

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Ανάπτυξη Συστήματος Εξομοίωσης
Φωτοβολταϊκών Στοιχείων βασισμένο σε
Αναδιατασσόμενη Λογική

Διπλωματική Εργασία

Τζιτζιλώνης Βασίλης

Εξεταστική επιτροπή

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Πνευματικάτος Διονύσιος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Κουτρούλης Ευύχιος (Διδάσκων ΠΔ407/80)

Χανιά 2005

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί αντικείμενο ενός ευρύτερου πεδίου που έχει σχέση με τις εφαρμογές εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Συνεπώς ξεφεύγει από τα “στενά” πλαίσια της ηλεκτρονικής και της πληροφορικής έχοντας σχέση με το περιβάλλον, με την εξοικονόμηση ενέργειας και γενικότερα με την συνολική προσπάθεια που γίνεται προς την διατήρηση και αύξηση του βιοτικού επιπέδου της κοινωνίας. Όπως είναι γνωστό η Ελλάδα προσφέρεται για την χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας τόσο της αιολικής όσο και της ηλιακής. Παρόλα αυτά, ελάχιστα βήματα έχουν γίνει προς αυτήν την κατεύθυνση και σιγά σιγά ο τομέας της αξιοποίησης των εναλλακτικών μορφών ενέργειας αναπτύσσεται και στην Ελλάδα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καλαϊτζάκη για τον χρόνο που αφιέρωσε στην διπλωματική καθώς και για την εξασφάλιση των πόρων για την εργασία, τον κ. Πνευματικάτο για τον χρόνο που θα αφιερώσει για την μελέτη της διπλωματικής και τον κ. Κουτρούλη για την συνεργασία μας καθόλη την διάρκεια της εργασίας. Τέλος ευχαριστώ το Εργαστήριο Μικροεπεξεργαστών και Υλικού για τους πόρους που προσέφερε και ιδιαίτερα τους μεταπτυχιακούς φοιτητές Ευσταθίου Διονύσιο Παπαδόπουλο Γιώργο και Παπαδάκη Κώστα για τις πολύτιμες συμβουλές τους. Τέλος όλους όσους με ανέχτηκαν και προσέφεραν κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η υλοποίηση ενός εξομοιωτή φωτοβολταϊκών συστοιχιών με τη χρήση διατάξεων προγραμματιζόμενης λογικής (programmable logic devices, PLDs) και πιο συγκεκριμένα με τη χρήση διατάξεων πυλών προγραμματιζόμενου πεδίου (field-programmable gate arrays, FPGA). Ο εξομοιωτής αποτελείται από ένα μετατροπέα dc-dc που ελέγχεται με την τεχνική της Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Pulse-Width-Modulation, PWM) από την FPGA. Η τάση και το ρεύμα εξόδου του εξομοιωτή διαβάζονται, μέσω δύο μετατροπέων Αναλογικού σε Ψηφιακό (A/D), από την FPGA και στη συνέχεια η τιμή του ρεύματος που μετράται συγκρίνεται με την τιμή του ρεύματος που θα έπρεπε να είχε στην έξοδο ο εξομοιωτής. Η διαφορά των δύο ρευμάτων ενισχύεται και αποτελεί την είσοδο σε μια συνάρτηση που παράγει το σήμα ελέγχου PWM με την βοήθεια ενός μετρητή και ενός RS flip-flop.

Το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία ενός ελεγχόμενου μετατροπέα dc-dc που εξομοιώνει συστοιχίες φωτοβολταϊκών στοιχείων με ακρίβεια λαμβάνοντας μάλιστα υπόψιν και τις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος όπως είναι η ακτινοβολία και η θερμοκρασία. Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι ο εξομοιωτής λειτουργεί με ακρίβεια της τάξης του 1.03% .

Η FPGA επικοινωνεί απευθείας με το κύκλωμα, που είναι σαφώς πιο γρήγορο από το να επικοινωνούσε μέσω σειριακής ή οποιασδήποτε άλλης θύρας με υπολογιστή. Παράλληλα με τη χρήση FPGA η συχνότητα λειτουργίας του PWM μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, αφού η συχνότητα το ρολογιού των FPGA μπορεί να είναι πολύ υψηλή (της τάξης των μερικών εκατοντάδων MHz), κάτι που δεν είναι δυνατό με την χρήση μικροεπεξεργαστών. Παράλληλα ο εξομοιωτής που υλοποιήθηκε δεν εξαρτάται από υπολογιστές μιας και το μόνο που χρειάζεται να γίνει είναι να προγραμματιστεί η FPGA και στην συνέχεια ο εξομοιωτής λειτουργεί χωρίς να χρειάζεται κάποια επιπλέον επικοινωνία με υπολογιστή.

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή.....	6
2.Φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.2 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	11
2.3 Η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου	11
2.4 Αρχές λειτουργίας.....	12
2.5 Η χαρακτηριστική I-V σε συνθήκες φωτεινότητας.....	13
2.6 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης και Τάση Ανοιχτοκύκλωσης.....	14
2.7 Σημείο μέγιστης ισχύος.....	15
2.8 Παράγοντας πλήρωσης (Fill Factor) και αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας.....	16
2.9 Ισοδύναμο κύκλωμα για το ιδανικό στοιχείο.....	18
2.10 Αντιστάσεις σε σειρά και παράλληλα.....	18
2.11 Η επίδραση της θερμοκρασίας.....	19
3. Η Φωτοβολταϊκή γεννήτρια.....	21
3.1 Εισαγωγή.....	21
3.2 Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.....	22
3.3 Χρήσιμες εκφράσεις.....	23
3.4 Καθορισμός των παραμέτρων της χαρακτηριστικής I-V.....	25
3.5 Η Φωτοβολταϊκή συστοιχία.....	26
3.6 Κανονικές συνθήκες και NCOT.....	26
3.7 Συμπεριφορά κάτω από τυχαίες συνθήκες λειτουργίας.....	27
4.Μελέτη φωτοβολταϊκών μονάδων με τη χρήση του λογισμικού MATLAB..	30
4.1 Ανάλυση του μοντέλου προς προσομοίωση.....	30
4.2 Μοντέλα και τεχνολογίες φωτοβολταϊκών.....	31
5. Μετατροπείας dc-dc.....	45

5.1 Ανάλυση του μετατροπέα dc-dc.....	45
5.2 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step-down ή buck converter).....	48
6.Υλοποίηση του εξομοιωτή φωτοβολταϊκών συστοιχιών.....	56
6.1 Ανάλυση της ανάπτυξης του κώδικα σε VHDL.....	56
6.2 Ανάπτυξη του κυκλώματος του εξομοιωτή.....	72
7.Πειραματικά αποτελέσματα.....	76
8.Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις.....	88
9.Βιβλιογραφία.....	90
9.1 Δημοσιεύσεις.....	90
9.2 Βιβλία.....	90

1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενεργειακών πόρων, η εξάντληση των ήδη διαθέσιμων (π.χ. το πετρέλαιο) καθώς και η μόλυνση του περιβάλλοντος (π.χ. το φαινόμενο του θερμοκηπίου) οδηγεί στην αναζήτηση όχι μόνο νέων πηγών ενέργειας αλλά και σχετικά λιγότερο επιβαρυντικών για το περιβάλλον. Έτσι συνεχώς η έρευνα γύρω από εναλλακτικές μορφές ενέργειας έρχεται στο προσκήνιο με πιο διαδεδομένη τη χρήση της αιολικής και στην συνέχεια της ηλιακής ενέργειας.

Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται χρησιμοποιώντας τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι κατασκευασμένα από ημιαγωγούς p-n οι οποίοι έχουν την ιδιότητα ότι με την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας ελευθερώνονται ηλεκτρόνια από τους δεσμούς τους, αφού έχει αυξηθεί η κινητική τους ενέργεια, και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Έτσι δημιουργούνται ζεύγη από ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές τα οποία με την κίνηση τους δημιουργούν διαφορά δυναμικού, διαδικασία η οποία ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να εξομοιωθεί η λειτουργία μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας για διάφορα είδη φωτοβολταϊκών στοιχείων και για διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος με την χρήση διατάξεων προγραμματιζόμενης λογικής.

Ο αριθμός των φωτοβολταϊκών στοιχείων που απαιτούνται για την κάλυψη της απαιτούμενης κατανάλωσης σε ενέργεια για ένα σύστημα (π.χ. εργοστάσιο, οικία κ.λ.π.) μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά, όμως πρέπει να γίνει πιστοποίηση και πειραματικά. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση ενός πρωτότυπου φωτοβολταϊκού στοιχείου και τη μέτρηση της ενέργειας που παράγεται στις συνθήκες περιβάλλοντος της συγκεκριμένης περιοχής. Βέβαια έτσι πρέπει να δοκιμαστεί μια σειρά από διαφορετικούς τύπους και μεγέθη φωτοβολταϊκών ώστε να βρεθεί το κατάλληλο σύστημα (συστοιχία) για τις συγκεκριμένες ανάγκες σε φορτίο.

Όμως οι δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες είναι ακριβές, χρονοβόρες και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες. Πρέπει να υπάρχει επαρκής ασφάλεια και προστασία από τον καιρό στην περιοχή της δοκιμής, ενώ τέλος μπορεί να υπάρξουν καθυστερήσεις είτε λόγω του καιρού είτε λόγω κάποιας

βλάβης στο σύστημα. Συνεπώς γίνεται φανερό η ανάγκη για την κατασκευή και χρησιμοποίηση συστημάτων εξομοίωσης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών έτσι ώστε να γίνει εφικτή η εξομοίωση πολλών και διαφορετικών τύπων φωτοβολταϊκών για την επιλογή του πιο κατάλληλου για τις ανάγκες κάθε εφαρμογής. Επιπρόσθετα η χρήση των φωτοβολταϊκών εξομοιωτών είναι πολύ χρήσιμη για τον έλεγχο της λειτουργίας μετατροπών DC-DC (π.χ. μετατροπών που λειτουργούν με την αρχή Maximum Power Point Tracking, MPPT). Το MPPT είναι η μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται η συνεχής λειτουργία του φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σημείο μέγιστης ισχύος για κάθε τιμή ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Επίσης οι εξομοιωτές είναι χρήσιμοι για τον έλεγχο μετατροπών dc-ac, φορτιστών και αλγορίθμων φόρτισης καθώς και για διάφορους ενεργειακούς υπολογισμούς.

Ένας τρόπος προσομοίωσης παρουσιάζεται στην εργασία [1] και έχει ως ιδέα τη χρησιμοποίηση ενός κυκλώματος ενίσχυσης για την παραγωγή των χαρακτηριστικών I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα το κύκλωμα ενισχύει την έξοδο μιας φωτοδιόδου που θεωρείται ότι λειτουργεί σαν ένα μικρό φωτοβολταϊκό στοιχείο. Το κύκλωμα αποτελείται από την μικρή μονάδα του φωτοβολταϊκού και έναν dc ενισχυτή που ελέγχει το κέρδος της τάσης και ενισχύει την τάση εξόδου του μικρού φωτοβολταϊκού στοιχείου. Το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού ελέγχεται με ένα σήμα ανάδρασης από έναν αισθητήρα ρεύματος στην έξοδο του συστήματος. Για να λειτουργήσει αυτός ο προσομοιωτής χρειάζεται να βρίσκεται σε συνθήκες περιβάλλοντος ώστε το μικρό φωτοβολταϊκό που έχει ως είσοδο να απορροφά ακτινοβολία. Αυτό έχει ως συνέπεια την άμεση εξάρτηση του προσομοιωτή από τις καιρικές συνθήκες κάτι που δεν είναι πάντα επιθυμητό.

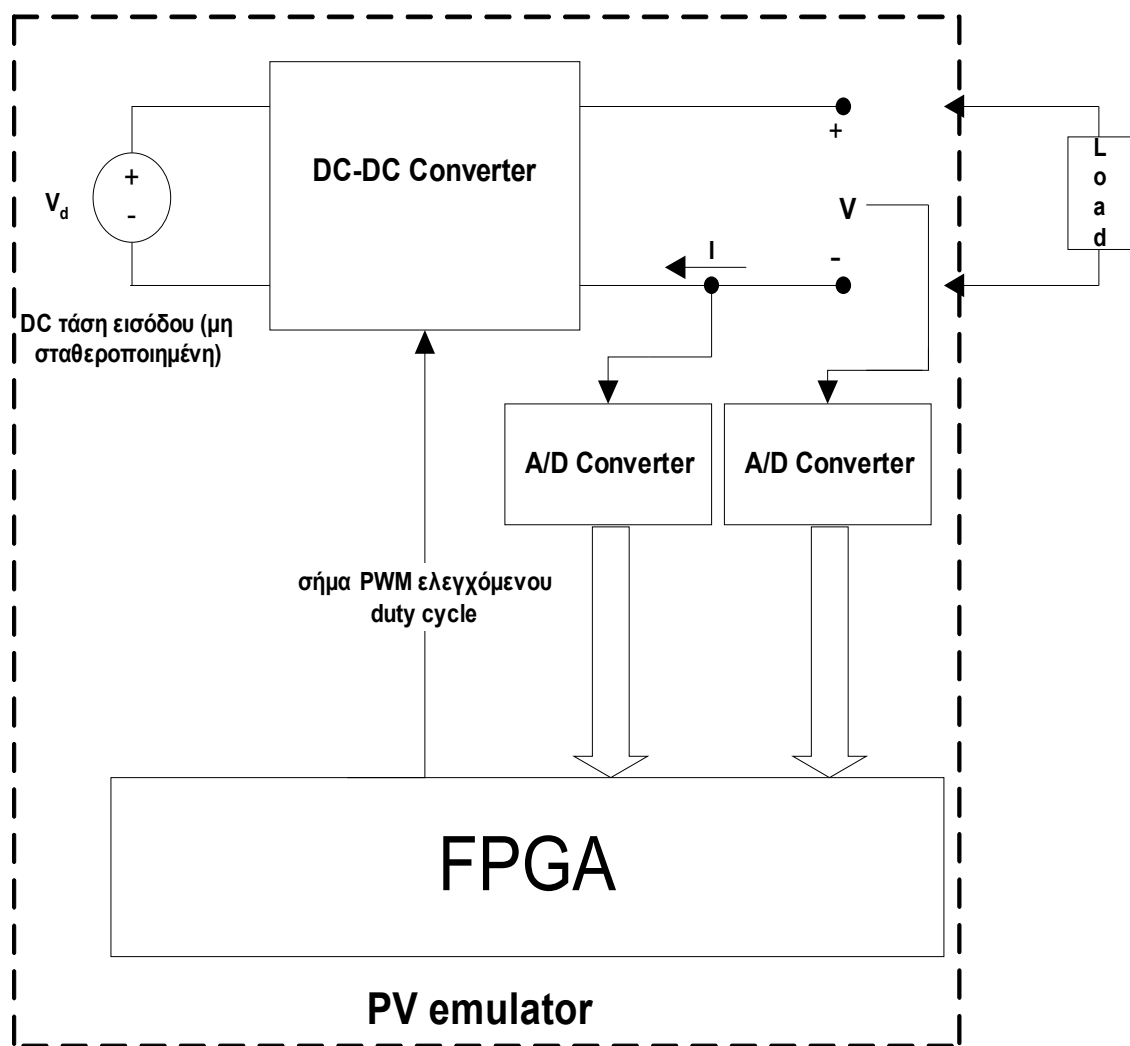
Στην εργασία [2] παρουσιάζεται ένας ηλεκτρονικός προσομοιωτής. Οι χαρακτηριστικές φορτώνονται σε μία EPROM και χρησιμοποιείται ένας ενισχυτής τάξης A για να παράγει την τάση εξόδου του μετατροπέα σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές I-V που περιέχονται στην EPROM. Ο ενισχυτής έχει εσωτερικό έλεγχο ρεύματος που επιτρέπει να συνδεθούν μονάδες παράλληλα έτσι ώστε να επιτευχθούν υψηλότερες τιμές ρεύματος στην έξοδο. Το σύστημα έχει ως είσοδο μια σειρά από τροφοδοτικά συνδεδεμένα είτε παράλληλα είτε σε σειρά, τα οποία συνδέονται με τον ενισχυτή μέσω διακοπών. Οι διακόπτες ανοιγοκλείνουν αυτόματα έτσι ώστε να κρατάνε τον ενισχυτή στην περιοχή λειτουργίας καθώς το σημείο λειτουργίας κινείται πάνω στην χαρακτηριστική I-V. Το όλο σύστημα έχει προσομοιωθεί στο Ispace και σε Simulink.

Επίσης μια ακόμη ιδέα παρουσιάζεται στην εργασία [3] όπου προτείνεται ένας υβριδικός προσομοιωτής φωτοβολταϊκών. Αποτελείται από το αναλογικό κομμάτι που είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να προσομοιώνει φωτοβολταϊκά στοιχεία το οποίο αποτελείται από μια πηγή ρεύματος που αντιστοιχεί στο φωτόρευμα του φωτοβολταϊκού και από μια δίοδο που αντιστοιχεί στην p-n σύνδεση. Από το ψηφιακό τμήμα που κατασκευάστηκε για να προσομοιώνει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με την χρήση μικροεπεξεργαστή. Τα δύο συστήματα είναι διακριτά και το μόνο που έχουν κοινό είναι η τροφοδοσία έτσι ώστε το κόστος να είναι χαμηλό και το μέγεθος του εξομοιωτή μικρό. Η γρήγορη απόκριση του αναλογικού τμήματος το καθιστά κατάλληλο για την μελέτη των μεταβατικών φαινομένων ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Όμως οι αυξημένες απαιτήσεις του σε ισχύ το περιορίζουν μόνο σε μελέτες μικρής περιόδου. Η χαμηλή κατανάλωση του ψηφιακού εξομοιωτή το καθιστούν ικανό για μετρήσεις μεγάλης χρονικής περιόδου. Παράλληλα με την χρήση του μικροεπεξεργαστή το σύστημα μπορεί να προσομοιώνει συστοιχίες για οποιεσδήποτε συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, αφού ο μικροεπεξεργαστής του ψηφιακού τμήματος μπορεί να προγραμματίζεται ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος.

Μια άλλη ιδέα παρουσιάζεται στην εργασία [4], όπου αναπτύσσεται ένας εξομοιωτής που ελέγχεται από υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα ο προσομοιωτής αποτελείται από έναν switched-mode step down (ή buck) ρυθμιστή τάσης που λειτουργεί υπό τον έλεγχο ενός υπολογιστή έτσι ώστε να παράγεται στην έξοδο του συστήματος η τάση και το ρεύμα της επιθυμητής φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η ακτινοβολία, η θερμοκρασία και το μέγεθος της συστοιχίας μπορούν να εισαχθούν στον υπολογιστή έτσι ώστε στην έξοδο του ελεγχόμενου ρυθμιστή να προσομοιώνονται και αυτές οι συνθήκες. Συνεπώς με την συνεχή μέτρηση της τάσης και του ρεύματος εξόδου μπορεί να παραχθεί η επιθυμητή χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού για διαφορετικά φορτία.

Ο εξομοιωτής που υλοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιεί διάταξη πυλών προγραμματιζόμενου πεδίου λογικής (field-programmable gate arrays, FPGA). Σκοπός είναι η δημιουργία ενός εξομοιωτή που να μπορεί να εξομοιώσει οποιαδήποτε φωτοβολταϊκή συστοιχία με ακρίβεια. Το σύστημα αποτελείται από ένα μετατροπέα DC-DC που ελέγχεται με την τεχνική της Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Pulse-Width Modulation PWM) που παράγεται από την FPGA. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει στο πρόγραμμα τα ζεύγη των τιμών τάσης και ρεύματος της ιδανικής χαρακτηριστικής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου και στη συνέχεια να προσομοιώσει το συγκεκριμένο μοντέλο του φωτοβολταϊκού σε

οποιοσδήποτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Συνεπώς ο χρήστης μπορεί να εξετάσει διαφορετικές συστοιχίες και τύπους φωτοβολταϊκών σε όποιες συνθήκες απαιτούνται από τις ανάγκες της μελέτης και σε πραγματικό χρόνο. Το γενικό διάγραμμα του κυκλώματος φαίνεται στο σχήμα 1. Ο εξομοιωτής αποτελείται από ένα μετατροπέα dc-dc που στην έξοδο του μετράται η τάση και το ρεύμα και μέσω μετατροπέων A/D αυτές οι τιμές εισάγονται στην FPGA. Στην συνέχεια με κατάλληλο αλγόριθμο ελέγχου η FPGA υπολογίζει τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) του σήματος PWM που ελέγχει τον μετατροπέα dc-dc. Σκοπός είναι για κάθε τιμή φορτίου το ρεύμα I και η τάση εξόδου V του μετατροπέα να αντιστοιχούν στην χαρακτηριστική I-V της επιθυμητής φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



Σχήμα 1. Το γενικό διάγραμμα του εξομοιωτή.

Η χρήση της FPGA έχει ως πλεονέκτημα τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού της και άρα τον συνεχή έλεγχο και την προσαρμογή του

σχεδιασμού ανάλογα με τις ανάγκες της σχεδίασης, κάτι που κάνει εφικτή την εξομοίωση οποιασδήποτε φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Συγχρόνως οι υψηλές συχνότητες λειτουργίας των FPGA είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα. Αυτό διότι το πηνίο που χρησιμοποιείται στον μετατροπέα DC-DC είναι από πυρήνα φερρίτη και το μέγεθος και το βάρος του είναι αντιστρόφως ανάλογα με την συχνότητα λειτουργίας. Και έτσι εφόσον το μέγεθος του μετατροπέα εξαρτάται κυρίως από το πηνίο είναι κρίσιμο να αυξηθεί η συχνότητα λειτουργίας για να μειωθεί το μέγεθος του μετατροπέα. Παράλληλα, σε ότι αφορά τον εξομοιωτή, ο έλεγχος του κυκλώματος είναι σαφώς πιο γρήγορος σε σχέση με τη χρήση υπολογιστή αφού μετά από την αρχική φόρτωση των τιμών από τον υπολογιστή το σύστημα δεν χρειάζεται να επικοινωνήσει με τον υπολογιστή μέσω οποιασδήποτε θύρας. Η συχνότητα του PWM μπορεί να είναι πολύ υψηλή με τη χρήση FPGA αφού οι συχνότητες λειτουργίας των τελευταίων είναι πολύ υψηλές. Παράλληλα η υψηλή συχνότητα λειτουργίας των FPGA καθιστά δυνατή την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας κατά την παραγωγή του σήματος PWM με το επιθυμητό duty cycle. Αυτό διότι αν θεωρηθεί ότι το duty cycle του σήματος PWM έχει ακρίβεια 10 bit και το σήμα PWM έχει συχνότητα 100kHz τότε το ρολόι που απαιτείται είναι 102.4 MHz που μόνο από FPGA μπορεί να υποστηριχθεί και όχι από μικροελεγκτές. Η πρωτοτυπία της εργασίας εστιάζεται στη χρήση της FPGA και στην δυνατότητα εξομοίωσης οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού στοιχείου, μονάδας ή συστοιχίας είτε σε πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος διαβάζοντας με κάποια αισθητήρια συνεχώς την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία της περιοχής που γίνεται η δοκιμή. Αν αυτό δεν είναι εφικτό λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών είναι δυνατή η εξομοίωση στο εργαστήριο, πάλι σε οποιοδήποτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που εισάγονται από τον χρήστη.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στο φωτοβολταϊκό στοιχείο και στις αρχές που διέπουν την λειτουργία του. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και των μαθηματικών σχέσεων που σχετίζονται με την λειτουργία της. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση των χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων με τη χρήση του MATLAB που απαιτείται για την μελέτη της ακρίβειας του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Στο κεφάλαιο 5, γίνεται η ανάλυση του μετατροπέα dc-dc και στο 6 κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση του εξομοιωτή που αναπτύχθηκε.

2. Φωτοβολταϊκό στοιχείο

2.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι ένα φυσικό φαινόμενο γνωστό ως **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**.

Ο Becquerel ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο στα ηλεκτροχημικά κύτταρα το 1839, αλλά το 1954 οι Chapin, Fuller και Pearson ανέπτυξαν το πρώτο αποδοτικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.

2.2 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο

Όταν το φως του ήλιου προσπίπτει σε συγκεκριμένα υλικά γνωστά σαν ημιαγωγούς, τα φωτόνια που αποτελούν το ηλιακό φως μεταδίδουν την ενέργεια τους στα ηλεκτρόνια σθένους.

Κάθε φορά που ένα φωτόνιο απορροφάται, ένα ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται από τον δεσμό του και μπορεί να μετακινηθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα. Το ελεύθερο ηλεκτρόνιο αφήνει πίσω του ένα κενό που ονομάζεται οπή, που επίσης μπορεί να κινηθεί μέσα στο πλέγμα. Οι οπές συμπεριφέρονται όπως τα ηλεκτρόνια αλλά έχουν θετικό φορτίο. Η κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών σε αντίθετες κατευθύνσεις δημιουργεί το ηλεκτρικό ρεύμα στον ημιαγωγό. Το ρεύμα αυτό στη συνέχεια μπορεί να συνεχίσει και σε ένα εξωτερικό κύκλωμα οπότε η ενέργεια που απορροφήθηκε από το φως μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια που τροφοδοτεί το φορτίο.

2.3 Η δομή του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Στα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία [5], το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται στην ένωση μεταξύ δύο περιοχών ενός κρυσταλλικού ημιαγωγού που είναι αντίθετου τύπου (π.χ. p και n). Εάν ο ημιαγωγός είναι από πυρίτιο, η περιοχή τύπου-n συνήθως εμπλουτίζεται με φώσφορο, που έχει πέντε ηλεκτρόνια σθένους (ένα περισσότερο από το πυρίτιο). Αυτή η περιοχή παρουσιάζει μεγάλη συγκέντρωση ηλεκτρονίων σε σχέση με τις οπές. Η περιοχή τύπου-p εμπλουτίζεται με βόριο, που έχει τρία ηλεκτρόνια σθένους, ένα λιγότερο από το πυρίτιο. Εδώ η συγκέντρωση των οπών είναι μεγαλύτερη. Η μεγάλη διαφορά ηλεκτρονίων από την μια περιοχή στην άλλη δημιουργεί ένα μόνιμο ηλεκτρικό

πεδίο με φορά από την περιοχή τύπου-n προς την περιοχή τύπου-p. Αυτό το πεδίο είναι υπεύθυνο για την κίνηση των ηλεκτρονίων, που παράγονται όταν το φως πέφτει πάνω στο στοιχείο, προς μια κατεύθυνση.

2.4 Αρχές λειτουργίας

Εάν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο συνδεθεί με ένα φορτίο και εκτεθεί σε ακτινοβολία, θα δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού στο φορτίο και θα ρέει ρεύμα. Το ρεύμα αφήνει το στοιχείο από το θετικό τμήμα και επιστρέφει στο αρνητικό τμήμα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες το φωτοβολταϊκό στοιχείο λειτουργεί σαν μια πηγή ενέργειας. Η διαδικασία που λαμβάνει χώρα μέσα στο στοιχείο μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

- Τα φωτόνια που φτάνουν το εσωτερικό του στοιχείου και έχουν ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το κενό ζώνης, απορροφώνται από το κύριο σώμα του ημιαγωγού δημιουργώντας ζευγάρια ηλεκτρονίων και οπών που λειτουργούν σαν φορείς ρεύματος.
- Το ηλεκτρικό πεδίο, ή η διαφορά δυναμικού, που δημιουργείται από τις διαφορετικές περιοχές p και n, είναι υπεύθυνο για τον διαχωρισμό των φορτίων πριν αυτά έχουν την δυνατότητα να ξαναενωθούν. Το αποτέλεσμα είναι ότι αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού και ρέει ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα.
- Η παρουσία της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος των τμημάτων της συσκευής παράγει, όπως σε κάθε ένωση p-n, φαινόμενα έγχυσης και ανασυνδυασμού των ηλεκτρονίων και των οπών.

Συνοψίζοντας, όταν ένα φορτίο είναι συνδεδεμένο σε ένα ακτινοβολούμενο φωτοβολταϊκό στοιχείο το ρεύμα που ρέει είναι το καθαρό αποτέλεσμα δύο συνιστωσών του εσωτερικού ρεύματος:

- ✓ Το φωτογενές ρεύμα ή απλά φωτόρευμα, I_L , λόγω της παραγωγής των φορτίων από το φως.
- ✓ Το σκοτεινό ρεύμα, dark current I_D , λόγω του ανασυνδυασμού των φορτίων.

Θεωρώντας το φωτόρευμα σαν θετικό, μπορεί να γραφτεί ότι:

$$I = I_L - I_D(V) \quad (1)$$

όπου I είναι το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου και V η τάση εξόδου του.

Αυτή είναι η θεμελιώδης χαρακτηριστική εξίσωση του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

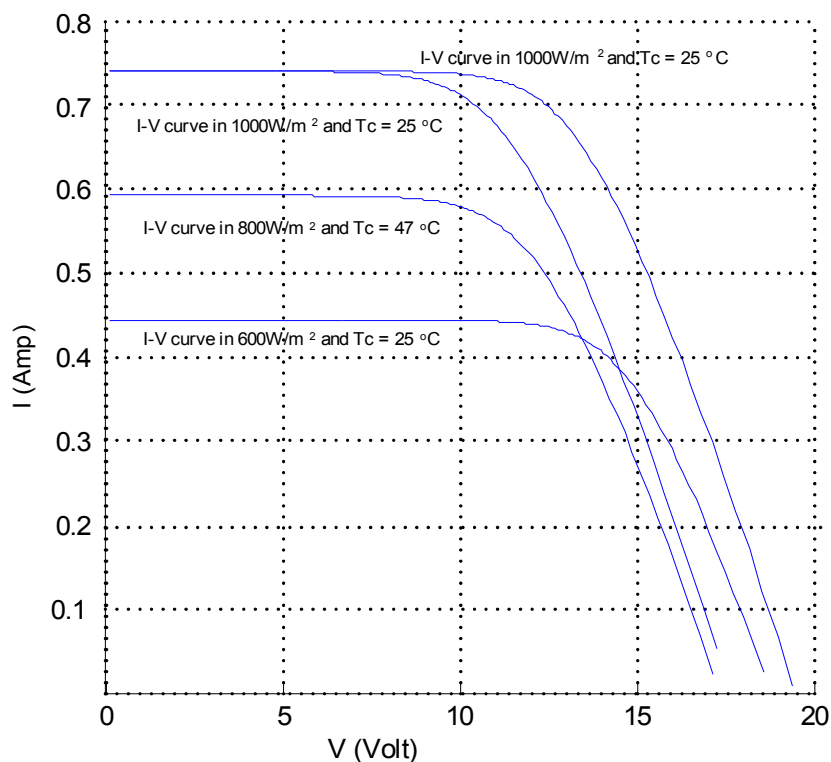
2.5 Η χαρακτηριστική I-V σε συνθήκες φωτεινότητας

Σύμφωνα με τη σχέση (1), το ρεύμα που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο σε κάποιο φορτίο είναι αυτό που δίνεται από τη διαφορά μεταξύ του φωτορεύματος I_L και του ανασυνδυασμένου ρεύματος $I_0(V)$, με το τελευταίο να οφείλεται στην τάση πόλωσης από την παραγόμενη τάση. Αν υποθεθεί, για χάριν απλοποίησης, ότι το ρεύμα μπορεί να εκφραστεί από μια εκθετική συνάρτηση, η χαρακτηριστική εξίσωση για την συσκευή είναι:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(q_e \frac{V}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

όπου m παράγοντας ιδανικότητας, k είναι η σταθερά Boltzman, q_e το φορτίο του ηλεκτρονίου και T η θερμοκρασία του στοιχείου.

Η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου (I-V) που αντιπροσωπεύει αυτή την εξίσωση παρουσιάζεται στο σχήμα 2, όπου φαίνονται οι χαρακτηριστικές για διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας.



Αυτός ο τρόπος αναπαράστασης υιοθετεί μία σύμβαση προσήμου η οποία θεωρεί το ρεύμα που παράγεται σαν θετικό. Με αυτή την σύμβαση, το πρώτο τεταρτημόριο του I-V επιπέδου αντιστοιχεί στην περιοχή όπου το στοιχείο παραδίδει το ρεύμα στο φορτίο στο οποίο εφαρμόζεται θετική τάση. Με άλλα λόγια, το στοιχείο λειτουργεί σαν μια πηγή ενέργειας.

