

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ**
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός:1029

ΘΕΜΑ: Απ' ευθείας υλοποίηση από το στάδιο της εξομοίωσης κυκλώματος ελέγχου και παλμοδότησης μετατροπέα ισχύος για μέγιστη απορρόφηση ενέργειας φωτοβολταϊκών στοιχείων με χρήση ψηφιακού επεξεργαστή σήματος.

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΑΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

- 1) ΧΑΤΖΗΓΙΑΝΝΗΣ ΕΥΡΥΣΘΕΝΗΣ
- 2) ΚΑΛΑΝΤΖΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στόχος αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι να σχεδιαστεί ένα γενικό μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου που θα τροφοδοτεί το εξομοιωμένο μοντέλο του κυκλώματος ισχύος. Ποιο αναλυτικά δημιουργήσαμε μέσω του προγράμματος εξομοίωσης Simulink του Matlab φωτοβολταϊκή συστοιχία 2.2kW της οποίας την τάση και το ρεύμα τα εισάγουμε στο Σύστημα Εύρεσης Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ή Μ.Ρ.Ρ.Τ.). Μέσω αυτού προκύπτει ο βαθμός εργασίας α ο οποίος ευθύνεται για το ρυθμό που το διακοπτικό στοιχείο του μετατροπέα παραμένει σε αγωγή ή σε αποκοπή και τελικά τροφοδοτεί το φορτίο. Τα αποτελέσματα του εξομοιωμένου μοντέλου τα συγκρίναμε με μετρήσεις που πήραμε από την πραγματική συστοιχία του εργαστηρίου και βγάλαμε συμπεράσματα για την εγκυρότητα, αλλά και τις αδυναμίες του μοντέλου.

Από την συνολική διαδικασία της εργασίας καταφέραμε να αποκομίσουμε αρκετά ενδιαφέροντα στοιχεία. Μάθαμε πως για να ξεκινήσουμε να ασχολούμαστε με ένα τόσο σοβαρό θέμα που έχει ως αντικείμενο την έρευνα θα πρέπει να κατανοήσουμε πλήρως το θέμα που μας απασχολεί. Η πλήρης και σωστή κατανόηση του θέματος μας βοήθησε ώστε το αρκετά σύνθετο αρχικό πρόβλημα να το κατακερματίσουμε σε μικρότερα τμήματα λιγότερο σύνθετα τα οποία θα μας έδιναν τη δυνατότητα να φτάσουμε στην τελική λύση ποιο εύκολα. Την επίλυση των επιμέρους τμημάτων την πετύχαμε μέσω της έρευνας που κάναμε από πηγές του διαδικτύου και από βιβλία σχετικά με την λειτουργία και τη μηχανική των φωτοβολταϊκών. Στα διάφορα προβλήματα και στις απορίες που μας παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια υλοποίησης της εργασίας ανατρέχαμε στις πηγές μας και βεβαίως στην εμπειρία του επιβλέποντα καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Πατρών κύριο Παναγή Βοβό για να βρούμε παραλήψεις ή παρανοήσεις που μας οδηγούσαν σε σφάλματα. Τέλος, σημαντική ήταν η ενασχόληση με το πρόγραμμα εξομοίωσης Simulink του Matlab καθώς

ήταν το κύριο εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του μοντέλου στον υπολογιστή.

Περιεχόμενα

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΜΕΡΑ	σελ. 10
1.1	Ιστορική αναδρομή-Ενεργειακή κατάσταση σήμερα.....	σελ. 10
1.1.1	Ιστορική αναδρομή και η εξέλιξη της ενέργειας	σελ. 10
1.2	Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	σελ. 11
1.3	Παρούσα ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα.....	σελ. 12
1.4	Προοπτικές εξέλιξης των Α.Π.Ε.....	σελ. 13
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΟ ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΑΙ Η ΕΚΜΕΤΑΛΕΥΣΗ ΤΟΥ.	σελ. 15
2.1	Ο ήλιος.....	σελ. 15
2.2	Η ακτινοβολία του ηλίου	σελ. 15
2.3	Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας.....	σελ. 20
2.4	Ημερήσια ενεργειακή απολαβή από τον ήλιο	σελ. 23
2.5	Εκμετάλευση της ηλιακής ενέργειας	σελ. 25
2.6	Προσανατολισμός του συλλέκτη.....	σελ. 26
2.6.1	Στοιχεία προσδιορισμού του προσανατολισμού ενός συλλέκτη	σελ. 26
2.6.2	Τρόποι στήριξης των συλλεκτών και προσανατολισμός τους.....	σελ.29

2.7	Εισαγωγή στα φωτοβολταϊκά.....σελ.35
2.7.1	Γενικά..... σελ. 35
2.8	Τεχνικές εγκατάστασης.....σελ. 38
2.8.1	Εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε ένα κτίριο.....σελ. 38
2.8.2	Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τρόποι για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε ένα κτίριο.....σελ. 38
2.9	Στόχος εργασίας.....σελ. 42
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΘΕΩΡΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ..σελ. 43
3.1	Το πυρίτιο και οι εφαρμογές του στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία..... σελ. 43
3.1.1	Βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του πυριτίου.... σελ. 43
3.2	Το μοντέλο των ενεργειακών ζωνών σελ. 45
3.3	Η επαφή P-N..... σελ. 47
3.4	Ορθή και ανάστροφη πόλωση της διόδου σελ. 49
3.5	Η χρήση του πυριτίου στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές σελ. 50
3.6	Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σελ. 54
3.7	Τι είναι τα φωτοβολταϊκά; σελ. 57
3.8	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας..... σελ. 58

4	ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....σελ.	60
4.1	Εξίσωση ρεύματος του φωτοβολταϊκού (SHOCKLEY)σελ.	60
4.2	Ηλεκτρική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών	σελ. 61
4.3	Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου	σελ. 62
4.4	Εξομοίωση πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου	σελ. 64
4.5	Χαρακτηριστική απόδοσης ηλιακού στοιχείου.....σελ.	66
4.6	Προσδιορισμός εσωτερικής αντίστασης σειράς (R_s) .σελ.	67
4.6.1	Εσωτερική αντίσταση σειράς καθοριζόμενη από δύο I-V καμπύλες	σελ. 73
4.6.2	Καθορισμός εσωτερικής αντίστασης σειράς με μια μόνο I-V καμπύλη υπό φωτισμό (under illumination).	σελ. 75
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ.....σελ.	84
5.1	Απόδοση φωτοβολταϊκού στοιχείου	σελ. 84
5.2	Τι είναι το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (MPPT);.....σελ.	86
5.3	Αλγόριθμος	σελ. 89
5.3.1	Εισαγωγή.....σελ.	89
5.3.2	Αρχή λειτουργίας.....σελ.	90
5.3.3	Ανάλυση του αλγόριθμου Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (MPPT)	σελ. 93
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΣ	σελ. 95

6.1	Εισαγωγή.....	σελ. 95
6.2	Οι αλγόριθμοι (Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ή MPPT)	σελ. 96
6.2.1	Διαταραχή και παρατήρηση	σελ. 96
6.2.2	Εκτίμηση, διαταραχή και διαταραχή (Ε.Δ.Δ.) (Perturb and Perturb).....	σελ. 99
6.2.3	Παράδειγμα υλοποίησης Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (MPPT)	σελ. 101
6.3	Τα αποτελέσματα του πειράματος.....	σελ. 103
6.3.1	Μετατροπείας τάσης εξόδου, με επαγωγικό ρεύμα και παλμό στην πύλη.....	σελ. 107
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ.....	σελ. 108
7.1	Εξομοίωση φωτοβολταϊκού μέσω προγράμματος MATLAB.....	σελ. 108
7.2	Εξομοίωση φωτοβολταϊκής συστοιχίας	σελ. 110
8	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	σελ. 130
8.1	Σύγκριση μετρήσεων μεταξύ πραγματικής συστοιχίας φωτοβολταϊκών και μοντέλου.....	σελ. 130
8.2	Μετρήσεις θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.....	σελ. 130
8.3	Συμπεράσματα από τις μετρήσεις.....	σελ.142
9	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΙΣΧΥΟΣ.....	σελ. 144
9.1	Αλγόριθμοι ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος	σελ. 144
9.2	Κατηγορίες αλγορίθμων Σ.Μ.Ι.	σελ. 146

9.3	Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. διαταραχής και παρακολούθησης.	σελ. 149
9.4	Υλοποίηση αλγορίθμου Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.	σελ. 152
9.5	Εξομοίωση Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.	σελ. 154
9.6	Υπολογισμός του βαθμού εργασίας α	σελ. 155
9.7	Σχεδιασμός Σ.Ρ.-Σ.Ρ. μετατροπέα υποβιβασμού	σελ. 158
9.8	Σχεδίαση ενός DC σε DC μικτού μετατροπέα (BUCK -BOOST CONVERTER).....	σελ. 168
9.9	Διαμόρφωση Εύρους Παλμών PWM.....	σελ. 181
10	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΚΑΙ Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.	σελ. 186
10.1	Ανάλυση εξομοιωμένου κυκλώματος.....	σελ. 186
10.2	Εξομοίωση φωτοβολταϊκού, Σ.Ε.Σ.Μ.Ι., μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, φορτίου	σελ. 187
10.3	Συμπεράσματα-παρατηρήσεις από τις παραπάνω μετρήσεις.....	σελ. 215
11	ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	σελ. 218
12	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	σελ.221
12.1	Μελέτη εγκατάστασης στο κτίριο εργαστηρίου Παραγωγής Μεταφοράς και Χρησιμοποίησης της Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	σελ. 221
12.2	Κόστος φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	σελ. 226
13	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	σελ. 228

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΜΕΡΑ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΗΜΕΡΑ

1.1.1 Ιστορική αναδρομή και η εξέλιξη της ενέργειας

Η εξέλιξη της ανθρωπότητας είναι στενά συνδεδεμένη με τη χρήση ενέργειας. Δεν είναι τυχαίο ότι οι ονομασίες των ιστορικών περιόδων της ανθρωπότητας, λίθινη εποχή, εποχή του σιδήρου ή του χαλκού, προέκυψαν από τις διαφορετικές μορφές ενέργειας που οι άνθρωποι διαχειρίζονταν στις αντίστοιχες εποχές. Σ' όλη την ιστορική του πορεία, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε με εφευρετικότητα τις δυνατότητες που του παρείχε απλόχερα η φύση, τη δύναμη της φωτιάς, του νερού, του ανέμου και του ήλιου, με στόχο τη βελτίωση των συνθηκών της διαβίωσής του. Στους πιο πρόσφατους αιώνες, χρησιμοποίησε την ενέργεια από την καύση του κάρβουνου και του πετρελαίου και βρήκε τρόπο να τη μετατρέπει στην περισσότερο εξευγενισμένη των μορφών της, τον ηλεκτρισμό. Στα μέσα του 20ου αιώνα, ένας νέος τρόπος παραγωγής ενέργειας ήρθε να δημιουργήσει ελπίδες, για ριζική επίλυση του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος, η πυρηνική ενέργεια. Πολύ γρήγορα, όμως, δραματικά γεγονότα ήλθαν να επιβεβαιώσουν, χωρίς περιθώρια αμφισβήτησης, την αδυναμία μας να διασφαλίσουμε την ελεγχόμενη παραγωγή της πυρηνικής ενέργειας και την αποφυγή ατυχημάτων.

Επιπλέον, άρχισαν να επιβεβαιώνονται, με επιστημονικά τεκμηριωμένο τρόπο, οι προβλέψεις για σημαντικές επιβαρυντικές συνέπειες της μέχρι σήμερα συμπεριφοράς του ανθρώπου στο οικοσύστημα, εξαιτίας κυρίως της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών καυσίμων και πολλών, φαινομενικά αθώων, τεχνολογικών προϊόντων. Η

παραγωγή και χρήση της ενέργειας που προέρχεται από τα συμβατικά καύσιμα δημιούργησαν μια σειρά από περιβαλλοντικά προβλήματα με αιχμή τους, το γνωστό σε όλους μας, φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η υπερθέρμανση του πλανήτη αλλά και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο δεν αφήνουν κανένα περιθώριο εφησυχασμού. Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου έχουν ήδη ανεβάσει τη θερμοκρασία κατά 0.6 βαθμούς παγκοσμίως. Εάν δεν ληφθούν μέτρα, θα σημειωθεί αύξηση κατά 1.4 με 5.8 βαθμούς έως τα τέλη του αιώνα. Όλες οι περιοχές του κόσμου (συμπεριλαμβανομένης της Ευρωπαϊκής Ένωσης) θα αντιμετωπίσουν σοβαρές συνέπειες, τόσο για τις οικονομίες τους όσο και για τα οικοσυστήματά τους. Για το λόγο αυτό η διεθνής ερευνητική κοινότητα και η ενεργειακή βιομηχανία έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους αφενός σε σύγχρονες “καθαρές” τεχνολογίες παραγωγής με βελτιωμένη ενεργειακά και περιβαλλοντικά απόδοση, όπως πχ. οι “καθαρές” τεχνολογίες άνθρακα, και αφετέρου στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). [1,2,3,4]

1.2 ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) έχουν οριστεί οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες καθημερινά μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης. Οι Α.Π.Ε. πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνον από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων την τελευταία δεκαετία. Για πολλές χώρες, οι Α.Π.Ε. αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- ο ήλιος - ηλιακή ενέργεια, με δυνατότητα παροχής θερμότητας ή/και ηλεκτρισμού,
 - ο άνεμος - αιολική ενέργεια,
 - οι υδατοπτώσεις - υδραυλική ενέργεια, με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος κάτω των 10 MW,
 - η γεωθερμία - γεωθερμική ενέργεια: υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας,
 - η βιομάζα: θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη
- χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων,
- οι θάλασσες: ενέργεια κυμάτων, παλιρροϊκή ενέργεια και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος. [3]

1.3 ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η Ελλάδα, αναλογικά με τον πληθυσμό της, κατέχει μια από τις πρώτες θέσεις στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο δείκτης “Τελική Κατανάλωση Ενέργειας (Τ.Κ.Ε.)” στην Ελλάδα ήταν 20,2*106 Τ.Ι.Π. (τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) το έτος 2004 κατά 28% υψηλότερος του αντίστοιχου του έτους 1995 (ετήσια αύξηση 2.8%). Η κατανομή των διαφόρων μορφών ενέργειας στο δείκτη αυτόν ήταν:

- Ηλεκτρισμός 21% (αύξηση 15% από το επίπεδο του έτους 1995).
- Α.Π.Ε. 5.2% (αύξηση 15% από το επίπεδο του έτους 1995).
- Πετρέλαιο 68.7% (αύξηση 28% από το επίπεδο του έτους 1995).
- Φυσικό Αέριο 2.8%.

Η κατανομή του Τ.Κ.Ε. ανά Τομέα ήταν:

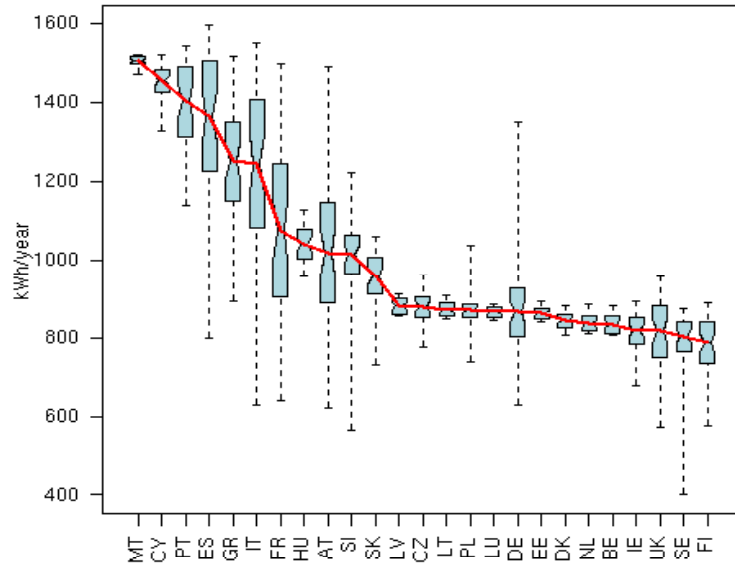
- Μεταφορές 39%
- Βιομηχανία 20%
- Οικιακός, Αγροτικός, Τριτογενής 41%.

Είναι αξιοσημείωτη η αύξηση του τελευταίου Τομέα, σε σχέση με τα επίπεδα του έτους 1995, που οφείλεται στον ολοένα αυξανόμενο ρόλο του τριτογενή τομέα στην Εθνική Οικονομία. [5]

1.4 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ Α.Π.Ε.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει αναλάβει έναν πρωτοποριακό ρόλο στην προσπάθεια άμβλυνσης της κλιματικής αλλαγής σε παγκόσμιο επίπεδο και έχει ασκήσει μεγάλη πίεση για την υιοθέτηση συγκεκριμένων και φιλόδοξων στόχων. Ήδη, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο έχει θέσει τη νέα Ευρωπαϊκή στρατηγική για τη βιώσιμη ανάπτυξη (το λεγόμενο “πακέτο 20-20-20” που σημαίνει παραγωγή του 20% της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, 20% μείωση των ρύπων και 20% εξοικονόμηση ενέργειας) έως το έτος 2020 για την Ευρώπη. [6]

Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται το ετήσιο ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα χαρακτηριστικό σύστημα φωτοβολταϊκών 1kWp στις οικιστικές περιοχές των 25 κρατών μελών της Ε.Ε. Οι τιμές που παρουσιάζονται αντιστοιχούν σε: μέγιστο, μέγιστο του 80% των περιπτώσεων, μέσος όρος, ελάχιστο του 80% των περιπτώσεων και ελάχιστο για τη βέλτιστη γωνία.



Εικόνα 1.1

Ετήσιο ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ένα χαρακτηριστικό σύστημα φωτοβολταϊκών 1 kWp στις οικιστικές περιοχές των 25 κρατών μελών της Ε.Ε. Τα σημεία που ενώνονται με την κόκκινη γραμμή αντιστοιχούν στο μέσο όρο και τα ψηλότερα σημεία αντιστοιχούν στο μέγιστο, τα αμέσως επόμενα στο 80% του μεγίστου, τα επόμενα στο ελάχιστο και τα χαμηλότερα στο 80% του ελαχίστου για τη βέλτιστη γωνία.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΤΟ ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΑΙ Η ΕΚΜΕΤΑΛΕΥΣΗ ΤΟΥ

2.1 Ο ΗΛΙΟΣ

Ο ήλιος είναι το πιο σημαντικό αστέρι του ηλιακού μας συστήματος, με μάζα $2 \cdot 10^{30} \text{kg}$, ακτίνα 700.000km , ηλικία $5 \cdot 10^9$ χρόνια και υπολογίζεται ότι έχει μπροστά του άλλα 5 περίπου δισεκατομμύρια χρόνια ζωής. Η επιφανειακή του θερμοκρασία 5.800°K , ενώ η εσωτερική, περίπου, $15.000.000^\circ \text{K}$. Η υψηλή θερμοκρασία του ήλιου οφείλεται στις αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του κατά τις οποίες μετατρέπεται το υδρογόνο σε ήλιο. Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου, που μετατρέπεται σε He, εκλύεται ενέργεια ίση με $U = 1.67 \cdot 10^5 \text{ kWh}$. Με μια καλή προσέγγιση, ο ήλιος ενεργεί ως μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας. Η προσπίπτουσα (κατά μέσο όρο) ροή ενέργειας πάνω σε μια μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά: $S = 1367 \text{ W/m}^2$. [7,8]

2.2 Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ

Η τροχιά της γης, κατά την κίνηση της γύρω από τον ήλιο, είναι έλλειψη, με τον ήλιο στη μια των εστιών της, με μήκος μεγάλου ημιάξονα, $a = 149.6 \cdot 10^6 \text{ km}$ και εκκεντρότητα, $e \approx 0.01673$. Η απόσταση γης- ήλιου μεταβάλλεται περιοδικά, κατά τη διάρκεια του έτους, μεταξύ της μέγιστης τιμής της (περί την 1η Ιουλίου), που ονομάζεται *αφήλιο* ($\sim 152.1 \cdot 10^6 \text{ km}$) και της ελάχιστης (περί την 1η Ιανουαρίου), που ονομάζεται *περιήλιο* ($147.1 \cdot 10^6 \text{ km}$). Το μήκος του μεγάλου ημιάξονα, a , προσεγγιστικά $150.000.000 \text{ km}$, λαμβάνεται ως μονάδα μήκους σε διαστημικές αποστάσεις, ονομάζεται Αστρονομική Μονάδα και συμβολίζεται ως 1 AU

(Astronomical Unit). Για να διανύσει την απόσταση αυτή το φως, με την ταχύτητα των 300.000 km/s, απαιτούνται περίπου 8.5 min.

Κατά τη διέλευση των ηλιακών ακτινών, από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση τους ελαττώνεται, καθώς τα φωτόνια σκεδάζονται αφενός στα μόρια της ατμόσφαιρας και στα πολύ μικρής διαμέτρου d , σωματίδια, αφετέρου, στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματα της, δηλαδή, τους υδρατμούς, τη σκόνη και τον καπνό. Ένα άλλο μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από ορισμένα συστατικά της ατμόσφαιρας. Παραδείγματος χάριν, η υπεριώδης ακτινοβολία απορροφάται από τα μόρια του όζοντος, στα ανώτερα στρώματα της κύριας μάζας της ατμόσφαιρας, έτσι ώστε η ένταση των ακτινών αυτών, στην επιφάνεια της γης, να είναι εξαιρετικά μειωμένη και η καρκινογόνος δράση της αρκετά περιορισμένη. Ομοίως οι υδρατμοί απορροφούν, το CO_2 , τα οξειδία του αζώτου κ.α., σε άλλες περιοχές του φάσματος. Τέλος, μέρος της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης.

Συνεπώς, σε κάθε τόπο της επιφάνειας της γης, φτάνουν δύο συνιστώσες του ηλιακού φωτός: η απευθείας, ή άμεση B (Beam) και η σκεδαζόμενη στα μόρια του αέρα, η οποία ονομάζεται διάχυτη D (Diffuse). Η διάχυτη ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια, προέρχεται από όλο τον ουράνιο θόλο (πάνω από το φυσικό ορίζοντα). Γενικά, λοιπόν, η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα συλλέκτη ή έναν αισθητήρα, αποτελείται από την απευθείας, τη διάχυτη και την “ανακλώμενη” από το έδαφος. Η συνολική αυτή ακτινοβολία αναφέρεται ως ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένο ή οριζόντιο συλλέκτη και συμβολίζεται με G (Global Irradiation).

Η ανακλώμενη εξαρτάται από τη μορφολογία και το χρώμα του εδάφους ή της επικάλυψης του (γρασίδι ή χιόνι) και την πυκνότητα των νεφών, ενώ η ολική, απευθείας και διάχυτη, εξαρτώνται, σε γενικές γραμμές από τους επόμενους παράγοντες:

- α) τη σύσταση- κατάσταση της ατμόσφαιρας, τη δεδομένη χρονική στιγμή (υγρασία και γενικά, τα αιωρήματα της ατμόσφαιρας)
- β) την ημέρα κατά τη διάρκεια του έτους
- γ) τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στη συλλεκτική επιφάνεια (ύψος του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας).

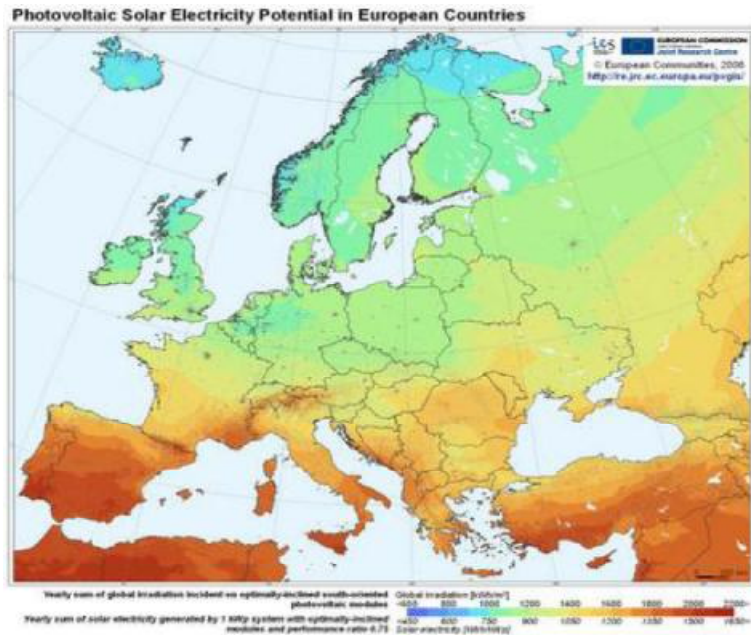
Στην περίπτωση που αναφερόμαστε στην ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας (χωρίς την επίδραση της ατμόσφαιρας στη διέλευση του φωτός), χρησιμοποιούνται τα σύμβολα G_{ext} και B_{ext}

(ext=extraterrestrial=πέραν της γης, εννοείται στα όρια της ατμόσφαιρας), για την ολική και απευθείας ακτινοβολία, αντίστοιχα.

Κατά την ανατολή του ήλιου, η ζενίθια γωνία του ήλιου ($z=90^\circ$ -EL, EL (Elevation) το ύψος του ήλιου) είναι $z=90^\circ$ (σχήμα 2.5) και άρα η ολική οριζόντια πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας G , καθορίζεται, κυρίως, από τη διάχυτη συνιστώσα, D . Καθώς το ύψος του ήλιου αυξάνει, μέσα σε μια αίθρια ημέρα, η απευθείας κάθετη ακτινοβολία, αυξάνει μέχρι το ηλιακό μεσημέρι, μετά το οποίο ελαττώνεται, περίπου κατά συμμετρικό τρόπο.

Με βάση τις ωριαίες τιμές των συνιστωσών G , B και D , προκύπτουν οι ημερήσιες μέσες τιμές, οι μηνιαίες μέσες τιμές, καθώς και οι ετήσιες μέσες τιμές των μεγεθών αυτών. Προκειμένου τα αποτελέσματα αυτά να αξιοποιηθούν σε ενεργειακούς υπολογισμούς, συλλέγονται επί σειρά πολλών ετών (πχ. 30 ετών), η επεξεργασία των οποίων δίδει το Τυπικό Μετεωρολογικό Έτος για τον αντίστοιχο τόπο.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία (kW/m^2) αθροίζεται στη διάρκεια ενός έτους, προκύπτει η ετήσια ηλιακή ενέργεια (συνήθως σε kWh/m^2). Η τιμή αυτή διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την τοποθεσία, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1.

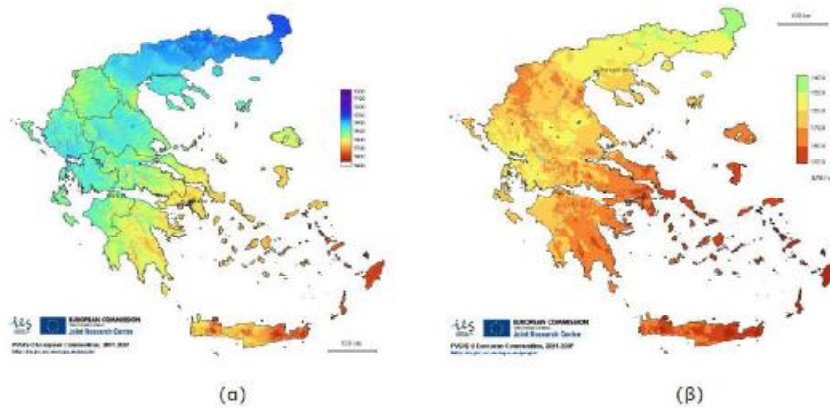


Εικόνα 2.1

Χάρτης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας των χωρών της Ευρώπης.

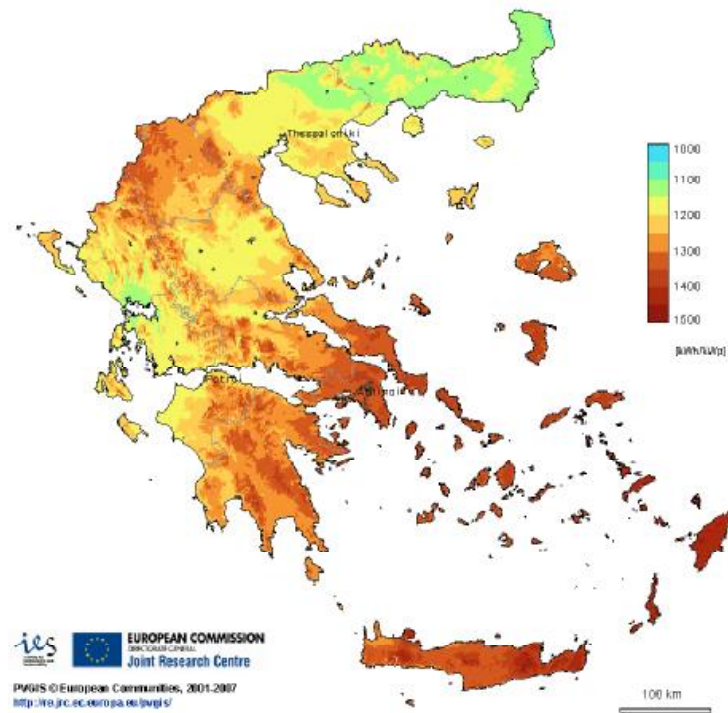
Η χώρα μας συγκαταλέγεται μεταξύ των χωρών υψηλής ακτινοβολίας. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα στην εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από το Κέντρο Ερευνών της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν γίνει μελέτες για τη χώρα μας και απεικονίζονται στους χάρτες της εικόνας 2.2 και 2.3. Οι χάρτες αντιπροσωπεύουν την ετήσια ποσότητα ενέργειας (kWh/m²) που προέρχεται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε οριζόντια θέση (σχήμα 2.2α) καθώς και υπό τη βέλτιστη γωνία κλίσης (εικόνα 2.2β) και αφορούν διάστημα 10 ετών και συγκεκριμένα την περίοδο 1981-1990. Εναλλακτικά δίνεται χάρτης με την ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εκφρασμένη σε kWh από φωτοβολταϊκό σύστημα, με συλλέκτες πυριτίου (c-Si) ισχύος

1kWh υπό βέλτιστη γωνία κλίσης (εικόνα 2.3). Σημειώνεται ότι στις τιμές αυτές δεν περιλαμβάνονται απώλειες λόγω υψηλών θερμοκρασιών, αντανάκλασης καθώς και εκείνων που οφείλονται σε καλωδιώσεις και μετατροπείς. [7,9]



Εικόνα 2.2

(α) ετήσια ποσότητα ενέργειας (kWh/m^2) που προέρχεται από την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκούς συλλέκτες σε οριζόντια θέση (β) και υπό άριστη γωνία κλίσης.

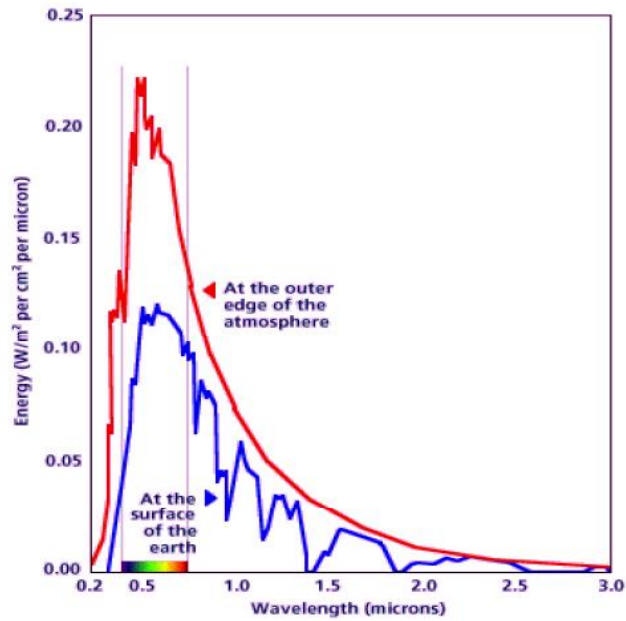


Εικόνα 2.3

Ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εκφρασμένη σε kWh από φωτοβολταϊκό σύστημα, με συλλέκτες πυριτίου (c-Si) ισχύος 1kWp υπό άριστη γωνία κλίσης.

2.3 ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

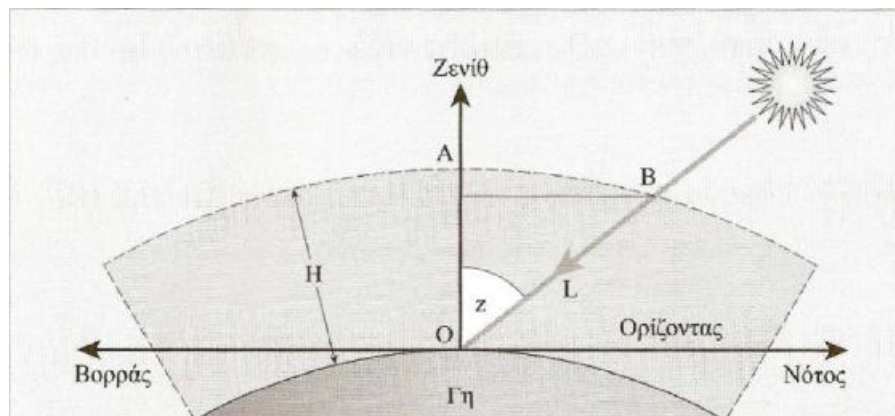
Ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει την επίδραση της καθαρής ατμόσφαιρας πάνω στο ηλιακό φως είναι η μάζα αέρος (Air Mass). Το φάσμα του ηλιακού φωτός στα όρια της ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται με τη συντετμημένη έκφραση AM0. Στην εικόνα 2.4 απεικονίζεται το φάσμα του ηλιακού φωτός που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της γης και έξω από την ατμόσφαιρα.



Εικόνα 2.4

Φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης και στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας.

Εκτός από το φάσμα AM0 υπάρχουν και τα AM1, AM1.5 AM2, τα οποία αφορούν στο ηλιακό φως, όπως αυτό καταμετρείται στην επιφάνεια της γης και αφού το φως διαγράψει τροχιά μήκους μια φορά, μια και ήμισυ (περίπου) και δυο φορές αντίστοιχα, το πάχος της ατμόσφαιρας. Θεωρώντας ότι το ηλιακό φως διαγράφει ευθύγραμμη τροχιά μέσα στην ατμόσφαιρα στις τρεις προηγούμενες περιπτώσεις, οι ακτίνες σχηματίζουν γωνίες 0° , 48° , 60° , αντίστοιχα, με την κατακόρυφη του τόπου (εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5

Το μήκος L που διανύουν οι ηλιακές ακτίνες μέσα στην ατμόσφαιρα πάχους H και η ζενίθια γωνία z .

Η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, κάθετα στην επιφάνεια συλλογής, που αντιστοιχεί σε AM1 (Air Mass 1), έχει τυπική τιμή περίπου 950 W/m^2 . Η AM1 μπορεί να μετρηθεί σε τόπους με γεωγραφικό πλάτος μεταξύ των τιμών -23.5° και 23.5° , διότι μόνο σ' αυτούς, οι ηλιακές ακτίνες μπορούν να διαπεράσουν κάθετα την ατμόσφαιρα, δύο φορές μέσα στο έτος. Καθώς το ύψος (EL, Elevation) του ήλιου, δηλαδή, η γωνία των ακτινών του, σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο του τόπου, αλλάζει, οι ακτίνες του διανύουν διαφορετικό μήκος μέσα στην ατμόσφαιρα.

Ο λόγος $m=L/H$ του μήκους της διαδρομής των ηλιακών ακτινών μέσα στην ατμόσφαιρα σε σχέση με το πάχος της ατμόσφαιρας, προσδιορίζει τον αριθμό, που τίθεται μετά τα ακρωνύμια AM (εξίσωση 2.1). Με καλή, σχετικά, προσέγγιση για μικρές ζενίθιες γωνίες ($z < 60^\circ$), μπορούμε να υπολογίσουμε το λόγο m από την εξίσωση:

$$m = \frac{L}{H} \approx \frac{1}{\cos(z)}$$

Εξίσωση 2.1

Καθορίζει ουσιαστικά την ελάττωση της έντασης του φωτός, που προκαλείται από το μεγαλύτερο δρόμο που διανύουν σ' αυτήν την

περίπτωση, οι ακτίνες του ήλιου μέσα στην ατμόσφαιρα. Όπως είναι φανερό, ο λόγος m , εξαρτάται από τη ζενίθια γωνία z , μεταξύ των ηλιακών ακτινών και της διεύθυνσης του ζενίθ του τόπου. [7,8]

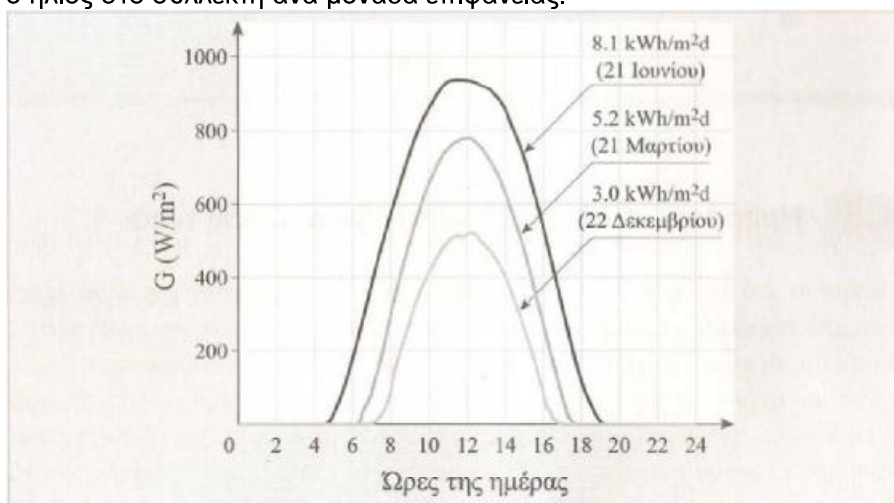
2.4 ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΛΑΒΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ

Η ενέργεια ανά m^2 , που φτάνει στην επιφάνεια της Γης μέσα σε μια μέρα, εξαρτάται από την κλίση της συλλεκτικής επίπεδης επιφάνειας, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, τη μέρα του χρόνου και από τις συγκεντρώσεις των διαφόρων αερίων, υγρών και στερεών συστατικών και αιωρημάτων της ατμόσφαιρας, κατά την ημέρα εκείνη. Οι συλλεκτικές επιφάνειες των μετρητικών οργάνων (αισθητήρων), μπορεί να προσανατολιστούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πειράματος και τις προδιαγραφές των οργάνων αυτών.

Προκειμένου, όμως, να υπάρχουν συγκρίσιμα στοιχεία, σε διεθνή κλίμακα, αναφερόμαστε σε μετρήσεις με αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετούνται με τη συλλεκτική επιφάνεια, οριζόντια. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μέσες ημερήσιες τιμές της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2), σε οριζόντια επιφάνεια, μέσα σε κάθε μήνα και μέσα στο έτος. Για να αξιοποιηθούν αυτά τα μετεωρολογικά στοιχεία σε πρακτικές εφαρμογές (πχ. σε ενεργειακές μελέτες), απαιτούνται μετρήσεις που να καλύπτουν περίοδο πολλών ετών (πχ. 10 έως 30 ετών). Σε περιπτώσεις που λείπουν στοιχεία μακράς περιόδου για κάποιο τόπο, μπορούν να αξιοποιηθούν στοιχεία που έχουν συλλεχθεί σε μικρότερες χρονικές περιόδους, με την επιφύλαξη της μικρότερης αξιοπιστίας τους.

Η ημερήσια μεταβολή της πυκνότητας ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (G (W/m^2)), απεικονίζονται στην εικόνα 2.6 Στο ίδιο σχήμα σημειώνονται και οι αντίστοιχες ενεργειακές πυκνότητες H (kWh/m^2*d), οι οποίες προκύπτουν ως ολοκλήρωμα ή “εμβαδόν” κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη. Σημειώνεται πάντως, ότι, κατά τη διάρκεια μερικής παρουσίας σύννεφων, γύρω απ’ την κατεύθυνση του ήλιου, μπορεί να παρατηρηθούν τιμές της πυκνότητας ισχύος μεγαλύτερες των τιμών που θα καταγράφονταν χωρίς την παρουσία τους. Το παράδοξο αυτό φαινόμενο οφείλεται στο ότι, με την παρουσία συστάδων από σύννεφα, που δεν καλύπτουν τον ήλιο,

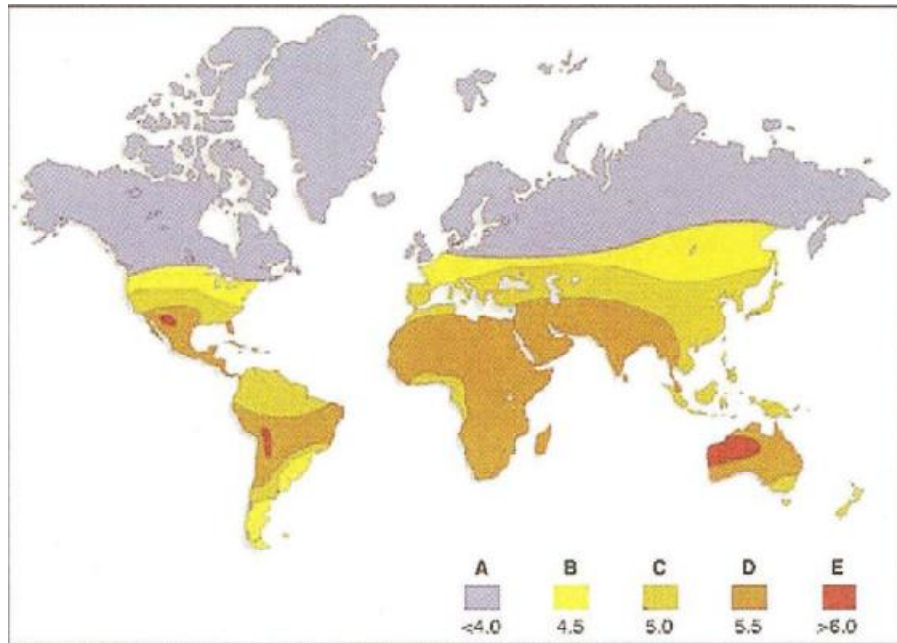
πέφτουν στον αισθητήρα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας, εκτός απ' τις απευθείας και διάχυτες ηλιακές ακτίνες, που αφορούν σε μια ηλιοφανή μέρα και οι σχετικά ισχυρά σκεδαζόμενες στα σύννεφα. Να σημειώσουμε ότι τα ολοκληρώματα κάτω από τις καμπύλες του σχήματος, ισούνται με την αντίστοιχη ημερήσια ενέργεια που προσφέρει ο ήλιος στο συλλέκτη ανά μονάδα επιφάνειας.



Εικόνα 2.6

Καταγραφή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, με πυρανόμετρο σε οριζόντια επιφάνεια, στο εργαστήριο "Φωτοβολταϊκό Πάρκο" στο Ηράκλειο της Κρήτης ($\varphi=35.5^\circ$), σε τρεις χαρακτηριστικές μέρες κατά τη διάρκεια του έτους.

Σε περιοχές κοντά στον Ισημερινό, η μέση ετήσια τιμή της είναι μεγαλύτερη (μέχρι και $7 \text{ kWh/m}^2\text{*d}$) και αντίστοιχα, σε περιοχές στα όρια των Εύκρατων ζωνών, είναι μικρότερη ($<3 \text{ kWh/m}^2\text{*d}$).



Εικόνα 2.7

Παγκόσμιος χάρτης κατανομής των τιμών της μέσης ετησίως ημερήσιας πυκνότητας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας, σε οριζόντιο επίπεδο, σε kWh/m²*d.

Ο χάρτης της εικόνας 2.7 δείχνει την κατανομή της μέσης, ετήσιας, ημερήσιας ενεργειακής απολαβής από τον ήλιο ανά τον κόσμο. Άξιο παρατήρησης είναι η ελαττωμένη τιμή σε περιοχές της Τροπικής Ζώνης (γύρω από τον Ισημερινό). Η υψηλή υγρασία των περιοχών αυτών, με την έντονη βλάστηση, έχει ως αποτέλεσμα την ισχυρή ελάττωση της άμεσης ακτινοβολίας. [7]

2.5 ΕΚΜΕΤΑΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας γίνεται κατά διάφορους τρόπους, που διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα παθητικά συστήματα (βιοκλιματικός, σχεδιασμό

κτιρίων) που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε εσωτερική ενέργεια δομικών κατασκευών και στη δεύτερη, τα ενεργά ηλιακά συστήματα, που προκαλούν μετατροπή της, σε άλλης μορφής ενέργεια ή χρησιμοποιείται θερμικό ρευστό σε κίνηση. Στα ενεργά ηλιακά συστήματα συγκαταλέγονται αυτά που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε εσωτερική ενέργεια θερμικού ρευστού (Θερμοσιφωνικά συστήματα) και αυτά που μετατρέπουν το ηλιακό φως απ' ευθείας σε ηλεκτρισμό (Φωτοβολταϊκά συστήματα). [7,10]

2.6 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ

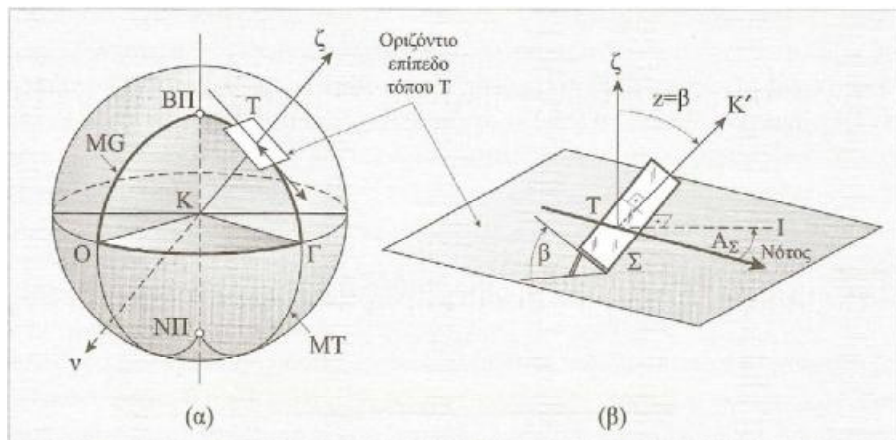
Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια είναι ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούμε, κατ' αρχήν, σε μια απλή μέθοδο προσδιορισμού του προσανατολισμού του συλλέκτη και στη συνέχεια θα εξετάσουμε με συντομία τους διάφορους τρόπους τοποθέτησης των συλλεκτών, με βασική απαίτηση τη μεγιστοποίηση της ημερησίως συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας. [7,11]

2.6.1 Στοιχεία προσδιορισμού του προσανατολισμού του συλλέκτη

Κάθε τόπος πάνω στην επιφάνεια της γης, προσδιορίζεται από τις σφαιρικές συντεταγμένες του:

α) Το γεωγραφικό μήκος, (L), που καθορίζεται από το τόξο ΟΓ, πάνω στον Ισημερινό ή σε άλλο παράλληλο, με αναφορά το μεσημβρινό του Greenwich (MG), από 0° - 180° Ανατολικά και από 0° - 180° Δυτικά.

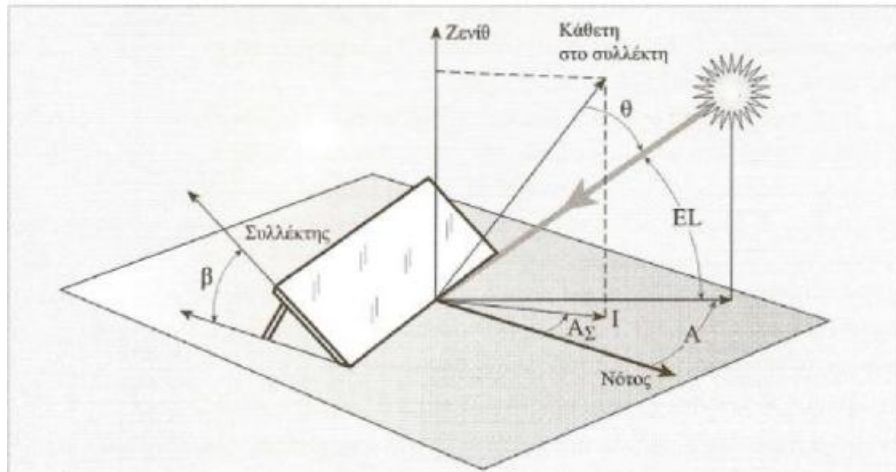
β) Το γεωγραφικό πλάτος, (φ), που καθορίζεται από το τόξο ΓΤ, πάνω στο μεσημβρινό του τόπου ΜΤ, με αναφορά τον Ισημερινό, από 0 - 90° Βόρεια και 0° - 90° Νότια. Ας θεωρήσουμε έναν επίπεδο συλλέκτη, Σ , τοποθετημένο έτσι ώστε το επίπεδό του να σχηματίζει γωνία β , ως προς τον ορίζοντα. Η γωνία κλίσης του συλλέκτη, β , ισούται με τη ζενίθια γωνία, z , της καθέτου στο επίπεδο του συλλέκτη (TK'), η οποία μπορεί να πάρει τιμές από 0° (Ζενίθ) έως 180° (Ναδίρ).



Εικόνα 2.8

(α) Παράδειγμα τόπου T , πάνω στην επιφάνεια της γης, ο οποίος προσδιορίζεται από το γεωγραφικό μήκος του, ίσο με το τόξο $ΟΓ$, και από το πλάτος του, που καθορίζεται από το τόξο $ΓΤ$, πάνω στο μεσημβρινό του τόπου $ΜΤ$. (β) $ΑΣ$ και (β), αζιμούθιο και γωνία κλίσης του συλλέκτη $Σ$.

Η γωνία $ΑΣ$, μεταξύ της κατακόρυφης προβολής $ΤΙ$, της καθέτου στο συλλέκτη, $ΤΚ'$ πάνω στο οριζόντιο επίπεδο, με τη διεύθυνση του νότου, ονομάζεται αζιμούθιο ή αζιμουθιακή γωνία του συλλέκτη και παίρνει τιμές από $+180^\circ$ μέχρι -180° . Χαρακτηριστικές θέσεις $+180^\circ$ (Βορράς), $+90^\circ$ (Ανατολή), 0° (Νότος), -90° (Δύση) και -180° (Βορράς). Όταν ο συλλέκτης στραφεί ώστε οι ακτίνες του ήλιου (απευθείας ακτινοβολία), να προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του, τότε το ύψος του ήλιου EL και η γωνία κλίσης β , του συλλέκτη δίνουν άθροισμα 90° ($EL + \beta = 90^\circ$).



Εικόνα 2.9

Η γωνία θ , μεταξύ των ακτίνων του ήλιου και της κάθετης στο συλλέκτη, μια δεδομένη χρονική στιγμή, καθορίζεται από τον προσανατολισμό του συλλέκτη (Αζιμούθιο $A\sigma$ και γωνία κλίσης β) και τις σφαιρικές συντεταγμένες της θέσης του ήλιου ως προς το σύστημα του παρατηρητή, στον τόπο T , δηλαδή αζιμούθιο A και το ύψος του (Elevation) EL .

