



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ
ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ
ΚΑΙ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ
ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέδες Ι. Γεώργιος

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ
ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ
ΚΑΙ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ
ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δέδες Ι. Γεώργιος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Καθ. ΕΜΠ

.....
Καθ. ΕΜΠ

.....
Καθ. ΕΜΠ

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάιος 2009

.....
Δέδες Ι. Γεώργιος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δέδες Ι. Γεώργιος, 2009
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία αποτελείται ουσιαστικά από δύο εργασίες. Η πρώτη εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ), ενώ η δεύτερη στο τμήμα Electrical Engineering του Danmarks Tekniske Universitet (DTU) της Κοπεγχάγης.

1^η ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Η εργασία αυτή αποτελείται από 2 μέρη. Το πρώτο μέρος είναι προγραμματιστικό και αφορά την κατασκευή μιας εφαρμογής (εικονικό εργαλείο) στο πρόγραμμα Labview. Η εφαρμογή προσομοιώνει τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού (Φ/Β) πλαισίου ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του πλαισίου, παρέχοντας ως αποτέλεσμα τη χαρακτηριστική V-I και P-V. Σκοπός αυτής της εφαρμογής είναι να βοηθήσει τους σπουδαστές στη μελέτη και κατανόηση της λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων. Για το λόγο αυτό, η εφαρμογή φιλοξενείται online και είναι διαθέσιμη σε όποιον θέλει να την κατεβάσει.

Το δεύτερο μέρος αποτελεί το κατασκευαστικό τμήμα αυτής της εργασίας. Ουσιαστικά κατασκευάστηκε κύκλωμα για την καταγραφή των καμπυλών των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός πλαισίου. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε μια πλακέτα η οποία παίζει το ρόλο μεταβλητού φορτίου. Με τη σύνδεσή της με ένα Φ/Β πλαίσιο και με τον υπολογιστή μέσω μιας κάρτας DAQ μπορούμε να καταγράψουμε τις χαρακτηριστικές V-I και P-V του πλαισίου.

Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα μέσω απομακρυσμένου ελέγχου να πραγματοποιήσουμε την καταγραφή μιας καμπύλης ενός Φ/Β πλαισίου.

2^η ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ

Η τάση για την ανάπτυξη αντιστροφέων με σκοπό την εφαρμογή τους για την διασύνδεση Συστημάτων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΣΔΠ) με το δίκτυο έχει αυξήσει τη σημασία του ελέγχου και της ποιότητας ισχύος που παρέχουν. Με τη χρήση τριών ή πολλαπλών επιπέδων αντιστροφέων σε ΣΔΠ μπορεί να επιτευχθεί υψηλής ποιότητας ισχύς εξόδου με ρεαλιστική διακοπτική συχνότητα. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η προσομοίωση ενός τριφασικού αντιστροφέα τριών επιπέδων, συνδεδεμένου στο δίκτυο. Η σχεδίαση του κυκλώματος οδήγησης του αντιστροφέα βασίζεται στην τεχνική του Διανυσματικού Ελέγχου Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Space Vector PWM). Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με το λογισμικό SIMULINK/MATLAB.

Λέξεις Κλειδιά: φωτοβολταϊκό πλαίσιο, προσομοίωση φωτοβολταϊκού πλαισίου, καμπύλες ηλεκτρικών χαρακτηριστικών, P-V, V-I, Labview, Pspice, αντιστροφέας τριών βαθμίδων, οδήγηση αντιστροφέα, space vector modulation, Διανυσματικός Έλεγχος Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών, παλμογεννήτρια, SVPWM, simulink

ABSTRACT

This thesis consists of two projects. The first one was conducted at the Photovoltaics Systems Laboratory of the Center of Renewable Energy Sources in Athens, whereas the second one at the Department of Electrical Engineering of the Danmarks Tekniske Universitet in Copenhagen.

1st Project

STUDY AND CONSTRUCTION OF A SYSTEM THAT MEASURES THE ELECTRICAL CURVES OF A P/V MODULE

This project consists of two parts. The first part involves programming in Labview for the construction of an application (virtual instrument). This application simulates the function of a photovoltaic panel according to the solar irradiance and panel's temperature, giving as a result the V-I and P-V curves. The aim of this application is to help students in understanding the way solar panels work. Therefore, the application has been designed in order to be available online.

The second part consists of the construction of an electrical circuit that measures the curves of a P/V module. To be more specific, the electrical board which was constructed, serves as a variable resistance. When connecting the board with a photovoltaic panel and a personal computer through a data acquisition board, we can observe the V-I and P-V curves of the panel. In this way, we can remotely measure the electrical curves of a P/V module.

2nd Project

SIMULINK MODEL OF A THREE LEVEL SPACE VECTOR MODULATED GRID CONNECTED POWER INVERTER

The trend towards deploying inverters in interfacing distributed generation (DG) systems to the grid has raised the importance of control and power quality aspects of inverters. Using three level or multilevel inverters in DG systems, one can achieve high power quality outputs with realistic switching frequency. The purpose of this project is to simulate a three phase, three level grid connected inverter. The design of the inverter is based on the space vector modulation technique. All simulations have been made using SIMULINK.

Key Words: photovoltaic panel, simulation of a photovoltaic panel, electrical characteristic curves, V-I, P-V, Labview, Pspice, 3-level inverter, space vector modulation, SVPWM, pulse generator, simulink

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικώς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ν. Χατζηαργυρίου καθώς και τον Δρ. Σ. Τσελεπή, προϊστάμενο του Τμήματος Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Διεσπαρμένης Παραγωγής του ΚΑΠΕ, για την άριστη συνεργασία μας.

Επίσης, να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Δρ. Ε. Ρίκο για την άρτια καθοδήγηση και βοήθεια που μου παρείχε στα πλαίσια της εκπόνησης της εργασίας μου στο ΚΑΠΕ, ενώ και τον καθηγητή Tonny W. Rasmussen για την συνεργασία μας στο Πολυτεχνείο της Κοπεγχάγης.

Τέλος, θέλω να υπογραμμίσω ότι η εκπόνηση του δεύτερου μέρους αυτής της εργασίας, που έγινε στη Δανία στα πλαίσια του προγράμματος Erasmus/Socrates, με γέμισε με μοναδικές εμπειρίες και ευχαριστώ για άλλη μια φορά τον καθηγητή μου κ. Ν. Χατζηαργυρίου που με προέτρεψε να προχωρήσω.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Κεφάλαιο 1 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

1.1	Εισαγωγή.....	13
1.2	Φωτοβολταϊκό στοιχείο.....	14
1.3	Ημιαγωγοί.....	16
1.4	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	18
1.5	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	19
1.6	Καμπύλη V-I.....	21
1.7	Παράγοντες απόδοσης των φωτοβολταϊκών.....	22
1.8	Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT).....	24
1.9	Φωτοβολταϊκά πλαίσια.....	26
1.10	Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	28
1.11	Παρούσα κατάσταση και ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα.....	29

Κεφάλαιο 2 Προσομοίωση φωτοβολταϊκού πλαισίου

2.1	Εισαγωγή.....	31
2.2	Λογισμικό.....	32
2.3	Μοντέλο εξομοίωσης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.....	32
2.3.1	Η παραμετρική μέθοδος.....	32
2.3.2	Η μέθοδος παρεμβολής.....	33
2.4	Η εφαρμογή.....	34
2.4.1	Βήμα 1. Εισαγωγή των χαρακτηριστικών του πλαισίου.....	35
2.4.2	Βήμα 2. Επιλογή των τιμών ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.....	37
2.4.3	Βήμα 3. Υπολογισμός και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.....	38

Κεφάλαιο 3 Δικτυακός τύπος

3.1	Εισαγωγή.....	41
3.2	Κεντρική σελίδα.....	42
3.3	Ερωτηματολόγιο.....	43

Κεφάλαιο 4 Η διάταξη καταγραφής των χαρακτηριστικών καμπυλών

4.1	Εισαγωγή.....	45
4.2	Λογισμικό.....	46
4.3	Σχεδίαση.....	47
4.4	Κατασκευή.....	50
4.5	Λειτουργία.....	51

Κεφάλαιο 5 Μετρήσεις

5.1	Εικονικό εργαλείο.....	53
5.2	Διάταξη.....	55
Συμπεράσματα.....		57

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ

1	Εισαγωγή.....	61
2	Βασική Θεωρία.....	63
2.1	Μετασχηματισμός περιστροφής.....	63
2.2	Αντιστροφέας δύο επιπέδων.....	63
2.2.1	Space Vectors.....	64
2.2.2	Υπολογισμός Χρονικών Διαστημάτων.....	66
2.2.3	Συντελεστής Διαμόρφωσης.....	67
2.2.4	Διακοπτική Ακολουθία.....	67
2.3	NPC Αντιστροφέας Τριών Επιπέδων.....	69
2.3.1	Space Vectors.....	70
2.3.2	Υπολογισμός Χρονικών Διαστημάτων.....	72
2.3.3	Σχεδιασμός Διακοπτικής Ακολουθίας.....	74
2.3.4	Περιορισμός Αρμονικών Άρτιας Τάξης.....	77
3	Μοντελοποίηση.....	81
3.1	Αντιστροφέας δύο επιπέδων.....	81
3.2	NPC Αντιστροφέας Τριών Επιπέδων.....	83
4	Συμπεράσματα.....	87
Βιβλιογραφία.....		89

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

1.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό της στους μεγάλους θερμοηλεκτρικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Οι παραπάνω μορφές παραγωγής ενέργειας καταναλώνουν πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο, ουράνιο ή άλλα ραδιενεργά υλικά, ή χρησιμοποιούν υδατοπτώσεις. Όλες όμως αυτές οι ενεργειακές πηγές έχουν σχετικά περιορισμένες προοπτικές αφού τα αέρια, υγρά ή στερεά και γενικά συμβατικά καύσιμα, εξαντλούνται βαθμιαία, ενώ και η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι ποσοτικά καθορισμένη και γεωγραφικά περιορισμένη. Επιπλέον, γνωστές είναι και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των παραπάνω μορφών παραγωγής ενέργειας, καθιστώντας απαραίτητη την ανάπτυξη και χρήση τεχνολογιών για την εκμετάλλευση ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Σε αυτό συμβάλει και η ξέφρενη πορεία του πετρελαίου που χαρακτηρίζεται από αστάθεια και υψηλές τιμές και η οποία μας απασχολεί τους τελευταίους μήνες.

Το ενδιαφέρον για την ηλιακή ενέργεια εντάθηκε όταν χάρι στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, διαπιστώθηκε η πρακτική δυνατότητα της εύκολης, άμεσης και αποδοτικής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με την κατασκευή φωτοβολταϊκών γεννητριών. Η φωτοβολταϊκή μέθοδος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια έχει κυρίως πλεονεκτήματα. Τα κυριότερα είναι:

- Ανανεώσιμη και ελεύθερα διαθέσιμη ενεργειακή πηγή.
- Πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (τουλάχιστον 25 χρόνια).
- Τα ηλιακά στοιχεία δεν έχουν κινούμενα μέρη και είναι σχεδόν απαλλαγμένα από την ανάγκη επίβλεψης και συντήρησης. Ακόμα και σε περίπτωση βλάβης, η αποκατάσταση της λειτουργίας γίνεται εύκολα λόγω της σπονδυλωτής μορφής της φωτοβολταϊκής διάταξης.
- Η φωτοβολταϊκή μετατροπή δεν προκαλεί ρύπανση στο περιβάλλον, ούτε θόρυβο και δε δημιουργεί απόβλητα ή άχρηστα παραπροϊόντα.
- Δίνει τη δυνατότητα ανεξαρτησίας από κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής, καθιστώντας τη μια λογικού κόστους παροχή ενέργειας σε εγκαταστάσεις απομακρυσμένες από το κυρίως δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

- Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί μπορούν να λειτουργούν με όσο μικρή ισχύ ζητηθεί.
- Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγικών υλικών και η συνεχής μείωση του κόστους παραγωγής τους, οδηγούν σε σταδιακή μείωση και του κόστους των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Τα Φ/Β συστήματα μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη λεγόμενη «Διεσπαρμένη Παραγωγή Ενέργειας» (Distributed Power Generation), η οποία αποτελεί το νέο μοντέλο ανάπτυξης σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαφοροποίηση στην παραγωγή ενέργειας, που προσφέρεται από τα Φ/Β συστήματα, σε συνδυασμό με την κατά μεγάλο ποσοστό απεξάρτηση από το πετρέλαιο και την αποφυγή περαιτέρω ρύπανσης του περιβάλλοντος, μπορούν να δημιουργήσουν συνθήκες οικονομικής ανάπτυξης σε ένα νέο ενεργειακό τοπίο που αυτή τη στιγμή διαμορφώνεται στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Φυσικά, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως το σχετικά υψηλό κόστος για τις περισσότερες εφαρμογές (ιδίως για τους οικιακούς καταναλωτές φτάνει τα 6000 Ευρώ/ kWp για ένα Φ/Β σύστημα) και η αδυναμία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας να παράγει συνεχώς ηλεκτρική ενέργεια λόγω των διακυμάνσεων της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Ουσιαστικά, πρόκειται για μία τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με απρόβλεπτο και στοχαστικό χαρακτήρα εξόδου που εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Βέβαια, με τη χρήση συσσωρευτών, μπορεί να επιτευχθεί αυτονομία.

Η πρόοδος όμως και η εξέλιξη που παρατηρείται στο πεδίο της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών είναι αλματώδης. Η βελτίωση της απόδοσης και η μείωση του κόστους παραγωγής των φωτοβολταϊκών στοιχείων υπόσχονται σημαντική ανάπτυξη στα επόμενα χρόνια. Εκτιμάται ότι το μέσο κόστος φωτοβολταϊκού συστήματος θα μειωθεί από 6000 Ευρώ/kWp που είναι σήμερα, σε 2250 Ευρώ/kWp το 2020.

Το ποσό της ενέργειας που περιέχεται στο φως του ήλιου, ονομάζεται ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και με μία πιο αυστηρή ορολογία, ροή ακτινοβολίας. Η ροή ακτινοβολίας ορίζεται ως το ποσό της ενέργειας της ακτινοβολίας που περνά στη μονάδα του χρόνου από τη μονάδα εμβαδού μιας επιφάνειας τοποθετημένης κάθετα στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας και εκφράζεται συνήθως σε kW/m². Επίσης στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η ηλιακή ακτινοβολία δεν μετατρέπεται εξολοκλήρου σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος από την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον, ενώ από τη ακτινοβολία που διεισδύει ένα μέρος πάλι συμβάλει στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αυτό οφείλεται στις αντιστάσεις που παρουσιάζει το Φ/Β στοιχείο αλλά και στην «επιλεκτικότητα» του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγικού υλικού. Αυτό θα περιγραφεί αναλυτικότερα στην παράγραφο 1.4.

1.2 Φωτοβολταϊκό στοιχείο

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να δώσει μέχρι 0.5-1.0 Volt και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40mA ανά cm² της επιφανείας του. Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθορίζεται

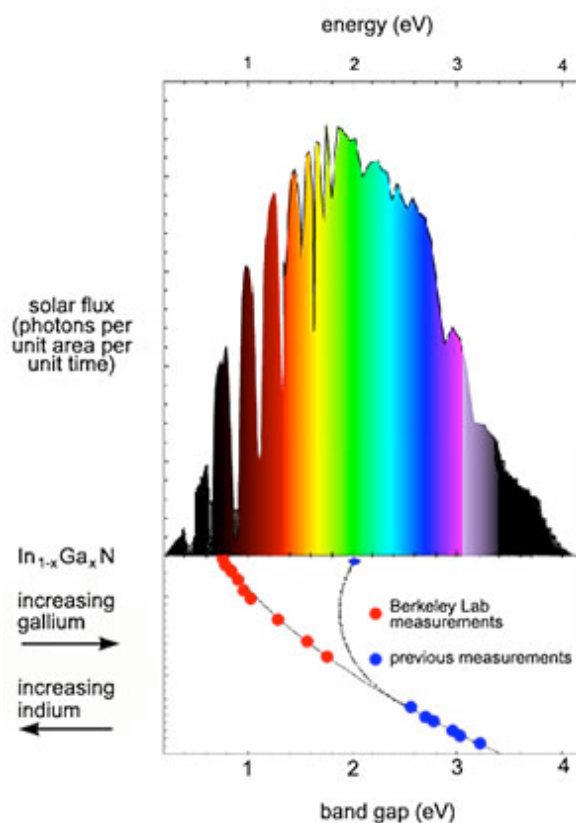
με κυριότερο κριτήριο όπως θα δούμε και στη συνέχεια, από την τιμή του ενεργειακού διακένου του η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου.

Το πυρίτιο αποτελεί το βασικότερο υλικό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων μιας και αποτελεί το κυρίαρχο υλικό στην κατασκευή ημιαγωγών. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από πυρίτιο κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας είτε μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά wafer, είτε λεπτά films πυριτίου (άμορφο).

Ως συντελεστής απόδοσης ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, ένας ημιαγωγός μπορεί να απορροφήσει μόνο τα φωτόνια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο. Και μάλιστα, από τα φωτόνια αυτά αξιοποιείται φωτοβολταϊκά το μέρος μόνο της ενέργειας τους που ισούται με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια μετατρέπεται σε συνήθως ανεπιθύμητη θερμότητα. Επομένως, η τιμή του ενεργειακού διακένου των ημιαγωγών είναι ένα από τα κυριότερα κριτήρια που καθορίζουν την απόδοσή τους. Έτσι λοιπόν, οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να πραγματοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό διάκενο περίπου 1,5eV και δεν ξεπερνούν το 29%.

Καθημερινά όμως οι ερευνητικές προσπάθειες πανεπιστημιακών εργαστηρίων οδηγούν στην αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Συγκεκριμένα στο Πανεπιστήμιο New South Wales' ARC Photovoltaic Centre of Excellence της Αυστραλίας [1] επιτεύχθηκε ένα νέο παγκόσμιο ρεκόρ με φωτοβολταϊκά στοιχεία που αγγίζουν το θεωρητικό 29%. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι αναφερόμαστε σε στοιχεία πυριτίου πρώτης γενιάς.

Αυτή η διάκριση γίνεται γιατί έρευνες στην Αριζόνα των ΗΠΑ [2] απέδειξαν ότι αν κατασκευαστεί Φ/Β στοιχείο από στρώσεις διάφορων ημιαγωγικών υλικών (και όχι αποκλειστικά από ένα υλικό) τότε μπορεί να απορροφηθεί σχεδόν όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, οδηγώντας σε πολύ μεγάλες θεωρητικές αποδόσεις. Το 2002 ερευνητές στο Materials Sciences Division (MSD) of Lawrence Berkeley National Laboratory, σε συνεργασία με το Cornell University και το Japan's Ritsumeikan University, ανακάλυψαν ότι το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού indium nitride δεν είναι 2 eV όπως είχε καταγραφεί, αλλά 0.7 eV [3]. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα για μετατροπή όλου του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, από το υπέρυθρο μέχρι και το υπεριώδες. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 1.1. Τα παραπάνω ισχυρίζονται ότι η θεωρητική απόδοση αυτών των στοιχείων μπορεί να ξεπεράσει το 48%, ανοίγοντας νέους δρόμους για την δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών στοιχείων.



Σχήμα 1.1 Με την κατασκευή φ/β στοιχείων από στρώσεις υλικών μπορεί να αξιοποιηθεί πολύ μεγαλύτερο εύρος του ηλιακού φάσματος [3]

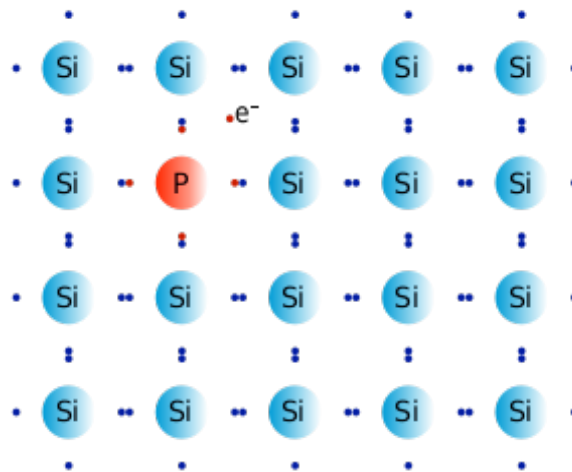
Γίνεται λοιπόν φανερό ότι βρίσκομαστε ακόμα σε μια εποχή που η πρόοδος και εξέλιξη είναι καθημερινή, κάτι που θα οδηγήσει μέσα στα επόμενα 20 χρόνια σε νέες τεχνολογίες με δραματική μείωση του κόστους παραγωγής και ταυτόχρονα με μεγαλύτερες αποδόσεις.

1.3 Ημιαγωγοί

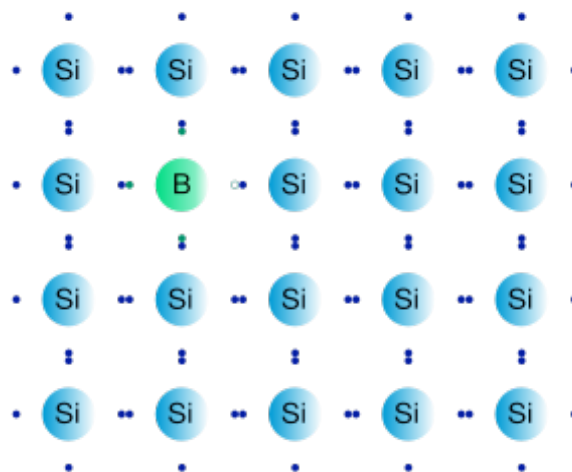
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Κάνοντας μια πιο αναλυτική προσέγγιση, στα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δε διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν όμως απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή. Η ενέργεια που παρέχεται, κατανέμεται στα άτομα του ημιαγωγού και προκαλεί την απελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια σθένους απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα, χάρη στην κινητική ενέργεια που απόκτησαν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.

Αν στα ηλεκτρόνια των δεσμών του κρυστάλλου προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας π.χ. αν δεχθούν μια δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια $h\nu$ μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο ($E_g < h\nu$), δε μπορούν να την απορροφήσουν και μένουν στη ζώνη σθένους. Αν όμως τα ενεργειακά κβάντα που προσφέρονται είναι ίσα ή μεγαλύτερα από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού ($E_g \geq h\nu$), τότε κάθε κβάντο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να το διεγείρει προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή.

Αν τώρα ο τετρασθενής ημιαγωγός Si, νοθευτεί με κάποιο πεντασθενές στοιχείο (φώσφορος, P) ή με κάποιο τρισθενές στοιχείο (βόριο, B), τότε έχουμε ημιαγωγό προσμίξεως τύπου-n και τύπου-p αντίστοιχα.