2.6 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης και Τάση Ανοιχτοκύκλωσης

Όπως φαίνεται από το σχήμα 2, η μεγαλύτερη τιμή του ρεύματος με το στοιχείο να λειτουργεί σαν γεννήτρια (στο πρώτο τεταρτημόριο) εμφανίζεται κάτω από συνθήκες βραχυκύκλωσης, όταν $V = 0$. Σύμφωνα με την εξίσωση (1), το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , δίνεται από την σχέση:

$$I_{sc} \equiv I(V=0) = I_L \quad (3)$$

Εάν το φωτοβολταϊκό στοιχείο βρίσκεται σε συνθήκη ανοιχτοκύκλωσης, έτσι ώστε $I = 0$, τότε η τιμή της τάσης είναι η μεγαλύτερη που μπορεί να εμφανιστεί στο πρώτο τεταρτημόριο. Αυτή ονομάζεται **τάση ανοιχτοκύκλωσης**, V_{oc} . Τότε από την σχέση (2), εξάγεται η σχέση:

$$V_{oc} = m \frac{kT}{q_e} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (4)$$

Ο προσδιορισμός των δύο παραπάνω παραμέτρων λειτουργίας επιτρέπει να γραφτεί η χαρακτηριστική εξίσωση του στοιχείου στην παρακάτω μορφή:

$$I = I_{sc} \left[1 - \exp\left(-q_e \frac{(V_{oc} - V)}{mkT}\right) \right] \quad (5)$$

2.7 Σημείο μέγιστης ισχύος

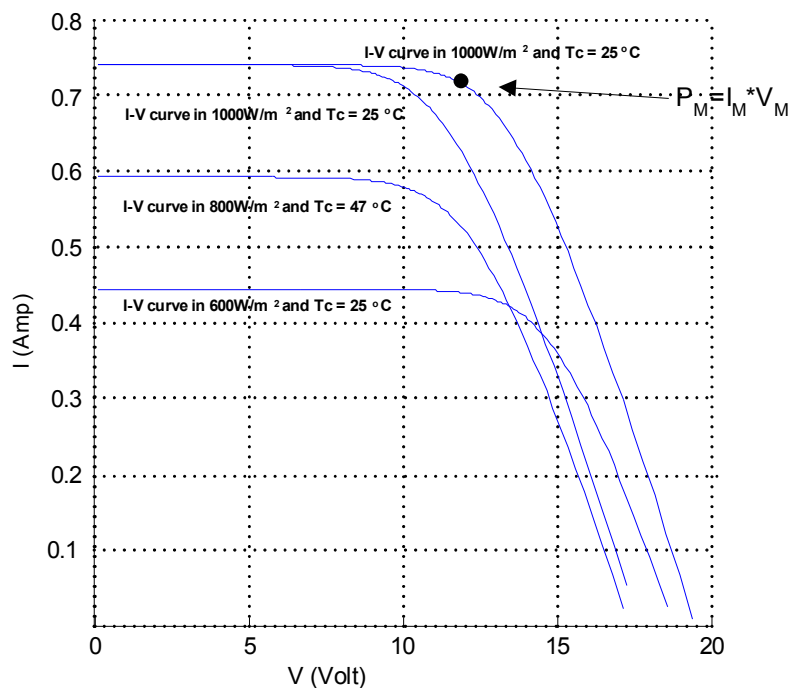
Όπως αναφέρθηκε πριν, η περιοχή της καμπύλης μεταξύ I_{SC} και V_{OC} αντιστοιχεί στην λειτουργία του στοιχείου σαν γεννήτρια.

Η ισχύς, P , που παράγεται δίνεται από το γινόμενο $P = IV$. Υπάρχει ένα σημείο στην χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού στοιχείου (I_M , V_M) στο οποίο η ισχύς που παράγεται είναι μέγιστη όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος. Οι τιμές των I_M και V_M μπορούν να εξαχθούν από την συνθήκη για το μέγιστο:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow 0 = d(IV)_M \equiv I_M dV + V_M dI \quad (6)$$

Η σχέση (6) μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\left[\frac{dI}{dV} \right]_M = \frac{-I_M}{V_M} \quad (7)$$



Σχήμα 3. Σημείο μέγιστης ισχύος P_M για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Αυτή η σχέση αναπαριστάνει την γενική συνθήκη για το μέγιστο. Όταν εφαρμόζεται σε ένα στοιχείο τότε το αποτέλεσμα είναι το εξής:

$$I_M = I_L + \frac{I_0}{\left(1 + \frac{mkT}{(q_e V_M)}\right)} \quad (8)$$

Επίσης πρέπει να ικανοποιείται και η εξίσωση του στοιχείου:

$$I_M = I_L - I_0 \left[\exp\left(q_e \frac{V_M}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

Από αυτές τις δύο ταυτόσημες εξισώσεις μπορούν να υπολογιστούν τα I_M και V_M . Μία πολύ προσεγγιστική αναλυτική λύση δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{I_M}{I_L} = 1 - a^{-b} \quad (10)$$

$$\frac{V_M}{V_{OC}} \approx 1 - \ln \frac{a}{a+1} \quad (11)$$

όπου

$$a = 1 + \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) \quad \text{και} \quad b = \frac{a}{(a+1)} \quad (12)$$

2.8 Παράγοντας πλήρωσης (Fill Factor) και αποδοτικότητα μετατροπής ενέργειας

Το γινόμενο $I_M \times V_M$ αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος που μπορεί να παραδοθεί στο φορτίο, το οποίο είναι μικρότερο από την τιμή του γινομένου του ρεύματος βραχυκύκλωσης με την τάση ανοιχτοκύκλωσης $I_{SC} \times V_{OC}$. Το πηλίκο αυτών των δύο γινομένων ονομάζεται παράγοντας πλήρωσης (fill factor) και δίνει ένα ποσοτικό κριτήριο της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης:

$$FF = \frac{(I_M V_M)}{(I_{SC} V_{OC})} \quad (13)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση για το παράγοντα πλήρωσης, η σχέση για τη μέγιστη ισχύ που παραδίδεται από το στοιχείο μπορεί να γραφτεί:

$$P_M = FF I_{SC} V_{OC} \quad (14)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (10) και (11) και λαμβάνοντας υπόψιν ότι πρακτικά στα στοιχεία το a είναι μεγαλύτερο από 20, μπορεί να εξαχθεί η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του FF :

$$FF = 1 - \frac{(\ln(a) - 1)}{a} \quad (15)$$

όπου ο συντελεστής a δίνεται από την σχέση (12).

Αυτή η σχέση προβλέπει μια μικρή μεταβολή στο FF εξαρτώμενη από το στοιχείο και τις συνθήκες λειτουργίας. Συμπερασματικά, η εξίσωση (14) τονίζει την εξάρτηση της μέγιστης ισχύος σε σχέση με τις βασικές συνθήκες λειτουργίας που είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοιχτοκύκλωσης.

Η **αποδοτικότητα της μετατροπής ενέργειας** ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ως το πηλίκο μεταξύ της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να προσφερθεί στο φορτίο και της ισχύος P_L της προσπίπτουσας ακτινοβολίας:

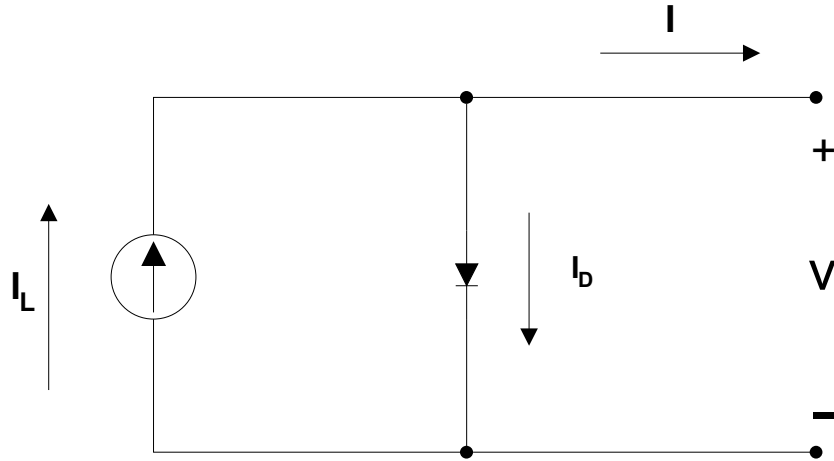
$$n \equiv \frac{(I_M V_M)}{P_L} \equiv \frac{(FF I_{SC} V_{OC})}{P_L} \quad (16)$$

Φυσικά, αυτή η αποδοτικότητα και η μέγιστη ισχύ αποκτώνται μόνο εάν η αντίσταση του φορτίου έχει την κατάλληλη τιμή V_M/I_M .

Οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω περιγράφουν την συμπεριφορά των ιδανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων, στα οποία τα μόνα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι η παραγωγή και ο ανασυνδυασμός των φορτίων.

2.9 Ισοδύναμο κύκλωμα για το ιδανικό στοιχείο

Το *ισοδύναμο κύκλωμα του ιδανικού στοιχείου* φαίνεται στο σχήμα 4 και περιγράφεται από την εξίσωση (2). Αποτελείται από μια ιδανική δίοδο p-n που έχει ανάστροφο ρεύμα κόρου I_0 και μια ιδανική πηγή ρεύματος I_L .



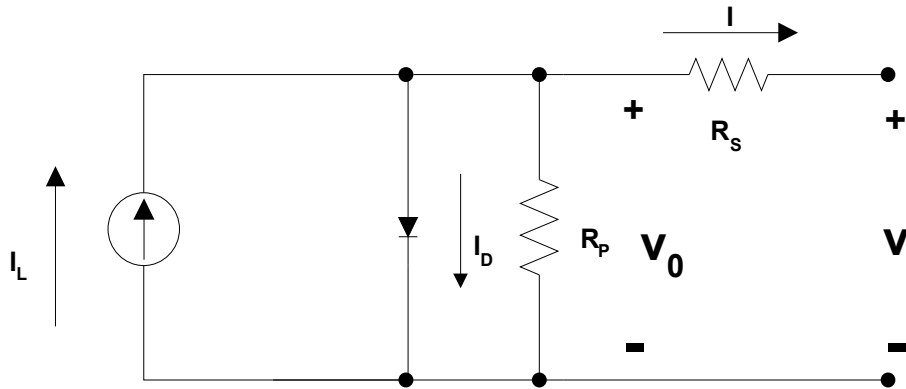
Σχήμα 4. Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου.

2.10 Αντιστάσεις σε σειρά και παράλληλα

Σε πραγματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία υπάρχουν και άλλα φαινόμενα, που δεν λαμβάνονται υπόψιν από την εξίσωση (2). Αυτά τα φαινόμενα επηρεάζουν την εξωτερική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Θα ληφθούν υπόψιν τουλάχιστον δύο από αυτά τα εξωτερικά φαινόμενα: η αντίσταση σε σειρά και η διαρροή ρεύματος αναλογικά με την τάση. Το τελευταίο φαινόμενο συνήθως χαρακτηρίζεται από μία παράλληλη αντίσταση. Αυτά τα φαινόμενα κατανέμονται σε όλο το στοιχείο και δεν μπορούν πάντα να αναπαρασταθούν από μια αντίσταση ή μια σταθερή τιμή. Όμως, από πρακτικής πλευράς η χρήση αντιστάσεων για να αναπαρασταθούν είναι μία πολύ αποδεκτή και πάρα πολύ χρήσιμη λύση.

Η παράλληλη αντίσταση, R_p , έχει μεγάλη επίδραση όταν η τάση έχει μικρή τιμή, όταν δηλαδή το ρεύμα που διαρρέει την δίοδο του ισοδύναμου κυκλώματος είναι πολύ μικρό. Η προέλευση και η ακριβής μελέτη της παράλληλης αντίστασης είναι σχετικά πολύπλοκη.

Αυτό δεν ισχύει με την αντίσταση σε σειρά, R_s , που οφείλεται στην ωμική αντίσταση των μεταλλικών επαφών με τον ημιαγωγό και στην ωμική αντίσταση των στρωμάτων του ημιαγωγού.



Σχήμα 5. Ισοδύναμο κύκλωμα μη ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Αν η R_s και η R_P ληφθούν υπόψιν στην μελέτη του στοιχείου, η εξίσωση για το φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(q_e \frac{(V + IR_s)}{mkT}\right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_P} \quad (17)$$

2.11 Η επίδραση της θερμοκρασίας

Για την ανάλυση της επίδρασης της θερμοκρασίας, ας θεωρηθεί ένα στοιχείο που περιγράφεται από μια εκθετική συνάρτηση με $m = 1$. Αυτό είναι επαρκές για μια πρώτη προσέγγιση. Η χαρακτηριστική εξίσωση για το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι:

$$I = I_L - I_0(T) \left[\exp\left(q_e \frac{(V + IR_s)}{kT}\right) - 1 \right] \quad (18)$$

Το φωτόρευμα I_L αυξάνει ελαφρά με την θερμοκρασία. Αυτή η αύξηση του φωτορεύματος είναι πιο φανερή στα στοιχεία από GaAs από ότι στα στοιχεία από Si. Παρόλα αυτά είναι πάντοτε μικρή και μπορεί να μην ληφθεί υπόψη σε μια πρώτη προσέγγιση.

Η εξάρτηση του ανάστροφου ρεύματος κορεσμού, I_0 , από την θερμοκρασία φαίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_0 = KT^3 \exp\left(\frac{-E_{GO}}{kT}\right) \quad (19)$$

όπου το K και το E_{GO} (το bandgap στους 0 °K) είναι και τα δύο σχεδόν σταθερά σε σχέση με τη θερμοκρασία.

Λαμβάνοντας υπόψιν τις εξισώσεις (18) και (19), μπορεί αμέσως να εξαχθεί η παρακάτω έκφραση για την τάση ανοιχτοκύκλωσης:

$$V_{oc}(T) = \frac{E_{GO}}{q_e} - \frac{kT}{q_e} \ln\left(\frac{KT^3}{I_L}\right) \quad (20)$$

Από τη σχέση (20) φαίνεται ότι η V_{oc} μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Η μεταβολή αυτή μπορεί να υπολογιστεί με τον παρακάτω συντελεστή μεταβολής:

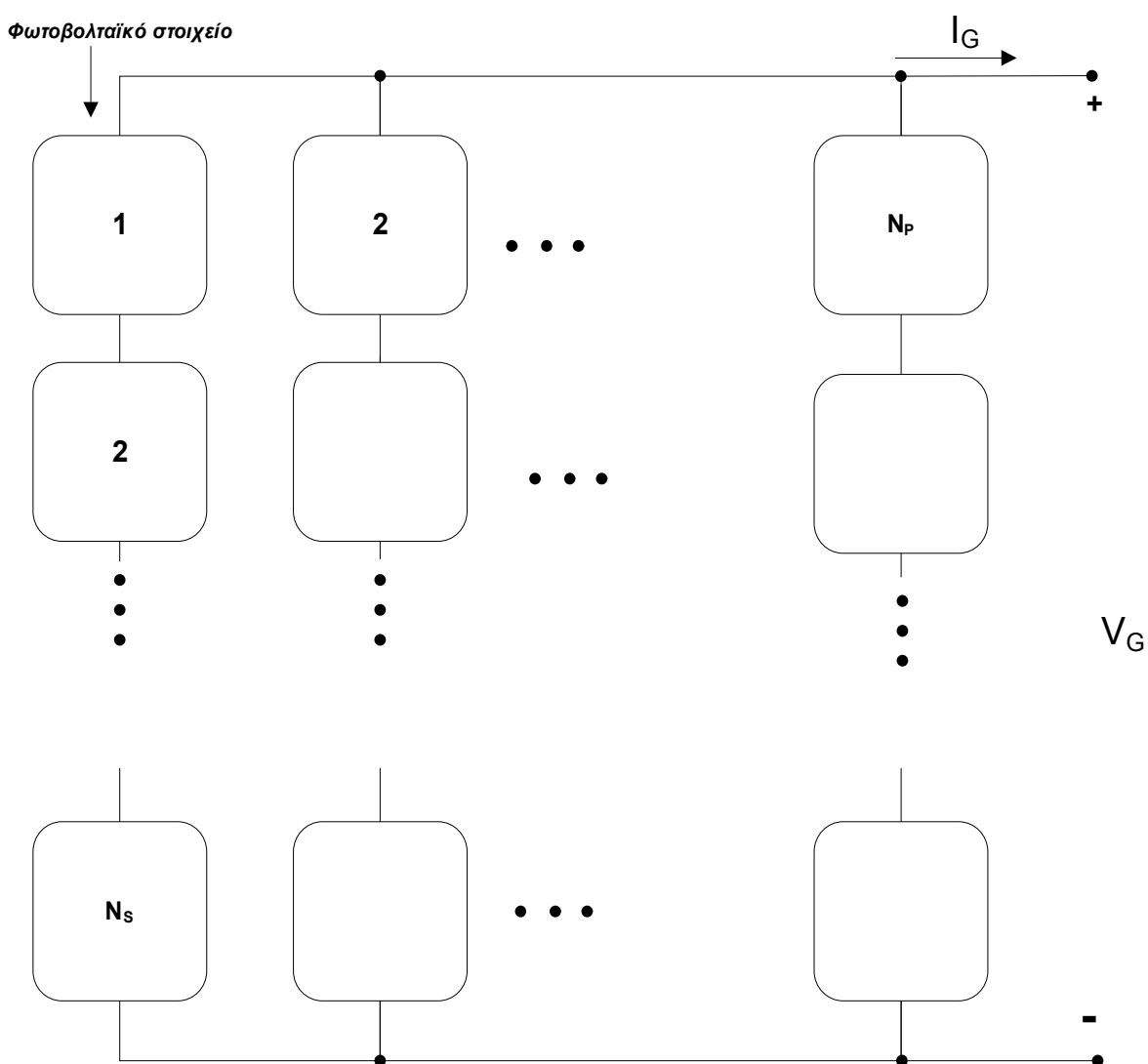
$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{-1}{T} \left[\frac{E_{GO}}{q_e} - V_{oc}(T) \right] \quad (21)$$

Ο συντελεστής αυτός παίρνει τιμή γύρω στα -2,3mV/ °C για στοιχεία πυριτίου. Επίσης ο συντελεστής πλήρωσης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

3. Η Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

3.1 Εισαγωγή

Για πρακτικούς λόγους, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά και παράλληλα. Έτσι σε κάθε εφαρμογή παράγονται οι επιθυμητές τιμές της τάσης και του ρεύματος λειτουργίας. Παράλληλα, τα στοιχεία τοποθετούνται μεταξύ διαφόρων υλικών έτσι ώστε να προστατευθούν. Τα στοιχεία, οι συνδέσεις και τα προστατευτικά αποτελούν όλα μαζί την φωτοβολταϊκή μονάδα (panel) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6. Διάγραμμα κυκλώματος φωτοβολταϊκής μονάδας.

Η ζωή μιας μονάδας πρέπει να ξεπερνάει τα είκοσι χρόνια κάτω από κανονικές συνθήκες. Αυτό εξαρτάται κυρίως από το περίβλημα της, που πρέπει να είναι στεγανό, να αντέχει την θερμική καταπόνηση και την τριβή από τα μηχανικά της μέρη. Ακόμα εύκολη τοποθέτηση και καθαρισμός, αποτελεσματική αποβολή της θερμότητας και χαμηλό κόστος είναι κάποια χαρακτηριστικά που είναι επιθυμητά από μια μονάδα.

Υπάρχουν αρκετοί τύποι φωτοβολταϊκών μονάδων. Τα πιο συνήθη έχουν από 30 έως 36 κρυσταλλικά στοιχεία πυριτίου. Όλα τα στοιχεία έχουν το ίδιο μέγεθος. Είναι συνδεδεμένα σε σειρά και περιβάλλονται από φύλλα γυαλιού. Ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου, η επιφάνεια της συστοιχίας κυμαίνεται από 0.1 και 0.5 m².

Ένα πρόβλημα που έχει να λύσει ένας μηχανικός είναι η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φωτοβολταϊκής μονάδας, με μόνες πληροφορίες τη δομή της μονάδας και τον τοπικό καιρό.

Όπως αναφέρθηκε η χαρακτηριστική εξίσωση για την καμπύλη I-V σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να εκφραστεί από την σχέση:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{(V + IR_s)}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_p} \quad (22)$$

όπου I_L , I_0 , R_s και R_p είναι το φωτοπαραγόμενο ρεύμα, το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού, η αντίσταση σειράς και η παράλληλη αντίσταση, αντίστοιχα. Η τάση V_t είναι ίση με mkT/q_e όπου $m = 1$ και $V_t \approx 25\text{mV}$ στους 300 °K.

Αυτή η έκφραση δίνει μια επαρκή αναπαράσταση της πραγματικής συμπεριφοράς του στοιχείου. Όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας. Ο λόγος είναι ότι οι παράμετροι, I_L και I_0 δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας και άρα είναι δύσκολο να επαληθευτεί.

3.2 Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, μια φωτοβολταϊκή μονάδα αποτελείται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία που είναι ενωμένα με ηλεκτρικές συνδέσεις. Επειδή αυτά τα στοιχεία δεν είναι όμοια, μπορεί να είναι ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα η πρόβλεψη της χαρακτηριστικής για όλη την μονάδα, ακόμα και αν είναι γνωστές οι χαρακτηριστικές για κάθε στοιχείο ξεχωριστά.

Ευτυχώς, οι πιο πολλές πρακτικές εφαρμογές δεν απαιτούν τόσο μεγάλη ακρίβεια, και συνεπώς ένα απλό μοντέλο μπορεί να βασιστεί στις παρακάτω υποθέσεις:

α) Η επίδραση της παράλληλης αντίστασης είναι αμελητέα.

β) Το φωτοπαραγόμενο ρεύμα I_L και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσα.

γ) ο όρος $\exp[(V + IR_s)/V_t]$ είναι μεγαλύτερος από 1 κάτω από όλες τις συνθήκες λειτουργίας.

δ) Όλα τα στοιχεία μιας μονάδας είναι πανομοιότυπα και λειτουργούν κάτω από τις ίδιες συνθήκες φωτεινότητας και θερμοκρασίας.

ε) Η πτώση τάσης στους αγωγούς που συνδέουν τα στοιχεία είναι αμελητέα.

Από την εξίσωση (22), μπορεί να εξαχθεί η χαρακτηριστική καμπύλη I-V για μια φωτοβολταϊκή μονάδα θεωρώντας ότι:

$$I_G = I N_P \quad (23)$$

$$V_G = V N_S \quad (24)$$

όπου I_G και V_G είναι το ρεύμα και η τάση της μονάδας, και N_P και N_S είναι ο αριθμός των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα, αντίστοιχα. Από τις εξισώσεις (22), (23) και (24) εξάγεται η σχέση:

$$I_G = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{\left(\frac{V_G}{N_S} + I_G \frac{R_S}{N_P}\right)}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{\left(\frac{V_G}{N_S} + I_G \frac{R_S}{N_P}\right)}{R_P} N_P \quad (25)$$

3.3 Χρήσιμες εκφράσεις

Από τις παραπάνω υποθέσεις και από την σχέση (22) προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$I = I_{SC} - I_0 \exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t}\right) \quad (26)$$

Αν $I = 0$ τότε, η τάση ανοιχτοκύκλωσης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$V_{OC} = V_t \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_0}\right) \quad (27)$$

από όπου:

$$I_0 = I_{SC} \exp\left(\frac{-V_{OC}}{V_t}\right) \quad (28)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (28) στην εξίσωση (26) εξάγεται τελικά η σχέση:

$$I = I_{SC} \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{OC} + IR_s}{V_t}\right) \right] \quad (29)$$

Αυτή είναι πολύ χρήσιμη σχέση διότι όλες οι παράμετροι στο δεξιό μέρος της εξίσωσης είναι πολύ εύκολο να υπολογιστούν.

Βέβαια παρουσιάζεται το πρόβλημα ότι το ρεύμα I είναι και στα δύο μέρη της εξίσωσης αλλά αυτό όπως θα δειχθεί σε επόμενο κεφάλαιο μπορεί να λυθεί.

Τελικά οι εξισώσεις για την φωτοβολταϊκή γεννήτρια θα είναι:

$$I_{SCG} = I_{SC} N_P \quad (30)$$

$$V_{OCG} = V_{OC} N_S \quad (31)$$

$$R_{SG} = R_s \frac{N_S}{N_P} \quad (32)$$

$$I_G = I_{SC} [1 - \exp(\frac{(V_G - V_{OCG} + I_G R_{SG})}{(N_s V_t)})] \quad (33)$$

όπου I_{SC} , V_{OCG} και R_{SG} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση ανοιχτοκύκλωσης και η αντίσταση σειράς της γεννήτριας, αντίστοιχα.

3.4 Καθορισμός των παραμέτρων της χαρακτηριστικής I-V.

Η ισχύς που παράγει ένα στοιχείο κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας δίνεται από την σχέση:

$$P = V I \quad (34)$$

Ο υπολογισμός της μέγιστης ισχύος μπορεί να γίνει με αντικατάσταση της εξίσωσης (29) στην (34) λαμβάνοντας υπόψιν ότι:

$$P = P_{MAX} \Rightarrow \frac{dP}{dV} = 0 \quad (35)$$

Όμως θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν πιο απλές μέθοδοι. Μία από αυτές βασίζεται στην ύπαρξη σχέσης μεταξύ του παράγοντα πλήρωσης (fill factor) και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Αρχικά ορίζεται η κανονικοποιημένη τάση και αντίσταση από τις σχέσεις (36) και (37) ως εξής:

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_t} \quad (36)$$

και

$$r_s = R_s \frac{V_{oc}}{I_{SC}} \quad (37)$$

Έτσι μια ικανοποιητική και εμπειρική έκφραση για τη σχέση μεταξύ του FF και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης είναι:

$$FF = \frac{(V_M I_M)}{(V_{oc} I_{SC})} = FF_o (1 - r_s) \quad (38)$$

όπου:

$$FF_o = \frac{(v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72))}{(v_{oc} + 1)} \quad (39)$$

και I_M, V_M είναι το ρεύμα και η τάση, αντίστοιχα, του στοιχείου στο σημείο μέγιστης ισχύος. Οι παράμετροι V_M και I_M υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\frac{V_M}{V_{OC}} = 1 - \frac{b}{v_{oc}} \ln(a) - r_s(1 - a^{-b}) \quad (40)$$

και:

$$\frac{I_M}{I_{SC}} = 1 - a^{-b} \quad (41)$$

όπου:

$$a = v_{oc} + 1 - 2 v_{oc} r_s \quad (42)$$

και:

$$b = \frac{a}{(1 + a)} \quad (43)$$

3.5 Η Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Για την απλοποίηση του χειρισμού, οι κατασκευαστές συνήθως προμηθεύουν τα στοιχεία ενωμένα και με την κατάλληλη προστασία και όλο αυτό αποτελεί την φωτοβολταϊκή μονάδα όπως φαίνεται στο σχήμα 6. Συνδέοντας σε σειρά και παράλληλα αυτές τις μονάδες κατασκευάζεται η φωτοβολταϊκή συστοιχία (array).

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία πρέπει να παράγει την τιμή της τάσης και ρεύματος που απαιτείται. Παράλληλα προστατεύει τα στοιχεία από τις αντίξοες συνθήκες του περιβάλλοντος, τα απομονώνει ηλεκτρικά και παρέχει μηχανική αντοχή.

3.6 Κανονικές συνθήκες και NCOT

Η ηλεκτρική συμπεριφορά μιας φωτοβολταϊκής μονάδας (αυτή είναι η καμπύλη I-V κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φωτεινότητας και θερμοκρασίας) μπορεί να

προβλεφθεί από τις πληροφορίες που συνήθως παρέχει ο κατασκευαστής με την μονάδα. Οι κανονικές συνθήκες (Standard Test Conditions, STC) που αντιστοιχούν σε αυτές τις πληροφορίες είναι:

Ακτινοβολία	100 mW/cm ² (ή 1kW/m ²)
Φάσμα	A M 1.5
Θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου	25 °C

Κάτω από αυτές τις συνθήκες, υπολογίζονται η μέγιστη ισχύς, P_{MAXM} , που αποδίδεται από την μονάδα, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{SCM} , και η τάση ανοιχτοκύκλωσης, V_{OCM} .

Ο χαρακτηρισμός της μονάδας είναι ολοκληρωμένος με την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου (*nominal cell operation temperature, NCOT*), που ορίζεται σαν η θερμοκρασία που φτάνει ένα στοιχείο όταν η μονάδα λειτουργεί κάτω από τις παρακάτω συνθήκες λειτουργίας:

Ακτινοβολία	80 mW/cm ² (ή 800 W/m ²)
Φάσμα	AM 1.5
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	20 °C
Ταχύτητα αέρα	1 m/s

3.7 Συμπεριφορά κάτω από τυχαίες συνθήκες λειτουργίας

Οι κατάλογοι των κατασκευαστών συχνά περιέχουν επιπλέον πληροφορίες, για παράδειγμα τις καμπύλες I-V για διάφορες φωτεινότητες και θερμοκρασίες κ.α.

Ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μιας φωτοβολταϊκής μονάδας είναι εφικτός με τις παρακάτω υποθέσεις:

α) Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάται αποκλειστικά και γραμμικά από την ακτινοβολία:

$$I_{sc}(G) = C_1 G \quad (44)$$

όπου G είναι η τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (mW/cm²).

Η σταθερά C_1 έχει την τιμή:

$$C_1 = \frac{I_{SC}}{(100 \text{ mW/cm}^2)} \quad (45)$$

όπου I_{SC} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε ακτινοβολία 100 mW/cm^2 .

Αυτή η υπόθεση δεν λαμβάνει υπόψη την επίδραση της θερμοκρασίας στο I_{SC} και την σύνθεση του φάσματος της ακτινοβολίας. Κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, αυτό δίνει ένα σφάλμα λιγότερο από 0.5%.

β) Η τάση ανοιχτοκύκλωσης μιας μονάδας εξαρτάται από την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου, T_c , αλλά και από την ακτινοβολία όπως φαίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{dV_{OC}}{dT_c} = -2.3 \text{ mV/}^\circ\text{C} \quad (46)$$

$$V_{OC} = \frac{E_{GO}}{q_e} - \frac{kT}{q_e} \ln\left(\frac{KT^3}{I_L}\right) \quad (47)$$

Στη σχέση (47) η επίδραση της ακτινοβολίας στην V_{OC} εισάγεται μέσω του ρεύματος I_L .

γ) Η αντίσταση σειράς είναι ιδιότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων, ανεπηρέαστη από τις συνθήκες λειτουργίας. Η τιμή της δίνεται από την σχέση:

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_o}\right) \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (48)$$

Η μέγιστη ισχύς, η τάση ανοιχτοκύκλωσης και το ρεύμα βραχυκύκλωσης, που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της R_s δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{MAX} = \frac{P_{MAXM}}{(N_{SM} N_{PM})} \quad (49)$$

$$V_{OC} = \frac{V_{OCM}}{N_{SM}} \quad (50)$$

$$I_{SC} = \frac{I_{SCM}}{N_{PM}} \quad (51)$$

όπου N_{SM} και N_{PM} είναι ο αριθμός των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα αντίστοιχα στην φωτοβολταϊκή μονάδα.

4. Μελέτη φωτοβολταϊκών μονάδων με τη χρήση του λογισμικού MATLAB

4.1 Ανάλυση του μοντέλου προς προσομοίωση

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, με τη χρήση του λογισμικού MATLAB υπολογίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V διαφόρων φωτοβολταϊκών μονάδων σε διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η ανάλυση αυτή γίνεται με σκοπό να επιβεβαιωθεί η ακρίβεια του θεωρητικού μαθηματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί στην υλοποίηση του εξομοιωτή και ταυτόχρονα να παραχθούν τα ζεύγη των τιμών της τάσης και του ρεύματος της ιδανικής χαρακτηριστικής που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση του ελέγχου του εξομοιωτή. Τα ζεύγη αυτά θα κβαντιστούν και θα φορτωθούν σε μνήμη στην FPGA και θα συγκρίνονται με τις τιμές που θα μετρώνται από το κύκλωμα του εξομοιωτή.

Πιο συγκεκριμένα, αφού είναι γνωστές οι τιμές της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, του ρεύματος βραχυκύκλωσης, των θερμικών παραμέτρων της μονάδας και των κανονικών συνθηκών λειτουργίας από τα εγχειρίδια των κατασκευαστών, μπορεί να υπολογιστεί η χαρακτηριστική I-V οποιασδήποτε φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Σύμφωνα με τις σχέσεις που παρουσιάζονται πιο πάνω, πρώτα γίνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων για το φωτοβολταϊκό στοιχείο και στην συνέχεια από τις σχέσεις (30), (31), (32) και (33) υπολογίζονται οι παράμετροι και η χαρακτηριστική I-V για την συστοιχία που δίνεται. Βέβαια η εξίσωση της χαρακτηριστικής είναι της μορφής $I = f(V, I)$ δηλαδή το ρεύμα είναι και στα δύο μέρη της εξίσωσης. Στο μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε υπολογίζεται η χαρακτηριστική του ιδανικού στοιχείου δηλαδή χωρίς την R_s από την παρακάτω σχέση:

$$I_G = I_{sc} [1 - \exp(\frac{(V - V_{ocG})}{(N_s V_t)})] \quad (52)$$

όπου V η τάση του ιδανικού στοιχείου.

Στην σχέση (52) δεν υπάρχει το ρεύμα στο δεύτερο μέρος της εξίσωσης και έτσι στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η τάση της μη ιδανικής χαρακτηριστικής από την σχέση (53):

$$V_G = V - I_G * R_s \quad 0 \leq V_G \leq V_{oc} \quad (53)$$

Με αυτή την μέθοδο μπορεί να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική του μη ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου με ζεύγη τιμών I_G και V_G .

4.2 Μοντέλα και τεχνολογίες φωτοβολταϊκών

Σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο προσομοιώθηκαν διάφορες φωτοβολταϊκές συστοιχίες και τα αποτελέσματα είναι τα παρακάτω:

α) Μονάδα SIEMENS ST10

Η φωτοβολταϊκή μονάδα αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικής δομής επιχαλκωμένου ασθενούς ινδίου συνδεδεμένα σε σειρά.

Οι παράμετροι λειτουργίας σύμφωνα με τον κατασκευαστή φαίνονται στους πίνακες 1 και 2.

Πίνακας 1 Ηλεκτρικές παράμετροι για το μοντέλο ST10 σε STC.