Η στροφή του συλλέκτη, ώστε αυτός να παρακολουθεί ανά πάσα στιγμή τον ήλιο, γίνεται με μηχανισμούς, οι οποίοι οδηγούνται από κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις, με βάση τις εξισώσεις κίνησης του ήλιου στην ουράνια σφαίρα. Η γωνία θ , που σχηματίζουν, μια δεδομένη χρονική στιγμή, οι ηλιακές ακτίνες (απευθείας ακτινοβολία), με την κάθετη σ' έναν επίπεδο συλλέκτη (εικόνα 2.9), γωνίας κλίσης β και αζιμουθιακής γωνίας $A\sigma$, δίδεται από την εξίσωση:

$$\cos(\theta) = \cos(EL) \sin(\beta) \cos(A - A\sigma) + \sin(EL) \cos(\beta)$$

Εξίσωση 2.2

όπου A , η αζιμούθια γωνία και EL το ύψος του ήλιου την ίδια χρονική στιγμή. [7]

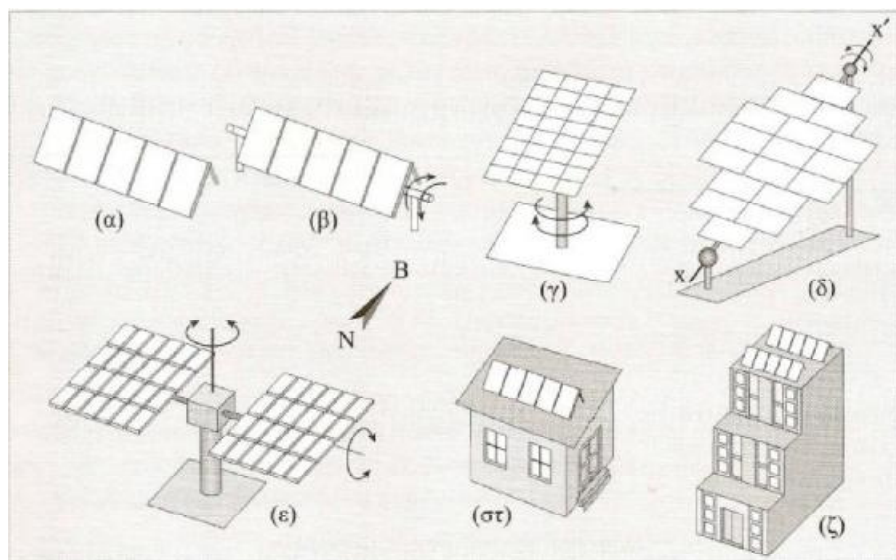
2.6.2 Τρόποι στήριξης των συλλεκτών και προσανατολισμός τους

Διακρίνουμε τρεις διαφορετικούς τρόπους στήριξης συλλεκτών. Σταθερής στήριξης, εποχιακά ρυθμιζόμενης στήριξης και συνεχούς παρακολούθησης της θέσης του ήλιου, με διάταξη που ονομάζεται ηλιοτρόπιο (Solar Tracker). Η εικόνα 2.10 δείχνει μερικούς χαρακτηριστικούς τρόπους στήριξης φωτοβολταϊκών συστοιχιών. [7]

α) Στήριξη του συλλέκτη με σταθερή γωνία κλίσης. Γωνία κλίσης για βέλτιστη ενεργειακή απολαβή

Η απουσία κινητών μερών κατά την στήριξη της συστοιχίας με σταθερή κλίση, προσδίδει στη διάταξη επαρκή μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα μάλιστα αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι. Στατικές συλλεκτικές επιφάνειες χρησιμοποιούνται επίσης ενσωματωμένες σε κτίρια (εικόνα 2.10, περιπτώσεις (α), (στ), (ζ)).

Η πιο αποδοτική περίπτωση είναι εκείνη κατά την οποία ο χώρος εγκατάστασης της συστοιχίας των συλλεκτών, δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, όλο το έτος. Κατά κανόνα επιλέγουμε νότιο αζιμουθιακό προσανατολισμό για τη συστοιχία και γωνία κλίσης κοντά στο γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης (εικόνα 2.11). Όταν η γωνία κλίσης ισούται ακριβώς με το γεωγραφικό πλάτος φ του τόπου, οι ακτίνες του ήλιου πέφτουν κάθετα στο συλλέκτη δύο φορές το χρόνο (το μεσημέρι των ισημεριών).

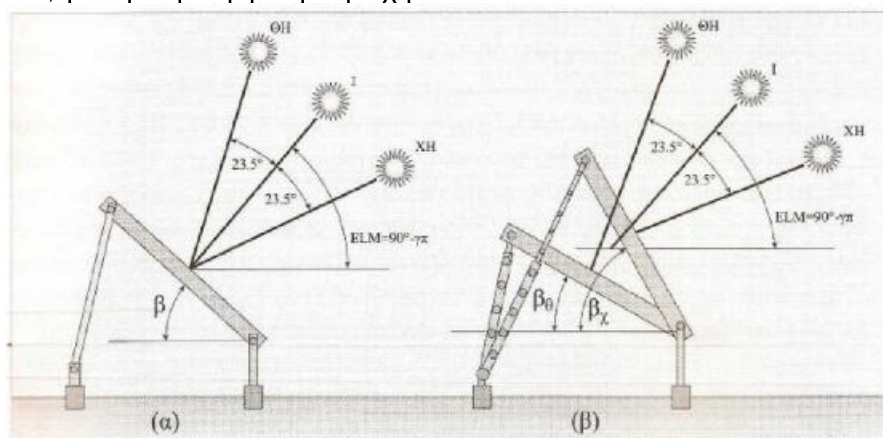


Εικόνα 2.10

(α) Τοποθέτηση φωτοβολταϊκής συστοιχίας με σταθερή γωνία κλίσης (β) Συστοιχία με δυνατότητα στροφής γύρω από οριζόντιο άξονα (αλλαγή ζενιθίας γωνίας της συστοιχίας) (γ) Συστοιχία σε ηλιοτρόπιο αζιμουθιακής στροφής, με σταθερή γωνία κλίσης (δ) Συστοιχία με δυνατότητα στροφής ως προς τον άξονα ($χχ'$), ο οποίος διατηρείται κεκλιμένος συνήθως υπό γωνία ίση (ή μερικές φορές, λίγο μικρότερη) του γεωγραφικού πλάτους του τόπου, δηλαδή ως προς άξονα παράλληλο προς τον πολικό άξονα της γης. (ε) Τυπική διάταξη ηλιοτροπίου (Tracker) δύο αξόνων. (στ) φωτοβολταϊκή συστοιχία στη στέγη κατοικίας (ζ) Φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετημένα σε διάφορες θέσεις σε μεγάλη οικοδομή (τοποθέτηση υπό κλίση στη στέγη και σε προβόλους και κατακόρυφα (facade) σε όψεις νότιου προσανατολισμού).

Σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της βέλτιστης γωνίας συλλέκτη με σταθερή κλίση, παίζουν οι επικρατούσες, στην περιοχή, μετεωρολογικές συνθήκες, οι οποίες καθορίζουν τη σχέση μεταξύ των συνιστωσών της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, απευθείας και διάχυτης, καθώς και το albedo του εδάφους (Η διάχυτη ανακλαστικότητα, δηλαδή το ποσοστό της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνεια της γης και ότι την καλύπτει, αναφέρεται, στη βιβλιογραφία, ως albedo). Για να προκύψει η βέλτιστη γωνία του συλλέκτη, επιβάλλεται να καταγραφούν

στοιχεία σχετικά με τους παράγοντες αυτούς και ιδιαίτερα μετρήσεις της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, σε διάφορες γωνίες κλίσης συλλέκτη. Συνήθως επειδή τέτοιες μετρήσεις δεν είναι διαθέσιμες, αρκούμαστε σε μετρήσεις σε οριζόντια τοποθετημένο αισθητήρα (πυρανόμετρο), για μια σειρά ετών, γι' αυτή την περιοχή. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις που έχουν συλλεχθεί στην πλησιέστερη προς αυτή περιοχή, λαμβάνοντας υπόψη πιθανή διαφοροποίηση του albedo του τόπου. Με βάση τις μετρήσεις αυτές προσδιορίζεται η ολική ακτινοβολία του συλλέκτη, απ' όπου προκύπτει, προσεγγιστικά, η βέλτιστη γωνία κλίσης του, για τη συγκεκριμένη περιοχή.



Εικόνα 2.11

(α) Σταθερή στήριξη σε ετήσια βάση, με γωνία κλίσης $\beta = \varphi$ (10° έως 15°) (β) Εποχική ρύθμιση της κλίσης του συλλέκτη δύο φορές μέσα στο έτος. ΘΗ: Θερινό Ηλιοστάσιο. ΧΗ: Χειμερινό Ηλιοστάσιο. Ι: Ισημερίες.

Στον πίνακα 2.1 δίνονται ενδεικτικές τιμές γωνιών κλίσης συλλεκτών σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη.

Αν δε διατίθενται μετεωρολογικά δεδομένα για τον τόπο εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος, ο οποίος δεν πρέπει να σκιάζεται από εμπόδια, κατά τη διάρκεια της ημέρας το καλύτερο που έχουμε να κάνουμε είναι να επιλέξουμε γωνία κλίσης συλλέκτη ίση με $\beta = \varphi$ (5° έως 10°). Κατά πάσα πιθανότητα, προσεγγίζει τη θέση της

Πίνακας 2.1:

Ενδεικτικές τιμές γωνιών κλίσης σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη

Περιοχή τιμών γεωγραφικού πλάτους (φ) του τόπου	Ενδεικτικές τιμές γωνίας κλίσης συλλέκτη με νότιο προσανατολισμό για το βόρειο ημισφαίριο και αντιστοίχως βόρειο προσανατολισμό για το νότιο ημισφαίριο
Μικρά γεωγραφικά πλάτη, γύρω απ' τον Ισημερινό, $\varphi \leq 20^\circ$	Ουσιαστικά 0° . Στην πράξη συνίσταται μια μικρή γωνία κλίσης, 5° - 10° , ώστε η ροή του νερού πλύσης ή της βροχής, να απομακρύνει τα σώματα που επικάθονται στην όψη του ΦΒ πλαισίου (σκόνη, φύλλα, περιπτώματα πουλιών κ.ά.)
Μέσα και μεγάλα γεωγραφικά πλάτη, $\varphi > 20^\circ$	1) Σταθερή τοποθέτηση, απαίτηση για μέγιστη αποδοτικότητα ετησίως $\rightarrow \varphi$ -(5° έως 10°) 2) Σταθερή τοποθέτηση. Κύρια απαίτηση κατά τη χειμερινή περίοδο $\rightarrow \varphi + 10^\circ$ 3) Ρυθμιζόμενη κλίση δυο θέσεων ετησίως. Θερινή $\rightarrow \varphi - 15^\circ$ Χειμερινή $\rightarrow \varphi + 15^\circ$

καλύτερης δυνατής εκμετάλλευσης της ημερήσιας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, ετησίως.

Τέλος, αν ο συλλέκτης πρέπει να εγκατασταθεί σε περιοχές με φυσικά εμπόδια, που τον σκιάζουν ορισμένη περίοδο της ημέρας, πχ. κτίρια ή δένδρα, τότε ο συλλέκτης προσανατολίζεται έτσι ώστε να

προκύπτει η βέλτιστη απόδοση. Κατά τη σύνταξη της σχετικής μελέτης, λαμβάνεται υπόψη, αφενός το τμήμα του ουρανού που αποκόπτεται από τα εμπόδια, αφετέρου, το μικροκλίμα της περιοχής. [7]

β) Στήριξη με δυνατότητα εποχικής ρύθμισης της κλίσης του συλλέκτη

Στην εικόνα 2.11 παριστάνεται μια διάταξη συλλεκτών, με νότιο προσανατολισμό ($A\Sigma=0$), η οποία εκ κατασκευής έχει τη δυνατότητα εποχικής ρύθμισης της κλίσης. Προσδιορίζονται οι κατάλληλες κλίσεις και ο χρόνος των αλλαγών. Οι τυπικές θέσεις του συλλέκτη είναι δύο : μια για το θερινό εξάμηνο (21 Μαρτίου-21 Σεπτεμβρίου), με κλίση ίση με $\beta\theta=\{\varphi-(10^\circ \text{ έως } 15^\circ)\}$, τιμή δηλαδή μικρότερη του γεωγραφικού πλάτους του τόπου κατά 10° έως 15° , και μια για το χειμερινό (22 Σεπτεμβρίου – 21 Μαρτίου), με κλίση ίση με $\beta\chi=\{\varphi-(10^\circ \text{ έως } 15^\circ)\}$. Όπως και στην περίπτωση συλλέκτη σταθερής κλίσης όλο το έτος, έτσι και στην περίπτωση επιλογής χειμερινής και θερινής θέσης, η επιλογή της βέλτιστης γωνίας για το συλλέκτη σε κάθε περίοδο, απαιτεί γνώση των τοπικών μετεωρολογικών συνθηκών (θερμοκρασίας- υγρασίας- ηλιοφάνειας) και της μορφολογίας και κάλυψης του εδάφους, που καθορίζει τη διάχυτη ανακλαστικότητα του (albedo). [7]

γ). Στήριξη με δυνατότητα στροφής του συλλέκτη γύρω από έναν ή δύο άξονες

I. Στροφή γύρω από έναν άξονα

Η συστοιχία περιστρέφεται με κατάλληλο μηχανισμό, γύρω από έναν άξονα, και στο τέλος της ημέρας, ο συλλέκτης επιστρέφει σε θέση αναμονής, συνήθως στο νοτιά. Το πρωί με την ανατολή του ήλιου, στρέφεται, έτσι ώστε να δέχεται από τον ήλιο το μέγιστο της διαθέσιμης ενέργειας του. Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

α) Αξιμουθιακό ηλιοτρόπιο : Η περιστροφή γίνεται ως προς κατακόρυφο άξονα (εικόνα 2.10γ), έτσι ώστε ο ήλιος να βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο που περιέχει την κάθετη στο συλλέκτη, του οποίου η γωνία κλίσης παραμένει σταθερή κατά την ημερήσια κίνησή του.

β) Ηλιοτρόπιο πολικού άξονα: Η συστοιχία έχει τη δυνατότητα στροφής γύρω από άξονα $\chi\chi'$, με κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου

(εικόνα 2.10ε). Έτσι, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο ήλιος βρίσκεται συνεχώς στο επίπεδο που είναι κάθετο στο συλλέκτη και περιέχει τον άξονα $\chi\chi'$. Κατά τη διάρκεια του έτους, η γωνία μεταξύ των ακτινών του ήλιου και της κάθετης στο συλλέκτη, κυμαίνεται στο διάστημα -23.5° έως $+23.5^\circ$.

II. Στροφή γύρω από δύο άξονες

Η παρακολούθηση του ήλιου με περιστροφή γύρω από δύο άξονες, επιτυγχάνεται μέσω δύο, συνήθως διαδοχικών, κινήσεων του συλλέκτη με ηλεκτρικούς κινητήρες, είτε βηματικούς είτε κινητήρες συνεχούς περιστροφής, με μειωτήρες και έλεγχο στροφών, για τον προσανατολισμό του επιπέδου, κάθετα στην απευθείας ηλιακή ακτινοβολία (εικόνα 2.10ε). Ο προσδιορισμός των κατάλληλων γωνιών στροφής γίνεται με ειδικές διατάξεις (Encoders). Όμοιο μηχανικό σύστημα, σε πολύ μικρότερες διαστάσεις, χρησιμοποιείται για τη στροφή του πυρηλιομέτρου, οπτικού οργάνου παρακολούθησης του ήλιου και καταγραφής της πυκνότητας ισχύος της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας.

Η διάταξη που περιγράψαμε, ονομάζεται ηλιοτρόπιο (Tracker) δυο αξόνων και χαρακτηρίζεται από το ότι ο συλλέκτης προσανατολίζεται συνεχώς προς τον ήλιο, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να προσπίπτουν κάθετα (ή σχεδόν κάθετα) στην επιφάνεια του. Η διάταξη, με τη δύση του ήλιου, επιστρέφει σε θέση αναφοράς, που χαρακτηρίζεται από νότιο προσανατολισμό και μικρή γωνία κλίσης, προκειμένου να προφυλαχθεί από πιθανό ισχυρό άνεμο, μέχρι την ανατολή. Λίγο πριν την ανατολή του ήλιου, ο μηχανισμός στρέφει το συλλέκτη, έτσι ώστε οι ηλιακές ακτίνες τότε, να προσπίπτουν κάθετα σ' αυτόν. Από τη χρονική στιγμή αυτή, αρχίζει η παρακολούθηση του ήλιου. Όσο μικρότερη η περίοδος ενεργοποίησης του μηχανισμού στροφής, τόσο καλύτερα προσεγγίζεται η κατάσταση συνεχούς κάθετης πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών, χωρίς αυτό να είναι εξαιρετικά κρίσιμο. Μια γωνία 10° , μεταξύ των ακτινών του ήλιου και της κάθετου στο επίπεδο του συλλέκτη, προκαλεί μείωση περίπου 1.5%, στην πυκνότητα ισχύος της απευθείας συνιστώσας στο επίπεδο του συλλέκτη, ακτινοβολίας. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια κίνησης της διάταξης προέρχεται από την παραγόμενη από τη συστοιχία, φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια.

Μειονέκτημα μιας τέτοιας διάταξης παρακολούθησης του ήλιου, δύο αξόνων, είναι η οικονομική επιβάρυνση για την κατασκευή των

μηχανολογικών και ηλεκτρικών τμημάτων της καθώς και η έκθεση της συστοιχίας στον κίνδυνο καταστροφής, εξαιτίας ισχυρού ανέμου. Για το λόγο αυτό, σε συστήματα με μηχανική κίνηση για τον προσανατολισμό των συλλεκτών προς τον ήλιο, ελέγχεται η ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε, στην περίπτωση ισχυρών ανέμων, οι συλλεκτικές επιφάνειες να διατάσσονται οριζόντια. Σ' αυτή τη θέση παρουσιάζουν μικρή μετωπική επιφάνεια προς τον άνεμο.

Οι διατάξεις πλήρους παρακολούθησης του ήλιου, με επίπεδα φωτοβολταϊκά πλαίσια, έχουν εν γένει περιορισμένη χρήση και χρησιμοποιούνται κυρίως σε συγκεντρωτικά συστήματα, τα οποία λειτουργούν, ουσιαστικά, με την απ' ευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας. Σε πολλές περιπτώσεις επιλέγεται η μερική παρακολούθηση, με αζιμουθιακούς συλλέκτες σταθερής γωνίας κλίσης, επειδή είναι απλούστερη, φθηνότερη και πιο αξιόπιστη κατασκευή, σε σχέση με το ηλιοτρόπιο δύο αξόνων ή αυτό του πολικού άξονα. Η στατική κατασκευή, παρότι σχετίζεται με χαμηλότερη ετήσια ενεργειακή απολαβή ηλιακής ακτινοβολίας από τους συλλέκτες που τοποθετούνται σ' αυτή, αποτελεί απλούστερη και πιο αξιόπιστη κατασκευή. Το κόστος των ειδικών μηχανολογικών κατασκευών και ηλεκτρονικών οδήγησης του ηλιοτροπικού συστήματος παραμένει σημαντικό σε σύγκριση με το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, σε κάθε περίπτωση προέχει η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία του συστήματος συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας, το στατικό σύστημα αποτελεί, στις περισσότερες των περιπτώσεων, την πιο ενδεδειγμένη λύση, ιδιαίτερα στην περίπτωση εφαρμογών μικρής ισχύος, με χρήση επίπεδων φωτοβολταϊκών πλαισίων. [7]

2.7 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ

2.7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη μείωση των αποθεμάτων συμβατικών καυσίμων και οι δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον από την εκτεταμένη χρήση τους, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στην εκμετάλλευση άλλων, συμβατικών πηγών ενέργειας. Η αυξανόμενη αυτή ενεργειακή κρίση που συντελείται παγκοσμίως αλλά και οι δυνατότητες που παρέχονται με την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστά αναγκαία την

περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη του κλάδου των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε). Μία από τις συμβατικές αυτές πηγές είναι και η ηλιακή ενέργεια, η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο ανακάλυψε ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel το 1839, κατά τη διάρκεια πειραμάτων του με μία ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Η ανακάλυψη στην οποία προέβη, είχε να κάνει με το γεγονός ότι ορισμένα υλικά παρουσίαζαν την ικανότητα παραγωγής μικρών ποσοτήτων ηλεκτρικού ρεύματος, όταν βρίσκονταν εκτεθειμένα σε ηλιακή ακτινοβολία.

Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο Adams και ο φοιτητής του Day, παρατήρησαν ότι μία ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός Czochralski, πρόσθεσε τη μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si), η οποία χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα.

Μία σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949, όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν τη θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ, η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει.

Τις δεκαετίες του '40 και του '50, πραγματοποιήθηκαν τα πρώτα βήματα προς την κατεύθυνση της εμπορικής αξιοποίησης των φωτοβολταϊκών με την ανάπτυξη της μεθόδου Czochralski για την παραγωγή κρυσταλλικού πυριτίου υψηλής καθαρότητας. Το πρώτο ηλιακό κύτταρο ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Charin, Fuller και Pearson. Κατασκεύασαν ηλιακό στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου με ικανότητα μετατροπής 6%.

Τα ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία, δεν άργησαν να βρουν εφαρμογή. Το 1958, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων χρησιμοποιήθηκε σε διαστημικές εφαρμογές, όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard I. Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για οχτώ ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα στο διάστημα. Από το χρονικό αυτό σημείο και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία τους να βελτιώνεται συνεχώς.

Το 1962, η μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε ένα φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wp.

Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν λοιπόν να κάνουν την εμφάνισή τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής, η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Οι υψηλές τιμές στα φωτοβολταϊκά, ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε μεγαλύτερη αποδοχή από την αγορά. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοσή τους συνεχώς βελτιωνόταν. Κυριότερος χρήστης των φωτοβολταϊκών τις δεκαετίες που ακολούθησαν, ήταν η NASA. [8,12]

Η διείσδυση των φωτοβολταϊκών έγινε με πολύ αργό ρυθμό συγκριτικά με την γρήγορη εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, μία τεχνολογία που επίσης στηρίζεται στα ημιαγώγιμα υλικά. Αυτή η καθυστέρηση οφείλεται κυρίως στις τεχνικές και οικονομικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές στην παραγωγική διαδικασία κατά την προσπάθειά τους να δημιουργήσουν καθαρά ημιαγώγιμα υλικά.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η ποσότητα του απαιτούμενου υλικού είναι πολύ μεγάλη και η παραγωγή του είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρος. Επίσης απαιτούνται υπέρογκα κεφάλαια για το κόστος του εξοπλισμού αλλά και της ενέργειας που καταναλώνεται κατά την παραγωγική διαδικασία. Για το λόγο αυτό άλλωστε, προβλέπεται ένα μεγάλο μερίδιο στην αγορά των φωτοβολταϊκών, να καταλάβουν οι τεχνολογίες λεπτού φιλμ (thin film). Στις τεχνολογίες αυτές, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της απαιτούμενης ποσότητας του υλικού και συνεπώς μείωση στις τιμές των φωτοβολταϊκών.

Για περαιτέρω εξάπλωση της αγοράς των φωτοβολταϊκών, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η συνεχιζόμενη μείωση του κόστους τους και παράλληλα, η αύξηση της απόδοσής τους. Η μείωση αυτή του κόστους μπορεί να επιτευχθεί κυρίως μέσω της μαζικής παραγωγής, κάτι που ακολουθεί η βιομηχανία των φωτοβολταϊκών καθώς ωριμάζει και μεγεθύνεται. Το κόστος, μπορεί να μειωθεί και μέσω της έρευνας και της ανάπτυξης της τεχνολογίας, οδός που τόσο η βιομηχανία όσο και η κρατική μηχανή επιδιώκουν. Εκτιμάται ότι με την εξάπλωση της αγοράς των φωτοβολταϊκών, είναι δυνατόν να διευρυνθεί η εφαρμογή τους σε όλα τα επίπεδα, από τα απομονωμένα συστήματα έως και τα μεγάλα διασυνδεδεμένα.

Οι προβλέψεις για το άμεσο μέλλον όσον αφορά την αγορά των φωτοβολταϊκών είναι ιδιαίτερα ευσίωνες, τόσο για την καθολική εξάπλωση της τεχνολογίας αυτής παγκοσμίως, όσο και για την καθοδική πορεία στις τιμές τους και την αύξηση της απόδοσής τους. [12]

2.8 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

2.8.1 Εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε ένα κτίριο

Για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών απαιτείται χώρος χωρίς σκιές με προσανατολισμό το Νότο. Εκτεταμένη προσοχή δίνουμε στην κλίση προς τον ήλιο. Συνήθως τοποθετούνται στην ταράτσα του κτιρίου με κλίση 45° αλλά μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε αλλού αν ο χώρος πληροί τις προϋποθέσεις π.χ. πάνω σε μεταλλικό ικρίωμα.

2.8.2 Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τρόποι για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε ένα κτίριο

1) Τοποθέτηση σε κεκλιμένα στηρίγματα. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από ξύλινα ή μεταλλικά είδη στηριγμάτων και οι περισσότεροι κατασκευαστές φωτοβολταϊκών συστημάτων προσφέρουν στηρίγματα που ταιριάζουν ακριβώς στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Σε μερικές περιπτώσεις, η κλίση είναι ρυθμιζόμενη. Η τοποθέτηση αυτή προσφέρει εύκολη πρόσβαση τόσο στο εμπρός όσο και στο πίσω μέρος των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όταν χρειάζεται να γίνει συντήρηση. Βοηθά επίσης, στον καλό αερισμό και στο δροσισμό των στοιχείων, αυξάνοντας έτσι την απόδοσή τους. Εντούτοις, το κόστος είναι σχετικά υψηλό, γιατί απαιτείται η χρήση πρόσθετων υλικών και επιπλέον εργασία. [13]

**Εικόνα 2.122**

Φωτοβολταϊκά πλαίσια στηριγμένα σε κεκλιμένα στηρίγματα

2) Τοποθέτηση σε ειδική βάση προσαρμοζόμενη στο εξωτερικό του κελύφους, η οποία εξέρχεται από την οροφή ή την πρόσοψη του κτιρίου. Η κατασκευή αυτή στηρίζεται στο εξωτερικό κέλυφος του κτιρίου. Χρειάζεται, όμως, προσοχή για την καλή μόνωση των σημείων στα οποία στηρίζεται η βάση. Η τοποθέτηση αυτή επιτρέπει επίσης τον καλό αερισμό και την ψύξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το κόστος είναι συνήθως μικρότερο σε σύγκριση με το κόστος που απαιτεί η τοποθέτηση σε κεκλιμένα στηρίγματα, αλλά μεγαλύτερο από το κόστος των μεθόδων που περιγράφονται στη συνέχεια. Αποτελεί μια καλή λύση, ειδικά σε ανακαινιζόμενα κτίρια, στα οποία δεν είναι δυνατόν να γίνουν μεγάλες αλλαγές στο εξωτερικό του κελύφους. [13]



Εικόνα 2.13

Φωτοβολταϊκά πλαίσια στηριγμένα σε ειδική βάση προσαρμοζόμενη στο εξωτερικό του κελύφους

3) Απευθείας τοποθέτηση. Στην περίπτωση αυτή, η εξωτερική επίστρωση του κτιρίου αντικαθίσταται από φωτοβολταϊκά πλαίσια. Παραδείγματος χάριν, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τοποθετούνται με τρόπο που το ένα να επικαλύπτει εν μέρει το άλλο, όπως ακριβώς τα κεραμίδια. Το φωτοβολταϊκό κάλυμμα προστατεύει το κτίριο, αλλά δεν είναι πλήρως στεγανό και απαιτούνται μέτρα για τη στεγανοποίησή του. Το κόστος όμως αυτής της μεθόδου είναι σχετικά χαμηλό, γιατί απαιτεί ελάχιστα πρόσθετα υλικά. Επίσης, η υποκατάσταση ορισμένων δομικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την εξωτερική κάλυψη του κελύφους του από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μειώνει το συνολικό κόστος. [13]



Εικόνα 2.14

Φωτοβολταϊκά πλαίσια απευθείας τοποθετημένα

4) Ενσωμάτωση των Φ/Β πλαισίων στο κέλυφος του κτηρίου
Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην υποκατάσταση ολόκληρων τμημάτων του κτιριακού κελύφους από φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η καλή εφαρμογή αυτής της τεχνικής απαιτεί τη στεγανή σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων μεταξύ τους.



Εικόνα 2.15

Φωτοβολταϊκά πλαίσια ενσωματωμένα στο πλαίσιο του κτηρίου

Παραδείγματος χάριν, φωτοβολταϊκά στοιχεία χωρίς μεταλλικό σκελετό τοποθετούνται σε στηρίγματα παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη συμβατικών διαφανών οροφών ή προσόψεων. Τα νέα τύπου ημιδιαφανή στοιχεία είναι δυνατόν να τοποθετηθούν στη θέση υαλοπινάκων ή αδιαφανών στοιχείων, παρέχοντας στο σχεδιαστή τη δυνατότητα εφαρμογής τεχνικών φωτισμού και ηλιοπροστασίας

παράλληλα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών παρέχει δυνατότητες για σημαντική μείωση του κόστους, καθώς εξοικονομείται το κόστος των δομικών στοιχείων του κελύφους τα οποία αντικαθίστανται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. [13]

2.9 ΣΤΟΧΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στόχος της εργασίας ήταν αρχικά η απευθείας υλοποίηση από το στάδιο της εξομοίωσης του συστήματος ελέγχου ενός αντιστροφέα για την μέγιστη απορρόφηση ισχύος μίας συστοιχίας Φωτοβολταϊκών από το δίκτυο. Η εργασία ολοκληρώθηκε τελικά λόγω όγκου και χρόνου, με την εξομοίωση του συστήματος, χωρίς να σημαίνει ότι σχετικά εύκολα δεν θα μπορούσαμε να περάσουμε το εξομοιωμένο σύστημα σε ένα πραγματικό σύστημα ελέγχου με την χρήση Ψηφιακού Επεξεργαστή Σήματος (D.S.P.). Άλλωστε το δυσκολότερο τμήμα της απ' ευθείας υλοποίησης ενός συστήματος ελέγχου με Ψηφιακό Επεξεργαστή Σήματος είναι η εξομοίωσή του.

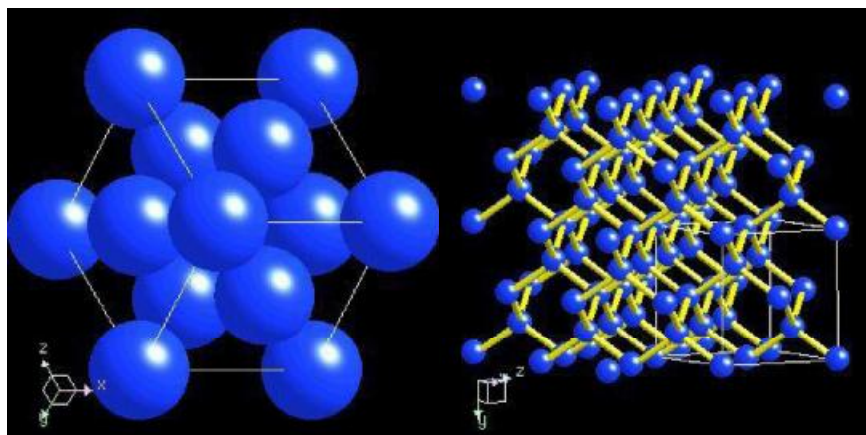
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

3.1 ΤΟ ΠΥΡΙΤΙΟ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΣΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

3.1.1 Βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του πυριτίου

Το πυρίτιο αποτελεί τον κυριότερο εκπρόσωπο των ημιαγωγών, ανήκει στην IVA ομάδα του περιοδικού πίνακα και χαρακτηρίζεται από ατομικό αριθμό 14, δηλαδή διαθέτει 4 ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα, γνωστά και σαν ηλεκτρόνια σθένους. Το πυρίτιο συναντάται σε δύο αλλοτροπικές μορφές, μια άμορφη και μια κρυσταλλική. Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει μεταλλική λάμψη, είναι σκληρό και έχει σκούρο γκρι χρώμα. Είναι στερεό σε θερμοκρασία δωματίου και δεν είναι ούτε ελατό ούτε όλκιμο. Είναι ημιαγωγός και την ιδιότητα αυτή διατηρεί ακόμη και σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, ενώ δεν είναι καλός αγωγός της θερμότητας. Ως στοιχείο, το πυρίτιο δεν απαντάται ελεύθερο στη φύση. Τα διάφορα ορυκτά και πετρώματα του πυριτίου αποτελούν το 87% του φλοιού της Γης, ενώ είναι το δεύτερο σε αφθονία χημικό στοιχείο στη γήινη φύση μετά το οξυγόνο, με ποσοστό 28% και το έβδομο πιο άφθονο στοιχείο στο Σύμπαν. Εξαιτίας της αφθονίας του στη φύση και τον ιδιοτήτων του, χρησιμοποιείται όχι μόνο για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων αλλά και για ηλεκτρονικές εφαρμογές. [10,11]



Εικόνα 3.1

(α) Δομή πυριτίου σε mol.

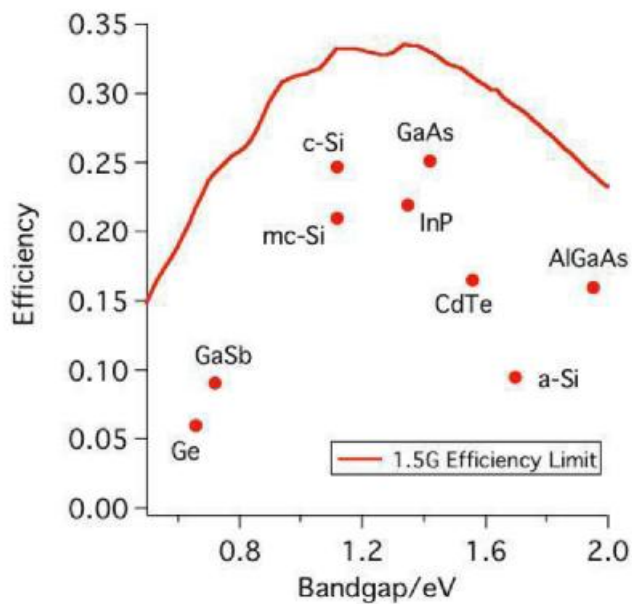
(β) Κρυσταλλική δομή Πυριτίου.

Στη θεμελιώδη κατάσταση, δηλαδή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν, όπου ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν μονωτής, κάθε άτομο Πυριτίου είναι ενωμένο με τέσσερα γειτονικά άτομα που συγκρατούνται με το κεντρικό άτομο με τέσσερα ζεύγη ηλεκτρονίων (χημικούς δεσμούς) όπως φαίνεται και από την εικόνα 3.1(α) και 3.1(β). Έτσι το κεντρικό άτομο έχει στην εξωτερική του στοιβάδα οχτώ ηλεκτρόνια και κατ' επέκταση σταθερή δομή. Ωστόσο, όταν το ηλιακό φως έχει αρκετή ενέργεια και πέσει πάνω σε κρυσταλλικό πυρίτιο είναι δυνατόν να αλλάξει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του κρυστάλλου. Όταν ο κρύσταλλος του πυριτίου απορροφήσει φωτόνια κατάλληλης ενέργειας ελευθερώνονται ηλεκτρόνια σθένους από κάποιους από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια αυτά αποτελούν φορείς ηλεκτρισμού και συνεισφέρουν στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Οι κενές θέσεις που δημιουργούνται στους χημικούς δεσμούς, οι οποίες όφειλαν να είναι κατειλημμένες από κάποιο ηλεκτρόνιο, ονομάζονται οπές. Σε συνθήκες σταθερής ενεργειακής κατάστασης (σταθερή θερμοκρασία ή ακτινοβολία), το πλήθος των ηλεκτρονίων που ελευθερώνονται ισούται με το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων που παγιδεύονται σε οπές, διατηρώντας έτσι ισορροπία μεταξύ των δύο φορέων. Στην περίπτωση

βέβαια που εφαρμόσουμε τάση στα άκρα του ημιαγωγού, τότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Η αγωγιμότητα των ημιαγωγών οφείλεται τόσο στη συνεισφορά των ηλεκτρονίων όσο και των οπών. [11,14]

3.2 ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΖΩΝΩΝ

Όταν τα ηλεκτρόνια ενός κρυστάλλου υφίστανται την επίδραση ενός περιοδικού δυναμικού, χρησιμοποιούμε το μοντέλο των ενεργειακών ζωνών. Οι ενεργειακές ζώνες είναι περιοχές πιθανών ενεργειών των ηλεκτρονίων του στερεού. Τα ηλεκτρόνια μπορούμε να τα χωρίσουμε σε τρεις κατηγορίες: τα ηλεκτρόνια των εσωτερικών στοιβάδων, τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων και τα ελεύθερα. Τα πρώτα είναι τα λιγότερο ενεργά και δε συμμετέχουν σε μηχανισμούς αγωγιμότητας. Η ζώνη η οποία περιέχει τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στοιβάδων των ατόμων (ηλεκτρόνια σθένους) καλείται ζώνη σθένους, και η αμέσως ανώτερη από τη ζώνη σθένους, είναι η ζώνη αγωγιμότητας (ή ζώνη αγωγής) στην οποία ανήκουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η απόσταση μεταξύ των δύο ενεργειακών ζωνών ονομάζεται ενεργειακό διάκενο ή χάσμα (gap) και εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής. [7,11,14]



Εικόνα 3.2

Απεικόνιση των ιδανικών αποδόσεων των πιο σημαντικών φωτοβολταϊκών στοιχείων, ως συνάρτηση του ενεργειακού χάσματος των αντίστοιχων ημιαγωγών στους 300°K.

Η τιμή του ενεργειακού διακένου E_g χαρακτηρίζει το υλικό και σχετίζεται με την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων όπως φαίνεται και από την εξίσωση 3.1. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, 300°K, η τιμή του ενεργειακού χάσματος για το πυρίτιο είναι 1.12eV.

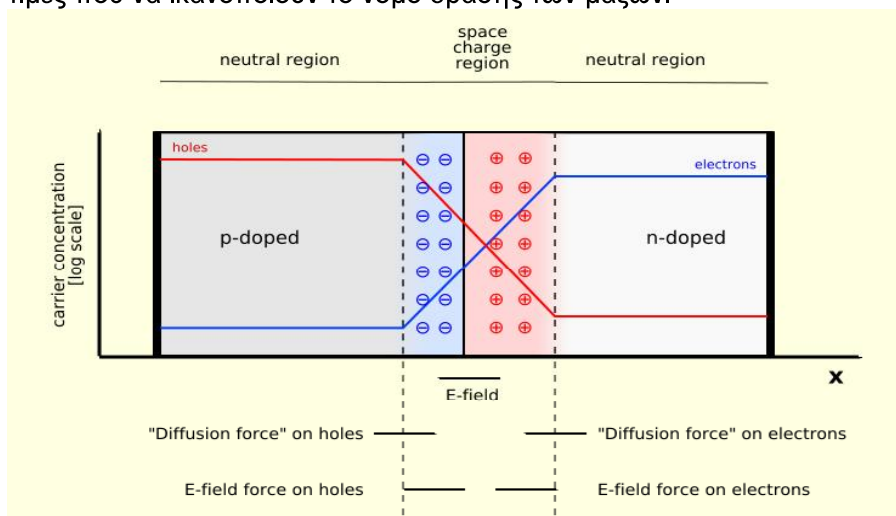
$$n_T = \frac{\left(E_g \int_0^{\lambda_c} J_0(\lambda) d\lambda \right)}{\int_0^{\infty} J_0(\lambda) h * v * d\lambda}$$

Εξίσωση 3.1

όπου $J_0(\lambda)$ η επιφανειακή πυκνότητα φωτονίων ανά μονάδα χρόνου και ανά μοναδιαίο διάστημα μήκους κύματος, h η σταθερά του Planck και v η συχνότητα των φωτονίων. [15]

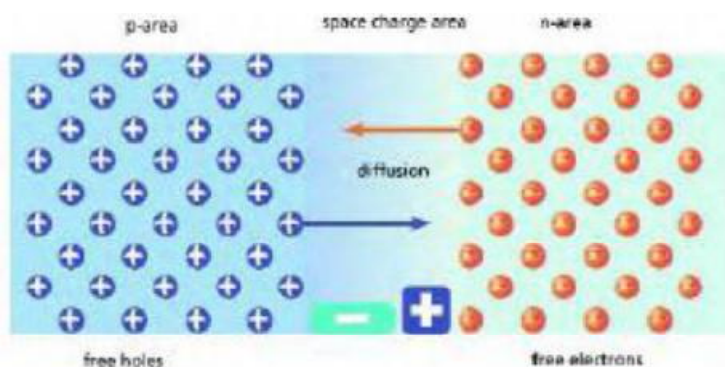
3.3 Η ΕΠΑΦΗ P-N

Οι σημαντικότερες ιδιότητες και εφαρμογές των διατάξεων ημιαγωγών δεν προέρχονται κυρίως από τη δημιουργία φορέων, αλλά οφείλονται περισσότερο στη διάχυση των φορέων τους. Βασική διάταξη για την εκδήλωση των ιδιοτήτων αυτών είναι η επαφή p-n (ονομάζεται επίσης σύνδεση, ένωση ή μετάβαση p-n) που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι σχηματίζεται όταν έλθουν σε στενή επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p με ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου n. Αμέσως τότε, ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n, όπου οι οπές είναι λιγότερες, και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι επίσης πολύ λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την κατάσταση ισορροπίας που υπήρχε πριν. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν το νόμο δράσης των μαζών.



Εικόνα 3.3

Παράδειγμα της μεταβολής της συγκέντρωσης των οπών (p) και των ελεύθερων ηλεκτρονίων (n) κατά μήκος μιας επαφής p-n, σε κατάσταση ισορροπίας.



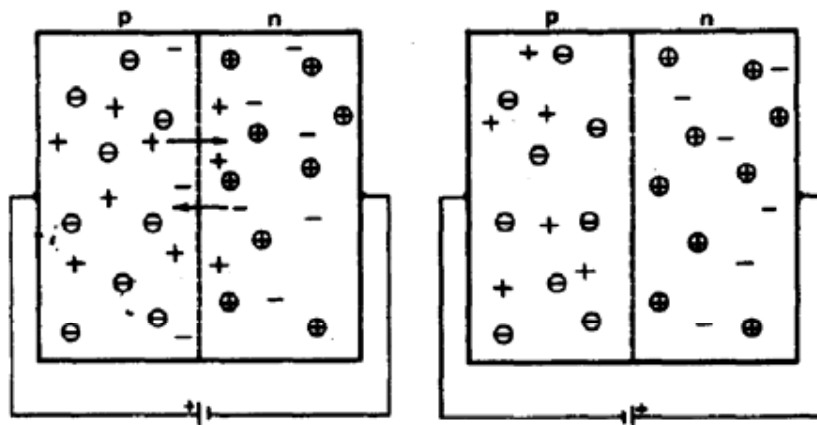
Εικόνα 3.4

Επαφή p-n

Γι' αυτό η περιοχή γύρω από μια ένωση p-n ονομάζεται ζώνη εξάντλησης των φορέων (περιοχή αραιώσης ή απογύμνωσης (depletion region ή depletion layer) ή φορτίων χώρου (space charge region)). Η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται δίοδος ημιαγωγού ή απλά δίοδος. Σε αντίθεση με τους ευκίνητους φορείς των ημιαγωγών (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) που τείνουν να διαχέονται προς τις περιοχές με τη μικρότερη συγκέντρωσή τους, η συγκέντρωση των αρνητικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p, και η συγκέντρωση των θετικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι δότες στο τμήμα τύπου n, παραμένουν αμετάβλητες, αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μία διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή (συνήθως περίπου 0,3 μέχρι 0,5V, ανάλογα με τις συγκεντρώσεις των προσμίξεων) αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η δίοδος που περιέχει την ένωση p-n παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με τη φορά του. [11]

3.4 ΟΡΘΗ ΚΑΙ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΠΟΛΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ

Η μία περίπτωση είναι να επιβληθεί στη δίοδο p-n ορθή πόλωση, δηλαδή ο αρνητικός πόλος της πηγής να συνδεθεί με το τμήμα τύπου n της δίοδου, και ο θετικός πόλος με το τμήμα τύπου p (εικόνα 3.5). Τότε, τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή της ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής, διαμέσου του τμήματος τύπου p.

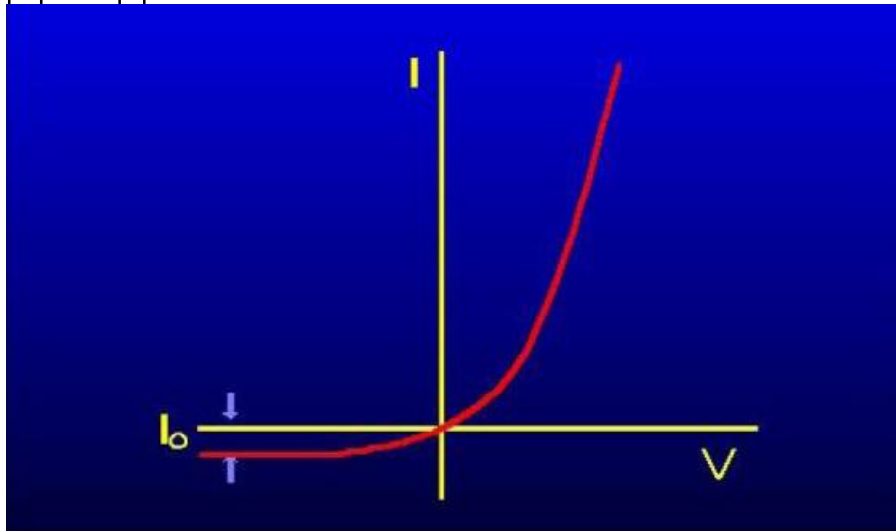


Εικόνα 3.5

Συνδεσμολογία ορθής και ανάστροφης πόλωσης.

Αντίθετα, στην ανάστροφη πόλωση, δηλαδή αν ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδεθεί με το τμήμα τύπου p και ο θετικός με το τμήμα τύπου n, γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος τύπου p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή και από την άλλη μεριά, απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων του τμήματος τύπου n προς το θετικό πόλο της πηγής. Έτσι, οι συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται πάρα πολύ, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει, και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ένα ισχυρό εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή. Το αποτέλεσμα είναι ότι τώρα η δίοδος προβάλλει μεγάλη

αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα. Δηλαδή μπορεί μια δίοδος που έχει σε ορθή πόλωση αντίσταση μόλις 10Ω , να την αυξάνει στην αντίστροφη πόλωση σε $100 \text{ M}\Omega$, δηλαδή να γίνεται δέκα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη.



Εικόνα 3.6

Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος - τάσης δίοδου p – n.

Το διάγραμμα της εικόνας 3.6 δείχνει ακριβώς την ιδιόμορφη μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια δίοδο ένωσης p-n, σε συνάρτηση με την τιμή της τάσης και το είδος της πόλωσης που εφαρμόζεται. [11]

3.5 Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΗΤΙΟΥ ΣΤΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

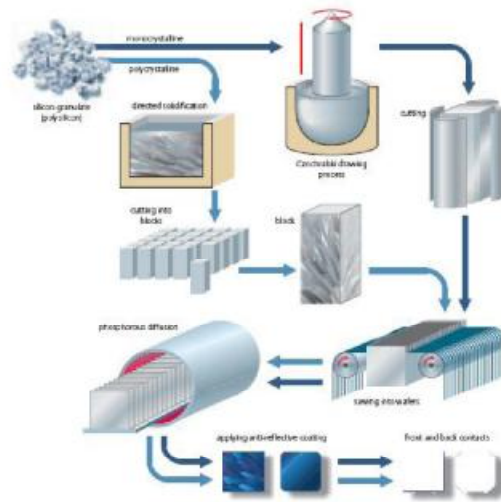
Το πυρίτιο ήταν ένα από τα πρώτα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η γρήγορη ανάπτυξη της τεχνολογίας στην εξερεύνηση του διαστήματος διάνοιξε εξαιρετικές

προοπτικές για τη χρήση φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το 1958, 108 ηλιακά κύτταρα είχαν σταλεί στο διάστημα για δοκιμή. Η σύνδεση σε σειρά άρχισε αργότερα σε μικρότερο αριθμό. Η επίγεια χρήση ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του '70, εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης του 1973-74 και έδωσε ερεθίσματα για την εκπόνηση πληθώρας ερευνητικών μελετών. Οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών στοιχείων που συναντώνται σήμερα ποικίλουν ανάλογα με το υλικό κατασκευής, την ικανότητα μετατροπής και το κόστος. Τα ηλιακά κύτταρα χωρίζονται σε τρεις γενιές ανάλογα με τη σειρά που καθένα από αυτά έγιναν γνωστά. Στην πρώτη γενιά ανήκουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου και στη δεύτερη φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού φιλμ. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τρίτης γενιάς στοχεύουν να ενισχύσουν την "κακή" απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων της δεύτερης γενιάς (τεχνολογία λεπτού φιλμ) διατηρώντας τις πολύ χαμηλές δαπάνες παραγωγής. Αυτή τη στιγμή υπάρχει έρευνα για τα στοιχεία όλων των γενιών, ενώ οι τεχνολογίες της πρώτης γενιάς είναι αυτές που αντιπροσωπεύονται περισσότερο στην εμπορική παραγωγή, αποτελώντας το 89.6% της συνολικής παραγωγής του 2007. [10]

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη δομή του βασικού υλικού ή τον ιδιαίτερο τρόπο παρασκευής. Οι διαφορετικοί τύποι είναι οι εξής:

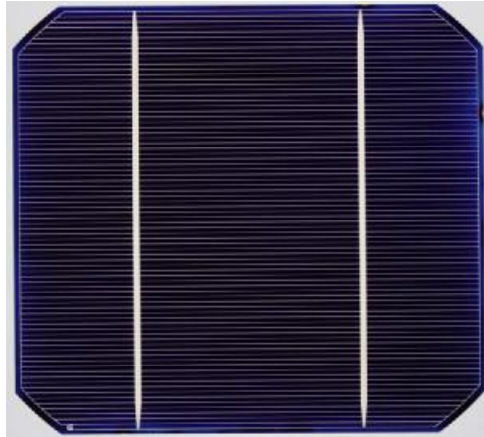
1. φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (Single-Crystal

Silicon): το βασικό υλικό είναι μονοκρυσταλλικό και το πάχος του υλικού είναι σχετικά μεγάλο (Wafer ~ 300μm). Η διαδικασία κατασκευής φωτοβολταϊκών κυττάρων μονοκρυσταλλικού πυριτίου απεικονίζεται στην εικόνα 3.7. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας, η απόδοση τους κυμαίνεται από 21% με 24%, ενώ χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος κατασκευής και έχουν σκούρο χρώμα (εικόνα 3.8). [15,16]



Εικόνα 3.7

Κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 3.8

Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

2. φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού Πυριτίου

(multicrystalline Silicon mc-Si) : Στην επιφάνεια τους διακρίνονται οι διάφορες ενώσεις των κρυσταλλικών κόκκων από τους οποίους αποτελούνται (μονοκρυσταλλικές περιοχές). Γενικά, όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου, τόσο υψηλότερη η απόδοσή του, η οποία κυμαίνεται από 17% έως 20% σε εργαστηριακή μορφή κυψελίδας. Χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή χρονική σταθερότητα και το κόστος παρασκευής τους είναι χαμηλότερο σε σχέση με το αντίστοιχο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. [15,16]



Εικόνα 3.9

Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

3. φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας (Ribbon Silicon) : Πρόκειται για τη δημιουργία λεπτής ταινίας από τηγμένο υλικό πολυκρυσταλλικού πυριτίου απόδοσης περίπου 13% (εικόνα 6.10). Είναι μέθοδος υψηλού κόστους και προς το παρόν περιορίζεται μόνο σε βιομηχανική παραγωγή. [15,16]



Εικόνα 3.10

Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου.

4. φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου Πυριτίου (Amorphous-Thin Film

Silicon): Τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων (films), θεωρητικά πολύ χαμηλού κόστους εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού και η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων αυτών μειώνεται έντονα, στα αρχικά στάδια φωτισμού τους, στα επίπεδα του 6% έως 8% (εικόνα 3.11). Σήμερα, η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων φωτοβολταϊκών στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις δύο ή τριών στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα, με σκοπό την αύξηση του αξιοποιήσιμου τμήματος του ηλιακού φάσματος.



Εικόνα 3.11

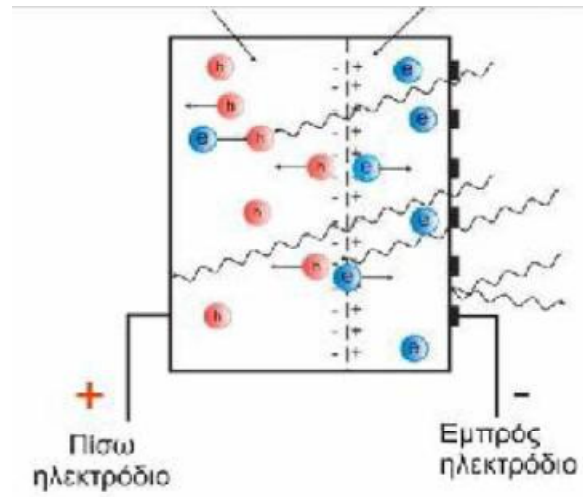
Τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου.

Εκτός από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία Πυριτίου, λεπτής επίστρωσης, τα οποία αποτελούν τα περισσότερο διαδεδομένα στον κόσμο, κατασκευάζονται φωτοβολταϊκά στοιχεία και από άλλα υλικά, όπως CIS, Cu₂S/CdS, CuInSe₂ ή CIGS, CdTe, GaAs. Γενικά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, παρά τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το πυρίτιο, παρουσιάζουν ακόμη, μειονεκτήματα, τα οποία στην καλύτερη περίπτωση, περιορίζουν τη χρήση τους σε ειδικές εφαρμογές. [15,16]

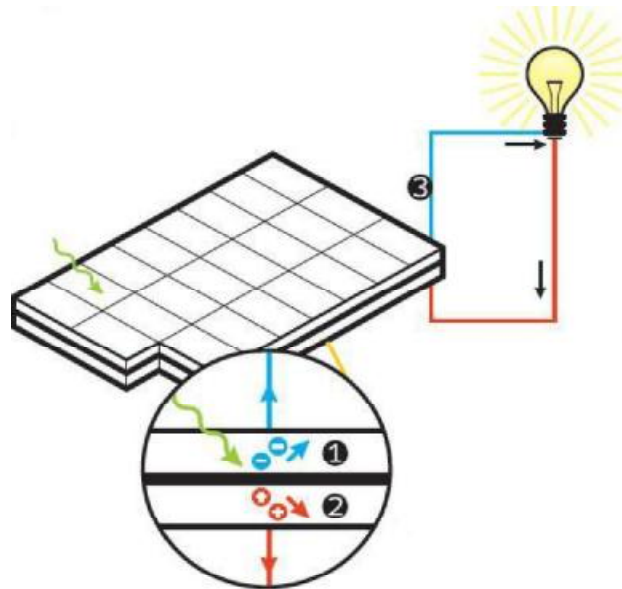
3.6 ΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποτελεί τη βασική φυσική διαδικασία μέσω της οποίας ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Είναι γνωστό ότι τα ηλιακά κύτταρα είναι δίοδοι ημιαγωγού, με τη μορφή ενός δίσκου δηλαδή η επαφή p-n

εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου, που δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία. Το ηλιακό φως είναι μικρά πακέτα ενέργειας που λέγονται φωτόνια, τα οποία περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Το γαλάζιο χρώμα ή το υπεριώδες πχ. έχουν περισσότερη ενέργεια από το κόκκινο ή το υπέρυθρο. Όταν λοιπόν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς διαχέονται στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντιθέτου πρόσημου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου. Τα φωτόνια της ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη, τύπου n (εικόνα 3.13), παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, e^-) ή προς τα πίσω (οι οπές), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δυο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και δεν υφίστανται σαν ελεύθεροι φορείς. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ ένα άλλος μέρος της διέρχεται από το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο.



Εικόνα 3.12



Εικόνα 3.13

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p , με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. [17,18,19]

3.7 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ;

Ο όρος φωτοβολταϊκά αποτελεί μετάφραση του αγγλικού photovoltaic. Ο όρος αυτός χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1890 έχοντας σαν συνθετικά τις λέξεις: photo από την ελληνική λέξη Φως και volt η οποία συνδέεται με την πρωτοπόρο στην ανάπτυξη του ηλεκτρισμού Alessandro Volta. Αναφέρεται δηλαδή στον ηλεκτρισμό από το φως. Αυτό ακριβώς κάνουν τα φωτοβολταϊκά υλικά, μετατρέπουν την ενέργεια του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια (Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο), όπως ανακάλυψε ο Edmond Becquerel το 1939 .

Τα μεμονωμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία (PV cells), κοινώς γνωστά σαν ηλιακά στοιχεία / κυψέλες (solar cells) είναι συσκευές που παράγουν ηλεκτρισμό κατασκευασμένες από ημιαγώγιμα υλικά. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία φτιάχνονται σε διάφορα μεγέθη και σχήματα, από μικρότερα του ενός γραμματοσήμου μέχρι αρκετά εκατοστά. Συχνά συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας τους φωτοβολταϊκούς πίνακες, οι οποίοι με τη σειρά τους συχνά συνενώνονται σε φωτοβολταϊκές συστοιχίες διαφόρων μεγεθών και ισχύος εξόδου.

Το μέγεθος μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας εξαρτάται από μια πληθώρα παραγόντων, όπως η ποσότητα του ηλιακού φωτός που είναι διαθέσιμη σε μια δεδομένη τοποθεσία και τις ενεργειακές απαιτήσεις του καταναλωτή. Οι φωτοβολταϊκοί πίνακες της συστοιχίας αποτελούν το κύριο μέρος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει ακόμη ηλεκτρικές συνδέσεις, μηχανισμούς στήριξης,

ρυθμιστές ενέργειας και μπαταρίες για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται ενέργεια όταν σε περιόδους μειωμένης ή ανύπαρκτης ηλιοφάνειας.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ήδη μέρος της καθημερινής μας ζωής. Απλά φωτοβολταϊκά συστήματα παρέχουν ενέργεια για μικρές συσκευές όπως υπολογιστές τσέπης και ρολόγια χειρός. Πιο πολύπλοκα φωτοβολταϊκά σύστημα χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, αντλίες νερού, συσκευές, μηχανές καθώς και σπίτια και χώρους εργασίας αρκετών ανθρώπων.

Πολλά επίσης φώτα δρόμων και τηλεφωνικοί θάλαμοι τροφοδοτούνται με ενέργεια από φωτοβολταϊκά συστήματα. Σε πολλές περιπτώσεις όπου το φορτίο βρίσκεται μακριά από το διασυνδεδεμένο δίκτυο η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελεί την φθηνότερη λύση για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. [20]

3.8 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Πλεονεκτήματα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας:

Η ηλιακή ενέργεια, η οποία είναι η βασική πηγή ενέργειας της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Ανεξάντλητη και άφθονη.
2. Η ηλεκτρική ενέργεια από την φωτοβολταϊκή τεχνολογία αποτελεί μια οικονομικά συμφέρουσα εναλλακτική σε σύγκριση με την επέκταση συμβατικών γραμμών μεταφοράς ενέργειας.
3. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας είναι ελάχιστο.
4. Δεν έχει κινητά μέρη ώστε να φθείρονται ή να σπάνε.
5. Δεν ρυπαίνει το περιβάλλον με ρύπους και θόρυβο.
6. Δυνατότητα επεκτασιμότητας.

Μειονεκτήματα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας:

1. Μεγάλο κόστος εγκατάστασης.
2. Η ηλιακή ενεργεία δεν είναι πάντα διαθέσιμη (π.χ. κατά τη διάρκεια της νύχτας , χειμωνιάτικες περίοδοι). Οπότε σε αρκετές εφαρμογές απαιτούνται μονάδες αποθήκευσης.

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

4.1 ΕΞΙΣΩΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ (SHOCKLEY)

Αν η επαφή P-N πολωθεί ορθά, δηλαδή εφαρμοστεί θετικό δυναμικό στην επαφή P και αρνητικό δυναμικό στην επαφή N, τα ηλεκτρόνια και οι οπές θα κινούνται πιο εύκολα και θα εμφανιστεί το ρεύμα διάχυσης I_D . (Εξίσωση Shockley).

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Εξίσωση 4.1

όπου :

q : φορτίο $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

k : σταθερά Boltzman $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T: η απόλυτη θερμοκρασία

V: η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου

I_0 : είναι ένα ασθενές αντίστροφο ρεύμα κόρου, που η δίοδος P-N επιτρέπει να περνάει από αντίστροφη πόλωση, χωρίς να φωτίζεται ενώ το ρεύμα αυτό υπό ορθή πόλωση παίρνει μεγάλες τιμές. [21]

4.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Υπολογισμός τάσης φωτοβολταϊκού κυττάρου (V_{oc})

Η τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} (open circuit) αυξάνει ελάχιστα με την αύξηση της ακτινοβολίας και υπολογίζεται από τη σχέση :

$$V_{oc} = 25 * 10^{-3} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right)$$

Εξίσωση 4.2

Όπου

V_{oc} : (Voltage Open Circuit) Τάση ανοικτού κυκλώματος

I_{ph} : φωτόρευμα

I_o : ρεύμα ανοικτού κυκλώματος

$$q * V \leq E_g$$

$$V_g = \frac{E_g}{q} = \frac{1,12eV}{e} = 1,12V$$

Εξίσωση 4.3

Όπου

E_g : διάστημα απαγορευμένης περιοχής

q : φορτίο ηλεκτρονίων

Παράδειγμα

Έστω $I_{ph} = 0.1 \text{ A}$, $I_o = 10^{-19} \text{ A}$

και $I_{oc} = I_{ph} = 100 \text{ mA}$.

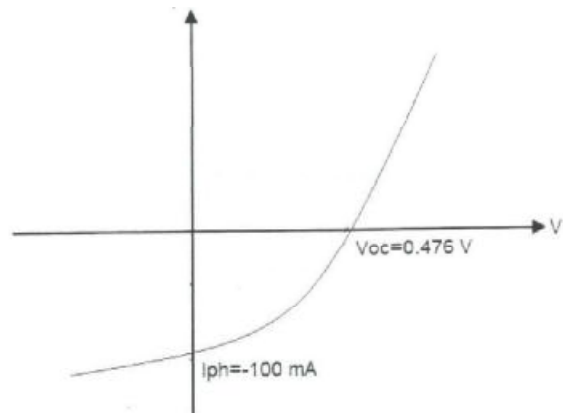
$V_t = 25 * 10^{-3} \text{ V} \rightarrow V_t = kT/q$

Αν αντικαταστήσουμε τα παραπάνω στη σχέση $V_{oc} = 25 * 10^{-3} \ln(I_{ph}/I_o)$ παίρνουμε:

$V_{oc} = 476 \text{ mV}$

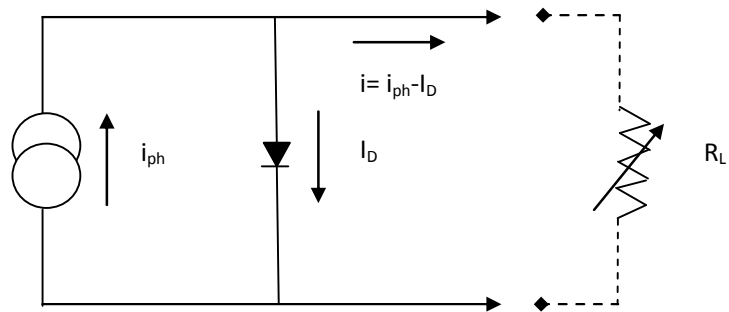
Το I_{oc} και το V_{oc} προκύπτουν από την γραφική παράσταση 1

[21]



Γραφική παράσταση 1
Απεικόνιση της V_{oc} συναρτήσει της I_{ph}

4.3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ



Σχήμα 4.1:

Ισοδύναμο κύκλωμα φωτιζόμενου ηλιακού στοιχείου

Το παραπάνω ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού αποτελείται από μια πηγή έντασης, μια δίοδο και μία μεταβλητή αντίσταση η οποία αποτελεί το φορτίο μας.

Οι δύο σημαντικότερες παράμετροι περιγραφής της ηλεκτρικής απόδοσης της κυψέλης είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου φαίνεται στην εικόνα 4.1.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης μετριέται βραχυκυκλώνοντας την έξοδο και μετρώντας το τελικό ρεύμα υπό πλήρη ακτινοβολία. Αγνοώντας τη μικρή δίοδο και το ρεύμα γείωσης που διαφεύγει υπό μηδενική τάση, το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπό αυτές τις συνθήκες είναι το φωτόρευμα I_{ph} που είναι ανάλογο προς τα φωτόνια που απορροφά το ηλιακό στοιχείο, δηλαδή $I_{sc} = I_{ph}$.

Το ρεύμα i που δίδει το φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν συνδεθεί με μια αντίσταση φορτίου R_L , είναι η διαφορά των ρευμάτων i_{ph} και I_D .

$$i = i_{ph} - I_D \text{ [A]}$$

Εξίσωση 4.4

I_D είναι το ρεύμα της διόδου του σχήματος 1 και δίδετε από την σχέση:

$$I_D = I_o (e^{qV/nkT} - 1) , \text{ [A]}$$

Εξίσωση 4.5

γνωστή ως εξίσωση Shockley και συνεπώς η εξίσωση 4.4 με αντικατάσταση σε αυτήν της εξίσωσης 4.5 γίνεται:

$$i = i_{ph} - I_0 (e^{qV/nkT} - 1) \text{ [A]}$$

Εξίσωση 4.7

Όπου:

q: το φορτίο του ηλεκτρονίου = $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb

k: η σταθερά Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ Joules/Kelvin = $86,3 \times 10^{-3}$ eV/K

h: $6,626 \times 10^{-34}$ J *s όπου καλείται σταθερά του Planck

c: $2,998 \times 10^8$ m/s όπου είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό

l: είναι το μήκος κύματος του φωτονίου [m]

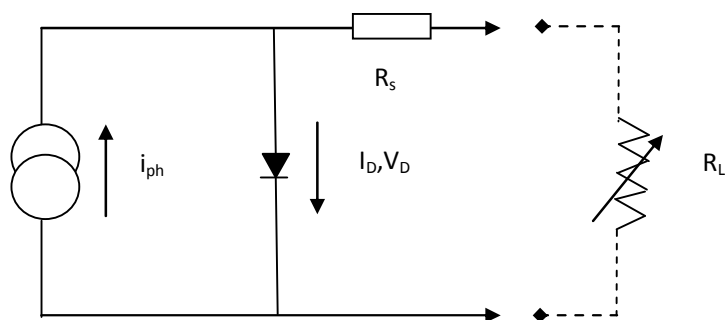
T: η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin (όπου $0^\circ\text{C} \rightarrow 273^\circ\text{K}$)

V : η τάση στα άκρα της διόδου από τη πρόσπτωση του φωτός

I_0 : ένα ασθενές αντίστροφο ρεύμα κόρου που η διόδος P-N επιτρέπει να περνά από αντίστροφη πόλωση χωρίς να φωτίζεται, ενώ το ρεύμα αυτό υπό ορθή πόλωση παίρνει μεγάλες τιμές. [21]

4.4 ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

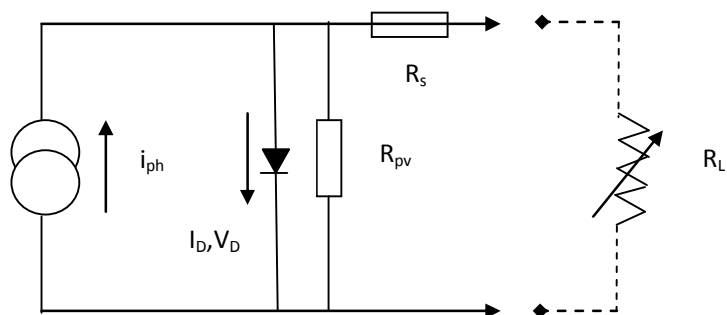
Το προηγούμενο ισοδύναμο φωτοβολταϊκό στοιχείο ήταν ιδανικό χωρίς απώλειες. Παρακάτω θα εξηγήσουμε την λειτουργία ενός πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου με εσωτερικές αντιστάσεις. Το ισοδύναμο κύκλωμα με πραγματικές απώλειες φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.2:

Μοντέλο πραγματικού φωτοβολταϊκού

Παρατηρούμε πως η διαφορά σε αυτό το κύκλωμα είναι μια αντίσταση R_s η οποία θεωρητικά συνδέεται σε σειρά με το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Αντιπροσωπεύει την ωμική αντίσταση στις επαφές στην εμπρόσθια επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου και στην μεταλλική επαφή με τον ημιαγωγό. Αν η $R_s > 10\text{m}\Omega$ τότε έχουμε σημαντικές απώλειες στην απόδοση, του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ενώ επίσης ο συντελεστής πλήρωσης, FF, μειώνεται καθοριστικά.



Σχήμα 4.3:

Μοντέλο πραγματικού φωτοβολταϊκού με R_{pv}

Η αντίσταση R_{pv} στο ισοδύναμο κύκλωμα θεωρείται ότι συνδέεται παράλληλα με το φωτοβολταϊκό στοιχείο και αντιπροσωπεύει διαύλους υψηλής αγωγιμότητας δια μέσω της διόδου P-N ή περιοχές υψηλής αγωγιμότητας στην περιφέρεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

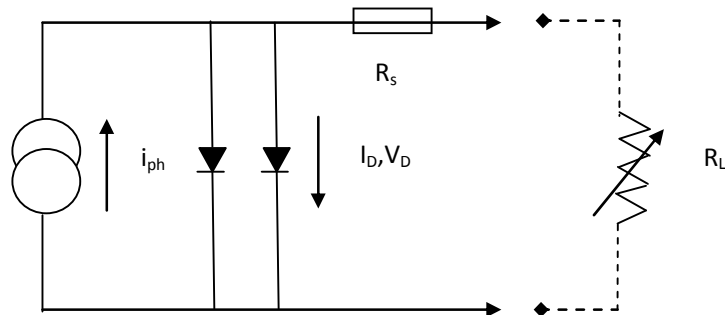
Το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει ένα φανταστικό φωτοηλεκτρικό στοιχείο το οποίο παρουσιάζει μια θετική ή μια αρνητική αντίσταση. Το νέο στοιχείο παρουσιάζεται από την R_{pv} (αντίσταση φωτοβολταϊκού). [21]

4.5 Χαρακτηριστική απόδοσης ηλιακού στοιχείου

Ο σκοπός της χαρακτηριστικής ρεύματος – τάσης (I-V) ενός ισοδύναμου κυκλώματος είναι ο σαφής υπολογισμός και η συσχέτιση των προβλημάτων μεταξύ των ηλιακών γεννητριών και των διαφόρων φορτίων. Μία υπολογιστική μέθοδος για την συσχέτιση των προβλημάτων του φωτοβολταϊκού μηχανισμού έχει τις ακόλουθες επιλογές:

- Σαφής υπολογισμός ρεύματος – τάσης για την χαρακτηριστική εξίσωση $V(I)$.
- Σαφής υπολογισμός των παραμέτρων της χαρακτηριστικής εξίσωσης για την μέτρηση των παραμέτρων I_{sc} , V_{oc} , I_{pmax} , V_{pmax}
- Ο βαθμός ακρίβειας κατά προσέγγιση μέσα στα όρια του βαθμού ακρίβειας της μεθόδου μέτρησης. (Degree of accuracy of approximation within the range of degree of accuracy of measuring method (state-of-the-art))

Η χαρακτηριστική απόδοσης ηλιακού στοιχείου καλύπτει τις τρεις απαιτούμενες επιλογές, έχοντας την ίδια κατά προσέγγιση ακρίβεια όπως το μοντέλο των δύο διόδων:



Σχήμα 4.4:

Ισοδύναμο κύκλωμα χαρακτηριστικής απόδοσης ηλιακού στοιχείου

Σημείωση: η πραγματική εσωτερική αντίσταση σειράς R_s δεν πρέπει να συγχέεται με την αντίσταση του φωτοβολταϊκού στοιχείου R_{pv} . [22]

4.6 Προσδιορισμός εσωτερικής αντίστασης σειράς (R_s)

Ακολουθεί η χαρακτηριστική εξίσωση του ηλιακού στοιχείου.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_{pv}}{Vt}} - 1 \right)$$

Εξίσωση 4.8

Αναλυτική ερμηνεία

$$V = Vt \ln \left(\frac{I_{ph} - I + I_0}{I_0} \right) - IR_{pv}$$

Εξίσωση 4.9

Με την εισαγωγή της αντίστασης του φωτοβολταϊκού γίνεται σαφής υπολογισμός της απόδοσης της ηλιακής γεννήτριας συναρτήσει διάφορων πιθανών φορτίων με ακρίβεια 1%, σχετικά με την μέγιστη ισχύ της ηλιακής γεννήτριας.

Με τον προσδιορισμό των τεσσάρων ανεξάρτητων παραμέτρων των εξισώσεων R_{pv} , V_T , I_o , I_{ph} , είναι απαραίτητες επίσης τέσσερις ανεξάρτητες μετρήσιμες παράμετροι. Οι παράμετροι αυτοί είναι: I_{sc} , V_{oc} , I_{pmax} , V_{pmax} . Αν προστεθεί η κλίση M λαμβάνοντας υπόψη την τάση ανοιχτού κυκλώματος έχουμε:

$$M = \frac{dV}{dI} (I = 0)$$

Εξίσωση 4.10

Τότε για τις τέσσερις εξισώσεις είναι διαθέσιμες οι πέντε παράμετροι των εξισώσεων.

$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \left(k_1 \frac{I_{pmax} V_{pmax}}{I_{sc} V_{oc}} + k_2 \frac{V_{pmax}}{V_{oc}} + k_3 \frac{I_{pmax}}{I_{sc}} + k_4 \right)$$

Εξίσωση 4.11

Με σταθερές εξίσωσης:

$$k_1 = -5.411$$

$$k_2 = 6.450$$

$$k_3 = 3.417$$

$$k_4 = -4.422$$

Να σημειωθεί ότι οι σταθερές K_1 , K_2 , K_3 και K_4 της εξίσωσης δεν είναι εμπειρικές, έχουν προέλθει από χρήση μαθηματικών μεθόδων, ανεξάρτητα από τα υλικά κατασκευής του ηλιακού στοιχείου.

Χρησιμοποιώντας ένα μη γραμμικό σύστημα ταυτόχρονα με τις εξισώσεις οι παράμετροι καθορίζονται από τα ακόλουθα.

$$Rpv = -M \frac{Isc}{I_{pmax}} + \frac{V_{pmax}}{I_{pmax}} \left(1 - \frac{Isc}{I_{pmax}}\right)$$

Εξίσωση 4.12

$$Vt = -(M + Rpv)Isc$$

Εξίσωση 4.13

$$I_o = Isc e^{\frac{V_{oc}}{Vt}}$$

Εξίσωση 4.14

$$I_{ph} = Isc$$

Εξίσωση 4.15

Παράδειγμα 1: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου BP585F ελέγχοντας κατά προσέγγιση την ποιότητα της αποδιδόμενης χαρακτηριστικής του ηλιακού στοιχείου: Συγκρίνοντας με τις μετρούμενες τιμές.

Στο παράδειγμά μας οι μετρούμενες τιμές είναι οι εξής:

$$I_{sc} = 1.015A$$

$$V_{oc} = 20.508A$$

$$I_{pmax} = 0.951A$$

$$V_{pmax} = 17.002V$$

Οι υπολογίσιμες τιμές των εξισώσεων 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 είναι:

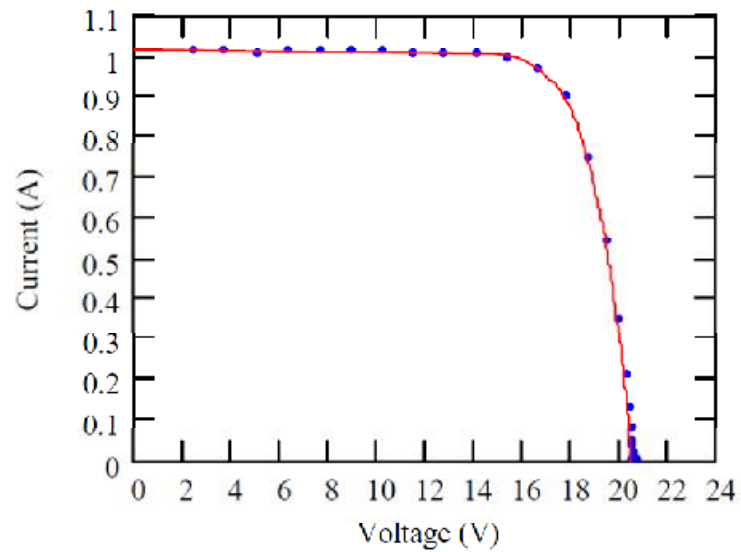
$$M = -1.535 \frac{V}{A}$$

$$R_{pv} = 0.431\Omega$$

$$V_T = 1.12V$$

$$I_o = 1.142 * 10^{-8}A$$

$$I_{ph} = 1.015A$$



Εικόνα 4.1 :

I-V καμπύλη ενός κρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Παράδειγμα 2 : Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου Solarex MSX 40: Έλεγχος της ποιότητας κατά προσέγγιση της αποδιδόμενης χαρακτηριστικής: Συγκρίνοντας με τις μετρούμενες τιμές.

Στο παράδειγμά μας οι μετρούμενες τιμές είναι οι εξής:

$$I_{sc} = 2.874A$$

$$V_{oc} = 22.662V$$

$$I_{pmax} = 2.099A$$

$$V_{pmax} = 14.653V$$

Οι μετρούμενες τιμές των εξισώσεων 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 είναι:

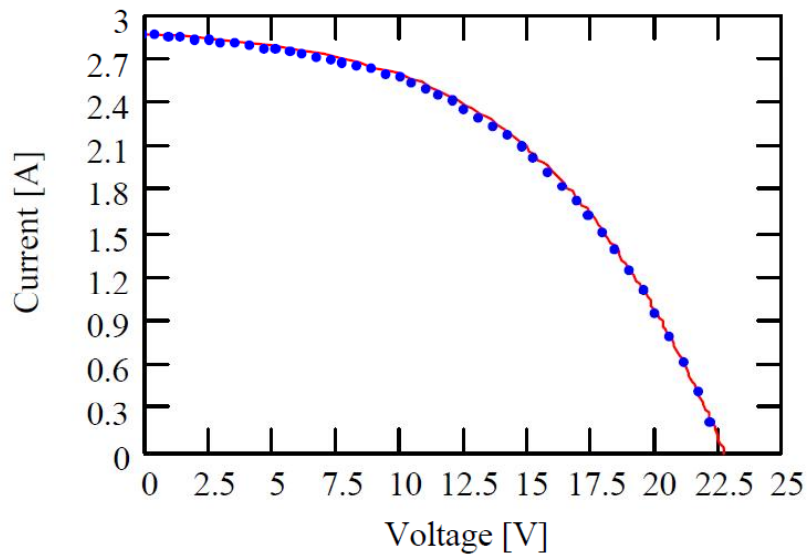
$$M = -2.454 \frac{V}{A}$$

$$R_{pv} = 0.906\Omega$$

$$V_T = 4.804V$$

$$I_o = 0.026A$$

$$I_{ph} = 2.874A$$



Εικόνα 4.2

I-V καμπύλη άμορφου φωτοβολταϊκού στοιχείου

Οι εικόνες 4.1 και 4.2 φαίνονται να συμφωνούν και οι δύο με τις μετρήσεις των I-V καμπυλών απόδοσης του ηλιακού στοιχείου. [22]

4.6.1 Εσωτερική αντίσταση σειράς καθοριζόμενη από δύο I-V καμπύλες

Για την μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης σειράς R_s είναι απαραίτητες δύο I-V καμπύλες με διαφορετική ακτινοβολία αλλά με το ίδιο φάσμα και την ίδια θερμοκρασία σύμφωνα με το IEC 60891.

Από τις δύο χαρακτηριστικές λαμβάνονται δυο σημεία λειτουργίας V_1 και V_2 έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η αντίσταση σειράς.

Τα δύο σημεία λειτουργίας καθορίζονται από τα ακόλουθα:

Ορισμός του διαστήματος ΔI του ρεύματος.

$$\Delta I = 0.5 I_{sc}$$

Εξίσωση 4.16

Καθορισμός δύο σημείων λειτουργίας V_1 και V_2 με δύο εξισώσεις:

$$V_1 = V(I_{sc1} - \Delta I, R_{pv1}, V_{t1}, I_1, I_{ph1})$$

Εξίσωση 4.17

$$V_2 = V(I_{sc2} - \Delta I, R_{pv2}, V_{t2}, I_2, I_{ph2})$$

Εξίσωση 4.18

Υπολογισμός της αντίστασης σειράς:

$$R_s = \frac{V_2 - V_1}{I_{sc1} - I_{sc2}}$$

Εξίσωση 4.19

Για μονά στοιχεία (single cells) η δεύτερη I-V καμπύλη μπορεί να λαμβάνετε με τη σκίαση του στοιχείου (Εικόνα 4.3). [22]



Εικόνα 4.3:

Μέτρηση της R_s για μονά φωτοβολταϊκά στοιχεία.

4.6.2 Καθορισμός εσωτερικής αντίστασης σειράς με μια μόνο I-V καμπύλη υπό φωτισμό (under illumination).

Για μεγάλες φωτοβολταϊκές γεννήτριες (για εφαρμογές πολλών KW) η προηγούμενη μέθοδος δεν εφαρμόζεται. Μια νέα μέθοδος είναι απαραίτητη για να καθορισθεί η εσωτερική αντίσταση σειράς που θα εξάγεται από μία μόνο I-V καμπύλη υπό φωτισμό (under illumination).

Περιορισμός της μέγιστης ισχύος μπορεί να προκαλέσει αύξηση της εσωτερικής αντίστασης σειράς. Για τον καθορισμό της εσωτερικής αντίστασης σειράς που εξάγεται από μια I-V καμπύλη με σκίαση του στοιχείου μπορεί εύκολα να μετρηθεί. Όσο για την μέτρηση της I-V καμπύλης είναι απαραίτητη μια εξωτερική (Σ.Ρ.) πηγή ρεύματος, τέτοιες εξωτερικές πηγές ρεύματος για μεγάλες φωτοβολταϊκές γεννήτριες (για εφαρμογές πολλών KW) είναι πολύ δαπανηρές και δύσκολα διαθέσιμες.

Για την μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης σειράς είναι απαραίτητες δύο I-V καμπύλες με διαφορετική ακτινοβολία αλλά με το ίδιο φάσμα και την ίδια θερμοκρασία σύμφωνα με το IEC 60891. Όσο για το πραγματικό φάσμα κατά την διάρκεια της μέτρησης είναι μη σχετικό με τον υπολογισμό της R_s , η μέτρηση της πρώτης χαρακτηριστικής μπορεί επίσης

$$FF = \frac{I_{pmax1} V_{pmax1}}{I_{sc1} V_{oc1}}$$

Εξίσωση 4.20

$$f_i = \begin{cases} FF & \text{if } FF \geq 0.7 \\ 2.2 * 10^{-9} * e^{28*FF} & \end{cases}$$

Εξίσωση 4.21

$$f_n = 1$$

Το FF είναι ο ίδιος και στις δύο χαρακτηριστικές, έτσι:

$$I_{sc2} = f_i * I_{sc1}$$

Εξίσωση 4.22

$$V_{oc2} = V_{oc1}$$

Εξίσωση 4.23

$$I_{pmax2} = f_i * I_{pmax1}$$

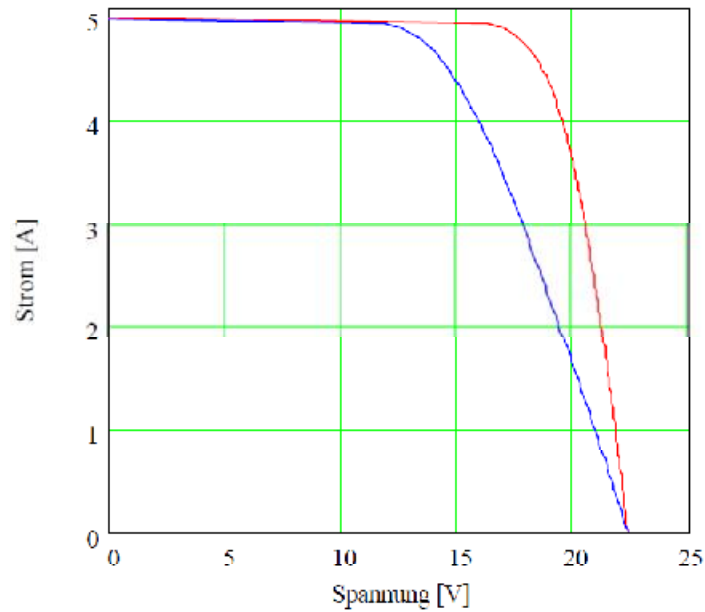
Εξίσωση 4.24

$$V_{pmax2} = V_{pmax1}$$

Εξίσωση 4.25

Ο καθορισμός της αντίστασης σειράς R_s τώρα είναι δυνατός με μία μόνο μέτρηση της I-V χαρακτηριστικής.

Στη συνέχεια αποδεικνύεται η επίδραση της R_s , μέτρηση της R_s ενός BP 585F στοιχείου πρώτα χωρίς επηρεασμό και η δεύτερη μέτρηση με επιπρόσθετη εξωτερική αντίσταση $R_{εξωτ.} = 0.9\Omega$. [22]



5

Σχήμα 4.4

BP585F με παραμόρφωση (κόκκινη καμπύλη) και χωρίς παραμόρφωση (μπλε καμπύλη).

Παράδειγμα 3

Με δεδομένα το $I_{sc} = 5A$, $V_{oc} = 22.3V$, $I_{pmax} = 4.72A$, $V_{pmax} = 18A$ θα βρούμε την πραγματική εσωτερική αντίσταση σε σειρά R_s χωρίς επηρεασμό. Ο κώδικας μέσω MATLAB είναι ο εξής:

```
function ypologismosrs(Voc,Vpmax,Ipmax,Isc);
K1=-5.411;
K2=6.450;
K3=3.417;
K4=-4.422;
Voc1=Voc;
FF= (Ipmax*Vpmax)/ (Isc*Voc)
```

```

if (FF>=0.7)
    fi=FF
else
    fi=2.2*10^-9*exp(28*FF)
end
Isc1=fi*Isc
Isc2=fi*Isc1
Ipmax1=fi*Ipmax
Vpmax1=Vpmax
DI=0.5*Isc1
M=(Voc/Isc)*(K1*((Ipmax*Vpmax)/(Isc*Voc)))+(K2*(Vpmax/Voc))+(K3*(Ipmax/Isc))+(K4)
M1=(Voc1/Isc1)*(K1*((Ipmax1*Vpmax1)/(Isc1*Voc1)))+(K2*(Vpmax1/Voc1))+(K3*(Ipmax1/Isc1))+(K4)
Iph=Isc
Iph1=Isc1
Rpv=-M*(Isc/Ipmax)+((Vpmax/Ipmax)*(1-(Isc/Ipmax)))
Rpv1=-M1*(Isc1/Ipmax1)+((Vpmax1/Ipmax1)*(1-(Isc1/Ipmax1)))
Vt=-((M+Rpv)*Isc)
Vt1=-((M1+Rpv1)*Isc1)
Io=Isc*(exp(-Voc/Vt))
Io1=Isc1*(exp(-Voc1/Vt1))
Voc1=Voc
I=Isc-DI
I1=Isc1-DI
Vcalc=Vt*log((Iph-(Isc-DI)+Io)/Io)-I*Rpv
Vcalc1=Vt1*log((Iph1-(Isc1-DI)+Io1)/Io1)-I1*Rpv1
Rs=((Vcalc1-Vcalc)/(Isc-Isc1))

```

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

```
>> ypologismosrs(22.3,18,4.72,5)
```

FF = 0.7620

fi = 0.7620

Isc1 = 3.8099

Isc2 = 2.9030

$$I_{pmax1} = 3.5965$$

$$V_{pmax1} = 18$$

$$DI = 1.9049$$

$$M = -0.5045$$

$$M1 = -0.6621$$

$$I_{ph} = 5$$

$$I_{ph1} = 3.8099$$

$$R_{pv} = 0.3082$$

$$R_{pv1} = 0.4044$$

$$V_t = 0.9815$$

$$V_{t1} = 0.9815$$

$$I_o = 6.7881e-010$$

$$I_{o1} = 5.1723e-010$$

$$V_{oc1} = 22.3000$$

$$I = 3.0951$$

$$I_1 = 1.904$$

$$V_{calc} = 20.3990$$

$$V_{calc1} = 20.8492$$

$$R_s = 0.3783$$

[22]

Παράδειγμα 4

Με δεδομένα το $I_{sc} = 5A$, $V_{oc} = 22.3V$, $I_{pmax} = 4.51A$, $V_{pmax} = 14.56A$ θα βρούμε την πραγματική εσωτερική αντίσταση σε σειρά R_s με επηρεασμό μια εξωτερικής αντίστασης $R_{εξωτ} = 0.9\Omega$. Ο κώδικας μέσω MATLAB είναι ο εξής:

```
function ypologismosrs(Voc,Vpmax,Ipmax,Isc);
K1=-5.411;
K2=6.450;
K3=3.417;
K4=-4.422;
Voc1=Voc;
FF=(Ipmax*Vpmax)/(Isc*Voc)
if (FF>=0.7)
    fi=FF
else
    fi=2.2*10^-9*exp(28*FF)
end
Isc1=fi*Isc
Isc2=fi*Isc1
Ipmax1=fi*Ipmax
Vpmax1=Vpmax
DI=0.5*Isc1
M=(Voc/Isc)*(K1*((Ipmax*Vpmax)/(Isc*Voc)))+(K2*(Vpmax/Voc))+(K3*(Ipmax/Isc))+(K4)
M1=(Voc1/Isc1)*(K1*((Ipmax1*Vpmax1)/(Isc1*Voc1)))+(K2*(Vpmax1/Voc1))+(K3*(Ipmax1/Isc1))+(K4)
Iph=Isc
Iph1=Isc1
Rpv=-M*(Isc/Ipmax)+((Vpmax/Ipmax)*(1-(Isc/Ipmax)))
Rpv1=-M1*(Isc1/Ipmax1)+((Vpmax1/Ipmax1)*(1-(Isc1/Ipmax1)))
Vt=-((M+Rpv)*Isc)
Vt1=-((M1+Rpv1)*Isc1)
Io=Isc*(exp(-Voc/Vt))
Io1=Isc1*(exp(-Voc1/Vt1))
Voc1=Voc
I=Isc-DI
I1=Isc1-DI
Vcalc=Vt*log((Iph-(Isc-DI)+Io)/Io)-I*Rpv
```

$$V_{calc1} = V_t \cdot \log\left(\frac{I_{ph1} - (I_{sc1} - DI) + I_{o1}}{I_{o1}}\right) - I_1 \cdot R_{pv1}$$
$$R_s = \frac{(V_{calc1} - V_{calc})}{(I_{sc} - I_{sc1})}$$

Τα αποτελέσματα του δεύτερου παραδείγματος είναι τα εξής:

>> `ypologismosrs(22.3,14.56,4.51,5)`

FF = 0.5889

fi = 0.0319

Isc1 = 0.1596

Isc2 = 0.0051

I_{pmax1} = 0.1439

V_{pmax1} = 14.5600

DI = 0.0798

M = -1.4061

M1 = -44.0615

I_{ph} = 5

I_{ph1} = 0.1596

R_{pv} = 1.2081

R_{pv1} = 37.8572

V_t = 0.9900

V_{t1} = 0.9900

$$I_0 = 8.2392e-010$$

$$I_{01} = 2.6292e-011$$

$$V_{oc1} = 22.3000$$

$$I = 4.9202$$

$$I_1 = 0.0798$$

$$V_{calc} = 12.2597$$

$$V_{calc1} = 18.5936$$

$$R_s = 1.3086$$

[22]

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

5.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Ο συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου (n_c) εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (P_{max}), προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας (I_T) που δέχεται στην επιφάνειά του (A_c).

$$n_c = \frac{P_{max}}{A_c * I_T}$$

Εξίσωση 5.1

Επίσης μπορεί να γραφεί :

$$n_c = \frac{i_m * v_m}{A_c * I_T} = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{A_c * I_T} * 100\%$$

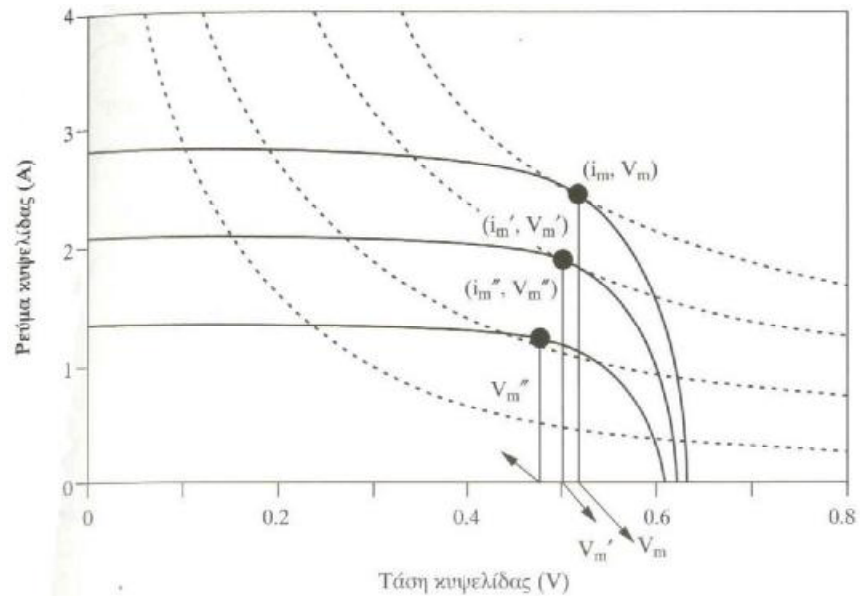
Εξίσωση 5.2

Όπου

i_m το ρεύμα του μέγιστου σημείου

v_m η τάση του μέγιστου σημείου

Τα σημεία i_m και v_m απεικονίζονται στην εικόνα 5.1 η οποία φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5.1

Φαίνεται το ρεύμα και η τάση κυψελίδας. Γραφική απεικόνιση του i_m και v_m

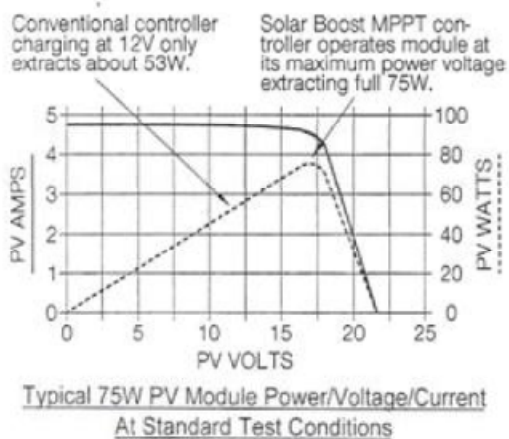
Η απόδοση ενός Φωτοβολταϊκού Συστήματος εξαρτάται από :

- Από το κλίμα της περιοχής (όσο λιγότερες είναι οι μέρες ηλιοφάνειας, τόσο μικρότερη είναι η απόδοση π.χ. Δυτική Ελλάδα).
- Από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής (όσο πιο νότια είναι η περιοχή, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας).
- Από την κλίση των Φ/Β πάνελ ως προς το οριζόντιο επίπεδο (η βέλτιστη απόδοση είναι με νότιο προσανατολισμό και κλίση περίπου 30°).
- Από την ηλικία των Φ/Β πάνελ (υπολογίζεται ότι τα πάνελ έχουν διάρκεια ζωής 20-30 έτη με απόδοση έως και 80% για τα 20 πρώτα έτη). [21]

5.2 ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (MPPT);

Το Σύστημα Εντοπισμού Σημείου Μέγιστης Ισχύος ή Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (Maximum Power Point Tracking ή MPPT) είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα το οποίο εκμεταλλεύονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια. Το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. δεν είναι ένα μηχανικό σύστημα ανίχνευσης το οποίο «μετακινεί φυσικά» τα μοντέλα προς την κατεύθυνση του ήλιου. Το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. είναι ένα πλήρως ηλεκτρικό σύστημα το οποίο μεταβάλλει τις ηλεκτρικές παραμέτρους των μοντέλων ώστε να απορροφούν τη μέγιστη ενέργεια. Η περίσσεια ενέργεια που δεν απορροφά το φορτίο αποθηκεύεται π.χ. χρησιμοποιείται στη φόρτιση της συστοιχίας συσσωρευτών. Το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με ένα μηχανικό σύστημα ανίχνευσης, αλλά τα δύο συστήματα είναι τελείως διαφορετικά.

Για να καταλάβουμε πως λειτουργεί το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ας σκεφτούμε τη λειτουργία ενός συμβατικού ελεγκτή φόρτισης (μη - Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.). Όταν ένας συμβατικός ελεγκτής φορτίζει μια άδεια μπαταρία απλά συνδέει τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατευθείαν με τη μπαταρία. Αυτό κάνει τα φωτοβολταϊκά συστήματα να βάζουν σε λειτουργία τη μπαταρία, αλλά όχι με την τάση με την οποία είναι ικανά να παράγουν τη μέγιστη ισχύ. Η εικόνα 5.2 δείχνει την τυπική καμπύλη ρεύματος/τάσης για ένα τυπικό φωτοβολταϊκό στοιχείο 75W στις κανονικές συνθήκες ελέγχου των 25°C θερμοκρασίας κυψέλης και 1000W/m² της ηλιακής ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, ο συμβατικός ελεγκτής απλά συνδέει το φωτοβολταϊκό στοιχείο στη μπαταρία και κατά συνέπεια αυτό το να λειτουργεί στα 12V. Αναγκάζοντας το μοντέλο των 75W να λειτουργεί στα 12V ο συμβατικός ελεγκτής περιορίζει την παραγωγή ισχύος περίπου στα 53W.



Εικόνα 5.2

Απεικόνιση του Ρεύματος συναρτήσει της τάσης για ένα τυπικό μοντέλο των 75W σε θερμοκρασία 25°C

Αντί απλά να συνδέσουμε το φωτοβολταϊκό στοιχείο στη μπαταρία, το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. υπολογίζει την τάση κατά την οποία το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι σε θέση να παράγει τη μέγιστη ισχύ του. Σ' αυτό το παράδειγμα, η τάση μέγιστης ισχύς είναι 17V. Το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. λειτουργεί σε τάση 17V και στην έξοδο του δίνει ισχύ 75W, ανεξάρτητα της τάσης της μπαταρίας. Ένας υψηλής απόδοσης Σ.Ρ./Σ.Ρ. μετατροπέας ισχύος μετατρέπει τα 17V τάσης εισόδου στον ελεγκτή σε τάση εξόδου στην μπαταρία. Αν το σύστημα ήταν ιδανικό δηλαδή $P_{in}=P_{out} \Rightarrow I_{\Phi/B} * V_{\Phi/B} = I_{ΜΠΑΤ} * V_{ΜΠΑΤ}$ τότε η φόρτιση της μπαταρίας θα ήταν:

$$V_{\Phi/B} / V_{ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ} * I_{\Phi/B}, \text{ ή } 17V / 12V * 4.45A = 6.30A.$$

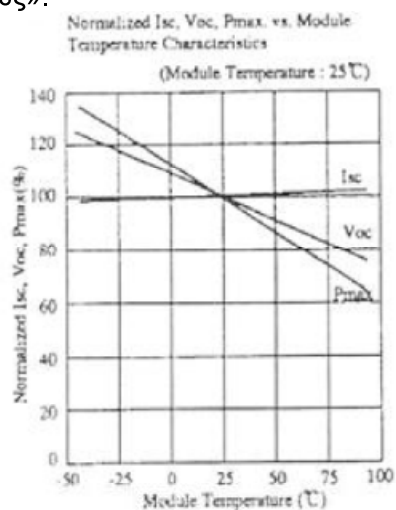
Όπου $V_{\Phi/B}$ = Η τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού στοιχείου

$V_{ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ}$ = Η τάση της μπαταρίας

Ο ρυθμός φόρτισης της μπαταρίας αυξάνεται κατά 42% ή 1.85A. Αλλά το σύστημα μας δεν είναι ιδανικό και έχουμε απώλεια ισχύος από καλωδιώσεις, ασφάλειες και διακοπτικά φαινόμενα.

Η πραγματική αύξηση της φόρτισης ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Όπως φαίνεται παρακάτω όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ανάμεσα στην μέγιστη ισχύ του φωτοβολταϊκού (PV) μοντέλου

και στα Volts της μπαταρίας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αύξηση της φόρτισης. Όσο πιο χαμηλές είναι οι θερμοκρασίες των κυψελών του φωτοβολταϊκού μοντέλου τόσο περισσότερη τάση μέγιστης ισχύος V_{MP} παράγουν και κατά συνέπεια αυξάνεται περισσότερο η φόρτιση. Αυτό συμβαίνει γιατί η τάση μέγιστης ισχύος V_{MP} και η διαθέσιμη ισχύς αυξάνεται όσο η θερμοκρασία των κυψελών μειώνεται όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία στους 25°C με τάση μεγαλύτερη από 17V αυξάνουν περισσότερο την φόρτιση για την διαφορά ανάμεσα στην πραγματική τάση μέγιστης ισχύος V_{MP} και στην τάση της μπαταρίας. Μία αρχικά υψηλή αποφόρτιση της μπαταρίας αυξάνει επίσης την φόρτιση. Όσο η τάση της μπαταρίας είναι χαμηλή τότε η έξοδος στην μπαταρία κατά την διάρκεια του Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. μπορεί να θεωρηθεί «συνεχής ισχύς».