Σχήμα 1.2 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα νόθευσης τύπου-n [4]



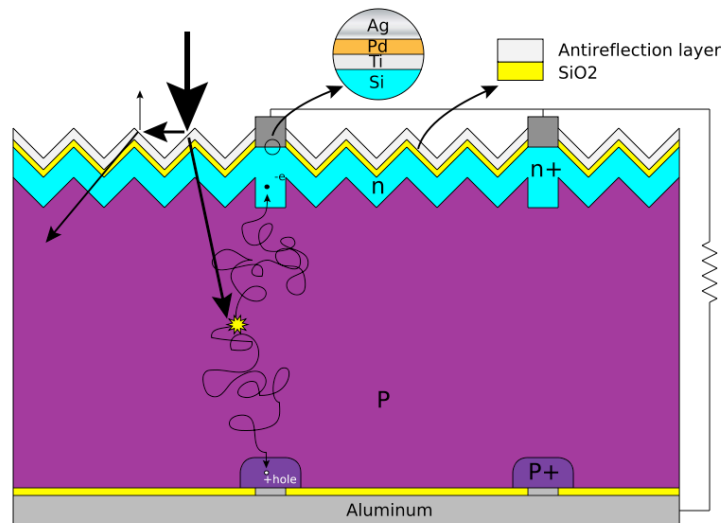
Σχήμα 1.3 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα νόθευσης τύπου-p [5]

Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P, θα ενωθούν με ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων Si και θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς (Σχήμα 1.2). Το πέμπτο ηλεκτρόνιο (φορέας πλειονότητας) θα συγκρατείται πολύ χαλαρά από το θετικό πυρηνικό φορτίο του P και με λίγη ενέργεια μπορεί να αποσπασθεί και να κινείται σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, αφήνοντας ένα ανιόν (P^+) που μένει ακίνητο στο πλέγμα. Δηλαδή το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται στο πλέγμα σαν δότης ηλεκτρονίων (τύπου-n ημιαγωγός). Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενών ατόμων B σε πλεγματικές θέσεις του Si, δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς (σχήμα 1.3). Με την απορρόφηση λίγης ενέργειας, ένα

ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να καλύψει την κενή θέση, αφήνοντας παράλληλα στην προηγούμενη θέση του μια οπή και μετατρέποντας το άτομο B σε κατίον (B^+). Δηλαδή το τρισθενές άτομο συμπεριφέρεται σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας) ή δότης οπών (τύπου-p ημιαγωγός).

Όταν σε μια περιοχή του ημιαγωγού υπάρχει δημιουργία ή έκχυση φορέων σε περίσσεια, αυτοί διαχέονται προς τις άλλες περιοχές του ημιαγωγού όπου η συγκέντρωση των αντίστοιχων φορέων είναι μικρότερη. Επίσης όταν έλθουν σε στενή επαφή ένας ημιαγωγός τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n, δηλαδή σχηματίζεται μια ένωση p-n (διάταξη διόδου ημιαγωγού), τότε ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πολύ λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια (περιοχή αραίωσης) των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την ισορροπία που υπήρχε πριν. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν τον νόμο δράσης των μαζών. Η συγκέντρωση των κατιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p και n, παραμένουν αμετάβλητες αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μια διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή, αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η διάδος που περιέχει την ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά του.

Στο σχήμα 1.4 φαίνεται η βασική δομή ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου από πυρίτιο και ο μηχανισμός λειτουργίας του.



Σχήμα 1.4 Δομή ενός φ/β στοιχείου από πυρίτιο και μηχανισμός λειτουργίας του [6]

1.4 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.3. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια

ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μια περίσσεια από ζεύγη φορέων πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου, μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n, οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ηλεκτροστατικού της πεδίου. Με τον τρόπο αυτό, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Η εκδήλωση της τάσης αυτής ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η διάταξη αποτελεί μια πηγή ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου.

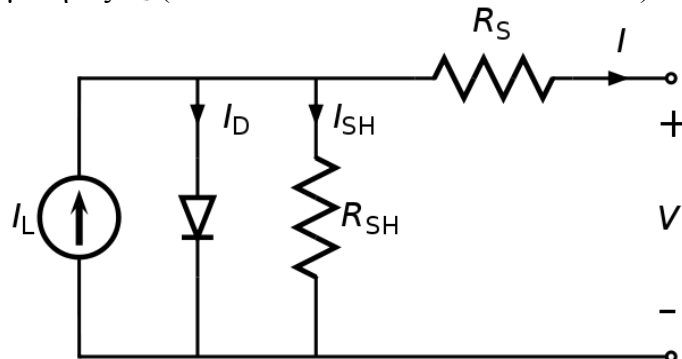
Όταν ένα Φ/Β στοιχείο δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_{PH} , που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Η πυκνότητα του φωτορεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$I_{PH} = e \int_0^{\lambda_g} S(\lambda)[1 - R(\lambda)]\Phi(\lambda)d\lambda \quad (1.4.a)$$

όπου e , είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο και λ_g , το μέγιστο χρησιμοποιούμενο μήκος κύματος ακτινοβολίας στον ημιαγωγό. $S(\lambda)$ είναι η φασματική απόκριση που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με τη φωτονική ροή $\Phi(\lambda)$, δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι $\lambda+d\lambda$. $R(\lambda)$ είναι ο δείκτης ανάκλασης της επιφάνειας του στοιχείου.

1.5 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το ισοδύναμο κύκλωμα για ένα μη ιδανικό στοιχείο είναι αυτό του σχήματος 1.5, που περιλαμβάνει τις αντιστάσεις R_S (series resistance) που παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό (κυρίως στο εμπρός επιφανειακό στρώμα του) και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Ακόμα επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω επίσης αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} η οποία ισούται με το ανάστροφο της αγωγιμότητας G_s (Shunt resistance- Shunt conductance).



Σχήμα 1.5 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου [7]

Για την μαθηματική περιγραφή του φωτοβολταϊκού φαινομένου μπορούμε να πούμε ότι σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρρευμα. Δηλαδή θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$I_{PH} = I_0 \left(e^{\frac{eV}{\gamma kT}} - 1 \right) \quad (1.5.a)$$

όπου I_0 , είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου, e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, k η σταθερά Boltzmann, T η απόλυτη θερμοκρασία και γ ένας συντελεστής που ανάλογα με την κατασκευή και την ποιότητα της διόδου παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 1 και 2.

Από την σχέση (1.5.a), η τάση ανοιχτοκυκλώματος θα είναι:

$$V_{oc} = \frac{\gamma kT}{e} \ln \left(\frac{I_{PH}}{I_0} + 1 \right), \quad I_0 \ll I_{PH}, \quad \Rightarrow V_{oc} = \frac{\gamma kT}{e} \ln \left(\frac{I_{PH}}{I_0} \right) \quad (1.5.b)$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της V_{oc} σε συνάρτηση με το I_{PH} , δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το Φ/Β στοιχείο και την εξάρτηση της από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού. Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρρευμα, $I_{sc} = I_{PH}$.

Όταν το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L , το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται με τη λύση της εξίσωσης :

$$I_L = I_{PH} - I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{e I_L R_L}{\gamma kT} \right) - 1 \right) \quad (1.5.c)$$

Όπως προκύπτει από την εξίσωση (1.5.c), θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης, δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος, για την οποία η ισχύς που παράγει το Φ/Β στοιχείο θα γίνεται μέγιστη ($P_{mp} = V_{mp} I_{mp}$). Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_{mp} , που δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

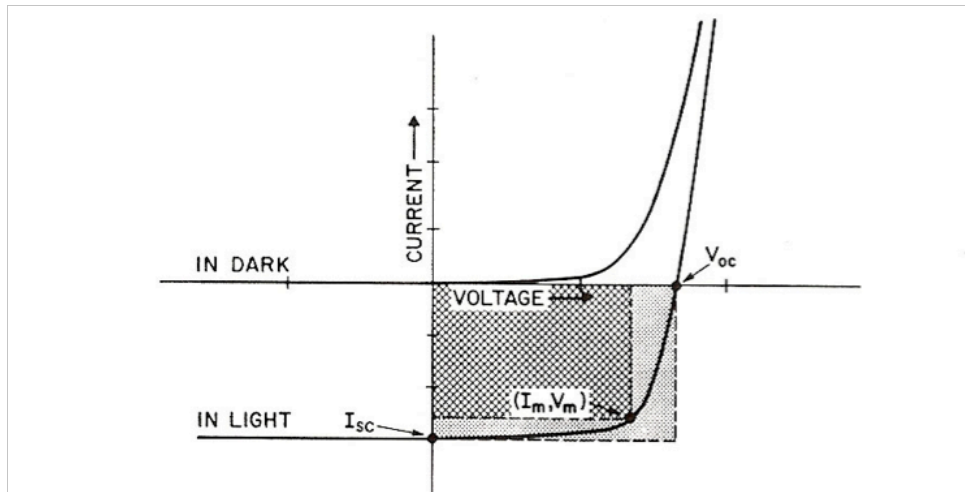
$$\frac{I_{PH}}{I_0} + 1 = \left(1 + \frac{e V_{mp}}{\gamma kT} \right) \exp \left(\frac{e V_{mp}}{\gamma kT} \right) \quad (1.5.d)$$

Στο διάγραμμα του σχήματος 1.6, φαίνονται τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους.

Ο λόγος της μέγιστης ισχύος $I_m V_m$ δια το γινόμενο της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, V_{oc} και του I_{sc} , ρεύματος βραχυκύκλωσης ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης (fill factor).

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (1.5.e)$$

Αντιπροσωπεύει το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V του στοιχείου υπό συνθήκες ακτινοβολίας, προς το εμβαδό που ορίζεται από τις τιμές I_{sc} και V_{oc} (σχήμα 1.6).

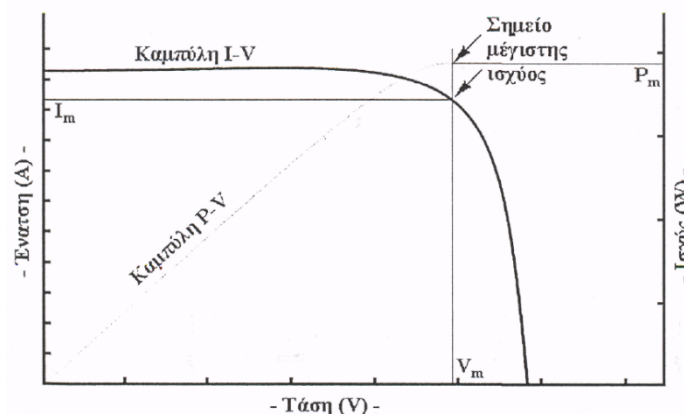


Σχήμα 1.6 Ο συντελεστής πλήρωσης ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού της σκούρας περιοχής δια το εμβαδό της μεγαλύτερης.

1.6 Καμπύλη V- I

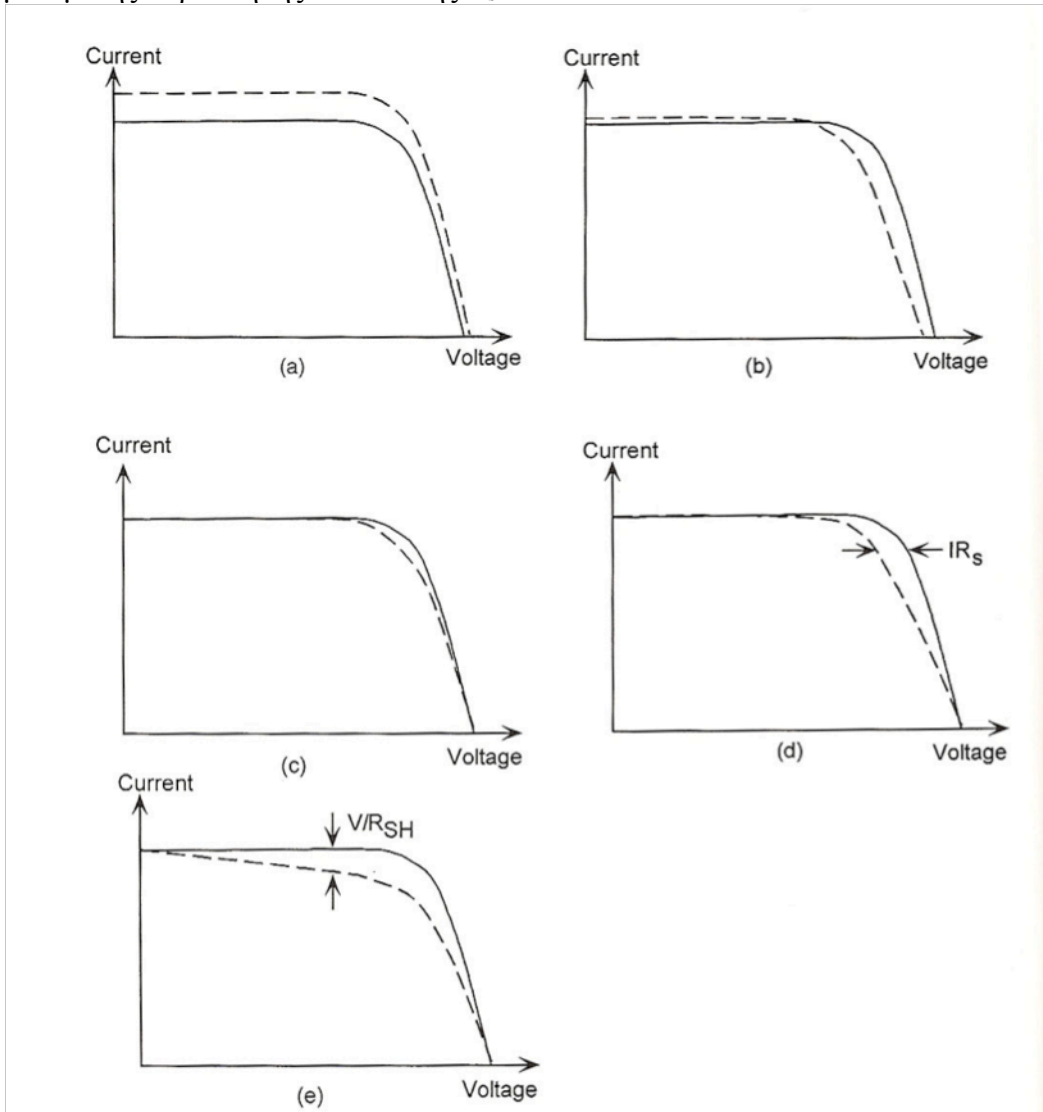
Ως πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το Φ/Β στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Δηλαδή, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται ριζικά και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Επίσης ένας παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και αντίστοιχη μείωση της απόδοσης του στοιχείου.

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας (και θερμοκρασίας) και για μεταβαλλόμενες τιμές στην αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτεί το ηλιακό κύτταρο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του κυττάρου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση (βραχυκυκλωμένη κατάσταση με μέγιστη τιμή ρεύματος I_{sc} και μηδενική τάση) και άπειρη αντίσταση (ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση με μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης V_{oc}), όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7 Καμπύλες I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου Si για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας [8]

Στο διάγραμμα 1.8 φαίνονται οι μεταβολές των χαρακτηριστικών I-V για μεταβαλλόμενες συνθήκες, δηλαδή σε περίπτωση αυξημένης πρόσπτωσης ηλιακής ακτινοβολίας, αυξημένης θερμοκρασίας του στοιχείου, αυξημένου συντελεστή ποιότητας, αυξημένης αντίστασης σειράς R_s , και μειωμένης παράλληλης αντίστασης R_{sh} .



Σχήμα 1.8 Αλλαγή της χαρακτηριστικής I-V σε σχέση με (a) αυξημένη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, (b) αυξημένη θερμοκρασία στοιχείου, (c) αυξημένος συντελεστής ποιότητας, (d) αυξημένα αντίσταση σειράς R_s , (e) μειωμένη παράλληλη αντίσταση R_{sh} .

1.7 Παράγοντες απόδοσης των φωτοβολταϊκών

Δεδομένης της μικρής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, έχει μεγάλη σημασία να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο μέρος που θα τοποθετηθεί. Γι' αυτόν τον σκοπό ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα τα οποία εξασφαλίζουν την όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση του ήλιου και την βέλτιστη λειτουργία του φωτοβολταϊκού.

-Ηλιακή ακτινοβολία: Ο ήλιος διαγράφει συγκεκριμένη τροχιά γύρω από τη γη, και ανάλογα με το που βρίσκεται το σημείο που θα τοποθετηθεί το Φ/Β πλαίσιο, προσδιορίζεται κατάλληλα ο προσανατολισμός του. Η αζιμούθια γωνία ορίζεται ως η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του ηλιακού συλλέκτη και στον

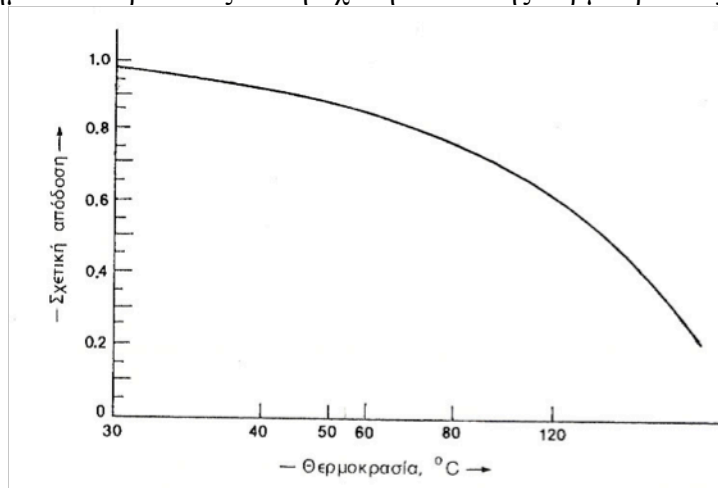
τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Για να έχουμε βέλτιστη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας η γωνία πρόσπτωσης πρέπει να είναι κάθετη στο συλλέκτη οπότε και η αζιμούθια γωνία μηδέν. Για το βόρειο ημισφαίριο όπου και βρίσκεται η Ελλάδα, η αζιμούθια γωνία είναι μηδέν, οπότε και ο προσανατολισμός του συλλέκτη πρέπει να είναι προς το νότο. Επίσης η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη, δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και στον ορίζοντα, είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που βρίσκεται αυτός. Για την Αθήνα π.χ. είναι ίση με 38 μοίρες. Για μεγαλύτερη απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι καλύτερο η κλίση των συλλεκτών να μην μένει σταθερή όλο το χρόνο, αλλά να αλλάζει δύο φορές το χρόνο. Για την Αθήνα για παράδειγμα, μια καλή λύση είναι να τοποθετούνται οι συλλέκτες υπό κλίση 60 μοιρών τους χειμερινούς μήνες και 30 μοιρών τους θερινούς.

-Θερμοκρασία. Ένας ακόμα παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών είναι η θερμοκρασία. Με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλείται αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και του FF.

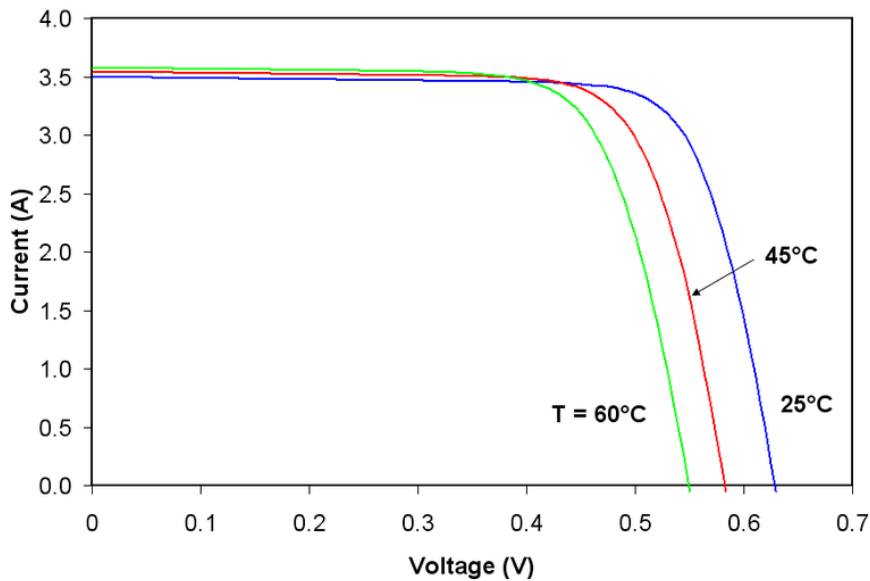
Αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με μια συμβατική θερμοκρασία είναι n , η τιμή του σε διαφορετική θερμοκρασία θ θα είναι:

$$n_{\theta} = n\sigma_{\theta}$$

όπου σ_{θ} , είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης. Στη συμβατική θερμοκρασία, ο σ_{θ} είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου. Στο σχήμα 1.9 παρουσιάζεται η σχέση απόδοσης-θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.9 Τυπική απόκλιση της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία τους. Η κλίμακα του άξονα των τεταγμένων δίνει το ποσοστό της απόδοσης του στοιχείου σε σχέση με την απόδοση του στη συμβατική θερμοκρασία 20°C. Η κλίμακα της θερμοκρασίας στον άξονα των τεταγμένων είναι λογαριθμική. [9]



Σχήμα 1.10 Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε καθαρά την διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών καμπυλών I-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου όταν έχουμε αλλαγή της θερμοκρασίας. [10]

Οι Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (Standard Test Conditions-STC) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου επιτυγχάνονται σε θερμοκρασία 25°C, ακτινοβολούμενο ηλιακό επίπεδο 1000 W/m² και μάζα αέρα AM 1,5 φασματικής διανομής. Δεδομένου ότι αυτές οι συνθήκες είναι όχι πάντα χαρακτηριστικές για το πώς τα πλαίσια λειτουργούν στο πεδίο εγκατάστασης, η πραγματική απόδοση εκτιμάται ότι είναι συνήθως 85 έως 90 τοις εκατό της πρότυπης δοκιμαστικής κατάστασης (STC).

Οι Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (STC) συνδυάζουν την ακτινοβολία μιας θερινής ημέρας, την θερμοκρασία στοιχείου μιας χειμερινής ημέρας και το ηλιακό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μιας ανοιξιάτικης μέρας. Αυτές οι καταστάσεις μέτρησης προφανώς δεν αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές καταστάσεις λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην περιοχή της εγκατάστασης.

1.8 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT)

Σε αντίθεση με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται πάντοτε από το φορτίο που τροφοδοτεί, δηλαδή την τιμή της αντίστασης που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του. Όταν δεν υπάρχει καθόλου αντίσταση, συναντάται η μέγιστη τάση εξόδου, η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} . Αντίθετα όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα της γεννήτριας, η τάση μηδενίζεται αλλά έχουμε μέγιστη ροή ρεύματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Ωστόσο, η ισχύς που παράγεται για κάθε ζεύγος τιμών τάσης-έντασης δεν είναι πάντα σταθερή αλλά μηδενίζεται όπως φαίνεται εύκολα στις ακραίες συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης-βραχυκύκλωσης και παρουσιάζει ένα μέγιστο για συγκεκριμένη τιμή τάσης-έντασης. Επιθυμητό είναι λοιπόν σε κάθε εγκατάσταση φωτοβολταϊκών οι συστοιχίες να λειτουργούν παράγοντας τις τιμές αυτές τάσης-έντασης που δίνουν κάθε στιγμή τη μέγιστη ισχύ.

Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια τροφοδοτεί απευθείας ένα συγκεκριμένο φορτίο κάτι τέτοιο δεν είναι πραγματοποιήσιμο καθώς η τιμή του φορτίου έχει συγκεκριμένη αντίσταση. Όταν όμως μεταξύ γεννητριών και κατανάλωσης παρεμβάλλονται ηλεκτρονικά για τον έλεγχο της

ισχύος, για την ρύθμιση φόρτισης συσσωρευτών, για την ανύψωση ή και την αλλαγή μορφής της παραγόμενης τάσης, τότε υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργούν αυτές σε ένα μέγιστο σημείο. Αυτό το αναλαμβάνουν ειδικοί ανιχνευτές της μέγιστης ισχύος, ή maximum power point trackers (MPPT).

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Η λογική που συνήθως ακολουθείται για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος είναι η εξής: Παρακολουθώντας συνεχώς τις τιμές τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλούν ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης, αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας.

Όπως προαναφέρθηκε στην εξέταση των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα από την τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό για κάθε στιγμή το Φ/Β στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.

Η παραγόμενη ισχύς από ένα Φ/Β στοιχείο είναι $P=VI$. Όταν η λειτουργία του στοιχείου μετατοπιστεί σε διαφορετικό σημείο της καμπύλης $V-I$ λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, τότε η τάση μεταβάλλεται κατά dV και η ένταση κατά dI .

Τότε η ισχύς είναι

$$P = VI = (V + dV)(I + dI) \quad (1.8.a)$$

Αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξης έχουμε

$$dP = dV \cdot I + dI \cdot V \quad (1.8.b)$$

Όπως είναι φανερό από την καμπύλη ισχύος του φωτοβολταϊκού, ο όρος dP (η κλίση δηλαδή της καμπύλης ισχύος) είναι μηδέν στο σημείο μέγιστης ισχύος. Στο σημείο αυτό (MPP) λοιπόν η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$0 = dV \cdot I + dI \cdot V$$

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (1.8.c)$$

Στην εξίσωση αυτή, ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής Z_d ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση Z_s . Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

1. Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην φωτοβολταϊκή πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής Z_d και η στατική αντίσταση Z_s . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή $Z_d = -Z_s$.

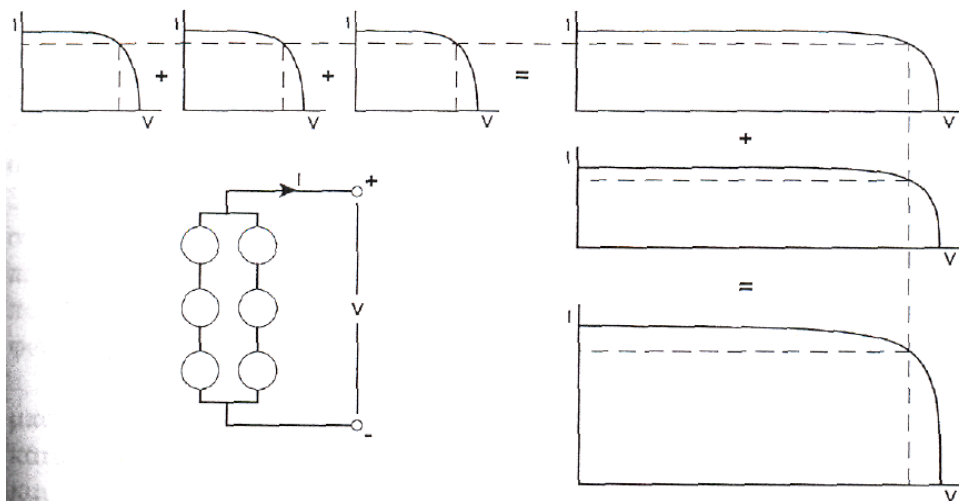
2. Μια δεύτερη μέθοδος ελέγχου είναι να αυξάνεται η τάση όσο ισχύει η συνθήκη $\frac{dP}{dV} > 0$ δηλαδή η ισχύς αυξάνεται με αύξηση της τάσης. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται. Η τάση σταθεροποιείται όταν μηδενίζεται σχεδόν αυτός ο ρυθμός μεταβολής.

3. Μια τρίτη μέθοδος κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή $\frac{V_{mp}}{V_{oc}} = K$, (περίπου 0,72 για τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου). Ένα Φ/Β στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φωτοβολταϊκών στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο $K \cdot V_{oc}$, που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά η γεννήτρια στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να αυψώσει ή να μειώσει την τάση μέχρι να εντοπιστεί το σημείο μέγιστης ισχύος.

1.9 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Η τάση και η ισχύς των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι πολύ μικρή για να ανταποκριθεί στην τροφοδότηση των συνηθισμένων ηλεκτρικών καταναλώσεων ή για τη φόρτιση των συσσωρευτών. Ειδικότερα, η τάση που εκδηλώνει ένα συνηθισμένο Φ/Β στοιχείο πυριτίου του εμπορίου, σε κανονική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μόλις 0.5V περίπου και η ηλεκτρική ισχύς που παράγει είναι μέχρι μόλις 0.4W περίπου. Επίσης, είναι γνωστό ότι υπό ιδανικές συνθήκες δύο ή περισσότερες ίδιες πηγές τάσης σε σειρά προστίθενται όπως προστίθενται και δύο ή περισσότερες πηγές ρεύματος που συνδέονται παράλληλα. Για τον λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που προορίζονται για τη συγκρότηση φωτοβολταϊκών γεννητριών συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα και τοποθετούνται σε ενιαίο πλαίσιο με κοινή ηλεκτρική έξοδο ώστε να τροφοδοτούν στην έξοδο τους με την επιθυμητή από τον κατασκευαστή τάση και ισχύ (σχήμα 1.11).



Σχήμα 1.11 Τοποθέτηση φ/β στοιχείων σε σειρά ή/και παράλληλα με ανάλογη μεταβολή της τάσης εξόδου

Όταν τα ηλιακά κύτταρα έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά, η μέγιστη ισχύς που παίρνουμε από ένα Φ/Β πλαίσιο ισούται με το γινόμενο της μέγιστης ισχύος που μπορεί να τροφοδοτήσει κάθε στοιχείο ξεχωριστά, επί τον αριθμό των στοιχείων. Η μέγιστη τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου προσδιορίζεται από τον αριθμό των συγκεκριμένων ηλιακών στοιχείων που συνδέονται σε σειρά και το μέγιστο ρεύμα στην έξοδο (για κανονικά επίπεδα ηλιοφάνειας) προσδιορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων (ή ομάδα εν σειρά στοιχείων) που συνδέονται παράλληλα. Η χαρακτηριστική I-V καμπύλη ενός συνόλου ίδιων ηλιακών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά ή/και παράλληλα, προκύπτει με αντίστοιχο συνδυασμό των χαρακτηριστικών των επιμέρους στοιχείων όπως φαίνεται στο σχήμα 1.11.

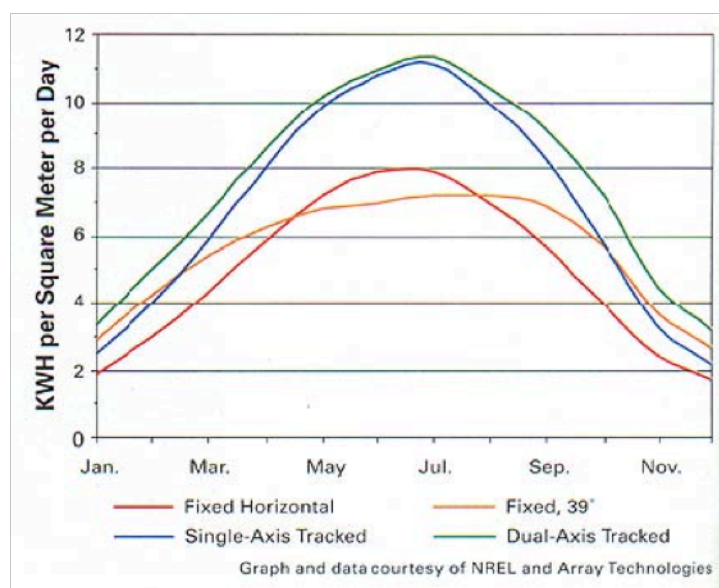
Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που κυκλοφορούν στο εμπόριο, αποτελούνται από στοιχεία τα οποία προστατεύονται από πάνω με φύλλο γυαλιού ή διαφανούς πλαστικού και από κάτω με φύλλο ανθεκτικού υλικού, συνήθως μετάλλου ή ενισχυμένου πλαστικού. Το πάνω και κάτω προστατευτικό φύλλο συγκρατούνται μεταξύ τους στεγανά και μόνιμα. Διαμορφώνεται έτσι η βιομηχανική μονάδα η οποία χρησιμοποιείται ως συλλέκτης στη συγκρότηση των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Επίσης, συχνά χρησιμοποιούνται στα πλαίσια δίοδοι για την προστασία (δίοδοι απομόνωσης, blocking diodes) και την βελτίωση της απόδοσης τους (δίοδοι παράκαμψης, bypass diodes).

Πολύ σημαντικός είναι ο προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων της συστοιχίας σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας και περιγράφεται με την κλίση και την αζιμούθια γωνία των πλαισίων. Προφανώς η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε ένα συλλέκτη θα πραγματοποιείται όταν η επιφάνεια του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Στις συνηθισμένες περιπτώσεις τα πλαίσια τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμούθια γωνία, που επιλέγονται ώστε η γωνία πρόσπτωσης να είναι όσο το δυνατό μικρότερη κατά τη διάρκεια του έτους. Στο βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι 0° (προς νότο). Βέβαια η βέλτιστη κλίση, λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου στη διάρκεια του έτους, είναι διαφορετική για κάθε εποχή οπότε και επιλέγεται ανάλογα την εφαρμογή κάποια διαφοροποίηση στην κλίση από την παράλληλο.

Οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες βέβαια, είναι δυνατό εκτός από τη συστοιχία να περιλαμβάνουν και επιπλέον εξοπλισμό και με βάση αυτόν κατατάσσονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες.

1. Τις απλές διατάξεις, όπου τα πλαίσια τοποθετούνται σε σταθερό σημείο και η συστοιχία δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία με τη φυσική της πυκνότητα και διακύμανση στη διάρκεια της ημέρας.
2. Τις διατάξεις με κινητά πλαίσια (trackers) που περιστρέφονται αυτόματα και παρακολουθούν συνεχώς την πορεία του ήλιου στον ουρανό, ώστε τα ηλιακά στοιχεία να δέχονται κάθετα την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια της ημέρας. Τα κινητά πλαίσια είναι κινούμενες πλατφόρμες πάνω στις οποίες τοποθετούνται οι ηλιακοί συλλέκτες. Οι πλατφόρμες αυτές είναι συνδεδεμένες με κύκλωμα το οποίο ελέγχει κάθε στιγμή την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ένας κινητήρας στη βάση τους επιτρέπει την κίνηση της πλατφόρμας από την ανατολή μέχρι τη δύση. Επίσης συναντώνται εφαρμογές που επιτρέπουν την κίνηση και στο κατακόρυφο επίπεδο, δηλαδή μεταβάλλουν και την κλίση των συλλεκτών. Το κύκλωμα ελέγχου, έχει φωτοαισθητήρες τοποθετημένους πάνω στην πλατφόρμα με ίδια φυσικά κλίση με τους ηλιακούς συλλέκτες. Μια μικρή διαταραχή στον προσανατολισμό της πλατφόρμας θα προκαλέσει αύξηση ή μείωση της προσπίπτουσας

ηλιακής ακτινοβολίας. Εάν υπάρξει αύξηση τότε το κύκλωμα ελέγχου θα περιστρέψει την πλατφόρμα προς την κατεύθυνση που προκάλεσε την αύξηση. Αντίθετα μια μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας θα την περιστρέψει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Μετρήσεις δείχνουν ότι η χρήση μιας τέτοιας τεχνολογίας μπορεί να αυξήσει την απόδοση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών από 10% τους χειμερινούς μήνες μέχρι 40% τους θερινούς, εν συγκρίσει με την περίπτωση σταθερά τοποθετημένων συλλεκτών. Ωστόσο, το υψηλό κόστος που συνεπάγεται η εγκατάσταση πολλών τέτοιων μηχανισμών, ιδιαίτερα αν πρόκειται για πολλές συστοιχίες συλλεκτών, αλλά και η μικρότερη μηχανική αντοχή στους ανέμους, δεν έχουν διαδώσει ευρέως αυτή την τεχνολογία.



Σχήμα 1.13 Παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρισμού ανά m^2 από Φ/Β πλαίσιο, για διάφορες τεχνικές τοποθέτησης. Από την υψηλότερη καμπύλη: σύστημα παρακολούθησης ηλίου σε δύο άξονες, σύστημα παρακολούθησης με ένα άξονα, τοποθετημένο με κλίση 39, τοποθετημένο οριζόντια. Τοποθεσία Sacramento California.

3. Τις διατάξεις που με τη χρησιμοποίηση φακών ή κατόπτρων συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και την στέλνουν συμπυκνωμένη πάνω στα ηλιακά στοιχεία. Για την αποφυγή υπερθέρμανσης, στις συγκεντρωτικές φωτοβολταϊκές διατάξεις απαιτείται συνήθως η τεχνική ψύξης των στοιχείων με κυκλοφορία ψυχρού αέρα ή ψυκτικών υγρών.

1.10 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν αναπτυχθεί τόσο για μικρές, όσο και για μέσης και μεγάλης κλίμακας εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι θεωρητικά απεριόριστες δυνατότητες σύνδεσης στοιχείων και πλαισίων σε συνδυασμό με το μικρό πάχος και βάρος των τελευταίων διευρύνουν τα πεδία εφαρμογών και εμπλουτίζουν τους τρόπους εγκατάστασης των συστημάτων.

Γενικά για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της απόστασης από την κατανάλωση, χωρίς να επηρεάζεται συνήθως από ιδιομορφίες της θέσης που επιλέγεται. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, τα πλαίσια είναι δυνατό είτε να τοποθετηθούν ελεύθερα στο έδαφος ή επάνω σε κτήρια ή σε άλλες κατασκευές είτε να χρησιμοποιηθούν ως δομικά στοιχεία ή υλικά επικάλυψης στεγών ή επένδυσης όψεων.

Δυο βασικές παράμετροι επηρεάζουν τον τρόπο τοποθέτησης σε σχέση με την απόδοση: η κλίση της επιφάνειας του πλαισίου και η θερμοκρασία του. Η άμεση κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια απορρόφησης μεγιστοποιεί την απόδοση του πλαισίου, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας του την ελαττώνει. Η πίσω επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου πρέπει να αερίζεται επαρκώς, ώστε να αποφεύγεται αύξηση της θερμοκρασίας της.

1.11 Παρούσα κατάσταση και ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα

Στα πλαίσια του Νόμου 3468/2006 για την προώθηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκούς σταθμούς, καταρτίστηκε Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών από την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) και εγκρίθηκε από τον υπουργό ανάπτυξης [11]. Το πρόγραμμα αυτό, του οποίου η πρώτη φάση υλοποίησης άρχισε από την έναρξη ισχύος του νέου νόμου και λήγει την 31. 12. 2020, αφορά την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών που εγκαθίστανται στην ελληνική επικράτεια. Έπειτα από αλλαγές που έγιναν στον αρχικό σχεδιασμό, το πρόγραμμα αφορά την ανάπτυξη σταθμών συνολικής ισχύος τουλάχιστον 640 MWp, για σταθμούς που συνδέονται με το Σύστημα, απευθείας ή μέσω Δικτύου, και συνολικής ισχύος τουλάχιστον 200 MWp, για σταθμούς που συνδέονται στο Δίκτυο των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών. Το «Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών» θέτει ως όριο για την αδειοδότηση της παραπάνω αναφερόμενης ισχύος, το έτος 2010.

Η ΡΑΕ ανακοίνωσε στις 7 Απριλίου 2008 την αναστολή της υποβολής αιτήσεων για την χορήγηση άδειας παραγωγής και την εξαίρεση από την υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής από φωτοβολταϊκούς σταθμούς σε όλες τις περιοχές της ηπειρωτικής χώρας, εκτός των νησιών. Η αιτία αναστολής οφείλεται στο γεγονός ότι το επενδυτικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών ήταν εξαιρετικά μεγάλο, όπως προκύπτει από τα στοιχεία της ΡΑΕ. Η συνολική ισχύς των αιτήσεων που έχουν υποβληθεί έως σήμερα, για την χορήγηση εξαίρεσης από την υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής υπερβαίνει κατά πολύ την ισχύ που αναφέρεται στο «Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών» ως όριο. Έως τον Απρίλιο του 2008 οπότε ανακοινώθηκε η αναστολή της υποβολής αιτήσεων στη ΡΑΕ, είχαν ήδη υποβληθεί, και αφορούν συστήματα άνω των 20 kWp, 7947 αιτήσεις συνολικής ισχύος 3.756 MWp περίπου.

Τελευταία διεξάγεται δημοσίως διάλογος σχετικά με τα κίνητρα και συνεπώς με το κόστος για την υλοποίηση του προγράμματος φωτοβολταϊκών αλλά και την συνέχεια υποστήριξής τους. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα προγράμματα που σχεδιάστηκαν στις χώρες ηγέτες στις εφαρμογές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, για τον υπολογισμό των οικονομικών κινήτρων των προγραμμάτων προώθησης, θεωρούσαν σαν χρόνο αποπληρωμής του φωτοβολταϊκού συστήματος τα 10 περίπου χρόνια.

Πράγματι λοιπόν, το πλαίσιο στήριξης των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα είναι πολύ ελκυστικό και κάτω από τις καλύτερες προϋποθέσεις μια επένδυση αποπληρώνεται σε 6 χρόνια. Βέβαια, οι τιμές για την προμήθεια και εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα κυμαίνονται σε υψηλότερα επίπεδα από τις ωριμότερες αγορές φωτοβολταϊκών στην Ευρώπη (Γερμανία, Ισπανία) αλλά αυτό είναι φυσικό καθώς με την ανάπτυξη της αγοράς οι όγκοι και η οργάνωση των δραστηριοτήτων των επιχειρήσεων και η εκπαίδευση του προσωπικού θα μειώσουν το αρχικά μεγαλύτερο κόστος σχεδίασης, προμήθειας, εγκατάστασης και συντήρησης.

Αυτό που χρειάζεται στην Ελληνική αγορά είναι αφού ξεκινήσουν οι εγκαταστάσεις και η λειτουργία της αγοράς, να ακολουθήσει μια προοδευτική μείωση των ενισχύσεων είτε με μείωση της τιμής αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας (feed-in-tariff) είτε της επιδότησης του αρχικού κόστους επένδυσης. Η υλοποίηση του συνδιασμού μέτρων και τα κίνητρα θα είναι αντικείμενο μιας μελέτης που πρέπει να γίνει.

Σε μια πρώτη προσέγγιση, έχοντας υπόψη την Ευρωπαϊκή εμπειρία και την διαμορφωμένη κατάσταση στην Ελλάδα, προτείνεται να προχωρήσουν οι διαδικασίες για τα φωτοβολταϊκά έργα που έχουν πάρει άδεια παραγωγής και για τα υπόλοιπα έργα να μελετηθεί και να ανακοινωθεί ένα νέο πλαίσιο ενισχύσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις.

Μελλοντικά, η μεγάλη διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων πρέπει να έρθει στον κτηριακό τομέα που αποτελεί τον "φυσικό χώρο" των φωτοβολταϊκών. Η τεχνολογία αυτή ενδείκνυται για ενσωμάτωση σε κτήρια, αποτελώντας έτσι την κυριότερη ίσως συνιστώσα ενός ενεργειακού μοντέλου αποκεντρωμένης παραγωγής. Σε χώρες με αναπτυγμένη τη σχετική αγορά, όπως η Γερμανία, τα μικρά συστήματα σε κτήρια (ισχύος < 10 kWp) αποτελούν το 40% της αγοράς, ενώ συνολικά ο κτηριακός τομέας έχει ένα μερίδιο της τάξης του 90%.

Μετά το πρώτο φωτοβολταϊκό πρόγραμμα που ήταν ελκυστικό για επιχειρήσεις και για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε περιοχές κυρίως εκτός πόλεων και συνεπώς μακριά από την κατανάλωση, το επόμενο πρόγραμμα θα πρέπει να επικεντρώνεται στην εγκατάσταση και ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτήρια. Το πρόγραμμα θα πρέπει να είναι κατάλληλο για ιδιώτες, δηλαδή απλοποιημένο, αλλά και για επιχειρήσεις. Παράλληλα τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα συνεισφέρουν στην επίτευξη των στόχων του 2020 σχετικά με την ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ και συγχρόνως θα γίνει ουσιαστική εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της διεσπαρμένης παραγωγής.

Προσομοίωση φωτοβολταϊκού πλαισίου

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα που έγιναν για το χτήσιμο της εφαρμογής που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός Φ/Β πλαισίου. Μέσα από αυτή την εφαρμογή, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να παρακολουθεί τις χαρακτηριστικές καμπύλες V-I και P-V ενός πλαισίου της επιλογής του, ανάλογα με τη θερμοκρασία του πλαισίου και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό. Μέσα από αυτή την προσομοίωση, ο χρήστης μπορεί να πληροφορηθεί άμεσα και με σχετική ακρίβεια για την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου Φ/Β πλαισίου, γνωρίζοντας μόνο τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που δίνονται στο data sheet του πλαισίου. Αυτό δίνει άπειρες δυνατότητες πειραματισμού στο χρήστη, καθώς μπορεί να αλλάζει κατά βούληση το πλαίσιο αλλά και τις συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, λαμβάνοντας κάθε φορά τις μετρήσεις που επιθυμεί. Έτσι, η σύγκριση της συμπεριφοράς διαφορετικών Φ/Β πλαισίων υπό τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες ή ακόμα και του ίδιου πλαισίου υπό άλλες συνθήκες, μπορεί να αποδειχθεί ένα απλό και ισχυρό εργαλείο στα χέρια ενός ερευνητή ή ένα κατανοητό και ευχάριστο μέσο εκπαίδευσης στα χέρια του σπουδαστή.

2.2 Λογισμικό

Το Labview είναι μια πλατφόρμα προγραμματισμού της National Instruments, η οποία χρησιμοποιεί γραφικά αντί για εντολές. Ο προγραμματισμός υλοποιείται με βάση τη ροή δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό η ροή του προγράμματος καθορίζεται από τα δεδομένα και όχι από μια ακολουθία εντολών, όπως στις συνηθισμένες γλώσσες προγραμματισμού. Το Labview βρίσκει κυρίως εφαρμογή στην συλλογή δεδομένων (Data Acquisition) και τον εποπτικό έλεγχο (Supervisory Control). Απλοποιεί σημαντικά τον προγραμματισμό και βελτιώνει κατά πολύ τους χρόνους ανάπτυξης και διόρθωσης σφαλμάτων (debugging).