Μέγιστη ισχύ P_{MAX}	10 Watt
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC}	0.74 Amp
Τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC}	21 Volt

Πίνακας 2 Θερμικές παράμετροι για το μοντέλο ST10.

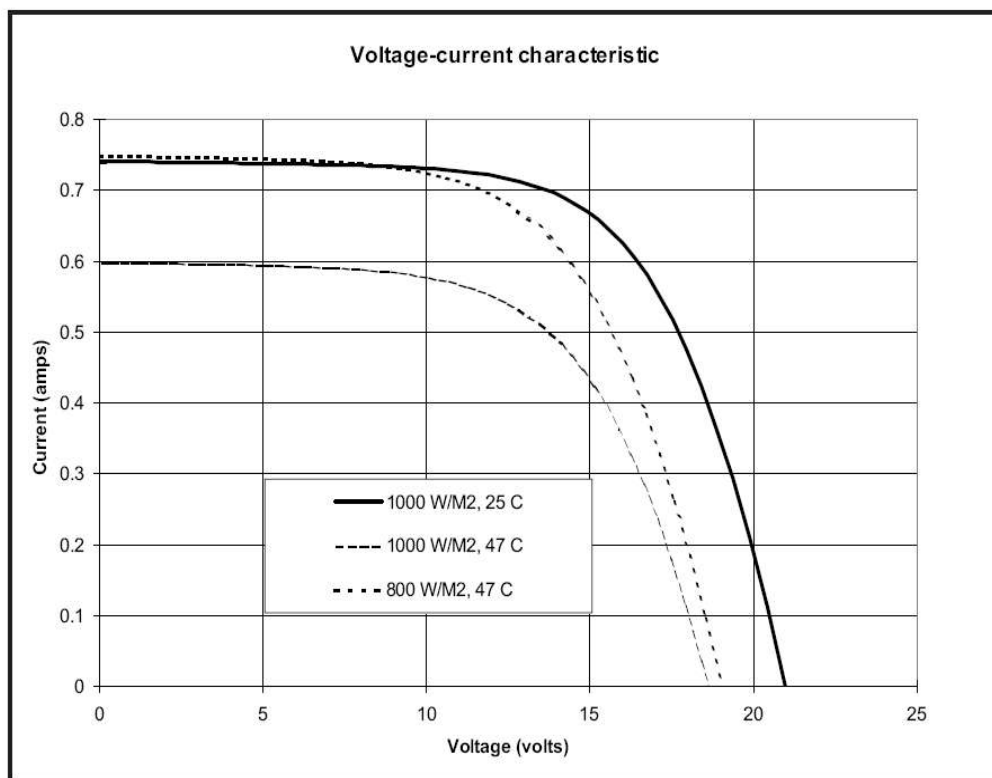
NCOT	$47 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Συντελεστής Θερμοκρασίας του Ρεύματος Βραχυκύκλωσης	$0.26\text{mA}/^{\circ}\text{C}$
Συντελεστής Θερμοκρασίας της Τάσης Ανοιχτοκύκλωσης	$-0.1 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$

Οι συνθήκες δοκιμής Standard Test Conditions (STC) είναι:

Ακτινοβολία $E = 1000 \text{ W/m}^2$ και

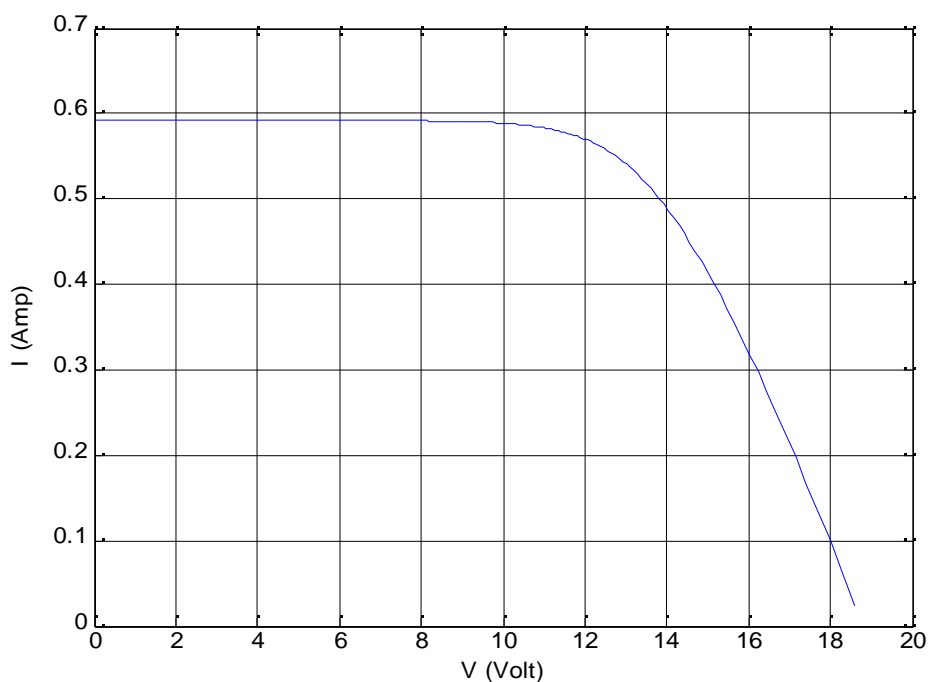
Θερμοκρασία στοιχείου $T_C = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες που δίνει ο κατασκευαστής για την συγκεκριμένη μονάδα για διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στοιχείου φαίνονται στο σχήμα 7 όπου η καμπύλη με μέγιστο ρεύμα η ρεύμα βραχυκύκλωσης 0.58 Amp αντιστοιχεί σε ακτινοβολία 800 W/m^2 και θερμοκρασία στοιχείου $47 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ενώ οι άλλες δύο σε ίδια ακτινοβολία αλλά διαφορετική θερμοκρασία στοιχείου .



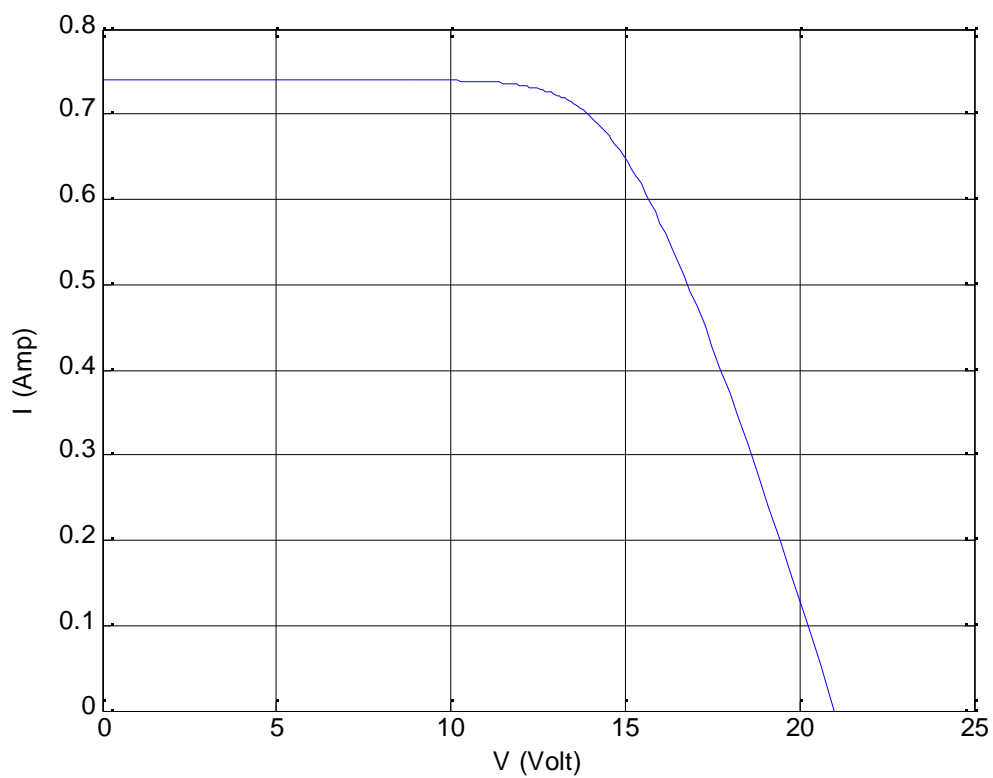
Σχήμα 7. Χαρακτηριστικές I-V για το ST10 από το εγχειρίδιο χρήσης.

Για τιμή ακτινοβολίας 800 W/m^2 και θερμοκρασίας 47°C σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύχθηκε η χαρακτηριστική φαίνεται στο σχήμα 8.



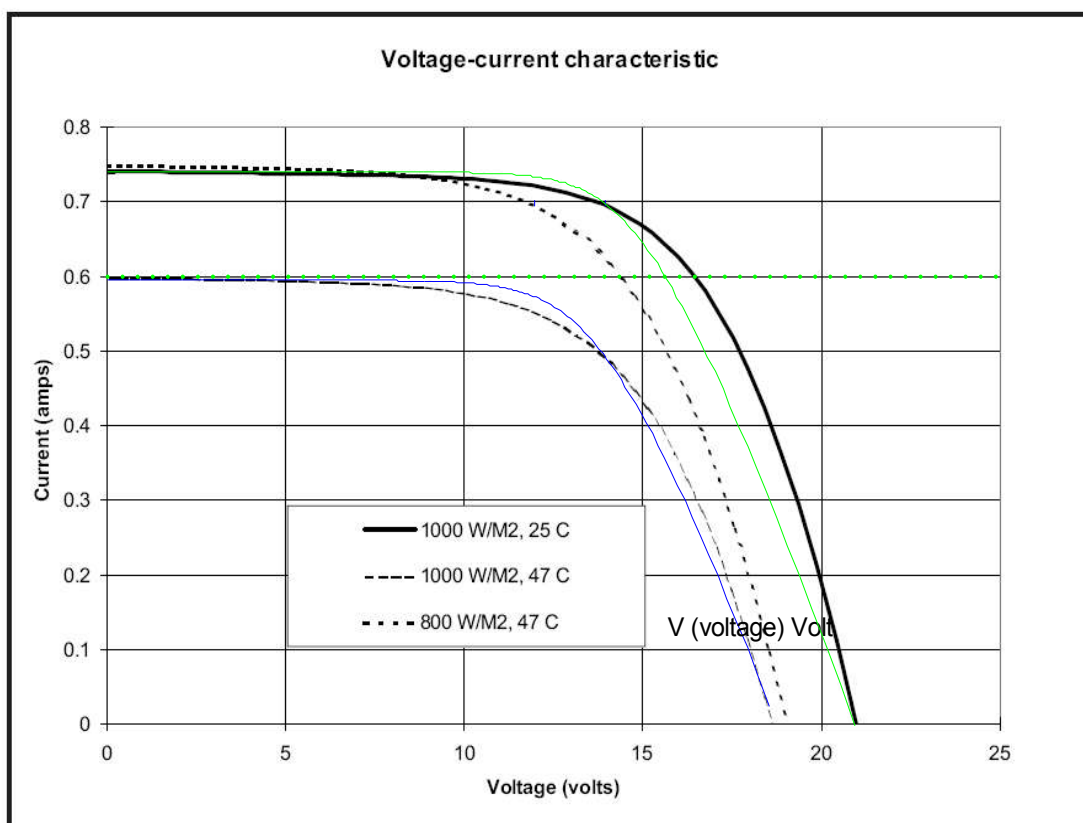
Σχήμα 8. Χαρακτηριστική I-V από το MATLAB για 800 W/m^2 και θερμοκρασία 47°C .

Για τιμή ακτινοβολίας 1000 W/m^2 και θερμοκρασίας 25°C σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύχθηκε η χαρακτηριστική φαίνεται στο σχήμα 9.



Σχήμα 9. Χαρακτηριστική I - V από το *MATLAB* για 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 25°C .

Στο σχήμα 10 φαίνονται οι χαρακτηριστικές I-V από το μοντέλο που αναπτύχθηκε και από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή.



— I-V από το MATLAB για 1000 W/M² και 25 °C

— I-V από το MATLAB για 800 W/M² και 47 °C

Σχήμα 10. I-V χαρακτηριστικές από το MATLAB και από το εγχειρίδιο.

β) Μονάδα Siemens SP75

Οι παράμετροι λειτουργίας σύμφωνα με τον κατασκευαστή φαίνονται στους πίνακες 3 και 4.

Πίνακας 3 Ηλεκτρικές παράμετροι για το μοντέλο SP75 σε STC.

Μέγιστη ισχύ P_{MAX}	75 Watt
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC}	4.8 Amp
Τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC}	21.7 Volt

Πίνακας 4 Θερμικές παράμετροι για το μοντέλο SP75.

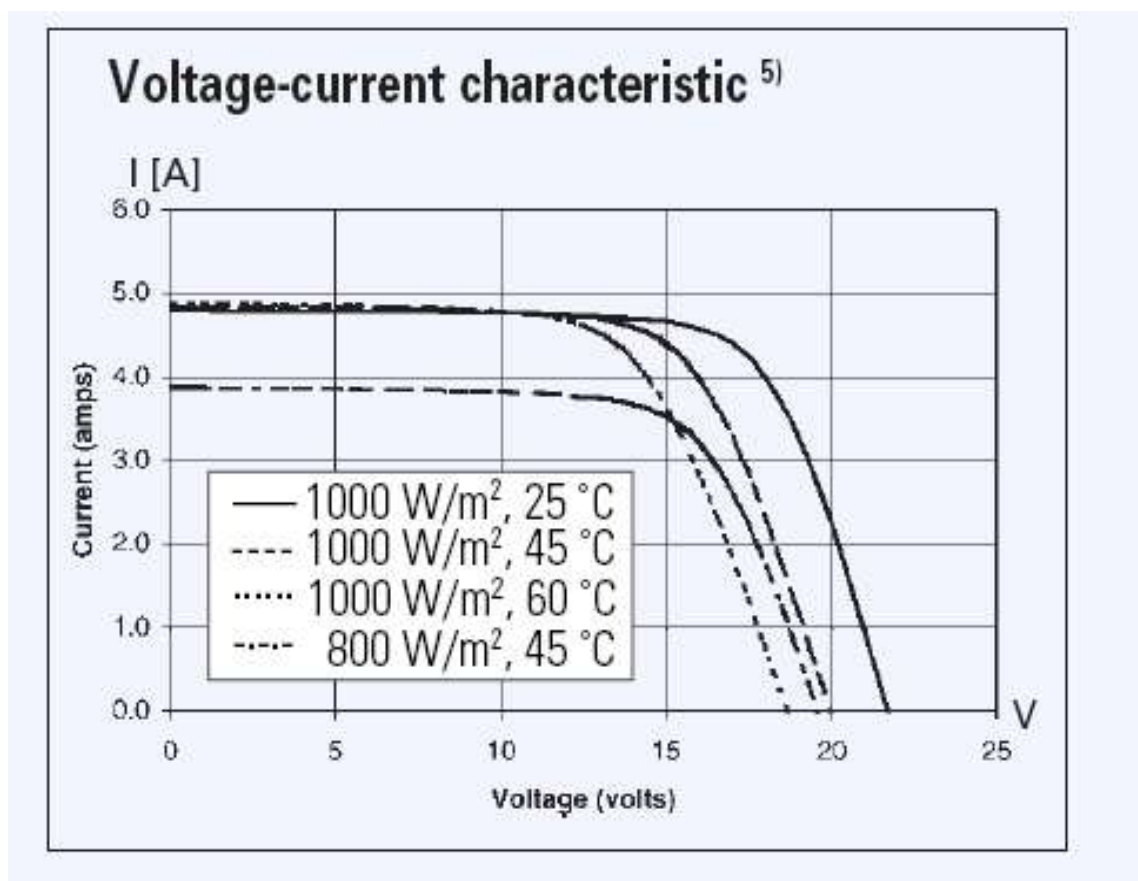
NCOT	45 ±2 °C
Συντελεστής Θερμοκρασίας του Ρεύματος Βραχυκύκλωσης	1.2mA/ °C
Συντελεστής Θερμοκρασίας της Τάσης Ανοιχτοκύκλωσης	- 0.077 V / °C

Οι STC συνθήκες δοκιμές είναι:

Ακτινοβολία $E = 1000 \text{ W/m}^2$ και

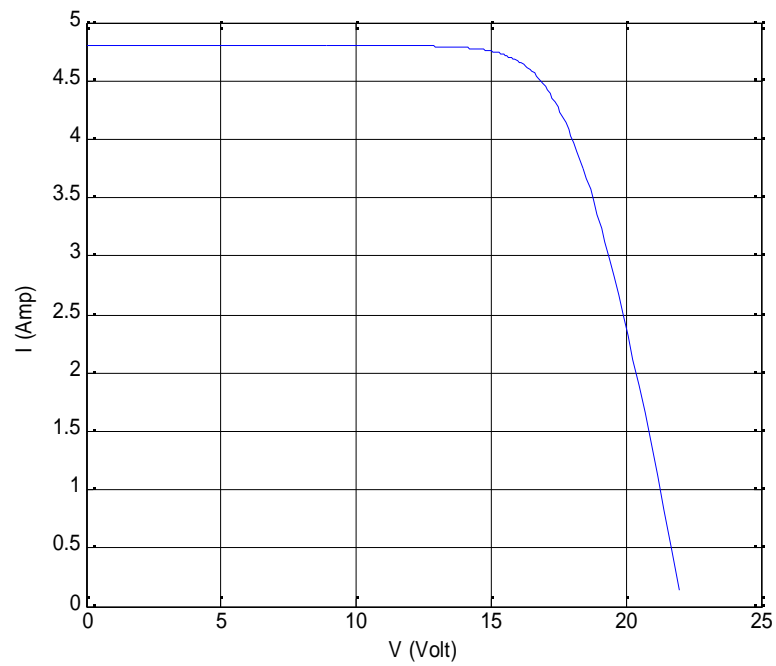
Θερμοκρασία στοιχείου $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι χαρακτηριστικές καμπύλες που δίνει ο κατασκευαστής για την συγκεκριμένη μονάδα φαίνονται στο σχήμα 11.

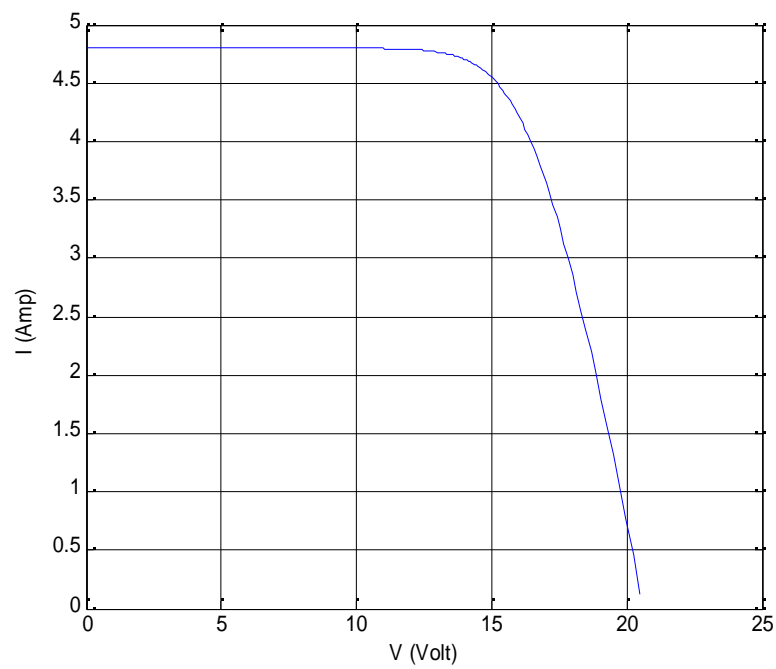


Σχήμα 11. Χαρακτηριστικές I-V για το SP55 από το εγχειρίδιο χρήσης.

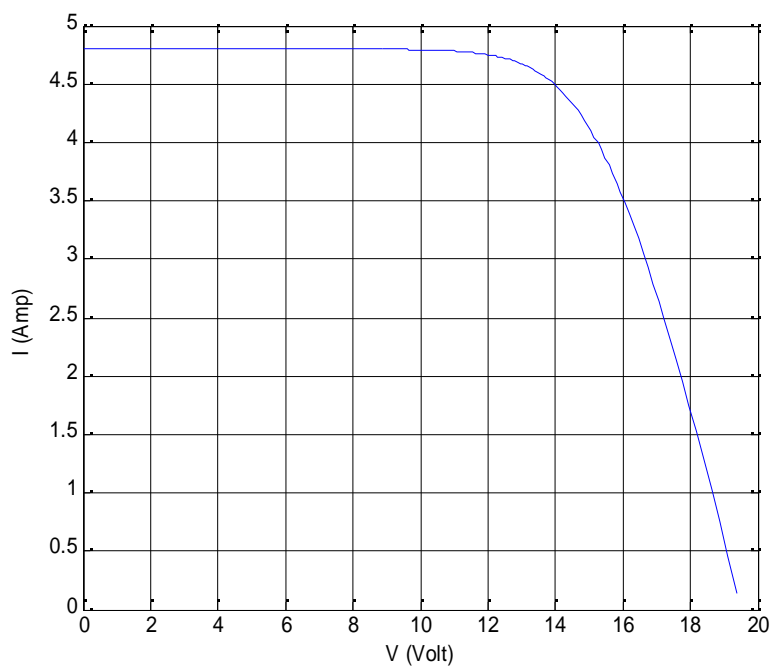
Σύμφωνα με την προσομοίωση οι χαρακτηριστικές για το συγκεκριμένο μοντέλο φαίνονται στα σχήματα 12,13,14 και 15 ενώ στο 16 φαίνονται οι θεωρητικές χαρακτηριστικές μαζί με τις χαρακτηριστικές του κατασκευαστή.



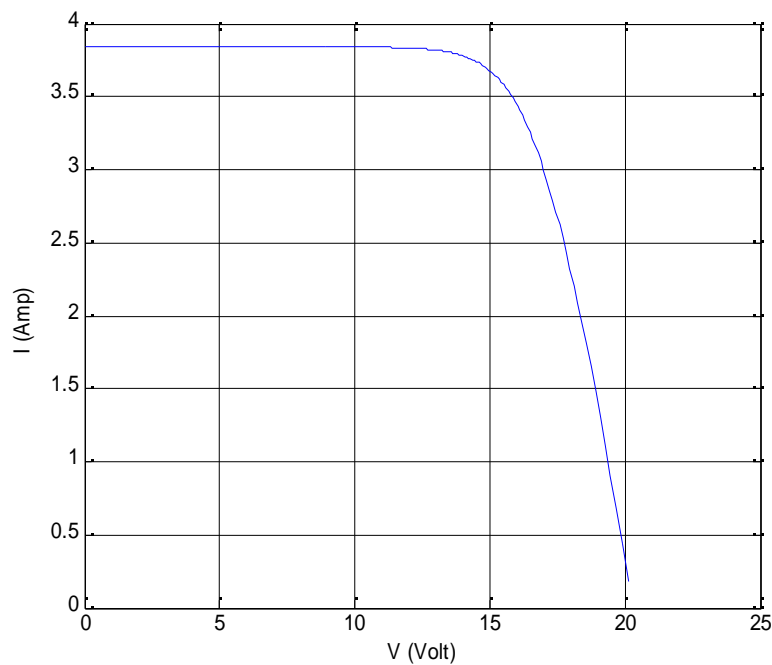
Σχήμα 12. Χαρακτηριστική I - V για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.



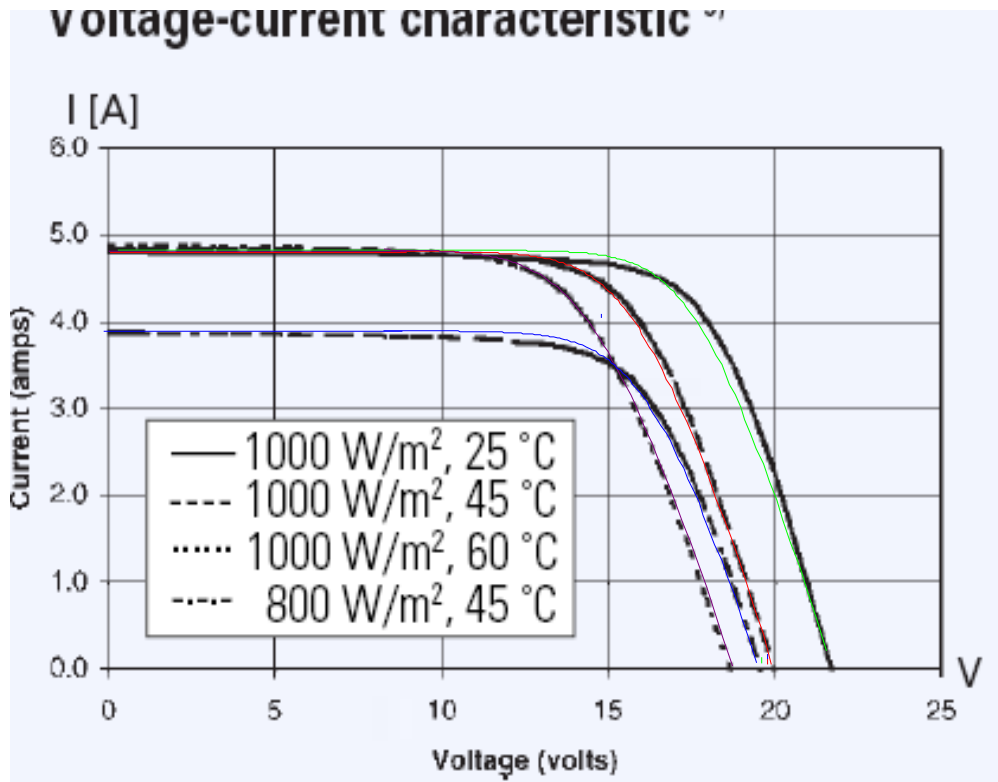
Σχήμα 13. Χαρακτηριστική I - V για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία $45 \text{ }^\circ\text{C}$.



Σχήμα 14. Χαρακτηριστική I - V για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία $60 \text{ }^\circ\text{C}$.



Σχήμα 15. Χαρακτηριστική I - V για ακτινοβολία 800 W/m^2 και θερμοκρασία $45 \text{ }^\circ\text{C}$.



- I-V από το MATLAB για 1000 W/M² και 25 °C
- - - I-V από το MATLAB για 1000 W/M² και 45 °C
- ... I-V από το MATLAB για 1000 W/M² και 60 °C
- . - I-V από το MATLAB για 800 W/M² και 45 °C

Σχήμα 16. I-V χαρακτηριστικές από το MATLAB και από εγχειρίδιο.

β) Μονάδα Siemens SM110/100

Οι παράμετροι λειτουργίας σύμφωνα με τον κατασκευαστή για το SM110 φαίνονται στους πίνακες 5 και 6.

Πίνακας 5 Ηλεκτρικές παράμετροι για το μοντέλο SM110 σε STC.

Μέγιστη ισχύς P_{MAX}	110 Watt
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC}	6.9 Amp
Τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC}	21.7 Volt

Πίνακας 6 Θερμικές παράμετροι για το μοντέλο SM110.

NCOT	$45 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Συντελεστής Θερμοκρασίας του Ρεύματος Βραχυκύκλωσης	$4 \times 10^{-4} / \text{ }^{\circ}\text{K}$
Συντελεστής Θερμοκρασίας της Τάσης Ανοιχτοκύκλωσης	$- 3.4 \times 10^{-3} \text{ V} / \text{ }^{\circ}\text{K}$

Οι παράμετροι λειτουργίας σύμφωνα με τον κατασκευαστή για το SM100 φαίνονται στους πίνακες 7 και 8.

Πίνακας 7 Ηλεκτρικές παράμετροι για το μοντέλο SM100 σε STC.

Μέγιστη ισχύ P_{MAX}	110 Watt
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{SC}	6.5 Amp
Τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{OC}	21 Volt

Πίνακας 8 Θερμικές παράμετροι για το μοντέλο SM100.

NCOT	$45 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Συντ. Θερμοκρασίας: Ρεύμα Βραχυκύκλωσης	$4 \times 10^{-4} / \text{ }^{\circ}\text{K}$
Συντ. Θερμοκρασίας: Τάση Ανοιχτοκύκλωσης	$- 3.4 \times 10^{-3} / \text{ }^{\circ}\text{K}$

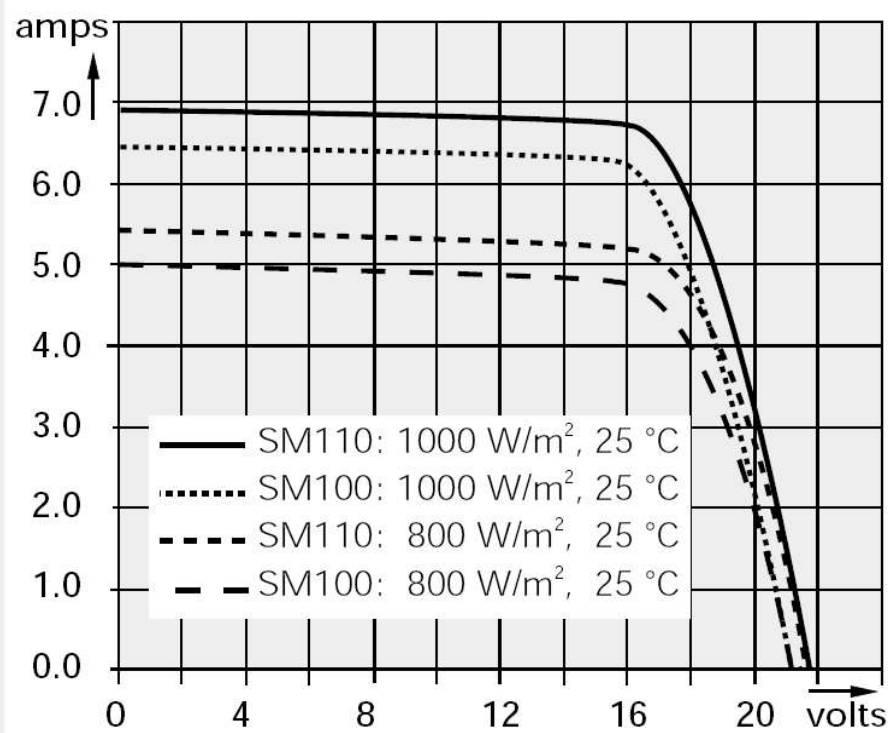
Οι STC συνθήκες είναι:

Ακτινοβολία $E = 1000 \text{ W/m}^2$ και

Θερμοκρασία στοιχείου $T_c = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

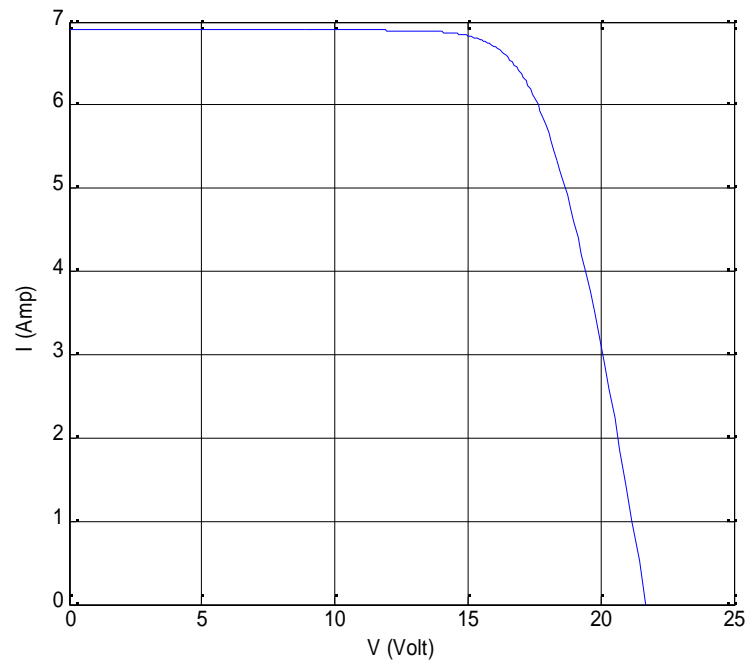
Σύμφωνα με τα παραπάνω οι χαρακτηριστικές καμπύλες για τις συγκεκριμένες μονάδες φαίνονται στο σχήμα 17.

Voltage-current characteristic 12 V

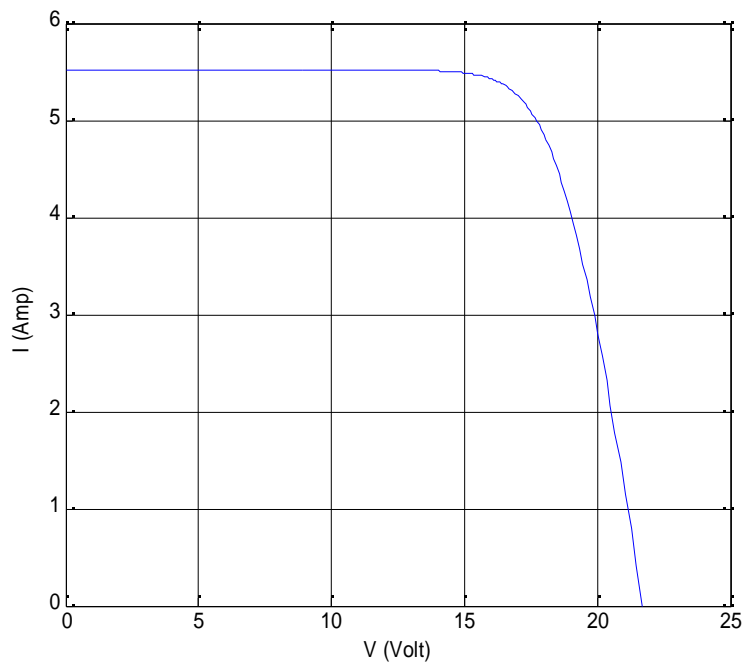


Σχήμα 17. Χαρακτηριστικές I-V για τα μοντέλα SM110 και SM100 από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή.