Typical PV Module Temperature Performance

Εικόνα 5.3

Απεικόνιση των Isc, Voc και Pmax όσο η θερμοκρασία αυξάνει. Όπου Voc η τάση της μπαταρίας και Pmax η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταϊκού

Στις περισσότερες περιπτώσεις παρατηρείται μια αύξηση 10% – 25% της απόδοσης. Χαμηλότερες θερμοκρασίες και αποφορτισμένες μπαταρίες μπορούν να παράγουν αύξηση σε ποσοστό άνω των 30%. Σε ψυχρά κλίματα έχουν αναφέρει τρέχουσες αυξήσεις ποσοστών που υπερβαίνουν το 40%. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση τείνει να είναι μεγαλύτερη όταν οι ανάγκες είναι μεγαλύτερες. Σε ψυχρές συνθήκες όταν η μέρα είναι μικρή, ο ήλιος είναι χαμηλά στον ορίζοντα, οι μπαταρίες αποφορτίζονται περισσότερο. Σε συνθήκες που δεν υπάρχει περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια (υψηλά φορτισμένη μπαταρία και ζεστά φωτοβολταϊκά μοντέλα) ένας Ελεγκτής Ηλιακής Ενίσχυσης (Solar Boost) θα λειτουργήσει σαν ένας τυπικός ελεγκτής Διαμόρφωσης Εύρους παλμών ή Δ.Ε.Π. (PWM). [23]

5.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Ο αλγόριθμος ελέγχου του Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. βασίζεται στην επεξεργασία της τρέχουσας τάσης και της χαμηλής συχνότητας ταλάντωσης που εισάγονται στα τμήματα του φωτοβολταϊκού από την ενιαία τάση του δικτύου για την μέγιστη απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο. Ο αλγόριθμος έχει αναπτυχθεί για να επιτρέπει μια σειρά από διατάξεις φωτοβολταϊκών να συνδεθούν με το δίκτυο με την χρήση ενός μονοβάθμιου μετατροπέα.

5.3.1 Εισαγωγή

Η ροή ενέργειας μεταξύ του φωτοβολταϊκού μοντέλου και του δικτύου ελέγχεται από το Σύστημα Διαμόρφωσης Ισχύος (Σ.Δ.Ι.), το οποίο πρέπει να είναι αξιόπιστο και φτηνό. Για να επιτύχει την μέγιστη αποτελεσματικότητα του συστήματος, το (Σ.Δ.Ι.) πρέπει να διατηρήσει την ισχύ που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (PV panels) κοντά στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Σ.Μ.Ι). Έχουν προταθεί διάφορες

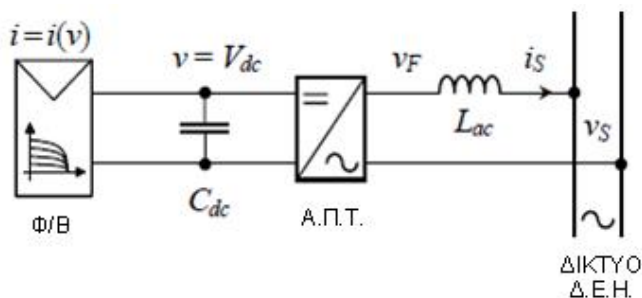
λύσεις για την (Σ.Δ.Ι.) με σύστημα εντοπισμού σημείου μέγιστης ισχύος (Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.) με βάση τόσο το μονοβάθμιο όσο και το διβάθμιο μετατροπέα.

Παρακάτω θα ασχοληθούμε με μία μόνο φάση και ένα μονοβάθμιο (Σ.Μ.Ι.), χρησιμοποιώντας ένα απλό και αποτελεσματικό ενσωματωμένο αλγόριθμο για το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.

5.3.2 Αρχή λειτουργίας

Στην εικόνα 5.4 αντιστροφείας πηγής τάσης (Α.Π.Τ.) ελέγχει την τάση εξόδου V_F , ώστε να διοχετεύσει ρεύμα στο δίκτυο I_S και να ακολουθήσει μια ημιτονοειδής κυματομορφή αναφοράς, συγχρονιζόμενη και στην φάση με την θεμελιώδη συνιστώσα της τάσης σε σχέση με την πηγή V_S . Ως συνέπεια, μια ημιτονοειδής τάση προκύπτει ακόμα και από διαταραχές της τάσης που προέρχονται από το δίκτυο. Το εύρος της αναφοράς της πηγής του ρεύματος I_S προέρχεται από την σύνδεση Σ.Ρ. ρυθμιστή τάσης με βάση το σφάλμα μεταξύ της τάσης V_{DC} και της αναφοράς τάσης Σ.Ρ. V_{DS} των φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Ο αλγόριθμος Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ποικίλει ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες με σκοπό να κρατήσει το σημείο λειτουργίας των Φ/Β στοιχείων κοντά στο Σ.Μ.Ι.



Εικόνα 5.4

Σχηματικό Διάγραμμα από Φ/Β γεννήτριας

Η βασική αρχή του αλγόριθμου Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. είναι η εκμετάλλευση της έντασης και των ταλαντώσεων της τάσης που προκαλούνται από την διπλή συχνότητα των παλμών της στιγμιαίας ισχύς, οι οποίες είναι έμφυτες σε ένα μονοφασικό σύστημα ισχύος. Αναλύοντας αυτές τις ταλαντώσεις είναι δυνατόν να πάρουμε πληροφορίες σχετικά με την κλίση της ισχύος, δηλαδή αν το σύστημα φωτοβολταϊκών λειτουργεί κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Όπως είναι γνωστό, για μια μηδενική τιμή της ενεργού ισχύος που εισάγεται σε ένα μονοφασικό δίκτυο P_S , η στιγμιαία ισχύς $P_S(t)$ πάλλεται με συχνότητα διπλάσια από αυτή του δικτύου. Αν η τάση $V_S(t)$ είναι συμφασική με την πηγή τάσης $V_s(t)$, η στιγμιαία ισχύς που εισέρχεται στο δίκτυο είναι

$$\begin{aligned} P_S(t) &= v_S(t) i_S(t) = \sqrt{2}V_S \cos \omega t \sqrt{2}I_S \cos \omega t \\ &= V_S I_S (1 + \cos 2\omega t). \end{aligned}$$

Εξίσωση 5.3

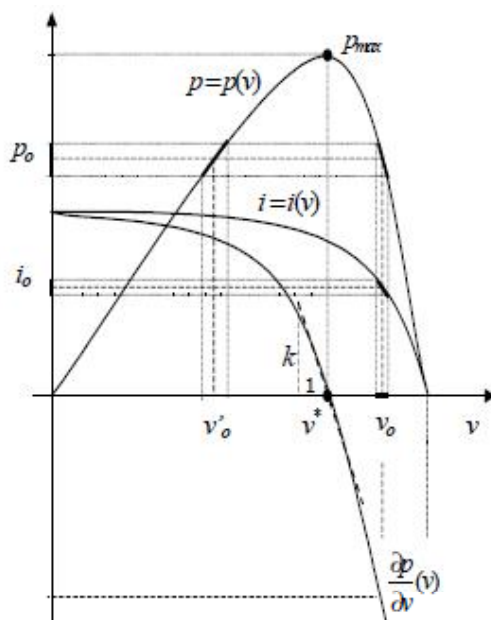
Η μέγιστη ποσότητα V_S , I_S αντιστοιχεί στην ενεργό ισχύ P_S . Η ισχύς που πάλλεται με γωνιακή συχνότητα 2ω αντικατοπτρίζεται στο ζυγό της σύνδεσης συνεχούς ρεύματος (DC – link) του Α.Π.Τ. ως παλμοί τάσης στη σύνδεση συνεχούς ρεύματος του V_{DC} . Η διακύμανση του V_{DC} μπορεί να σχετίζεται με την ενεργό ισχύ P_S , με γωνιακή συχνότητα δικτύου ω , και την Σ.Ρ. σύνδεση πυκνωτή με την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{P_S}{\omega} = C_{dc} (V_{dcMAX}^2 - V_{dcMIN}^2).$$

Εξίσωση 5.4

Η τάση σύνδεσης Σ.Ρ. ($V_{dcmax}^2 - V_{dcmin}^2$) μπορεί να περιοριστεί επιλέγοντας την κατάλληλη τιμή του πυκνωτή Σ.Ρ. (C_{dc}), σύμφωνα με την εξίσωση 5.4, ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή λειτουργία του αντιστροφέα. Το υπόλοιπο της ταλάντωσης V_{DC} καθορίζει ένα παλμό της ισχύος που υποστηρίζεται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Με βάση τη σχέση

ανάμεσα στην ισχύ και την ταλάντωση της τάσης, ο αλγόριθμος Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. μετακινεί το σημείο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε διαφορετικό V_{DC} μέχρι να επιτευχθεί το σημείο μέγιστης ισχύος (Σ.Μ.Ι.). Οι ταλαντώσεις της τάσης και του ρεύματος πρέπει να είναι όσο πιο μικρές γίνεται ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ταλαντώσεις της ισχύος Σ.Μ.Ι. που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά. Από την άλλη μεριά αυτές οι ταλαντώσεις πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να ανιχνεύονται και να διακρίνονται από το ρεύμα και τους κυματισμούς τάσης λόγω των επιδράσεων των διακοπτικών φαινομένων του Α.Π.Τ. Έχει παρατηρηθεί ότι κρατώντας την ταλάντωση του ρεύματος και της τάσης γύρω στο 1% της ονομαστικής τους τιμής οδηγεί σε καλή λειτουργία ολόκληρου του φωτοβολταϊκού συστήματος. [24]



Εικόνα 5.5

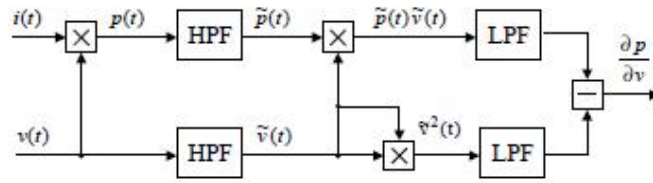
Ρεύμα, Ισχύς και παραγόμενη ισχύς από τις Φ/Β συστοιχίες σε σχέση με την τάση

5.3.3 Ανάλυση του αλγόριθμου Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (MPPT)

Όλοι οι αλγόριθμοι Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (MPPT) έχουν σχεδιασθεί για να εξάγουν δυναμικά τη μέγιστη ισχύ από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Συνήθως, η συνθήκη εύρεσης της μέγιστης ισχύος $\partial p/\partial v = 0$ έχει υιοθετηθεί για να εντοπίζεται αυτό το σημείο λειτουργίας αφού τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παρουσιάζουν ένα μοναδικό σημείο μέγιστης ισχύος.

Οι αλγόριθμοι Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (MPPT) βασίζονται στο προσδιορισμό της μεταβολής της ισχύος εξόδου ∂p των φωτοβολταϊκών στοιχείων έναντι της μεταβολής της ∂v τάσης, δηλαδή τον $\partial p/\partial v$. Η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και της τάσης V που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ του σημείου λειτουργίας χρησιμοποιείται σαν τιμή σφάλματος του κυκλώματος ελέγχου. Η ποιοτική συμπεριφορά του $\partial p/\partial v$ φαίνεται στην εικόνα 5.5. Στην περιοχή γύρω από το V η ισχύς που παράγεται μπορεί να θεωρηθεί μια ευθεία γραμμή με κλίση k .

Για να καθοριστεί η τιμή των παραγώγων $\partial p/\partial v$ είναι απαραίτητο να εισαχθεί μια αστάθεια ρεύματος και τάσης γύρω από κάθε σημείο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Παραδοσιακά ο αλγόριθμος Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. είναι βασισμένος στη μέθοδο της «διαταραχής και παρατήρησης» ή στη μέθοδο της «αυξητικής αγωγιμότητας». Ορισμένες παραλλαγές αυτών των μεθόδων έχουν παρουσιασθεί προκειμένου να βελτιωθεί η δυναμική απόδοση και για την μείωση των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος (Σ.Μ.Ι). Μια εναλλακτική μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση και την επεξεργασία του ρεύματος ή στο κυματισμό της τάσης λόγω της μεταστροφής της συμπεριφοράς του μετατροπέα που συνδέεται με την διάταξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως «έλεγχος αντιστοιχίας κυμάτων». [24]



Εικόνα 5.6

Εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος από Φ/Β με χρήση φιλτραρισμένων τμημάτων

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο συνήθως αποτελείται από μια διάταξη η οποία μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, έναν μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. που μετατρέπει τη χαμηλή τάση που παράγεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο σε υψηλή τάση Σ.Ρ., έναν αντιστροφέα που μετατρέπει την υψηλή τάση Σ.Ρ. (dc) σε μονοφασική ή τριφασική τάση Ε.Ρ. και έναν ψηφιακό ελεγκτή ο οποίος ελέγχει το σύστημα και εφαρμόζει τον αλγόριθμο Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ελέγχοντας το ρεύμα και την τάση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ο αλγόριθμος Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. χρησιμεύει στο να αυξάνει την αποδοτικότητα του συστήματος.

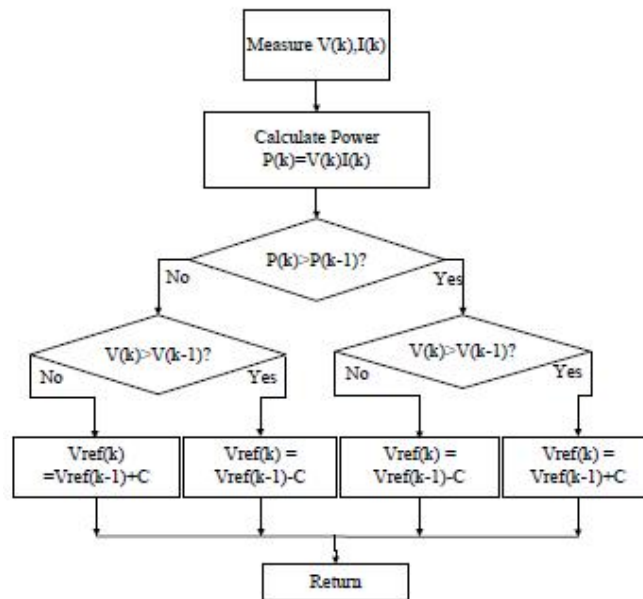
Το φωτοβολταϊκό σύστημα που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική είναι γενικά πολυδάπανο και είναι καλός τρόπος παραγωγής ενέργειας μόνο αν μπορεί να έχει τη μέγιστη δυνατή απόδοση από όλες τις καιρικές συνθήκες. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει ένα χαρακτηριστικό μη γραμμικό ρεύμα-τάση το οποίο ποικίλει με την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία που επηρεάζουν σημαντικά την παραγόμενη ενέργεια της διάταξης. Ο έλεγχος Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι επομένως κρίσιμος για την επιτυχία του συστήματος. Οι αλγόριθμοι Σ.Ε.Σ.Μ.Ι., κυμαίνονται από απλούς αναρριχόμενους αλγόριθμους μέχρι αλγόριθμους ασαφούς λογικής και νευρωνικών δικτύων. Ο αναρριχόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιείται ευρέως στα πρακτικά φωτοβολταϊκά στοιχεία γιατί είναι απλός και επειδή δεν απαιτεί προηγούμενη γνώση ή προσχέδιο των χαρακτηριστικών της πηγής και μπορεί να ερμηνεύσει την κίνηση των χαρακτηριστικών που

προκύπτουν από το παλαίωση, τη φωτοσκίαση ή άλλες λειτουργικές ιδιαιτερότητες. Ο βασικός αναρριχόμενος αλγόριθμος είναι ο αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης (P&O). Ωστόσο ο αλγόριθμος Δ.&Π. λειτουργεί καλά όταν η ακτινοβολία αλλάζει αργά, παρουσιάζει αστάθεια στις γρήγορες αλλαγές του επιπέδου της ακτινοβολίας το οποίο προκαλεί λάθος ή αργό Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. . Αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη του αλγόριθμου Τροποποιημένης Διαταραχής και Παρατήρησης ή Τ.Δ.&Π. (MP&O). Ο αλγόριθμος Τ.Δ.&Π. (MP&O) βελτιώνει τον αλγόριθμο Δ.&Π. σε βάρος της ταχύτητας ανταπόκρισης στις αλλαγές της ακτινοβολίας. Μία νέα μέθοδος η Εκτίμησης Διαταραχής και Διαταραχής ή Ε.Δ.&Δ. (EPP), φαίνεται να έχει καλή απόδοση. Ο αλγόριθμος Ε.Δ.&Δ. χρησιμοποιεί μια εκτίμηση για κάθε δύο διαταραχές που προκύπτουν από μια γρήγορη αντίδραση στις αλλαγές της ακτινοβολίας, που οδηγούν σε μια σημαντικά υψηλότερη παραγωγή ισχύος του φωτοβολταϊκού στοιχείου. [25]

6.2 ΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ (Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ή MPPT)

6.2.1 Διαταραχή και παρατήρηση

Η μέθοδος Δ.&Π. (P&O) είναι ο πιο δημοφιλής Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. αλγόριθμος λόγω της απλότητάς του. Στην εικόνα 6.1 φαίνεται η μέθοδος Δ.&Π. (P&O). Μετά από μια διαταραχή η ισχύς του ρεύματος υπολογίζεται και συγκρίνεται με την προηγούμενη τιμή για να προσδιοριστεί η αλλαγή της ισχύος ΔP . Αν $\Delta P > 0$, τότε η λειτουργία συνεχίζεται προς την ίδια κατεύθυνση με τη διαταραχή. Διαφορετικά, η λειτουργία ακολουθεί την κατεύθυνση της διαταραχής. [25]



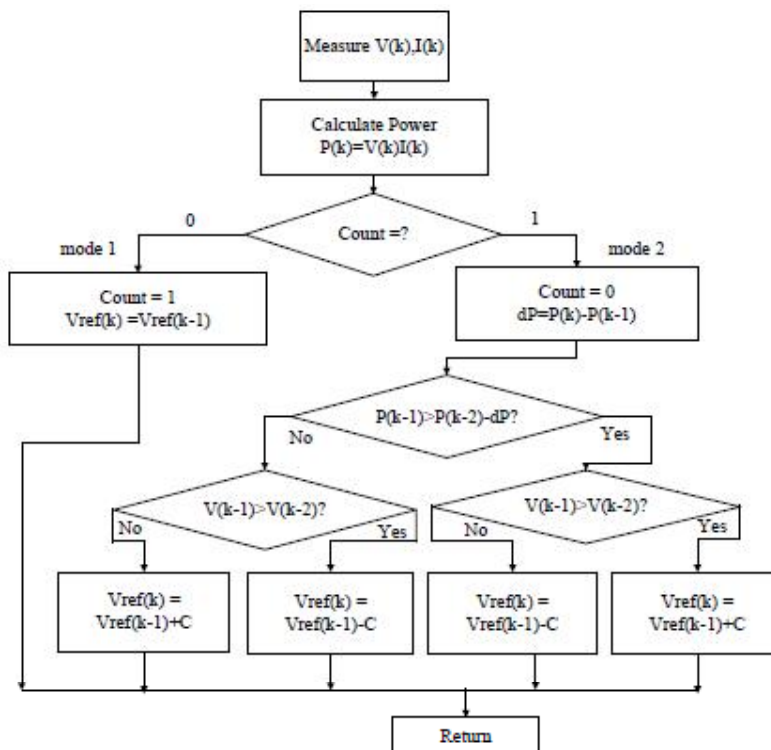
Εικόνα 6.1

Διάγραμμα Ροής του αλγορίθμου Δ.&Π. (P&O)

Τροποποιημένη διαταραχή και παρατήρηση

Η μέθοδος Τροποποιημένης Διαταραχής και Παρατήρησης (MP&O) εφαρμόζει μια τεχνική αναρρίχησης, η οποία λειτουργεί καλά στις αργές αλλαγές του περιβάλλοντος αλλά έχει κάποιους περιορισμούς κάτω από γρήγορες ατμοσφαιρικές αλλαγές. Οι μέθοδοι μπορούν να οδηγήσουν σε λάθος ή αργό Σ.Ε.Σ.Μ.Ι..

Για να λυθούν τέτοια προβλήματα η μέθοδος Τ.Δ.&Π. (MP&O), που παρουσιάζεται στην εικόνα 6.2, απομονώνει την αυξομείωση των διαταραχών που προκαλούνται από την ακτινοβολία ή την αλλαγή του καιρού.



Εικόνα 6.2

Διάγραμμα Ροής από αλγόριθμο Τ.Δ.&Π. (MP&O)

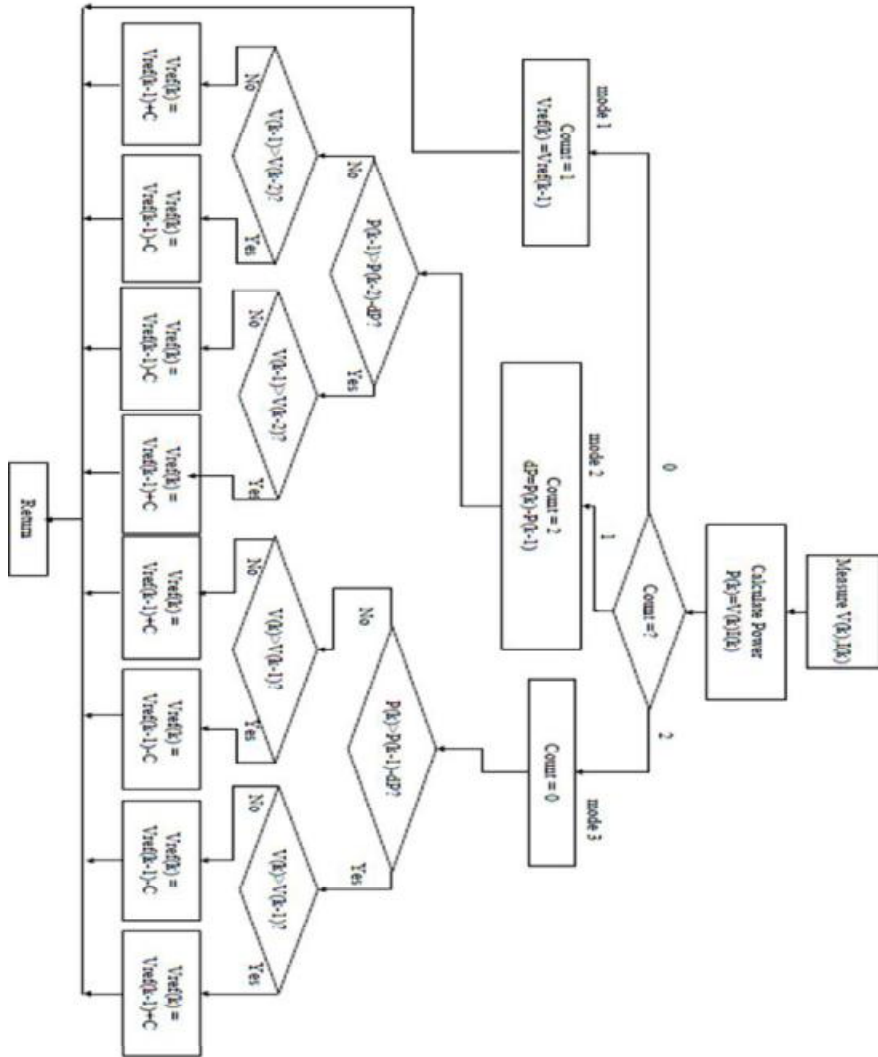
Αυτή η μέθοδος προσθέτει μια εκτίμηση στη διαδικασία της αλλαγής της ακτινοβολίας σε κάθε διαταραχή για να μετρήσει το πόσο άλλαξε η ισχύς λόγω της ατμοσφαιρικής αλλαγής.

Επειδή η διαδικασία εκτίμησης του σημείου Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. σταματά κρατώντας την τάση του φωτοβολταϊκού σταθερή, η ταχύτητα της μεθόδου Τ.Δ.&Π. (MP&O) είναι μόνο η μισή της συμβατικής μεθόδου Δ.&Π. (P&O). [25]

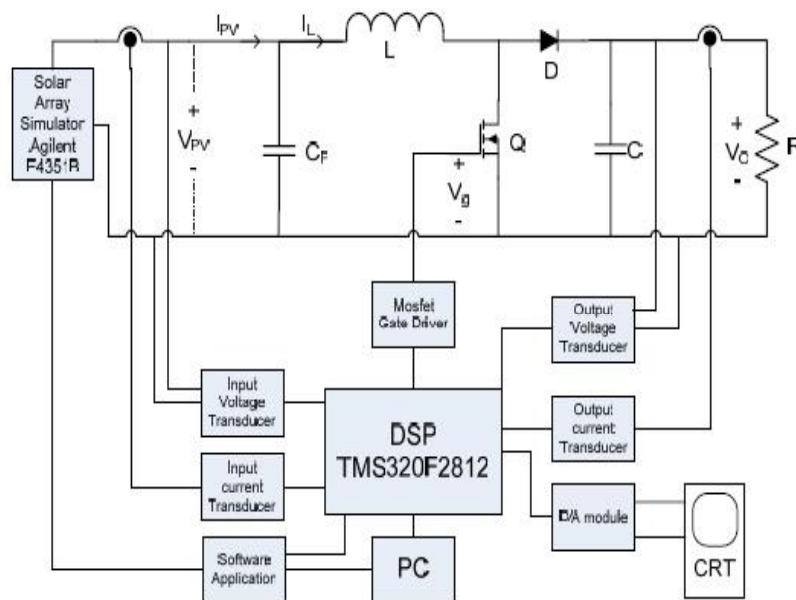
6.2.2 Εκτίμηση, διαταραχή και διαταραχή (Ε.Δ.Δ.) (Perturb and Perturb)

Ο αλγόριθμος Ε.Δ.Δ. χρησιμοποιήθηκε για να αυξήσει την ταχύτητα του αλγόριθμου Τ.Δ.&Π. κρατώντας τα βασικά του χαρακτηριστικά. Όταν συγκρίνεται με τον αλγόριθμο Τ.Δ.&Π., ο αλγόριθμος Ε.Δ.Δ. που χρησιμοποιεί μια μέθοδο εκτίμησης για κάθε δύο διαταραχές, αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα ελέγχου του Σ.Ε.Σ.Μ.Ι., χωρίς να μειώνει την ακρίβειά του.

Συγκρινόμενος με τον αλγόριθμο Τ.Δ.&Π., ο αλγόριθμος Ε.Δ.Δ. εικόνα 6.3 έχει ταχύτητα 1,5 φορές μεγαλύτερη αλλά έχει τον ίδιο χρόνο καθυστέρησης ανάμεσα στη διαδικασία εκτίμησης και τη διαδικασία διαταραχής. Γι' αυτό ο αλγόριθμος Ε.Δ.Δ. έχει φανερά πλεονεκτήματα έναντι του αλγόριθμου Τ.Δ.&Π.. [25]



Εικόνα 6.3
Διάγραμμα Ροής του Ε.Δ.&Δ. (EPP) αλγορίθμου



Εικόνα 6.4

Σχηματικό Διάγραμμα Φ/Β συστήματος με έλεγχο Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.

6.2.3 Παράδειγμα υλοποίησης Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (MPPT)

Υπόδειγμα πραγματικής διάταξης μετατροπέα ελεγχόμενου από Επεξεργαστή Ψηφιακού Σήματος (DSP).

Ο αλγόριθμος Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. και ο έλεγχος του μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ. εφαρμόζονται στον εξομοιωτή (Simulator) Επεξεργαστή Ψηφιακού Σήματος (Ε.Ψ.Σ.) TI TMS320F2812. Ο Ε.Ψ.Σ. (Digital Signal Processor) μετράει το εισερχόμενο ρεύμα και την εισερχόμενη τάση με ένα μοντέλο A/D και υπολογίζει την ισχύ που παράγεται από τον Εξομοιωτή Ηλιακού Στοιχείου (Solar Array Simulator). Ο κύκλος του εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιείται καθώς ο έλεγχος είναι μεταβλητός ώστε να

απλοποιεί τον έλεγχο της δομής του συστήματος. Η ισχύς που υπολογίζεται μαζί με την ισχύ που τροφοδοτείται από το λογισμικό προωθείται στο μοντέλο D/A ώστε να μπορούν οι αλγόριθμοι Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. να συγκριθούν και να αναλυθούν. Το μοντέλο D/A εφαρμόζεται ως σήμα PWM και ως ένα διβάθμιο χαμηλοδιαβατό (two-stage low-pass) φίλτρο. Ο ρυθμός εκτέλεσης του αλγόριθμου (Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.) είναι ρυθμισμένος στα 25 msec. Αυτό το μέγεθος ανακαλύφθηκε πειραματικά ρυθμίζοντας το όσο πιο γρήγορα ήταν δυνατό χωρίς να προκαλείται αστάθεια στο σύστημα, αφού ο τόσο γρήγορος ρυθμός θα μπορούσε να κάνει το σύστημα ασταθές εξαιτίας της σχετικά μακράς σταθερότητας της ισχύος. Η εγκατάσταση που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πείραμα φαίνεται στην εικόνα 6.5 (το πείραμα και συνεπώς η διάταξη που φαίνεται στην εικόνα 6.5 δεν την πραγματοποιήσαμε εμείς αλλά δανειστήκαμε τα στοιχεία που αναφέρουμε σε όλο το κεφάλαιο 6 από την πηγή [25]).

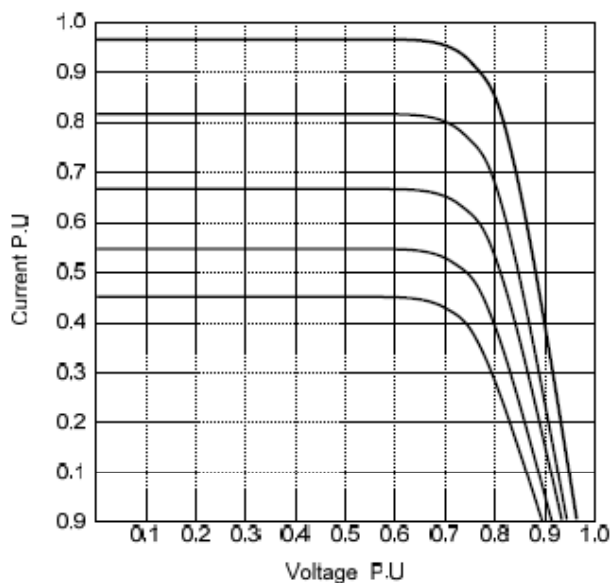


Εικόνα 6.5

Πρότυπο πείραμα με ισχύ 1KW

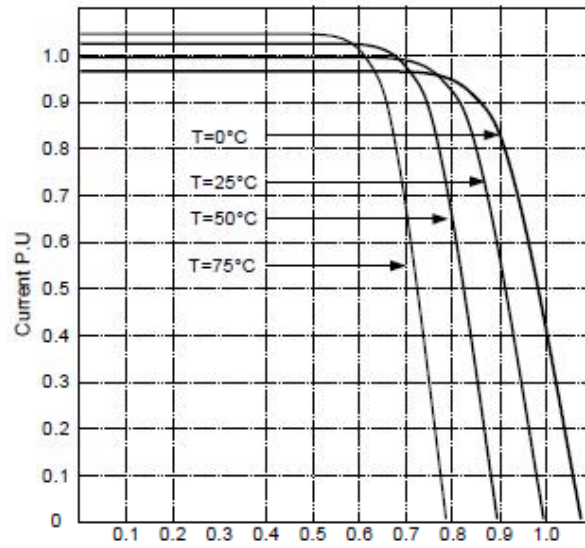
6.3 ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Η εγκατάσταση που περιγράφηκε παραπάνω χρησιμοποιήθηκε για να ελεγχθούν οι αλγόριθμοι Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. Η εικόνα 6.8 παρουσιάζει την κυματομορφή της παραγόμενης ισχύος από τον μετατροπέα, το πηνίο του ρεύματος και την θύρα παλμών. Οι εικόνες 6.6 και 6.7 δείχνουν την αλλαγή των χαρακτηριστικών του ρεύματος-τάσης του φωτοβολταϊκού εξαιτίας της αλλαγής της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Οι εικόνες 6.9, 6.10 και 6.11 απεικονίζουν την κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος από την διάταξη φωτοβολταϊκών, κάτω από σταθερές συνθήκες ισχύος, με τους αλγόριθμους Δ.&Π., Τ.Δ.&Π. και Ε.Δ.&Δ., αντίστοιχα. [25]

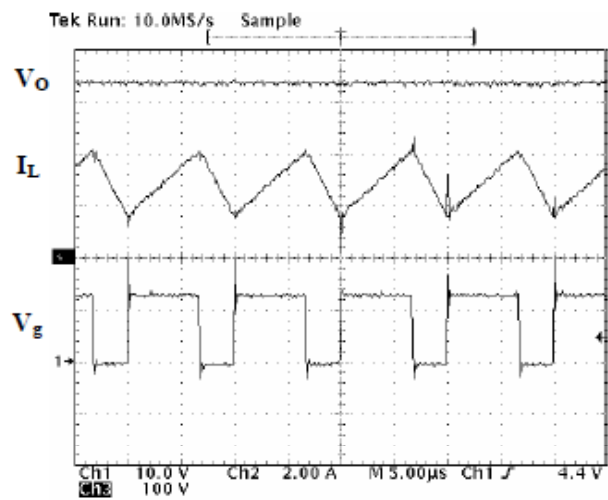


Εικόνα 6.6

Αλλαγή χαρακτηριστικών της τάσης του Φ/Β εξαιτίας της αλλαγής της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας

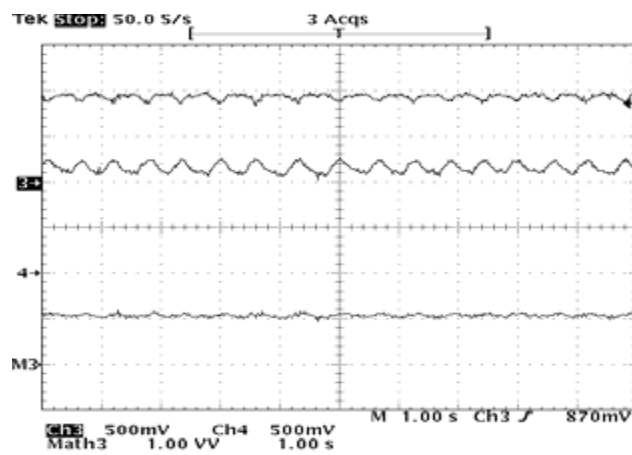
**Εικόνα 6.7**

Αλλαγή χαρακτηριστικών της τάσης το Φ/Β εξαιτίας της αλλαγής της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας



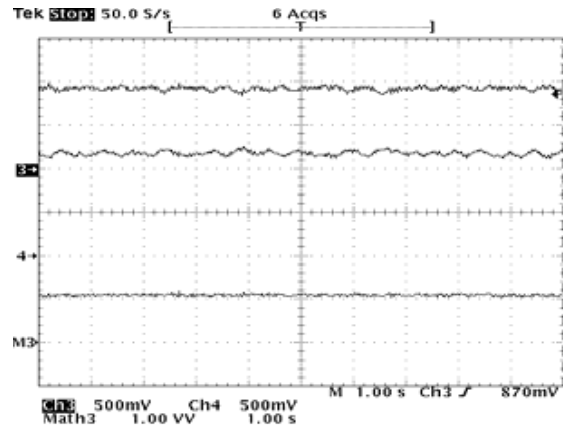
Εικόνα 6.8

Παραγωγή Ισχύος από τον μετατροπέα



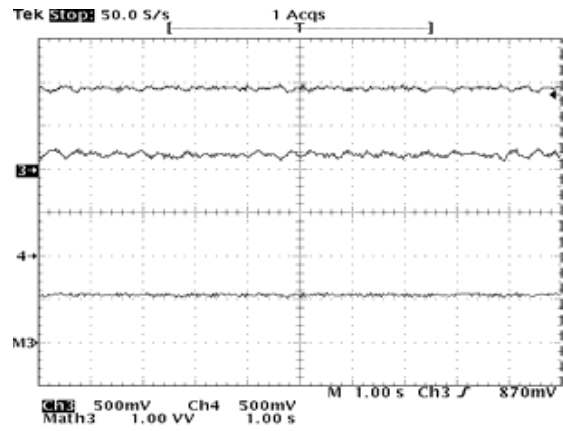
Εικόνα 6.9

Κυματομορφές τάσης, ρεύματος και ισχύος για τον αλγόριθμο Δ.&Π.



Εικόνα 6.10

Κυματομορφές τάσης, ρεύματος και ισχύος για τον αλγόριθμο Τ.Δ.&Π.



Εικόνα 6.11

Κυματομορφές τάσης, ρεύματος και ισχύος για τον αλγόριθμο Ε.Δ.&Δ.

6.3.1 Μετατροπές τάσης εξόδου, με επαγωγικό ρεύμα και παλμό στην πύλη

Η ταλάντωση του αλγόριθμου Δ.&Π. γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί από την ταλάντωση της κυματομορφής του ρεύματος στην εικόνα 6.9. Οι αλγόριθμοι Τ.Δ.&Π. και Ε.Δ.&Δ. έχουν πολύ μικρότερη ταλάντωση και αυτό είναι φανερό στις εικόνες 6.10 και 6.11 αντίστοιχα.

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ

7.1 ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΜΕΣΩ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MATLAB

Σε αυτή την ενότητα, στόχος μας είναι η εξομοίωση ενός φωτοβολταϊκού (Φ/Β) πλαισίου αρχικά και μιας συστοιχίας φωτοβολταϊκών (30 πλαίσια) στην συνέχεια. Γνωρίζουμε πως το κάθε Φ/Β μας πλαίσιο αποτελείται από 36 κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. Για την εξομοίωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων υλοποιήσαμε έναν αλγόριθμο στον Editor ο οποίος εξομοιώνει την συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού SW 80 mono/R5E. Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας αλγορίθμου που δημιουργήσαμε σε κώδικα MATLAB.

```
function Ia=solar(Va,Ns,m,Suns,TaC)
```

```
k = 1.38e-23;
```

```
q = 1.60e-19;
```

```
n=1.2;
```

```
Vg = 1.12;
```

```
T1 = 273 + 25;
```

```
Voc_T1 = m*21.9 /Ns;
```

```
Isc_T1 = 5;
```

```
T2 = 273 + 45.5;
```

```
Voc_T2 = m*19.8 /Ns;
```

```
Isc_T2 = 4.13;
```

```
TaK = 273 + TaC;
```

```
K0 = (Isc_T2 - Isc_T1)/(T2 - T1);
```

```
IL_T1 = Isc_T1 * Suns;
```

```
IL = IL_T1 + K0*(TaK - T1);
```



```

I0_T1=Isc_T1/(exp(q*Voc_T1/(n*k*T1))-1);
I0= I0_T1*(TaK/T1).^(3/n).*exp(-q*Vg/(n*k).*((1./TaK)-(1/T1)));
Xv = I0_T1*q/(n*k*T1) * exp(q*Voc_T1/(n*k*T1));
dVdl_Voc = -(1.15*m)/Ns / 2;
Rs = - dVdl_Voc - 1/Xv;

A=1.2;
Vt_Ta = A * k * TaK / q;
Vc = Va/Ns;
Ia = zeros(size(Vc));
for j=1:5;
Ia = Ia - (IL - Ia - I0.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta) - 1))./(-1 - (I0.*(
exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta) - 1)).*Rs./Vt_Ta);
end

```

Όπου:

$k \rightarrow$ η σταθερά Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ Joules/Kelvin = $86,3 \times 10^{-3}$ eV/K

$q \rightarrow$ το φορτίο του ηλεκτρονίου = $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb

$n \rightarrow$ σταθερά φωτοβολταϊκού για μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (1,2)

$V_g \rightarrow$ τάση αγωγής της διόδου

$T \rightarrow$ θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου

$V_{oc_T1} \rightarrow$ Τάση ανοιχτοκύκλωσης για την θερμοκρασία T1

$V_{oc_T2} \rightarrow$ Τάση ανοιχτοκύκλωσης για την θερμοκρασία T2

$I_{sc_T1} \rightarrow$ Ρεύμα βραχυκύκλωσης για θερμοκρασία T1 (προκύπτει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου).

$I_{sc_T2} \rightarrow$ Ρεύμα βραχυκύκλωσης για θερμοκρασία T2 (προκύπτει από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου).

$TaK \rightarrow$ θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν (θερμοκρασία κελιού).

Τέλος μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson γίνεται ο υπολογισμός του ρεύματος I_a . Στην αριθμητική ανάλυση η Μέθοδος Νιούτον (γνωστή και ως μέθοδος Νιούτον-Ράφσον, Newton-Raphson), είναι μία από τις καλύτερες μεθόδους διαδοχικών προσεγγίσεων για την προσεγγιστική εύρεση των ριζών μιας πραγματικής συνάρτησης. Η μέθοδος Νιούτον-Ράφσον είναι ικανή να συγκλίνει σημαντικά γρήγορα,

ειδικά αν η επαναληπτική διαδικασία ξεκινήσει «αρκετά κοντά» στην ζητούμενη λύση. Το πόσο «αρκετά κοντά» πρέπει να είναι, εξαρτάται από το πρόβλημα. Αν η μέθοδος ξεκινήσει μακριά από την επιθυμητή λύση υπάρχει πιθανότητα να μην συγκλίνει. Έτσι καλές υλοποιήσεις της μεθόδου θεωρούνται αυτές που έχουν ενσωματωμένη διαδικασία εντοπισμού και ενδεχομένως αποφυγής της μη σύγκλισης. Όπως θα φανεί σε παρακάτω παράγραφο η συνάρτηση $I(V)$ είναι μονοτονική, άρα η μοναδικότητά της επιθυμητής λύσης εξασφαλισμένη. Με δεδομένη την συνάρτηση $f(x)$ και την παράγωγό της $f'(x)$, μπορούμε να ξεκινήσουμε με ένα τυχαίο x_0 και να βρούμε μία καλύτερη προσέγγιση x_1 είναι η [26]

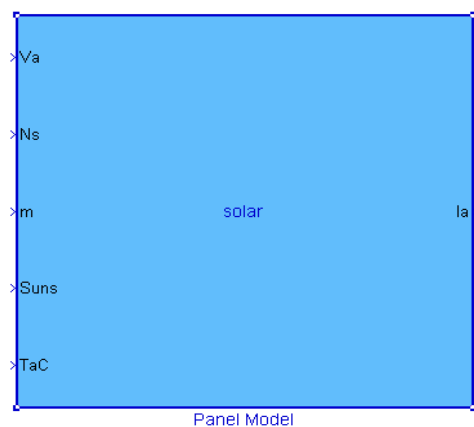
$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Εξίσωση 7.1

7.2 ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ

Το φωτοβολταϊκό μας εξομοιώθηκε σαν πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση δηλαδή στην έξοδο του παίρνουμε το ρεύμα (I_a) που προκύπτει από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Αυτό το ρεύμα εφαρμόζεται σε ένα φορτίο πάνω στο οποίο δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού V_a . Αυτή την διαφορά δυναμικού την χρησιμοποιούμε και σαν είσοδο του φωτοβολταϊκού μας. Δηλαδή το φωτοβολταϊκό δίνει ένα μεταβαλλόμενο ρεύμα I_a (εφόσον έχει εξομοιωθεί σαν πηγή ρεύματος), αυτό εφαρμόζεται πάνω στην αντίσταση και συνεχώς προκύπτει μια διαφορετική τάση η οποία εφαρμόζεται σαν είσοδος στο φωτοβολταϊκό μέχρι το ρεύμα και η τάση να σταθεροποιηθεί σε μία τιμή. Επιπλέον σαν είσοδος χρησιμοποιείται το N_s το οποίο δηλώνει τον αριθμό των κυψελών, το m το οποίο δηλώνει τον αριθμό των πάνελ που θέλουμε να εξομοιώσουμε, το S_{sun} το οποίο δηλώνει την ακτινοβολία σε W/m^2 και το T_aC το οποίο δηλώνει την θερμοκρασία που αναπτύσσεται μέσα σε κάθε κυψέλη. Η διαδικασία υπολογισμού αυτής της θερμοκρασίας (T_aC) παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω. Σαν έξοδο το Embedded MATLAB

Editor – Block μας δίνει το ρεύμα το οποίο προκύπτει από το πλαίσιο μας. Το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού, εξομοιωμένο σαν πηγή ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 4.1 του 4^{ου} κεφαλαίου.

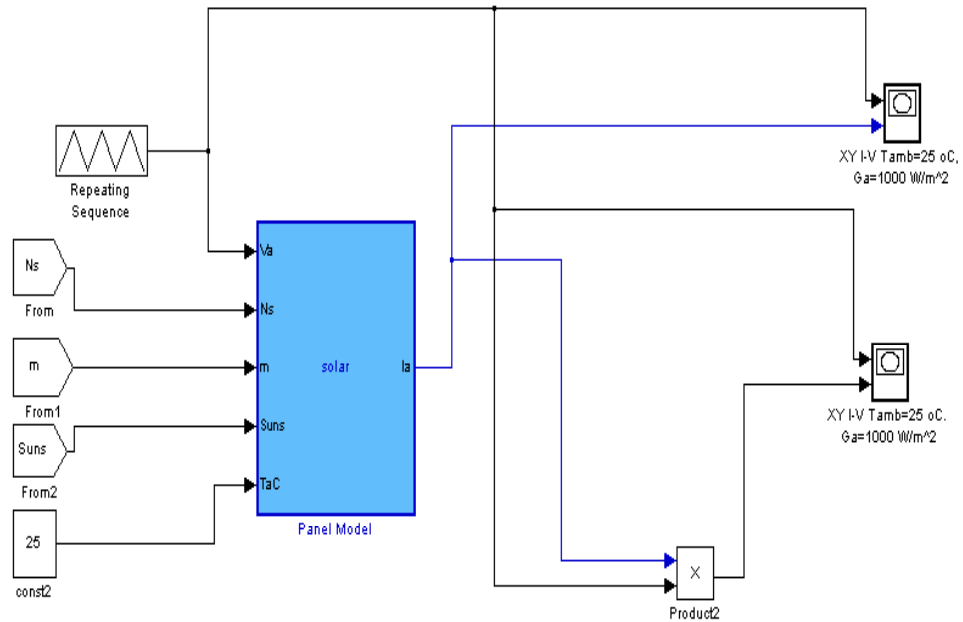


Εικόνα 7.1

Υποσύστημα με το οποίο εξομοιώσαμε το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Το Embedded MATLAB Editor – Block μέσα στο οποίο δημιουργήθηκε ο αλγόριθμος για την εξομοίωση του SW 80 mono/R5E.

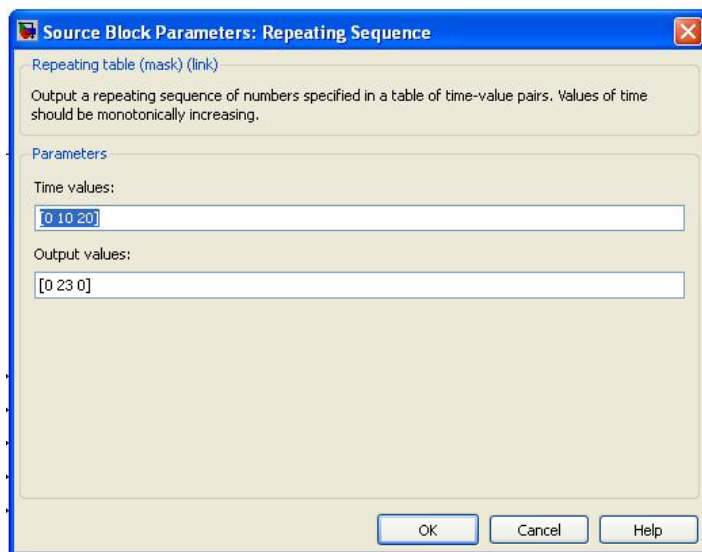
Χρησιμοποιώντας το μοντέλο του πλαισίου επαληθεύσαμε τις χαρακτηριστικές I/V (ρεύματος/τάσης) και P/V (ισχύος/τάσης) που ισχύουν για ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Το κύκλωμα που εξομοιώσαμε φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 7.2

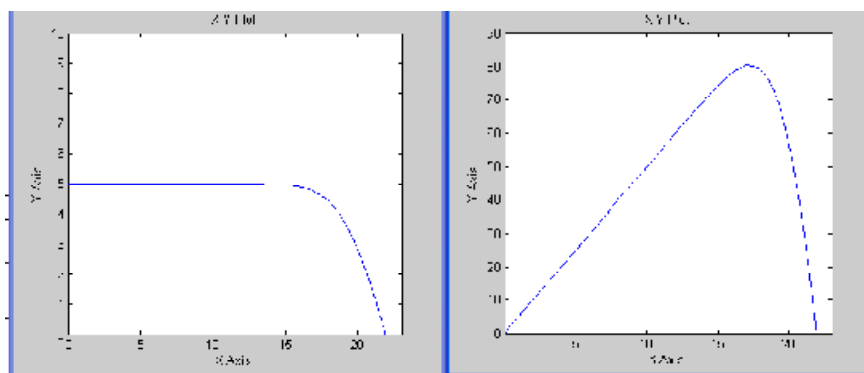
Από το παραπάνω κύκλωμα (εν κενό λειτουργία) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου απεικονίστηκαν οι χαρακτηριστικές I-V (ρεύματος - τάσης) και P-V (ισχύος - τάσης) οι οποίες φαίνονται παρακάτω

Ως τάση V_a δώσαμε μια τριγωνική τάση με πλάτος 23V μέσω του μπλοκ Repeating Sequence. Η τάση επιλέχτηκε βάση της τάσης που μας δίνει το φωτοβολταϊκό στην έξοδο του (περίπου 22V). Τις ρυθμίσεις που πραγματοποιήσαμε μέσα στο μπλοκ φαίνονται παρακάτω:

**Εικόνα 7.3**

α) Παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην συνάρτηση του MATLAB β) Η μορφή του τριγωνικού παλμού που χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω εξομοίωση. Το πλάτος είναι 23V και η περίοδος 20 msec

Στην είσοδο N_s δώσαμε τον αριθμό των κυψελών, δηλαδή 36, εφόσον θέλουμε να πάρουμε τις χαρακτηριστικές για ένα πλαίσιο, στην είσοδο m δώσαμε την τιμή 1 εφόσον για ένα πλαίσιο ζητάμε τις χαρακτηριστικές. Σαν ακτινοβολία δώσαμε $1000\text{W}/\text{m}^2$ και σαν θερμοκρασία 25°C . Οι χαρακτηριστικές I-V και P-V που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω:



Εικόνα 7.4

(α) (I-V) χαρακτηριστική (β) (P-V) χαρακτηριστική για 25°C και 1000W/m^2

Στην εικόνα 10.3, στο γράφημα 7.4 α παριστάνεται η χαρακτηριστική I-V όπου στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η τάση V σε Volt και στον κατακόρυφο άξονα το ρεύμα I σε Ampere και στο 7.4 β παριστάνεται η χαρακτηριστική P-V όπου στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η τάση V σε Volt και στον κατακόρυφο άξονα η ισχύς P σε Watt.

Από την χαρακτηριστική (I-V), προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- i. Όταν η τάση είναι 0, δηλαδή βρισκόμαστε στο σημείο βραχυκύκλωσης, το ρεύμα είναι μέγιστο δηλαδή για το συγκεκριμένο πλαίσιο $I_{sc}=5\text{A}$.
- ii. Ενώ η τάση αρχίζει να αυξάνει η τιμή του ρεύματος παραμένει 5A μέχρι να φτάσει στην τιμή περίπου των 17V. Σε εκείνο το σημείο παρατηρούμε πως η ένταση αρχίζει και μειώνεται μέχρι να φτάσει στην τιμή 0 όπου έχουμε την τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{oc}=21,9\text{V}$.