Τα προγράμματα σε Labview ονομάζονται Εικονικά Όργανα (Virtual Instruments), επειδή τόσο στη μορφή τους όσο και στη λειτουργία τους, προσομοιάζουν πραγματικά όργανα, όπως για παράδειγμα παλμογράφους και πολύμετρα. Τα VIs μπορούν να δέχονται δεδομένα από διάφορες πηγές, τα οποία επεξεργάζονται και στη συνέχεια, είτε απεικονίζουν τα αποτελέσματα, είτε τα αποθηκεύουν σε αρχεία για μελλοντική χρήση.

Ένα Εικονικό Όργανο αποτελείται από τρία μέρη:

- Την πρόσοψη (front panel) που αποτελεί τη διεπαφή (interface) μεταξύ του οργάνου και του χρήστη.
- Το διάγραμμα ροής (block diagram) το οποίο συνίσταται από εικονίδια γραφικών συνδεδεμένα μεταξύ τους, καθορίζοντας έτσι τη ροή του προγράμματος.
- Ένα καθοριστικό για κάθε VI εικονίδιο (icon and connector pane) στο οποίο φαίνονται όλες οι δυνατότητες συνδέσεων στο συγκεκριμένο VI. Με τη χρήση αυτού του εικονιδίου, το VI είναι δυνατόν να ενταχθεί σε άλλο VI, οπότε ονομάζεται subVI. Είναι αντίστοιχο της υπορουτίνας που συναντάμε στις συνηθισμένες γλώσσες προγραμματισμού.

Τόσο το front panel όσο και το block diagram χρησιμοποιούν ένα κοινό μενού εργαλείων (tools palette). Για τη διαμόρφωση του front panel υπάρχει ένα μενού ελέγχου και απεικόνισης, ενώ αντίστοιχα στο block diagram υπάρχει ένα μενού λειτουργιών και συναρτήσεων.

Στη συγκεκριμένη εργασία το Labview αποτελεί την καρδιά της εφαρμογής καθώς μέσω αυτού γίνεται η προσομοίωση του φωτοβολταϊκού πλαισίου αλλά και ο χειρισμός της υλοποιηθείσας διάταξης.

2.3 Μοντέλο εξομοίωσης της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Το πιο σημαντικό στοιχείο της εργαστηριακής εξομοίωσης είναι η μαθηματική μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εξομοίωση των χαρακτηριστικών εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ξεχωρίζουν δύο: α) Παραμετρική μέθοδος και β) μέθοδος παρεμβολής. [12]

2.3.1 Η παραμετρική μέθοδος

Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει ότι όλες οι θεωρητικές παράμετροι είναι διαθέσιμες. Η τάση εξόδου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας αυτές τις θεωρητικές παραμέτρους, την ακτινοβολία και

την θερμοκρασία. Το φωτορεύμα I_{PH} (A) ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας T (K), της ακτινοβολίας ϕ (W/m^2), της επιφάνειας του πλαισίου S (cm^2) και των σταθερών συντελεστών a και β και δίνεται από τον τύπο:

$$I_{PH} = a(1 + \beta T)\phi S$$

Οι σταθερές a και β ορίζονται ως

$$a = \frac{dI_{sc}}{dT}$$

και

$$\beta = \frac{dV_{oc}}{dT}$$

και ονομάζονται συντελεστές θερμοκρασίας.

Το ρεύμα κόρου είναι μια συνάρτηση της επιφάνειας και της θερμοκρασίας και δίνεται από τον τύπο

$$I_0 = C_M S T^3 \exp\left(-\frac{E_{GO}}{kT}\right)$$

όπου το ενεργειακό κενό E_{GO} (eV) του υλικού κατασκευής είναι μετρημένο στους $0^\circ K$, k είναι η σταθερά Boltzmann (J/K) και C_M είναι μια σταθερά που εξαρτάται από το πλαίσιο.

Το συνολικό ρεύμα εξόδου του πλαισίου είναι η διαφορά μεταξύ του φωτορεύματος και του ρεύματος κόρου της διόδου και δίνεται από τον τύπο

$$I = N_P I_{PH} - N_P I_0 \exp\left(V_T \left(\frac{V}{N_S} + \frac{IR_S}{N_P}\right) - 1\right) \quad (2.3.1.a)$$

όπου V_T (V/K) είναι η θερμική τάση, R_S (Ω) είναι η αντίσταση σειράς του πλαισίου και N_P και N_S είναι το πλήθος των στοιχείων παράλληλα και σε σειρά αντίστοιχα. Η τελευταία εξίσωση μπορεί να γραφεί ως προς την τάση εξόδου

$$V = N_S \left(V_T \ln \left[\frac{(N_P I_{PH} - I)}{N_P I_0} + 1 \right] - \frac{IR_S}{N_P} \right) \quad (2.3.1.b)$$

2.3.2 Η μέθοδος παρεμβολής

Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν οι θεωρητικές παράμετροι δεν είναι διαθέσιμες. Σε αυτή την περίπτωση, χρειάζονται τέσσερα στοιχεία: η τάση ανοικτοκύκλωσης του πλαισίου V_{oc} , το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος V_{mp} και το αντίστοιχο ρεύμα I_{mp} . Επιπρόσθετα, μπορεί να γίνει μια προσέγγιση της αντίστασης σειράς. Αυτές οι μετρήσεις γίνονται κάτω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς T_{REF} και ακτινοβολία ϕ ίση με $1000 W/m^2$. Ο τύπος που απορρέει μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Από τα τέσσερα αυτά στοιχεία υπολογίζονται δύο σταθερές

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) \exp\left(\frac{-V_{mp}}{C_2 V_{oc}}\right) \quad C_2 = \frac{\left(\frac{V_{mp}}{V_{oc}} - 1\right)}{\ln\left[1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right]}$$

Μετά υπολογίζονται οι παράμετροι D_I και V_R που δείχνουν πώς επηρεάζουν το αποτέλεσμα η ακτινοβολία και η θερμοκρασία:

$$D_I = a\phi(T - T_{REF}) + I_{sc}(\phi - 1)$$

$$V_R = V + \beta(T - T_{REF}) + R_s D_I$$

Τέλος, το ρεύμα και η τάση εξόδου δίνονται από τους τύπους:

$$I = I_{sc} \left(1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{V_R}{C_2 V_{oc}}\right) - 1\right]\right) + D_I \quad (2.3.2.a)$$

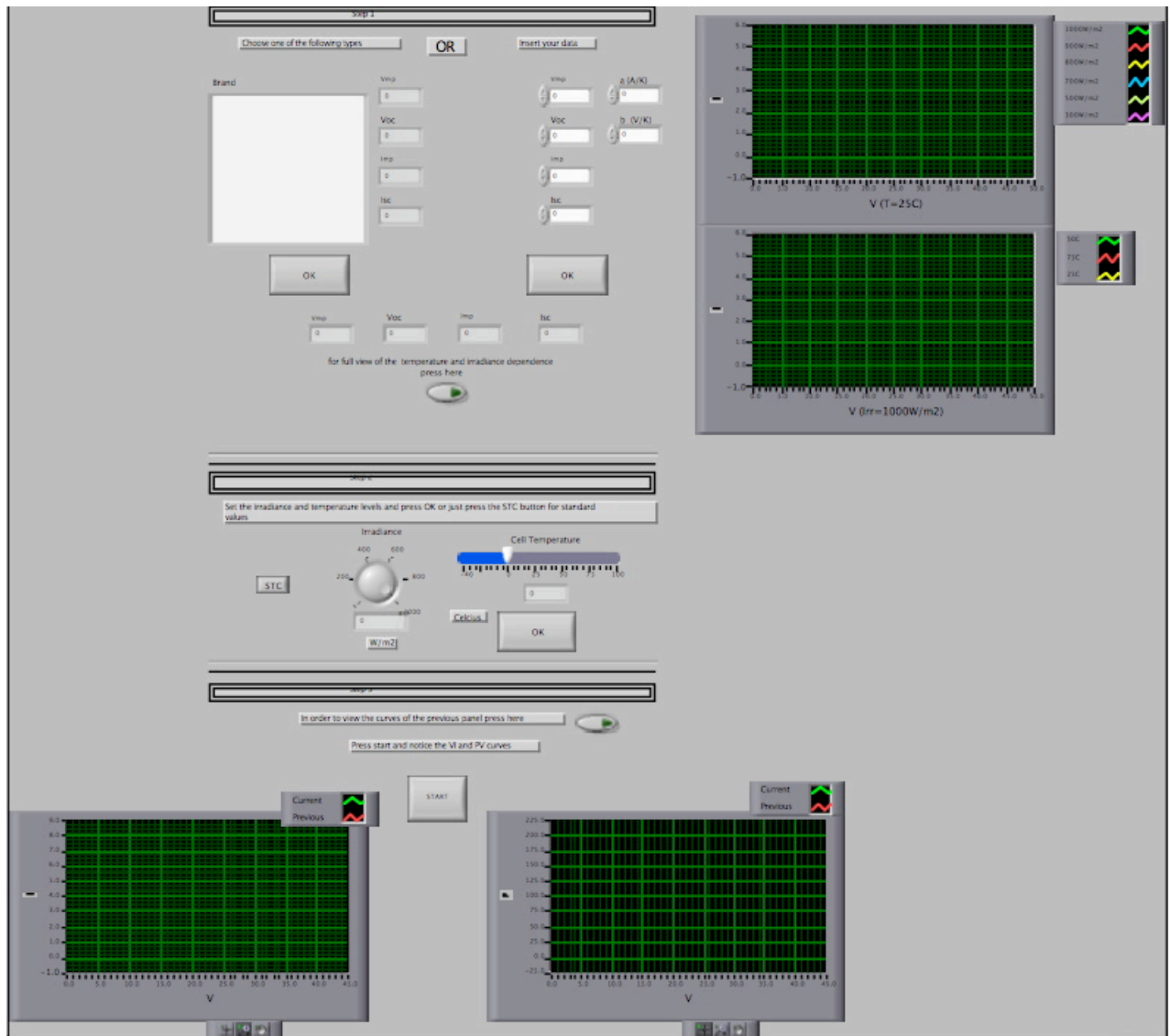
$$V = C_2 V_{oc} \ln\left(\frac{\left[1 - \frac{I - D_I}{I_{sc}}\right]}{C_1} + 1\right) - \beta(T - T_{REF}) - R_s D_I \quad (2.3.2.b)$$

Από τις 2 παραπάνω μεθόδους, στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της παρεμβολής καθώς μας επιτρέπει την εξομοίωση ενός πλαισίου με μόνη γνώση τα στοιχεία που δίνονται στο datasheet του.

2.4 Η εφαρμογή

Η εφαρμογή ή αλλιώς εικονικό εργαλείο (Virtual Instrument) αποτελεί το πρώτο μέρος αυτής της διπλωματικής εργασίας. Έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να βρίσκεται online και να είναι διαθέσιμη σε όσους θέλουν να την χρησιμοποιήσουν.

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα γενικό πλάνο του front panel, με το οποίο έρχεται σε επαφή ο χρήστης μόλις ανοίξει την εφαρμογή.



Σχήμα 2.1 Η εφαρμογή

Πιο αναλυτικά, η εφαρμογή χωρίζεται σε τρία βήματα. Κάθε βήμα προϋποθέτει την ολοκλήρωση του προηγούμενου. Ο χρήστης υποχρεώνεται μετά την ολοκλήρωση κάθε βήματος να πατά το κουμπί *OK* ώστε να μεταφέρεται στο επόμενο βήμα. Μετά την ολοκλήρωση και των τριών βημάτων, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει και πάλι την εφαρμογή.

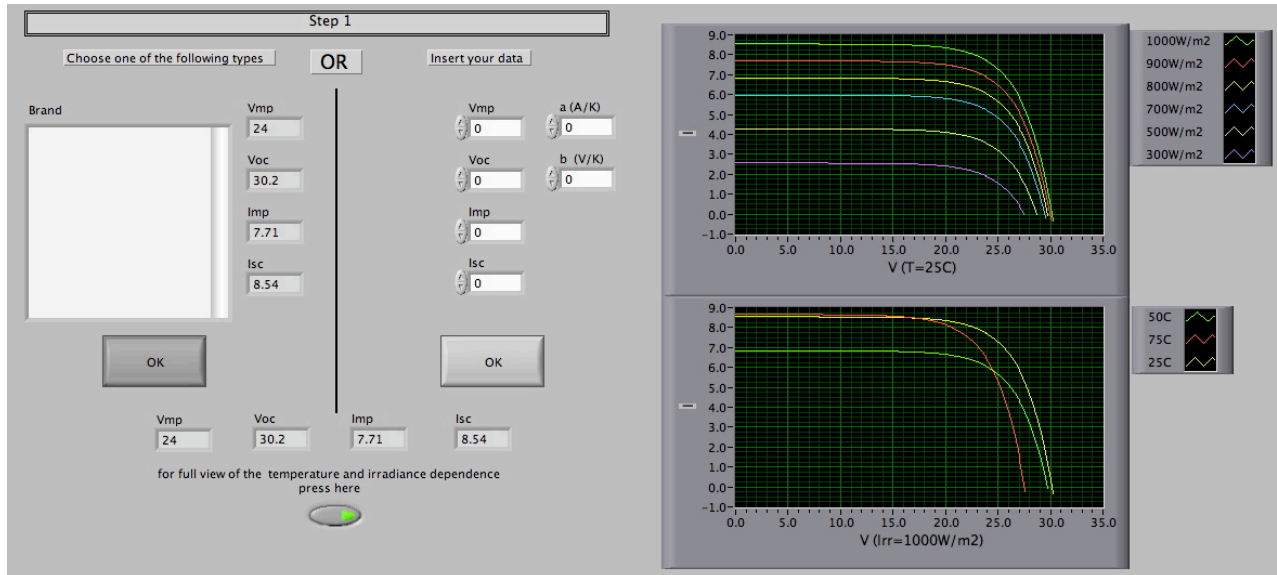
2.4.1 Βήμα 1. Εισαγωγή των χαρακτηριστικών του πλαισίου

- Front Panel

Ο χρήστης έχει δύο επιλογές. Μπορεί είτε να διαλέξει ένα συγκεκριμένο μοντέλο φωτοβολταϊκού πλαισίου ή να εισάγει τα δικά του δεδομένα για ένα οποιοδήποτε πλαίσιο αυτός επιθυμεί. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν από το πρόγραμμα (V_{oc} , V_{mp} , I_{sc} , I_{mp} , α , β) προέρχονται από τα datasheet των κατασκευαστών των πλαισίων.

Με το πάτημα του διακόπτη που βρίσκεται κάτω από το πεδίο εμφάνιση των τελικών χαρακτηριστικών που επιλέχθηκαν, ο χρήστης μπορεί να δει άμεσα τις χαρακτηριστικές καμπύλες V-I για διάφορες τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Αυτά τα σχεδιαγράμματα παρέχονται συνήθως και στα datasheet.

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται πιο ξεκάθαρα το βήμα 1.



Σχήμα 2.2 Βήμα 1. Αριστερά από την κάθετη γραμμή υπάρχει το πεδίο επιλογής διάφορων πλαισίων ενώ δεξιά ο χρήστης εισάγει τα δικά του δεδομένα. Ανάλογα με ποιό *OK* πατηθεί, αποθηκεύονται και τα αντίστοιχα δεδομένα.

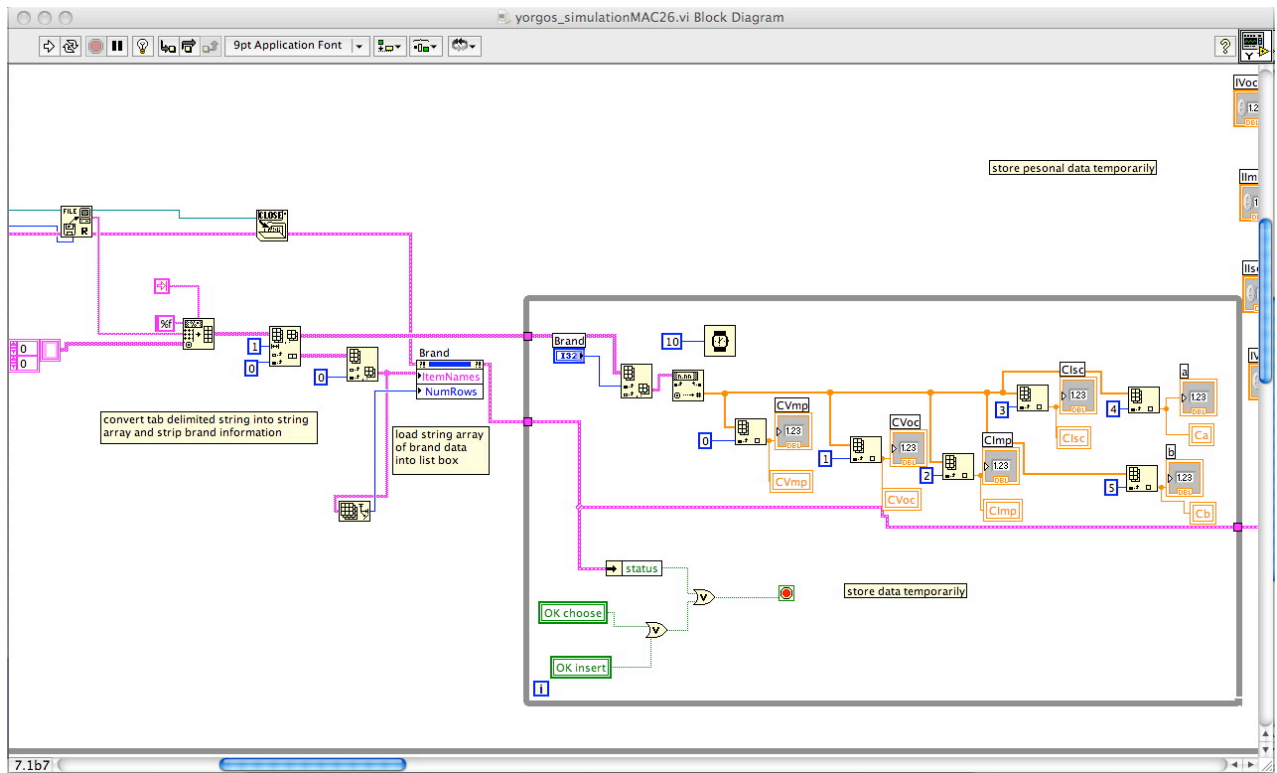
- Block Diagram

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το block diagram είναι το διάγραμμα στο οποίο ουσιαστικά γράφεται το πρόγραμμα. Η εισαγωγή των χαρακτηριστικών των πλαισίων προς επιλογή, γίνεται μέσω ενός αρχείου κειμένου `pv_data.txt` (σχήμα 2.3). Εκεί καταγράφεται το όνομα του πλαισίου, η τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc} , το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος V_{mp} και το αντίστοιχο ρεύμα I_{mp} ενώ και οι συντελεστές α και β . Κάθε φορά που εκτελείται η εφαρμογή, αντλεί τα δεδομένα από αυτή τη βάση δεδομένων.

pv_data							
SKSOLAR- 50E6+140F(L)	23,6	28.95	5.81	6.51	0.003255	0.095535	
PV-MF165EB3	24.2	30.4	6.83	7.36	0.00057	0.00346	
SF-CPV-205	40	46	5.2	5.4	0.000008	0.07	
MUS5E3E / NU185E1	24	30.2	7.71	8.54	0.0045262	0.104	
SKSOLAR - 36E6+120F(L)	18	21.9	6.7	7.75	0.002325	0.07446	
GEPV-100	16.1	20.6	6.2	7.1	0.003	0.08	
PV-TE 130MF5N	17.4	21.9	7.47	8.05	0.004347	0.075117	
KD135GX-LP	17.7	22.1	7.63	8.37	0.00502	0.08	
KC85T	17.4	21.7	5.02	5.34	0.00212	0.0821	
BP 380	17.6	22.1	4.5	4.8	0.00312	0.08	

Σχήμα 2.3 όνομα V_{mp} V_{oc} I_{mp} I_{sc} α β είναι οι στήλες που χωρίζονται μεταξύ τους με tab

Στο σχήμα 2.4 φαίνεται μέρος του διαγράμματος ροής που αφορά την εισαγωγή των δεδομένων.

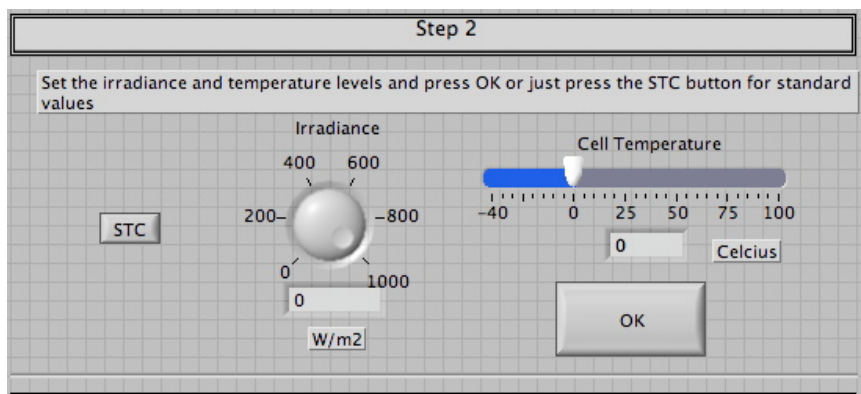


Σχήμα 2.4 Μέρος του Block diagram για την υλοποίηση του πρώτου βήματος

2.4.2 Βήμα 2. Επιλογή των τιμών ακτινοβολίας και θερμοκρασίας

- Front Panel

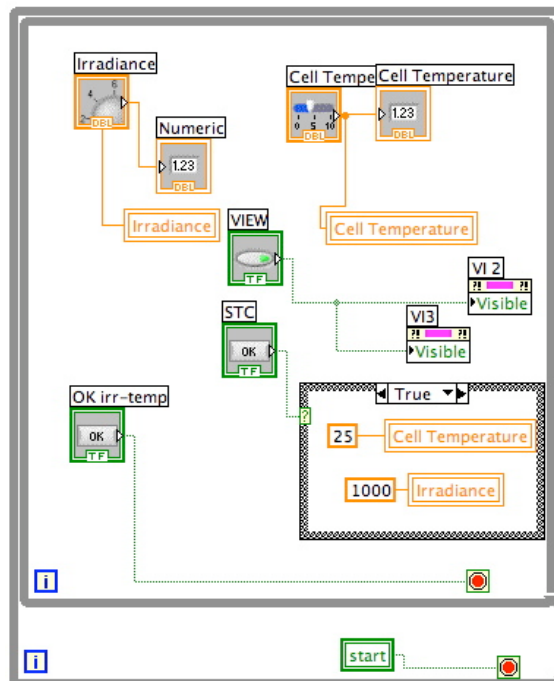
Σε αυτό το βήμα, ο χρήστης καλείται να επιλέξει την ακτινοβολία σε W/m^2 που δέχεται το πλαίσιο αλλά και την θερμοκρασία του (cell temperature). Πατώντας το κουμπί STC μπορεί να θέσει τη θερμοκρασία στους $25^0 C$ και την ακτινοβολία στα $1000 W/m^2$ (σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Βήμα 2

- Block Diagram

Στο σχήμα 2.6 φαίνεται το διάγραμμα ροής του βήματος 2.