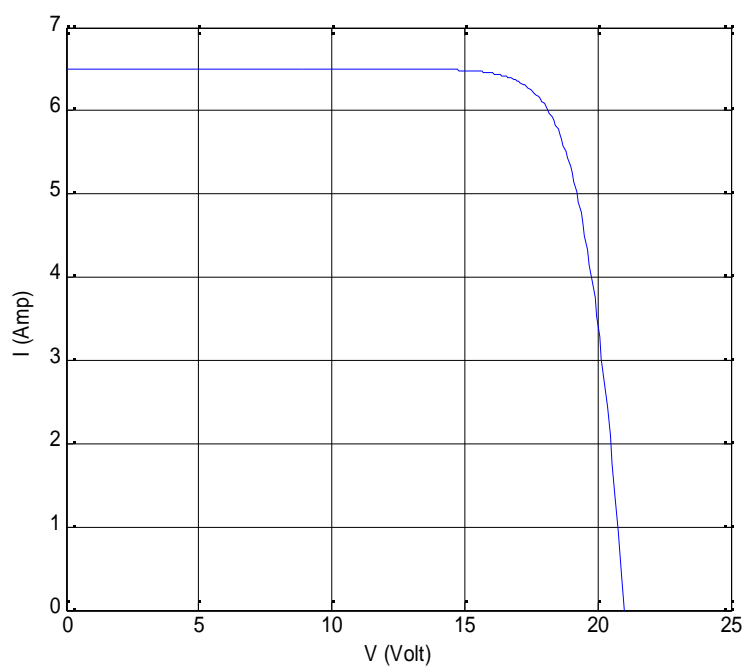
Σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο MATLAB προκύπτουν οι χαρακτηριστικές I-V για διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας που φαίνονται στα σχήματα 18,19,20, 21 και 22.



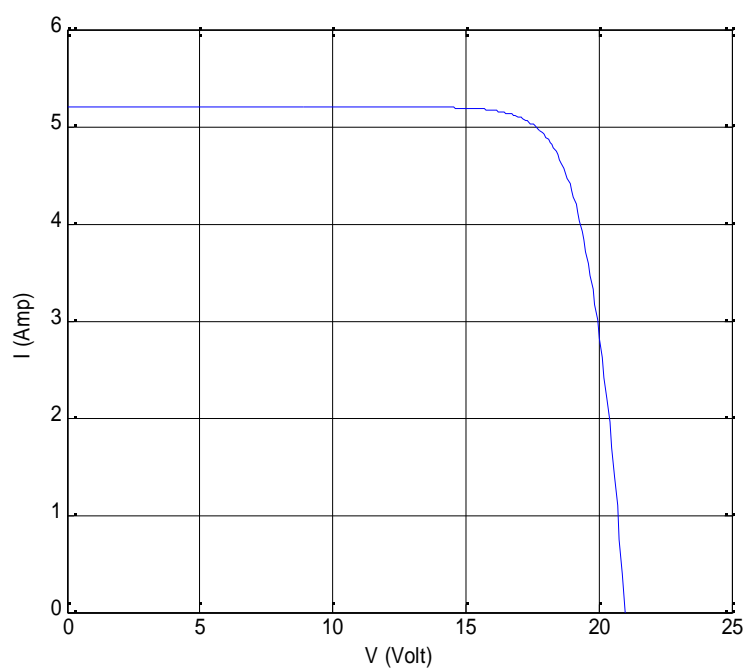
Σχήμα 18. Χαρακτηριστική I-V για το μοντέλο SM110 για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.



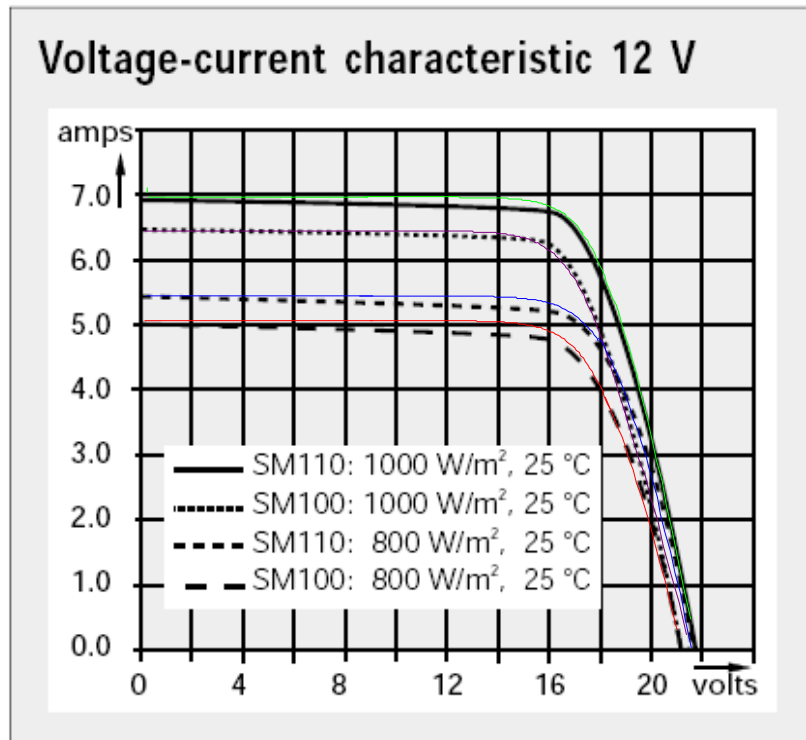
Σχήμα 19. Χαρακτηριστική I-V για το μοντέλο SM110 για ακτινοβολία 800 W/m^2 και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.



Σχήμα 20. Χαρακτηριστική I - V για το μοντέλο SM100 για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.



Σχήμα 21. Χαρακτηριστική I - V για το μοντέλο SM100 για ακτινοβολία 800 W/m^2 και θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$.



- I-V από το MATLAB για το SM110 σε 1000 W/M² και 25 °C
- I-V από το MATLAB για το SM100 σε 800 W/M² και 25 °C
- I-V από το MATLAB για το SM100 σε 1000 W/M² και 25 °C
- I-V από το MATLAB για το SM110 σε 800W/M² και 25 °C

Σχήμα 22. I-V χαρακτηριστικές από το MATLAB και από εγχειρίδιο.

Οι χαρακτηριστικές I-V που έχουν εξαχθεί με το μοντέλο που αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια προσεγγίζουν με σχετικά καλή ακρίβεια τις χαρακτηριστικές των περισσότερων φωτοβολταϊκών που δίνουν οι κατασκευαστές. Σημαντικές όμως αποκλίσεις εμφανίζονται για το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ST10. Αυτό διότι το συγκεκριμένο μοντέλο έχει πολλαπλών στρωμάτων μη κρυσταλλικά στοιχεία και τα μαθηματικά μοντέλα που προσπαθούν να το περιγράψουν αποτελούν πεδίο έρευνας.

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια θα χρησιμοποιηθεί στον εξομοιωτή. Δηλαδή, όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια, οι τιμές της τάσης και του ρεύματος της ιδανικής χαρακτηριστικής I-V που υπολογίζεται από το MATLAB θα χρησιμοποιηθούν στην υλοποίηση του εξομοιωτή αφού θα φορτωθούν σε μνήμη που θα υλοποιηθεί στην FPGA. Άρα η παραπάνω ανάλυση ήταν αναγκαία

έτσι ώστε να διαπιστωθεί το κατά πόσον το μαθηματικό μοντέλο ήταν ακριβές στον υπολογισμό των χαρακτηριστικών I-V.

5. Μετατροπéας dc-dc

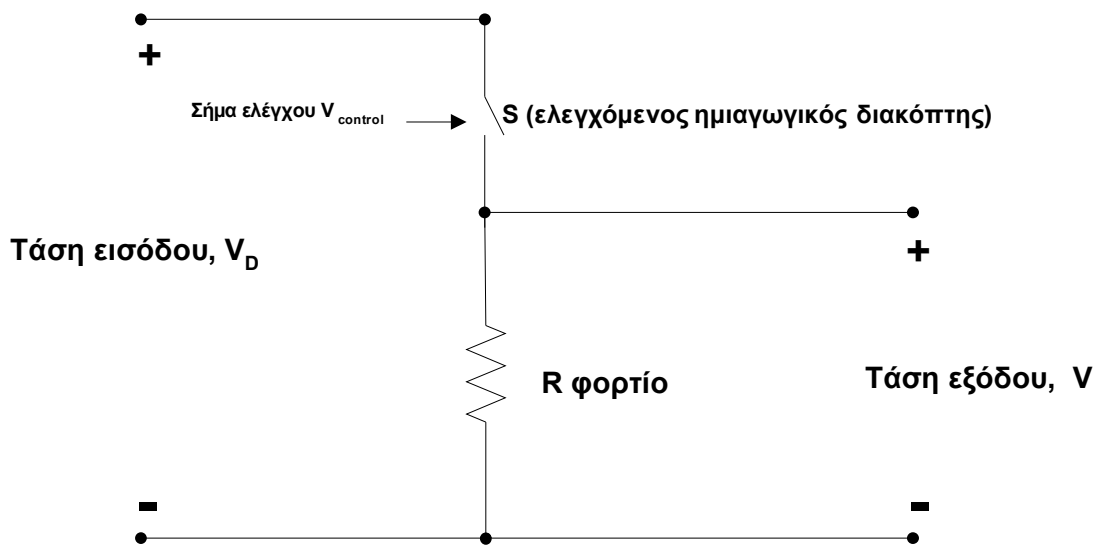
5.1 Ανάλυση του μετατροπέα dc-dc

Οι μετατροπéες dc-dc χρησιμοποιούνται ευρέως σε διακοπτικά dc τροφοδοτικά και σε εφαρμογές ελέγχου dc κινητήρων. Η τάση εισόδου σε αυτούς τους μετατροπéες είναι μη σταθεροποιημένη dc τάση, που προκύπτει από την ανόρθωση και το φιλτράρισμα της τάσης του δικτύου και για αυτό έχει διακυμάνσεις λόγω των αλλαγών στο πλάτος της τάσης του δικτύου. Οι διακοπτικοί μετατροπéες dc-dc χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της μη-σταθεροποιημένης dc τάσης εισόδου σε μια ελεγχόμενη dc τάση εξόδου με το επιθυμητό επίπεδο τάσης.

Διάφοροι τύποι μετατροπέων dc-dc είναι οι παρακάτω:

- 1) Step-down (buck) converter,
- 2) Step-up (boost) converter,
- 3) Step-down/step-up (buck – boost) converter,
- 4) Cuk converter και
- 5) Full-bridge converter.

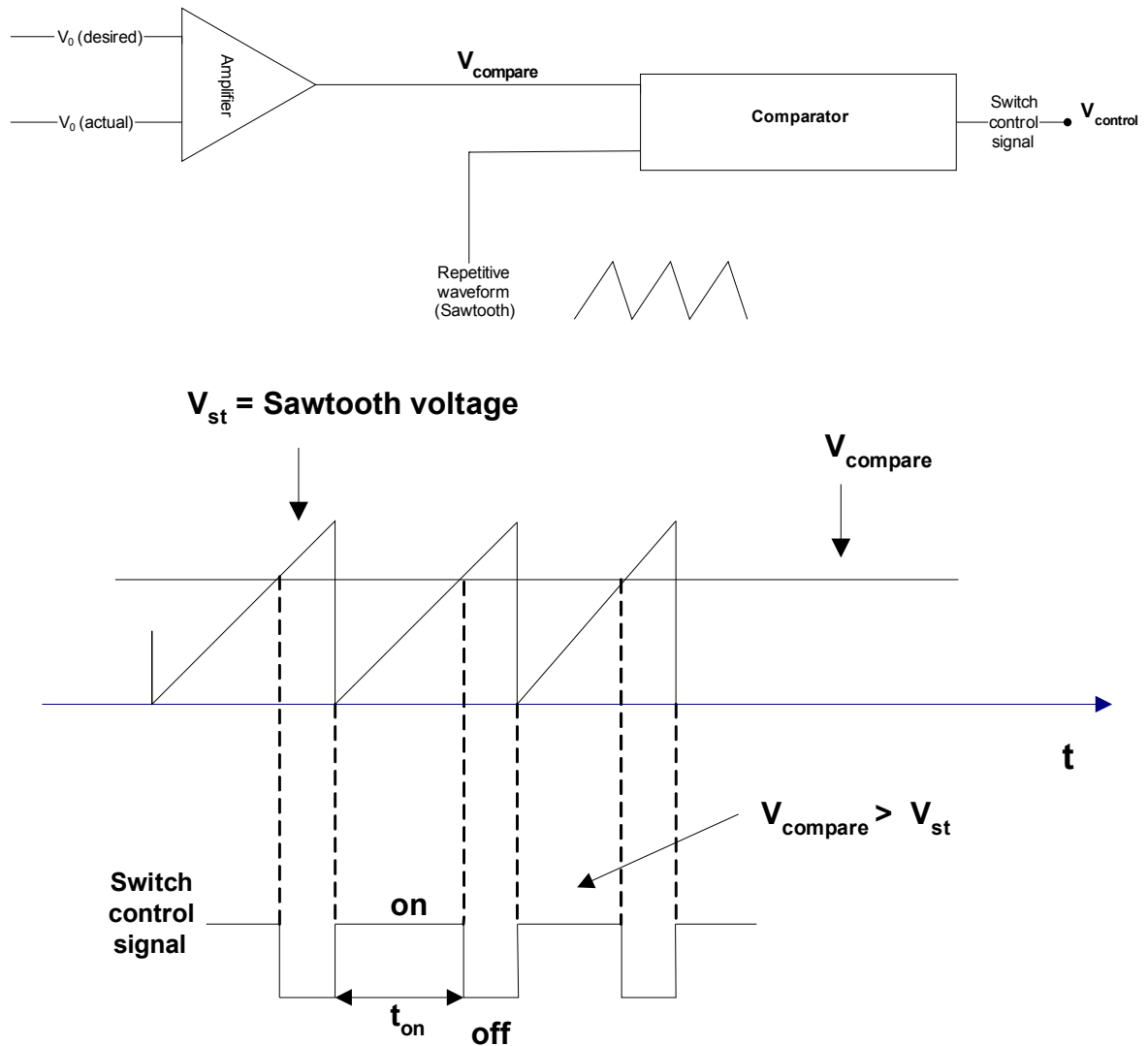
Στους μετατροπéες dc-dc, η dc τάση εξόδου πρέπει να ελεγχθεί έτσι ώστε να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο, παρόλο που το φορτίο εξόδου μπορεί να μεταβάλλεται. Οι διακοπτικοί μετατροπéες dc-dc χρησιμοποιούν ένα ή παραπάνω διακόπτες έτσι ώστε να μετατρέψουν την τάση dc από το ένα επίπεδο σε κάποιο άλλο. Στους μετατροπéες dc-dc με δεδομένη τάση εισόδου, η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται με την ελεγχόμενη διάρκεια του ανοίγματος και του κλεισίματος του διακόπτη S (t_{on} και t_{off} αντίστοιχα) όπως φαίνεται στο σχήμα 23. Έτσι, η διάρκεια που παραμένει ανοιχτός ο διακόπτης καθορίζει και την τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.



Σχήμα 23. Μετατροπέας dc-dc.

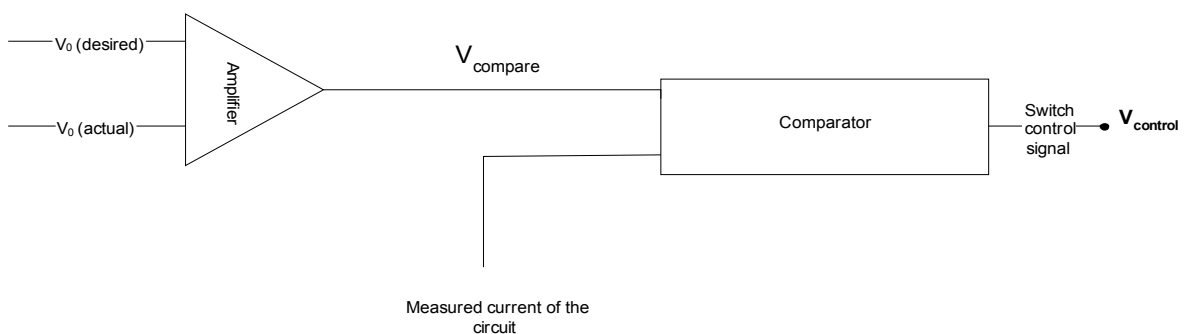
Μία από τις μεθόδους για τον έλεγχο της τάσης εξόδου είναι να ανοιγοκλείνει ο διακόπτης με σταθερή συχνότητα (σταθερή εναλλαγή με περίοδο $T_s = t_{on} + t_{off}$) ενώ ταυτόχρονα ελέγχεται η διάρκεια που ο διακόπτης παραμένει ανοιχτός, έτσι ώστε να φτάσει η τάση εξόδου στην επιθυμητή τιμή. Στην μέθοδο αυτή, που ονομάζεται **Διαμόρφωση Εύρους Παλμού** (Pulse-Width Modulation, PWM), μεταβάλλεται το duty ratio D , όπου $D = t_{on}/T_s$.

Στον έλεγχο PWM με σταθερή συχνότητα, το σήμα που κάνει τον έλεγχο δημιουργείται συγκρίνοντας ένα σήμα $V_{compare}$ με μια περιοδική κυματομορφή όπως φαίνεται στο σχήμα 24 που συνήθως είναι μια πριονωτή τάση. Το σήμα ελέγχου $V_{compare}$ δημιουργείται από την ενίσχυση του σφάλματος μεταξύ της τάσης εξόδου και της επιθυμητής τάσης εξόδου. Η συχνότητα της πριονωτής κυματομορφής, V_{st} , που έχει σταθερή τιμή κορυφής, καθορίζει την συχνότητα εναλλαγής. Αυτή η συχνότητα είναι σταθερή και επιλέγεται να είναι από λίγα kHz έως μερικές εκατοντάδες kHz. Όταν το ενισχυμένο σήμα σφάλματος, $V_{compare}$, που μεταβάλλεται πολύ πιο αργά σε σχέση με την συχνότητα εναλλαγής, είναι μεγαλύτερο από την στιγμιαία τιμή της πριονωτής κυματομορφής, το σήμα ελέγχου εναλλαγής γίνεται ένα, με αποτέλεσμα ο διακόπτης να ανοίξει (on), αλλιώς είναι κλειστός (off).



Σχήμα 24. Διάγραμμα λειτουργίας dc-dc μετατροπέα με Voltage control.

Μία άλλη μέθοδος ελέγχου των μετατροπέων dc-dc είναι με τη μέτρηση του ρεύματος εξόδου του κυκλώματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 25. Το γεγονός ότι ελέγχεται το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα έχει επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά της ανάδρασης του βρόγχου ελέγχου.



Σχήμα 25. Διάγραμμα λειτουργίας dc-dc μετατροπέα με έλεγχο ρεύματος.

Ο έλεγχος με τη μέτρηση του ρεύματος έχει μερικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον συμβατικό τρόπο ελέγχου του duty-cycle του PWM:

- 1) Αφαιρεί τον ένα πόλο από την συνάρτηση μεταφοράς έξοδο-προς-έλεγχο $v(s)/v_c(s)$, με αποτέλεσμα να απλοποιείται η αντιστάθμιση του συστήματος αρνητικής-ανάδρασης.
- 2) Επιτρέπει την σχεδίαση τροφοδοτικών με υπομονάδες που λειτουργούν παράλληλα και συνεισφέρουν ίσα ρεύματα στο φορτίο εξόδου.

Ένας από τους στόχους στην σχεδίαση των τροφοδοτικών είναι η μείωση του όγκου τους και η αύξηση της αξιοπιστίας τους. Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των ημιαγωγών έχουν σαν αποτέλεσμα να προτιμάται η χρήση διακοπτόμενων τροφοδοτικών αντί των γραμμικών διότι είναι μικρότερα και πιο αξιόπιστα σε σχέση με τα γραμμικά. Στα διακοπτικά τροφοδοτικά η μετατροπή της dc τάσης από ένα επίπεδο σε κάποιο άλλο επιτυγχάνεται με την χρήση ενός dc-dc μετατροπέα. Επειδή τα στοιχεία ισχύος δεν χρειάζεται να λειτουργούν στην ενεργό περιοχή τους, ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας έχει πολύ χαμηλή απώλεια ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την υψηλή ενεργειακή απόδοση σε ένα ποσοστό της τάξης του 70 με 90%. Επιπρόσθετα η αυξημένη συχνότητα εναλλαγής, οι υψηλές τιμές λειτουργίας τάσης και ρεύματος και το χαμηλό κόστος είναι οι παράγοντες που κάνουν τα διακοπτικά τροφοδοτικά να χρησιμοποιούνται ευρέως. Τέλος ένα MOSFET που λειτουργεί σαν διακόπτης έχει πολύ μεγαλύτερη ικανότητα να χειρισμού της ισχύς σε σύγκριση με το γραμμικό τρόπο λειτουργίας.

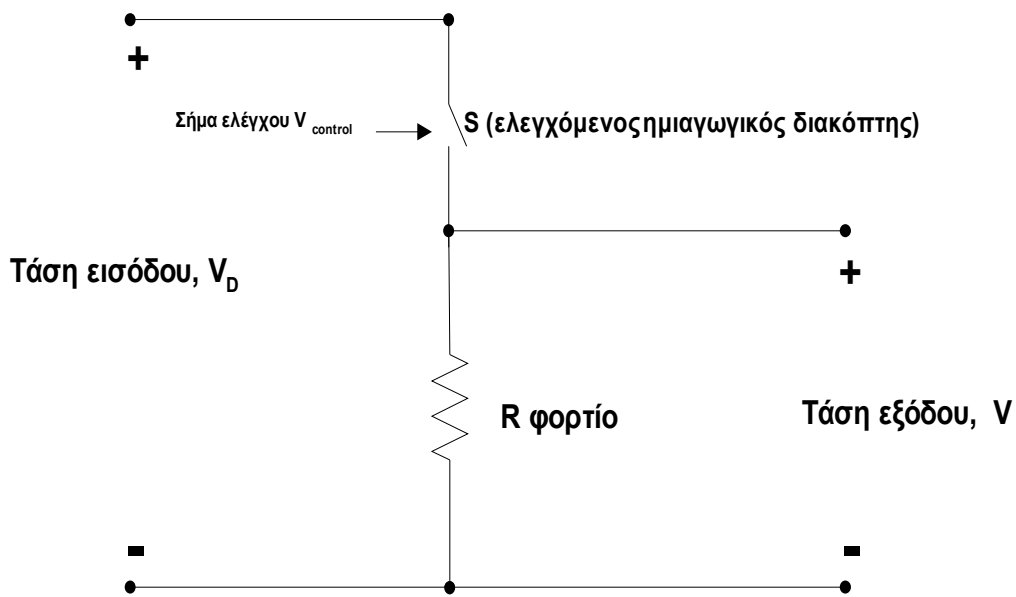
Στον αντίποδα, τα διακοπτόμενα τροφοδοτικά είναι πολύ πιο σύνθετα και πρέπει να λειφθούν συγκεκριμένα μέτρα για τη μείωση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής λόγω της υψηλής συχνότητας εναλλαγής.

5.2 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step-down ή buck converter)

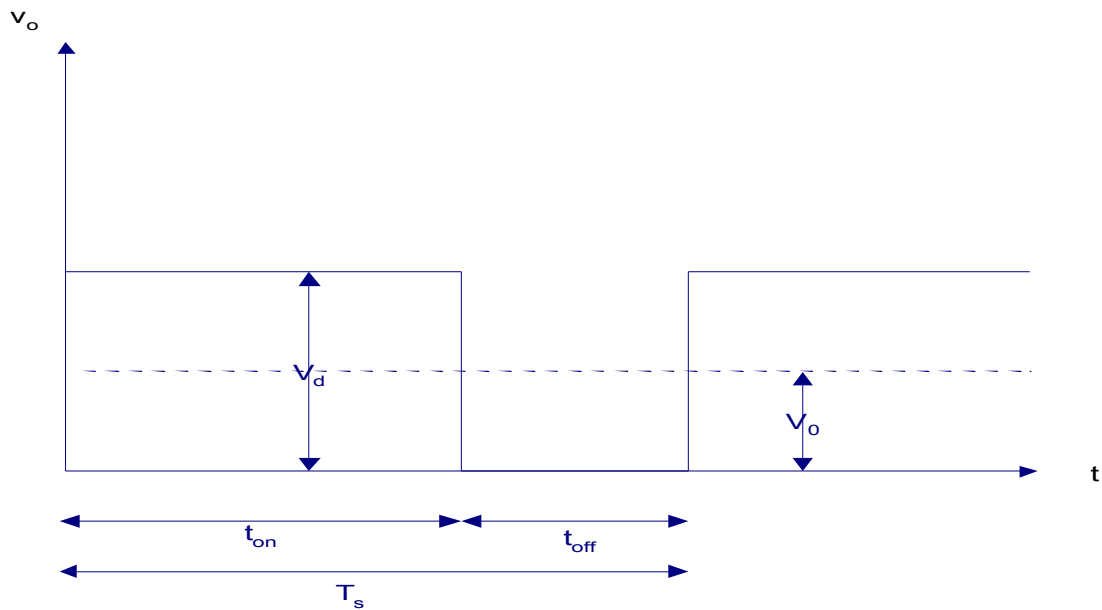
Ο τύπος του μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step-down ή buck converter) και όπως και το όνομα υπονοεί, παράγει χαμηλότερη μέση τιμή τάσης εξόδου από ότι η τάση εισόδου V_d .

Το κύκλωμα του σχήματος 26 αποτελεί ένα μετατροπέα step-down για ένα καθαρά ωμικό φορτίο. Θεωρώντας τον διακόπτη ιδανικό, τότε η κυματομορφή της

τάσης εξόδου φαίνεται στο σχήμα 27 σε σχέση με την κατάσταση του ημιαγωγικού διακόπτη S, όπου φαίνεται ότι όταν ο διακόπτης είναι on τότε η τάση εξόδου V_o είναι μέγιστη και όταν είναι κλειστός τότε η τάση εξόδου V_o είναι μηδέν.



Σχήμα 26. Μετατροπέας step-down.



Σχήμα 27. Κυματομορφή της τάσης εξόδου του dc-dc μετατροπέα.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση του duty cycle του διακόπτη:

$$V_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{(T_s)} v_0(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{(t_{on})} V_d dt + \int_{(t_{on})}^{(T_s)} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = DV_d \quad (54)$$

όμως το D δίνεται από την σχέση:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{v_{compare}}{V_{st}} \quad (55)$$

Αντικαθιστώντας το D στην σχέση (54) παράγεται η σχέση :

$$V_0 = \frac{V_d}{V_{st}} v_{compare} = k v_{compare} \quad (56)$$

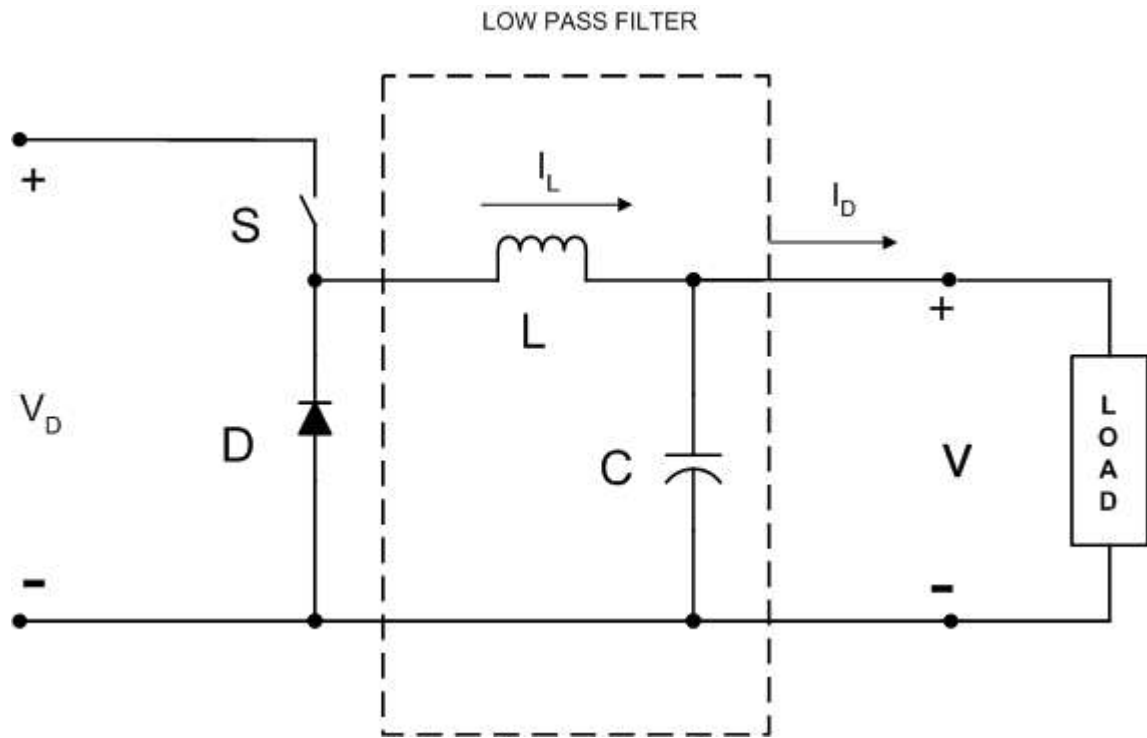
με

$$k = \frac{V_d}{V_{st}} = constant \quad (57)$$

Στις σχέσεις (55) – (57) V_{st} είναι η μέγιστη τιμή της τριγωνικής κυματομορφής.

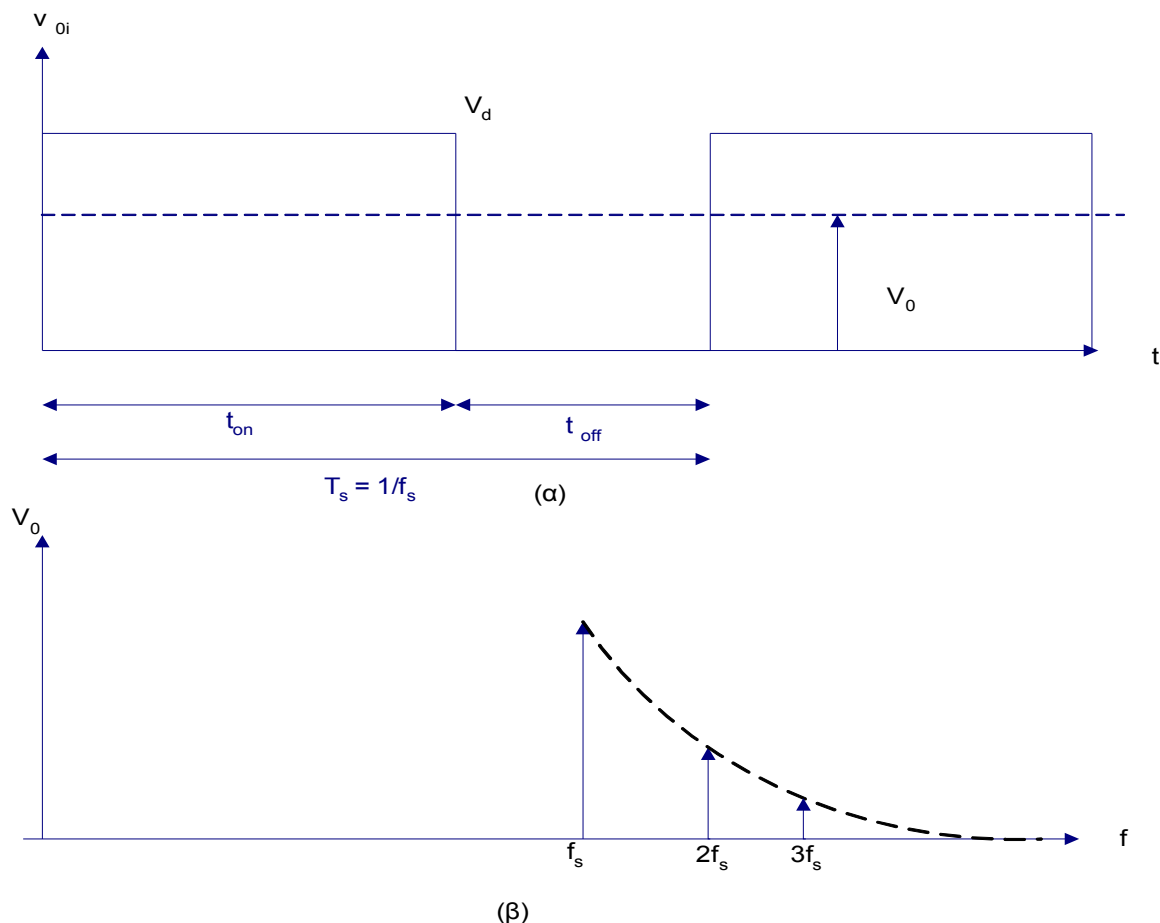
Μεταβάλλοντας το duty ratio t_{on} / T_s του διακόπτη, το V_0 μπορεί να ελεγχθεί. Μια ακόμη σημαντική παρατήρηση είναι ότι η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_0 μεταβάλλεται γραμμικά με την τάση ελέγχου όπως στην περίπτωση των γραμμικών ενισχυτών. Σε πραγματικές εφαρμογές, το προηγούμενο κύκλωμα έχει το μειονεκτήματα ότι η τάση εξόδου κυμαίνεται μεταξύ του μηδενός και του V_d , που δεν είναι αποδεκτό για τις πιο πολλές εφαρμογές.