Στην τιμή των 17V το ρεύμα αρχίζει και μειώνεται ενώ η τάση αυξάνει. Στα 17,5V δημιουργείται η τάση $V_{mp}=17,5\text{V}$ και αντίστοιχο ρεύμα $I_{mp}=4,58$ Δηλαδή σε εκείνο το σημείο παίρνουμε την μέγιστη ισχύ η οποία είναι:

$$P_{mpp} = V_{mpp} * I_{mpp} = 17,5 * 4,58 = 80,15W$$

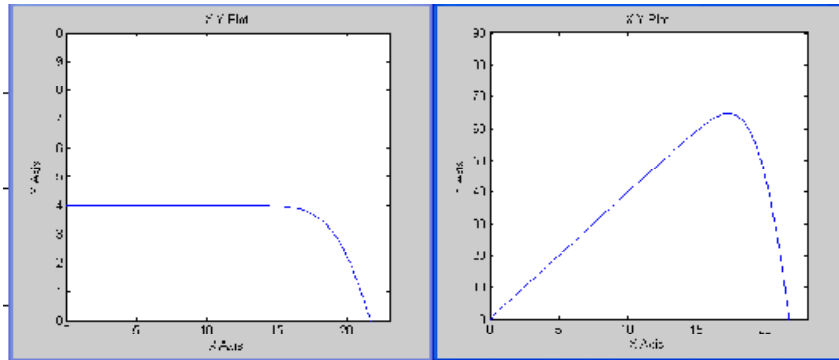
Εξίσωση 7.2

Από την χαρακτηριστική (P-V), προκύπτει το εξής συμπέρασμα: Η ισχύς αυξάνει όσο αυξάνει και η τάση, σχεδόν γραμμικά μέχρι το σημείο $V_{mpp} = 17,5V$ σε εκείνο το σημείο παρατηρείται μια 'κορυφή'. Επομένως σε εκείνο το σημείο έχουμε την μέγιστη ισχύ $80,15W$ όπως αναφέραμε και παραπάνω. Στην συνέχεια, ενώ η τάση συνεχίζει να αυξάνει, η ισχύς μειώνεται μέχρι να πάρει την τιμή 0. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα μειώνεται επειδή πλησιάζουμε την V_{oc} (τάση ανοιχτοκύκλωσης) = $21,9V$.

$$P_{oc} = V_{oc} * I_{oc} = 21,9 * 0 = 0W$$

Εξίσωση 7.3

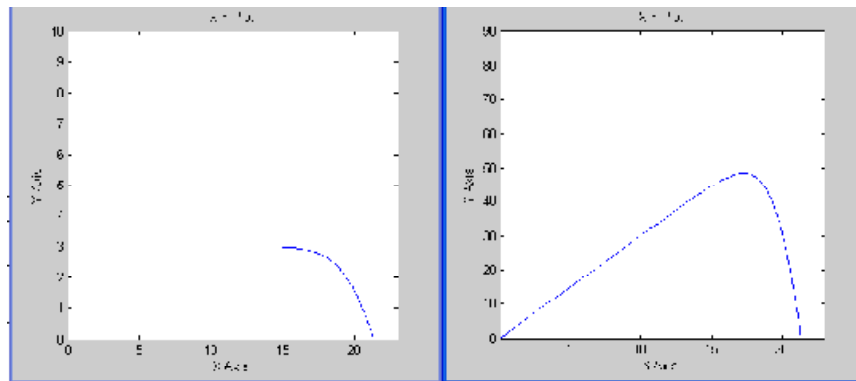
Στην συνέχεια του πειράματος μας, μεταβάλλαμε την ακτινοβολία πρώτα και έπειτα την θερμοκρασία στην είσοδο του μοντέλου του φωτοβολταϊκού, προκειμένου να δούμε τι αλλαγές θα προκύψουν στο σημείο MPP, ποια η μεταβολή της τάσης, του ρεύματος και πως θα επηρεαστεί η ισχύς.



Εικόνα 7.5

Αριστερά φαίνεται η (I-V) χαρακτηριστική ενώ δεξιά η (P-V) χαρακτηριστική για ακτινοβολία 800W/m^2

Για ακτινοβολία 800W/m^2 παρατηρούμε πως το ρεύμα μειώθηκε από 5A σε 4A, επομένως είναι λογικό να υπάρχει και μείωση στην τιμή της ισχύος. Όντως, παρατηρούμε πως η μέγιστη ισχύς από τα 80W έχει πέσει στα 65W.



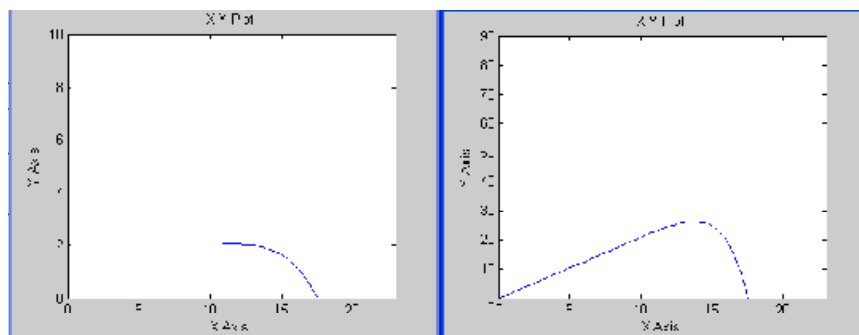
Εικόνα 7.6

Αριστερά φαίνεται η (I-V) χαρακτηριστική ενώ δεξιά η (P-V) χαρακτηριστική για ακτινοβολία 600W/m^2

Για ακτινοβολία $600\text{W}/\text{m}^2$ παρατηρούμε πως το ρεύμα μειώθηκε από 4A σε 3A, επομένως είναι λογικό να υπάρχει και μείωση στην τιμή της μέγιστης ισχύος. Όντως παρατηρούμε πως από τα 65W έχει πέσει στα 50W.

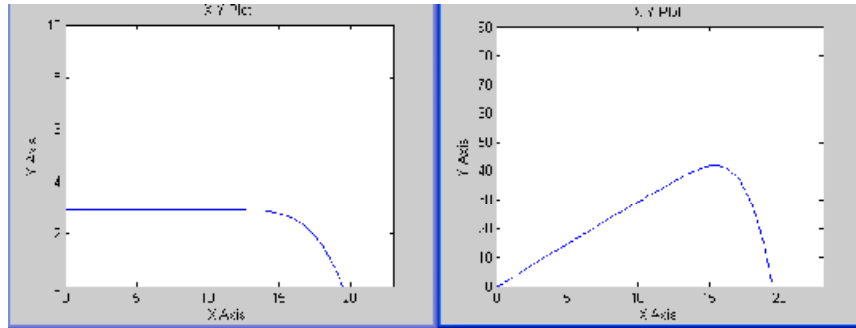
Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως αν μειώσουμε την ακτινοβολία τότε παρατηρούμε έντονη μείωση του ρεύματος περίπου 1A κάθε $200\text{W}/\text{m}^2$. Η τάση δεν επηρεάζεται τόσο πολύ (παρατηρούμε μικρές μεταβολές στην τιμή της). Εφόσον με μείωση της ακτινοβολίας έχουμε μείωση του ρεύματος, είναι λογικό να έχουμε και μείωση της ισχύος. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα διαγράμματα της ισχύος με την τάση (εικόνες x,y,z) βλέπουμε πως η ισχύς επηρεάζεται έντονα με την μείωση της ακτινοβολίας.

Στην συνέχεια θα αυξήσουμε την τιμή της θερμοκρασίας και θα κρατήσουμε σταθερή την ακτινοβολία προκειμένου να δούμε τις όποιες μεταβολές στην τάση, το ρεύμα, την ισχύ και το μέγιστο σημείο λειτουργίας (MPP).



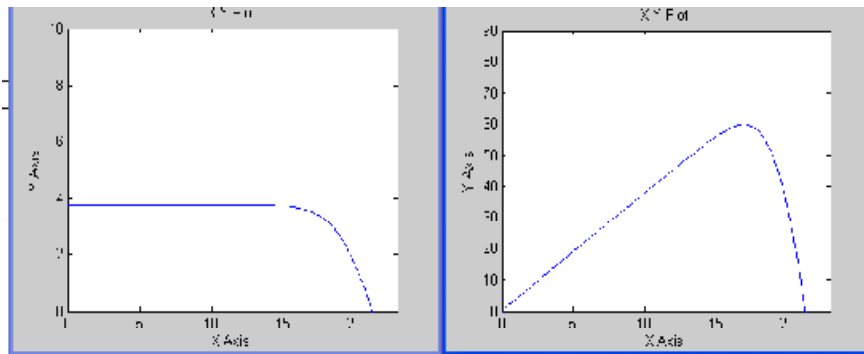
Εικόνα 7.7

Για 70°C α) (I-V) χαρακτηριστική β) (P-V) χαρακτηριστική



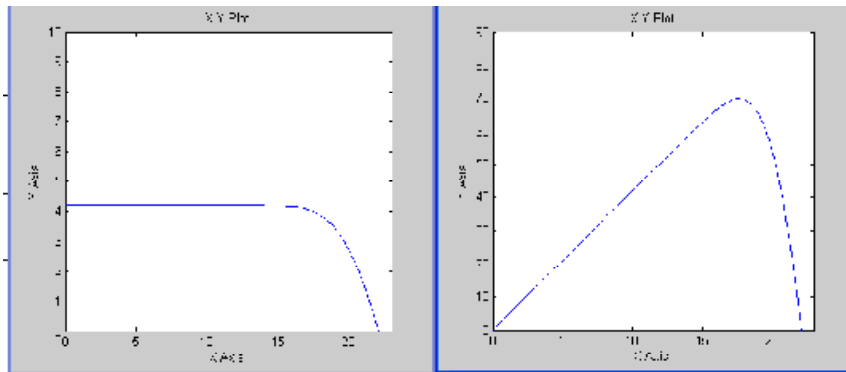
Εικόνα 7.8

Για 50°C α) (I-V) χαρακτηριστική β) (P-V)χαρακτηριστική

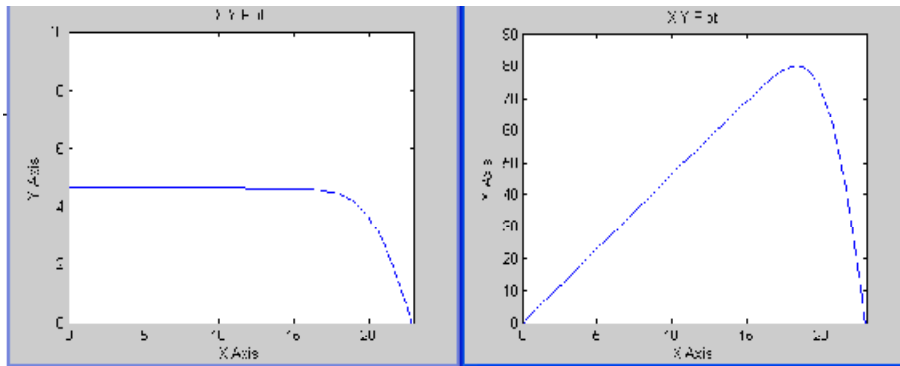


Εικόνα 7.9

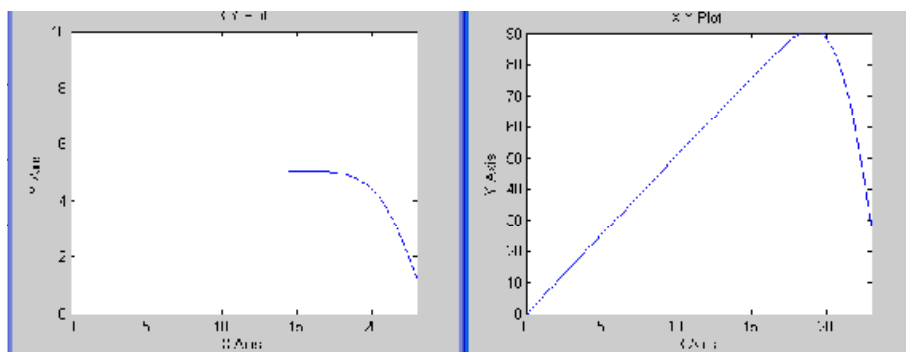
Για 30°C α) (I-V) χαρακτηριστική β) (P-V)χαρακτηριστική



Εικόνα 7.10
 Για 20°C α) (I-V) χαρακτηριστική β) (P-V) χαρακτηριστική



Εικόνα 7.11
 Για 10°C α) (I-V) χαρακτηριστική β) (P-V) χαρακτηριστική



Εικόνα 7.12

Για 0°C α) (I-V) χαρακτηριστική β) (P-V) χαρακτηριστική

Παραπάνω φαίνονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από 70°C έως 0°C. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως όσο μειώνεται η θερμοκρασία, η τάση και το ρεύμα μεγαλώνουν. Επομένως μεγαλώνει και η τιμή της ισχύος άρα και το σημείο μέγιστης ισχύος MPP. Επίσης το σημείο MPP μετατοπίζεται δεξιότερα (υψηλότερη τάση) όσο η θερμοκρασία μειώνεται.

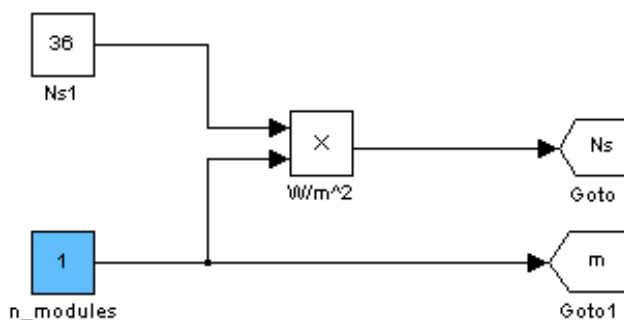
Έπειτα την έξοδο του μοντέλου του φωτοβολταϊκού μας την συνδέσαμε με ένα Current Source (πηγή ρεύματος) και στην συνέχεια με ένα ωμικό φορτίο ώστε να εξομοιώσουμε την συμπεριφορά του πραγματικού φωτοβολταϊκού σε ένα στοιχειώδες ηλεκτρικό κύκλωμα. Τελικός στόχος μας όμως ήταν να εξομοιώσουμε μια ολόκληρη συστοιχία φωτοβολταϊκών, δηλαδή 30 πλαίσια. Ως είσοδο στο φωτοβολταϊκό μας είχαμε θέσει από την αρχή το N_s το οποίο είναι ο αριθμός των κυψελών που είναι συνδεδεμένες σε σειρά και το m το οποίο είναι ο αριθμός των πλαισίων τα οποία θέλαμε να εξομοιώσουμε. Έτσι με ένα απλό

πολλαπλασιασμό μπορούσαμε να υπολογίσουμε πόσες κυψέλες θα χρησιμοποιούσαμε με τον παρακάτω τρόπο:

Αριθμός κυψελών (Ns) * Αριθμό πλαισίων (m) = Αριθμός συνολικών κυψελών

Εξίσωση 7.4

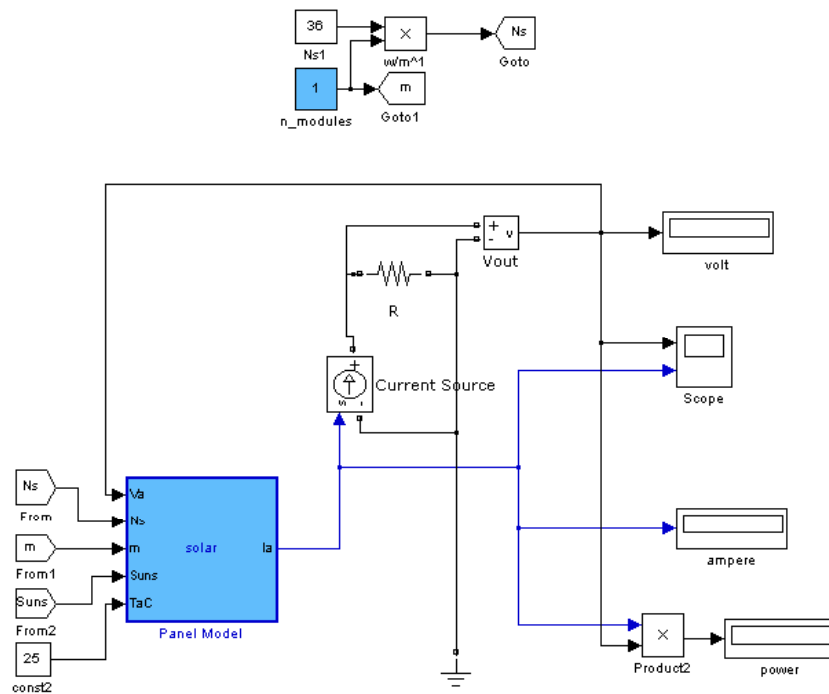
Με τα μπλοκ από το Simulink του MATLAB Goto και From καταφέραμε να υπολογίσουμε το συνολικό αριθμό των στοιχειωδών κυψελών που απαρτίζουν το μοντέλο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



Εικόνα 7.13

Τρόπος υπολογισμού του αριθμού των κυψελών κατά την εξομοίωσή μας και τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Αλλάζοντας μόνο την τιμή στο μπλοκ που έχουμε ονομάσει `n_modules` και βάζοντας τον αριθμό των πλαισίων για τον οποίο θέλουμε να κάνουμε εξομοίωση το MATLAB υπολογίζει από μόνο του τον αριθμό των κυψελών. Μέσω των δύο μπλοκ `Goto` και `Goto1` τα αποτελέσματα τροφοδοτούν τις αντίστοιχες εισόδους του μοντέλου μας.



Εικόνα 7.14

Απεικόνιση διαγράμματος στο MATLAB όπου τα αποτελέσματα από το μοντέλο υπολογισμού του αριθμού των κυψελών τροφοδοτούνται στο γενικό μοντέλο του Φ/Β. Το Φ/Β οδηγεί στην έξοδο του μια πηγή ρεύματος η οποία συνδέεται με ένα ωμικό φορτίο.

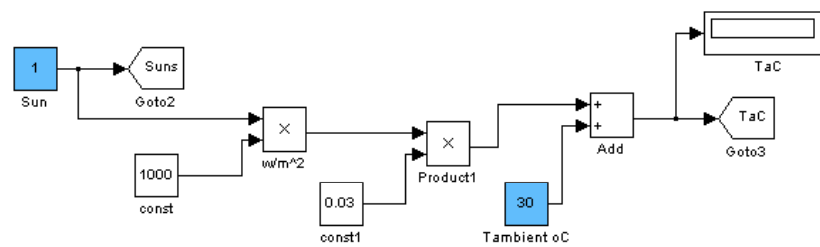
Υπολογίζεται η τάση και η ισχύς που προκύπτουν κατά την εξομοίωση. Η τάση ανατροφοδοτείται στο μοντέλο του Φ/Β, ώστε αυτό να οδηγείται σε μία τελική τιμή τάσης και ρεύματος. (βλ. 7.2 §Εξομοίωση Φ/Β συστοιχίας).

Η συνδεσμολογία που πραγματοποιήσαμε φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Το επόμενο πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε ήταν πως μέσα στον αλγόριθμο μας έπρεπε να χρησιμοποιούμε την θερμοκρασία κελιού TaC και όχι την θερμοκρασία περιβάλλοντος Ta ($T_{ambient}$). Βρήκαμε πως αυτή η μετατροπή επιτυγχάνεται από την παρακάτω εμπειρική σχέση:

(Ακτινοβολία $W/m^2 * 0,03$) + θερμοκρασία περιβάλλοντος $^{\circ}C$ =
θερμοκρασία κελιού $^{\circ}C$

Εξίσωση 7.5

Ο τρόπος που το υλοποιήσαμε αυτή τη συνάρτηση στο MATLAB φαίνεται παρακάτω:

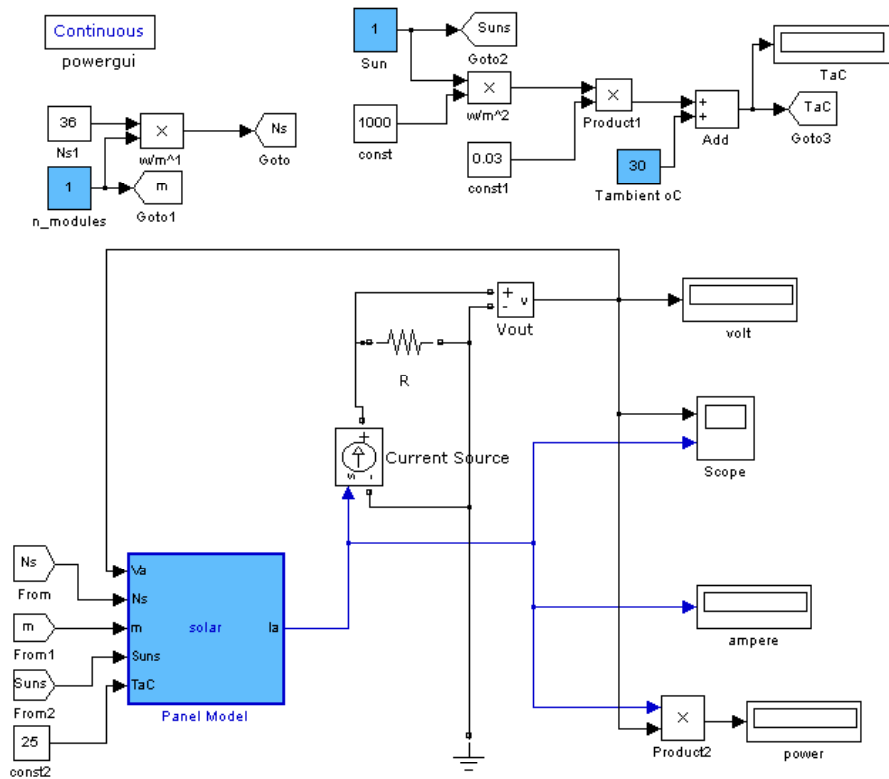


Εικόνα 7.15

Υπολογισμός της θερμοκρασίας κελιού μέσω MATLAB

Σχόλιο: αξίζει να τονίσουμε πως κάναμε την γενικά αποδεκτή παραδοχή ότι $1\text{Sun} = 1000\text{ W/m}^2$ για απλοποίηση των υπολογισμών μας.

Ενσωματώσαμε το παραπάνω μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας στο γενικό μοντέλο του φωτοβολταϊκού, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



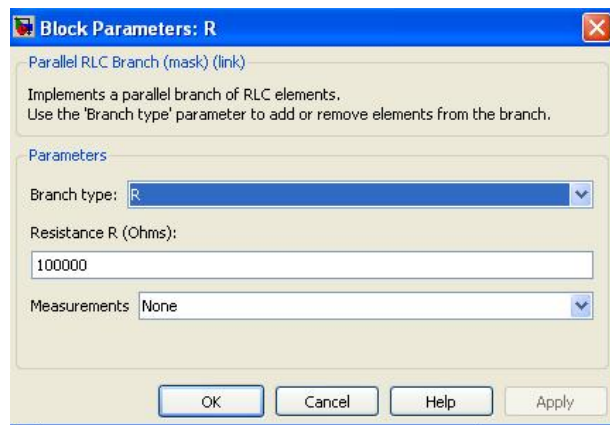
Εικόνα 7.16

Υπολογισμός στο μοντέλο του Φ/Β, της σωστής θερμοκρασίας κελιού

Έτσι τοποθετώντας διάφορες τιμές στην ακτινοβολία (Sun), την θερμοκρασία περιβάλλοντος (Tambient) τον αριθμό πλαισίων (n_modules) και δίνοντας την κατάλληλη τιμή στο φορτίο R, το Simulink μας υπολόγιζε την τάση, το ρεύμα και την ισχύ. Με αυτό τον τρόπο καταφέραμε να εξομοιώσουμε μια ολόκληρη συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Αρχικά για να επαληθεύσουμε το παραπάνω κύκλωμα, συνδέσαμε σαν φορτίο μια πολύ μεγάλη αντίσταση. Ουσιαστικά

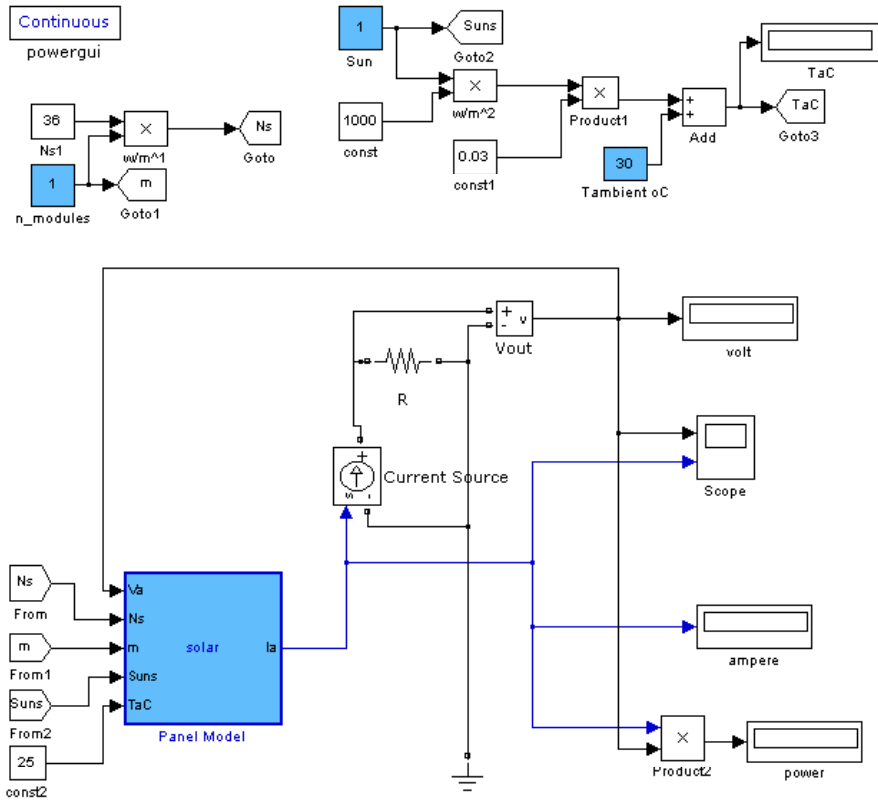
συνδέσαμε το φωτοβολταϊκό μας σαν ανοιχτοκύκλωμα. Αυτό που περιμένουμε να πάρουμε από τις προδιαγραφές του πραγματικού πλαισίου, είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{oc}=21,9V$ και ένα πολύ μικρό ρεύμα, της τάξεως των μA . Η τιμή που δώσαμε στην αντίσταση μας ήταν $100K\Omega$.



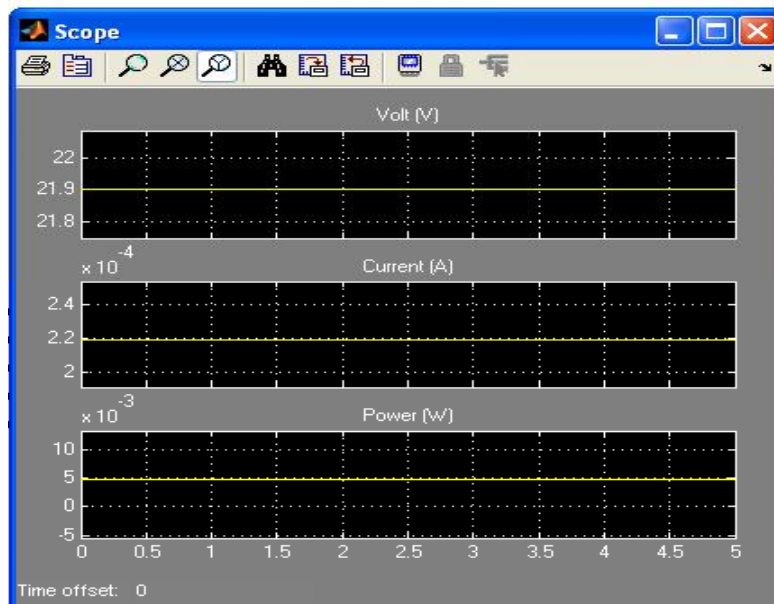
Εικόνα 7.17

Απεικονίζεται η τιμή της αντίστασης σε Ω

Και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το MATLAB φαίνονται παρακάτω:



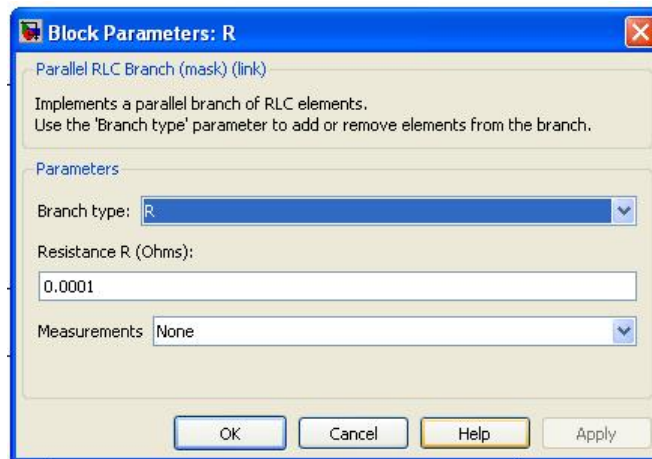
Εικόνα 7.18
Φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδεδεμένο με φορτίο

**Εικόνα 7.19**

Παλμογράφημα τάσης ρεύματος και ισχύος για 100.000Ω

Όταν το ρεύμα είναι πάρα πολύ μικρό, $2,2 \cdot 10^{-4}$ η τάση είναι 21,9V. Η τάση αυτή συμφωνεί με την τάση ανοιχτοκύκλωσης που δίνεται στις προδιαγραφές του πραγματικού φωτοβολταϊκού πλαισίου μας. Η ισχύς είναι και αυτή πολύ μικρή και είναι λογικό εφόσον πρακτικά δεν υπάρχει ρεύμα.

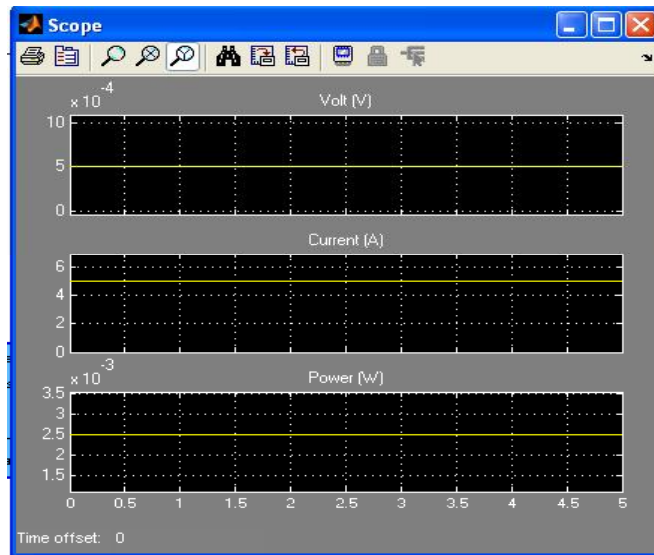
Στην συνέχεια τοποθετήσαμε στο κύκλωμά μας ένα πάρα πολύ μικρό φορτίο $R=0,0001\Omega$, (βλ. Εικόνα 7.18) προκειμένου να δούμε αν επαληθεύεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης το οποίο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού πλαισίου προκύπτει: $I_{sc}=5A$.



Εικόνα 7.20

Ρύθμιση της τιμής της αντίστασης σε πολύ μικρή τιμή (πρακτικό βραχυκύκλωμα)

Οι κυματομορφές που προέκυψαν από την εξομοίωση φαίνονται παρακάτω:

**Εικόνα 7.21**

Κυματομορφή που προέκυψε κατά την εξομοίωση

Απ' ότι παρατηρούμε το ρεύμα είναι 5A, η τάση πολύ μικρή και η ισχύς είναι της τάξεως των mW. Επομένως το μοντέλο του φωτοβολταϊκού πλαισίου συμπεριφέρεται όπως και το πραγματικό πλαίσιο, κατά την δοκιμή της βραχυκύκλωσης.

8^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

8.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Εφόσον επαληθεύσαμε το μοντέλο του φωτοβολταϊκού μας πλαισίου σε συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης και βραχυκύκλωσης εξομοιώσαμε ολόκληρη τη συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων που υπάρχει στην οροφή του εργαστηρίου Παραγωγής του Πανεπιστημίου Πατρών. Η πραγματική συστοιχία μας αποτελείται από 30 φωτοβολταϊκά πλαίσια τύπου SW 80 mono/R5E των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται στο παράρτημα.

8.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Με την βοήθεια του συστήματος συλλογής δεδομένων Sensor DAQ της εταιρίας Vernier εικόνα 8.1, με δειγματοληψία 20 δείγματα ανά δευτερόλεπτο, παίρναμε μετρήσεις ακτινοβολίας και θερμοκρασίας από αντίστοιχους αισθητήρες στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

**Εικόνα 8.1**

Φωτογραφία από τον αισθητήρα με τον οποίο πραγματοποιήσαμε τις μετρήσεις μας

Αυτές τις μετρήσεις τις εφαρμόσαμε σαν είσοδο στο φωτοβολταϊκό μας πλαίσιο. Τα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε ήταν πως ο αισθητήρας ακτινοβολίας μετρούσε την ακτινοβολία σε lux ενώ εμείς έπρεπε να την μετατρέψουμε σε W/m^2 . Όπως προέκυψε από τις έρευνές μας δεν υπάρχει καμία συγκεκριμένη σχέση η οποία να μπορεί να κάνει αυτή την μετατροπή. Ο εμπειρικός τύπος που επαλήθευε τα δικά μας φωτοβολταϊκά πλαίσια με μικρές αποκλίσεις φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$1 \text{ lux} = 0,0161028 \text{ W/m}^2$$

Σχέση 8.1

Φορτίο

Ως φορτίο χρησιμοποιήσαμε ένα ωμικό φορτίο το οποίο είχε κατασκευαστεί ώστε να αντέχει σε τάση 600 V και ρεύμα 5A που μπορούσαν να μας δώσουν τα φωτοβολταϊκά υπό ονομαστικές συνθήκες. Το φορτίο είχε πέντε αντιστάσεις των 47Ω τις οποίες ανάλογα με τις ανάγκες μας μπορούσαμε να συνδέσουμε σε σειρά ή παράλληλα.

Απώλειες αγωγών

Προκειμένου να περιορίσουμε το σφάλμα στις μετρήσεις μας προσπαθήσαμε να υπολογίσουμε τις απώλειες των αγωγών. Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν, η αντίσταση των αγωγών προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$R_{αγ} = (7,7 \Omega / 1000m) * \text{Μέτρα αγωγού} = \text{Αντίσταση σε } \Omega$$

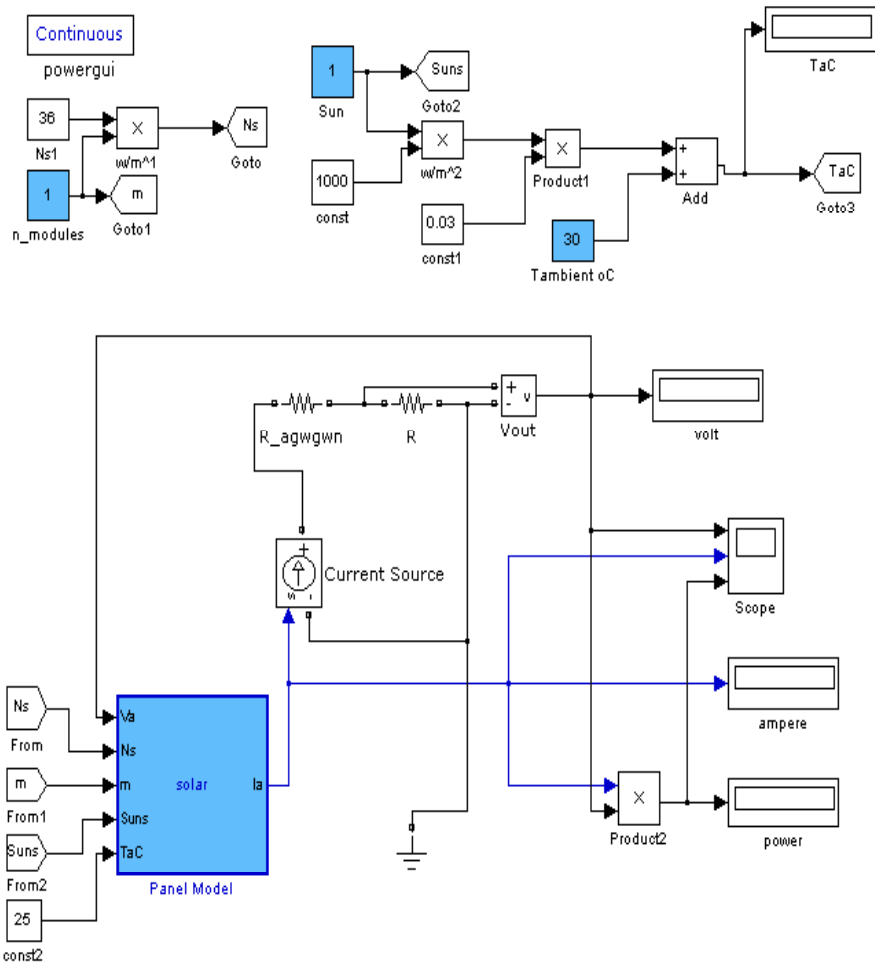
Σχέση 8.2

Εμείς από τις μετρήσεις μας καταλήξαμε πως έχουν χρησιμοποιηθεί 74,1m αγωγού για τις συνδέσεις των 30 φωτοβολταϊκών πλαισίων μεταξύ τους. Επομένως η σχέση γίνεται:

$$R_{αγ} = (7,7 \Omega / 1000m) * 74,1 = 0,57 \Omega$$

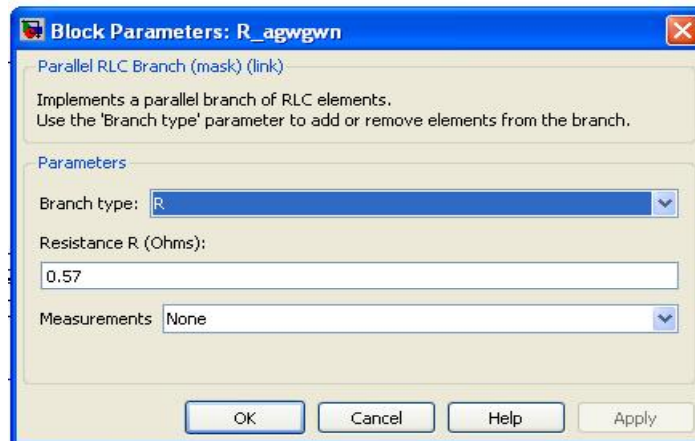
Σχέση 8.3

Επομένως στην εξομοίωσή μας προσθέσαμε άλλη μια αντίσταση σε σειρά με το φορτίο η οποία παριστά τις απώλειες των αγωγών. Το κύκλωμά απεικονίζεται στην εικόνα 8.2. [27]



Εικόνα 8.2

Κύκλωμα που χρησιμοποιήσαμε κατά την εξομείωση στο οποίο υπολογίζονται και οι απώλειες των αγωγών

**Εικόνα 8.3**

Ρύθμιση της αντίστασης αγωγών (R_agwgwn) σε Ω

Όργανα που χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις μας

Για την μέτρηση της τάσης και της έντασης, χρησιμοποιήθηκαν δύο πολύμετρα:

**Εικόνα 8.4**

Πολύμετρο το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η έξοδος των 30 εν σειρά συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και το βολτόμετρο και το αμπερόμετρο στην εν κενό λειτουργία τους.

**Εικόνα 8.5**

Διπολικός διακόπτης εξόδου της φωτοβολταϊκής συστοιχίας καθώς και όργανα μέτρησης τάσης και ρεύματος

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

- Η πρώτη σειρά μετρήσεων που καταγράψαμε φαίνεται παρακάτω:

$$V=253,6V$$

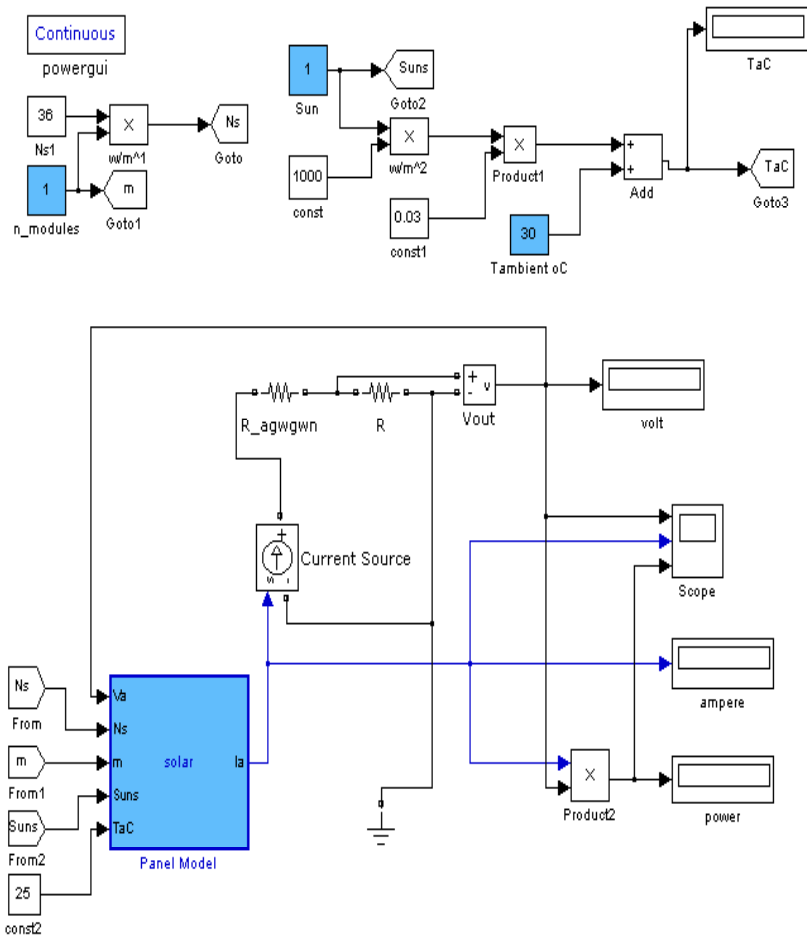
$$I=1,066A$$

$$R_L=5 * 47 =235\Omega$$

$$\text{Ακτινοβολία} =17922\text{lux} \rightarrow 288,5\text{W/m}^2$$

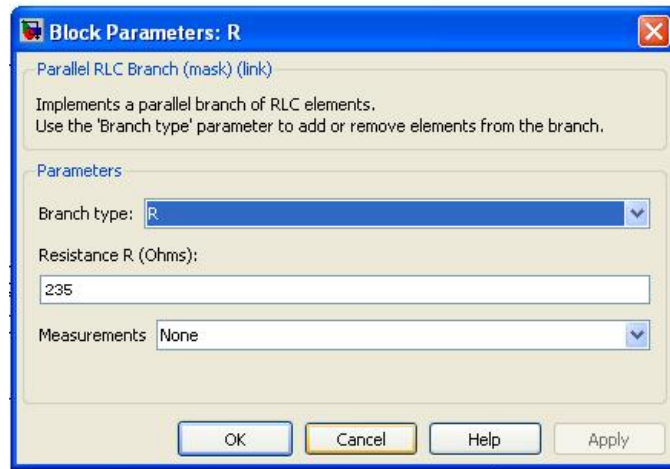
$$T= 28^\circ\text{C}$$

Η τάση και το ρεύμα μετρήθηκαν από τα πολύμετρα ενώ η ακτινοβολία και η θερμοκρασία των πλαισίων από τους αντίστοιχους αισθητήρες. Στο μοντέλο των φωτοβολταϊκών πλαισίων ρυθμίσαμε την τιμή της αντίστασης στα 235Ω , αντικαταστήσαμε την ακτινοβολία και την θερμοκρασία με τις τιμές που έδειχναν οι αισθητήρες εκείνη την στιγμή της μέτρησής και επίσης αντικαταστήσαμε τον αριθμό πλαισίων $n_modules$ με τον αριθμό 30 (αριθμός πλαισίων). Στην εικόνα 8.7 φαίνονται οι παραπάνω ρυθμίσεις στο μοντέλο των πλαισίων.



Εικόνα 8.6

Κύκλωμα που χρησιμοποιήσαμε προκειμένου να εξομοιώσουμε τα τριάντα πραγματικά πλαίσια και οι αντίστοιχες ρυθμίσεις των παραμέτρων του από μετρήσεις.

**Εικόνα 8.7**

Ρύθμιση της αντίστασης φορτίου στα 235 Ω.

Τα αποτελέσματα της εξομοίωσης καταγράφηκαν στα παρακάτω display του MATLAB/Simulink

**Εικόνα 8.8**

Τάση, ρεύμα και ισχύς κατά την εξομοίωση

Σχόλιο: Παρατηρείται μικρή απόκλιση στην τάση και το ρεύμα μεταξύ εξομοίωσης και πραγματικού συστήματος. Για την τάση η απόκλιση είναι της τάξης του 12,22% και για το ρεύμα η απόκλιση είναι 11,09 %.

➤ Δεύτερη μέτρηση:

Για φορτίο $R = 188\Omega$ μετρήσαμε:

$$V=241,4V$$

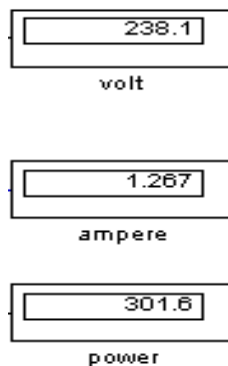
$$I=1,275A$$

$$R_L=4 * 47 =188\Omega$$

$$\text{Ακτινοβολία} =23159\text{lux} \rightarrow 372,9\text{W/m}^2$$

$$T= 27,9^\circ\text{C}$$

Εφόσον πραγματοποιήσαμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις στο μοντέλο, η εξομοίωση έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα:



Εικόνα 8.9

Τάση, ρεύμα και ισχύς κατά την εξομοίωση

Σχόλιο: Παρατηρείται μικρή απόκλιση στην τάση και το ρεύμα μεταξύ εξομοίωσης και πραγματικού συστήματος. Για την τάση η απόκλιση είναι της τάξης του 1,37% και για το ρεύμα η απόκλιση είναι 0,63%.

➤ Τρίτη μέτρηση:

$$V=283,2V$$

$$I=2A$$

$$R_L=3 * 47 =141\Omega$$

$$\text{Ακτινοβολία} =40981\text{lux} \rightarrow 659,908\text{W/m}^2$$

$$T= 29^\circ\text{C}$$

Εφόσον πραγματοποιήσαμε τις απαραίτητες αλλαγές προέκυψαν τα παρακάτω

**Εικόνα 8.10**

Τάση, ρεύμα και ισχύς κατά την εξομοίωση

Σχόλιο: Παρατηρείται μικρή απόκλιση στην τάση και το ρεύμα μεταξύ εξομοίωσης και πραγματικού συστήματος. Για την τάση η απόκλιση είναι της τάξης του 13,2% και για το ρεύμα η απόκλιση είναι 13.5%.

➤ Τέταρτη μέτρηση:

$$V=239,2V$$

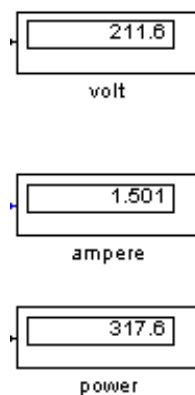
$$I=1,690A$$

$$R_L=3 * 47 =188\Omega$$

$$\text{Ακτινοβολία} =28264\text{lux} \rightarrow 455,12\text{W/m}^2$$

$$T= 29,6^\circ\text{C}$$

Εφόσον πραγματοποιήσαμε τις απαραίτητες αλλαγές προέκυψαν τα παρακάτω



Εικόνα 8.11

Τάση, ρεύμα και ισχύς κατά την εξομοίωση

Σχόλιο: Παρατηρείται μικρή απόκλιση στην τάση και το ρεύμα μεταξύ εξομοίωσης και πραγματικού συστήματος. Για την τάση η απόκλιση είναι της τάξης του 11,54% και για το ρεύμα η απόκλιση είναι 6,7%.

8.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στις 7 Μαΐου 2010 και ώρα περίπου 13:00 το μεσημέρι. Ο καιρός εκείνη την ημέρα ήταν αρκετά νεφελώδης για αυτό το λόγο δεν έχουμε καταγράψει μεγάλες

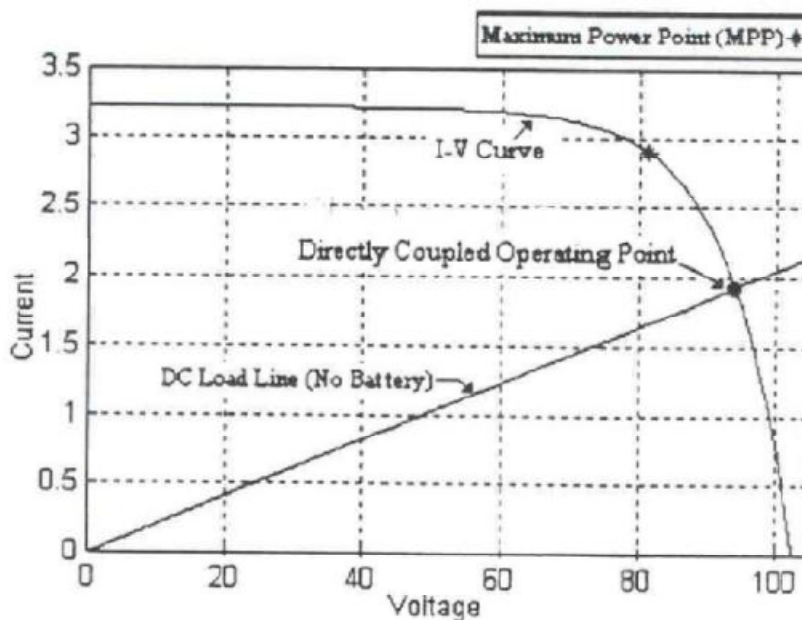
ακτινοβολίες. Αν εξαιρέσουμε την τέταρτη μέτρηση όπου το σφάλμα στην τάση είναι 39,1 V, σε όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις οι πραγματικές τιμές που καταγράψαμε μέσω δυο πολυμέτρων είναι αρκετά κοντά με τις θεωρητικές τιμές που υπολογίστηκαν μέσω του MATLAB. Τα μικρά σφάλματα που προκύπτουν οφείλονται στους παρακάτω παράγοντες α) η ακτινοβολία μας δεν ήταν σταθερή, β) ο εμπειρικός τύπος που χρησιμοποιήσαμε για να κάνουμε την μετατροπή από lux σε W/m^2 πιθανότατα δεν ήταν ο ακριβέστερος, γ) η αντίσταση των αγωγών δεν ήταν να μετρηθεί ούτε να υπολογιστεί με απόλυτη ακρίβεια, εφόσον εμείς μετρήσαμε το μήκος του αγωγού και από εκεί να υπολογίσουμε την αντίσταση του, ο οποίος σε κάποια σημεία ήταν υπόγειος οπότε και τον μετρήσαμε κατά προσέγγιση. Τέλος υπήρχαν τα σφάλματα των οργάνων (βολτομέτρου και αμπερομέτρου) και των αισθητήρων (θερμοκρασίας και ακτινοβολίας).