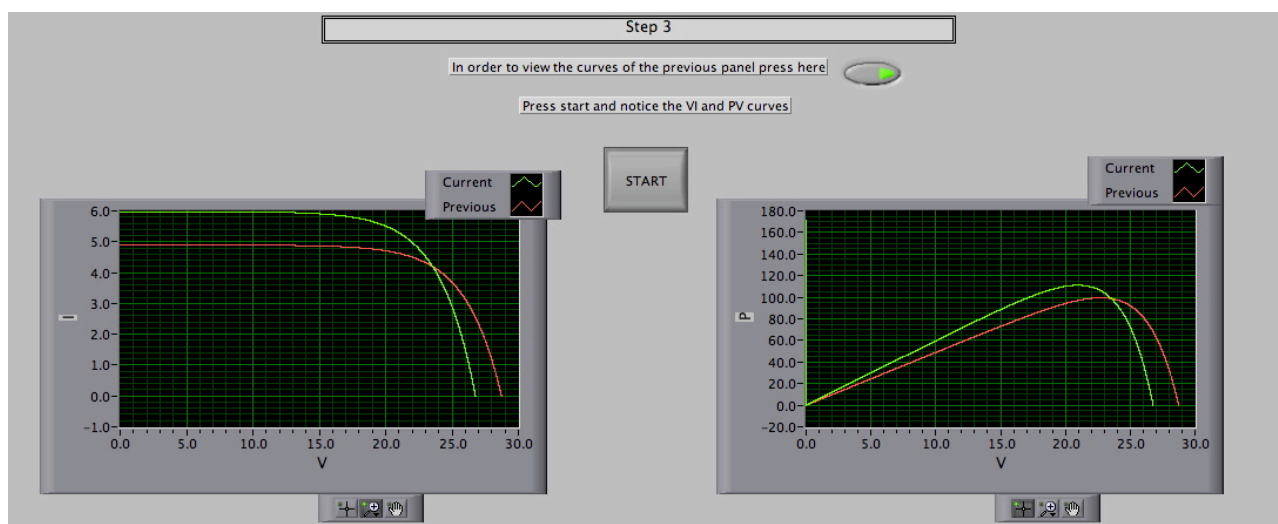


Σχήμα 2.6 Διάγραμμα ροής του βήματος 2

2.4.3 Βήμα 3. Υπολογισμός και παρουσίαση των αποτελεσμάτων

- Front Panel

Στο τελευταίο βήμα, ο χρήστης πατώντας το κουμπί *START* βλέπει τις χαρακτηριστικές V-I και P-V για τα δεδομένα που εισήγαγε παραπάνω (σχήμα 2.7). Παρέχεται επίσης η δυνατότητα ταυτόχρονης αναπαράστασης και της προηγούμενης δοκιμής, αν το επιθυμεί ο χρήστης. Έτσι λοιπόν, μπορεί να γίνει σύγκριση του ίδιου πλαισίου σε δύο διαφορετικά σενάρια συνθηκών ή ακόμα και σύγκριση δύο διαφορετικών πλαισίων κάτω από τις ίδιες συνθήκες.



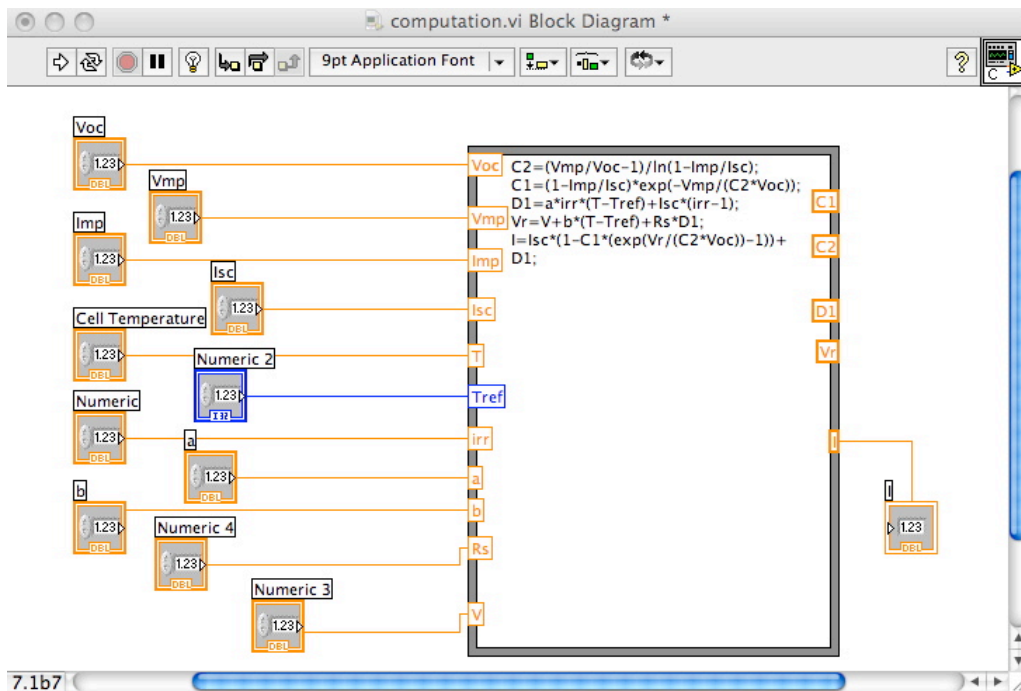
Σχήμα 2.7 Βήμα 3. Έχει γίνει επιλογή αναπαράστασης και της προηγούμενης δοκιμής

Στο τέλος εμφανίζεται ένα παράθυρο που προτρέπει το χρήστη να διαλέξει ένα αρχείο για αποθήκευση. Αυτό συμβαίνει καθώς δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων των διαγραμμάτων σε ένα αρχείο *.txt για εισαγωγή τους σε οποιοδήποτε λογιστικό φύλλο και περαιτέρω επεξεργασία. Εάν ο χρήστης δεν επιθυμεί την αποθήκευση, μπορεί να πατήσει το Cancel ενώ θα ακολουθήσει ένα μήνυμα σφάλματος το οποίο μπορεί να παραβλέψει.

- Block Diagram

Ο υπολογισμός των καμπυλών βασίζεται στον τύπο της παρεμβολής που είδαμε στην παράγραφο 2.3.2. Επειδή ο υπολογισμός γίνεται αρκετές φορές μέσα στο πρόγραμμα, κατασκευάστηκε ένα subVI το οποίο κάνει μόνο αυτό. Χρησιμοποιώντας ως μεταβλητή την τάση εξόδου του πλαισίου και μεταβάλλοντάς τη από το μηδέν μέχρι την τιμή ανοικτοκύκλωσης, παίρνουμε τις αντίστοιχες τιμές του ρεύματος. Ουσιαστικά, το Φ/Β πλαίσιο προσομοιώνεται με πηγή ρεύματος.

Στο σχήμα 2.8 φαίνεται το subVI που δέχεται ως παραμέτρους όλα τα απαραίτητα στοιχεία και δίνει ως έξοδο την τιμή του ρεύματος εξόδου.



Σχήμα 2.8 SubVI που εκτελεί τον υπολογισμό του ρεύματος εξόδου

Δικτυακός τύπος

3.1 Εισαγωγή

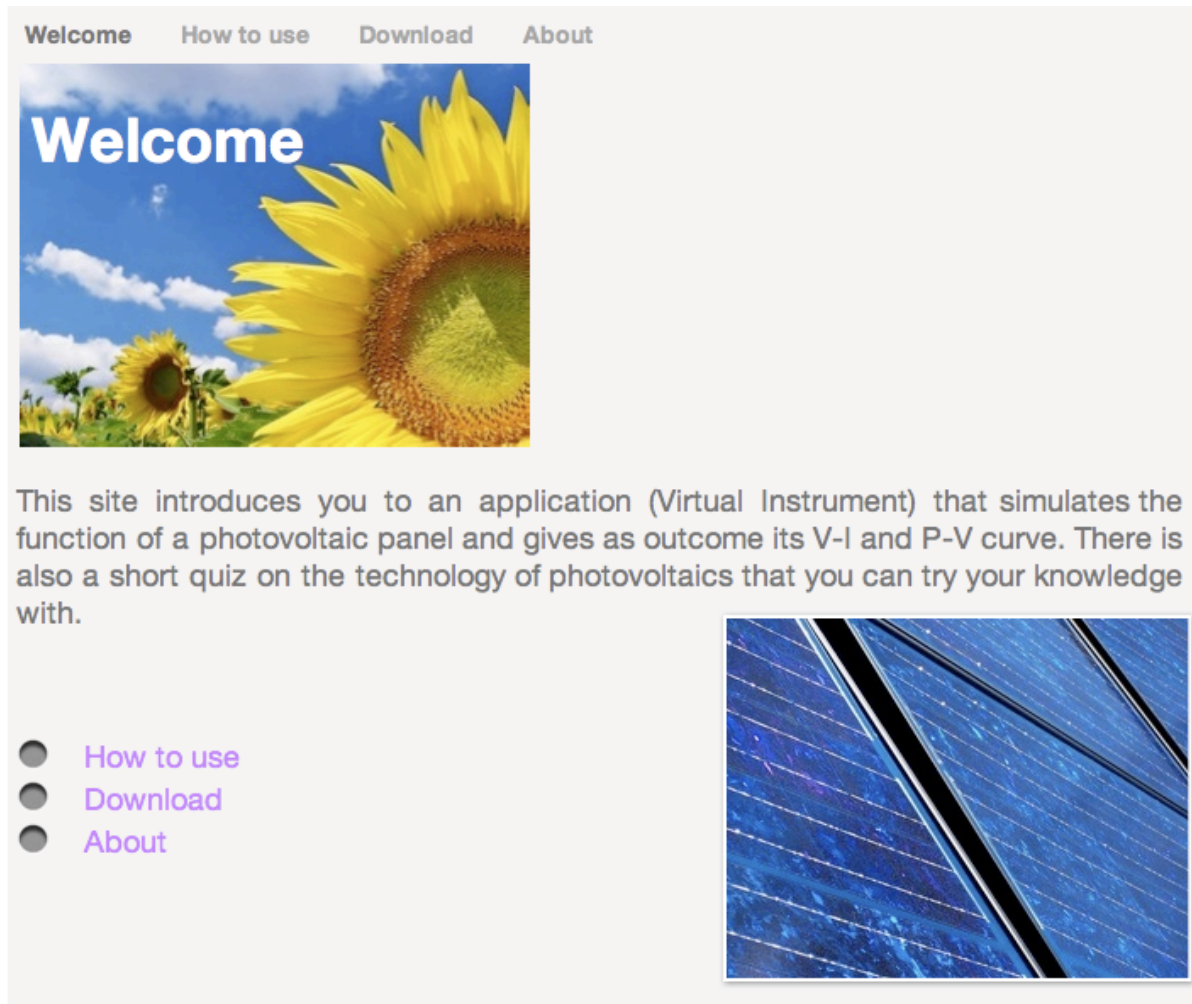
Η εφαρμογή έχει σχεδιαστεί για να είναι προσβάσιμη μέσω του διαδικτύου, ώστε οποιοσδήποτε σπουδαστής ή ερευνητής να μπορεί να τη χρησιμοποιήσει. Επειδή το ΚΑΠΕ για λόγους ασφαλείας απαγορεύει τη φιλοξενία σελίδων στους δικούς του εξυπηρετητές έπρεπε να στηθεί ένας ξεχωριστός εξυπηρετητής (server) ώστε να εκτελεί αυτήν την εφαρμογή. Ο εξυπηρετητής αυτός θα έπρεπε να έχει εγκατεστημένο το πρόγραμμα Labview. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να τρέχει την εφαρμογή στον εξυπηρετητή, επομένως δεν απαιτείται να έχει εγκατεστημένο το λογισμικό στο σύστημά του.

Έπειτα από συνεννόηση με τους υπεύθυνους δικτύου του ΚΑΠΕ, έγινε η δοκιμή της εφαρμογής online αλλά για σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς ο εξυπηρετητής δεν θα άντεχε πιθανές κακόβουλες επιθέσεις. Έτσι λοιπόν, για την online διάθεση της εφαρμογής, ήταν απαραίτητο το στήσιμο ενός ανεξάρτητου εξυπηρετητή. Επειδή όμως αυτό ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, η εφαρμογή βρίσκεται ως εκτελέσιμο αρχείο διαθέσιμο για κατέβασμα. Το μόνο μειονέκτημα αυτής της λύσης είναι ότι ο χρήστης πρέπει να έχει εγκατεστημένο στον υπολογιστή του το λογισμικό Labview.

Ο ιστότοπος που φιλοξενεί την εφαρμογή γράφτηκε σε γλώσσα html και η διεύθυνσή του είναι:
<http://users.ntua.gr/el03038/VI/Welcome.html>

3.2 Κεντρική σελίδα

Ο χρήστης παραπέμπεται στην αρχική σελίδα η οποία είναι εισαγωγική και δίνει πληροφορίες για την εφαρμογή καθώς και οδηγίες χρήσης (σχήμα 3.1).



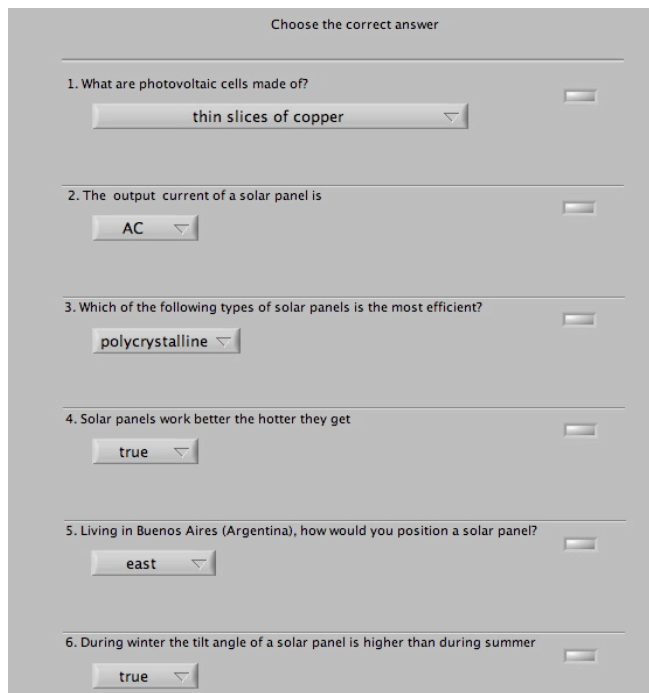
Σχήμα 3.1 Κεντρική σελίδα

Από εδώ έχει την δυνατότητα να κατεβάσει έναν φάκελο ο οποίος περιέχει την εφαρμογή (ή virtual instrument σύμφωνα με το Labview) αλλά και ένα ερωτηματολόγιο ώστε να δοκιμάσει τις γνώσεις του γύρω από την τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Μέσα στον φάκελο βρίσκονται όλα τα αρχεία που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση της εφαρμογής, ενώ υπάρχουν και επεξηγηματικές οδηγίες χρήσης.

Στην σελίδα με τίτλο 'about' δίνονται λεπτομέρειες για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, στοιχεία επικοινωνίας και περιγραφή των δικαιωμάτων χρήσης (creative commons 3.0).

3.3 Ερωτηματολόγιο

Ο σκοπός του ερωτηματολογίου (quiz) είναι εκπαιδευτικός. Αποτελείται από 10 ερωτήσεις και στο τέλος πληροφορεί τον χρήστη για το ποσοστό επιτυχίας του. Υλοποιήθηκε και αυτό μέσω του Labview. Στο σχήμα 3.2 φαίνεται μέρος του ερωτηματολογίου.



The image shows a LabVIEW quiz interface with the title "Choose the correct answer". It contains six questions, each with a dropdown menu for the answer and a small rectangular button to the right of the dropdown. The questions and their selected answers are:

1. What are photovoltaic cells made of?
thin slices of copper
2. The output current of a solar panel is
AC
3. Which of the following types of solar panels is the most efficient?
polycrystalline
4. Solar panels work better the hotter they get
true
5. Living in Buenos Aires (Argentina), how would you position a solar panel?
east
6. During winter the tilt angle of a solar panel is higher than during summer
true

Σχήμα 3.2 Το ερωτηματολόγιο

Η διάταξη καταγραφής των χαρακτηριστικών καμπυλών

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την κατασκευή της διάταξης καταγραφής των χαρακτηριστικών καμπυλών ενός Φ/Β πλαισίου. Αναλυτικότερα, η διάταξη αυτή παρεμβάλλεται μεταξύ του υπολογιστή και του πλαισίου, και δίνει τη δυνατότητα καταγραφής των καμπυλών V-I και P-V. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς η διάταξη αποτελεί ένα μεταβλητό φορτίο που συνδέεται σε σειρά με το Φ/Β πλαίσιο. Μέσω της κάρτας συλλογής δεδομένων (DAQ) που συνδέει τον υπολογιστή με την διάταξη, παρέχεται η δυνατότητα ελέγχου του κυκλώματος και αποθήκευσης των μετρήσεων.

Η διάτρητη πλακέτα που κατασκευάστηκε δεν αποσκοπεί να αποτελέσει ένα εργαλείο που θα παρέχει ακριβείς μετρήσεις, αλλά αποτελεί μία προσπάθεια κατανόησης της λειτουργίας και της συμπεριφοράς ενός Φ/Β πλαισίου.

4.2 Λογισμικό

Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Spice για την μελέτη του προτεινόμενου κυκλώματος.

Το SPICE (Simulation Program of Integrated Circuit Electronics) είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Με το πρόγραμμα αυτό δίνεται η δυνατότητα πρόβλεψης της πραγματικής λειτουργίας των διατάξεων και των πιθανών σχεδιαστικών σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν. Μέχρι σήμερα, έχουν αναπτυχθεί αρκετές εκδόσεις του Spice από διαφορετικές εταιρείες, όπως το PSpice από τη MicroSim, το ISpice από τη IntuSoft κ.α.. Η PSpice έκδοση του προγράμματος Spice είναι κατάλληλη για την προσομοίωση σύνθετων ηλεκτρικών κυκλωμάτων και περιλαμβάνει μια πλούσια βιβλιοθήκη στοιχείων. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το Orcad PSPICE, version 9.2 by Cadence Design Systems.

- Schematic Capture

Επιτρέπει στο χρήστη να σχεδιάζει και να κατασκευάζει νέα σύμβολα και μοντέλα στοιχείων εισάγοντας τις επιθυμητές προδιαγραφές. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση κυκλωμάτων.

- Text Editor

Επιτρέπει στο χρήστη να ελέγχει και να επεξεργάζεται τον κώδικα του προγράμματος (output file) καθώς και να ειδοποιείται για τα σχεδιαστικά σφάλματα που προκύπτουν.

- Simulator

Επιτρέπει στο χρήστη τη σχεδίαση και προσομοίωση ενός κυκλώματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την επίλυση αριθμητικών εξισώσεων, με επαναληπτικές μεθόδους σύγκλισης και κάτω από δεδομένες αρχικές συνθήκες.

- Graphic Post Processor

Επιτρέπει στο χρήστη την οπτική απεικόνιση του συνόλου των λύσεων, είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας.

Για την έναρξη της προσομοίωσης είναι απαραίτητη η απόδοση κάποιων αρχικών συνθηκών, από το πρόγραμμα, στις τάσεις κόμβων του κυκλώματος. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες κυκλωματικές εξισώσεις των στοιχείων που συνθέτουν τη διάταξη, υπολογίζονται οι αρχικές τιμές των ρευμάτων κλάδων. Αυτές οι τιμές των ρευμάτων χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι τιμές των κομβικών τάσεων και αρχίζει η αναδρομική ακολουθία επίλυσης. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επιλυθούν οι κυκλωματικές εξισώσεις με δεδομένη από το χρήστη ακρίβεια, οπότε συγκλίνει (convergence) η χρησιμοποιούμενη από τον simulator αναδρομική μέθοδος. Η επαναληπτική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση της μήτρας των κυκλωματικών εξισώσεων εξαρτάται από τη γραμμικότητα ή μη του κυκλώματος. Έτσι, όταν το κύκλωμα περιέχει μη γραμμικά στοιχεία η μέθοδος επίλυσης είναι η Newton-Raphson, ενώ αντίθετα αν το κύκλωμα περιέχει μόνο γραμμικά στοιχεία χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος απαλοιφής τους Gauss.

Ο simulator του προγράμματος αποτελείται από δύο μονάδες προσομοίωσης, μια αναλογική και μια ψηφιακή. Η αναλογική μονάδα προσομοίωσης επιλύει αριθμητικά τους νόμους του Kirchhoff στους κόμβους και στους κλάδους του κυκλώματος και η ψηφιακή μονάδα εκτελεί πράξεις Boolean δυαδικής λογικής.

4.3 Σχεδίαση

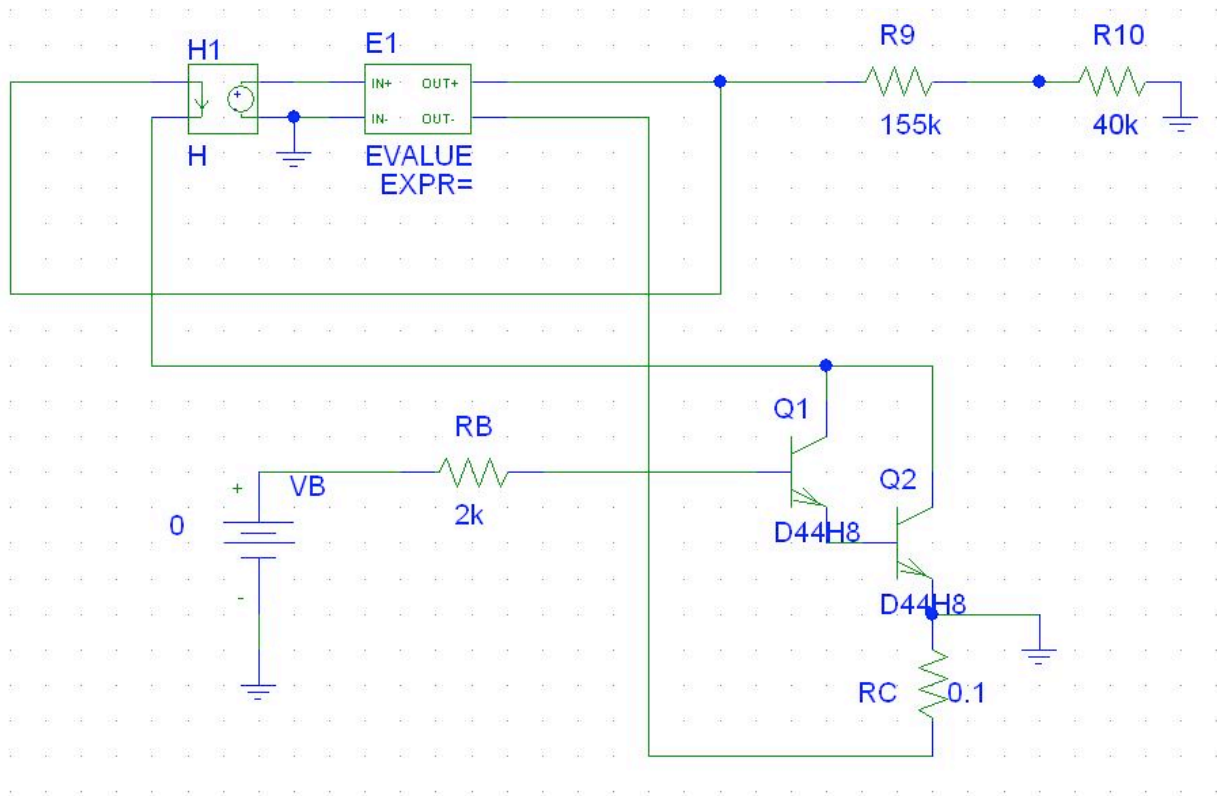
Η σχεδίαση της πλακέτας έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να συνδεθεί με ένα Φ/Β πλαίσιο και να μας επιτρέψει να καταγράψουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες V-I και P-V του πλαισίου.