Το πρόβλημα της διακύμανσης της τάσης εξόδου εξαλείφεται με τη χρήση ενός βαθυπερατού φίλτρου, αποτελούμενο από ένα πηνίο και ένα πυκνωτή όπως φαίνεται στο σχήμα 28.



Σχήμα 28. Μετατροπέας dc-dc με την χρήση διόδου και βαθυπερατού φίλτρου.

Στο σχήμα 29 στο (α) φαίνεται η κυματομορφή της εισόδου του φίλτρου, v_{oi} , ενώ στο σχήμα 29(β) φαίνεται το φάσμα της v_{oi} που αποτελείται από μία dc συνιστώσα, V_0 , και αρμονικές στη συχνότητα f_s και τα πολλαπλάσια της.



Σχήμα 29. (α) Κυματομορφή εισόδου στο βαθυπερατό φίλτρο και (β) το φάσμα της V_{Oi} .

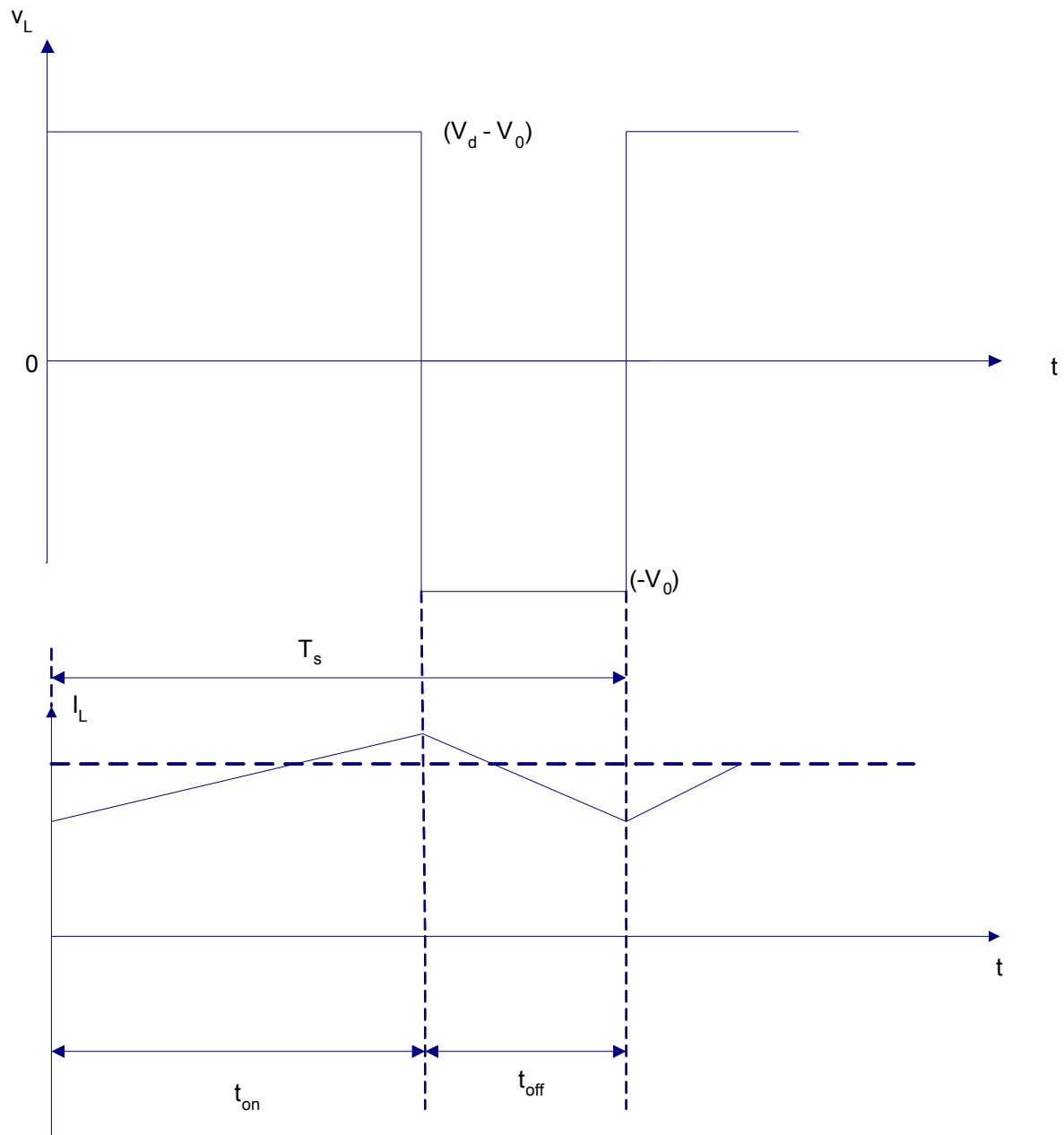
Κατά το διάστημα που ο διακόπτης είναι ανοιχτός (on), η διόδος πολώνεται ανάστροφα και η είσοδος παρέχει ενέργεια στο φορτίο καθώς και στο πηνίο. Κατά την διάρκεια που ο διακόπτης είναι κλειστός (off), το ρεύμα του πηνίου ρέει διαμέσου της διόδου, προσφέροντας την αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου στο φορτίο.

Στην ανάλυση μόνιμης κατάστασης που παρουσιάστηκε εδώ, ο πυκνωτής του φίλτρου θεωρείται ότι έχει μεγάλη χωρητικότητα, αφού συνήθως στις εφαρμογές απαιτείται μια σχεδόν σταθερή στιγμιαία τάση $v_o(t) = V_0$.

Από το κύκλωμα του σχήματος 28 παρατηρείται ότι στον step-down μετατροπέα, η μέση τιμή του ρεύματος είναι ίση με τη μέση τιμή του ρεύματος I_0 στην έξοδο, αφού η μέση τιμή του ρεύματος του πυκνωτή στην μόνιμη κατάσταση είναι μηδέν.

Ο μετατροπέας που υλοποιήθηκε λειτουργεί σε continuous-conduction mode δηλαδή το ρεύμα του πηνίου ρέει συνέχεια ($i_L(t) > 0$). Στο σχήμα 30 φαίνονται οι κυματομορφές για τον συγκεκριμένο τρόπο λειτουργίας. Όταν ο διακόπτης είναι on για μια χρονική διάρκεια t_{on} , ο διακόπτης άγει το ρεύμα πηνίου και η διόδος είναι

πολωμένη ανάστροφα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αναπτύσσεται τάση $v_L = V_d - V_0$ στα άκρα του πηνίου.



Σχήμα 30. Κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στο πηνίο.

Η τάση αυτή προκαλεί αύξηση στο ρεύμα του πηνίου. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας στο πηνίο, το ρεύμα του πηνίου συνεχίζει να ρέει μέσω της διόδου.

Η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς αγωγής δίνεται από την σχέση (58):

$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{Lpeak} = \frac{t_{on}}{2} L (V_d - V_0) = \frac{DT_s}{2} L (V_d - V_0) = I_0 B \quad (58)$$

Η τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου θα πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε το ρεύμα να ισχύει η παραπάνω σχέση για την ελάχιστη τιμή του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα.

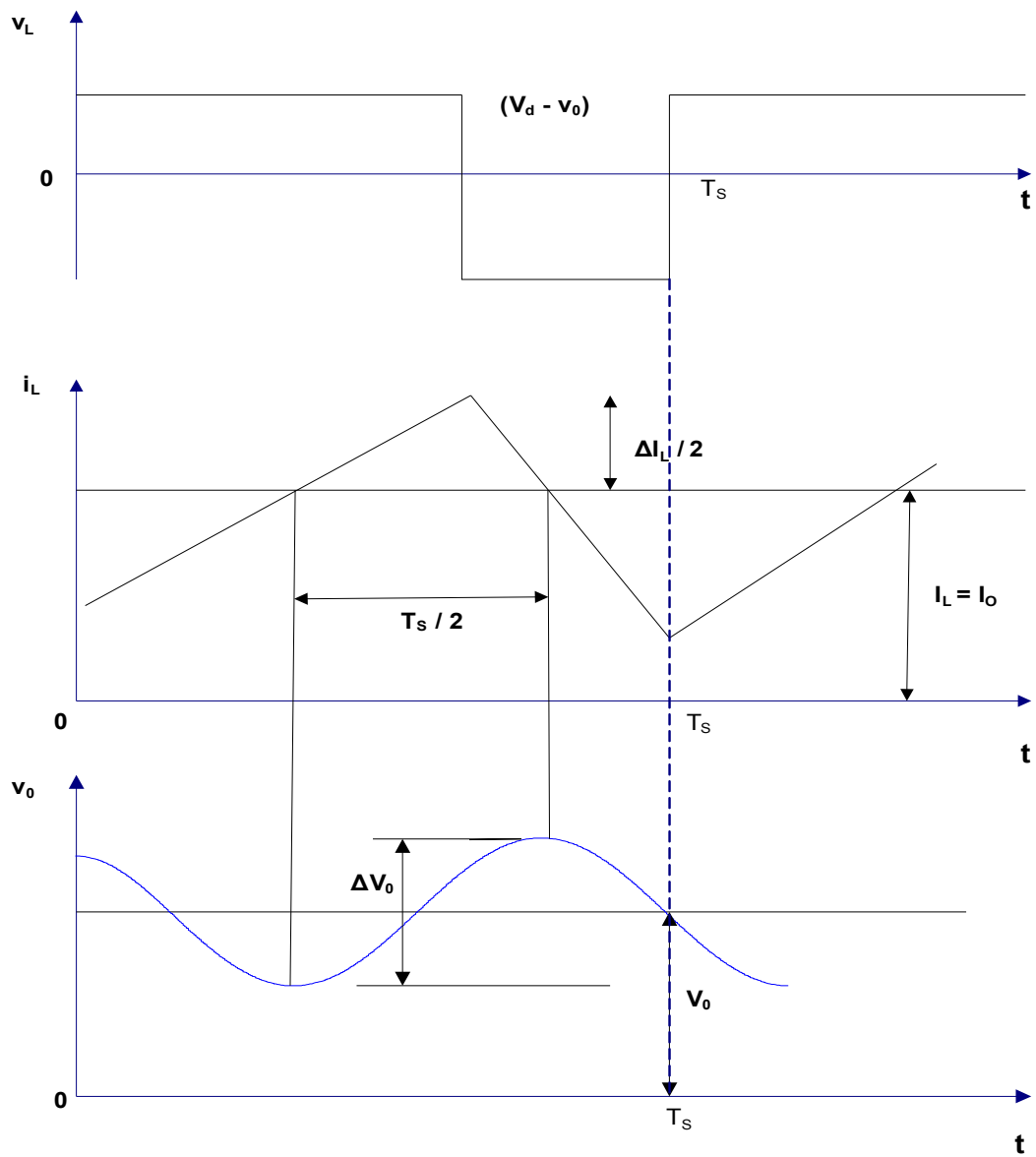
Η συχνότητα της εναλλαγής του μετατροπέα θα πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη από την συχνότητα του βαθυπερατού φίλτρου:

$$f_s \gg f_{filter} = \frac{1}{(2\pi\sqrt{LC})} \quad (59)$$

Όμως δεν μπορεί να αυξηθεί πολύ, ώστε να περιοριστούν οι απώλειες μεταγωγής (switching) του ημιαγωγικού διακόπτη και οι απώλειες στο μαγνητικό υλικό του πυρήνα του πηνίου. Στο σύστημα που υλοποιήθηκε η f_s επιλέχθηκε να είναι 46.8 kHz. Στο σχήμα 31 φαίνεται η κυματομορφή της κυμάτωσης της τάσης εξόδου.

Ο συντελεστής κυμάτωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{1}{8} T_s^2 \frac{(1-D)}{LC} = \frac{\pi^2}{2} (1-D) \left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2 \quad (60)$$



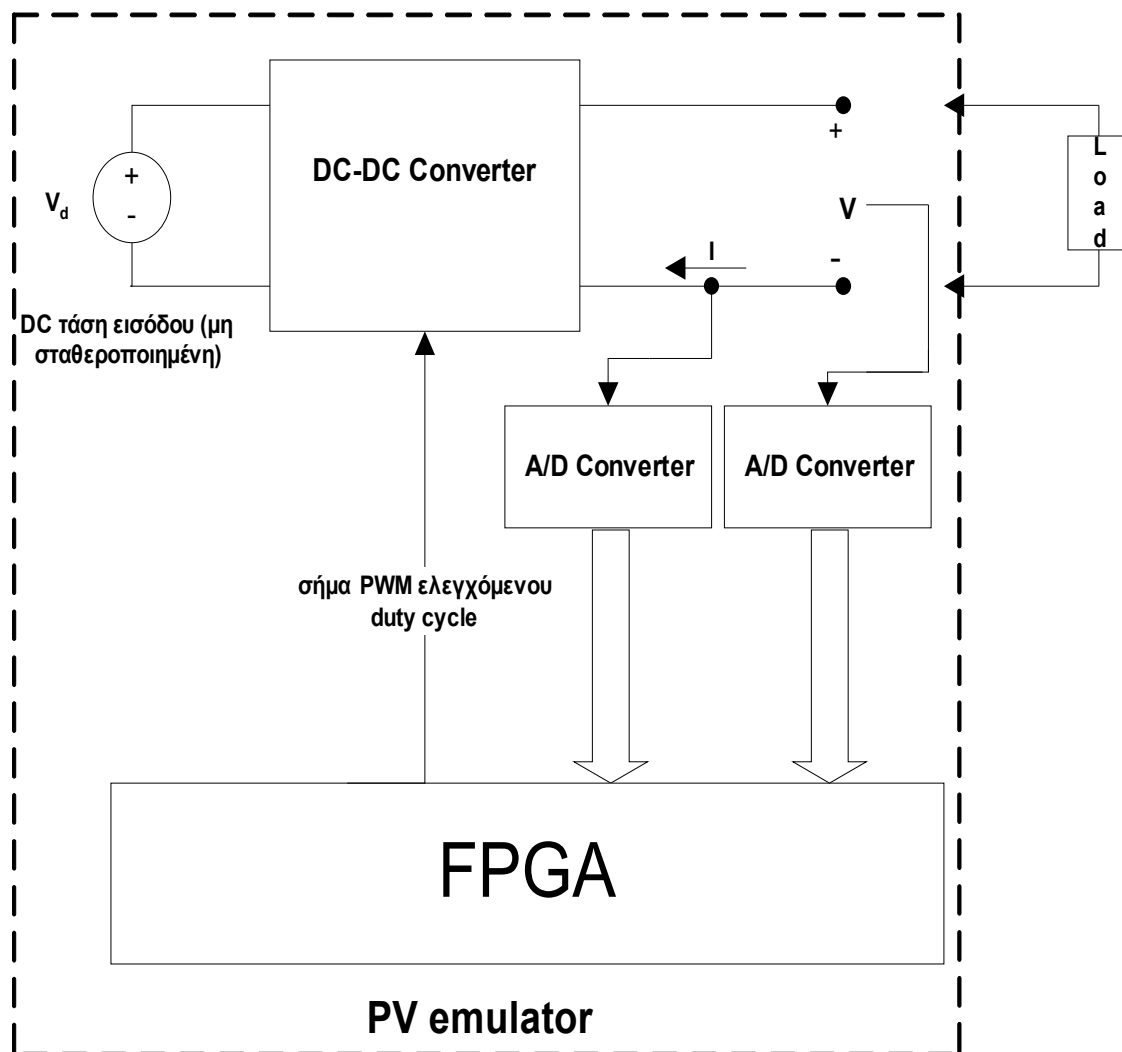
Σχήμα 31. Διάγραμμα κυμάτωσης πυκνωτή.

Η χωρητικότητα του πυκνωτή του φίλτρου εξόδου επιλέγεται έτσι ώστε η τιμή του συντελεστή κυμάτωσης να είναι μικρότερη από 1%.

6. Υλοποίηση του εξομοιωτή φωτοβολταϊκών συστημάτων

6.1 Ανάλυση της ανάπτυξης του κώδικα σε VHDL

Το γενικό διάγραμμα του εξομοιωτή που αναπτύχθηκε φαίνεται στο σχήμα 32.



Σχήμα 32. Γενικό διάγραμμα του εξομοιωτή φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Η FPGA διαβάζει τις τιμές τάσης και ρεύματος εξόδου και μετά από μία διαδικασία που θα αναλυθεί παρακάτω παράγει το σήμα ελέγχου PWM.

Οι τιμές της τάσης και του ρεύματος διαβάζονται από την FPGA μέσω δύο 8-bit μετατροπών A/D. Η δειγματοληψία γίνεται στην συχνότητα των 11,7kHz. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι υποδιαίρεση του ρολογιού της FPGA και δίνεται από την σχέση:

$$f_{sample} = \frac{f_{clock}}{2^n} \quad (61)$$

όπου n ο αριθμός των bit ενός μετρητή.

Για να παραχθεί η συχνότητα αυτή έχει υλοποιηθεί ένας free-running μετρητής και ανάλογα με πιο bit του μετρητή έχει ως έξοδο η συνάρτηση που υλοποιεί τον μετρητή, αλλάζει και η συχνότητα. Για παράδειγμα, αν θεωρηθεί ότι στην έξοδο είναι το όγδοο bit ενός 10-bit μετρητή τότε η συχνότητα θα είναι:

$$f_{sample} = \frac{f_{clock}}{2^8} \quad (62)$$

όπου f_{clock} η συχνότητα ρολογιού της FPGA.

Παράλληλα η FPGA διαβάζει τις τιμές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας και τις λαμβάνει υπόψιν στον υπολογισμό για το PWM όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Αναλυτικότερα από το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο MATLAB οι τιμές της τάσης και του ρεύματος που παράγουν την ιδανική χαρακτηριστική για το φωτοβολταϊκό στοιχείο κβαντίζονται έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε τιμές από 0 έως 255 δηλαδή μετατρέπονται σε ακεραίους 8-bit με τιμές από 00000000 έως 11111111. Στη συνέχεια τα ζευγάρια των τιμών της τάσης και του ρεύματος φορτώνονται σε ένα Look-up-table (LUT) στην FPGA. Ο κβαντισμός υλοποιείται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_{I8m} = V_{id} * K_V \quad (63)$$

$$I_{I8m} = I_{id} * K_I \quad (64)$$

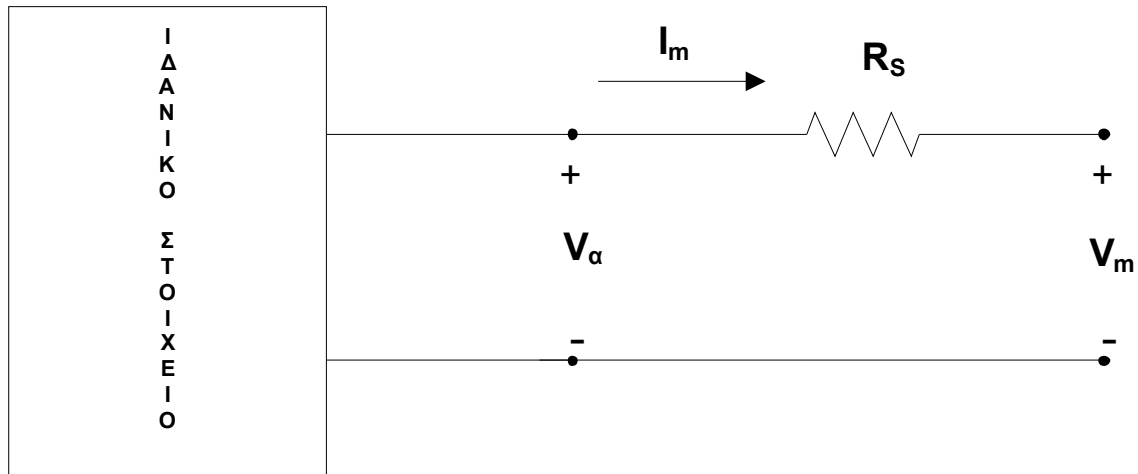
$$K_I = \frac{255}{(3 * E_s)} \quad (65)$$

$$K_V = \frac{255 * 7.4 * 10^{-4} * E_s}{(V_{oc} - 0.1 * T_c)} \quad (66)$$

όπου με V_{I8m} και I_{I8m} είναι ακέραιοι 8-bit που αντιστοιχούν στις τιμές της ιδανικής χαρακτηριστικής που θα εισαχθούν στην μνήμη, K_V και K_I οι συντελεστές κβαντισμού, V_{id} και I_{id} οι τιμές της τάσης και του ρεύματος της ιδανικής χαρακτηριστικής του φωτοβολταϊκού στοιχείου, E_s είναι 10-bit ακέραιος που αντιστοιχεί στην τιμή της ακτινοβολίας που παράγει ο αντίστοιχος μετατροπέας A/D, T_c είναι 8 bit ακέραιος που αντιστοιχεί στην θερμοκρασία του στοιχείου που

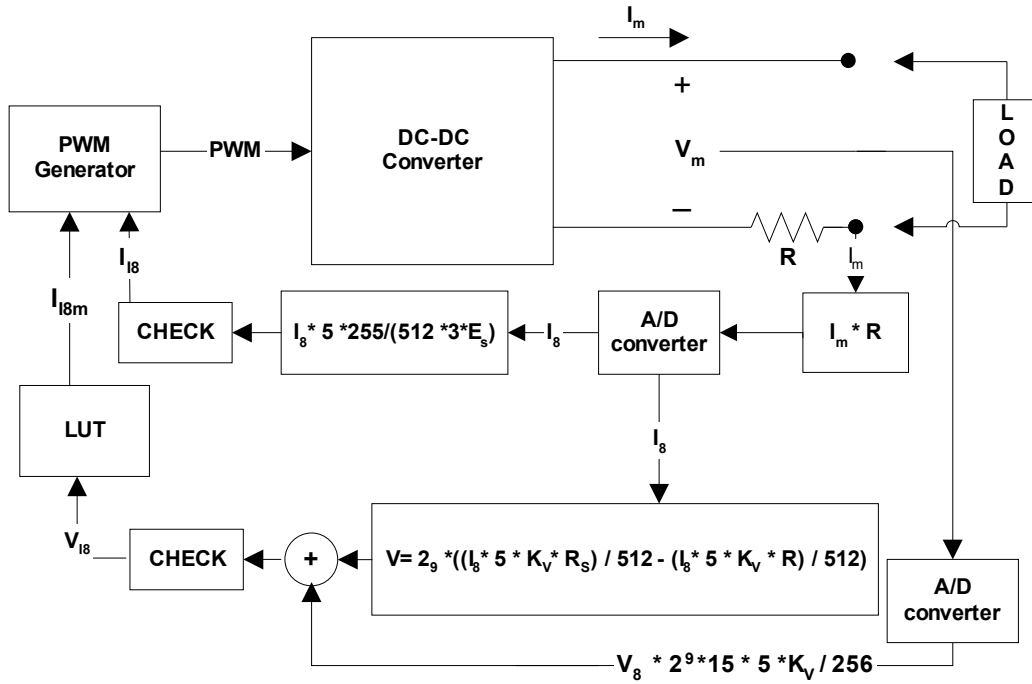
παράγει ο αντίστοιχος μετατροπέας A/D και V_{OC} είναι 14 bit ακέραιος που αντιστοιχεί στην τάση ανοιχτοκύκλωσης του στοιχείου.

Οι τιμές όμως, όπως φαίνεται και από το σχήμα 33, που μετρώνται από τα αισθητήρια του κυκλώματος αντιστοιχούν σε τιμές τάσης και ρεύματος του μη ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου, ενώ η χαρακτηριστική στο LUT αντιστοιχεί στο ιδανικό στοιχείο.



Σχήμα 33. Κύκλωμα αναπαράστασης για την αντιστοίχιση της τιμής της τάσης εξόδου του εξομοιωτή με αυτή του ιδανικού στοιχείου.

Συνεπώς στην τιμή της τάσης που μετρίεται προστίθεται η πτώση τάσης λόγω της R_s δηλαδή η τάση του ιδανικού φωτοβολταϊκού είναι $V_a = V_m + I_m R_s - I_m R$, όπου V_m εξόδου του εξομοιωτή, I_m το ρεύμα εξόδου του εξομοιωτή, R_s η τιμή της αντίστασης κατά σειρά που έχει υπολογιστεί από το μαθηματικό μοντέλο και R η αντίσταση του αισθητηρίου του ρεύματος:



Σχήμα 34. Το γενικό διάγραμμα υπολογισμού του *duty cycle* του σήματος ελέγχου *PWM*.

Επιπρόσθετα όπως φαίνεται και στο σχήμα 34 δεν επηρεάζει μόνο η R_s την τιμή της τάσης που μετράται αλλά και η αντίσταση, R , του αισθητηρίου που μετράει το ρεύμα I_m . Συνεπώς στην τάση που μετρείται όχι μόνο προστίθεται η πτώση τάσης $I_m * R_s$ αλλά αφαιρείται και η τάση $I_m * R$ που οφείλεται στην αντίσταση R του αισθητηρίου που μετράει το ρεύμα I_m . Τελικά η τάση δίνεται από την παρακάτω σχέση όπου.

$$V_a = V_m + I_m * R_s - I_m * R \quad (67)$$

με V_m και I_m οι τιμές που μετριοούνται της τάσης και του ρεύματος που μετρώνται μέσω των αισθητηρίων και V_a η αναλογική τιμή του αποτελέσματος της σχέσης (67).

Οι σχέσεις που ισχύουν για την μετατροπή του A/D είναι οι παρακάτω:

$$V_8 = \frac{V_m * 256}{(G_v * 5)} \quad (68)$$

$$I_8 = \frac{I_m * G_I * 256}{5} \quad (69)$$

όπου V_8 και I_8 οι ακέραιες 8-bit τιμές που παράγονται από τους μετατροπείς A/D, G_V είναι το κέρδος του διαιρέτη τάσης για το αισθητήριο μέτρησης της τάσης και G_I είναι η τιμή της αντίστασης R που αποτελεί το αισθητήριο μέτρησης του ρεύματος και I_m και V_m οι αναλογικές τιμές του ρεύματος και της τάσης που μετρώνται από το κύκλωμα. Στον εξομοιωτή που υλοποιήθηκε οι τιμές των αισθητηρίων είναι $G_V = 12$ και $G_I = 2$ αντίστοιχα.

Από τις σχέσεις (65), (66), (68) και (69) εξάγονται οι σχέσεις:

$$V_m = \frac{V_8 * 12 * 5 * K_V}{256} \quad (70)$$

$$I_m = \frac{I_8 * 5 * K_I}{512} \quad (71)$$

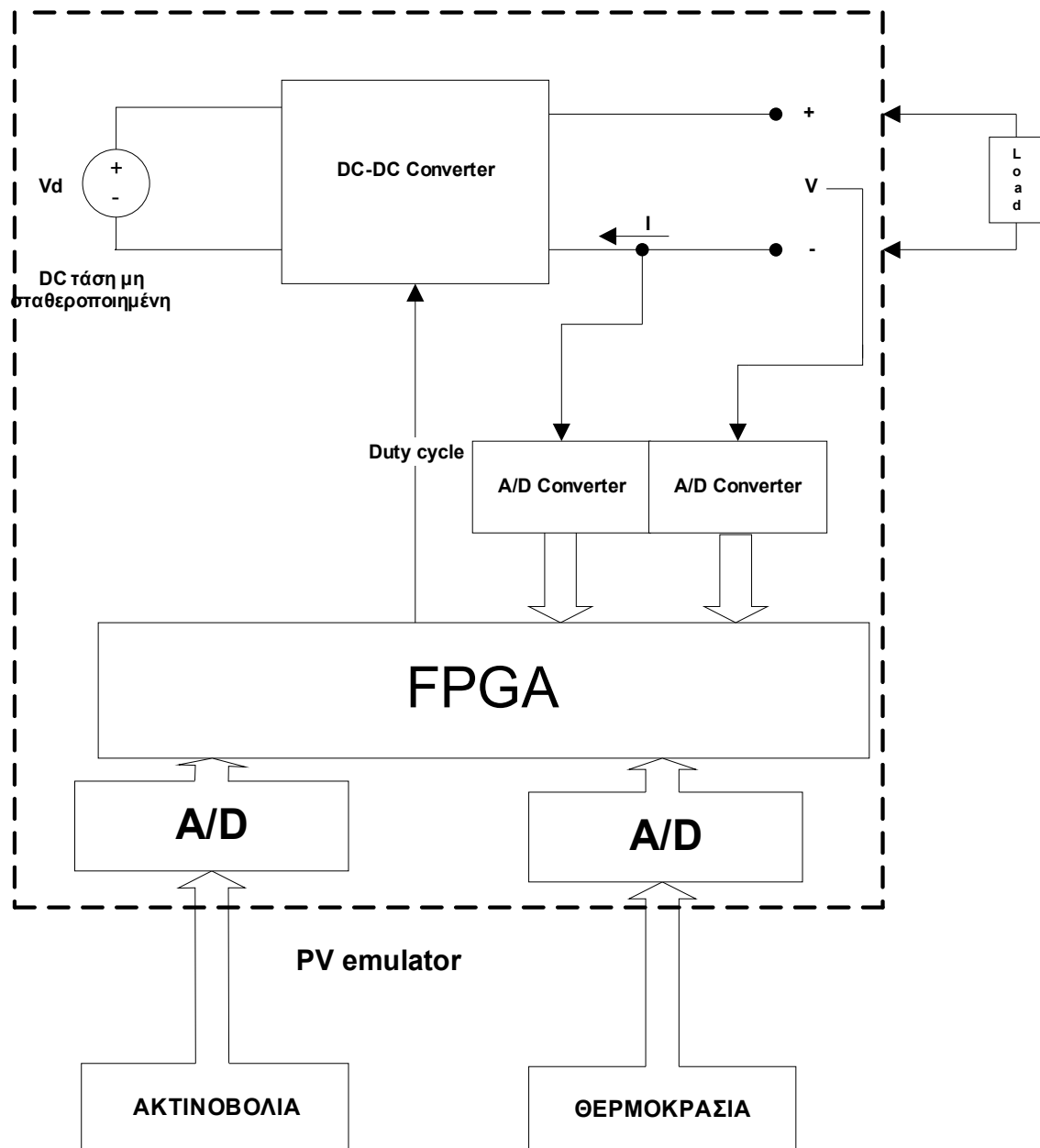
Στους συντελεστές κβαντισμού K_I και K_V λαμβάνεται υπόψιν και η θερμοκρασία του στοιχείου αλλά και η ακτινοβολία.

Συνεπώς με αντικατάσταση στην σχέση (67) το αποτέλεσμα της σχέσης από αναλογικό μετατρέπεται σε ένα αριθμό ακέραιο 35-bit, V_I , που αποτελεί την αναγωγή της τιμής της τάσης που μετρίεται σε αυτήν της μνήμης που περιέχει στο LUT και δίνεται από την σχέση:

$$V_I = \frac{K_V * 15 * 5 * V_8}{256} + \frac{K_V * I_8 * 5 * R_S}{512} - \frac{K_V * 5 * R * I_8}{512} \quad (72)$$

Το ρεύμα που εισάγεται στην συνάρτηση παραγωγής του σήματος PWM δίνεται από την σχέση:

$$I_{I8} = \frac{I_8 * 5 * 255}{(512 * 3 * E_S)} \quad (73)$$



Σχήμα 35. Γενικό διάγραμμα εξομοιωτή με παραμέτρους ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Η FPGA διαβάζει τις τιμές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 35 και έτσι εξομοιώνεται η χαρακτηριστική της φωτοβολταϊκής συστοιχίας που είναι στο LUT για κάθε θερμοκρασία και ακτινοβολία. Αυτό γίνεται εφικτό διότι είναι γνωστό ότι αύξηση ή η μείωση της ακτινοβολίας επηρεάζει την τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ενώ της θερμοκρασίας επηρεάζει την τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Συνεπώς αφού οι αλλαγές στην ακτινοβολία και στην θερμοκρασία εκφράζονται σαν μετατοπίσεις στους άξονες και δεν επηρεάζουν την κλίση της χαρακτηριστικής (η κλίση εξαρτάται από την R_s που θεωρείται σταθερή) δεν χρειάζεται να αλλάζουν οι τιμές της τάσης και του ρεύματος που είναι αποθηκευμένες στην μνήμη ανεξάρτητα για ποιες συνθήκες έχουν υπολογιστεί.

Απλά οι τιμές της τάσης και του ρεύματος που μετρώνται από τα αισθητήρια πρέπει να αναχθούν στις τιμές που αντιστοιχούν στην ακτινοβολία και στην θερμοκρασία που μετρήθηκαν.

Επειδή το μοντέλο που υλοποιήθηκε χρησιμοποιεί ακεραίους και η τιμή της R_s είναι δεκαδικός αριθμός αλλά και οι διάφοροι συντελεστές είναι και αυτοί δεκαδικής μορφής πρέπει να μετατραπούν όλοι οι αριθμοί σε ακέραια μορφή με τέτοιον τρόπο έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ακρίβεια στις πράξεις ενώ παράλληλα η πολυπλοκότητα της σχεδίασης να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα τόσο για την σωστή διαχείριση των πόρων όσο και για να είναι λειτουργική η σχεδίαση ακόμα και σε μικρές FPGA όπως η 4010XL της Xilinx που χρησιμοποιήθηκε.