9^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

9.1 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

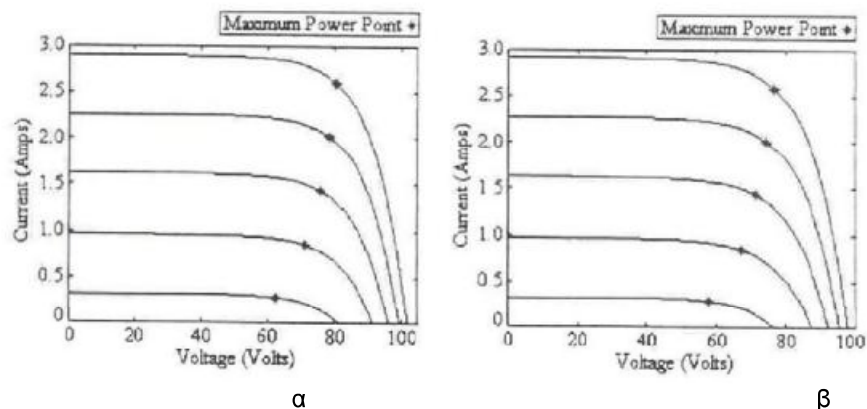
Μια συστοιχία φωτοβολταϊκών υπό συνθήκες σταθερής και ομοιόμορφης ακτινοβολίας έχει μια χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσεως (I-V), όπως φαίνεται στην εικόνα 9.1. Υπάρχει ένα μοναδικό σημείο της καμπύλης το οποίο ονομάζεται Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Σ.Μ.Ι.) (Maximum Power Point - MPP), στο οποίο η συστοιχία φωτοβολταϊκών λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση και παράγει τη μέγιστη ισχύ. Όταν μια συστοιχία φωτοβολταϊκών είναι άμεσα συνδεδεμένη στο φορτίο, το σημείο λειτουργίας του συστήματος θα είναι η τομή της καμπύλης I-V της συστοιχίας φωτοβολταϊκών και της γραμμής των φορτίων όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 9.1. Γενικά αυτό το σημείο λειτουργίας δεν είναι το σημείο μέγιστης ισχύος της συστοιχίας φωτοβολταϊκών όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα.



Εικόνα 9.9

Τυπική καμπύλη τάσης – ρεύματος

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να ξεπεραστεί χρησιμοποιώντας διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, όπως Σ.Ρ.-Σ.Ρ. μετατροπείς ισχύος, τους οποίους ονομάζουμε Ανιχνευτές Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Α.Σ.Μ.Ι.) (MPPT). Με τις διατάξεις αυτές, μπορεί να διατηρηθεί το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος στο μέγιστο σημείο λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται με τον Α.Σ.Μ.Ι., ο οποίος ελέγχει την τάση που παρέχει η συστοιχία άρα και το ρεύμα του φορτίου. Η θέση του Σ.Μ.Ι. μπορεί να βρεθεί είτε μέσω πρότυπων υπολογισμών είτε αλγοριθμικά κατά τη λειτουργία του. Η πρώτη μέθοδος είναι πολύπλοκη, επειδή το Σ.Μ.Ι. είναι μη γραμμική συνάρτηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 9.2.



Εικόνα 9.10

α. Καμπύλες (V-I) φωτοβολταϊκής συστοιχίας στους 40°C.
β. Καμπύλες (V-I) φωτοβολταϊκής συστοιχίας στους 50°C.

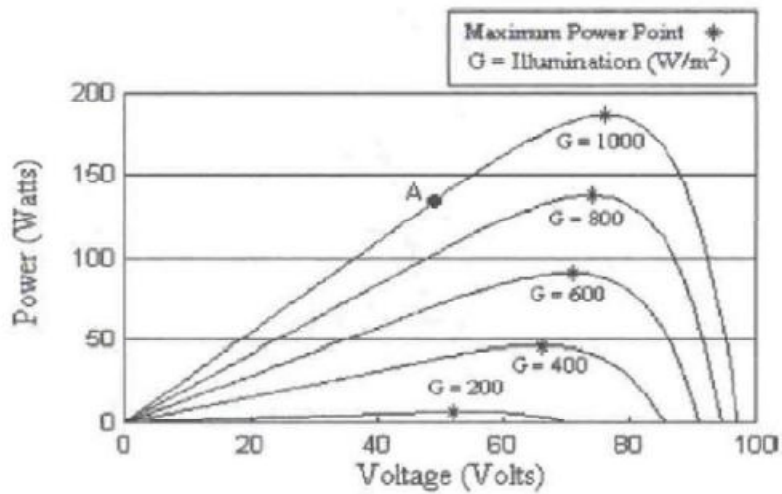
9.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ Σ.Μ.Ι.

Για την εύρεση του Σ.Μ.Ι. έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοί όπως:

- Διατάραξης και Παρατήρησης (Perturb- and –Observe P&O)
- Αυξητικής αγωγιμότητας (Incremental Conductance).
- Παρασιτικής χωρητικότητας (Parasitic Capacitance).
- Σταθερής τάσης (Constant Voltage).

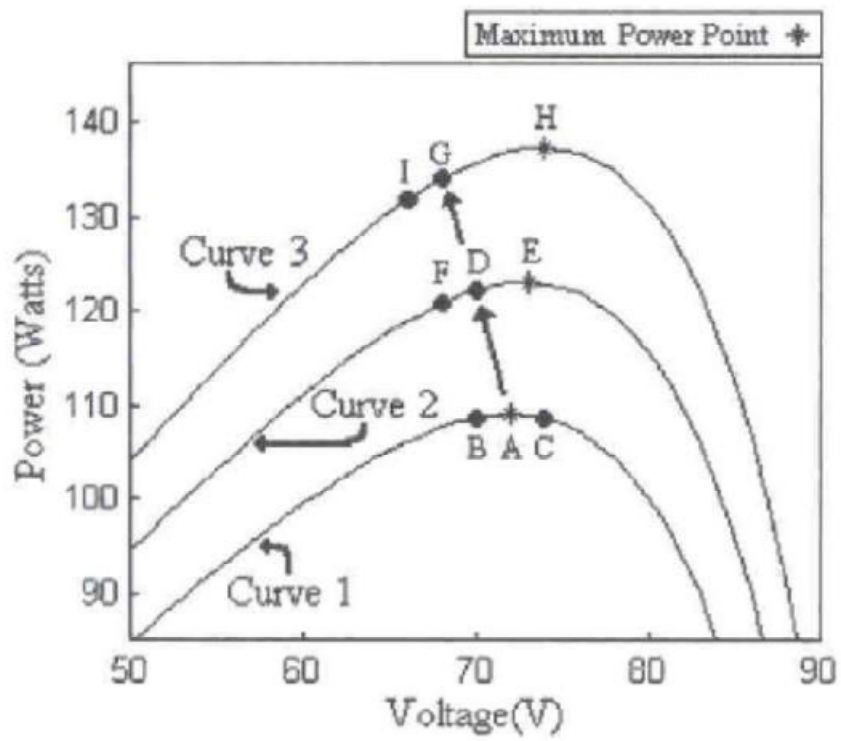
Ο αλγόριθμος διατάραξης και παρατήρησης είναι ο συνηθέστερος χρησιμοποιούμενος στην πράξη λόγω της εύκολης εφαρμογής του. Η πιο βασική μορφή του αλγόριθμου P&O λειτουργεί ως εξής. Στην εικόνα 9.3 παρουσιάζεται μια οικογένεια καμπυλών ισχύος συστοιχίας φωτοβολταϊκών πλαισίων, ως συνάρτηση της τάσης σε διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας για ομοιόμορφη ακτινοβολία και σταθερή

θερμοκρασία. Αυτές οι καμπύλες έχουν το γενικό μέγιστο στο Σ.Μ.Ι. Αν η συστοιχία φωτοβολταϊκών λειτουργεί στο σημείο A της εικόνας 9.3, το οποίο είναι μακριά από το Σ.Μ.Ι., η τάση λειτουργίας του στο P&O μεταβάλλεται με μια μικρή αύξηση και μετριέται η προκύπτουσα αλλαγή.



Εικόνα 9.11

Καμπύλες σχέσης τάσεως-ισχύος φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



Εικόνα 9.12

Παρουσίαση της ακανόνιστης συμπεριφοράς διατάραξης και παρατήρησης όταν η ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται γρήγορα.

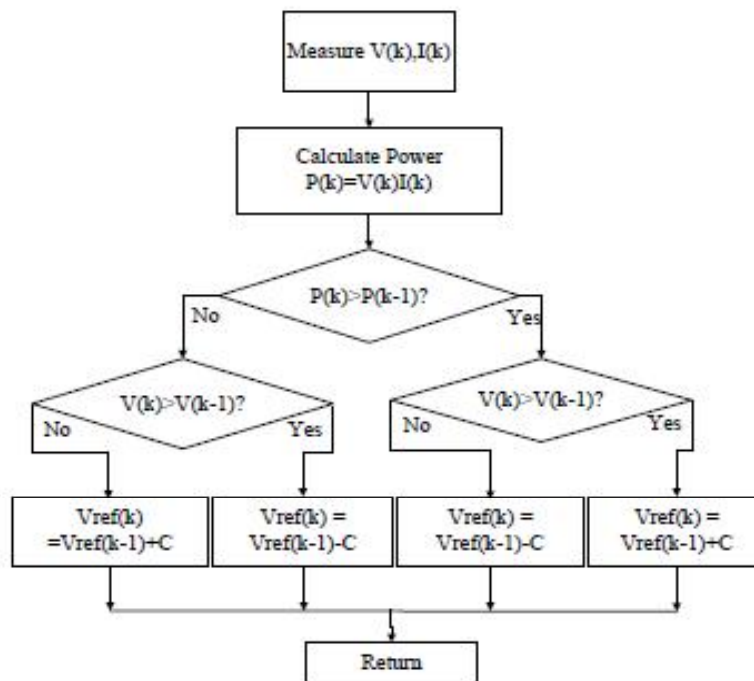
Τα πλεονεκτήματα αυτού του αλγορίθμου είναι η απλότητα και η ευκολία της εφαρμογής του. Η P&O όμως έχει περιορισμούς που μειώνουν την αποτελεσματικότητα του Α.Σ.Μ.Ι. Ένας τέτοιος περιορισμός είναι, ότι όσο το φως του ήλιου μειώνεται η καμπύλη P-V γίνεται επίπεδη, όπως φαίνεται στην εικόνα 9.3. Αυτό καθιστά δύσκολο για το Α.Σ.Μ.Ι. να διακρίνει τη θέση του Σ.Μ.Ι., επειδή είναι μικρή η αλλαγή της ισχύος όσον αφορά την διαταραχή της τάσης. Άλλο βασικό μειονέκτημα είναι, ότι δεν μπορεί να καθορίσει πότε έχει προσεγγίσει πραγματικά το Σ.Μ.Ι. με αποτέλεσμα να ταλαντώνεται γύρω από το Σ.Μ.Ι., αλλάζοντας πρόσημο μετά από κάθε μέτρηση της διαταραχής ΔΡ. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει αλλοπρόσαλλη συμπεριφορά όταν το επίπεδο ακτινοβολίας μεταβάλλεται γρήγορα. Αυτή η κατάσταση μπορεί να εμφανιστεί τις νεφελώδεις ημέρες όπου η ανίχνευση του Σ.Μ.Ι. είναι δυσκολότερη, εξαιτίας της συχνής μετακίνησής του. Διάφορες βελτιώσεις έχουν προταθεί, όπως η προσθήκη μιας συνάρτησης καθυστέρησης που προκαλεί μια στιγμιαία διακοπή των μεταβολών εάν το πρόσημο τους αντιστρέφεται πολλές φορές διαδοχικά, ένδειξη ότι το MPP έχει επιτευχθεί.

9.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ.

Το Σύστημα Εύρεσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.) είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα το οποίο εκμεταλλεύονται τα φωτοβολταϊκά μας, με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν την μέγιστη δυνατή ενέργεια. Το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. δεν είναι ένα μηχανικό σύστημα ανίχνευσης το οποίο «μετακινεί» τα πλαίσια προς την κατεύθυνση του ήλιου. Το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. είναι ένα πλήρως ηλεκτρικό σύστημα το οποίο μεταβάλλει τις ηλεκτρικές παραμέτρους των μοντέλων ώστε να απορροφούν την μέγιστη ενέργεια από αυτή που προσπίπτει κάθε χρονική στιγμή στα πλαίσια.

Εμείς πραγματοποιήσαμε στο πείραμά μας την πιο απλή μορφή Σ.Ε.Σ.Μ.Ι., το P&O (Perturb and Observe) δηλαδή (Διαταραχή και Παρατήρηση). Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί καλά όταν η ακτινοβολία αλλάζει αργά. Όταν η ακτινοβολία παρουσιάζει γρήγορες μεταβολές τότε ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει αστάθεια. Παρακάτω φαίνεται το Διάγραμμα Ροής.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.



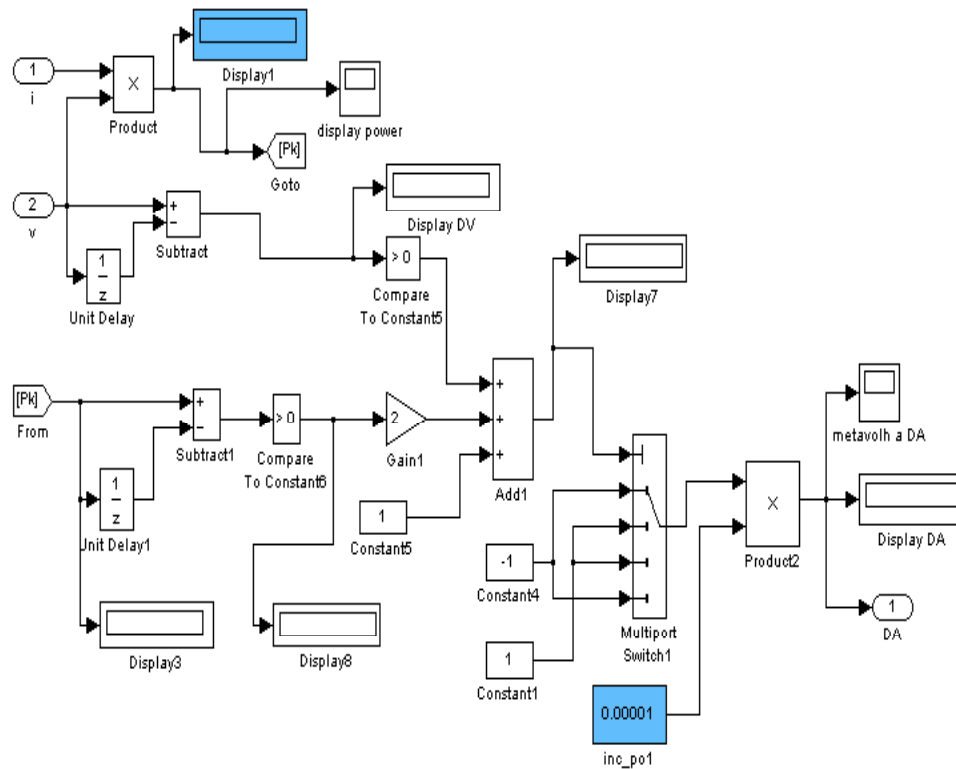
Εικόνα 9.13

Διάγραμμα Ροής του αλγορίθμου Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. P&O (Διαταραχής και παρατήρησης)

Αρχικά, όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής, πολλαπλασιάζουμε την τάση με το ρεύμα για να βρούμε την ισχύ. Εφόσον υπολογιστεί η τιμή της ισχύος, στην συνέχεια γίνεται μια σύγκριση αν η τιμή είναι μεγαλύτερη από την τιμή ισχύος που υπολογίστηκε κατά την εκτέλεση του προηγούμενου βρόχου του αλγορίθμου. Αν η σύγκριση είναι αληθής «TRUE» δηλαδή η ισχύς αυξήθηκε γνωρίζουμε βάση του διαγράμματος ροής ότι κατευθυνόμαστε προς τα δεξιά. Τότε οδηγούμαστε σε μία δεύτερη σύγκριση της τάσης αυτή την φορά. Αν η μεταβολή της τάσης είναι μεγαλύτερη του «0» (σε σχέση με την τιμή της τάσης κατά την εκτέλεση του προηγούμενου βρόχου του αλγορίθμου) τότε κατευθυνόμαστε και πάλι δεξιά, και θέτουμε $V_{ref}(k) = V_{ref}(k-1) + C$. Για το πλαίσιο αυτό δηλαδή ισχύει πως θετική μεταβολή της τάσης οδήγησε σε θετική μεταβολή της ισχύος. Αν η τιμή της μεταβολής της τάσης είναι μικρότερη από «0» τότε θέτουμε $V_{ref}(k) = V_{ref}(k-1) - C$. Για το πλαίσιο αυτό δηλαδή ισχύει πως αρνητική μεταβολή της τάσης οδηγεί σε θετική μεταβολή της ισχύος.

Τώρα, αν αρχικά η μεταβολή της τιμής της ισχύος είναι αρνητική, τότε κινούμαστε στον αλγόριθμο προς τα αριστερά όπου διεξάγεται αντίστοιχη διαδικασία με την τάση. Μόνο που τώρα, αν η μεταβολή της είναι θετική, τότε θέτουμε $V_{ref}(k) = V_{ref}(k-1) - C$, ενώ αν είναι αρνητική, τότε θέτουμε $V_{ref}(k) = V_{ref}(k-1) + C$. Επομένως στο πρώτο πλαίσιο η ισχύς και η τάση είναι αρνητικές, ενώ στο δεύτερο πλαίσιο η ισχύς είναι αρνητική και η τάση θετική. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσουμε στην τιμή της μέγιστης ισχύος. Εκεί το σύστημα δεν σταθεροποιείται τελείως αλλά παρατηρούμε μικρές ταλαντώσεις.

9.4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.



Εικόνα 9.14

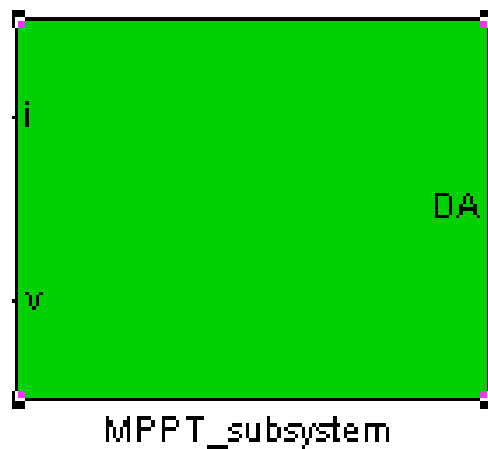
Υλοποίηση Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. στο MATLAB/Simulink [28]

Στην εικόνα 9.6 παραθέτουμε το μοντέλο που υλοποιείται στο MATLAB/Simulink τον αλγόριθμο του Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. (MPPT). Αρχικά πολλαπλασιάζει την τάση με το ρεύμα προκειμένου να υπολογίσει την

τιμή της ισχύος. Στην συνέχεια κάνει μια σύγκριση και αν η μεταβολή της ισχύος είναι θετική τότε δίνει σήμα «1» το οποίο πολλαπλασιάζεται με την τιμή «2» και το αποτέλεσμα καταλήγει στον αθροιστή τριών εισόδων. Αν η τιμή της ισχύος είναι μικρότερη του «0» τότε ο συγκριτής δίνει έξοδο «0» η οποία τιμή αν πολλαπλασιαστεί με το «2» δίνει στην είσοδο του αθροιστή τελικά την τιμή «0». Η ίδια ακριβώς διαδικασία γίνεται και για την τιμή της τάσης. Δηλαδή η τιμή της τάσης καταλήγει σε ένα συγκριτή και όταν αυτή είναι μεγαλύτερη του «0» τότε ο συγκριτής δίνει σήμα «1» στην είσοδο του αθροιστή ενώ όταν η τιμή της τάσης είναι μικρότερη από «0» τότε δεν στέλνει σήμα δίνει δηλαδή «0». Επομένως οι πιθανές τιμές που μπορεί να δώσει ο αθροιστής είναι «1», «2», «3», «4». Η έξοδος του αθροιστή καταλήγει σε έναν πολυπλέκτη 5 εισόδων όπου ανάλογα με την τιμή που θα προκύψει από την έξοδο του αθροιστή μετακινεί την επαφή της εξόδου του στην αντίστοιχη είσοδο. Ανάλογα από ποια είσοδο θα πάρει σήμα μεταβάλλεται και η τιμή εξόδου του. Αν πάρει σήμα από τις εισόδους 2 και 5 τότε στην έξοδό του θα προκύψει η τιμή «1». Ενώ αν πάρει σήμα από τις εισόδους 3 και 4 τότε θα προκύψει η τιμή στην έξοδό του «-1». Αυτή η τιμή καταλήγει σε ένα πολλαπλασιαστή. Ο πολλαπλασιαστής πολλαπλασιάζει το +/- 1 με την επιθυμητή μεταβολή που θα δοθεί στο σύστημα και το αποτέλεσμα της στην παραγόμενη ισχύ θα αξιολογηθεί στην επόμενη εκτέλεση του βρόχου του αλγορίθμου. Ουσιαστικά δηλαδή το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. οδηγεί το φωτοβολταϊκό στην μέγιστη ισχύ στο φορτίο (δοκιμάζοντας το αποτέλεσμα της μεταβολής μιας ηλεκτρικής παραμέτρου). Όταν φτάσει σε αυτή την μέγιστη τιμή (MPP) τότε ταλαντώνεται γύρω από αυτή την τιμή. Παρακάτω δείχνονται αναλυτικά όλη η διαδικασία και όλα τα παλμογραφήματα που προέκυψαν κατά την έρευνά μας.

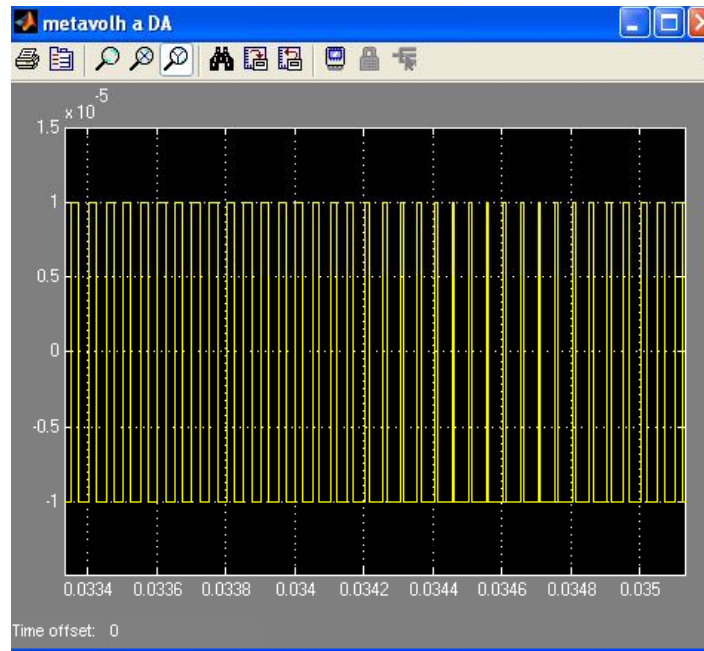
9.5 ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.

Στην εξομοίωσή μας το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. εξομοιώθηκε σαν ένα μπλοκ (subsystem) το οποίο σαν εισόδους έπαιρνε την τάση και το ρεύμα από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ενώ στην έξοδό του έδινε την μεταβολή του βαθμού εργασίας $\Delta\alpha$ (Duty cycle) έναν ψαλιδιστή που τροφοδοτεί το φορτίο από το φωτοβολταϊκό. Η κυματομορφή της μεταβολής οποίας φαίνεται στο παρακάτω παλμογράφημα.



Εικόνα 9.15

Υποσύστημα από το οποίο εξομοιώθηκε το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.



Εικόνα 9.16

Παλμογράφημα το οποίο απεικονίζει την μεταβολή του βαθμού εργασίας.

9.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (α)

Αρχικά δώσαμε μια αρχική τιμή 0,9 (constant) στο βαθμό εργασίας προκειμένου να ξεκινάει κατά την εξομοίωση τους υπολογισμούς του το πρόγραμμα. Αυτή η τιμή προστίθεται ή αφαιρείται με την μεταβολή του βαθμού εργασίας η οποία προκύπτει από την έξοδο από το Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από το παλμογράφο αλλά και από το Display που έχουμε τοποθετήσει στην έξοδο του πολλαπλασιαστή, παρατηρούμε πως η έξοδος είναι 0. Απλά την τοποθετήσαμε εκεί μόνο και μόνο για να ξεκινάει να 'τρέχει' η εξομοίωση. Τοποθετήσαμε ένα Embedded MATLAB function προκειμένου να επιταχύνουμε την

διαδικασία της εξομοίωσης. Στην εξομοίωση χρησιμοποιήθηκε αρχικά μετατροπέας Buck και μετά Buck-Boost γιατί όταν τοποθετήσαμε φορτίο 4Ω , η εξομοίωση μας δεν δούλεψε σωστά με το μετατροπέα Buck. Ο βαθμός εργασίας είχε γίνει '1' ενώ η ισχύς δεν είχε προλάβει να φτάσει στο Σ.Μ.Ι. Το πρόβλημα αυτό οφειλόταν στο μετατροπέα Buck ο οποίος δεν μπορεί να αυξήσει την τάση τροφοδοσίας πέραν αυτής της εισόδου τους και για το λόγο αυτό κατασκευάσαμε το μετατροπέα Buck-Boost. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε μέσα στο μπλοκ αυτό φαίνεται παρακάτω:

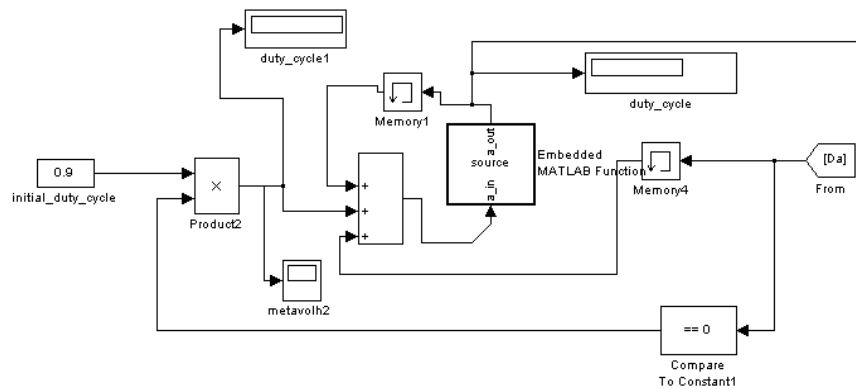
```
function a_out = source(a_in)
if a_in>1
    a_out=1;
else if a_in<0
    a_out=0;
else
    a_out=a_in;
end
```

Αυτός ο αλγόριθμος δεν μας επιτρέπει ο βαθμός εργασίας να ξεπερνάει την τιμή 1 ή να μην είναι μικρότερος του 0. Αυτό φυσικά είναι λογικό εφόσον ο βαθμός εργασίας πρέπει να κυμαίνεται σε αυτά τα επίπεδα για έναν ψαλιδιστή σαν αυτόν που εξομοιώσαμε αργότερα, για την τροφοδοσία του φορτίου από το φωτοβολταϊκό, αλλά κατά την εξομοίωσή μας μερικές φορές (στιγμιαία) ξεπερνούσαμε αυτό το όριο. Έτσι μέσω εντολών, όταν ο βαθμός εργασίας είναι μεγαλύτερος από την τιμή '1', εμείς δεν τον αφήνουμε να ξεπεράσει αυτή την τιμή αλλά παρέμεινε στην τιμή '1'. Το ίδιο ισχύει και όταν ο βαθμός εργασίας είναι μικρότερος του '0'. Δηλαδή όταν ο βαθμός εργασίας γίνονταν στιγμιαία μικρότερος από το '0' τότε εμείς μέσω εντολών δεν το αφήνουμε να πάρει αρνητικές τιμές αλλά να παραμένει στην κατώτερη τιμή '0'.

Στην συνέχεια καταλήγουμε σε ένα αθροιστή ο οποίος έχει σαν εισόδους την έξοδο του πολλαπλασιαστή (Product2), την μεταβολή του βαθμού εργασίας και την έξοδο του Embedded MATLAB function την

λειτουργία του οποίου εξηγήσαμε παραπάνω. Η έξοδος αυτού του αθροιστή καταλήγει στο υποσύστημα.

Τοποθετήσαμε μια μνήμη προκειμένου από την έξοδο του Embedded MATLAB function να καταλήγει στον αθροιστή η προηγούμενη τιμή που έβγαλε το υποσύστημα που υπολογίζει (η τιμή του υποσυστήματος μεταβάλλεται συνεχώς). Επίσης Memory έχουμε τοποθετήσει και στην μεταβολή του βαθμού εργασίας προκειμένου να μας δίνει την προηγούμενη τιμή της μεταβολής του βαθμού εργασίας εφόσον και αυτή η τιμή συνεχώς μεταβάλλεται. Έτσι με αυτό τον τρόπο καταφέραμε να μεταβάλλουμε την τιμή του βαθμού εργασίας μέχρι να έρθει ο αλγόριθμος του Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. σε ισορροπία.

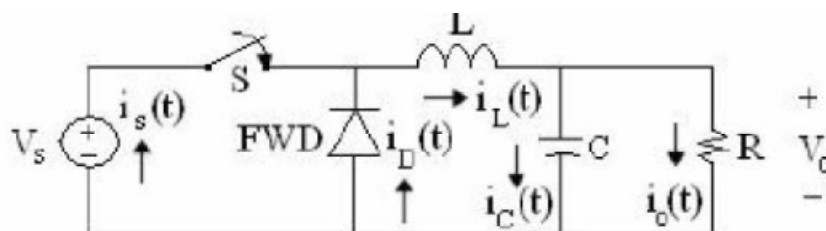


Εικόνα 9.17

Μοντέλο ελέγχου της μεταβολής του βαθμού εργασίας

9.7 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΕΝΟΣ Σ.Ρ.-Σ.Ρ. ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ

Ο μετατροπέας υποβιβασμού είναι ένας Σ.Ρ.-Σ.Ρ. μετατροπέας ο οποίος υποβιβάζει την Σ.Ρ. τάση από τη σταθερή υψηλή τιμή της σε μία επιθυμητή, χαμηλότερης τιμής. Επίσης ονομάζεται και μετατροπέας <<Buck>>. Η τοπολογία του κυκλώματος δίνεται παρακάτω στην εικόνα 9.10.



Εικόνα 9.18

Μετατροπέας Υποβιβασμού.

Ο διακόπτης S είναι συνήθως μία ηλεκτρονική συσκευή που λειτουργεί είτε στην κατάσταση αγωγής (conduction mode (on)), είτε στην κατάσταση αποκοπής (cut-off mode (off)). Οι περίοδοι αγωγής και αποκοπής (on και off) ελέγχονται από τα κατάλληλα σχεδιασμένα κυκλώματα οδήγησης της πύλης, τα οποία συνήθως δεν παρουσιάζονται. Ο χρόνος αγωγής του διακόπτη είναι ένα κλάσμα της περιόδου παλμοδότησης τέτοιος ώστε να ισχύει $T_{ON}=D \cdot T_{OFF}$, όπου D είναι η σχετική διάρκεια αγωγής (Duty Cycle). Κατά την περίοδο αποκοπής $T_{off} = (1-D)T$, η δίοδος ελεύθερης διέλευσης (freewheeling diode (FWD)), παρέχει μία διέξοδο στην ενέργεια του πηνίου, προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια του ρεύματος στο φορτίο. Το πηνίο βοηθάει στον έλεγχο της επί τοις εκατό κυμάτωσης του ρεύματος και το μέγεθος του, καθώς και η περίοδος του T , καθορίζουν αν το ρεύμα θα είναι διακοπτόμενο ή συνεχές. Ο πυκνωτής C εξομαλύνει το ρεύμα του φορτίου. Επίσης η τιμή του είναι πολύ μεγάλη έτσι ώστε η κυμάτωση της τάσης εξόδου να είναι πολύ μικρή.

Είναι προφανές από την εικόνα 9.10, ότι υπάρχουν δύο στοιχεία που αποθηκεύουν ενέργεια τα L και C. Αυτά τα στοιχεία έχουν ως αποτέλεσμα, την ύπαρξη μίας διαφορικής εξίσωσης δεύτερης τάξης συναρτήσει της τάσης του πυκνωτή ή της παράλληλης εξόδου συναρτήσει του ρεύματος του πηνίου. Η διαφορική εξίσωση συναρτήσει της τάσης του πυκνωτή, όταν ο διακόπτης S είναι κλειστός μπορεί να γραφεί ως:

$$LC \frac{d^2 v_c(t)}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) = v_s$$

Εξίσωση 9.2

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης δεύτερης τάξης δίνει την τάση στο χρονικό διάστημα όπου ο διακόπτης είναι κλειστός. Μία παρόμοια εξίσωση μπορεί να γραφεί όταν ο διακόπτης S είναι ανοικτός. Η παραπάνω διαφορική εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί αν υποθέσουμε ότι η τάση πάνω στο φορτίο, και επομένως πάνω στον πυκνωτή είναι σχεδόν σταθερή.

Η διαφορική εξίσωση συναρτήσει του ρεύματος του πηνίου, όταν ο διακόπτης S είναι κλειστός, μπορεί να γραφεί ως:

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = v_s - v_o$$

Εξίσωση 9.3

Ας υποθέσουμε ότι το κύκλωμα λειτουργεί για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα στη μόνιμη κατάσταση. Επίσης λίγο πριν το κλείσιμο του διακόπτη S υπάρχει το ελάχιστο ρεύμα στο πηνίο, I_{Lmin} (αρχική συνθήκη, $t=0$ $I_L=I_{Lmin}$). Με βάσει αυτά η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης για το χρονικό διάστημα από $0 \leq t \leq T_{on} = DT$ γίνεται

$$i_L(t) = \frac{V_s - V_o}{L} t + I_{Lmin}$$

Εξίσωση 9.4

Το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο και φτάνει στη μέγιστη του τιμή $I_{L,max}$ όταν $t=T_{ON}=DT$ και ισούται με:

$$I_{L,max} = \frac{V_s - V_o}{L} DT + I_{L,min}$$

Εξίσωση 9.5

Ορίζοντας τη μεταβολή του ρεύματος από την ελάχιστη τιμή του στη μέγιστη ως κυμάτωση ρεύματος από κορυφή σε κορυφή (peak-to-peak current ripple) ΔI_L , η παραπάνω εξίσωση δίνει την τιμή του ΔI_L , από την παρακάτω εξίσωση

$$\Delta I_L = I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_s - V_o}{L} DT$$

Εξίσωση 9.6

Σημειώνεται ότι η κυμάτωση του ρεύματος είναι ανάλογη της σχετικής διάρκειας αγωγής D (βαθμός εργασίας ή Duty Cycle), την οποία δεν μπορούμε να ελέγξουμε όταν η τάση της πηγής V_s και η τάση εξόδου V_o στο φορτίο είναι σταθερές. Από την άλλη, η κυμάτωση του ρεύματος είναι αντιστρόφως ανάλογη της αυτεπαγωγής L , την οποία μπορούμε να την επιλέξουμε. Επομένως, η κυμάτωση του ρεύματος μπορεί να διατηρηθεί στα όριά της με την κατάλληλη επιλογή της αυτεπαγωγής L . Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, το ρεύμα του πηνίου ρέει μέσω της διόδου ελεύθερης διέλευσης και η αντίστοιχη διαφορική εξίσωση για το χρονικό διάστημα από $0 \leq t \leq T_{off}$ είναι

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o$$

Εξίσωση 9.7

Από τη λύση της παραπάνω διαφορική εξίσωσης πρώτης τάξης, παίρνουμε

$$i_L(t) = -\frac{V_o}{L}t + I_{L,max}$$

Εξίσωση 9.8

όπου $I_{L,max}$ είναι η μέγιστη τιμή του ρεύματος του πηνίου κατά το άνοιγμα του διακόπτη ή στην αρχή της περιόδου αποκοπής (αρχική συνθήκη $t=T_{ON}$, $I_L=I_{L,max}$). Καθώς περνά ο χρόνος το ρεύμα του πηνίου μειώνεται στη μικρότερη του τιμή $I_{L,min}$ δηλαδή την χρονική στιγμή $t=T$ το ρεύμα του πηνίου που θα είναι $I_L=I_{L,min}$ και θα δίνεται από την εξίσωση

$$I_{L,min} = -\frac{V_o}{L}(1-D)T + I_{L,max}$$

Εξίσωση 9.9

Αυτή η εξίσωση δίνει μία άλλη έκφραση για τη κυμάτωση ρεύματος από κορυφή σε κορυφή

$$\Delta I_L = I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_o}{L}(1-D)T$$

Εξίσωση 9.10

Η κυμάτωση του ρεύματος η οποία δίνεται από την εξίσωση 9.7. πρέπει να είναι η ίδια με αυτή που δίνεται από την εξίσωση 9.9. Επομένως εξισώνοντας τις δύο αυτές εξισώσεις παίρνουμε

$$\frac{V_s - V_o}{L}DT = \frac{V_o}{L}(1-D)T$$

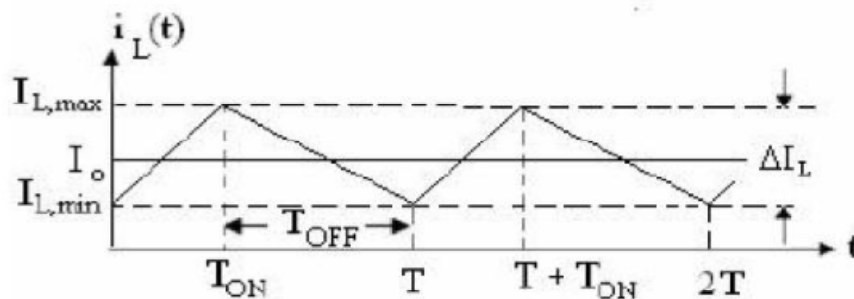
Εξίσωση 9.11

Η εξίσωση μετά από απλοποιήσεις γράφεται ως

$$V_o = DV_s$$

Εξίσωση 9.12

Η εξίσωση 9.11 δηλώνει ότι η τάση εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού είναι ανάλογη της σχετικής διάρκειας αγωγής και της τάσης της πηγής. Επομένως, αφού η σχετική διάρκεια αγωγής του στοιχείου είναι μικρότερη της μονάδας, η τάση εξόδου είναι μικρότερη από την τάση της πηγής (τάση εισόδου). Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο Σ.Ρ.-Σ.Ρ. μετατροπέας υποβιβασμού τάσης λέγεται και step-down converter. Εφόσον η ροή της ισχύος γίνεται από τη πηγή προς το φορτίο και δεν υπάρχει ροή ισχύος πίσω προς την πηγή, ο μετατροπέας αυτός ονομάζεται και forward converter.



Εικόνα 9.19
Ρεύμα πηνίου

Το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο όπως δίνεται από την εξίσωση 9.4 κατά τη διάρκεια αγωγής και από την εξίσωση 9.8 κατά τη διάρκεια αποκοπής παρουσιάζεται στην εικόνα 9.11. Το μέσο ρεύμα του πηνίου πρέπει να είναι ίσο με το Σ.Ρ. ρεύμα που διαρρέει το φορτίο. Έτσι έχουμε

$$I_{L,avg} = I_o = \frac{V_o}{R}$$

Εξίσωση 9.13

Οι εκφράσεις για το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα που διαρρέει το πηνίο μπορούν να γραφούν ως:

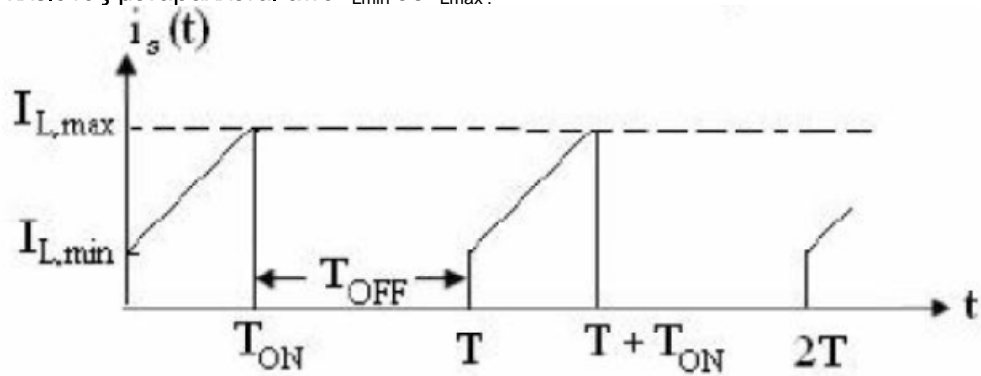
$$I_{L,min} = I_{L,avg} + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L}(1-D)T$$

Εξίσωση 9.14

$$I_{L,min} = I_{L,avg} - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2L}(1-D)T$$

Εξίσωση 9.15

Το ρεύμα i_s που δίνει η πηγή στο χρονικό διάστημα όπου ο διακόπτης είναι κλειστός μεταβάλλεται από $I_{L,min}$ σε $I_{L,max}$.



Εικόνα 9.20
Ρεύμα Πηγής

Αν τώρα θεωρήσουμε το διακόπτη, το πηνίο και τον πυκνωτή ως ιδανικά στοιχεία, η μέση ισχύ που καταναλώνεται από αυτά είναι μηδέν.

Επομένως, η μέση ισχύς που παρέχεται από την πηγή πρέπει να είναι ίση με τη μέση ισχύ που καταναλώνει το φορτίο. Έτσι έχουμε:

$$V_s I_s = V_o I_o = D V_s I_o$$

Εξίσωση 9.16

Με αυτή την εξίσωση μπορούμε να εκφράσουμε το μέσο ρεύμα της πηγής συναρτήσει του μέσου ρεύματος του φορτίου ως

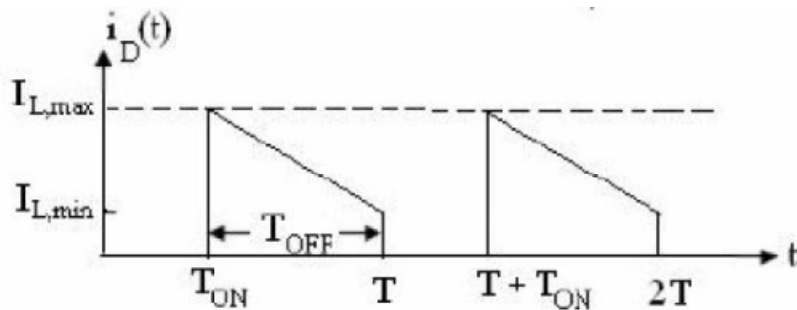
$$I_s = D I_o$$

Εξίσωση 9.17

Το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης φαίνεται στην εικόνα 9.13 και η μέση τιμή του είναι

$$I_D = (1 - D) I_o$$

Εξίσωση 9.18



Εικόνα 9.21

Ρεύμα Διόδου Ελεύθερης Διέλευσης.

Όταν το ρεύμα του φορτίου αφαιρείται από το ρεύμα του πηνίου, παίρνουμε το χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή. Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του από τις εξισώσεις 9.8 και 9.9 είναι

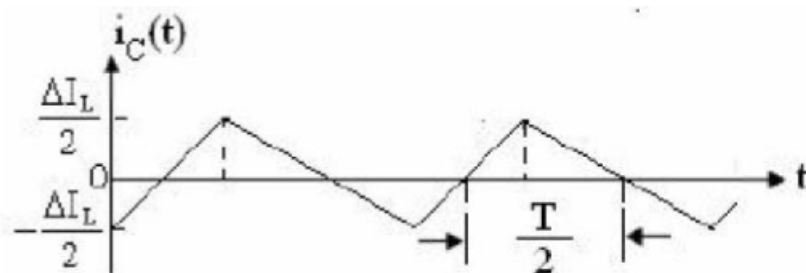
$$I_{c,max} = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{2L}(1-D)T$$

Εξίσωση 9.19

$$I_{c,max} = -\frac{\Delta I_L}{2} = -\frac{V_o}{2L}(1-D)T$$

Εξίσωση 9.20

Η αντίστοιχη κυματομορφή για το ρεύμα του πυκνωτή φαίνεται στην εικόνα 9.14. Το μέσο ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή είναι μηδέν.



Εικόνα 9.22

Ρεύμα Πυκνωτή του μετατροπέα forward.

Η κυματομορφή του ρεύματος έτσι όπως φαίνεται στην εικόνα 9.14, μας είναι χρήσιμη γιατί μπορούμε να καθορίσουμε την αλλαγή της τάσης πάνω στον πυκνωτή. Κατά τη διάρκεια της μισής περιόδου, το ρεύμα φορτίζει τον πυκνωτή και η αύξηση του ηλεκτρικού του φορτίου μπορεί να υπολογιστεί από την εικόνα 9.14 ως

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \frac{\Delta I_L T}{2} = \frac{1}{8} \Delta I_L T$$

Εξίσωση 0.21

Αντικαθιστώντας το ΔI_L της εξίσωσης 9.20 από την εξίσωση 9.18, παίρνουμε την έκφραση για την αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου του πυκνωτή ως

$$\Delta Q = \frac{V_o}{8L}(1-D)T^2$$

Εξίσωση 9.22

Επομένως, η αύξηση της τάσης του πυκνωτή είναι

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1-D}{8LC} V_o T^2 = \frac{1-D}{8LCf^2} V_o$$

Εξίσωση 9.23

Ορίζοντας την κυμάτωση της τάσης του πυκνωτή ως το λόγο της αύξησης της τάσης του πυκνωτή προς τη μέση της τιμή του τότε η εξίσωση 9.22 μπορεί να εκφραστεί ως

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2}$$

Εξίσωση 9.24

Η κυμάτωση τάσης από κορυφή σε κορυφή για τον μετατροπέα υποβιβασμού θα είναι διπλάσια από αυτή που δίνεται από την εξίσωση 9.23. Η εξίσωση 9.23 μπορεί να θεωρηθεί ως η κυμάτωση της τάσης προς τη μία μεριά.

Ο μετατροπέας υποβιβασμού μπορεί να λειτουργεί είτε σε κατάσταση συνεχούς αγωγής ρεύματος είτε σε κατάσταση διακοπτόμενης αγωγής ρεύματος. Όταν ο μετατροπέας λειτουργεί σε κατάσταση συνεχούς αγωγής ρεύματος, υπάρχει πάντα ρεύμα στο πηνίο. Υπάρχει όμως η οριακή περίπτωση στην οποία το ρεύμα παίρνει την τιμή μηδέν την χρονική στιγμή στην οποία ο διακόπτης μεταβαίνει από την κατάσταση αγωγής στην κατάσταση αποκοπής. Σε αυτή την περίπτωση το ελάχιστο ρεύμα είναι μηδέν. Συνεπώς, η ελάχιστη τιμή του πηνίου, για να είμαστε

σε κατάσταση συνεχούς αγωγής ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 9.14 θέτοντας το I_{Lmin} ίσο με το μηδέν

$$\frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2L_{min}}(1-D)T = 0$$

Εξίσωση 9.25

Επομένως

$$L_{min} = \frac{1-D}{2}RT = \frac{1-D}{2f}R$$

Εξίσωση 9.26

Από την εξίσωση 9.25 υπολογίζουμε την ελάχιστη τιμή της επαγωγής του πηνίου που θα εγκατασταθεί στον Σ.Ρ.-Σ.Ρ. μετατροπέα υποβιβασμού λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο, την συχνότητα παλμοδότησης και τη διάρκεια αγωγής του στοιχείου (διακόπτη).

Έχοντας υπόψη την τιμή του πηνίου από την εξίσωση 9.25, λαμβάνοντας υπόψη και το όριο της επιθυμητής διακύμανσης της τάσεως στην έξοδο, υπολογίζεται η χωρητικότητα του πυκνωτή στην έξοδο του μετατροπέα. Από την κυμάτωση ρεύματος (από κορυφή σε κορυφή), μπορούμε να εξάγουμε άλλη μία εξίσωση για την κυμάτωση του ρεύματος

$$\%CR = \frac{\Delta I_L}{I_{L,avg}} \times 100 = \frac{100(1-D)}{Lf}R$$

Εξίσωση 9.27

Για την οριακή περίπτωση της ελάχιστης μέσης τιμής ρεύματος του πηνίου λαμβάνουμε υπόψη την εξίσωση 9.10. Για τη οριακή αυτή περίπτωση το ελάχιστο ρεύμα του πηνίου είναι μηδέν ($I_{Lmin}=0$) και επομένως θα ισχύει η εξίσωση: [24]

$$I_{Largmin} = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_o}{2Lf}(1-D) = \frac{V_s}{2LF}D(1-D)$$

Εξίσωση 9.28

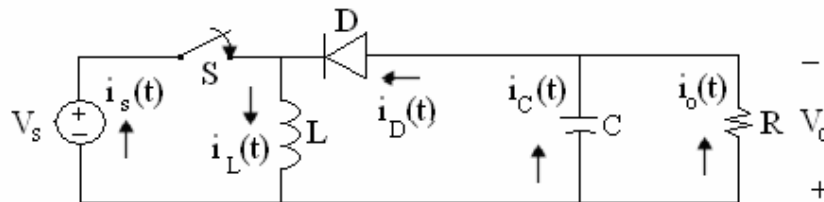
και το ελάχιστο ρεύμα προς το φορτίο θα είναι:

$$I_{0argmin} = I_{largmin}$$

Εξίσωση 9.29

9.8 Σχεδίαση ενός DC σε DC μικτού μετατροπέα (BUCK - BOOST CONVERTER)

Ο Μικτός μετατροπέας (Buck-Boost converter) είναι ένας Σ.Ρ-Σ.Ρ (dc-to-dc) μετατροπέας, ο οποίος έχει τη δυνατότητα υποβιβασμού ή ανύψωσης της τάσης εξόδου του σε σχέση με την τάση εισόδου. Με άλλα λόγια, η τάση εξόδου (output voltage) μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη της τάσης εισόδου (ή τάσης πηγής – input voltage or source voltage). Ο συγκεκριμένος μετατροπέας χαρακτηρίζεται και ως έμμεσος μετατροπέας, καθώς η τάση πηγής ποτέ δε συνδέεται άμεσα με το φορτίο. Το πηνίο στο κύκλωμα του Μικτού Σ.Ρ. σε Σ.Ρ. μετατροπέα είναι αυτό που ελέγχει τη ροή ενέργειας από την πλευρά της εισόδου στην πλευρά της εξόδου. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει το κύκλωμα του Μικτού Σ.Ρ. σε Σ.Ρ. μετατροπέα στην απλούστερη μορφή του. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις φορές των ρευμάτων που ρέουν στον πυκνωτή και στην αντίσταση φορτίου, καθώς και στην πολικότητα της τάσης εξόδου.



Εικόνα 9.23

Απλό ισοδύναμο κύκλωμα μικτού DC σε DC μετατροπέα

Ο διακόπτης S είναι συνήθως μια ηλεκτρονική συσκευή που λειτουργεί είτε στην κατάσταση αγωγής (διακόπτης S κλειστός) είτε στην κατάσταση αποκοπής (διακόπτης S ανοικτός). Οι περίοδοι αγωγής και αποκοπής ελέγχονται από κατάλληλα σχεδιασμένα κυκλώματα οδήγησης της πύλης (gating circuits), τα οποία συνήθως δεν παρουσιάζονται. Ο χρόνος αγωγής (t_{ON}) του διακόπτη είναι ένα κλάσμα της περιόδου παλμοδότησης T , έτσι ώστε να ισχύει η σχέση $t_{ON} = D \cdot T$, όπου D είναι η σχετική διάρκεια αγωγής (βαθμός εργασίας ή duty cycle). Κατά τη διάρκεια του χρόνου αποκοπής (t_{OFF}), όπου ο διακόπτης είναι ανοικτός, ισχύει η σχέση $t_{OFF} = (1 - D) \cdot T$ και το ρεύμα του πηνίου ρέει προς το φορτίο διαμέσου της διόδου D . Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η διόδος D δεν επιτρέπει την άμεση ροή του ρεύματος από την πηγή προς το φορτίο. Κατά τη διάρκεια του χρόνου αυτού, το ρεύμα της πηγής ρέει εξ' ολοκλήρου μέσω του πηνίου, το οποίο αποταμιεύει ενέργεια, ενώ ο πυκνωτής παρέχει ρεύμα στο φορτίο και εκφορτίζεται μερικώς. Μόνο όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής το ρεύμα πηνίου ρέει προς το φορτίο και τον πυκνωτή. Η διόδος D συμβάλλει στη διατήρηση της συνέχειας του ρεύματος πηνίου.