Στο σχήμα 4.1 φαίνεται το κύκλωμα στο στάδιο της σχεδίασης.

- Το σύμπλεγμα E1 και H1 αποτελούν το Φ/Β πλαίσιο. Το E1 αποτελεί πηγή τάσης εξαρτώμενη από τάση. Μέσω όμως του μετατροπέα H1, έχουμε μια πηγή τάσης εξαρτώμενη από ρεύμα. Η συνάρτηση μεταφοράς της E1 είναι ο τύπος (2.3.2.b).

$$V = C_2 V_{oc} \ln \left(\frac{\left[1 - \frac{I - D_I}{I_{sc}} \right]}{C_1} + 1 \right) - \beta (T - T_{REF}) - R_s D_I$$

- Τα τρανζίστορ Q1 και Q2 είναι συνδεδεμένα σε συνδεσμολογία Darlington και ελέγχονται μέσω της τάσης VB στη βάση του Q1.



Σχήμα 4.1 Το κύκλωμα

Το Φ/Β πλαίσιο λειτουργεί σαν πηγή τάσης, η τιμή της οποίας καθορίζεται από την τιμή του ρεύματος που το διαρρέει. Είδαμε ότι με τη χρήση της μεθόδου παρεμβολής, η τάση δίνεται από τον τύπο (2.3.2.b). Για την εξομοίωση χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο με χαρακτηριστικά $V_{mp}=24V$ $V_{oc}=30.2V$ $I_{mp}=7.71A$ $I_{sc}=8.54A$ $\alpha=0.005A/^{\circ}C$ $\beta=0.11V/^{\circ}C$

Επομένως, με τη σύνδεση των τρανζίστορ στους ακροδέκτες του πλαισίου και μεταβάλλοντας την τάση στη βάση του Q1 μας δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της λειτουργίας του πλαισίου. Μεταβάλλοντας την τάση στη βάση, μεταβάλλουμε και την αντίσταση του κυκλώματος, άρα και το ρεύμα που διαρρέει το πλαίσιο. Έτσι, με μια πλήρη μεταβολή της τάσης στη βάση από το μηδέν μέχρι την τάση κορεσμού του τρανζίστορ, μπορούμε να καταγράψουμε τη V-I χαρακτηριστική του πλαισίου.

Επιλέχθηκαν τρανζίστορ ισχύος BJT καθώς πλεονεκτούν από άλλα κατά τη λειτουργία στην ενεργό περιοχή. Τα συγκεκριμένα τρανζίστορ είναι τα D44H8, τύπου npn. Η επιλογή τους έγινε με κριτήριο το ικανοποιητικό ρεύμα συλλέκτη $I_c=10A$. Το κέρδος τους όμως (60) ήταν αρκετά μικρό για την εφαρμογή (σχήμα 4.2). Το πρόβλημα ήταν ότι η κάρτα μπορεί να οδηγήσει στη βάση του τρανζίστορ μέχρι 5mA. Αλλά το ρεύμα που θα διαπερνά το συλλέκτη θα πλησιάζει τα 10A. Επομένως επιλέχθηκε η συνδεσμολογία Darlington ακόλουθου εκπομπού, με την οποία το κέρδος αποτελεί το γινόμενο κερδών των 2 τρανζίστορ, το οποίο υπερκαλύπτει την ανάγκη για ρεύμα.

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage D44H8, D45H8 D44H11, D45H11	V_{CEO}	60 80	Vdc
Emitter Base Voltage	V_{EB}	5.0	Vdc
Collector Current - Continuous - Peak (Note 1)	I_C	10 20	Adc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ C$ @ $T_A = 25^\circ C$	P_D	50 2.0	W
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	$^\circ C$

Σχήμα 4.2 Χαρακτηριστικά του D44H8

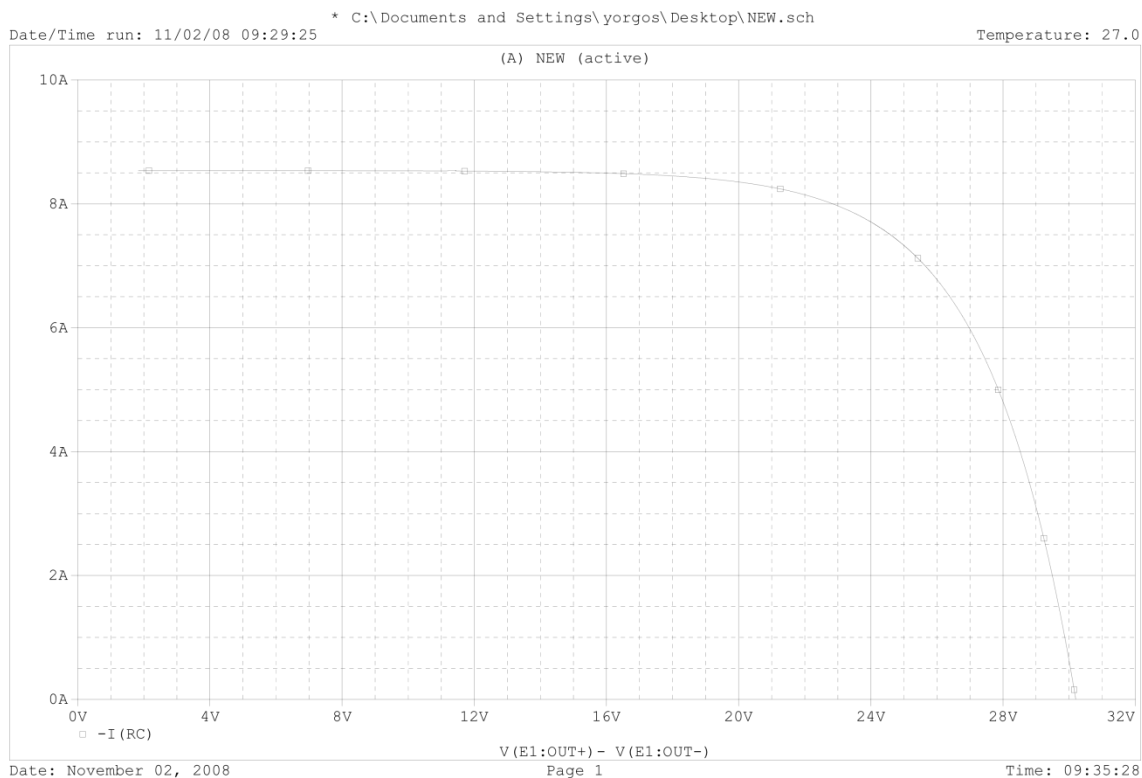
Επικοινωνία πλακέτας – υπολογιστή

Η πλακέτα συνδέεται μέσω μιας κάρτας συλλογής δεδομένων με τον υπολογιστή. Μέσω της κάρτας γίνεται ο έλεγχος του κυκλώματος αλλά και λαμβάνονται οι μετρήσεις. Η συγκεκριμένη κάρτα που χρησιμοποιήθηκε είναι η CIO-DAS08/JR-08 της Measurement Computing και η επικοινωνία υλοποιείται μέσω του Labview. Για την συγκεκριμένη υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε:

- Ένα κανάλι αναλογικής εξόδου για τον έλεγχο της τάσης V_B στη βάση. Η κάρτα δίνει τάση μέχρι 5V και ρεύμα μέχρι 5mA.
- Ένα κανάλι αναλογικής εισόδου για την μέτρηση της τάσης $E1(out +)$ στα άκρα του πλαισίου. Το όριο στην τάση εισόδου της κάρτας είναι τα 5V και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε διαιρέτης τάσης (R9, R10).
- Ένα κανάλι αναλογικής εισόδου για την μέτρηση της τάσης στο άκρο της αντίστασης ισχύος RC. Έτσι μπορούμε έμμεσα να μετρήσουμε το ρεύμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η τιμή της RC επιλέχθηκε όσο το δυνατόν μικρότερη (0.1Ω) ώστε η πτώση τάσης πάνω της να είναι αμελητέα.

Η τιμή της RB επιλέχθηκε μετά από δοκιμές και είναι υπεύθυνη για την ευαισθησία του ελέγχου των τρανζίστορ. Οι τιμές των R9 και R10 είναι κατάλληλες ώστε μία μέγιστη τάση των 30V να την μετατρέπουν σε 5V (όσο μπορεί να διαβάσει η κάρτα). Ο διαιρέτης τάσης υλοποιήθηκε με μεταβλητή αντίσταση (trimmer) ώστε να έχουμε τη δυνατότητα για περισσότερες επιλογές.

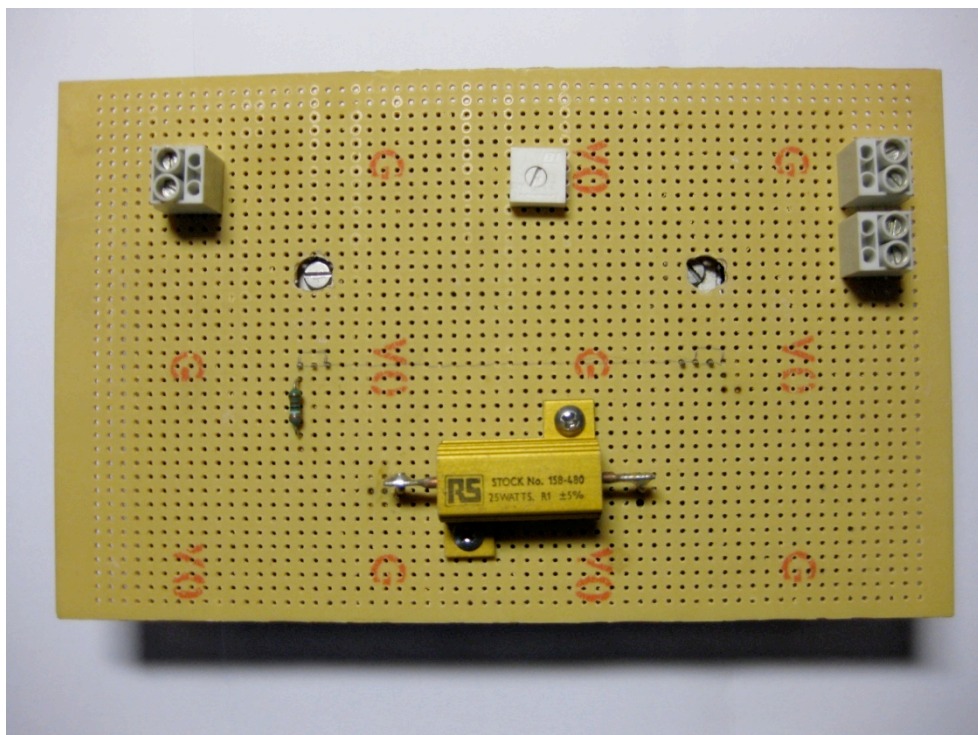
Εξομοιώνοντας το κύκλωμα με τη βοήθεια του Spice, και μεταβάλλοντας την τάση VB από τα 0 μέχρι τα 5V με DC sweep, πέρνουμε την εξής V-I (σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 Χαρακτηριστική V-I

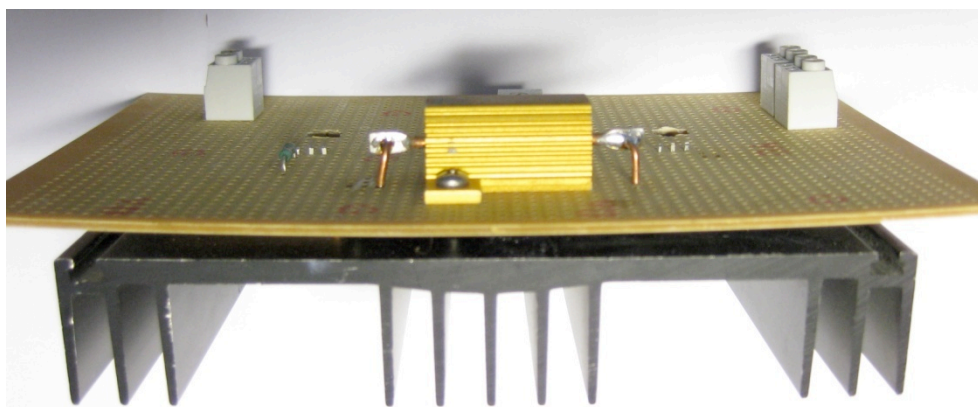
4.4 Κατασκευή

Ακολουθεί στο σχήμα 4.5 η πλακέτα.



Σχήμα 4.5 Η διάτρητη πλακέτα που κατασκευάστηκε

Το ψυκτικό σώμα που χρησιμοποιήθηκε βοηθά στην απαγωγή της θερμότητας από τα τρανζίστορ καθώς λόγω των μεγάλων ρευμάτων που τα διαρρέουν, αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, τα τρανζίστορ τοποθετήθηκαν από την κάτω μεριά της πλακέτας ώστε να εφάπτονται στο ψυκτικό σώμα, το οποίο αποτελεί και τη βάση της πλακέτας και φαίνεται στο σχήμα 4.6.



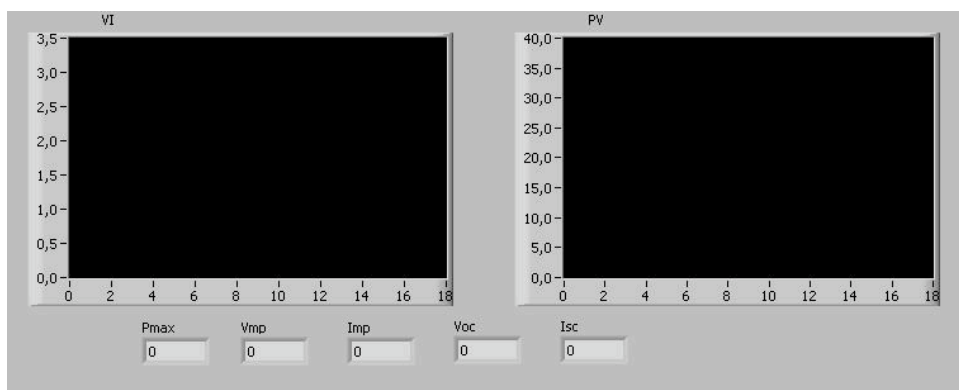
Σχήμα 4.6 Το ψυκτικό σώμα αποτελεί τη βάση της πλακέτας και σε αυτό εφάπτονται τα τρανζίστορ.

Στην αριστερή κλέμα συνδέονται οι ακροδέκτες του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ενώ στις 2 δεξιά τα σήματα από και προς τον υπολογιστή. Η γείωση λαμβάνεται από την κάρτα.

4.5 Λειτουργία

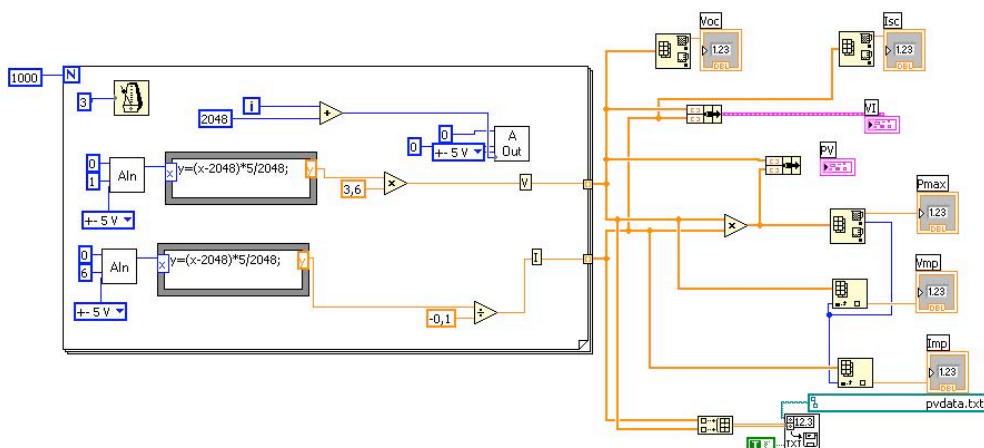
Το πρόγραμμα επικοινωνίας της πλακέτας με τον υπολογιστή γράφτηκε σε Labview. Μέσα σε 3 δευτερόλεπτα εκτελείται 1000 φορές, και μεταβάλλει την τάση στη βάση του Q1 από 0 σε 3V. Παράλληλα, καταγράφει την τιμή της τάσης στο άκρο της RC και διαιρώντας τη με την τιμή της (0.1Ω) υπολογίζει το ρεύμα που διαρρέει το Φ/Β πλαίσιο. Επίσης, καταγράφει και την τάση από τον διαιρέτη τάσης. Τέλος, αναπαριστά όλα τα δεδομένα στα διαγράμματα V-I και P-V.

Το front panel φαίνεται στο σχήμα 4.7



Σχήμα 4.7 Το front panel της εφαρμογής στο οποίο φαίνονται οι μετρήσεις που λαμβάνονται

Το block diagram φαίνεται στο σχήμα 4.8



Σχήμα 4.8 Το block diagram της εφαρμογής

Μετρήσεις

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των εφαρμογών που αναπτύχθηκαν, έγιναν ορισμένες μετρήσεις οι οποίες καταγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο.

5.1 Εικονικό Εργαλείο

Για να ελέγξουμε την αξιοπιστία του εικονικού εργαλείου, είναι σκόπιμο να συγκρίνουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες V-I και P-V που παρέχει στο datasheet ο κατασκευαστής ενός συγκεκριμένου πλαισίου, με αυτές που λαμβάνουμε από το εικονικό εργαλείο.

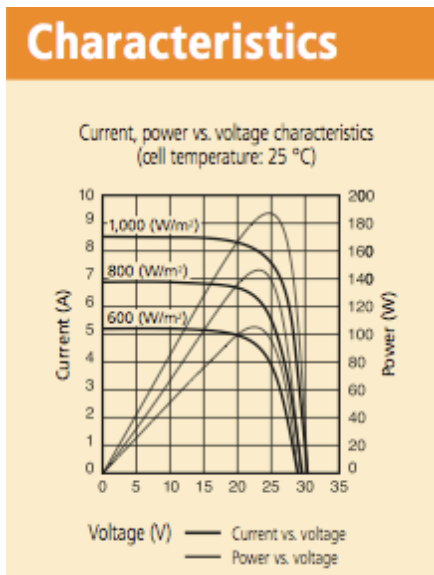
Επιλέγουμε τυχαία το πλαίσιο NUS5E3E / NU185E1 185W της Sharp. Στο σχήμα 5.1 φαίνονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στοιχεία του πλαισίου όπως δίνονται στο datasheet.

Electrical data				
Parameters	Symbol	Min.	Typ.	Unit
Open circuit voltage	V_{oc}	–	30.2	V
Maximum power voltage	V_{pm}	–	24.0	V
Short circuit current	I_{sc}	–	8.54	A
Maximum power current	I_{pm}	–	7.71	A
Nominal power	P_m	175.8	185.0	W
Module efficiency	η_m	–	14.1	%

The electrical data applies under Standard Test Conditions (STC): Radiation 1,000 W/m² with a spectrum of AM 1.5 and at a cell temperature of 25 °C.

Σχήμα 5.1 ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στοιχεία του πλαισίου NUS5E3E / NU185E1 [13]

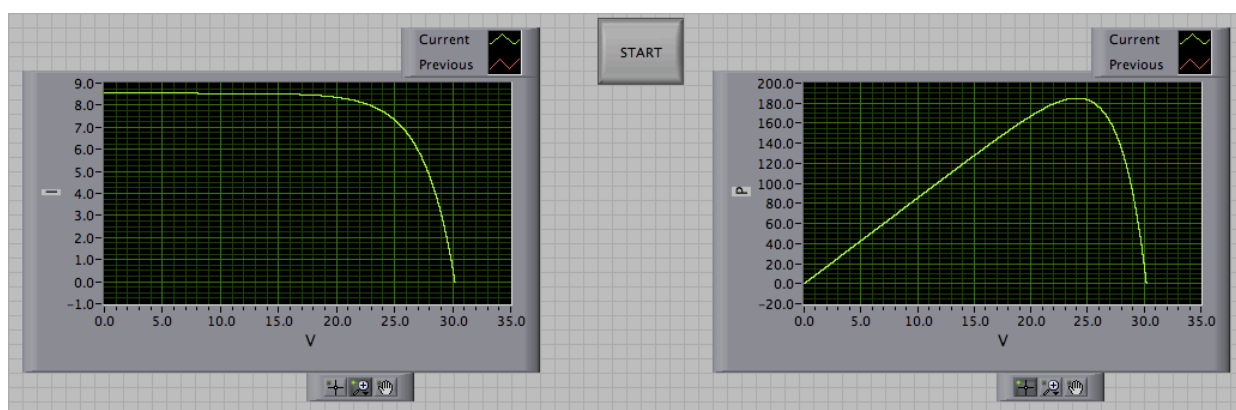
Ακολουθεί στο σχήμα 5.2 διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες του συγκεκριμένου πλαισίου όπως δίνονται από τον κατασκευαστή του.



Σχήμα 5.2 χαρακτηριστικές καμπύλες του πλαισίου NUS5E3E / NU185E1 για θερμοκρασία 25°C [13]

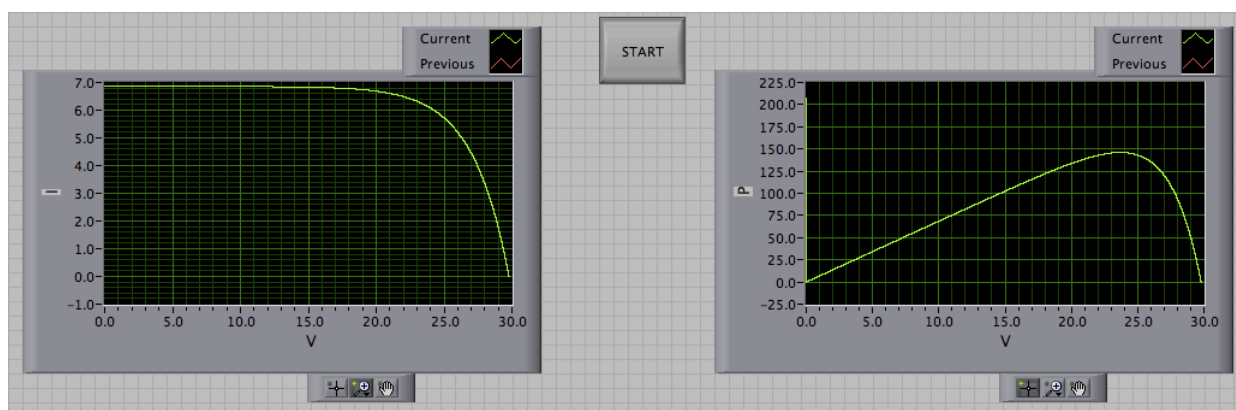
Η προσομοίωση του πλαισίου στο εικονικό εργαλείο δίνει τις εξής καμπύλες.