Αυτό που τελικά προέκυψε από την μαθηματική ανάλυση ήταν ότι οι τιμές της τάσης και του ρεύματος που μετρήθηκαν αρκεί να πολλαπλασιαστούν με κάποιους συντελεστές έτσι ώστε να έρθουν σε ακέραια μορφή. Πιο συγκεκριμένα για να γίνουν ακέραιοι στην συγκεκριμένη περίπτωση έπρεπε να πολλαπλασιαστούν με το 2^9 . Έτσι η σχέση 72 παίρνει την μορφή:

$$V_g = 2^9 * \left(\frac{K_V * 15 * 5 * V_8}{256} + \frac{K_V * I_8 * 5 * R_s}{512} - \frac{K_V * 5 * R * I_8}{512} \right) \quad (74)$$

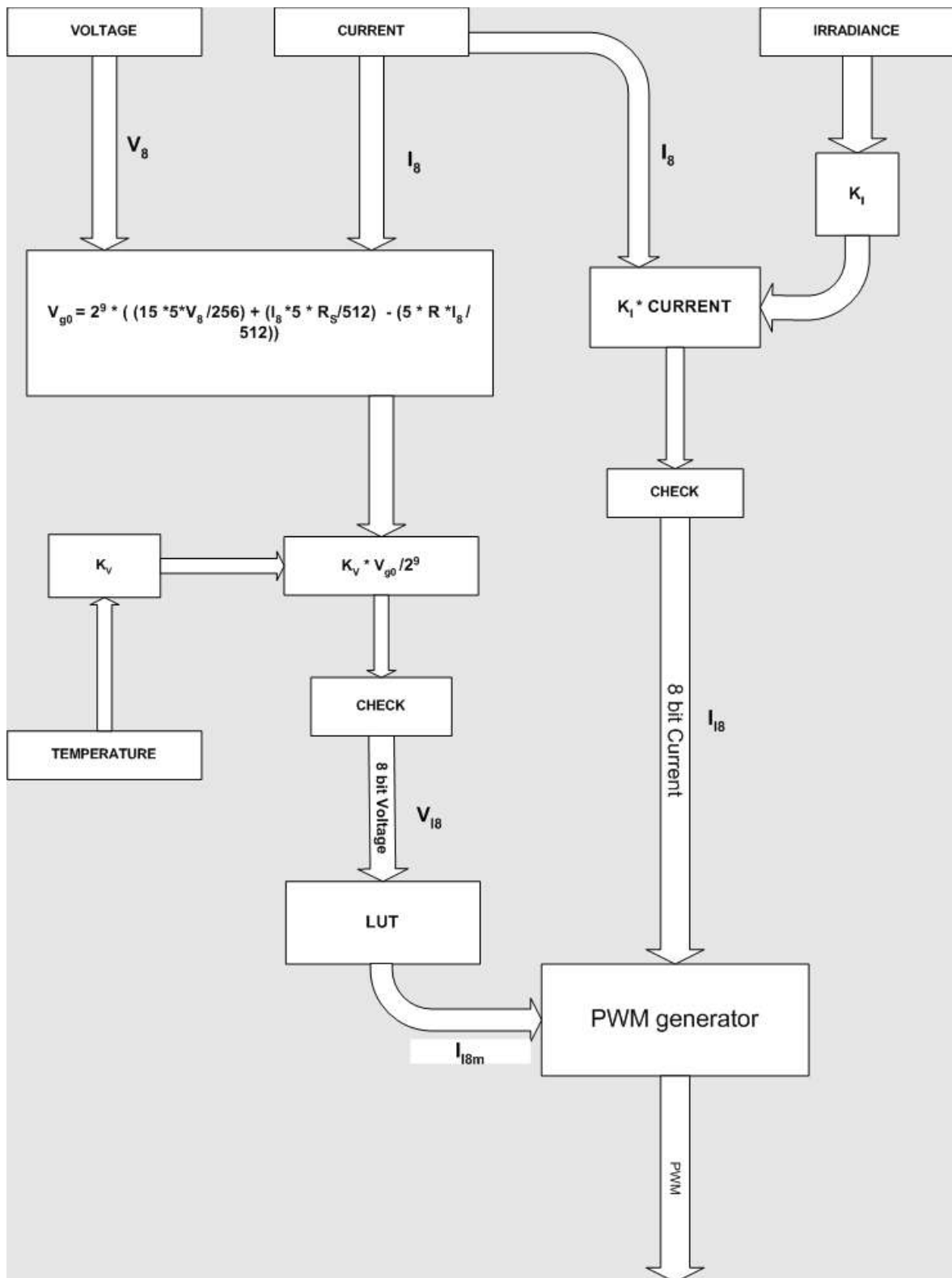
Η δύναμη του δύο επιλέχθηκε διότι απλοποιεί πολύ τις πράξεις του πολλαπλασιασμού και τις διαιρέσεις αφού ουσιαστικά υλοποιούνται με ένα shift δεξιά ή αριστερά αντίστοιχα.

Έτσι όπως φαίνεται και στο σχήμα 36 οι τιμές της τάσης, του ρεύματος, θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας εισάγονται στην FPGA. Στην συνέχεια υπολογίζονται οι όροι K_V και K_I καθώς και η σχέση:

$$V_{g0} = 2^9 * \left(\frac{15 * 5 * V_8}{256} + \frac{I_8 * 5 * R_s}{512} - \frac{5 * R * I_8}{512} \right) \quad (75)$$

όπου V_{g0} είναι 22 bit ακέραιος και αφού διαιρεθεί με το 2^9 πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το συντελεστή κβαντισμού K_V έτσι ώστε εισαχθεί στην συνάρτηση ελέγχου .

Στην συνέχεια υπολογίζονται οι όροι $V_{g0} * K_V / 2^9$ και $I_8 * K_I$ και μετά αφού ελεγχθούν από μία συνάρτηση που ονομάζεται check η τιμή της τάσης V_{I8} εισάγεται στο LUT και το ρεύμα I_{I8} στην συνάρτηση που θα παράγει το σήμα έλεγχου PWM.



Σχήμα 36. Συνοπτική περιγραφή του κώδικα που υλοποιήθηκε.

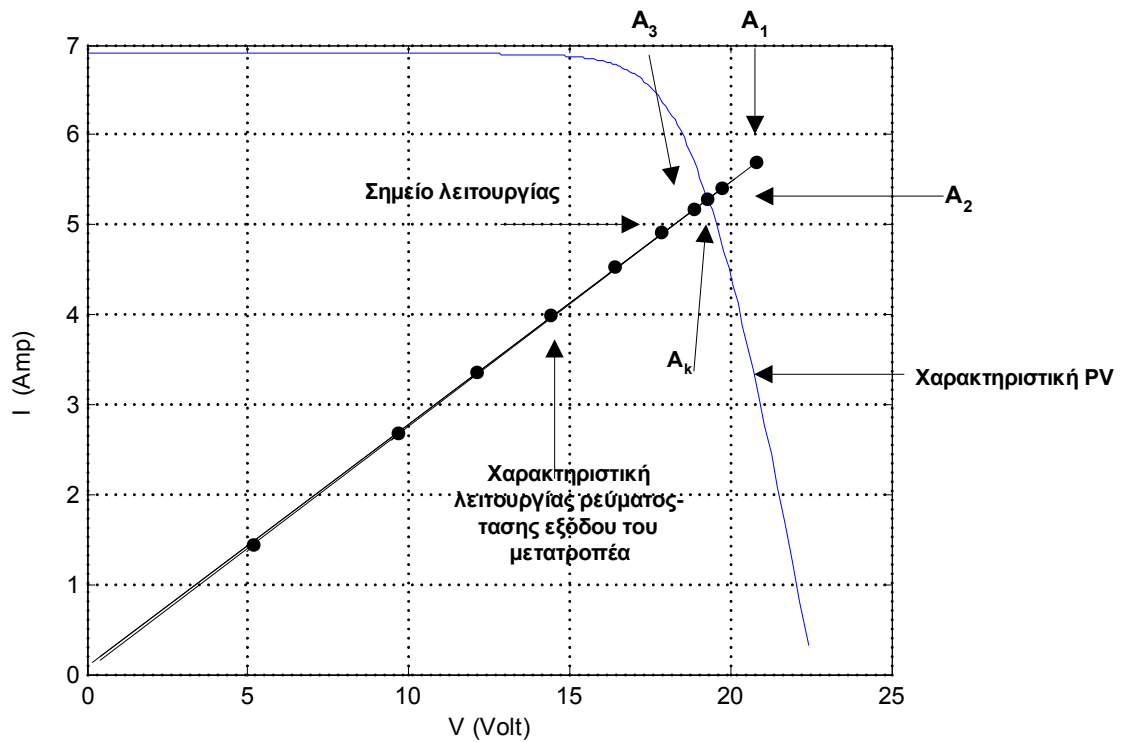
Όπως φαίνεται και από το σχήμα 36 οι τιμές της τάσης και του ρεύματος ύστερα από την μαθηματική επεξεργασία που έχουν υποστεί είναι αναμενόμενο το μέγεθος τους να υπερβαίνει τα 8-bit. Επιπρόσθετα και οι τιμές στο LUT αλλά και

η τιμή του PWM είναι 8-bit. Παράλληλα αν οι τιμές του ρεύματος ή της τάσης που μετράει η FPGA ύστερα από τις πράξεις χρειάζονται παραπάνω από 8-bit για να αναπαρασταθούν, αυτό σημαίνει ότι η αριθμητική τους τιμή υπερβαίνει την τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, αντίστοιχα. Συνεπώς οι τιμές αυτές είναι εκτός χαρακτηριστικής I-V. Για αυτό το λόγο υλοποιήθηκε η συνάρτηση που φαίνεται στο σχήμα 36 με το όνομα check. Η συγκεκριμένη συνάρτηση ελέγχει τα bit της τιμής της τάσης και του ρεύματος, που υπολογίζονται από το μοντέλο στην FPGA, από το ένατο και πάνω. Αν σε κάποια από αυτά τα bit βρει κάποιο “1”, αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός αυτός είναι μεγαλύτερος από 255 και άρα εκτός ορίων της χαρακτηριστικής I-V. Αφού είναι εκτός ορίων ο αριθμός που υπολογίστηκε, η συνάρτηση δίνει εντολή να εισαχθεί στο LUT για την τάση και στο PWM για το ρεύμα, αντίστοιχα, η τιμή ακέραια 255 ή δυαδική τιμή 11111111.

Η τιμή της τάσης που υπολογίστηκε σύμφωνα με το σχήμα 37 συγκρίνεται με τις τιμές της τάσης που υπάρχουν στο LUT, και αντιστοιχούν στις τιμές της χαρακτηριστικής καμπύλης για τη φωτοβολταϊκή συστοιχία που προσομοιώνεται. Μόλις βρεθεί η αντίστοιχη τιμή της τάσης, τότε η τιμή του ρεύματος που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη τιμή της τάσης εξάγεται από την μνήμη και εισάγεται στο κομμάτι του κώδικα που θα παράγει το PWM.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω οι δύο τιμές του ρεύματος, αυτή που μετρήθηκε από το αισθητήριο και αυτή που εξάχθηκε από τους υπολογισμούς και την μνήμη, εισάγονται σε μια συνάρτηση που θα έχει ως έξοδο το duty cycle του σήματος PWM που θα σταλεί στο κομμάτι ισχύος του κυκλώματος για να επιτευχθεί η τελική σύγκλιση στις τιμές της τάσης και ρεύματος που αντιστοιχούν στην τιμή του αντίστοιχου φορτίου που έχει εφαρμοστεί στο κύκλωμα.

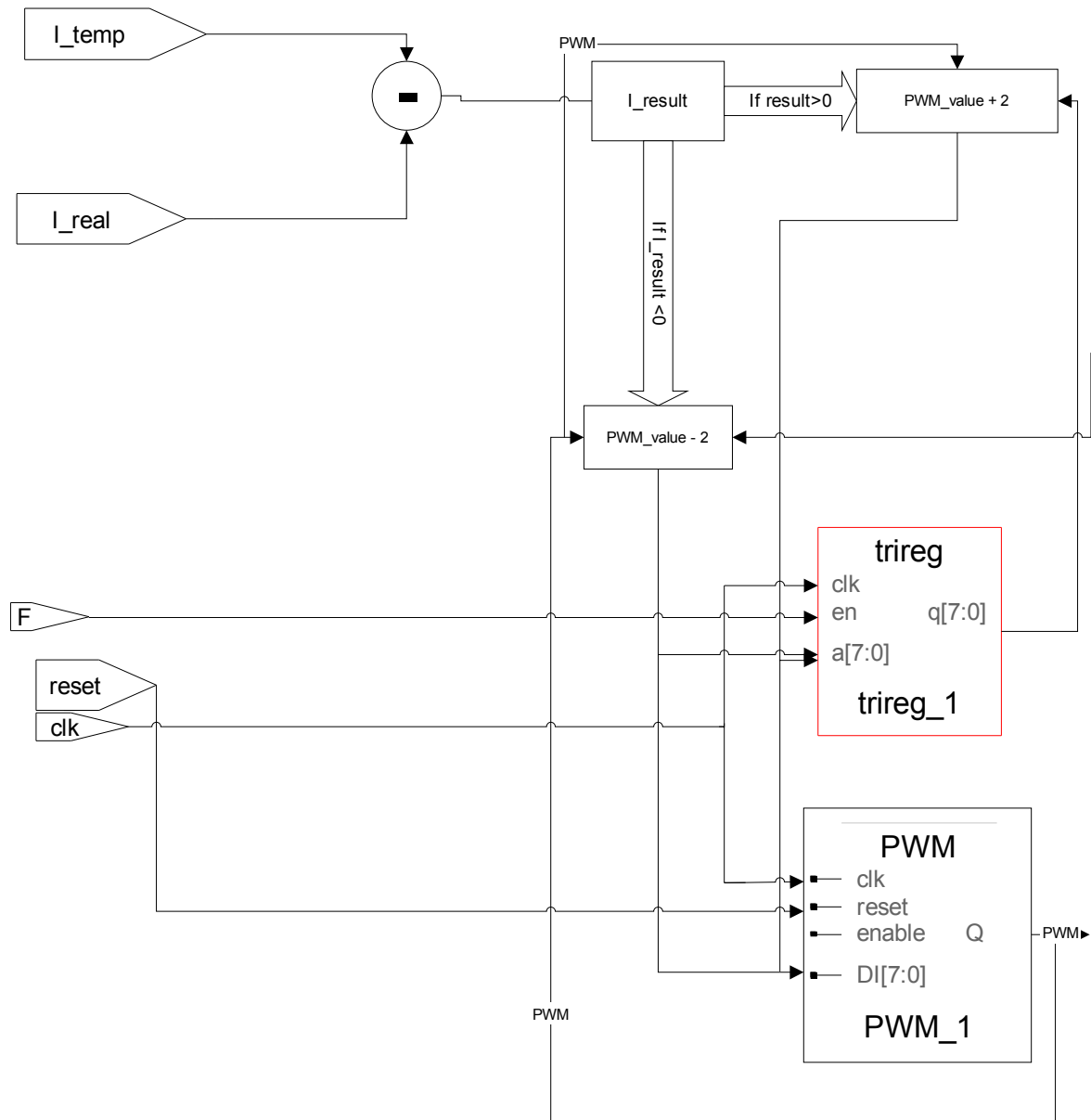
Η αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται το έλεγχος φαίνεται στο σχήμα 37. Η χαρακτηριστική είναι μιας τυχαίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Έστω ότι το σημείο A_1 που μέτρησε η FPGA είναι εκτός χαρακτηριστικής τότε το εύρος του παλμού μειώνεται έτσι ώστε να μειωθεί η τάση στην έξοδο. Το σημείο που θα μετρηθεί μετά, A_2 , θα είναι πιο κοντά στην χαρακτηριστική και κάποια στιγμή το σημείο θα μπει εντός ορίων χαρακτηριστικής αλλά όχι πάνω σε αυτήν (π.χ. το A_3). Τότε θα αυξηθεί το duty cycle του PWM και η έξοδος του κυκλώματος τελικά θα συγκλίνει πάνω στην χαρακτηριστική στο σημείο A_k .



Σχήμα 37. Διάγραμμα για τον τρόπο σύγκλισης του μετατροπέα με την χρήση σήματος ελέγχου PWM .

Στην συνάρτηση για την παραγωγή του PWM, όπως φαίνεται στο σχήμα 38 υπολογίζεται η διαφορά του ρεύματος που μετρήθηκε από το ρεύμα που θα έπρεπε να είχε σαν έξοδο το κύκλωμα. Αν η διαφορά τους είναι θετική τότε η προηγούμενη τιμή του PWM αυξάνεται κατά δύο στην περίπτωση που η διαφορά τους είναι αρνητική ή ίση με το μηδέν τότε το προηγούμενο PWM μειώνεται κατά δύο. Όπως φαίνεται από το σχήμα 39 η σχεδίαση έχει αναδρομικό χαρακτήρα μιας και χρειάζεται η προηγούμενη τιμή του PWM. Αυτό γίνεται εφικτό με την υλοποίηση ενός καταχωρητή ο οποίος κρατάει την προηγούμενη τιμή του PWM και την "απελευθερώνει" κάθε φορά που διαβάζει το σύστημα τις καινούργιες τιμές από τους μετατροπείς A/D.

Στην συνέχεια η καινούργια τιμή του PWM εισάγεται σε ένα free-running μετρητή και συγκρίνεται με την τιμή του μετρητή. Μόλις οι δύο τιμές είναι ίδιες τότε η είσοδος R ενός RS-flipflop γίνεται ένα αλλιώς είναι μηδέν και αντίστοιχα όταν ο μετρητής υπερχειλίζει τότε το Set του RS-flipflop γίνεται ένα αλλιώς είναι μηδέν όπως φαίνεται και στο σχήμα 38.



Σχήμα 38. Γενικό διάγραμμα για την λειτουργία της συνάρτησης παραγωγής του PWM

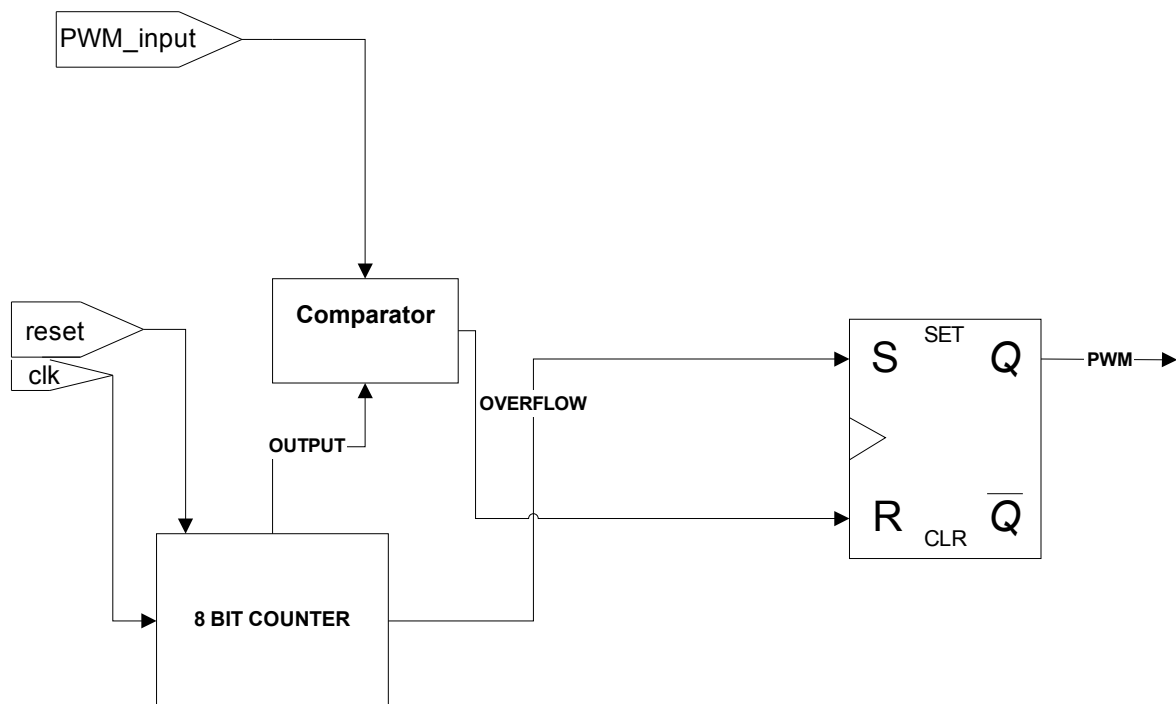
Έτσι η έξοδος του συστήματος είναι μια παλμοσειρά στην οποία μεταβάλλεται το εύρος του κάθε παλμού και άρα παράγεται ένα σήμα PWM με το οποίο γίνεται εφικτός ο έλεγχος του κυκλώματος. Η συχνότητα λειτουργίας του PWM, f_s , είναι εξαρτημένη από την συχνότητα ρολογιού της FPGA και δίνεται από την σχέση:

$$f_s = \frac{f_{clock}}{2^n} \quad (76)$$

όπου $n=8$ είναι ο αριθμός των bit της τιμής του duty cycle του σήματος PWM

Από τις σχέσεις (62) και (76) φαίνεται το πως εξαρτώνται οι συχνότητες δειγματοληψίας και του PWM από την FPGA. Τα σήματα αυτά αποτελούν

υποδιαίρεση του ρολογιού της. Παράλληλα ο register που έχει υλοποιηθεί για την αναδρομή, όπως αναφέρθηκε, δίνει τα δεδομένα στην θετική ακμή της συχνότητας δειγματοληψίας ενώ η καινούργια τιμή του PWM δίνεται κάθε θετική ακμή του PWM.

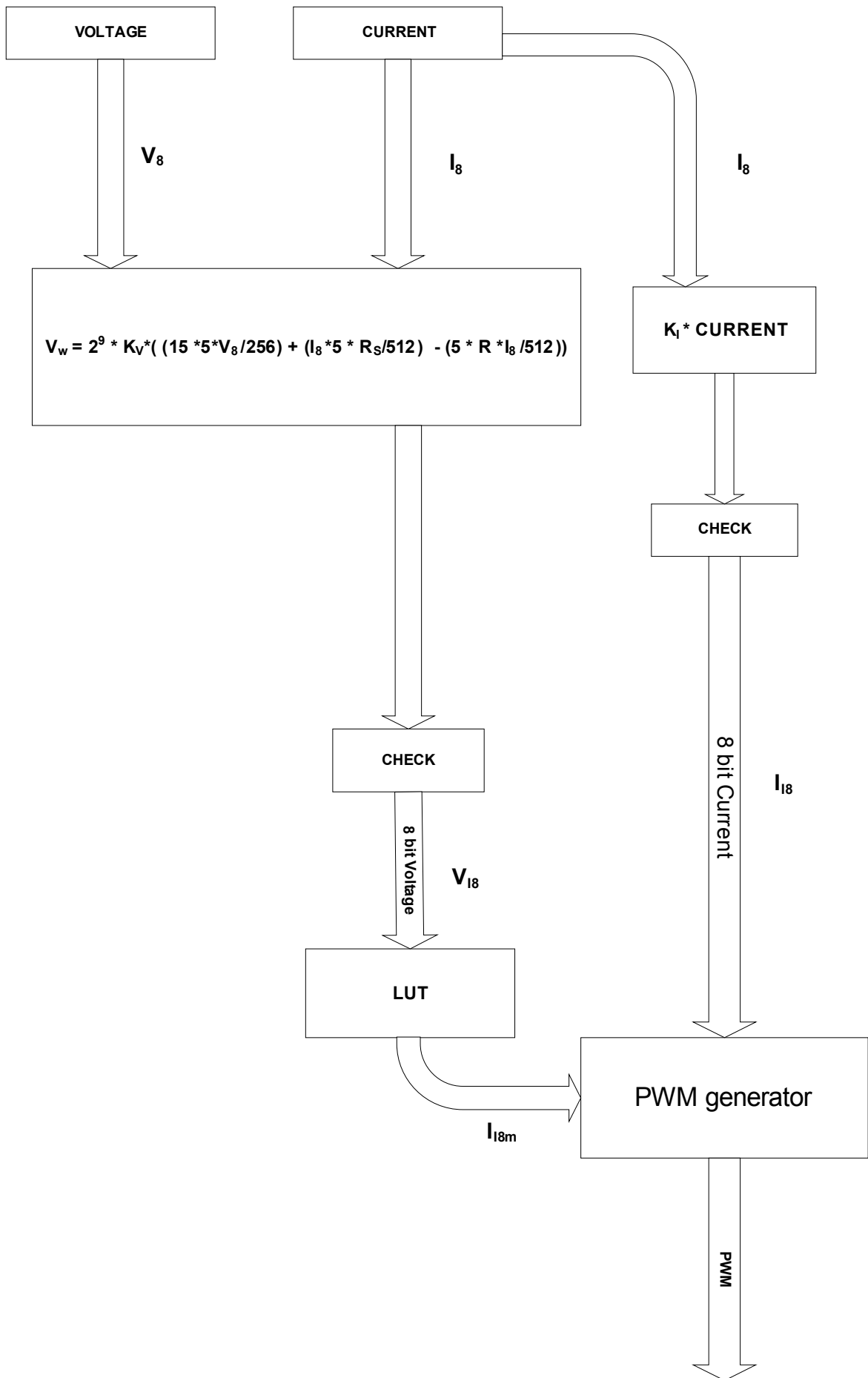


Σχήμα 39. Γενικό διάγραμμα της συνάρτησης παραγωγής του PWM.

Το διάγραμμα για τη λειτουργία του κώδικα για τον εξομοιωτή φαίνεται στο σχήμα 40 όπου φαίνονται αναλυτικά όλες οι πράξεις που γίνονται στην FPGA μέχρι να παραχθεί το PWM.

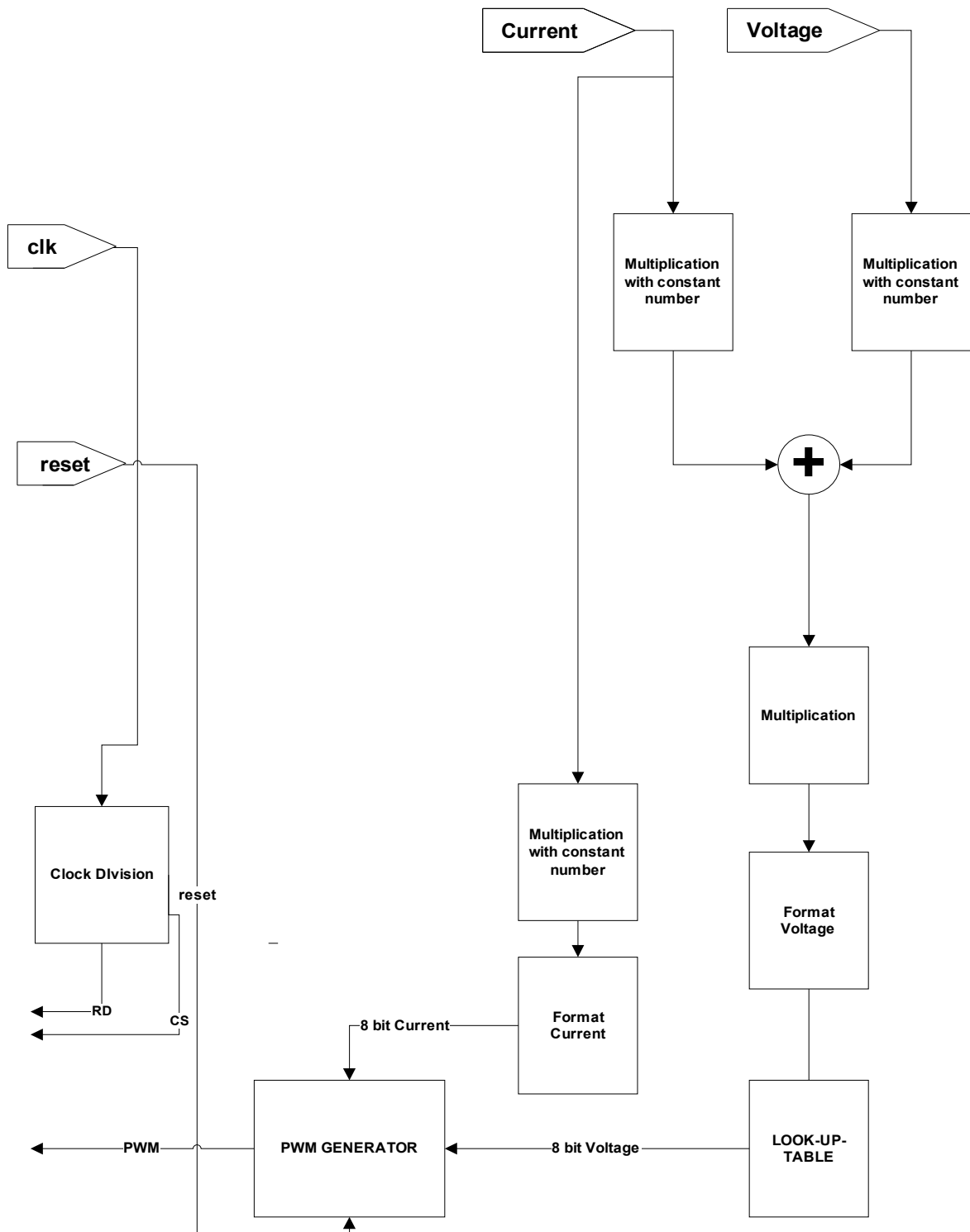
χωρητικότητα του είναι πολύ περιορισμένη (400 CLB) αφού είναι σχετικά παλαιάς τεχνολογίας.

Ο κώδικας που τελικά υλοποιήθηκε έτσι ώστε να χωρέσει στην 4010XL δεν είχε σαν παραμέτρους την ακτινοβολία και την θερμοκρασία και συνεπώς στο LUT κάθε φορά υπάρχει το μοντέλο του φωτοβολταϊκού για συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Για να εξεταστεί σε άλλες συνθήκες περιβάλλοντος το συγκεκριμένο μοντέλο απλά θα πρέπει να φορτωθούν στην μνήμη τα ζεύγη της τάσης και του ρεύματος της χαρακτηριστικής που αντιστοιχούν σε αυτές. Πιο αναλυτικά, μετρώνται η τάση και το ρεύμα και μετατρέπονται οι τιμές του σε ψηφιακές από δύο μετατροπείς A/D των 8-bit. Στην συνέχεια η FPGA διαβάζει τις τιμές αυτές και μέσω του μοντέλου που έχει περιγραφεί παραπάνω, τις συγκρίνει με τις τιμές της ιδανικής χαρακτηριστικής που υπάρχουν στην μνήμη, όπως φαίνεται στο σχήμα 34. Η ακτινοβολία και η θερμοκρασία δεν λαμβάνονται υπόψιν σαν μεταβλητές του συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 41, και για αυτό οι συντελεστές κβαντισμού K_v και K_t δεν μεταβάλλονται.



Σχήμα 41. Γενικό διάγραμμα για τον κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό του εξομοιωτή.

Στην τιμή της τάσης που μετράται προστίθεται η πτώση τάσης από την R_s και αφαιρείται η τάση από το αισθητήριο του ρεύματος όπως και προηγουμένως. Ο έλεγχος για το αν οι τιμές της τάσης και του ρεύματος υπερβαίνουν τις τιμές της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του ρεύματος βραχυκύκλωσης αντίστοιχα, υπάρχει και υλοποιείται όπως περιγράφηκε πιο πάνω, καθώς ίδια παραμένει και η συνάρτηση για την παραγωγή του PWM σήματος. Το γενικό διάγραμμα του κώδικα φαίνεται στο σχήμα 42.