Για τη μαθηματική ανάλυση του μετατροπέα, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι το κύκλωμα έχει λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα (μόνιμη κατάσταση) και το ρεύμα του πηνίου μεταβάλλεται μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής του κατά τη διάρκεια κάθε ημιπεριόδου.

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης του μετατροπέα, θεωρείται ότι το ρεύμα πηνίου έχει πάρει την ελάχιστη τιμή του και ο διακόπτης S είναι

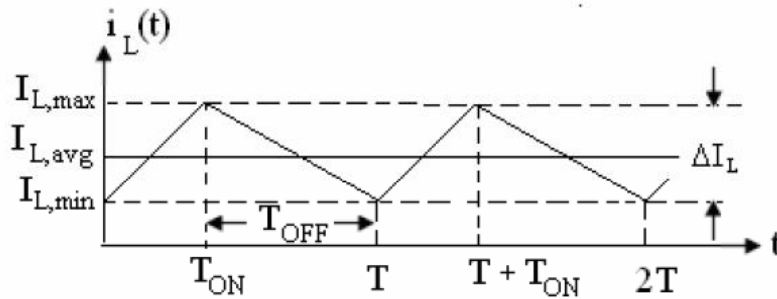
κλειστός. Κατά τη χρονική περίοδο αγωγής, η διαφορική εξίσωση που ισχύει για το ρεύμα του πηνίου και η λύση της είναι αντίστοιχα:

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s \text{ για } 0 \leq t \leq t_{ON} \text{ με } t_{ON} = DT$$

Εξίσωση 9.30

$$i_L(t) = \frac{V_s}{L}t + I_{L,min} \text{ για } 0 \leq t \leq t_{ON} \text{ με } t_{ON} = DT$$

Εξίσωση 9.31



Εικόνα 9.24

Κυματομορφή ρεύματος πηνίου

Σύμφωνα με αυτή την εξίσωση, το ρεύμα του πηνίου αυξάνει γραμμικά και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του $I_{L,max}$ τη χρονική στιγμή $t = t_{ON} = D \cdot T$ έτσι ώστε :

$$I_{L,max} = \frac{V_s}{L}(DT) + I_{L,min}$$

Εξίσωση 9.32

Ορίζοντας τη μεταβολή του ρεύματος από την ελάχιστη στη μέγιστη τιμή του ως κυμάτωση ρεύματος από κορυφή σε κορυφή (peak-to-peak current ripple) ΔI_L , η τελευταία εξίσωση δίνει μια σχέση για το ΔI_L , η οποία είναι :

$$\Delta I_L = I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_s}{L}(DT)$$

Εξίσωση 9.33

Μόλις το ρεύμα του πηνίου φτάσει τη μέγιστη τιμή του, ο διακόπτης ανοίγει. Το ρεύμα του πηνίου αρχίζει τώρα να τροφοδοτεί με ρεύμα το φορτίο και να φορτίζει τον πυκνωτή σύμφωνα με την ακόλουθη διαφορική εξίσωση :

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o \text{ για } t_{ON} \leq t \leq T \text{ με } t_{ON} = DT$$

Εξίσωση 9.34

Η λύση της τελευταίας είναι:

$$i_L(t) = -\frac{V_o}{L}t + A \text{ για } t_{ON} \leq t \leq T \text{ με } t_{ON} = DT$$

Εξίσωση 9.35

όπου A είναι η σταθερά που προκύπτει από την ολοκλήρωση και υπολογίζεται με βάση την αρχική συνθήκη για $t = t_{ON}$ ισχύει $i_L(t) = I_{L,max}$. Με την εφαρμογή της αρχικής συνθήκης στην τελευταία εξίσωση, προκύπτει:

$$I_{L,max} = -\frac{V_o}{L}(DT) + A$$

Εξίσωση 9.36

Από αυτή την εξίσωση υπολογίζεται η σταθερά A το οποίο είναι ίσο με:

$$A = I_{L,max} + \frac{V_o}{L}(DT)$$

Εξίσωση 9.37

Και επομένως, η εξίσωση του ρεύματος πηνίου γίνεται

$$i_L(t) = -\frac{V_o}{L}t + I_{L,max} + \frac{V_o}{L}(DT)$$

Εξίσωση 9.38

Σύμφωνα με αυτή την εξίσωση, το ρεύμα πηνίου ελαττώνεται γραμμικά από τη μέγιστη τιμή του και λαμβάνει την ελάχιστη τη χρονική στιγμή $t = T$. Οπότε:

$$I_{L,min} = -\frac{V_o}{L}T + I_{L,max} + \frac{V_o}{L}(DT) \Rightarrow I_{L,min} = -\frac{V_o}{L}(1-D)T + I_{L,max}$$

Εξίσωση 9.39

Σε αυτή την περίπτωση, η κυμάτωση του ρεύματος είναι:

$$\Delta I_L = I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_o}{L}(1-D)T$$

Εξίσωση 9.40

Οι τιμές της κυμάτωσης ρεύματος που προκύπτουν από τις εξισώσεις 9.36 και 9.39 πρέπει να είναι ίδιες. Επομένως, από τις εξισώσεις 9.36 και 9.39 προκύπτει:

$$\frac{V_s}{L}(DT) = \frac{V_o}{L}(1-D)T$$

Εξίσωση 9.41

Η τελευταία εξίσωση μετά από απλοποιήσεις γίνεται:

$$V_o = \frac{D}{(1-D)} V_s$$

Εξίσωση 9.42

Η εξίσωση 9.41 φανερώνει ότι η τάση εξόδου του μικτού μετατροπέα είναι ευθέως ανάλογη του D και αντιστρόφως ανάλογη του (1 - D). Στην περίπτωση που η σχετική διάρκεια αγωγής είναι D = 0.5, η τάση εξόδου είναι ίση με την τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετατροπέα. Η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη της τάσης εισόδου όταν η σχετική διάρκεια αγωγής είναι D > 0.5, που αντιστοιχεί στη λειτουργία ανύψωσης. Από την άλλη μεριά, ο μικτός μετατροπέας συμπεριφέρεται σαν μετατροπέας υποβιβασμού τάσης, με την τάση εξόδου να είναι μικρότερη της τάσης εισόδου, όταν η σχετική διάρκεια αγωγής είναι D < 0.5.

Όταν ο διακόπτης, το πηνίο και ο πυκνωτής θεωρηθούν ως ιδανικά, η ισχύς που καταναλώνεται στα στοιχεία αυτά είναι μηδέν. Συνεπώς, η μέση ισχύς τροφοδοσίας της πηγής πρέπει να είναι ίση με τη μέση τιμή της ισχύος που παρέχεται στο φορτίο. Από αυτό το συλλογισμό προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$V_s I_s = V_o I_o = \frac{I_o}{(1-D)} V_s$$

Εξίσωση 9.43

Η τελευταία εξίσωση συμβάλλει στην εξαγωγή μιας σχέσης μεταξύ της μέσης τιμής του ρεύματος της πηγής και της μέσης τιμής του ρεύματος του φορτίου και είναι η εξής:

$$I_s = \frac{D}{(1-D)} I_o$$

Εξίσωση 9.44

Το ρεύμα εξόδου, δίνεται από τη σχέση:

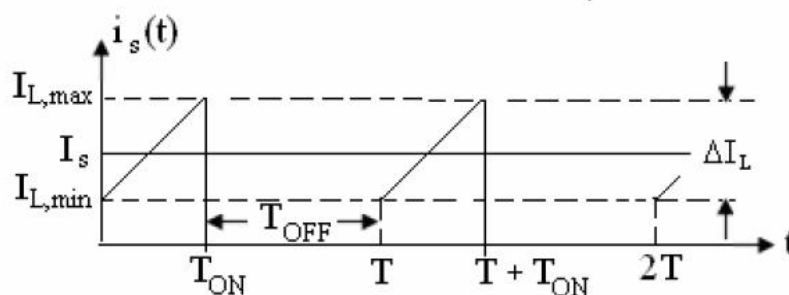
$$I_o = \frac{V_o}{R} = \left[\frac{D}{(1-D)} \right] \frac{V_s}{R}$$

Εξίσωση 9.45

Από τις εξισώσεις 9.43 και 9.44 προκύπτει το ρεύμα εισόδου συναρτήσει του βαθμού εργασίας (duty cycle) D που φαίνεται παρακάτω:

$$I_s = \frac{V_s}{R} \left[\frac{D}{(1-D)} \right]^2$$

Εξίσωση 9.46



Εικόνα 9.25

Κυματομορφή ρεύματος πηγής σε ένα μικτό μετατροπέα

Το ρεύμα εισόδου σε σχέση με το χρόνο φαίνεται στην παραπάνω εικόνα 9.17. Πρόκειται για την κυματομορφή του ρεύματος πηνίου όπως αυτή προκύπτει από την εξίσωση 9.34 όταν ο διακόπτης είναι κλειστός. Η μέση τιμή του ρεύματος εισόδου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_s = \frac{1}{T} \int_0^{DT} \left(\frac{V_s}{L} t + I_{L,min} \right) dt = \left(I_{L,min} + \frac{V_s}{2L} DT \right) D$$

Εξίσωση 9.47

Από την κυματομορφή του ρεύματος πηνίου, είναι φανερό ότι ισχύει η παρακάτω ισότητα :

$$I_{L,min} + \frac{V_s}{2L} DT = I_{L,min} + \frac{\Delta I_L}{2L} = I_{L,avg}$$

Εξίσωση 9.48

Επομένως, οι μέσες τιμές του ρεύματος πηγής και του ρεύματος πηνίου, συνδέονται με την παρακάτω εξίσωση:

$$I_s = DI_{L,avg}$$

Εξίσωση 9.49

Από τις σχέσεις 9.45 και 9.48 προκύπτει η σχέση που ακολουθεί για τη μέση τιμή του ρεύματος πηνίου :

$$I_{L,avg} = \frac{V_s}{R} \frac{D}{(1-D)^2}$$

Εξίσωση 9.50

Οι εξισώσεις της μέγιστης και ελάχιστης τιμής του ρεύματος πηνίου μπορούν τώρα να γραφούν ως:

$$I_{L,max} = I_{L,avg} + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{DV_s}{R(1-D)^2} + \frac{DV_s}{2Lf}$$

Εξίσωση 9.51

$$I_{L,max} = I_{L,avg} - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{DV_s}{R(1-D)^2} - \frac{DV_s}{2Lf}$$

Εξίσωση 9.52

Η κυμάτωση ρεύματος από κορυφή σε κορυφή (peak-to-peak current ripple) ΔI_L μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των τάσεων εισόδου και εξόδου όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\Delta I_L = \frac{V_s}{Lf} D = \frac{V_o}{Lf} (1 - D)$$

Εξίσωση 9.53

Όταν σε μια εφαρμογή γνωρίζουμε τα όρια μεταβολής της τάσεως εισόδου V_s ενώ η τάση του φορτίου V_o πρέπει να είναι σταθερή, από την εξίσωση 9.42 μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές του D η οποία θα δίνεται από την εξίσωση:

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_s}$$

Εξίσωση 9.54

Όταν $V_s = V_{smin}$ τότε $D=D_{max}$ και αντίθετα όταν $V_s = V_{smax}$ τότε $D=D_{min}$. Για την οριακή περίπτωση του ελάχιστου μη διακοπτόμενου ρεύματος του πηνίου θα είναι:

$$I_{Larg,min} = \frac{\Delta I_L}{2}$$

Εξίσωση 9.55

και

$$I_{Larg,min} = \frac{V_s}{2Lf} D = \frac{V_o}{1Lf} (1 - D)$$

Εξίσωση 9.56

Από την εξίσωση 9.43 προκύπτει:

$$I_{Larg,min} = I_{0arg,min} \frac{1}{1-D}$$

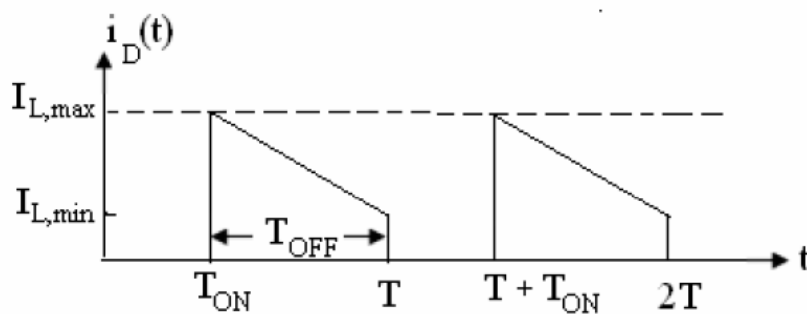
Εξίσωση 9.57

Από τις εξισώσεις 9.55 και 9.56 προκύπτει:

$$I_{0arg,min} = \frac{V_s}{2Lf} D(1-D) = \frac{V_o}{2Lf} (1-D)^2$$

Εξίσωση 9.58

Από τις εξισώσεις 9.55 και 9.57 υπολογίζονται για ένα συγκεκριμένο σύστημα οι ελάχιστες οριακές μέσες τιμές του ρεύματος του πηνίου και του φορτίου αντίστοιχα, για δεδομένες τιμές του L, του D και της συχνότητας f παλμοδότησης του στοιχείου.



Εικόνα 9.26

Κυματομορφή ρεύματος διόδου

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται το ρεύμα που ρέει μέσω της διόδου. Η μέση τιμή του ρεύματος διόδου είναι ίδια με τη μέση τιμή του ρεύματος φορτίου και μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_{D,avg} = \frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2} = \frac{t_{OFF}}{T} = \frac{V_o}{R}$$

Εξίσωση 9.59

Εφόσον η μέση τιμή του ρεύματος διόδου είναι ίση με τη μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση φορτίου R, η μέση τιμή του ρεύματος του πυκνωτή είναι μηδέν.

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, ο πυκνωτής τροφοδοτεί το φορτίο. Επομένως, για το χρονικό διάστημα αγωγής του διακόπτη, το ρεύμα του πυκνωτή είναι:

$$i_c(t) = -I_o = \frac{V_o}{R} \text{ για } 0 \leq t \leq t_{ON}$$

Εξίσωση 9.60

Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός, το ρεύμα του πηνίου τροφοδοτεί και τον πυκνωτή και το φορτίο. Για το λόγο αυτό, για χρονικό διάστημα , το ρεύμα του πυκνωτή δίνεται από την εξίσωση:

$$i_c(t) = i_L(t) - I_o$$

Εξίσωση 9.61

Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ρεύματος του πυκνωτή, κατά το διάστημα που ο διακόπτης είναι ανοικτός, δίνονται από τις εξισώσεις:

$$I_{c,max} = I_{L,max} - I_o = \frac{V_s}{R} \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 + \frac{DV_s}{2Lf}$$

Εξίσωση 9.62

$$I_{c,min} = I_{L,min} - I_o = \frac{V_s}{R} \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 + \frac{DV_s}{2Lf}$$

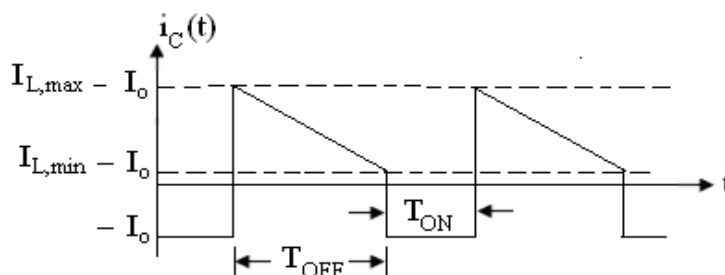
Εξίσωση 9.63

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να σημειωθεί ότι η κυμάτωση ρεύματος πυκνωτή από κορυφή σε κορυφή (peak-to-peak current ripple) ΔI_C :

$$\Delta I_C = I_{C,max} - I_{C,min}$$

Εξίσωση 9.64

Η κυματομορφή του ρεύματος του πυκνωτή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 9.27

Κυματομορφή ρεύματος πυκνωτή

Από την κυματομορφή του ρεύματος πυκνωτή, είναι δυνατό να καθοριστεί η μεταβολή της τάσης που εφαρμόζεται στον πυκνωτή. Κατά το διάστημα που ο διακόπτης είναι κλειστός, το φορτίο του πυκνωτή μειώνεται, δεδομένου ότι ο πυκνωτής τροφοδοτεί το φορτίο στη συγκεκριμένη περίπτωση. Η μεταβολή του φορτίου του πυκνωτή είναι:

$$\Delta Q = -I_o t_{ON} = -\frac{V_o}{R} (DT)$$

Εξίσωση 9.65

Η μείωση του φορτίου του πυκνωτή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης του. Επομένως, το πλάτος της μεταβολής της τάσης του πυκνωτή δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$|\Delta V_o| = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{V_o}{RC} (DT)$$

Εξίσωση 9.66

Να αναφερθεί ότι κατά το διάστημα που ο διακόπτης είναι ανοικτός, η συνιστώσα του ρεύματος πηνίου που ρέει μέσω του πυκνωτή θα προκαλέσει αύξηση της τάσης του πυκνωτή κατά την ίδια ποσότητα, που δίνεται από την εξίσωση 9.65. Για το λόγο αυτό, όταν η κυμάτωση του πυκνωτή ορίζεται ως ο λόγος της αύξησης της τάσης του πυκνωτή προς τη μέση τιμή της τάσης του πυκνωτή, τότε προκύπτει ότι:

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{DT}{RC} = \frac{D}{RCf}$$

Εξίσωση 9.67

Να σημειωθεί ότι η κυμάτωση του πυκνωτή που ορίζεται από την εξίσωση 9.66 δεν είναι ίδια με την κυμάτωση τάσης από κορυφή σε κορυφή για τους ανορθωτές. Η κυμάτωση τάσης από κορυφή σε κορυφή για το μικτό μετατροπέα θα είναι διπλάσια από αυτή που δίνεται από την εξίσωση 9.66. Η σχέση αυτή μπορεί να θεωρηθεί σαν μονόπλευρη κυμάτωση τάσης (one-sided voltage ripple).

Ο μικτός μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει σε κατάσταση συνεχούς ή διακοπτόμενης αγωγής. Όταν λειτουργεί στην κατάσταση συνεχούς αγωγής, το πηνίο διαρρέεται πάντα από ρεύμα. Το ελάχιστο ρεύμα πηνίου στην κατάσταση συνεχούς αγωγής μπορεί να πάρει την οριακή τιμή μηδέν, τη χρονική στιγμή αλλαγής κατάστασης του διακόπτη. Επομένως, υπάρχει μια ελάχιστη τιμή αυτεπαγωγής που εξασφαλίζει συνεχή αγωγή του μετατροπέα. Η τιμή αυτή μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 9.51 αν αντικατασταθεί το $I_{L,max}$ με 0. Άρα:

$$\frac{V_o}{R(1-D)} - \frac{V_o}{2L_{min}f} (1-D) = 0$$

Εξίσωση 9.68

Γίνεται αντικατάσταση του V_S με V_o , γιατί μετά τη αλλαγή της κατάστασης του διακόπτη από κλειστός σε ανοικτό, η τάση του πηνίου θα είναι ίση με την τάση εξόδου.

Τελικά η ελάχιστη αυτεπαγωγή για λειτουργία συνεχούς αγωγής δίνεται από τον τύπο:

$$L_{min} = \frac{R}{2f}(1 - D)^2$$

Εξίσωση 9.69

Από τις εξισώσεις 9.66 και 9.68 υπολογίζουμε τις ελάχιστες τιμές της χωρητικότητας του πυκνωτή και της επαγωγής του πηνίου του συστήματος.

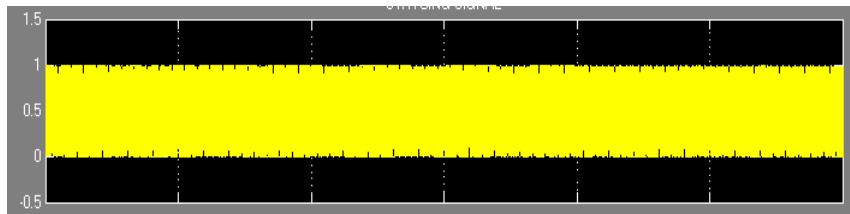
Από την κυμάτωση ρεύματος από κορυφή σε κορυφή, προκύπτει η εκατοστιαία κυμάτωση ρεύματος, η οποία δίνεται παρακάτω: [24]

$$\%CR = \frac{\Delta I_L}{I_{L,avg}} \times 100 = \frac{100R}{Lf}(1 - D)^2 = 100 \left(\frac{2L_{min}}{L} \right)$$

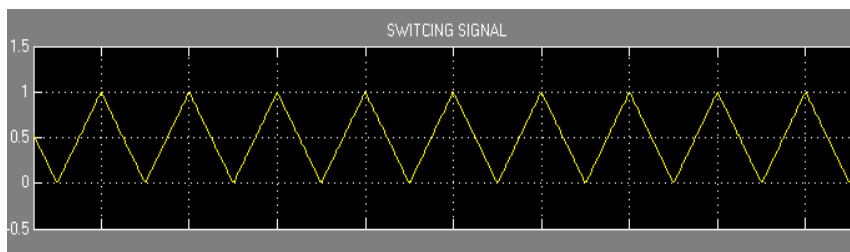
Εξίσωση 9.70

9.9 Διαμόρφωση Εύρους Παλμών PWM (Pulse With Modulation)

Όπως αναφέραμε και παραπάνω για να λειτουργήσει ο μετατροπέας Σ.Ρ-Σ.Ρ πρέπει να δημιουργήσουμε μια παλμοσειρά προκειμένου να μπορούμε να οδηγήσουμε τον διακόπτη (Ideal Switch). Για να δημιουργήσουμε μια παλμοσειρά συγκρίναμε δύο σήματα. Το ένα ήταν ο βαθμός εργασίας (α) και το άλλο μια τριγωνική παλμοσειρά. Τις κυματομορφές τους τις παραθέτουμε παρακάτω.

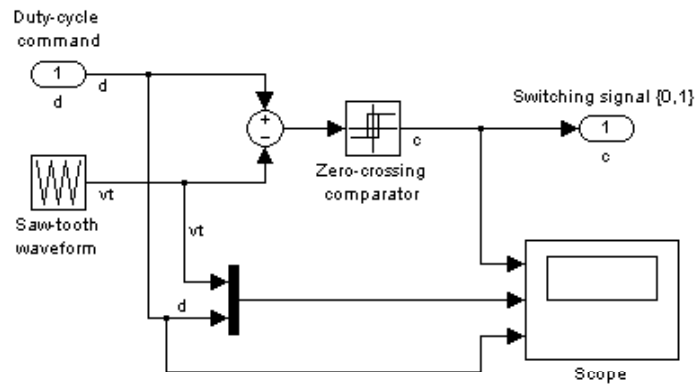


Εικόνα 9.28
Τριγωνικός παλμός 20KHz



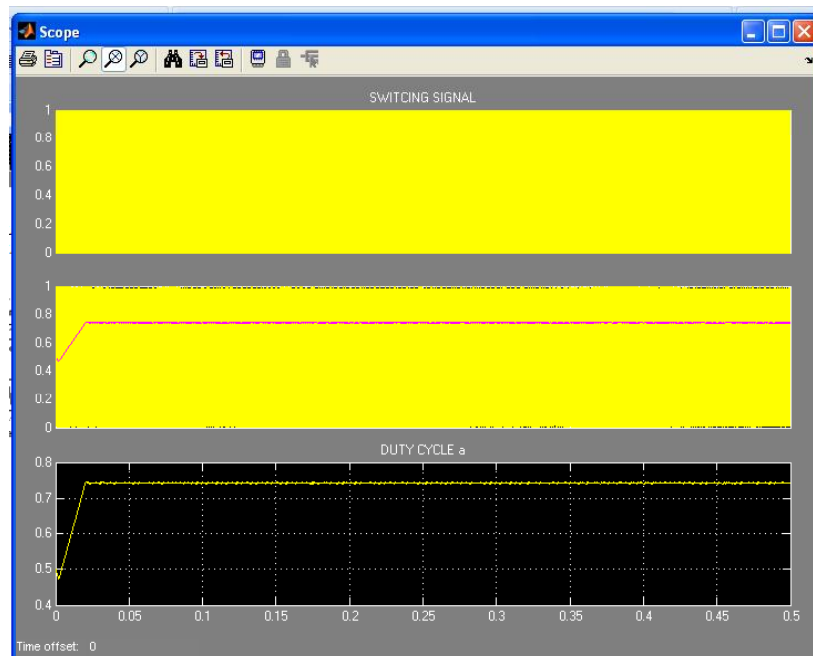
Εικόνα 9.29
Ο ίδιος παλμός με μεγέθυνση

Για την σύγκριση των δύο σημάτων χρησιμοποιήσαμε ένα συγκριτή, Zero-Crossing Comparator. Το μοντέλο που δημιουργήσαμε στο MATLAB/Simulink φαίνεται παρακάτω:

**Εικόνα 9.30**

Συγκριτής Zero-Crossing Comparator

Παρακάτω φαίνονται τα παλμογραφήματα που καταγράψαμε:



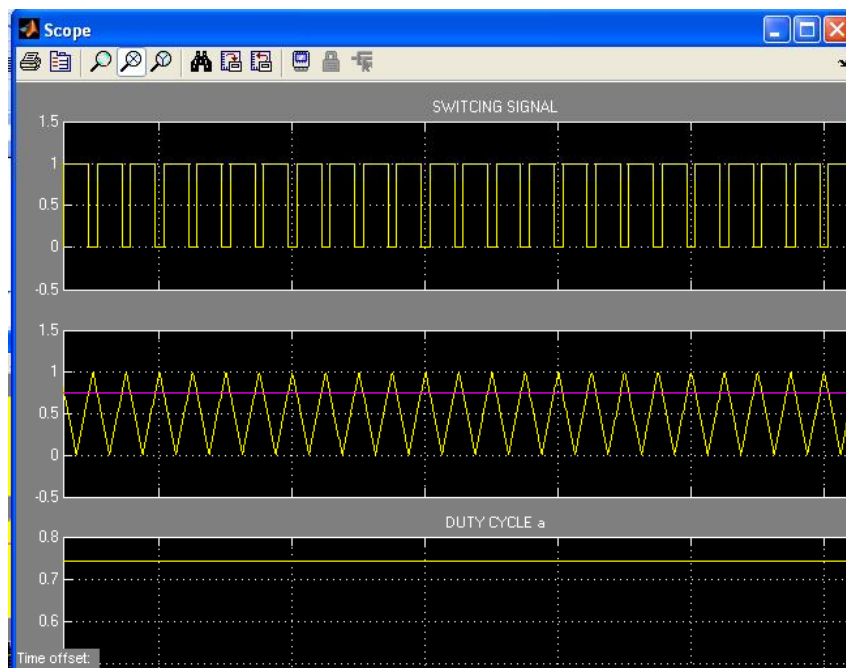
Εικόνα 9.31

Στο πρώτο παλμογράφημα απεικονίζεται ο παλμός που δημιουργήθηκε μετά την σύγκριση του τριγωνικού παλμού με τον βαθμό εργασίας.

Το δεύτερο παλμογράφημα δείχνει τον βαθμό εργασίας (κόκκινη κυματομορφή) και τον τριγωνικό παλμό ενώ

Το τρίτο παλμογράφημα δίνει τον βαθμό εργασίας.

Παρακάτω δείχνουμε τα ίδια παλμογραφήματα με περισσότερη μεγέθυνση.



Εικόνα 9.32

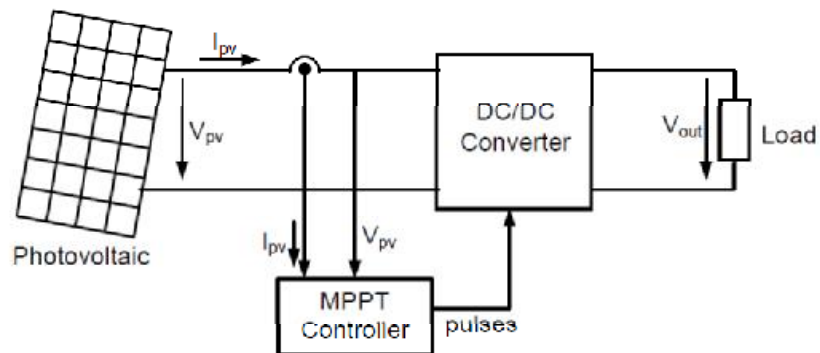
Με αυτό τον τρόπο δημιουργήσαμε μια παλμοσειρά η οποία μας καθόριζε πότε θα κλείσει ο διακόπτης και πότε θα ανοίξει, καθώς επίσης και τον χρόνο που θα παραμείνει κλειστός ή ανοιχτός ο διακόπτης. Δηλαδή ανάλογα με το πόσο μεγάλος ή μικρός είναι ο βαθμός εργασίας, αυτό θα μας καθόριζε το χρόνο που διαρκεί ο κάθε παλμός. Αξίζει να τονίσουμε πως οι παλμοί διαρκώς μεταβάλλονταν και αυτό είναι λογικό διότι ο βαθμός εργασίας συνεχώς διαφοροποιείται βάσει του Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. Όσο περισσότερο χρόνο παρέμενε κλειστός ο διακόπτης τόσο περισσότερο ρεύμα απορροφά το φορτίο.

10^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΚΑΙ Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.

10.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΞΟΜΟΙΩΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Παρακάτω φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα το οποίο εξομοιώσαμε στο Matlab:



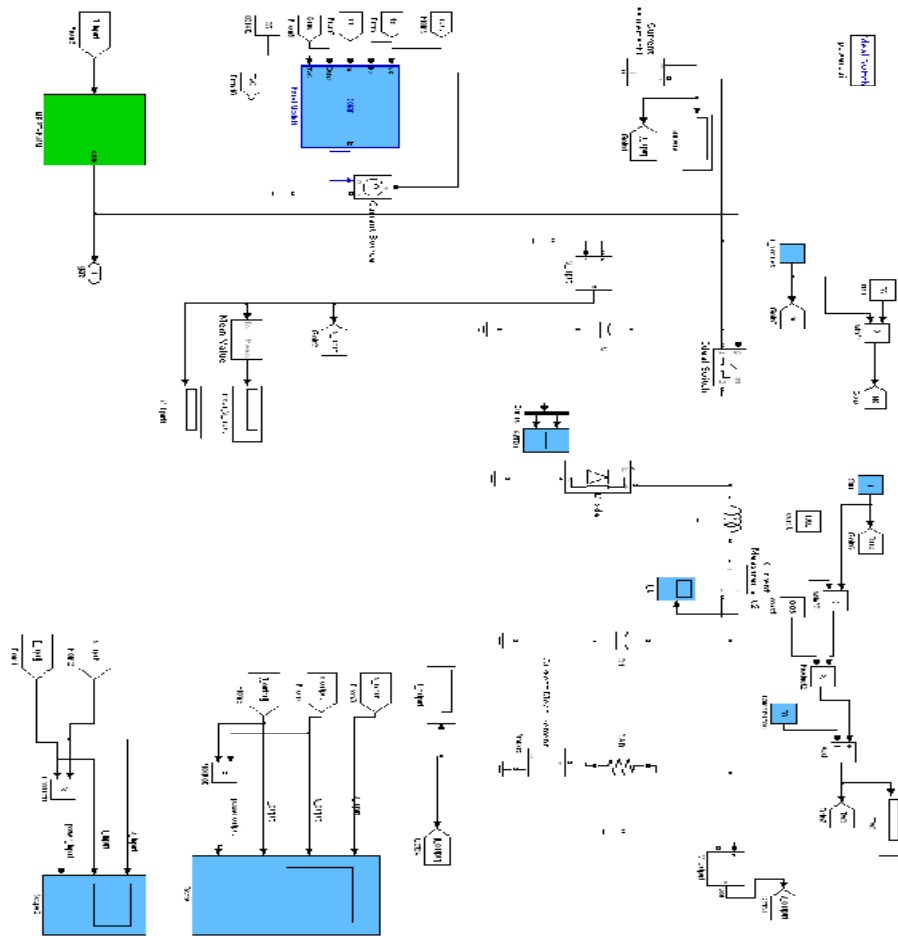
Σχήμα: 10.1

Αναλυτικότερα ο τύπος του φωτοβολταϊκού για το οποίο εξομοιώσαμε ήταν SW 80 mono/R5E. Χρησιμοποιήσαμε ως Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. την μέθοδο της Διαταραχής και Παρατήρησης. Επίσης με την διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) καθοδηγούσαμε τον μετατροπέα Σ.Ρ.-Σ.Ρ. Ως μετατροπέα χρησιμοποιήσαμε αρχικά τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (Buck Converter) και στην συνέχεια ένα μετατροπέα υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης (Buck-Boost Converter). Τέλος ως φορτίο χρησιμοποιήσαμε ένα ωμικό φορτίο.

10.2 ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ , Σ.Ε.Σ.Μ.Ι., ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΤΑΣΗΣ, ΦΟΡΤΙΟΥ.

Στην συνέχεια της εργασίας μας έπρεπε να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο στο οποίο θα χρησιμοποιούσαμε:

- 1) Φωτοβολταϊκή συστοιχία.
- 2) Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. μαζί με το PWM.
- 3) Μετατροπέα υποβιβασμού τάσεως.
- 4) Φορτίο.



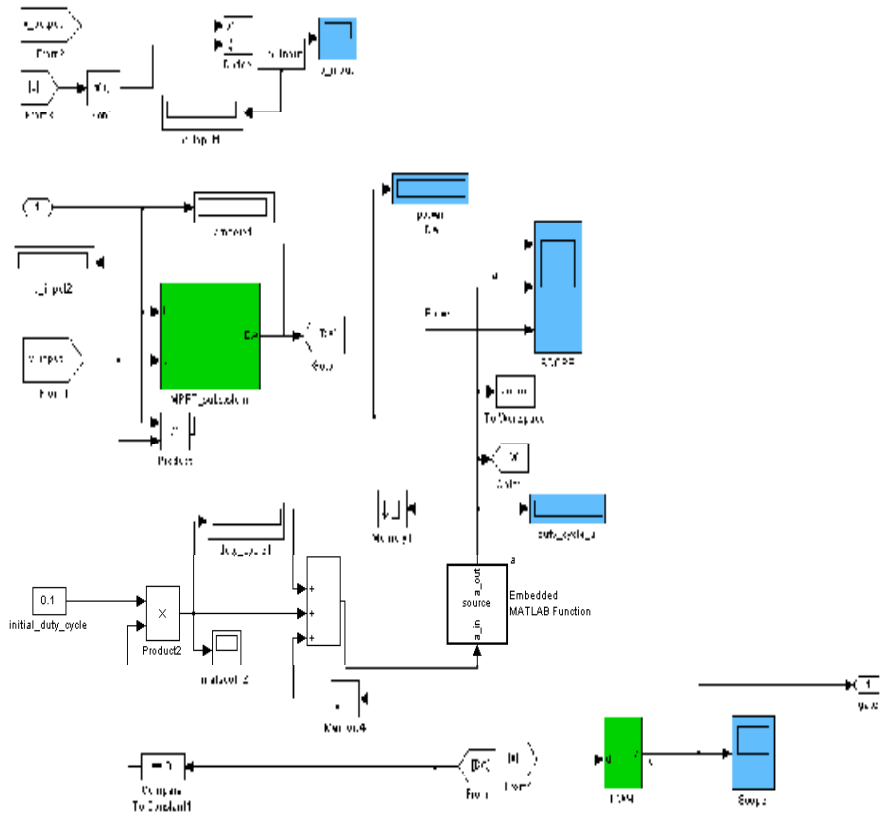
Σχήμα: 10.2

Συνολικό μοντέλο εξομοίωσης με μετατροπέα Buck.

Στο παραπάνω κύκλωμα εξομοιώνουμε μόνο ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Η τάση και το ρεύμα από το

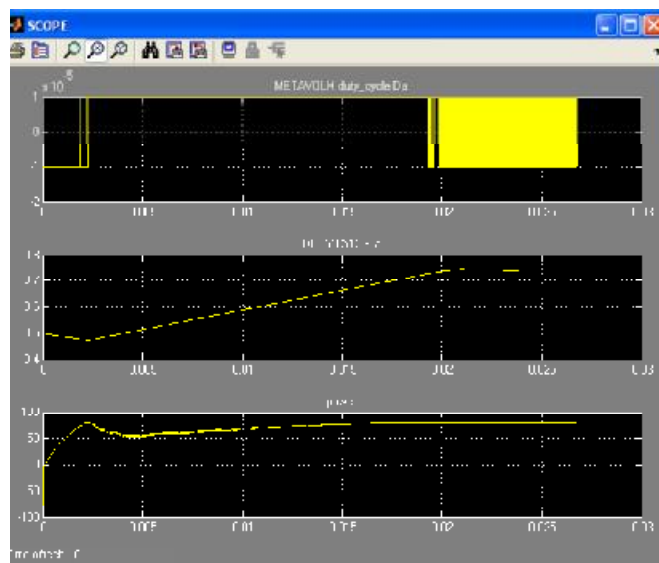
φωτοβολταϊκό μας είναι είσοδος στο Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. ο βαθμός εργασίας (α) που προκύπτει χρησιμοποιείται για την PWM διαμόρφωση, ο (μεταβλητός) παλμός της οποίας καταλήγει στην πύλη (gate) του διακόπτη (Ideal Switch). Με αυτό τον τρόπο καθορίζουμε τον ρυθμό που ο διακόπτης βρίσκεται στην αγωγή ή τον ρυθμό που ο διακόπτης βρίσκεται στην αποκοπή (άγει ή δεν άγει). Όσο περισσότερο χρονικό διάστημα ο διακόπτης είναι κλειστός, δηλαδή άγει, τόσο περισσότερο ρεύμα θα καταναλωθεί πάνω στο ωμικό φορτίο μας. Επομένως, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός εργασίας ($0 < \alpha < 1$), τόσο περισσότερο ρεύμα θα καταναλώνεται πάνω στο φορτίο επομένως έτσι μετακινεί ο μετατροπέας το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στο μέγιστο σημείο ισχύος. Ο βαθμός εργασίας (α) επηρεάζεται από την τιμή του φορτίου (ωμικό φορτίο). Όσο μεγαλύτερο φορτίο έχουμε, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο βαθμός εργασίας (α) και στόχος του είναι να παίρνουμε ανεξάρτητα από το φορτίο την μέγιστη ισχύ πάνω σε αυτό. Κατά την εξομοίωσή μας παρατηρούμε πως αρχικά η ισχύς στιγμιαία φτάνει τα 80W, στην συνέχεια μειώνεται γύρω στα 50W και τελικά ανεβαίνει και σταθεροποιείται εκ νέου στα 80W. Αυτό οφείλεται πως στην αρχή φορτίζεται το πηνίο και ο πυκνωτής τα οποία είναι αφόρτιστα. Όταν φορτίσουν ξεκινάει από τα 50W και αυξάνει η τιμή της ισχύος μέχρι να σταθεροποιηθεί στο Σ.Μ.Ι. (Σημείο Μέγιστης Ισχύος) εκεί ταλαντώνεται μέχρι να τελειώσει ο χρόνος της εξομοίωσή μας. Αρχικά ορίσαμε ως τιμή του φορτίου 2Ω. Οι τιμές που προέκυψαν κατά την εξομοίωση φαίνονται αναλυτικά παρακάτω:

ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΟ 2Ω ΠΡΟΕΚΥΨΑΝ:



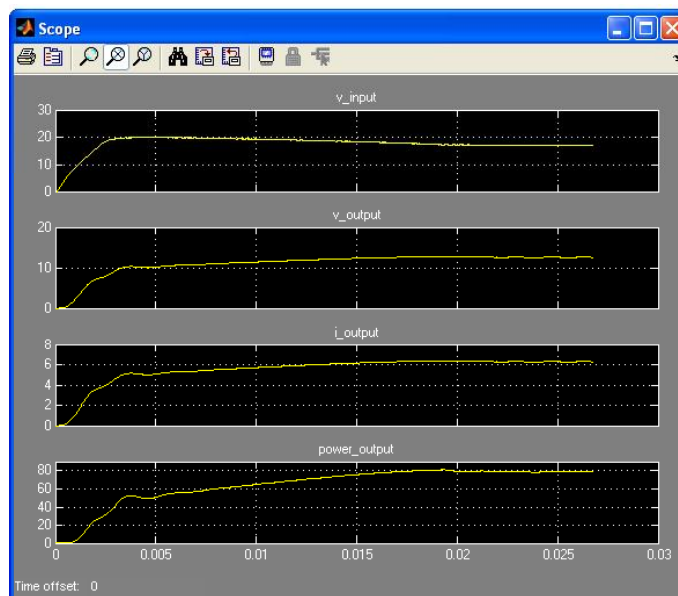
Σχήμα: 10.3

Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. καθώς και μοντέλου διαμόρφωσης εύρους παλμού. Από τα Display μπορούμε να παρατηρήσουμε πως η ισχύς σταθεροποιήθηκε στα 80,48W ενώ ο βαθμός εργασίας είναι $\alpha=0,7419$.

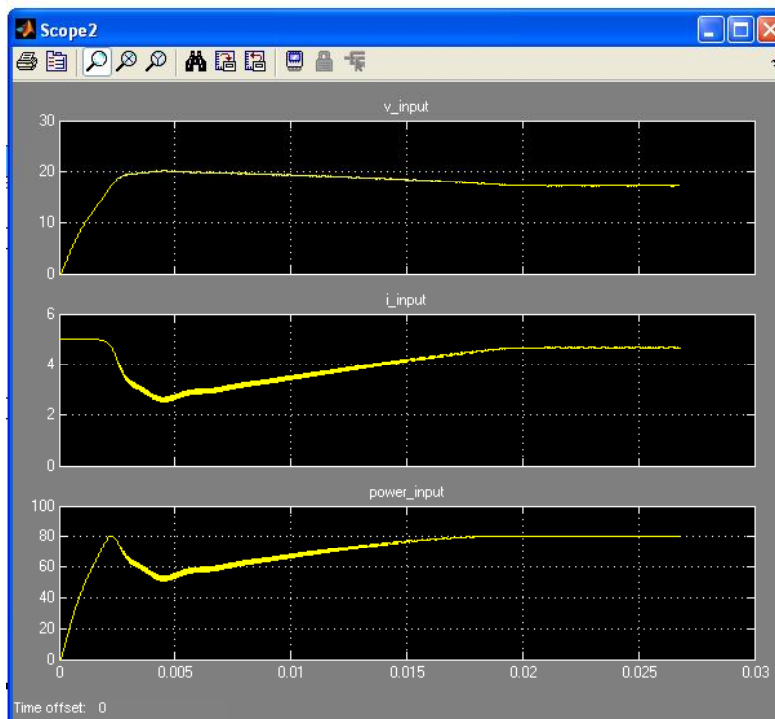


Εικόνα 10.1

Μεταβολή του βαθμού εργασίας ($\Delta\alpha$), ο βαθμός εργασίας (α) και η ισχύς (P) για φορτίο 2Ω .

**Εικόνα 10.2**

Τάση εισόδου, τάση ρεύμα και ισχύ εξόδου στον μετατροπέα.

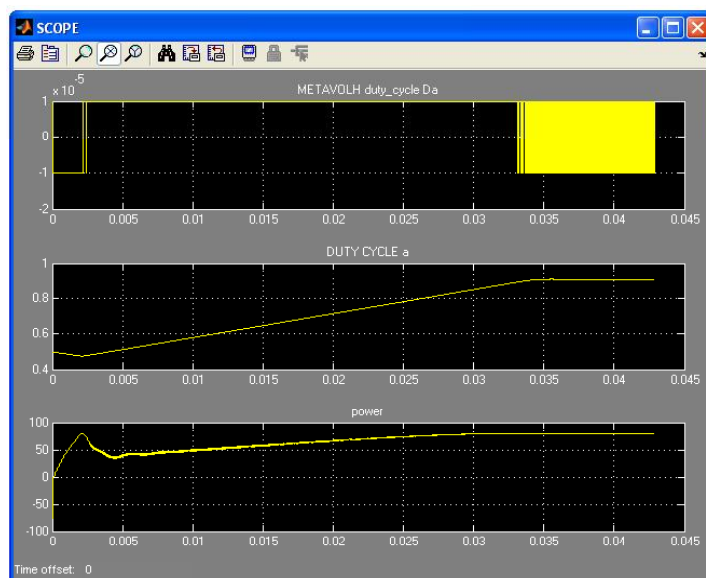


Εικόνα 10.3

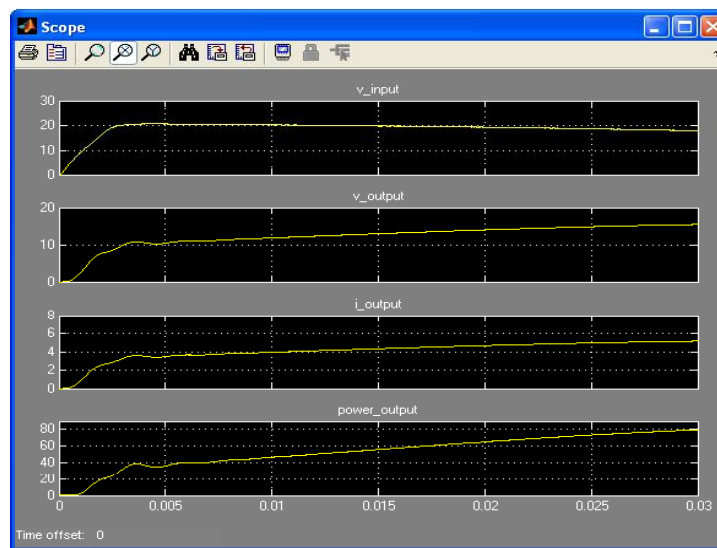
Τάση εισόδου, το ρεύμα εισόδου και η ισχύς εισόδου στον μετατροπέα.

Παρατηρούμε πως για φορτίο 2Ω ο βαθμός εργασίας προέκυψε $\alpha=0,7419$ ενώ η ισχύς σταθεροποιήθηκε στην τιμή $P=80,48W$. Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω παλμογραφήματα, επαληθεύονται αυτά που αναφέραμε παραπάνω, δηλαδή η ισχύς συνεχώς αυξάνει μέχρι να σταθεροποιηθεί στο Σ.Μ.Ι. (Σημείο Μέγιστης Ισχύος).

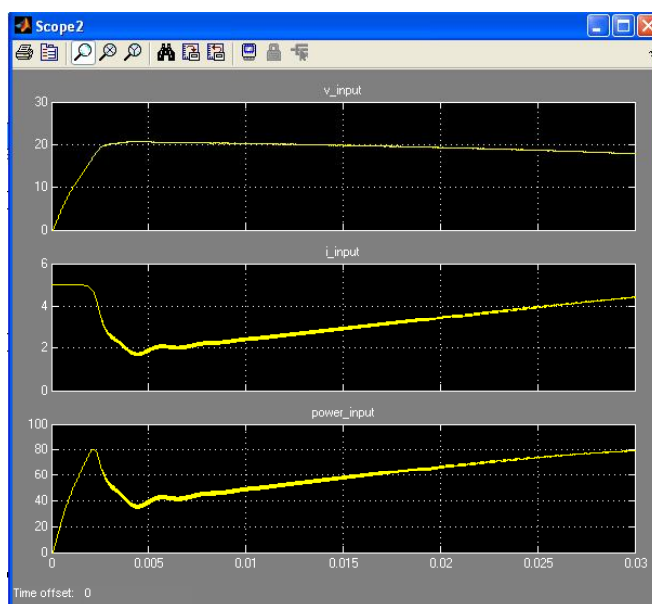
Στην συνέχεια τοποθετήσαμε φορτίο 3Ω προκειμένου να δούμε τη συμπεριφορά του συστήματος με μειωμένο φορτίο.

**Εικόνα 10.4**

Μεταβολή του βαθμού εργασίας (Δa), ο βαθμός εργασίας (a) και η ισχύς (P) για φορτίο 3Ω .

**Εικόνα 10.5**

Τάση εισόδου, τάση, ρεύμα και ισχύς εξόδου στον μετατροπέα.

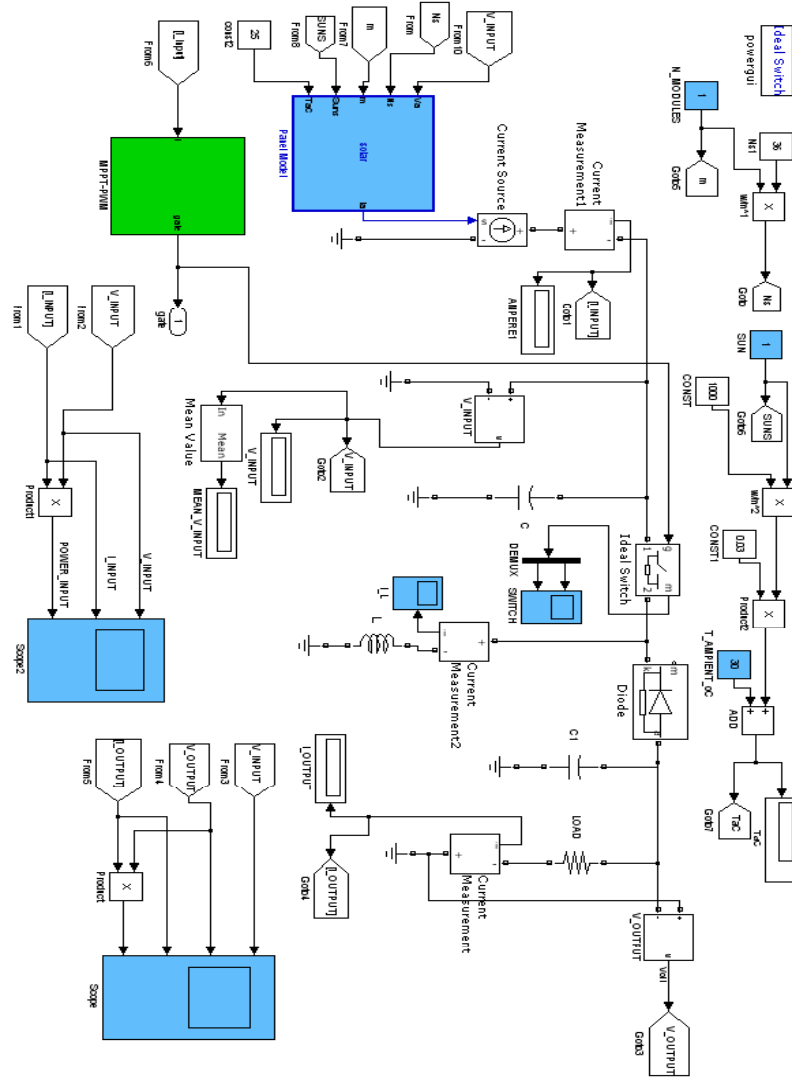
**Εικόνα 10.6**

Τάση εισόδου, το ρεύμα εισόδου και η ισχύς εισόδου στον μετατροπέα.