Για 1000 W/m² και 25°C



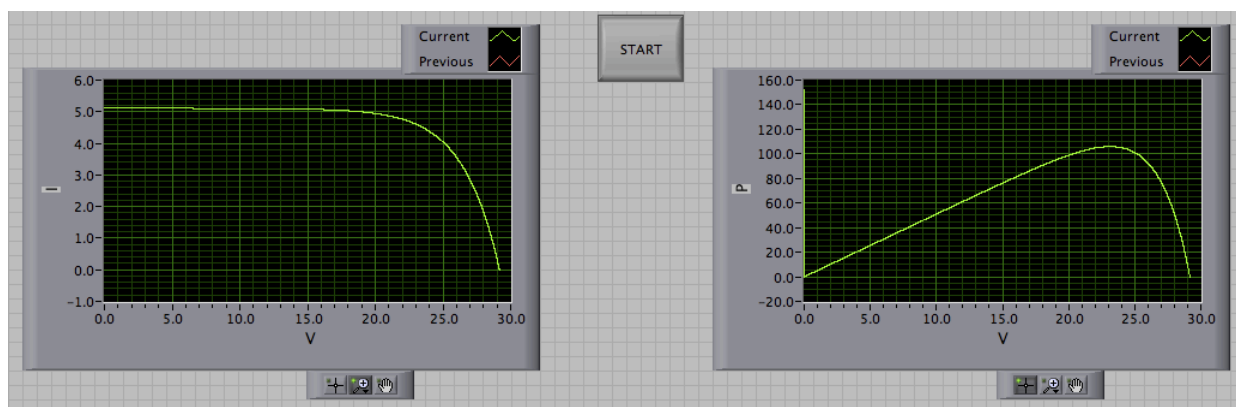
Σχήμα 5.3 χαρακτηριστικές καμπύλες του πλαισίου NUS5E3E / NU185E1 για 1000 W/m² και 25°C

Για 800 W/m² και 25°C



Σχήμα 5.4 χαρακτηριστικές καμπύλες του πλαισίου NUS5E3E / NU185E1 για 800 W/m² και 25°C

Για 600 W/m^2 και 25°C



Σχήμα 5.5 χαρακτηριστικές καμπύλες του πλαισίου NUS5E3E / NU185E1 για 600 W/m^2 και 25°C

Συγκρίνοντας τις καμπύλες, είναι εμφανές ότι συμπίπτουν σχεδόν απόλυτα με αυτές του κατασκευαστή. Αυτό αποδεικνύει ότι το εικονικό εργαλείο που κατασκευάστηκε προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του πλαισίου. Δεν περιοριστήκαμε όμως μόνο σε αυτό το πλαίσιο, καθώς έγιναν συγκρίσεις και με άλλα 2 πλαίσια οι οποίες είχαν το ίδιο αποτέλεσμα. Επομένως, η εφαρμογή αυτή παρουσιάζει αξιόπιστα αποτελέσματα.

5.2 Διάταξη

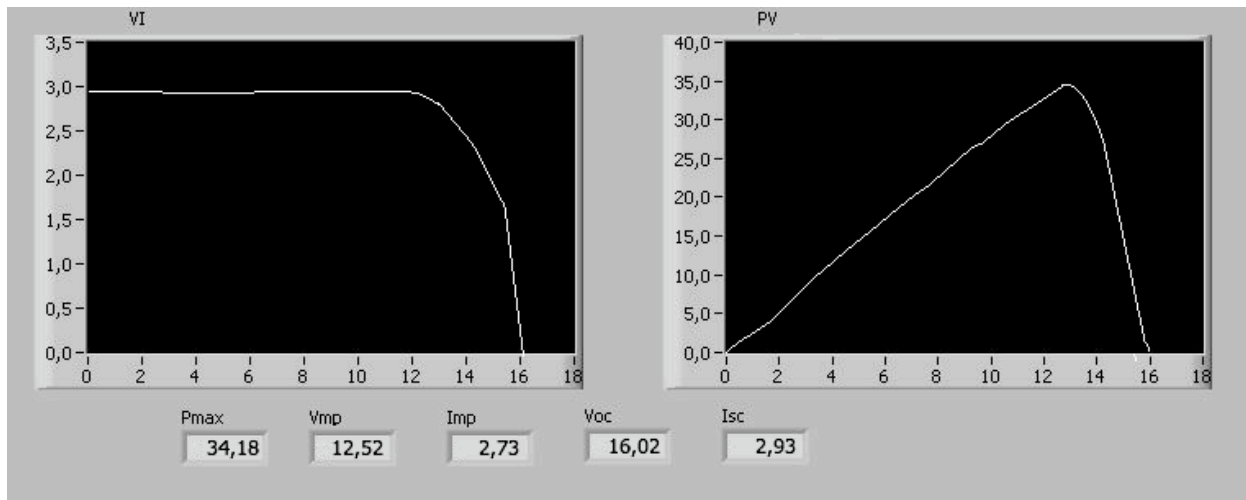
Η διάταξη που υλοποιήθηκε είχε ως σκοπό την ουσιαστική κατανόηση της λειτουργίας και συμπεριφοράς ενός Φ/Β πλαισίου. Στα πλαίσια αυτά, έγινε μια απλή υλοποίηση που δεν εξυπηρετεί ακριβείς μετρήσεις. Για να ερευνησουμε την συμπεριφορά της πλακέτας, έγιναν μια σειρά από δοκιμές με δύο διαφορετικά πλαίσια. Είναι σκόπιμο να αναφερθεί μόνο μία δοκιμή, καθώς οι υπόλοιπες είναι παρόμοιες.

Το Φ/Β πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το msx-60 της Solarex. Τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά, όπως δίνονται στο datasheet του [14], φαίνονται στο σχήμα 5.6.

Typical Electrical Characteristics ¹		
	MSX-64	MSX-60
Maximum power (P_{max})	64W	60W
Voltage @ P_{max} (V_{mp})	17.5V	17.1V
Current @ P_{max} (I_{mp})	3.66A	3.5A
Guaranteed minimum P_{max}	62W	58W
Short-circuit current (I_{sc})	4.0A	3.8A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.3V	21.1V
Temperature coefficient of open-circuit voltage $-(80 \pm 10) \text{ mV}/^\circ\text{C}$	
Temperature coefficient of short-circuit current	... $(0.065 \pm 0.015) \%/^\circ\text{C}$..	
Temperature coefficient of power $-(0.5 \pm 0.05) \%/^\circ\text{C}$...	
NOCT ² $47 \pm 2^\circ\text{C}$	

Σχήμα 5.6 ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στοιχεία του πλαισίου msx-60

Συνδέσαμε το πλαίσιο με την πλακετά και τον υπολογιστή, και το τοποθετήσαμε στον ήλιο. Στο σχήμα 5.7 δίνονται οι καμπύλες όπως καταγράφηκαν από την πλακετά.



Σχήμα 5.7 καμπύλες του πλαισίου msx-60

Παρατηρούμε ότι η μορφή των καμπυλών είναι αυτή που περιμέναμε. Οι ασυνέχειες που παρατηρούνται οφείλονται στη διακριτότητα του σήματος της τάσης που στέλνουμε στη βάση των τρανζίστορ και το οποίο ελέγχει το ρεύμα που διαρρέει το πλαίσιο. Η τάση στη βάση των τρανζίστορ πέρνει διαδοχικές τιμές από τα 0 μέχρι τα 5V (το μέγιστο που μπορεί να δώσει η κάρτα DAQ) και με βήμα 5/2048 καθώς το αναλογικό κανάλι εξόδου είναι ακρίβειας 12-bit.

Επίσης, επειδή η κάρτα μπορεί να μετρήσει μέχρι τα 5V και οι μετρήσεις όπως είδαμε φτάνουν μέχρι και τα 16V για το V_{oc} , έγινε χρήση διαιρέτη τάσης, ο οποίος ρυθμίστηκε με λόγο 1/3.6 όπως φαίνεται και στο block diagram του σχήματος 4.8. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται η δυνατότητα υποβιβασμού της τάσης και άρα μέτρησής της. Έτσι όμως εισέρχεται και άλλος ένας παράγοντας ανακρίβειας, καθώς υπάρχει πτώση τάσης πάνω στον διαιρέτη ενώ και το trimmer που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του διαιρέτη δεν ορίζει αυστηρά την αναλογία διαίρεσης τάσης.

Άλλη μία αδυναμία εντοπίζεται στον τρόπο που γίνεται η μέτρηση του ρεύματος του κυκλώματος καθώς ουσιαστικά μετράται η τάση πάνω στην αντίσταση που διαρρέεται από το ρεύμα.

Παρόλες τις ατέλειες του κυκλώματος, σχεδιαστικές και κατασκευαστικές, αυτό επιτελεί τον σκοπό του, αποτελώντας ένα μεταβλητό φορτίο για τη σύνδεσή του σε σειρά με Φ/Β πλαίσια και την καταγραφή των χαρακτηριστικών τους καμπυλών.

Συμπεράσματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μια βασική πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η πρόοδος που συντελείται στο πεδίο αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες αποδόσεις και μείωση του κόστους κατασκευής. Όλα δείχνουν ότι η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας είναι μονόδρομος και η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι το μέλλον για τα Συστήματα Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΣΔΠ).

Η κατανόηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων αποτελεί ουσιαστική και απαραίτητη γνώση για τους σπουδαστές των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός ήταν και ο σκοπός της εργασίας αυτής. Να παρέχει ένα χρηστικό εργαλείο, το οποίο θα βοηθήσει τον σπουδαστή να εμβαθύνει στον τρόπο λειτουργίας ενός Φ/Β πλαισίου.

Πιο αναλυτικά, ένα Φ/Β πλαίσιο αποτελεί μία πηγή ρεύματος. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή του είναι η ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό και η θερμοκρασία υπό την οποία λειτουργεί. Όσο ισχυρότερη είναι η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο περισσότερη ηλιακή ενέργεια παράγεται. Αντίθετα, όσο αυξάνει η θερμοκρασία του πλαισίου, η απόδοσή του μειώνεται. Σε αυτή την εργασία δίνεται έμφαση στον τρόπο που αυτοί οι δύο παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση του πλαισίου. Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να πειραματιστεί και να παρατηρήσει ο ίδιος το φαινόμενο μέσα από τις καμπύλες V-I και P-V, με αποτέλεσμα την καλύτερη κατανόησή του.

Παράλληλα, η κατασκευή της διάταξης που καταγράφει αυτές τις καμπύλες και με πειραματικό τρόπο, αποτελεί άλλο ένα βήμα για την ουσιαστικότερη κατανόηση του φαινομένου.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι το εικονικό εργαλείο πέρα από την εκπαιδευτική του αξία, μπορεί να προσφέρει και ουσιαστική βοήθεια καθώς αρκετοί κατασκευαστές πλαισίων στα datasheet των προϊόντων τους δεν συμπεριλαμβάνουν τις ηλεκτρικές τους καμπύλες, ή ακόμα και αν υπάρχουν δεν είναι τόσο λεπτομερείς.

Τέλος, είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι το λογισμικό Labview αποδείχθηκε ως ένα πολύ ισχυρό προγραμματιστικό εργαλείο ενώ ταυτόχρονα παραμένει εύκολο στη χρήση και πολύ λειτουργικό.

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΤΡΙΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ

1. Εισαγωγή

Η βασική λειτουργία ενός μετατροπέα τάσης είναι να μετατρέπει μια σταθερή DC τάση σε μια τριφασική AC με μεταβλητό πλάτος και συχνότητα. Για τον έλεγχο των μετατροπέων οι τεχνικές με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM) είναι οι πιο αποδοτικές.

Η τεχνική Space Vector PWM (SVPWM) την τελευταία δεκαετία έχει καθιερωθεί για διακοπτικής ισχύος αντιστροφείς ενώ εκτεταμένη έρευνα έχει διενεργηθεί γύρω από αυτό το θέμα. Η τεχνική SVPWM έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συνήθεις PWM τεχνικές, όπως τη Sinusoidal PWM. Η τεχνική SVPWM προσφέρει μεγαλύτερο συντελεστή διαμόρφωσης, διανυσματικό έλεγχο που σημαίνει ευκολότερη ψηφιακή διαχείριση, ενώ προσφέρει επιπλέον βαθμούς ελευθερίας στο σχεδιασμό των σταδίων διακοπής. Για το λόγο αυτό, η τεχνική SVPWM οδηγεί σε μείωση της παραμόρφωσης και των διακοπτικών απωλειών [15].

Για τριφασικά συστήματα, η πιο διαδεδομένη τοπολογία αντιστροφέα είναι ο αντιστροφέας δύο επιπέδων που αποτελείται από 3 αντιστροφείς ημιγέφυρας με έναν κοινό DC πυκνωτή. Αυτός ο τύπος αντιστροφέα μπορεί να παράγει μια τάση εξόδου σε κάθε φάση που συνδέεται είτε στον αρνητικό είτε στον θετικό πόλο της μέσης λήψης, για αυτό και το όνομα “δύο επιπέδων”. Υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα σε αυτόν το τύπο αντιστροφέα. Επειδή ο αντιστροφέας πρέπει να λειτουργεί σε σχετικά υψηλή διακοπτική συχνότητα, οι διακοπτικές απώλειες είναι πολύ μεγαλύτερες από τις απώλειες αγωγής. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο υπάρχει αναπτυσσόμενο ενδιαφέρον για τους αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων.

Αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων μπορούν να συνθέσουν κυματομορφές χρησιμοποιώντας παραπάνω από δύο επίπεδα τάσεων. Για το λόγο αυτό, η ποιότητα του φάσματος είναι σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση με αυτό της κλασσικής τοπολογίας δύο επιπέδων. Πιο συγκεκριμένα, οι κύριες διακοπτικές συσκευές πρέπει να διακόπτουν το 50% της τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι διακοπτικές απώλειες.

Τα κύρια μειονεκτήματα των αντιστροφών πολλαπλών επιπέδων είναι:

- αυτές οι τοπολογίες απαιτούν μεγάλο αριθμό διακοπών
- ο έλεγχός τους είναι περίπλοκος λόγω του μεγάλου αριθμού διακοπτικών συσκευών
- απαιτούνται αρκετές DC πηγές τάσεις, οι οποίες συνήθως δημιουργούνται με τη βοήθεια πυκνωτών. Η εξισσορόπηση των τάσεων αυτών των πυκνωτών γύρω από ένα σημείο λειτουργίας είναι δύσκολο έργο [16].

Παρόλα τα μειονεκτήματα, οι αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων έχουν αποδειχθεί πολύ καλές εναλλακτικές λύσεις για εφαρμογές υψηλών τάσεων, αφού το κόστος για τον έλεγχο σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ένα μικρό μέρος του συνολικού κόστους. Επιπλέον, καθώς οι τιμές των ημιαγωγικών στοιχείων και των DSPs συνεχίζουν να πέφτουν, η χρήση τοπολογιών πολλαπλών επιπέδων αναμένεται να επεκταθεί και σε εφαρμογές μικρής ισχύος (μικρότερες των 10kW).

Μέχρι τώρα, οι πιο αναπτυγμένες τοπολογίες πολλαπλών επιπέδων είναι:

- με διόδους περιορισμού (diode-clamped inverter)
- με αιωρούμενους πυκνωτές (floating-capacitor inverter)
- με μονοφασικούς αντιστροφείς συνδεδεμένους σε σειρά (cascaded-H bridge inverter)

Ο αντιστροφέας πολλαπλών επιπέδων μπορεί γενικά να αποτελεί έναν 3-, 4-, 5- ή 7- επιπέδων αντιστροφέα. Σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε με τον τριών επιπέδων με διόδους περιορισμού αντιστροφέα, γνωστό και ως αντιστροφέα ουδέτερου σημείου (Neutral-Point Clamped, NPC) καθώς έχει βρει ευρεία εφαρμογή σε υψηλής ισχύος, μέσης τάσης εφαρμογές [17]. Το κύριο χαρακτηριστικό του NPC αντιστροφέα είναι ότι επιτυγχάνει καλύτερη ποιότητα τάσης εξόδου (καλύτερο THD) σε σύγκριση με τον αντιστροφέα δύο επιπέδων.

Το επόμενο κεφάλαιο βασίζεται στα κεφάλαια 6 και 8 του βιβλίου "High-power Converters and AC Drives" του Bin Wu.

2. Βασική Θεωρία

2.1 Μετασχηματισμός Περιστροφής

Για να χρησιμοποιήσουμε την SVPWM τεχνική, πρέπει πρώτα να μετασχηματίσουμε τις στιγμιαίες τάσεις σε διανύσματα χώρου. Υποθέτοντας ότι η λειτουργία του μετατροπέα είναι συμμετρική τριφασική, έχουμε

$$v_{AO}(t) + v_{BO}(t) + v_{CO}(t) = 0 \quad (2.1-1)$$

Είναι προφανές ότι μία από τις φασικές τάσεις είναι εξαρτημένη καθώς αν είναι γνωστές δύο από τις τρεις, τότε η τρίτη μπορεί να υπολογισθεί άμεσα. Έτσι λοιπόν, είναι δυνατό να μετασχηματισθούν οι τριφασικές ποσότητες σε αντίστοιχες διφασικές μεταβλητές.

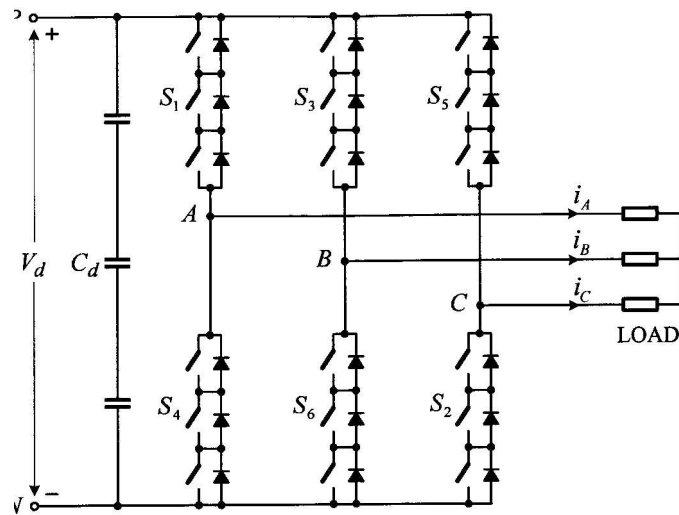
$$\begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) \\ v_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{AO}(t) \\ v_{BO}(t) \\ v_{CO}(t) \end{bmatrix} \quad (2.1-2)$$

Η επιλογή του συντελεστή $2/3$ έγινε κάπως αυθαίρετα. Η συνηθισμένη τιμή που χρησιμοποιείται είναι $2/3$ ή $\sqrt{2/3}$. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης του $2/3$ είναι ότι το πλάτος των διφασικών τάσεων θα είναι ίδιο με αυτό των τριφασικών μετά το μετασχηματισμό. Ένα διάνυσμα χώρου μπορεί γενικά να παρασταθεί από διφασικές τάσεις στο $\alpha - \beta$ πεδίο.

$$\vec{V}(t) = v_{\alpha}(t) + jv_{\beta}(t) \quad (2.1-3)$$

2.2 Αντιστροφείας δύο επιπέδων

Η κατάσταση λειτουργίας των διακοπών στον αντιστροφέα δύο επιπέδων στο σχήμα 1 μπορεί να αναπαρασταθεί από διακοπτικές καταστάσεις. Όπως φαίνεται στον πίνακα 1, η διακοπτική κατάσταση 'P' υποδηλώνει ότι ο άνω διακόπτης σε ένα από τα 3 πόδια του μετατροπέα είναι ανοικτός και πως η τάση του μετατροπέα (v_{AN} , v_{BN} , or v_{CN}) είναι θετική ($+V_d$) ενώ 'O' δείχνει ότι η τάση του μετατροπέα είναι μηδενική εξαιτίας της αγωγής του κάτω διακόπτη.



Σχήμα 1 Απλοποιημένο κύκλωμα αντιστροφέα δύο επιπέδων

Switching State	Leg A			Leg B			Leg C		
	S1	S4	v_{AN}	S3	S6	v_{BN}	S5	S2	v_{CN}
P	on	off	V_d	on	off	V_d	on	off	V_d
O	off	On	0	off	on	0	off	on	0

Πίνακας 1 Διακοπτικές καταστάσεις

2.2.1 Space Vectors

Υπάρχουν οκτώ πιθανοί συνδιασμοί διακοπτικών καταστάσεων στον αντιστροφέα δύο επιπέδων όπως φαίνεται στον πίνακα 2. Η διακοπτική κατάσταση [POO] για παράδειγμα ισοδυναμεί με αγωγή των διακοπών S1, S6, και S2 στα πόδια A, B, και C αντίστοιχα. Από τις διακοπτικές καταστάσεις, οι [PPP] και [OOO] είναι μηδενικές καταστάσεις και οι άλλες ενεργές.