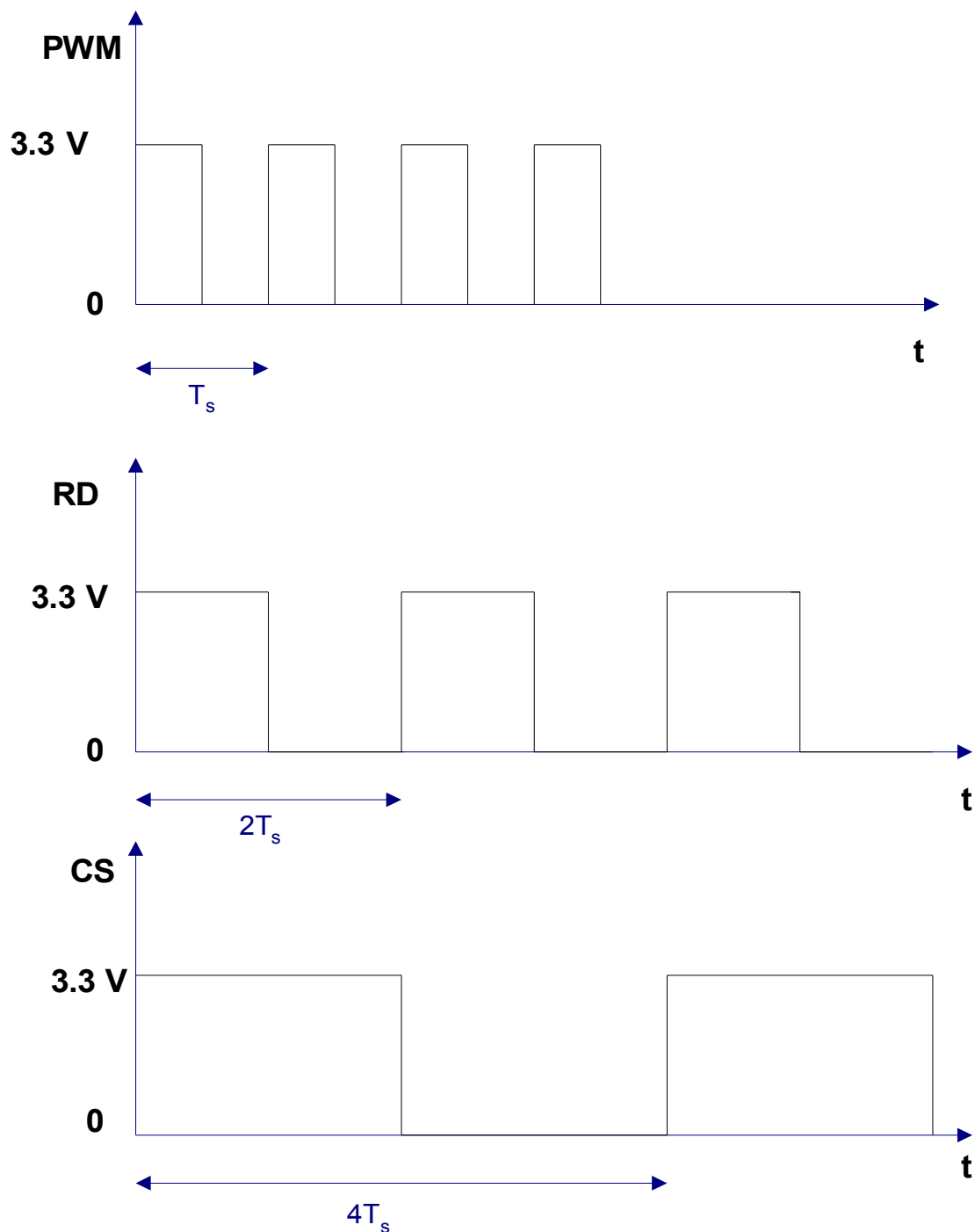
Σχήμα 42. Γενικό διάγραμμα για την λειτουργία του κώδικα του εξομοιωτή που υλοποιήθηκε.

6.2 Ανάπτυξη του κυκλώματος του εξομοιωτή

Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε ουσιαστικά αποτελείται από δύο μέρη: Το ψηφιακό και το ισχύος.

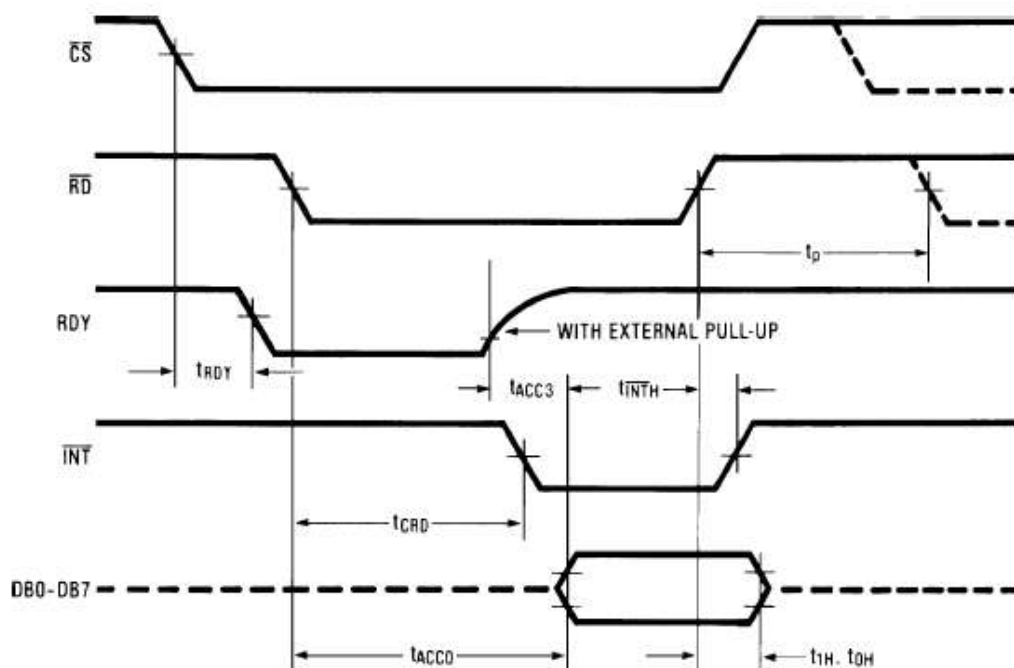
Αναφορικά με το πρώτο κομμάτι, η FPGA που χρησιμοποιήθηκε είναι η 4010XL-PC84 της XILINX με συχνότητα του ρολογιού ίση με 12 MHz. Αυτό όπως θα δειχθεί περιορίζει την ακρίβεια του όλου σχεδιασμού μιας και το παραγόμενο σήμα ελέγχου PWM θα πρέπει να δουλεύει στην συχνότητα των 46.8 kHz. Έτσι για να παραχθεί το σήμα αυτό σε αυτήν την συγκεκριμένη συχνότητα πρέπει το σήμα ελέγχου να είναι στα 8-bit. Αυτό διότι η συχνότητα του σήματος ελέγχου PWM εξαρτάται από το ρολόι της FPGA σύμφωνα με την σχέση (76) και αν αυξηθεί η ακρίβεια θα μειωθεί η συχνότητα του σήματος PWM. Συνεπώς ο κβαντισμός της χαρακτηριστικής που εισάγεται στο LUT γίνεται στα 8 bit και άρα η ακρίβεια περιορίζεται χωρίς όμως, όπως θα φανεί και από τα πειραματικά αποτελέσματα, να επηρεάζει την λειτουργία του συστήματος.

Όπως αναφέρθηκε η FPGA διαβάζει τις τιμές της τάσης και του ρεύματος από δύο μετατροπείς A/D των 8-bit της National Semiconductors, τους ADC0820. Η δειγματοληψία γίνεται στη συχνότητα των 11.7kHz και οι A/D που χρησιμοποιήθηκαν έχουν δύο τρόπους λειτουργίας. Στην περίπτωση του κυκλώματος που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε ο “RD” τρόπος λειτουργίας. Πιο αναλυτικά από την FPGA στέλνονται στον A/D δύο ρολόγια το ένα στην συχνότητα των 23.4 kHz, το RD, και άλλο ένα στην συχνότητα των 11.7 kHz το CS. Όταν το CS και το RD γίνονται low ξεκινάει η μετατροπή και το RD θα σημάνει και το τέλος της μετατροπής ενεργοποιώντας τις TRI-STATE εξόδους δεδομένων στο τέλος της μετατροπής. Ο συγχρονισμός των RD και CS με το σήμα ελέγχου PWM φαίνεται στο σχήμα 43. Την συχνότητα δειγματοληψίας την καθορίζει το σήμα CS.



Σχήμα 43. Διάγραμμα συγχρονισμού σημάτων του μετατροπέα A/D με το σήμα PWM.

Παράλληλα το σήμα INT του μετατροπέα A/D θα γίνει μηδέν δηλώνοντας το τέλος της μετατροπής. Η FPGA θα δει την αλλαγή του σήματος από ένα σε μηδέν και θα διαβάσει τα δεδομένα από τους A/D την ίδια χρονική στιγμή έτσι ώστε να μην έχουν την παραμικρή χρονική απόκλιση οι τιμές του ρεύματος και της τάσης που μετρώνται από το κύκλωμα. Ο χρονισμός αυτών των σημάτων φαίνεται στο σχήμα 44.



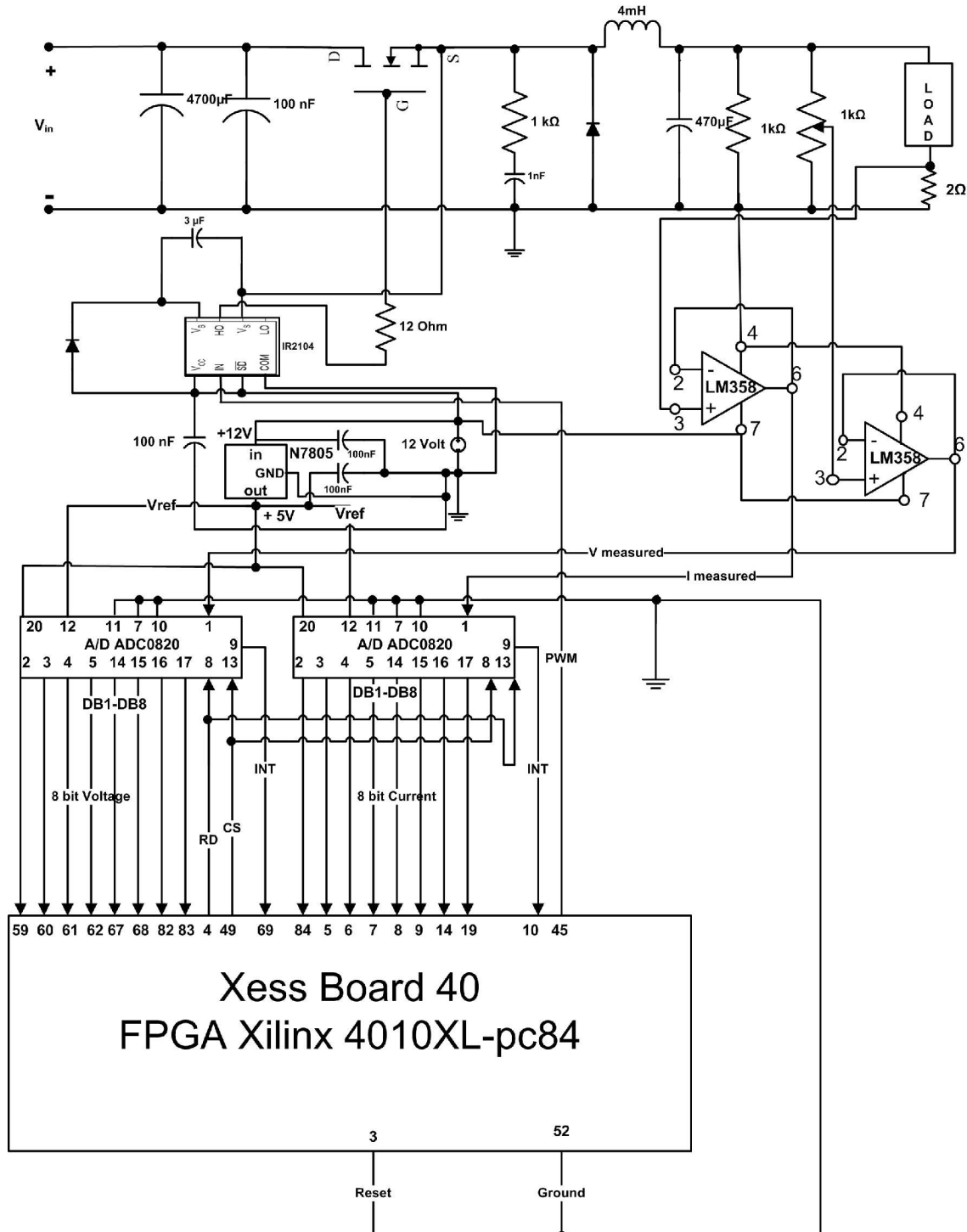
Σχήμα 44. Χρονισμός του A/D μετατροπέα κατά τον RD τρόπο λειτουργίας.

Το παραγόμενο σήμα PWM από την FPGA όπως φαίνεται και στο σχήμα 45 διαβιβάζεται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που αποτελεί έναν οδηγό (driver) για το MOSFET που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα. Ο οδηγός είναι το μοντέλο IR2104 και χρησιμοποιείται για να οδηγήσει το MOSFET IRFZ44. Στο MOSFET όταν η τάση στο gate-source ξεπεράσει ένα επίπεδο τότε είναι σε κατάσταση on ενώ αν η τάση πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι τότε το MOSFET είναι off. Το ρεύμα από το gate είναι μηδέν εκτός από την διάρκεια που γίνεται η αλλαγή από on σε off και αντίστροφα οπότε η χωρητικότητα του gate φορτίζεται ή αποφορτίζεται. Ο χρόνος εναλλαγής από on σε off είναι πολύ μικρός μόλις 45 ns και από off σε on 14 ns. Στην συνέχεια το κύκλωμα αποτελείται από ένα μία fast-switching δίοδο που έχει σαν σκοπό να προστατεύσει το MOSFET από την επαγωγική ενέργεια που υπάρχει στο κύκλωμα, σε διαφορετική περίπτωση θα την απορροφούσε το MOSFET, και μετά από ένα βαθυπερατό φίλτρο που χρησιμοποιείται για να εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της τάσης εξόδου όπως περιγράφηκε και πιο πάνω.

1. Στην συνέχεια στο κύκλωμα είναι το αισθητήριο για την μέτρηση της τάσης και στα άκρα του κυκλώματος εφαρμόζεται το φορτίο. Στην συνέχεια είναι συνδεδεμένη σε σειρά μια αντίσταση που αποτελεί το αισθητήριο για την

μέτρηση του ρεύματος. Στην συνέχεια οι τιμές της τάσης και του ρεύματος που μετρώνται εισάγονται σε κυκλώματα ακόλουθου τάσης, που έχουν υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας τον τελεστικό ενισχυτή LM358, και στην συνέχεια στέλνονται στους μετατροπείς A/D και μετά η ψηφιακή τους τιμή στην FPGA.

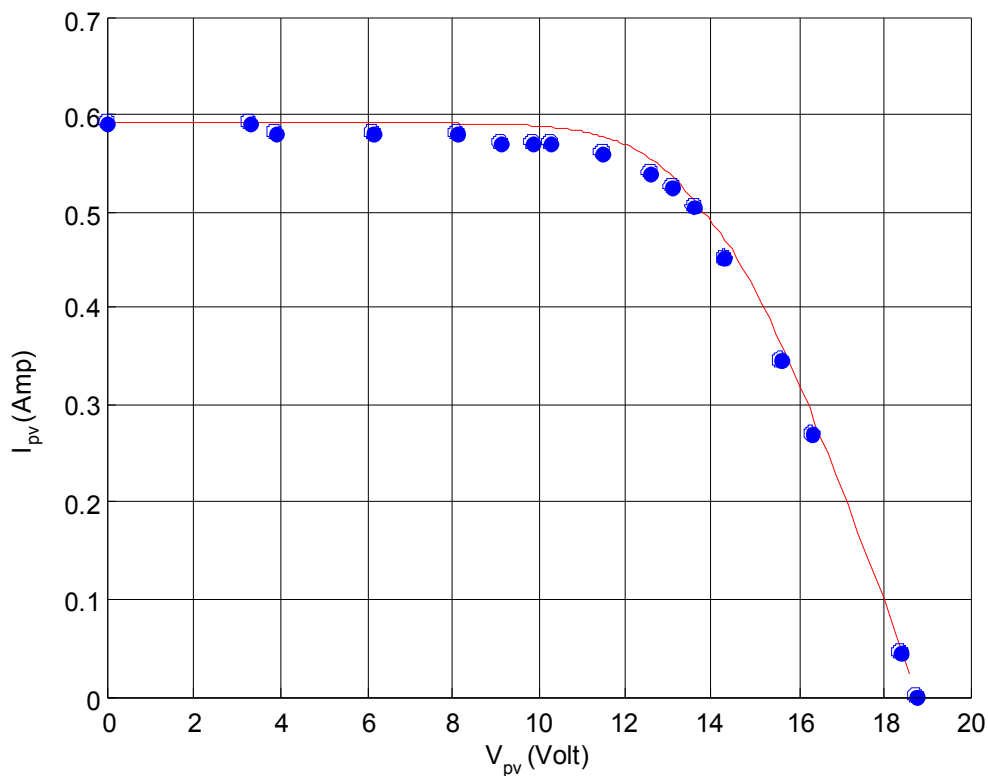
Το κύκλωμα που υλοποιήθηκε φαίνεται στο σχήμα 45:



Σχήμα 45. Το κύκλωμα του εξομοιωτή που υλοποιήθηκε.

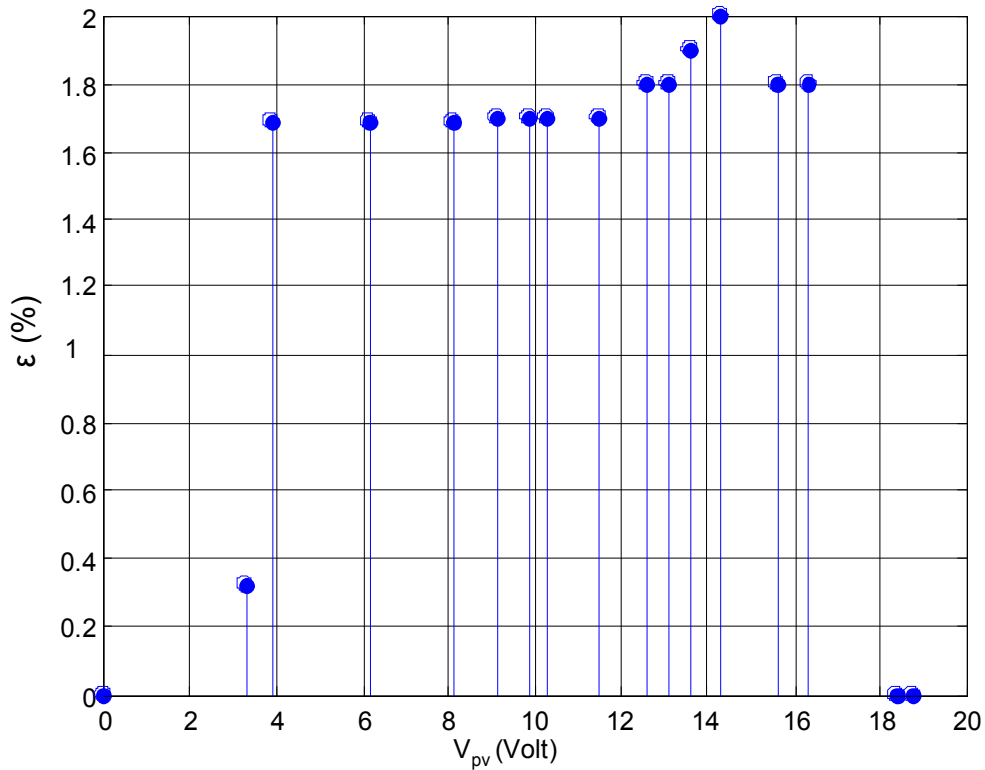
7. Πειραματικά αποτελέσματα

Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού πλαισίου που εξομοιώθηκε είναι το ST10 της SIEMENS για ακτινοβολία 800 W/m^2 και θερμοκρασία στοιχείου 45°C . Η χαρακτηριστική που φορτώθηκε στην μνήμη είναι της ιδανικής χαρακτηριστικής για τις παραπάνω συνθήκες και τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 46 όπου με κουκκίδες είναι οι μετρήσεις από τον εξομοιωτή και με την συνεχή γραμμή η θεωρητική, μη ιδανική χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού πλαισίου.



Σχήμα 46. Χαρακτηριστική I - V Θεωρητική και οι μετρήσεις με τάση εισόδου 30 Volt.

Στο σχήμα 47 φαίνεται η ποσοστιαία % απόκλιση για τις μετρήσεις στα 30 Volt



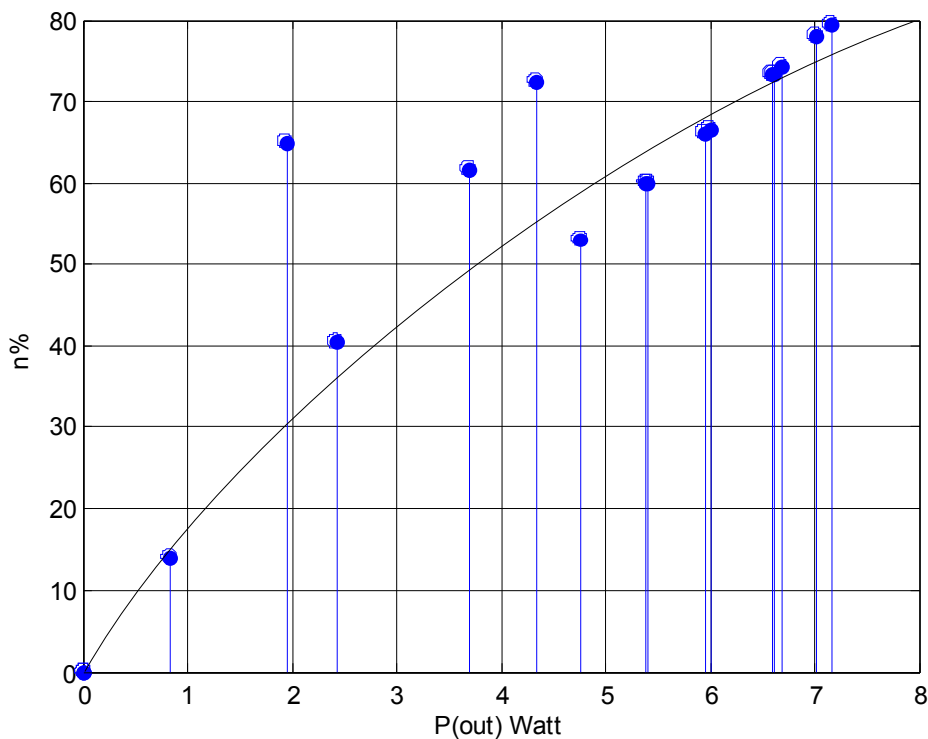
Σχήμα 47. Απόκλιση μετρήσεων για τάση εισόδου 30 Volt

Ως απόκλιση ε ορίζεται το κλάσμα της απόλυτης τιμής της διαφοράς της θεωρητικής τιμής του ρεύματος από την πειραματική προς της θεωρητική όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$\varepsilon(\%) = \frac{|I_{\text{Θεωρητική}} - I_{\text{Πειραματική}}|}{I_{\text{Θεωρητική}}} * 100 \% \quad (77)$$

Η μέση τιμή της απόκλισης για τάση εισόδου 30 Volt είναι 1.28% .

Στο σχήμα 48 φαίνεται ο βαθμός απόδοσης του εξομοιωτή για την τάση εισόδου 30 Volt.



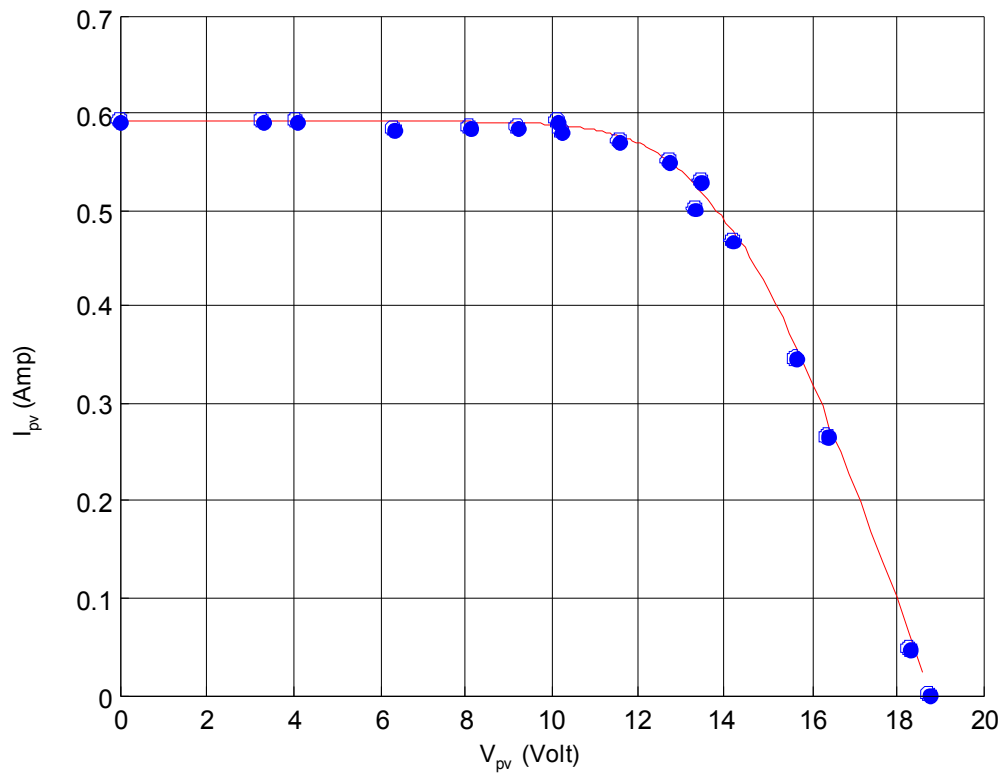
Σχήμα 48. Βαθμός απόδοσης για τάσης εισόδου 30 Volt.

Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύς εξόδου προς την ισχύ εισόδου:

$$\eta (\%) = \frac{P_{\text{εξόδου}}}{P_{\text{εισόδου}}} 100 \% \quad (78)$$

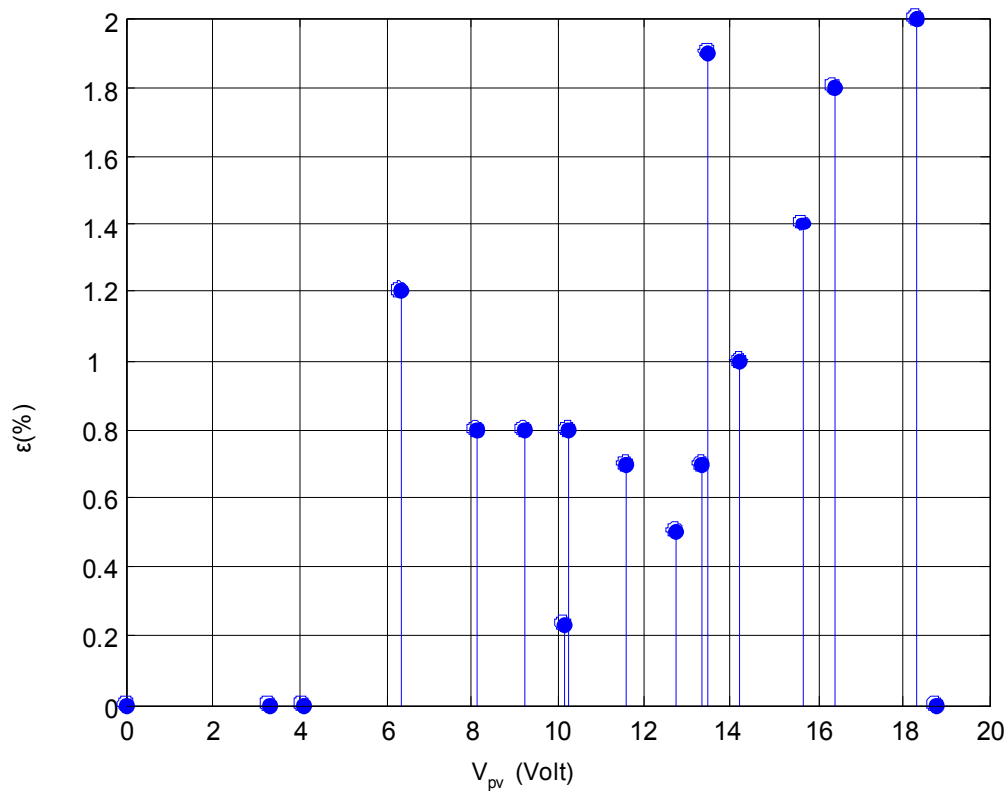
Οι μετρήσεις έχουν μικρή απόκλιση από τις θεωρητικές. Μάλιστα αν τα σημεία της χαρακτηριστικής για τα οποία έγιναν μετρήσεις γίνουν περισσότερα και αυξηθεί η ακρίβεια αναπαράστασης των αριθμών στο LUT τότε τα αποτελέσματα θα είναι πολύ καλύτερα.

Στο σχήμα 49 φαίνονται η χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού και οι μετρήσεις με τάση εισόδου 35 Volt.



Σχήμα 49. Χαρακτηριστική I - V Θεωρητική και οι μετρήσεις με τάση εισόδου 35 Volt.

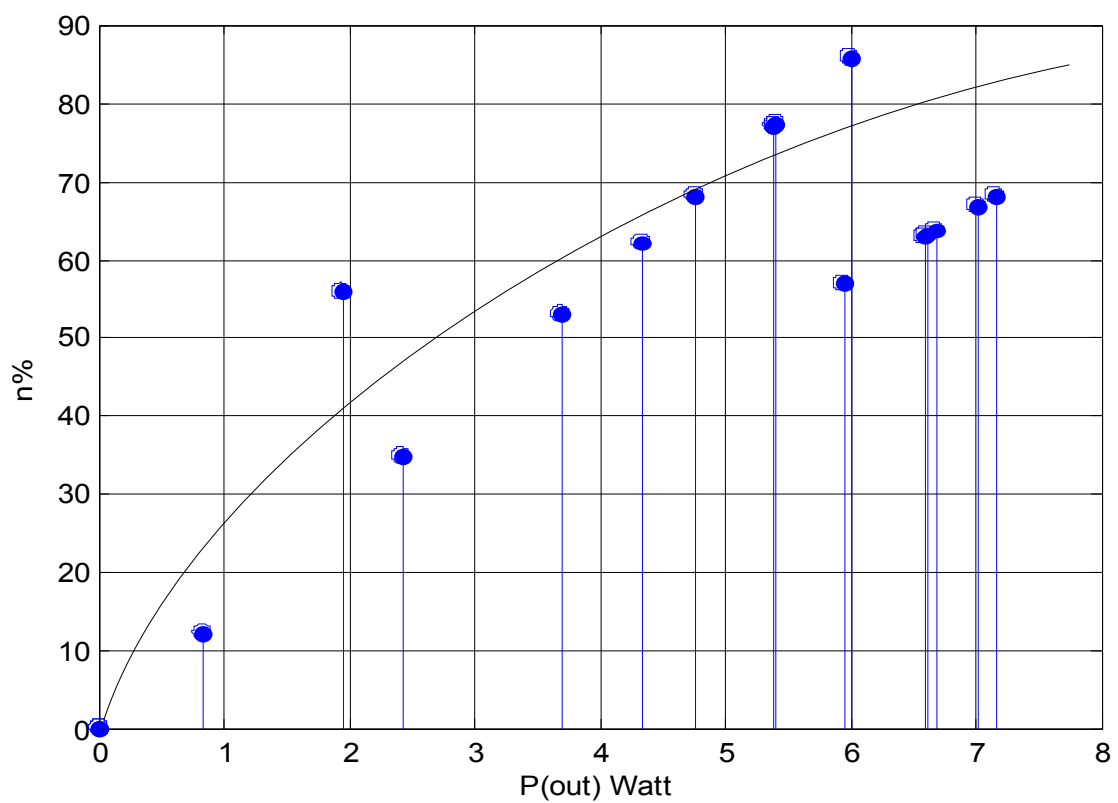
Στο σχήμα 50 φαίνεται η απόκλιση για τις μετρήσεις στα 35 Volt.



Σχήμα 50. Απόκλιση μετρήσεων για τάση εισόδου 35 Volt.

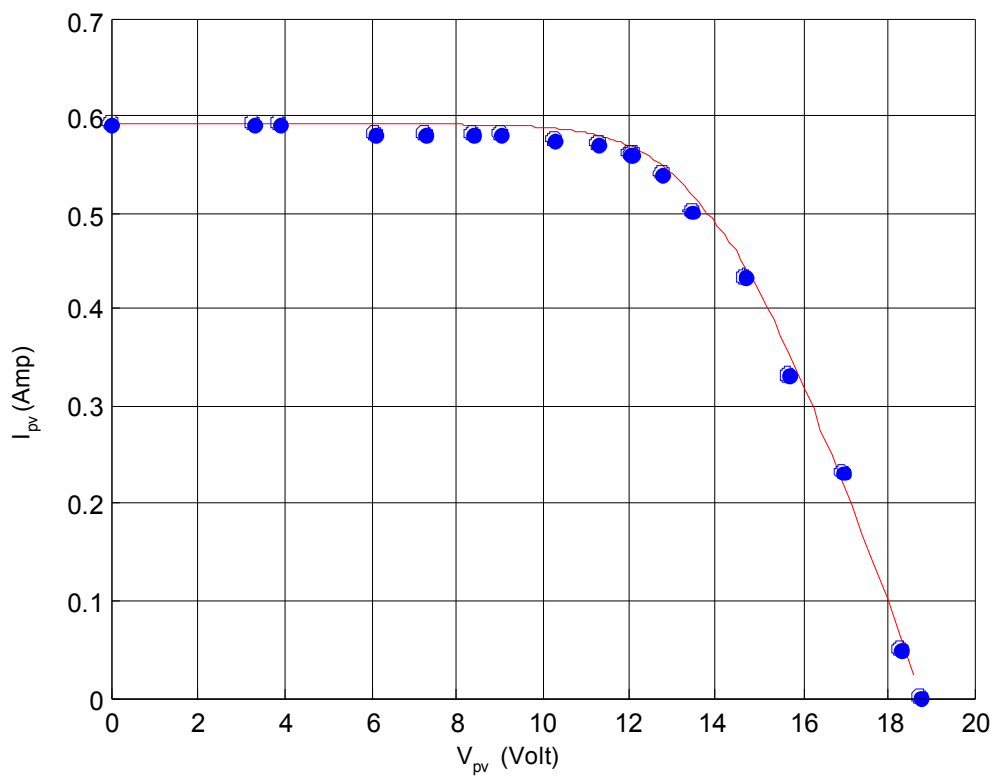
Η μέση τιμή της απόκλισης για τα 35 Volt είναι 0.8%.