Παρατηρούμε πως όσο το φορτίο αυξάνει, από 2Ω που είχαμε στην προηγούμενη μέτρηση στα 3Ω , ο βαθμός εργασίας (α) αυξάνει ενώ

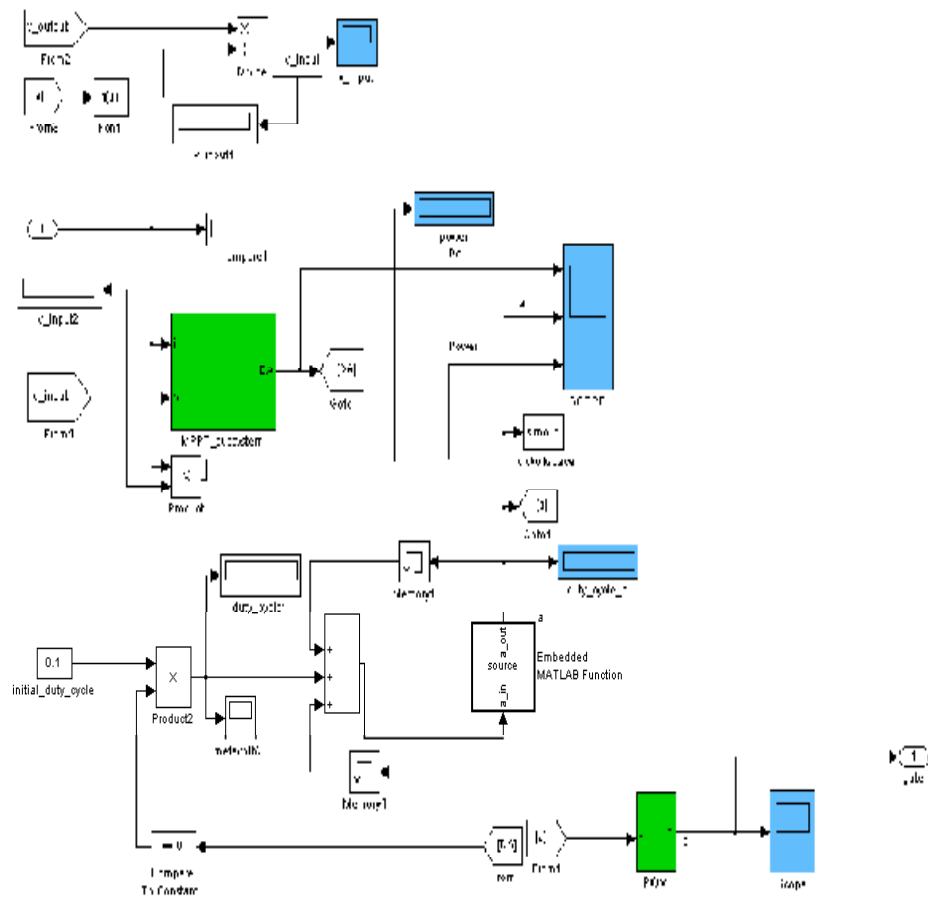
η ισχύς είναι σταθερή στο Σ.Μ.Ι. Είναι όντως λογικό να συμβαίνει αυτό διότι όσο μικρότερο φορτίο τοποθετούμε, τόσο περισσότερο ρεύμα πρέπει να απορροφήσει. Άρα πρέπει ο διακόπτης να μείνει περισσότερη ώρα σε αγωγή, επομένως να είναι περισσότερη ώρα κλειστός. Για αυτό το λόγω ο βαθμός εργασίας (α) μειώνεται με το φορτίο.

Όταν τοποθετήσαμε φορτίο 4Ω , η εξομοίωσή μας δεν δούλευε σωστά. Ο βαθμός εργασίας (α) είχε γίνει '1' ενώ η ισχύς δεν είχε προλάβει να φτάσει στο Σ.Μ.Ι. Το πρόβλημα αυτό οφειλόταν στον μετατροπέα μας ο οποίος δεν μπορεί να αυξήσει την τάση τροφοδοσίας πέραν αυτής της εισόδου τους και για το λόγο αυτό κατασκευάσαμε ένα μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού τάσεως (Buck-Boost Converter). Το νέο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 10.4. Η μόνη αλλαγή που πραγματοποιήσαμε ήταν στον μετατροπέα. Όλο το άλλο κύκλωμα είναι το ίδιο με τις προηγούμενες μετρήσεις. Για πρώτη μέτρηση επιλέξαμε φορτίο 4Ω στο οποίο δεν μπόρεσε να οδηγήσει στο Σ.Μ.Ι. ο προηγούμενος μετατροπέας.



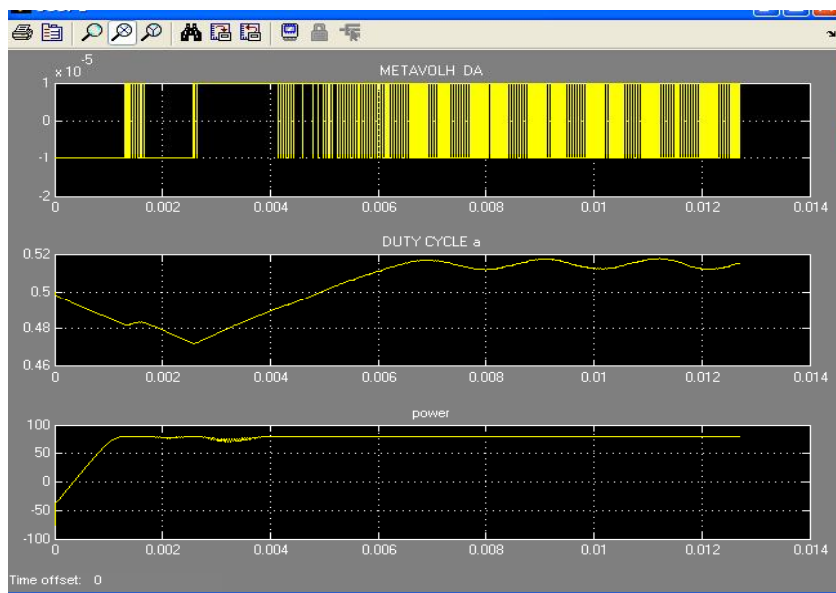
Σχήμα: 10.4

Συνολικό μοντέλο εξομοίωσης συστήματος με μετατροπέα Buck-Boost.

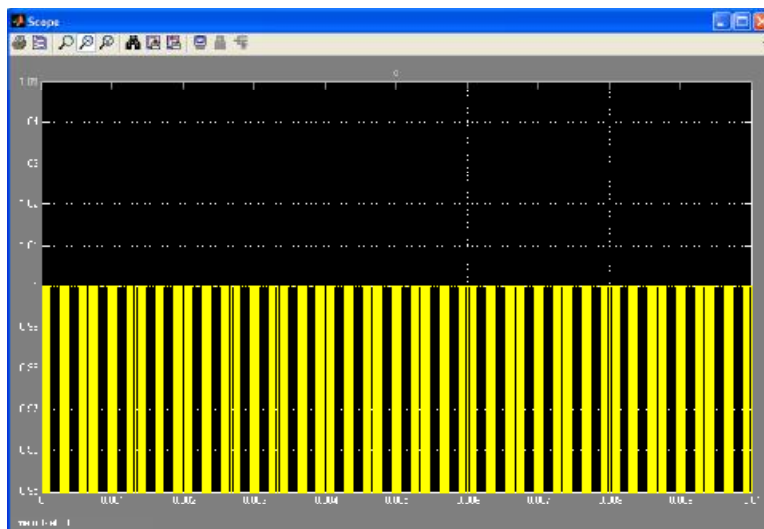


Σχήμα: 10.5

Φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα του Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. καθώς και η διαμόρφωση PWM.

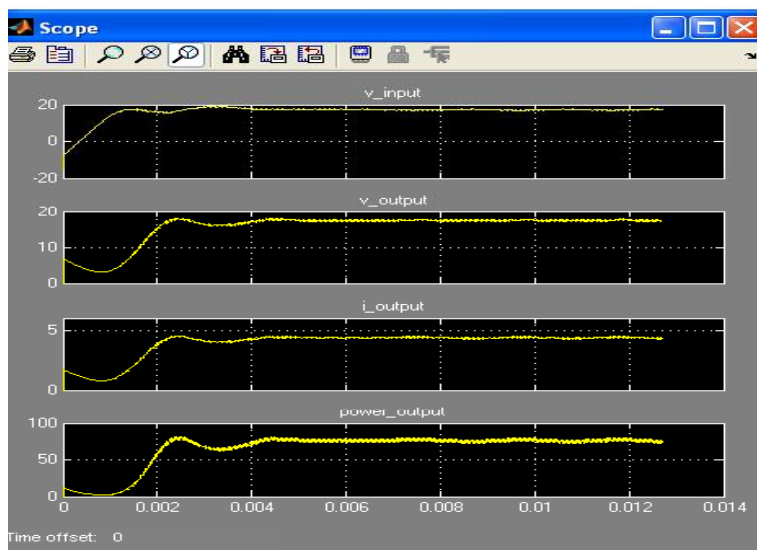
**Εικόνα 10.7**

Μεταβολή του βαθμού εργασίας(Δa), ο βαθμός εργασίας(a) και η ισχύς (P).

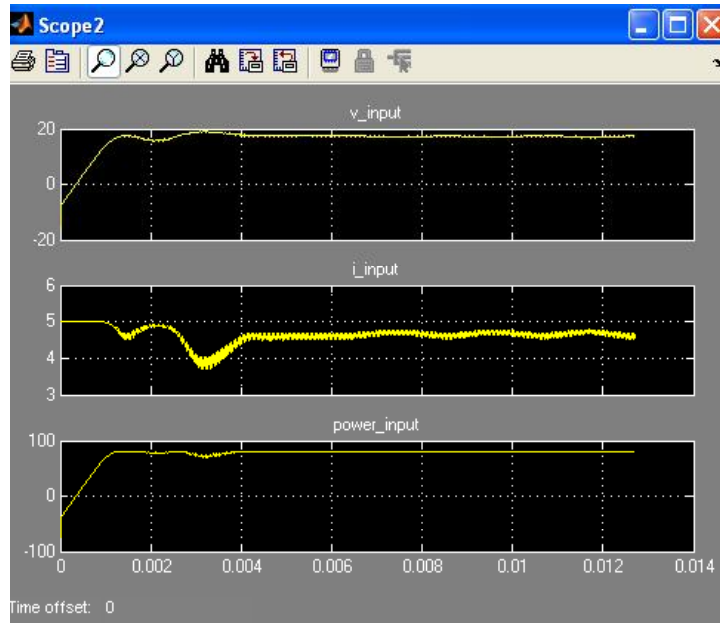


Εικόνα 10.8

Παλμοσειρά η οποία φτάνει στον διακόπτη του μετατροπέα.

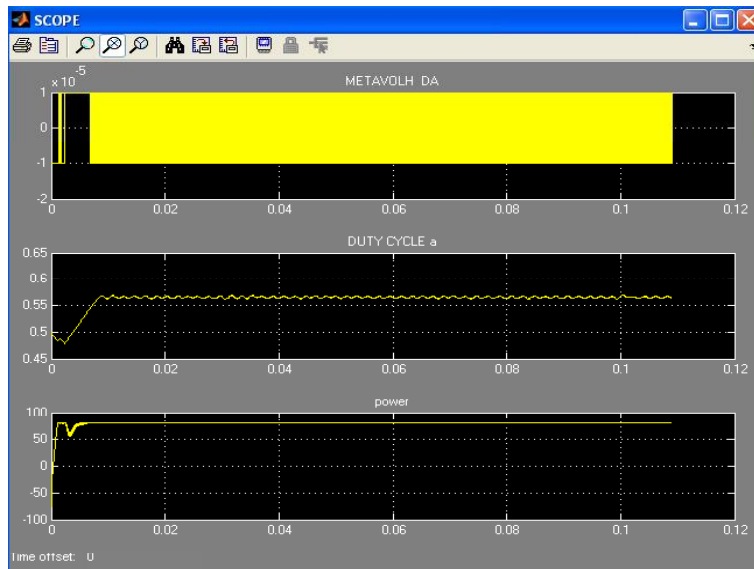
**Εικόνα 10.9**

Τάση εισόδου, τάση ρεύμα και ισχύς εξόδου.

**Εικόνα 10.10**

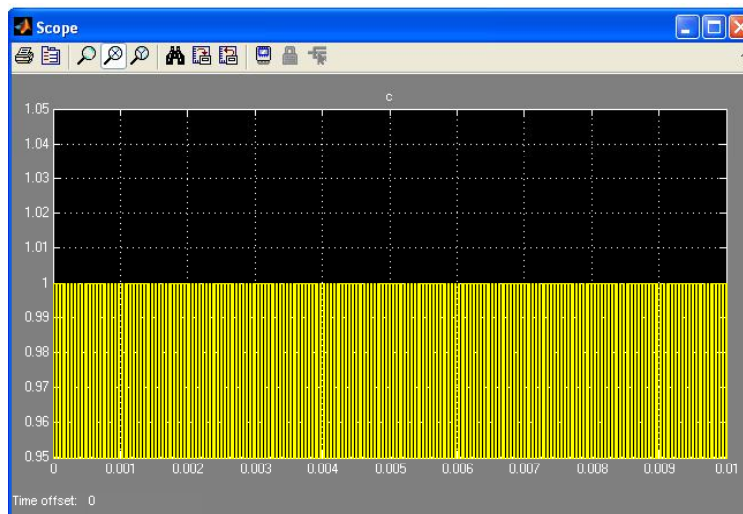
Φαίνονται η τάση εισόδου, το ρεύμα εισόδου και η ισχύς εισόδου στον μετατροπέα.

Έπειτα εξομοιώσαμε την απόκριση του συστήματος για ωμικό φορτίο 6Ω :



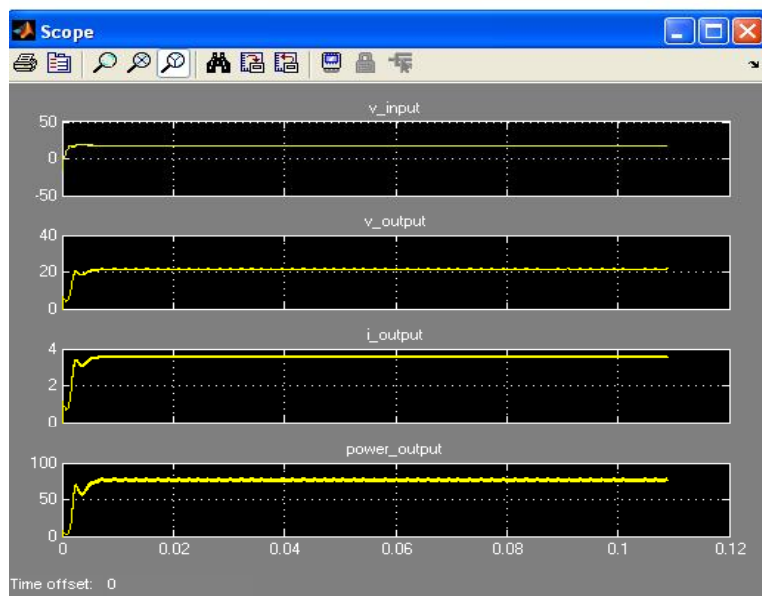
Εικόνα 10.11

Μεταβολή βαθμού εργασίας (Δa), βαθμός εργασίας (a) και ισχύ (P).

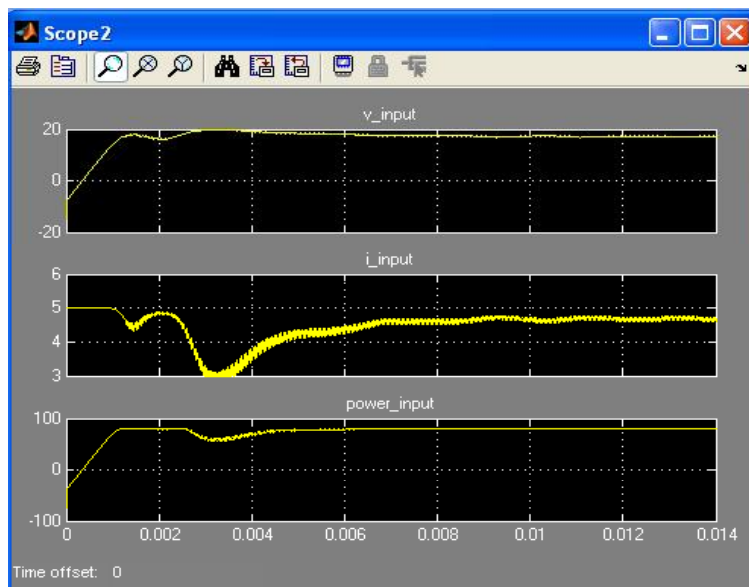


Εικόνα 10.12

Παλμοσειρά που καταλήγει στο διακόπτη του μετατροπέα.

**Εικόνα 10.13**

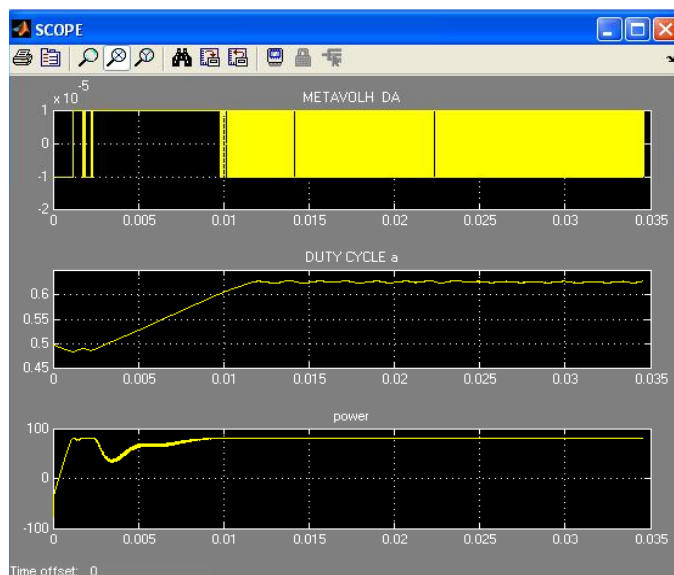
Τάση εισόδου, τάση εξόδου, ρεύμα και ισχύς εξόδου στον μετατροπέα.

**Εικόνα 10.14**

Φαίνονται η τάση εισόδου, το ρεύμα εισόδου και η ισχύς εισόδου στον μετατροπέα.

Σχόλιο: Παρά τις ταλαντώσεις τελικά το ρεύμα και η τάση εισόδου και τελικά η ισχύς εισόδου σταθεροποιούνται όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα 10.14

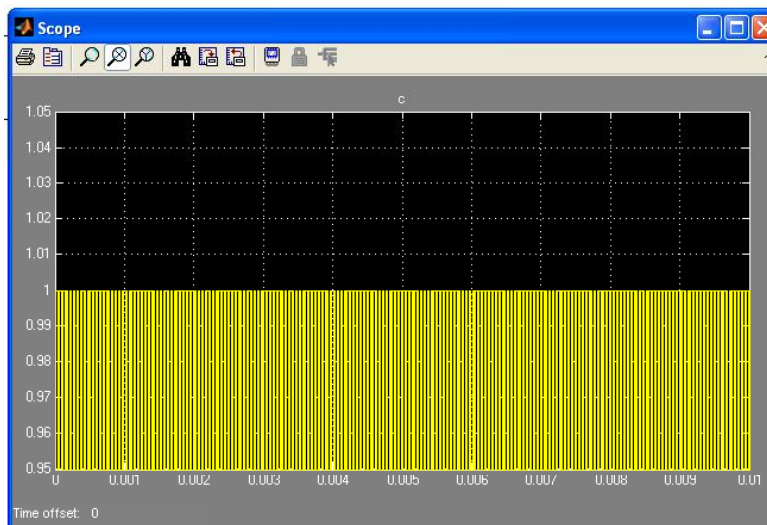
Έπειτα πήραμε μέτρηση για ωμικό φορτίο 10Ω:



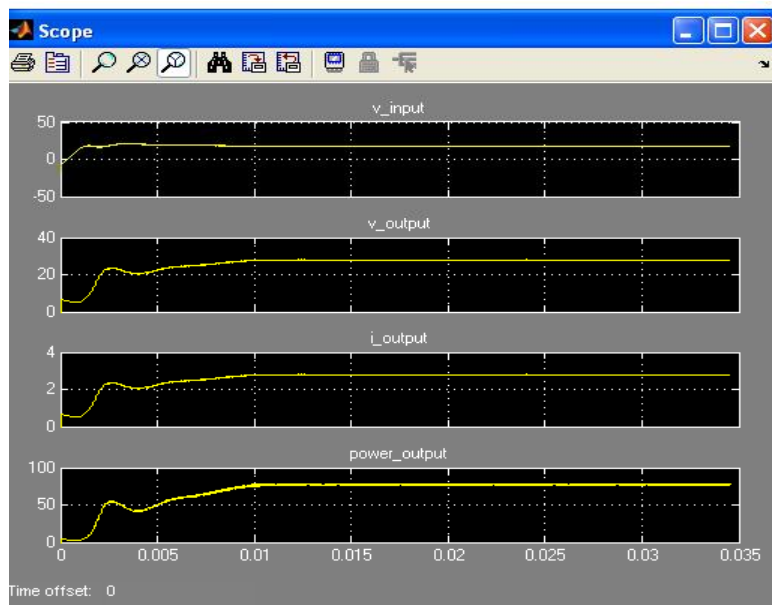
Εικόνα 10.15

Μεταβολή του βαθμού εργασίας ($\Delta\alpha$), ο βαθμός εργασίας (α) και η ισχύς (P) για φορτίο 10Ω.

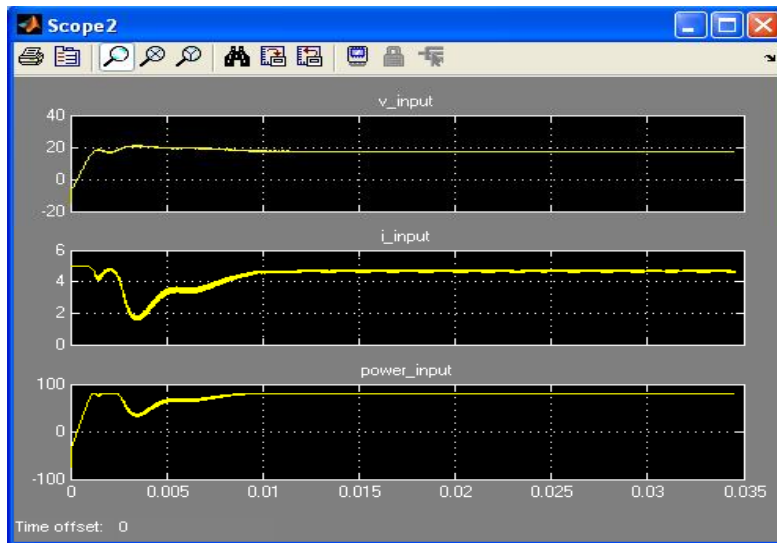
Σχόλιο: Το $\Delta\alpha$ (μεταβολή του βαθμού εργασίας) παραμένει +1 οπότε το "α" (βαθμός εργασίας) αυξάνει συνεχώς ώστε να φτάσει το επιθυμητό σημείο για Σ.Μ.Ι.



Εικόνα 10.16
Μεταβολή του βαθμού εργασίας $\Delta\alpha$.

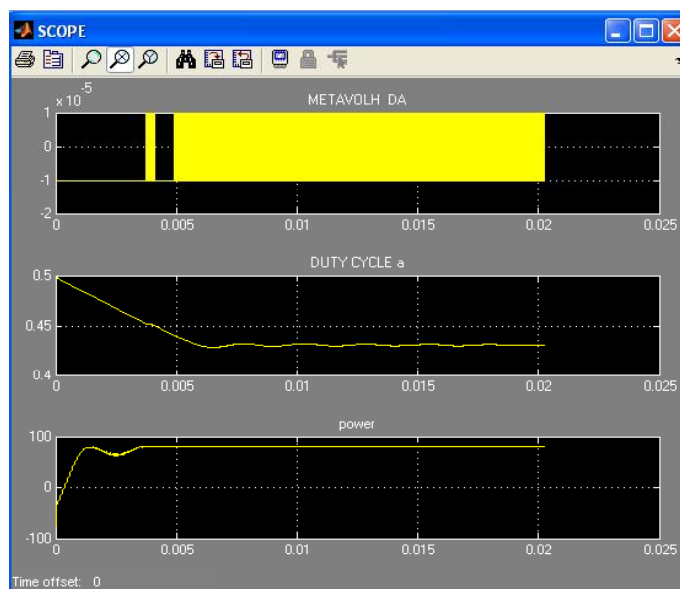
**Εικόνα 10.17**

Τάση εισόδου, τάση, ρεύμα και ισχύς εξόδου στον μετατροπέα.

**Εικόνα 10.18**

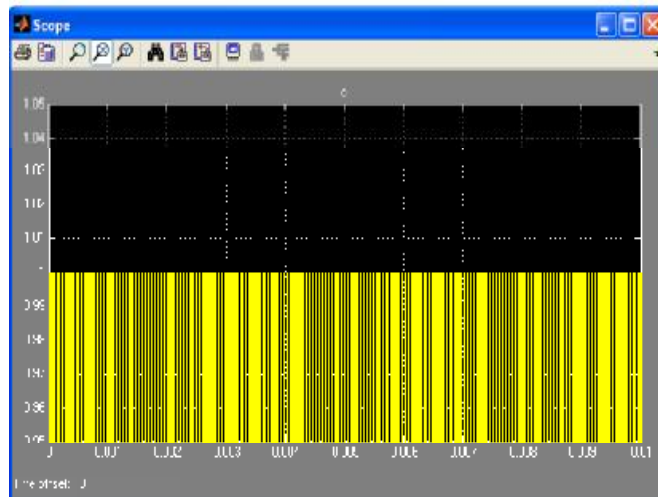
Τάση εισόδου, το ρεύμα εισόδου και η ισχύς εισόδου στον μετατροπέα.

Για 2Ω ωμικό φορτίο:

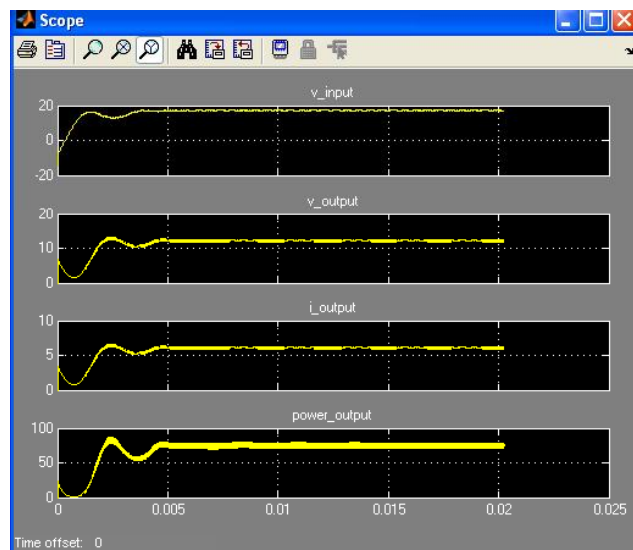


Εικόνα 10.19

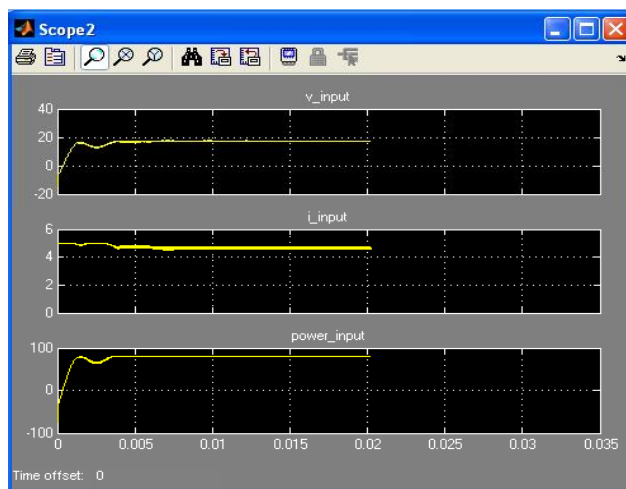
Μεταβολή του βαθμού εργασίας($\Delta\alpha$), ο βαθμός εργασίας (α) και η ισχύς (P) για φορτίο 2Ω .



Εικόνα 10.20
Μεταβολή βαθμού εργασίας $\Delta\alpha$.

**Εικόνα 10.21**

Τάση εισόδου, τάση, ρεύμα και ισχύς εξόδου στον μετατροπέα.

**Εικόνα 10.22**

Τάση εισόδου, το ρεύμα εισόδου και η ισχύς εισόδου στον μετατροπέα.

10.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Ο παρακάτω Πίνακας δείχνει τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων του συστήματος:

ΦΟΡΤΙΟ	2Ω	4Ω	6Ω	10Ω
ΒΑΘΜ. ΕΡΓΑΣΙΑΣ α	0,4313	0,5125	0,5636	0,6268
ΙΣΧΥΣ	80,39W	80,42W	80,44W	80,45W

Πίνακας 0.1

Αποτελέσματα εξομοιώσεων συστήματος.

Παρατηρούμε πως όσο το φορτίο αυξάνει, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός εργασίας α . Ο βαθμός εργασίας (α) μεταβάλλεται προκειμένου να πάρουμε την μέγιστη ισχύ πάνω στο φορτίο. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τις παραπάνω μετρήσεις, ανεξάρτητα από το φορτίο που θα τοποθετήσουμε, η ισχύς είναι 80W δηλαδή το Σ.Μ.Ι. Οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρούμε οφείλονται στην ταλάντωση που κάνει ο Σ.Ε.Σ.Μ.Ι. γύρω από το Σ.Μ.Ι. Όσο αφορά την τάση, η τάση εισόδου στον μετατροπέα είναι σταθερή γύρω στα 20V. Η τάση εξόδου από τον μετατροπέα μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο. Όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τάση εξόδου από τον μετατροπέα. Έτσι το ρεύμα μεταβάλλεται ανάλογα με τον βαθμό εργασίας (α). Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός εργασίας (α) τόσο

περισσότερη ώρα μένει κλειστός ο διακόπτης, επομένως τόσο περισσότερο ρεύμα απορροφάει το φορτίο.

Επίσης παρατηρήσαμε κατά την εξομοίωση πως με τον μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού τάσεως (Buck-Boost Converter), βρίσκουμε το Σ.Μ.Ι. πολύ γρηγορότερα σε σχέση με τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσεως (Buck Converter). Επίσης ο μετατροπέας buck-boost έχει την ικανότητα να οδηγήσει το σημείο λειτουργίας του συστήματος στο Σ.Μ.Ι. για οποιοδήποτε τιμή φορτίου. Επομένως είναι καλύτερα να χρησιμοποιούμε τον μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού τάσεως (Buck-Boost Converter).

11^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας, τι μάθαμε από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας και τους τρόπους που αυτά λύθηκαν, αλλά και κάποια γενικά συμπεράσματα για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.).

Βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε ήταν η δυσκολία για τη δημιουργία των διαφόρων τμημάτων της εξομοίωσης, η κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τους και η σύνδεση των τμημάτων αυτών μεταξύ τους. Αυτά τα προβλήματα παρουσιάστηκαν κυρίως εξαιτίας της απειρίας που είχαμε ως προς την αντιμετώπιση ενός τόσο σοβαρού θέματος αλλά και από την απειρία που είχαμε για τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος Simulink του Matlab. Προσπαθώντας να συνθέσουμε το συνολικό μοντέλο εξομοίωσης όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 10.2 τα προβλήματα που παρουσιάζονταν οδηγούσαν σε λανθασμένα αποτελέσματα. Για να λύσουμε αυτά τα προβλήματα καταρχήν αποδομήσαμε αποδομήσαμε το πρόβλημα σε επιμέρους προβλήματα/λειτουργίες του συνολικού συστήματος. Ανατρέξαμε στις βοήθειες που μας έδινε το πρόγραμμα για την λειτουργία των κουτιών της εξομοίωσης καθώς και στις συμβουλές που μας έδινε ο επιβλέπων καθηγητής κύριος Παναγής Βοβός και αλλάζοντας κάποιες ρυθμίσεις, συνδέσεις ή ακόμα προσθέτοντας κάποια επιπλέον μπλοκ εντός των επιμέρους κυκλωμάτων .

Ένα ακόμα πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν η υλοποίηση του αλγορίθμου στον editor του Matlab όπου εξομοιώνει τη συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού SW 80 mono/R5E. Προσπαθήσαμε να δημιουργήσουμε μια απλή μέθοδο η οποία βασιζόταν στην εξίσωση Shockley όπως αυτή παρουσιάζεται στην εξίσωση 4.7 μέσω της οποίας θέλαμε να εξάγουμε το ρεύμα του φωτοβολταϊκού. Όμως με αυτή τη μέθοδο ενώ η τάση που

μας έδινε το σύστημα ήταν σωστή περίπου στα 21V υπήρχε όμως σοβαρό πρόβλημα με το ρεύμα που μας έδινε αφού ανεξάρτητα από το φορτίο που χρησιμοποιούσαμε σε καμία περίπτωση τα αποτελέσματα δεν συμβάδιζαν με τη λογική αλλά και με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τελικά καταλήξαμε να δημιουργήσουμε τον αλγόριθμο της 7.1 παραγράφου ο οποίος χρησιμοποιεί την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson όπου γίνεται ο υπολογισμός του ρεύματος I_a . Αυτή η μέθοδος είναι μια από τις καλύτερες μεθόδους διαδοχικών προσεγγίσεων για την προσεγγιστική εύρεση των ριζών μιας πραγματικής συνάρτησης. Όμως για να καταλήξουμε σε αυτή τη μέθοδο υπολογισμού του ρεύματος έπρεπε πρώτα να συμβουλευτούμε αρκετά παρόμοια μοντέλα εξομοίωσης φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Τέλος, ένα ακόμα πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε είναι με τον αισθητήρα συλλογής δεδομένων Sensor DAQ της εταιρίας Vernier που μετράει την ακτινοβολία σε lux την οποία έπρεπε να την μετατρέψουμε σε W/m^2 . Μετά από έρευνα που κάναμε στο διαδίκτυο δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη σχέση η οποία να μπορεί να κάνει αυτή την μετατροπή, γιατί εξαρτάται από τα μήκη κύματος που απορροφά το κάθε μοντέλο φωτοβολταϊκού. Τελικά βρήκαμε έναν εμπειρικό τύπο που επαλήθευε τα πειραματικά αποτελέσματα των φωτοβολταϊκών μας με πολύ μικρές αποκλίσεις ($1lux=0.0161028 W/m^2$).

Από την εργασία όμως αποκομίσαμε αρκετά ενδιαφέροντα στοιχεία. Διδαχτήκαμε πως η αρχή για την επίλυση ενός δύσκολου θέματος που έχει ως αντικείμενο την έρευνα είναι η όσο το δυνατόν σφαιρικότερη κατανόησή του. Η κατανόηση μας βοήθησε ώστε το αρκετά σύνθετο αρχικό πρόβλημα να το κατακερματίσουμε σε μικρότερα τμήματα λιγότερο σύνθετα. Για παράδειγμα το σχήμα 10.2 μας παρουσιάζει το συνολικό κύκλωμα που σχεδιάστηκε μέσω του Simulink Matlab. Τα κυριότερα στοιχεία που αποτελούν αυτό το κύκλωμα είναι η φωτοβολταϊκή συστοιχία, το σύστημα εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.) μαζί με το PWM, μετατροπέας υποβιβασμού τάσεως και το φορτίο. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από τα 30 πλαίσια που είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους όπως φαίνεται στην εικόνα 8.6.

Έτσι δημιουργήσαμε τη συστοιχία. Το σύστημα εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (Σ.Ε.Σ.Μ.Ι.) όπως φαίνεται στο σχήμα 10.3 δέχεται ως είσοδο την τάση και το ρεύμα του φωτοβολταϊκού και ο βαθμός εργασίας που προκύπτει χρησιμοποιείται στο σύστημα διαμόρφωσης εύρους παλμών και ο παλμός που αυτό παράγει καταλήγει στην πύλη του διακοπτικού στοιχείου του μετατροπέα και επομένως καθορίζεται το ρεύμα που πάει στο φορτίο. Βέβαια για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε κάθε ένα από τα στοιχεία του συνολικού κυκλώματος έπρεπε να ανατρέξουμε στο διαδίκτυο αλλά και στο ίδιο το Matlab για να μπορέσουμε να βρούμε ιδέες για να δημιουργήσουμε το εκάστοτε μπλοκ με τα παρελκόμενά του έτσι ώστε να μας δώσουν συνδεδεμένα όλα μαζί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Το συνολικό φωτοβολταϊκό μοντέλο που δημιουργήσαμε είναι μια εφαρμογή η οποία άνετα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια οικιακή κατανάλωση με την προσθήκη ενός αντιστροφέα για τη δημιουργία εναλλασσομένου ρεύματος που θα τροφοδοτεί τις συσκευές.

Γενικότερα θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε για τις Α.Π.Ε. ότι τα μειονεκτήματα που έχουν δηλαδή το κόστος κατασκευής και την ενεργειακή απόδοση τους συνεχώς βελτιώνονται με την πάροδο του χρόνου και την εύρεση νέων τεχνολογιών. Οι Α.Π.Ε. είναι φιλικές προς το περιβάλλον δεν δημιουργούν προβλήματα στην ποιότητα της ζωής των ανθρώπων και δεν εγκυμονούν κινδύνους για ατυχήματα εξαιτίας κάποιου τεχνικού λάθους ή κάποιας φυσικής καταστροφής όπως έγινε με τον πυρηνικό σταθμό της Φουκουσίμα στην Ιαπωνία (Μάρτιος 2011).

12^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

12.1 ΜΕΛΕΤΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΚΤΙΡΙΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Performance of Grid-connected PV

NOTE: before using these calculations for anything serious, you should read [\[this\]](#)

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 38°17'17" North, 21°47'22" East, Elevation: 59 m a.s.l.,
Nearest city: Patrai, Greece (8 km away)

Nominal power of the PV system: 2.4 kW (crystalline silicon)
Estimated losses due to temperature: 10.6% (using local ambient temperature)
Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.7%
Other losses (cables, inverter etc.): 14.0%
Combined PV system losses: 25.2%

Fixed system: inclination=27°, orientation=1° (optimum)				
Month	E_d	E_m	H_d	H_m
Jan	4.22	131	2.19	68.0
Feb	5.26	147	2.78	77.9
Mar	7.29	226	3.93	122
Apr	9.46	284	5.20	156
May	10.40	324	5.90	183
Jun	11.30	338	6.50	195
Jul	11.00	342	6.42	199
Aug	10.50	326	6.11	190
Sep	9.16	275	5.19	156
Oct	6.82	211	3.77	117
Nov	4.51	135	2.42	72.6
Dec	3.45	107	1.81	56.1
Yearly average	7.80	237	4.36	133
Total for year	2850		1590	

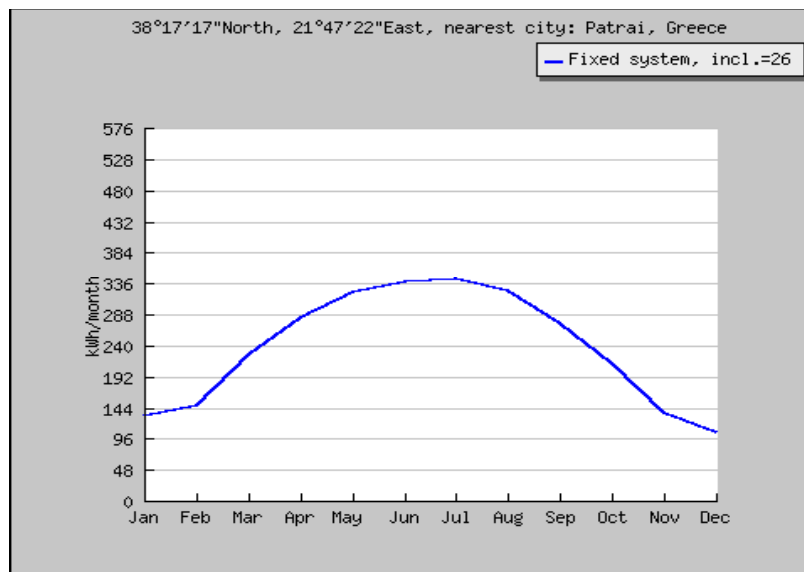
Πίνακας 12.2

E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh)

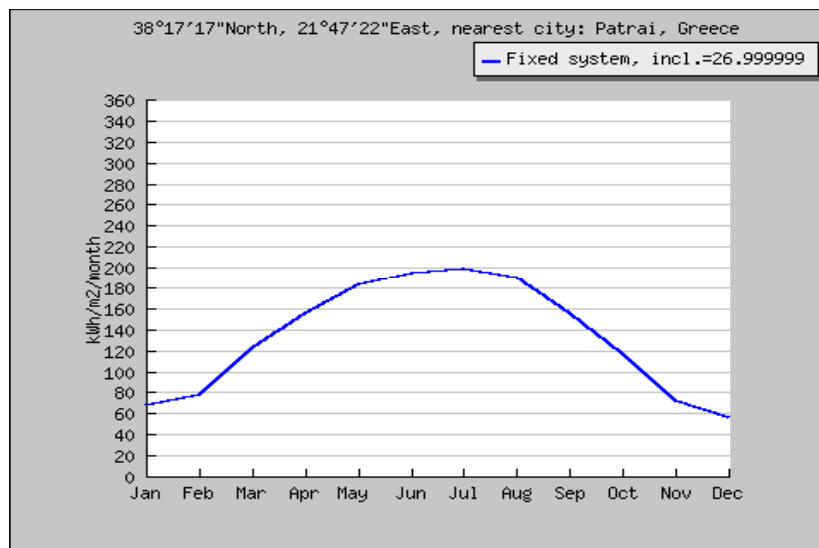
E_m : Average monthly electricity production from the given system (kWh)

H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

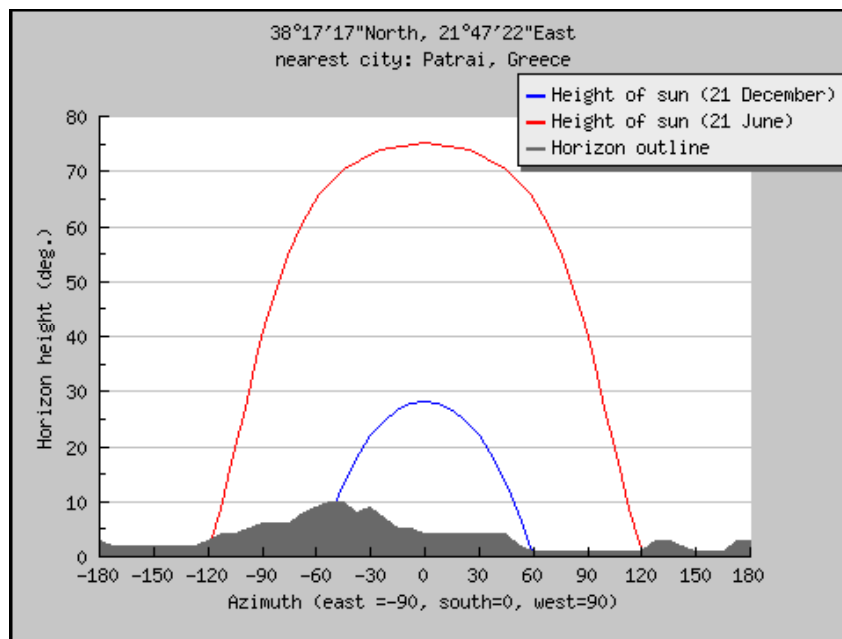
H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

**Εικόνα 12.23**

Καμπύλη ηλιοφάνειας στην περιοχή που διεξήχθη το πείραμα (KWh/μήνα)

**Εικόνα 12.24**

Καμπύλη ηλιοφάνειας στην περιοχή που διεξήχθη το πείραμα (KWh/m² ανά μήνα)



Εικόνα 12.25

Καμπύλη ηλιοφάνειας στην περιοχή που διεξήχθη το πείραμα.

PVGIS © European Communities, 2001-2008

Reproduction is authorised, provided the source is acknowledged

See the disclaimer [here](#)

4 window.focus(); [22]

12.2 ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Το κόστος των φωτοβολταϊκών συστημάτων εκφράζεται συνήθως σε ευρώ/Μ αιχμής. Η κυριότερη συνιστώσα του συνολικού κόστους είναι το κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Από υπολογισμούς προκύπτει ότι το κόστος για ένα Φ/Β σύστημα κατανέμεται ως εξής:

- Φ/Β πλαίσια: 40-60%.
- Συσσωρευτές: 15-25%.
- Αντιστροφείς: 10-15%.
- Υποδομή στήριξης: 10-15%.
- Σχεδιασμός και εγκατάσταση: 8-12%.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν διάρκεια ζωής έως και 20 ετών χωρίς ιδιαίτερη συντήρηση, ενώ σε αυτό το διάστημα οι συσσωρευτές αντικαθίστανται 4-5 φορές. Σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος ενός συστήματος είναι το είδος της εφαρμογής και το αν το σύστημα είναι συνδεδεμένο ή όχι. Το κόστος είναι συνήθως χαμηλότερο για συστήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο και η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι, σε αντίθεση με τα αυτόνομα συστήματα, δεν απαιτούν συσσωρευτές. Επίσης, το κόστος ανά W μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Το κόστος στην Ελλάδα των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των συσσωρευτών είναι της τάξεως των 8,217 με 9,391 ευρώ/kW, ενώ το κόστος των συνδεδεμένων με το δίκτυο φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι της τάξεως των 7,336 ευρώ/kW. Πρόσφατες εκτιμήσεις αναφέρουν ότι το κόστος παραγόμενης ενέργειας από φωτοβολταϊκά ανέρχεται στα 0,44 ευρώ/kWh για συνδεδεμένο σύστημα και στα 0,65 ευρώ/kWh για αυτόνομο σύστημα λίγων kW εγκατεστημένης ισχύος. Σημειώνεται, όμως, πως η αγορά και η εγκατάσταση οικιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων επιδοτείται από το κράτος μέσω της φοροαπαλλαγής ποσού ίσου μέχρι και του 75% του κόστους τους. Υπάρχουν, επίσης, επιδοτήσεις (όχι ακόμα σε ατομικούς καταναλωτές) στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος Ενέργειας (ΕΠΕ).

Για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων προβλέπεται και επιδότηση, δυστυχώς όμως αφορά στα σχετικά μεγάλα συστήματα και αποκλείονται, μέχρι στιγμής τουλάχιστον, οι μικροί καταναλωτές. Επιδoteίται το 55% του συνολικού κόστους του συστήματος, αλλά για επένδυση μεγαλύτερη των 58.694 ευρώ.

Φωτεινό παράδειγμα είναι το «ηλιακό ξενοδοχείο» Elounda Island Villas στην Κρήτη, του κ. Ηλία Αλεξόπουλου, ο οποίος επωφελήθηκε του αναπτυξιακού νόμου και επένδυσε το ποσό των 51.470 ευρώ σε φωτοβολταϊκά (το 43% του ποσού καλύφτηκε από την επιδότηση). Αυτό σημαίνει ότι μετά από 4 χρόνια, οπότε υπολογίζεται ότι θα έχει αποσβεστεί το επενδεδυμένο ποσό, και για τα υπόλοιπα 30 χρόνια το ξενοδοχείο θα έχει εξασφαλίσει δωρεάν ρεύμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ΔΕΗ ζητούσε 102.000 ευρώ για να συνδέσει το απομακρυσμένο ξενοδοχείο με το δίκτυό της. Το φωτοβολταϊκό σύστημα που έχει τοποθετηθεί είναι ισχύος 6,5 kW και έχει σχεδιαστεί για να ηλεκτροδοτεί με 230V το φωτισμό του συγκροτήματος, 11 οικιακά ψυγεία και 3 επαγγελματικά, καταψύκτη, φούρνο μικροκυμάτων και διάφορες μικροσυσκευές.

Χωρίς καμιά αμφιβολία το ενεργειακό μέλλον του κόσμου είναι η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Καμιά ενεργειακή πηγή δεν μπορεί να εξασφαλίσει την αναγκαία ενέργεια στη Γη πάνω από 15.000 χρόνια, εκτός από την ηλιακή ενέργεια. [13]

13^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. www.allaboutenergy.gr/Intro12.html
2. Μπαλτάς Πλάτων, 2007. Δυνατότητες Εφαρμογών Φ/Β Συστημάτων στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη.
3. Παπαδόπουλος Άγις, 2001. Διδακτικές Σημειώσεις στα Μαθήματα Οικονομική των Επιχειρήσεων και Ανάλυση Αξιολόγηση Επενδύσεων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Α.Π.Θ.
4. Πολυχρονιάδου Αικατερίνη, 2004. Τεχνοοικονομική μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων στα κτίρια του Ξενία (διδακτορική διατριβή στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου).
5. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας 2009. Θεσμικό, αδειοδοτικό και χρηματοοικονομικό πλαίσιο υλοποίησης έργων Α.Π.Ε. στην Ελλάδα.
6. Marcel Suri, Thomas A. Huld, Ewan D. Dunlop “Regional differences of the PV electricity production in EU 25 countries”, 19th EU PVS EC 2004.

7. Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, <<Φωτοβολταϊκά Συστήματα>> Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2007.
8. Tomas Markvart, “ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ”, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2003.
9. <http://www.shielcosolarpr.gr/portal/content/view/1/1>
10. http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
11. Κ.Καγκαράκης. “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1992.
12. www.selasenergy.gr
13. Η Εφαρμογή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στα κτίρια.
Κώστας Στεφ. Τσιπήςρας.
www.buildings.gr/greek/aiforos/ananeosimes/ape.htm.
14. Σπύρου Σ. Νικόλαος “Αγώγιμες Ιδιότητες των Ηλεκτροτεχνικών Υλικών”, Εκδόσεις Τζιόλα 2005.
15. Φυσική των Φωτοβολταϊκών Στοιχείων, Βασιλική Περράκη, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2006.
16. www.engaia.gr
17. European Commission of Energy (White Paper for a Community Strategy and Action Plan).

18. Χατζηβασιλειάδης Ιωάννης, 2007. Ανάπτυξη των Φωτοβολταϊκών Εφαρμογών στην Ελλάδα.
19. Baptiste P.J. Ducroux R. , 2008 Energy policy and climate change. Energy Policy 31, 155-156.
20. <http://fotovoltaika.weebly.com>
21. Μηχανική των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων. Τεχνολογία, Μελέτες, Εφαρμογές. Σ.Ν. Καπλάνης. Εκδόσεις ΙΩΝ 2004.
22. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 7-11 June 2004, Paper No 5BV "INTERNAL SERIES RESISTANCE DETERMINATED OF ONLY ONE I-V CURVE UNDER ILLUMINATION". Gerald Kunz, Andreas Wagner University of Applied Science Dortmund, P.O. Box 10 50 18, Dortmund, Germany.
23. What is Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) and How Does it Work. www.blueskyenergyinc.com.
24. Power Electronics Handbook, Second Edition Devices, Circuits and Applications.
25. Second Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June 10-14, 2007. IMPLEMENTATION OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHM FOR RESIDENTIAL

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS. A. Yafaoui, B. Wu and R. Cheung.

26. Evaluating M.P.P.T. converter topologies using a Matlab PV model. Geoff Walker. Dept of Computer Science and Electrical Engineering, University of Queensland, Australia.
27. Fulgor. Greek Electric Cables S.A.
28. Teaching Maximum Power Point Trackers Using a Photovoltaic Array Model with Graphical User Interface. Dezso Sera, Remus Teodorescu, Tamas Kerekes. Institute of Energy Technology; Aalborg University Pontoppidanstraede 101 DK-9220, Aalborg, Denmark.
29. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php>
30. Πρόγραμμα εξομίωσης MATLAB.