Στο σχήμα 51 φαίνεται ο βαθμός απόδοσης για τάση εισόδου 35 Volt.



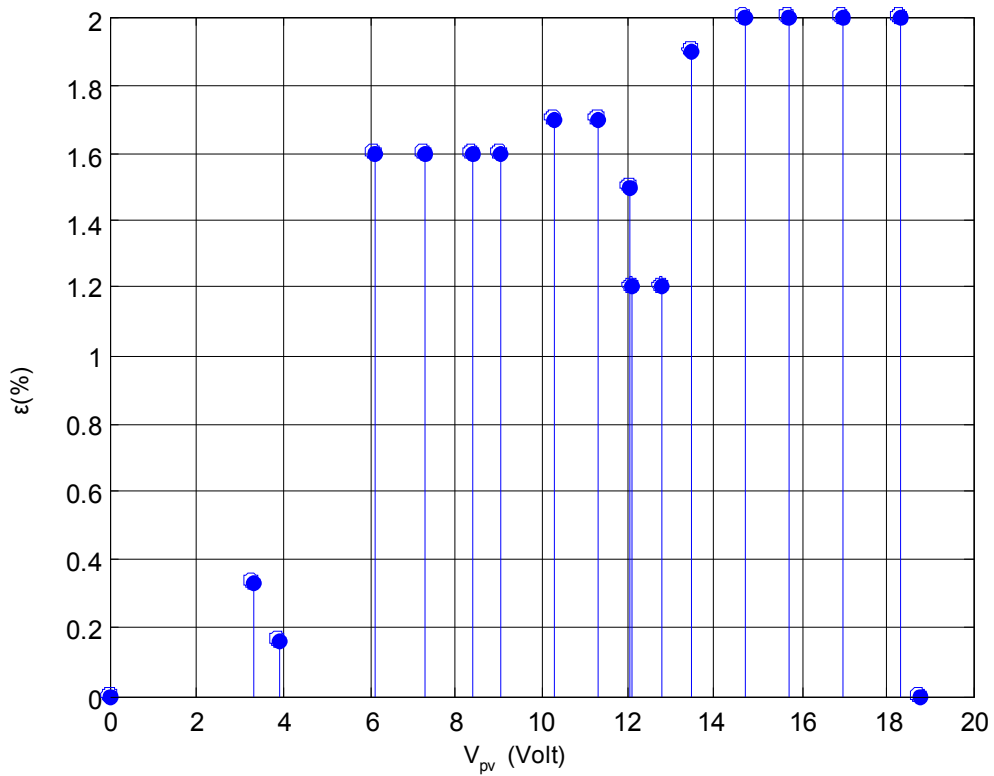
Σχήμα 51. Ο βαθμός απόδοσης για τάση εισόδου 35 Volt.

Η χαρακτηριστική του φωτοβολταϊκού και οι μετρήσεις με τάση εισόδου 36.4 Volt φαίνονται στο σχήμα 52.

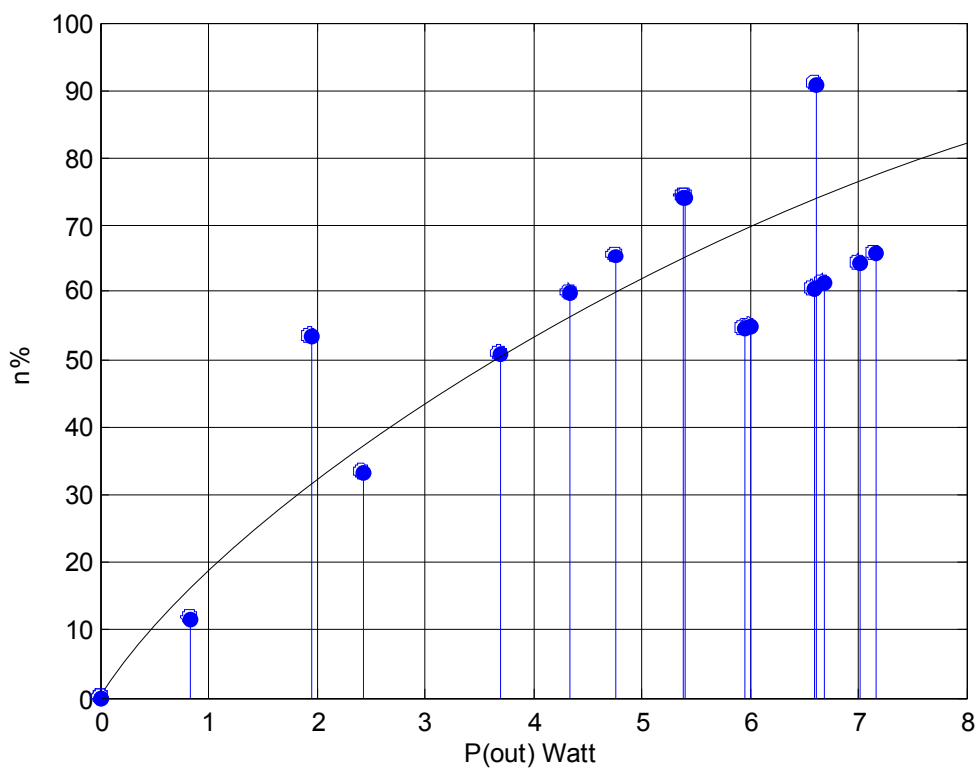


Σχήμα 52. Χαρακτηριστική I - V Θεωρητική και οι μετρήσεις με τάση εισόδου 36.4 Volt.

Η απόκλιση των τιμών φαίνεται στο σχήμα 53.



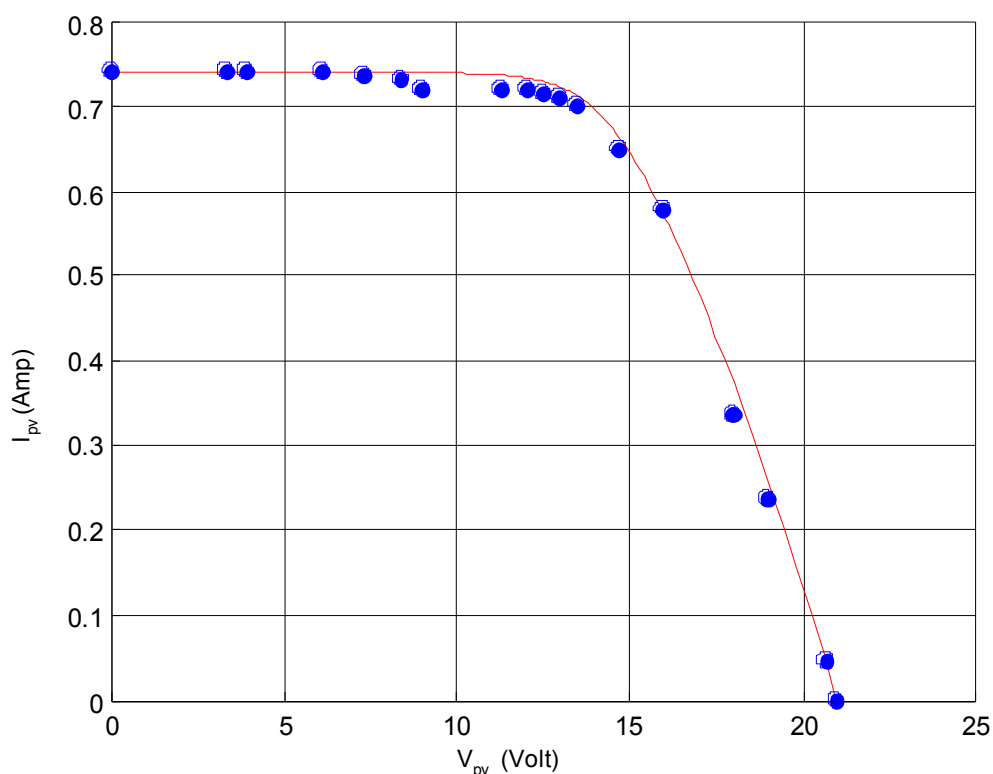
Σχήμα 53. Απόκλιση μετρήσεων για τάση εισόδου 36.4 Volt
 Η μέση τιμή της απόκλισης τάση εισόδου 36.4 Volt είναι 1.25%.



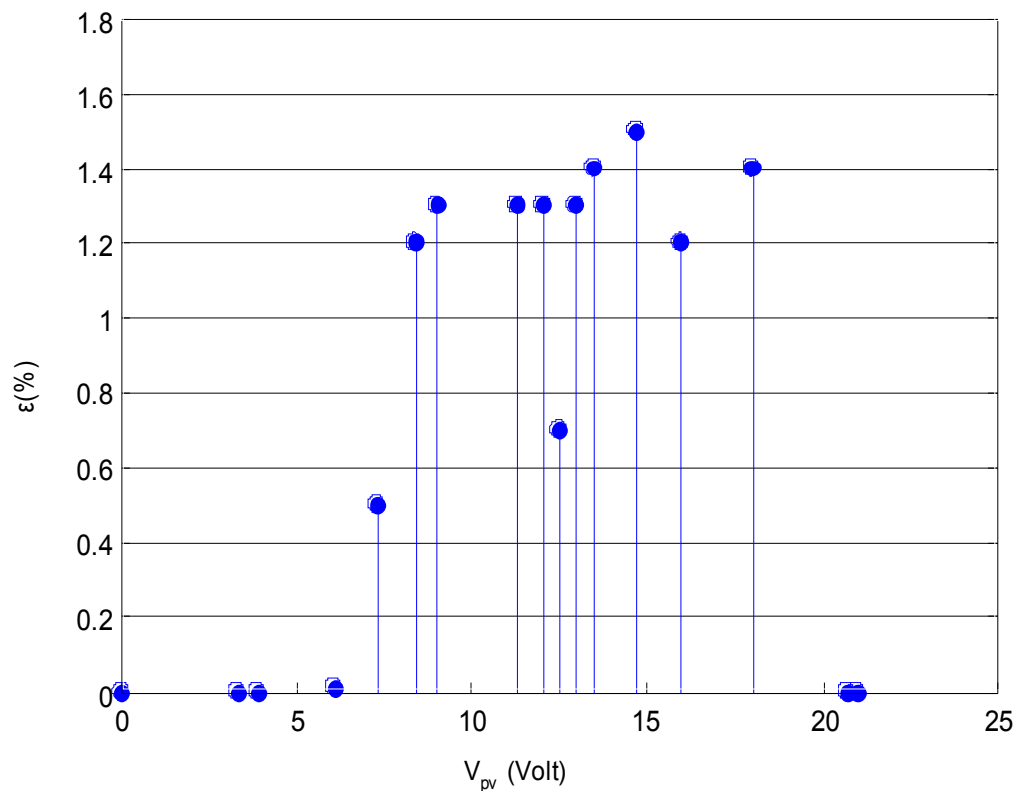
Σχήμα 54. Ο βαθμός απόδοσης για τάση εισόδου 36.4 Volt.

Όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις αν το φορτίο παραμείνει ίδιο και αλλάζει η τάση εισόδου, τότε η τάση εξόδου παραμένει σταθερή, συνεπώς αυτό έρχεται σε συμφωνία με την επεξήγηση για ότι το συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελεί ένα αρκετά αξιόπιστο διακοπτικό τροφοδοτικό.

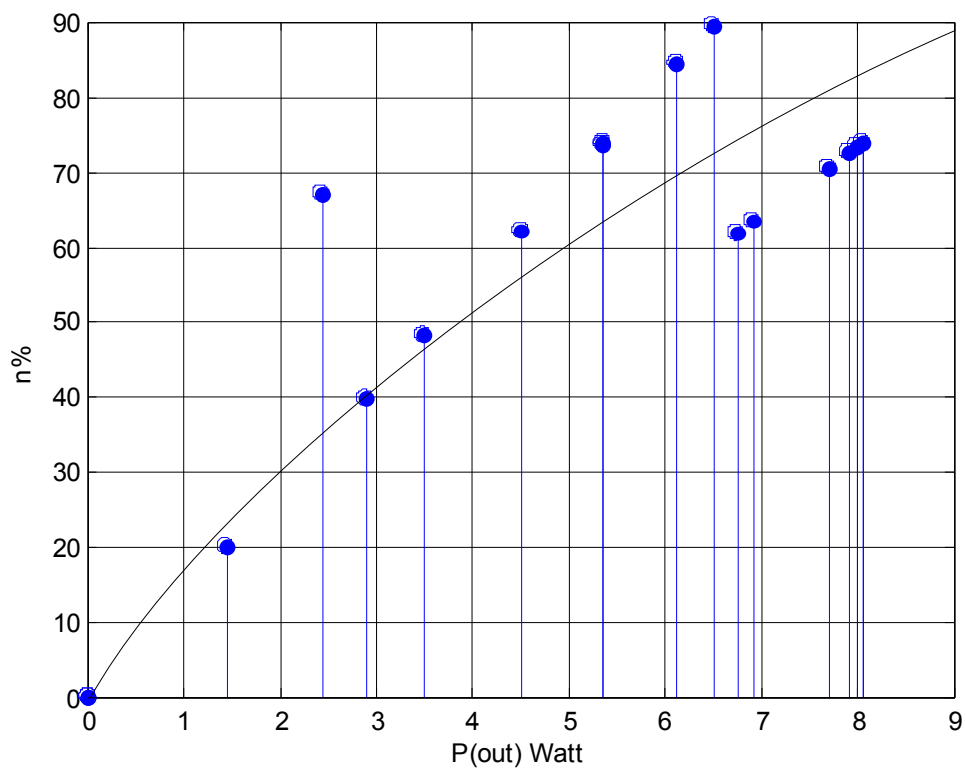
Παράλληλα ο κώδικας που αρχικά είχε σχεδιαστεί αλλά δεν χώραγε στο συγκεκριμένο μοντέλο της FPGA, με κάποιες τροποποιήσεις, όπως το να γίνουν κάποιες πράξεις εκτός FPGA και να εισαχθούν απλά στο μοντέλο τα αποτελέσματα αυτών των πράξεων σαν σταθερές, κατάφερε να δοκιμαστεί στον εξομοιωτή. Αυτό διότι μειώθηκε ο αριθμός των πράξεων που υλοποιεί η FPGA και συνεπώς χώρεσε σε αυτήν. Οι μετρήσεις με αυτόν τον κώδικα έγιναν για την ίδια συστοιχία και για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 25°C και για 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 47°C . Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα (55), (56), (57), (58), (59) και (60), αντίστοιχα.



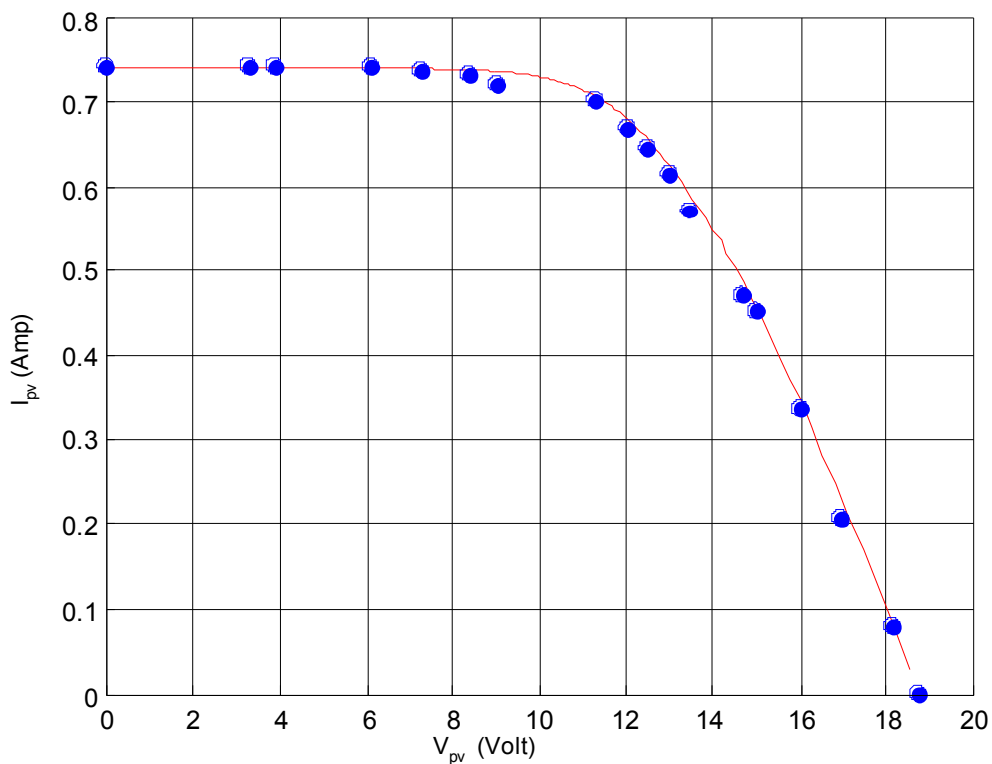
Σχήμα 55. Χαρακτηριστική I - V Θεωρητική και οι μετρήσεις με τάση εισόδου 36.4 Volt και ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 25°C .



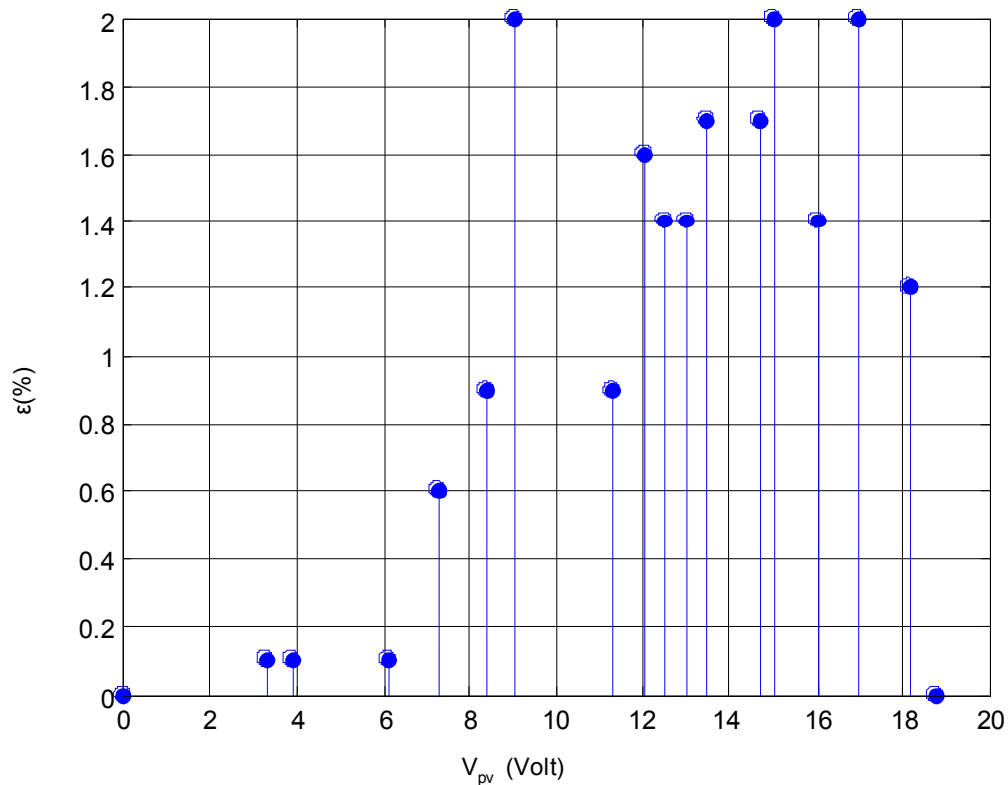
Σχήμα 56. Απόκλιση μετρήσεων για τάση εισόδου 36.4 Volt και ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 25°C .



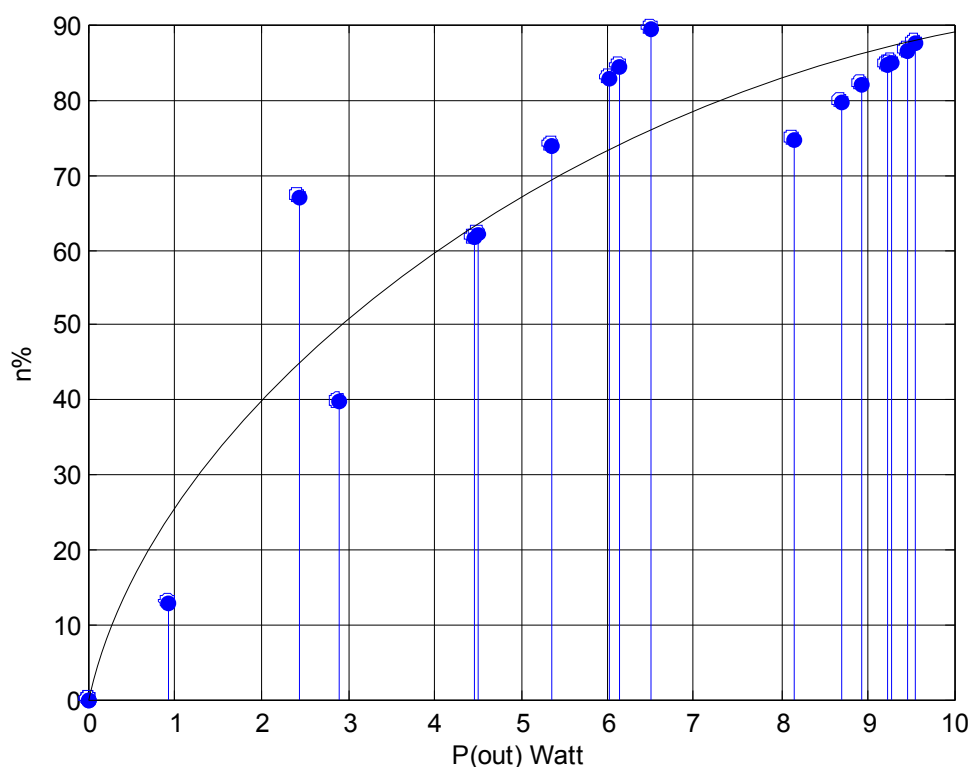
Σχήμα 57. Βαθμός απόδοσης για τάσης εισόδου 36.4 Volt και ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 25°C .



Σχήμα 58. Χαρακτηριστική I - V Θεωρητική και οι μετρήσεις με τάση εισόδου 36.4 Volt και ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 47°C .



Σχήμα 59. Απόκλιση μετρήσεων για τάση εισόδου 36.4 Volt και ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 47°C .



Σχήμα 60. Βαθμός απόδοσης για τάσης εισόδου 36.4 Volt και ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 47 °C.

Η μέση τιμή της απόκλισης για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και θερμοκρασία 25 °C είναι 0.73% ενώ για θερμοκρασία 47 °C και ίδια ακτινοβολία είναι 1.12%

Γίνεται φανερό από τις μετρήσεις ότι ο εξομοιωτής δουλεύει σωστά και μάλιστα με καλή ακρίβεια αφού η απόκλιση κατά μέσο όρο είναι 1.03%. Ο μέσος όρος που προκύπτει είναι ο συνολικός μέσος όρος των αποκλίσεων. Μάλιστα λειτουργεί για οποιαδήποτε ακτινοβολία και θερμοκρασία επιθυμεί ο χρήστης όπως φαίνεται από τα σχήματα 47 και 50 όπου και σε αυτήν την υλοποίηση η απόκλιση είναι γύρω στο 1.036%.

Ο κώδικας που λαμβάνει υπόψιν του ακτινοβολία και θερμοκρασία προσομοιώθηκε και για άλλες FPGA καινούργιας τεχνολογίας και οι απαιτήσεις του είναι αρκετά μικρές σε πόρους. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι XC3S400 5PQ208 και η XCES50-4 TQ144 της σειράς Spartan3 και η XC2V1000 -6 BG275 της σειράς Virtex και οι πόροι που χρειάστηκαν φαίνονται στον πίνακα 9.

Πίνακας 9 Πόροι που χρησιμοποιήσαν οι FPGA

<i>FPGA</i>	Πόροι που χρησιμοποιήθηκαν
4020XL -9 BG256	561/784 CLB
Virtex XC2V1000 -6 BG275	Slice Flip Flops: 111 1%
Spartan3 XCES50 -4 TQ144	Slice Flip Flops: 119 (7%)
Spartan3 XC3S400 5PQ208	Slice Flip Flops: 103 1%
VIRTEX4 4vlx80ff1148-11	Slice Flip Flops: 125 1%
Altera APEX20KE EP20K30E	Total LUTs: 501 of 1200 (41%)

Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι κάθε εταιρεία έχει και διαφορετικό τρόπο να μετράει την χωρητικότητα της κάθε FPGA.

Το κόστος των FPGA του πίνακα 9 φαίνεται στον πίνακα 10:

Πίνακας 10 FPGA που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση και κόστος αυτών

<i>ΜΟΝΤΕΛΟ FPGA</i>	<i>ΚΟΣΤΟΣ</i>
XC4020XL	139.00 €
Virtex XC2V1000 -6 BG275	210.00 €
Spartan3 XCES50 -4 TQ144	240.00 €
Spartan3 XC3S400 5PQ208	25,00 €
VIRTEX4 4vlx80ff1148-11	60,00 €
Altera APEX20KE EP20K30E	180.00 €

Από τους πίνακες με τις FPGA παρατηρείται ότι το κόστος για την υλοποίηση του εξομοιωτή είναι χαμηλό.

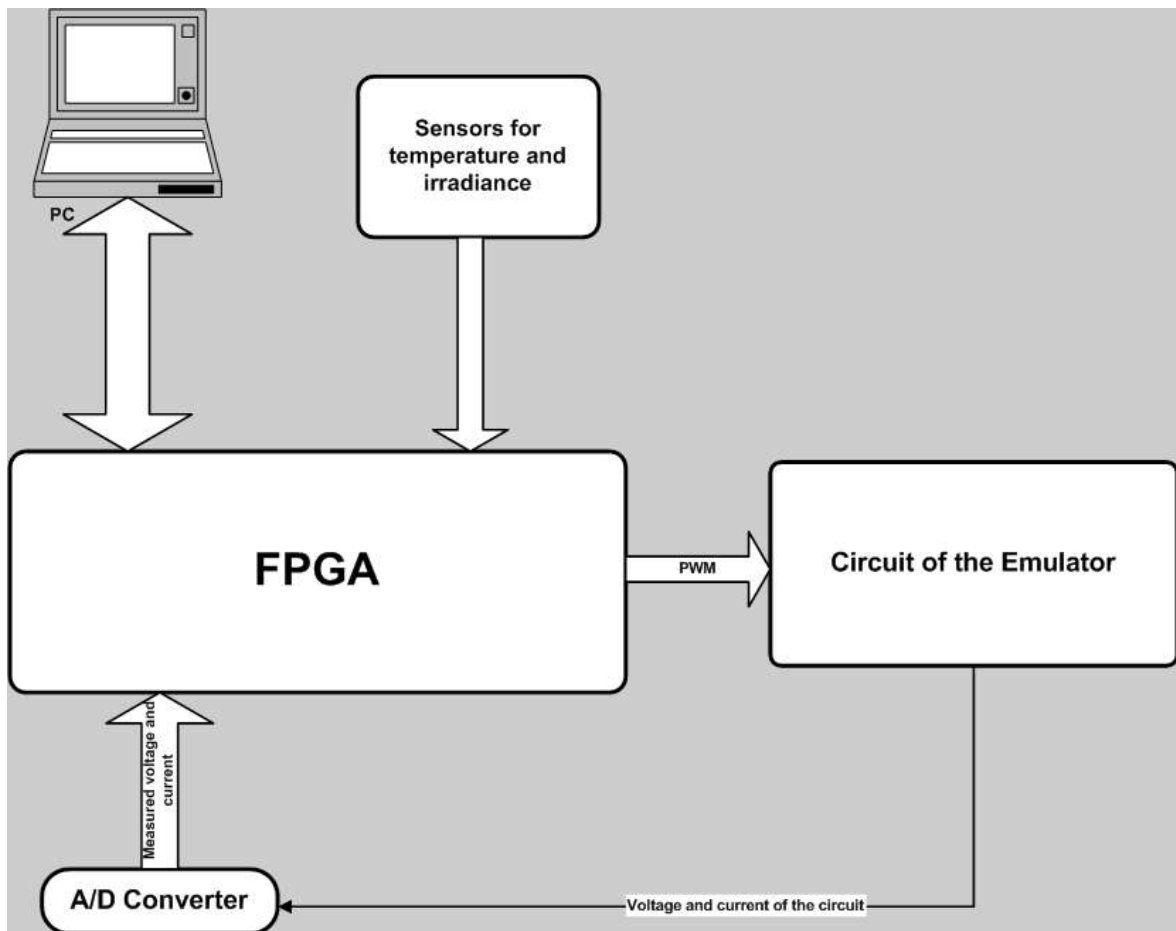
8. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Όπως φάνηκε από τα παραπάνω ο εξομοιωτής που κατασκευάστηκε αποτελεί μια αξιόπιστη και ακριβή λύση για την εξομοίωση φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Τα πλεονεκτήματα του είναι η σε πραγματικό χρόνο σύγκλιση του χωρίς την παρεμβολή υπολογιστή, η δυνατότητα προσομοίωσης τόσο σε πραγματικό πεδίο αν το επιτρέπουν οι καιρικές συνθήκες όσο και σε εργαστηριακό περιβάλλον για οποιοσδήποτε συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας και η ευελιξία του να προσαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη. Επιπρόσθετα μπορεί να προσομοιώσει οποιοδήποτε φωτοβολταϊκό στοιχείο, μονάδα ή γεννήτρια.

Οι πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι ο εξομοιωτής λειτουργεί με ακρίβεια της τάξης του 1.03%. Η FPGA διαβάζει από το κύκλωμα τις τιμές του ρεύματος και της τάσης μέσω των μετατροπών A/D με συχνότητα δειγματοληψίας 11.7kHz που είναι σαφώς πιο γρήγορο από το να διάβαζε τις τιμές κάποιος υπολογιστής μέσω σειριακής ή οποιασδήποτε άλλης θύρας και η σύγκλιση του κυκλώματος στην επιθυμητή τιμή εξόδου είναι σαφώς πιο γρήγορη αφού η καινούργια τιμή του PWM παρέχεται πολύ πιο γρήγορα. Παράλληλα ο εξομοιωτής που υλοποιήθηκε είναι σχετικά αυτόνομος από υπολογιστές μιας και το μόνο που χρειάζεται να γίνει είναι να προγραμματιστεί η FPGA και ο εξομοιωτής λειτουργεί χωρίς να χρειάζεται κάποια επιπλέον επικοινωνία με υπολογιστή. Ακόμα, η χρήση FPGA επιτρέπει την μεγάλη ακρίβεια του σήματος ελέγχου PWM ακόμα και σε μεγάλη συχνότητα λειτουργίας αφού το ρολόι της FPGA μπορεί να έχει συχνότητα αρκετά MHz.

Μελλοντικές επεκτάσεις του εξομοιωτή μπορεί να είναι η προσθήκη αισθητηρίων για τη συνεχή μέτρηση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασία σε πραγματικό πεδίο δοκιμών. Επίσης, η δημιουργία interface για την εύκολη χρήση του εξομοιωτή από τον χρήστη π.χ. για εύκολη εισαγωγή των δεδομένων στην μνήμη και αλλαγή των παραμέτρων του συστήματος έτσι ώστε να προσομοιώνονται εύκολα και διάφορα μοντέλα φωτοβολταϊκών. Με την προσθήκη των αισθητηρίων μπορεί να προσομοιωθεί οποιαδήποτε φωτοβολταϊκή συστοιχία μετρώντας την θερμοκρασία και την ακτινοβολία της περιοχής και λαμβάνοντας υπόψιν και την κλίση του φωτοβολταϊκού. Άρα θα μπορεί να δώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα για το ποιες και πόσες συστοιχίες θα πρέπει να τοποθετηθούν για να καλυφθούν οι ανάγκες σε φορτίο.

Στο σχήμα 61 φαίνεται μια άποψη που αναπτύχθηκε για την μελλοντική εξέλιξη του εξομοιωτή.



Σχήμα 61. Μελλοντική εξέλιξη του εξωμοιωτή.

9. Βιβλιογραφία

9.1 Δημοσιεύσεις

[1] Hiroshi Nagayoshi, “*I-V curve simulation by multi-module simulator using I-V magnifier circuit*” Solar Energy Material & Solar Cells, 82 (2004), 159-167.

[2] S.H.Lloyd, G.A.Smith, D.G.Infield, “*Design and construction of a modular electronic photovoltaic simulator*”, Center for Renewable Energy Systems and Technology (CREST), Loughborough University, Power Electronics and Variable Speed, 18-19 September 2000, Conference Publication No 475, pp 120-123.

[3] G.Vachtsevanos, K.Kalaitzakis, “*A hybrid photovoltaic simulator for utility interactive studies*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2 ,No. 2 June 1987,pp 227-231.

[4] Kame Khouzak, Keith Hoffman, “*Real-time simulation of photovoltaic modules*”, Solar Energy, Vol. 56, No. 6, pp. 521-526, 1996.

9.2 Βιβλία

[5] E.Lorenzo, “*Solar Electricity : engineering of photovoltaic systems*”, Universidad of Madrid, 1994.

[6] Ned Mohan, Tore M. Underland, William P. Robbin, “*Power Electronics: converters, applications and design*”, John Wiley & Sons New York 1989.