Space Vector	Switching State	On-State Switch	Vector Definition
V_0	[PPP]	S1, S3, S5	$\vec{V}_0 = 0$
	[OOO]	S4, S6, S2	
V_1	[POO]	S1, S6, S2	$\vec{V}_1 = \frac{2}{3}V_d e^{j0}$
V_2	[PPO]	S1, S3, S2	$\vec{V}_2 = \frac{2}{3}V_d e^{j\frac{\pi}{3}}$
V_3	[OPO]	S4, S3, S2	$\vec{V}_3 = \frac{2}{3}V_d e^{j\frac{2\pi}{3}}$
V_4	[OPP]	S4, S3, S5	$\vec{V}_4 = \frac{2}{3}V_d e^{j\frac{3\pi}{3}}$
V_5	[OOP]	S4, S6, S5	$\vec{V}_5 = \frac{2}{3}V_d e^{j\frac{4\pi}{3}}$
V_6	[POP]	S1, S6, S5	$\vec{V}_6 = \frac{2}{3}V_d e^{j\frac{5\pi}{3}}$

Πίνακας 2 Ορισμός των Διανυσμάτων

Αντικαθιστώντας τη (2.1-1) στην (2.1-2) παίρνουμε

$$\vec{V}(t) = \frac{2}{3} [v_{AO}(t)e^{j0} + v_{BO}(t)e^{j2\pi/3} + v_{CO}(t)e^{j4\pi/3}] \quad (2.2.1-1)$$

Για την ενεργό κατάσταση [POO], αν κοιτάξουμε ξανά το σχήμα 1, οι παραγόμενες τάσης εξόδου είναι

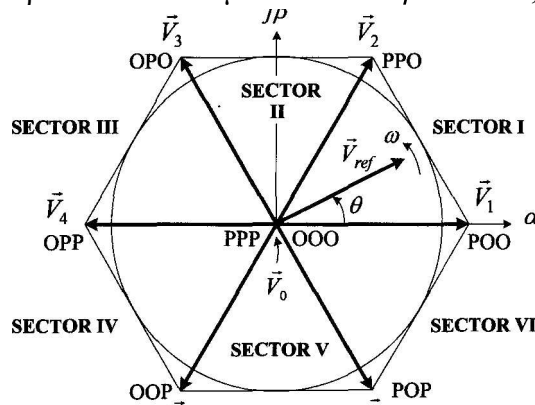
$$v_{AO}(t) = \frac{2}{3}V_d, \quad v_{BO}(t) = -\frac{1}{3}V_d, \quad v_{CO}(t) = -\frac{1}{3}V_d \quad (2.2.1-2)$$

Τώρα, αντικαθιστώντας τη (2.2.1-2) στην (2.2.1-1) έχουμε

$$\vec{V}_1 = \frac{2}{3}V_d e^{j0} \quad (2.2.1-3)$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, όλα τα 6 ενεργά διανύσματα μπορούν να βρεθούν. Παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Αν αναπαράστίσουμε τα 8 παραπάνω διανύσματα στο $\alpha - \beta$ επίπεδο, παίρνουμε το σχήμα 2.



Σχήμα 2 Space vector διάγραμμα για τον αντιστροφέα δυο επιπέδων

Το παραπάνω διάγραμμα απεικονίζει τα μηδενικά και ενεργά διανύσματα που δεν μετακινούνται στο χώρο, για αυτό και λέγονται στατικά διανύσματα. Από την άλλη μεριά, το διάνυσμα αναφοράς \vec{V}_{ref} περιστρέφεται στο χώρο με γωνιακή ταχύτητα

$$\omega = 2\pi f_1 \quad (2.2.1-4)$$

όπου f_1 είναι η θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του μετατροπέα.

Επομένως, δοθέντος του πλάτους και της θέσης (γωνία) του διανύσματος αναφοράς \vec{V}_{ref} (που μπορούν να μετρηθούν), μπορεί αυτό να συντεθεί από 3 παραπλήσια στατικά διανύσματα. Όταν το \vec{V}_{ref} διασχίζει τους διάφορους τομείς έναν έναν, διαφορετικές ομάδες διακοπών θα ανοίξουν ή θα κλείσουν. Έτσι λοιπόν, όταν το \vec{V}_{ref} ολοκληρώνει μία στροφή στο χώρο, η τάση εξόδου του μετατροπέα μεταβάλλεται για έναν κύκλο στο χρόνο. Η συχνότητα εξόδου του μετατροπέα αντιστοιχεί στην ταχύτητα περιστροφής του \vec{V}_{ref} ενώ η τάση εξόδου μπορεί να καθορισθεί από το πλάτος του \vec{V}_{ref} .

2.2.2 Υπολογισμός Χρονικών Διαστημάτων

Όπως ειπώθηκε και νωρίτερα, το διάνυσμα αναφοράς \vec{V}_{ref} μπορεί να συντεθεί από τρία στατικά διανύσματα. Τα χρονικά διαστήματα για στατικά διανύσματα ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν τον χρόνο που παραμένουν ανοικτοί ή κλειστοί οι διακόπτες κατά τη διάρκεια μιας περιόδου δειγματοληψίας T_s . Ο υπολογισμός των χρονικών διαστημάτων βασίζεται στην αρχή πως το γινόμενο της τάσης αναφοράς \vec{V}_{ref} και της περιόδου δειγματοληψίας T_s ισούται με το άθροισμα των τάσεων πολλαπλασιασμένων με το χρονικό διάστημα των επιλεγμένων διανυσμάτων.

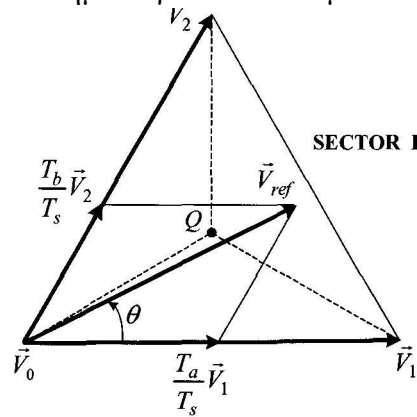
Για παράδειγμα, όταν το \vec{V}_{ref} βρίσκεται μέσα στον τομέα I όπως φαίνεται στο σχήμα 3

$$\vec{V}_{ref}T_s = \vec{V}_1T_a + \vec{V}_2T_b + \vec{V}_0T_0 \quad (2.2.2-1)$$

ενώ

$$T_s = T_a + T_b + T_0 \quad (2.2.2-2)$$

και T_a, T_b, T_0 είναι τα χρονικά διαστήματα για τα διανύσματα $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_0$ αντίστοιχα.



Σχήμα 3 Τομέας I

Κοιτώντας στο σχήμα 3, έχουμε

$$\vec{V}_{ref} = V_{ref}e^{j\theta}, \quad \vec{V}_1 = \frac{2}{3}V_d, \quad \vec{V}_2 = \frac{2}{3}V_d e^{j\pi/3} \quad \text{and} \quad \vec{V}_0 = 0 \quad (2.2.2-3)$$

Λύνοντας τις εξισώσεις (2.2.2-1), (2.2.2-2) και (2.2.2-3) παίρνουμε

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_d} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ T_b &= \frac{\sqrt{3}T_s V_{ref}}{V_d} \sin\theta \\ T_0 &= T_s - T_a - T_b \end{aligned} \quad (2.2.2-4)$$

για $0 \leq \theta < \pi/3$

Ο παραπάνω περιορισμός δείχνει ότι το \vec{V}_{ref} μπορεί να βρίσκεται μόνο στον τομέα I, αλλά ουσιαστικά, αυτές οι εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάθε τομέα, δεδομένου ότι ένα πολλαπλάσιο του $\pi/3$ αφαιρείται από την πραγματική γωνία θ έτσι ώστε η νέα θ' να βρίσκεται στον τομέα I. Με άλλα λόγια

$$\theta' = \theta - (k-1)\pi/3 \quad (2.2.2-5)$$

όπου $k=1, 2, \dots, 6$ για τους τομείς I, II, ..., VI αντίστοιχα.

2.2.3 Συντελεστής Διαμόρφωσης

Ο συντελεστής διαμόρφωσης ορίζεται ως

$$m_a = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{V_d} \quad (2.2.3-1)$$

Το μέγιστο πλάτος του διανύσματος αναφοράς, $V_{ref,max}$, αντιστοιχεί στην ακτίνα του μεγαλύτερου κύκλου που μπορεί να γραφεί μέσα στο εξάγωνο που φαίνεται στο σχήμα 2. Καθώς το εξάγωνο αποτελείται από 6 ενεργά διανύσματα που έχουν μήκος $2 V_d/3$, το $V_{ref,max}$ μπορεί να υπολογισθεί

$$V_{ref,max} = \frac{2}{3}V_d \times \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{V_d}{\sqrt{3}} \quad (2.2.3-2)$$

Ο μέγιστος συντελεστής διαμόρφωσης μπορεί να υπολογιστεί αντικαθιστώντας τη (2.2.3-2) στην (2.2.3-1)

$$m_{a,max} = 1$$

Η μέγιστη πολική τάση (rms) που παράγεται από SVM μπορεί να υπολογισθεί ως

$$V_{max,SVM} = \sqrt{3}(V_{ref,max} / \sqrt{2}) = 0.707V_d \quad (2.2.3-2)$$

όπου $V_{ref,max}$ είναι η μέγιστη rms τιμή της θεμελιώδους φασικής τάσης του μετατροπέα.

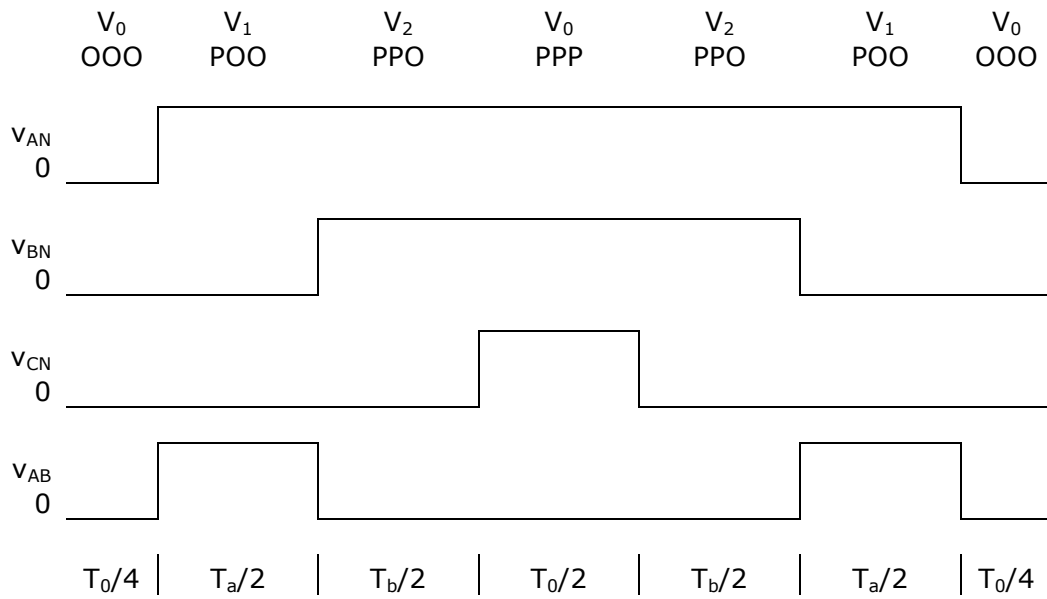
2.2.4 Διακοπτική Ακολουθία

Έχοντας επιλέξει τα διανύσματα χώρου και υπολογίσει τα χρονικά τους διανύσματα, το επόμενο βήμα είναι να καθορίσουμε την διακοπτική ακολουθία, με ποια σειρά δηλαδή θα γίνεται το άνοιγμα και κλείσιμο των συγκεκριμένων διακοπών. Γενικά, ο σχεδιασμός της διακοπτικής ακολουθίας για ένα δοσμένο διάνυσμα \vec{V}_{ref} δεν είναι μοναδικός, αλλά πρέπει να ικανοποιεί τις εξής δύο προδιαγραφές για την ελαχιστοποίηση των διακοπτικών απωλειών:

(α) Η μετάβαση από τη μία διακοπτική κατάσταση στην άλλη περιλαμβάνει μόνο 2 αλλαγές στο ίδιο πόδι του μετατροπέα. Ο ένας διακόπτης ανοίγει ενώ ο άλλος κλείνει.

(β) Η μετάβαση του \vec{V}_{ref} από έναν τομέα στο διανυσματικό διάγραμμα στον επόμενο, απαιτεί τον ελάχιστο αριθμό διακοπών, ή και καμία διακοπή.

Έχοντας φτάσει μέχρι εδώ, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια διακοπτική ακολουθία που φαίνεται στο σχήμα 4. Είναι μια τυπική διακοπτική ακολουθία επτά τμημάτων για το \vec{V}_{ref} στον τομέα I, όπου το \vec{V}_{ref} σχηματίζεται από τα \vec{V}_1 , \vec{V}_2 και \vec{V}_0 . Η περίοδος δειγματοληψίας T_s χωρίζεται σε 7 τμήματα για τα επιλεγμένα διανύσματα.



Σχήμα 4 Διακοπτική ακολουθία 7 τμημάτων για το V_{ref} στον τομέα I

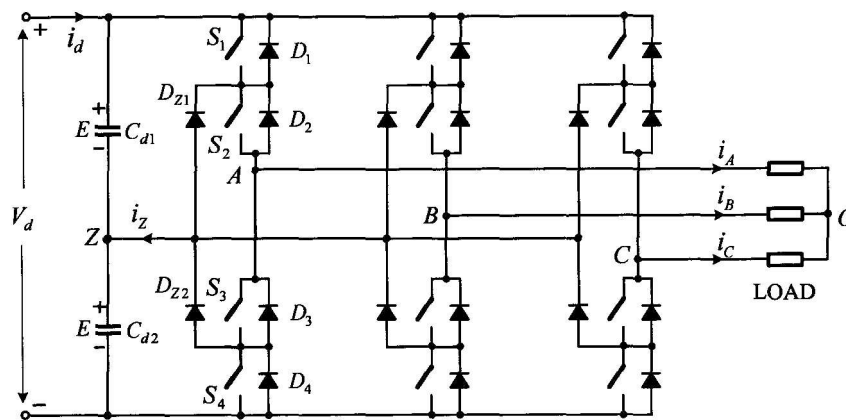
Ο πίνακας 3 δίνει την διακοπτική ακολουθία επτά τμημάτων για το \vec{V}_{ref} όταν αυτό βρίσκεται σε έναν από τους 6 τομείς.

switching segments							
sector	1	2	3	4	5	6	7
I	V_0 OOO	V_1 POO	V_2 PPO	V_0 PPP	V_2 PPO	V_1 POO	V_0 OOO
II	V_0 OOO	V_3 OPO	V_2 PPO	V_0 PPP	V_2 PPO	V_3 OPO	V_0 OOO
III	V_0 OOO	V_3 OPO	V_4 OPP	V_0 PPP	V_4 OPP	V_3 OPO	V_0 OOO
IV	V_0 OOO	V_5 OOP	V_4 OPP	V_0 PPP	V_4 OPP	V_5 OOP	V_0 OOO
V	V_0 OOO	V_5 OOP	V_6 POP	V_0 PPP	V_6 POP	V_5 OOP	V_0 OOO
VI	V_0 OOO	V_1 POO	V_6 POP	V_0 PPP	V_6 POP	V_1 POO	V_0 OOO

Πίνακας 3 Διακοπτική ακολουθία 7 τμημάτων

2.3 NPC Αντιστροφείας Τριών Επιπέδων

Το σχήμα 5 δείχνει το απλοποιημένο κυκλωματικό διάγραμμα ενός NPC αντιστροφέα τριών επιπέδων. Το πόδι A του μετατροπέα αποτελείται από 4 διακόπτες S1 έως S4 και 4 αντιπαράλληλες διόδους D1 έως D4. Στην πράξη, ως διακοπτικές συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν IGBT ή GCT. Στην DC πλευρά του μετατροπέα, ο πυκνωτής έχει χωρισθεί σε δύο, δημιουργώντας ένα ουδέτερο σημείο Z. Οι διόδους που είναι συνδεδεμένοι στο ουδέτερο σημείο, D_{Z1} και D_{Z2} , είναι οι διόδους περιορισμού. Όταν οι διακόπτες S2 και S3 είναι ανοικτοί, ο ακροδέκτης A του μετατροπέα συνδέεται στο ουδέτερο σημείο μέσω μιας διόδου περιορισμού. Η τάση κατά μήκος κάθε DC πυκνωτή είναι E, που είναι συνήθως ίση με το ένα δεύτερο της συνολικής DC τάσης V_d . Με μία πεπερασμένη τιμή για τους C_{d1} και C_{d2} , οι πυκνωτές μπορούν να φορτιστούν ή εκφορτιστούν από το ουδέτερο ρεύμα i_z προξενώντας απόκλιση τάσης στο σημείο Z.



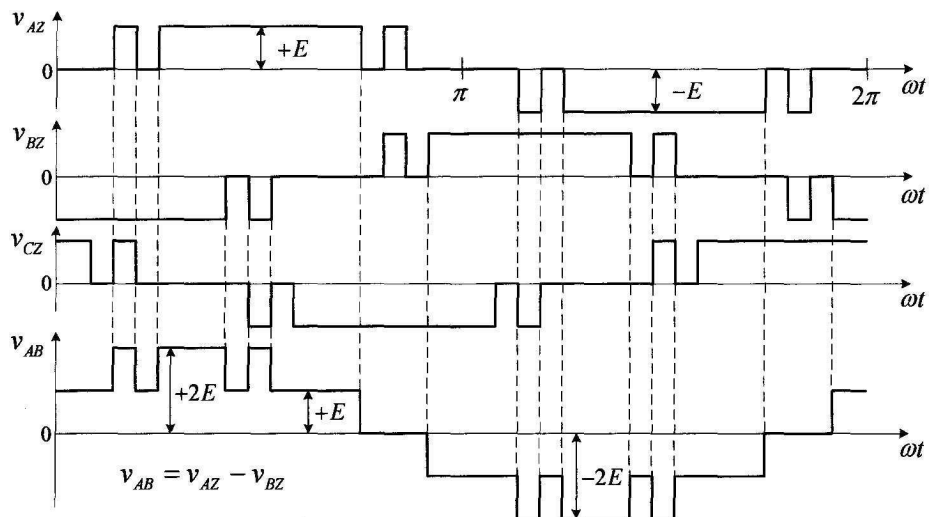
Σχήμα 5 NPC Αντιστροφείας Τριών Επιπέδων

Η κατάσταση λειτουργίας των διακοπών στον NPC inverter μπορεί να αναπαρασταθεί από τις διακοπτικές καταστάσεις που φαίνονται στον πίνακα 4. Η κατάσταση 'P' σημαίνει πως οι δύο άνω διακόπτες στο πόδι A είναι ανοικτοί και η τάση ακροδεκτών v_{AZ} , που είναι η τάση στον ακροδέκτη A με αναφορά στο σημείο Z, είναι +E, ενώ 'N' σημαίνει ότι οι δύο κάτω διακόπτες άγουν, έτσι ώστε $v_{AZ} = -E$. Η κατάσταση 'O' υποδηλώνει ότι οι δύο ενδιάμεσοι διακόπτες S2 και S3 άγουν και η v_{AZ} είναι μηδέν, μέσω των διόδων περιορισμού. Παρατηρώντας τον πίνακα 4 γίνεται φανερό ότι οι διακόπτες S1 και S3 λειτουργούν με συμπληρωματικό τρόπο. Το ίδιο ισχύει και για τους S1 και S4.

Switching State	Device Switching Status				v_{AZ}
	S1	S2	S3	S4	
P	On	On	Off	Off	E
O	Off	On	On	Off	0
N	Off	Off	On	On	-E

Πίνακας 4 Διακοπτικές Καταστάσεις

Το σχήμα 6 δείχνει πώς προκύπτει η κυματομορφή της πολικής τάσης.



Σχήμα 6 Κυματομορφές της πολικής τάσης και της τάσης εξόδου του αντιστροφέα

2.3.1 Space vectors

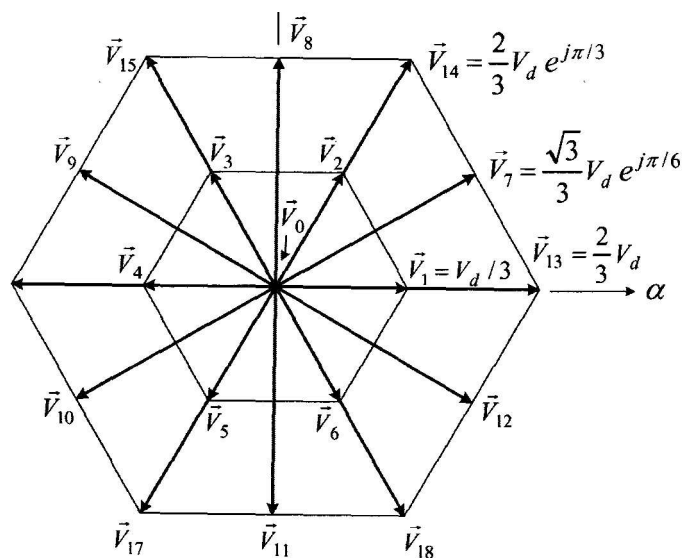
Όπως επισημάνθηκε και πριν, η λειτουργία κάθε φάσης μπορεί να παρασταθεί από τρεις διακοπτικές καταστάσεις [P], [0], και [N]. Θεωρώντας και τις 3 φάσεις, ο μετατροπέας έχει ένα σύνολο από $3^3 = 27$ πιθανούς συνδιασμούς διακοπτικών καταστάσεων. Όπως φαίνεται στον πίνακα 5, αυτές οι τριφασικές καταστάσεις απεικονίζονται από 3 γράμματα σε αγκύλες για τις φάσεις A, B και C.

Για την εύρεση της σχέσης μεταξύ των διακοπτικών καταστάσεων και των αντίστοιχων διανυσμάτων των τάσεων, μπορούμε να ακολουθήσουμε την ίδια πορεία με αυτή που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.2.1. Οι 27 καταστάσεις που φαίνονται στον πίνακα 5 αντιστοιχούν σε 19 διανύσματα τάσεων που το διανυσματικό τους διάγραμμα δίνεται στο σχήμα 7. Με βάση το πλάτος τους (μήκος), τα διανύσματα τάσεων μπορούν να χωρισθούν σε 4 ομάδες:

- Μηδενικό διάνυσμα (\vec{V}_0) που αντιπροσωπεύει τρεις διακοπτικές καταστάσεις [PPP], [000], και [NNN]. Το πλάτος του \vec{V}_0 είναι μηδέν.
- Μικρά διανύσματα (\vec{V}_1 έως \vec{V}_6), όλα έχουν πλάτος $V_d/3$. Κάθε μικρό διάνυσμα έχει 2 διακοπτικές καταστάσεις, μία που περιέχει [P] και την άλλη που περιέχει [N], και για το λόγο αυτό μπορεί να διαχωρισθεί περαιτέρω σε μικρό διάνυσμα τύπου P ή τύπου N.
- Μεσαία διανύσματα (\vec{V}_7 έως \vec{V}_{12}), το πλάτος των οποίων είναι $\sqrt{3}V_d/3$.
- Μεγάλα διανύσματα (\vec{V}_{13} έως \vec{V}_{18}), που όλα έχουν πλάτος $2V_d/3$.

Space Vector		Switching State		Vector Class	Vector Magnitude		
V_0		[PPP][OOO][NNN]		Zero	0		
V_1		P-type	N-type	Small	$1/3V_d$		
	V_{1P}	[POO]					
V_{1N}		[ONN]					
V_2	V_{2P}	[PPO]					
	V_{2N}		[OON]				
V_3	V_{3P}	[OPO]					
	V_{3N}		[NON]				
V_4	V_{4P}	[OPP]					
	V_{4N}		[NOO]				
V_5	V_{5P}	[OOP]					
	V_{5N}		[NNO]				
V_6	V_{6P}	[POP]					
	V_{6N}		[ONO]				
V_7		[PON]				Medium	$\sqrt{3}/3V_d$
V_8		[OPN]					
V_9		[NPO]					
V_{10}		[NOP]					
V_{11}		[ONP]					
V_{12}		[PNO]					
V_{13}		[PNN]		Large	$2/3V_d$		
V_{14}		[PPN]					
V_{15}		[NPN]					
V_{16}		[NPP]					
V_{17}		[NNP]					
V_{18}		[PNP]					

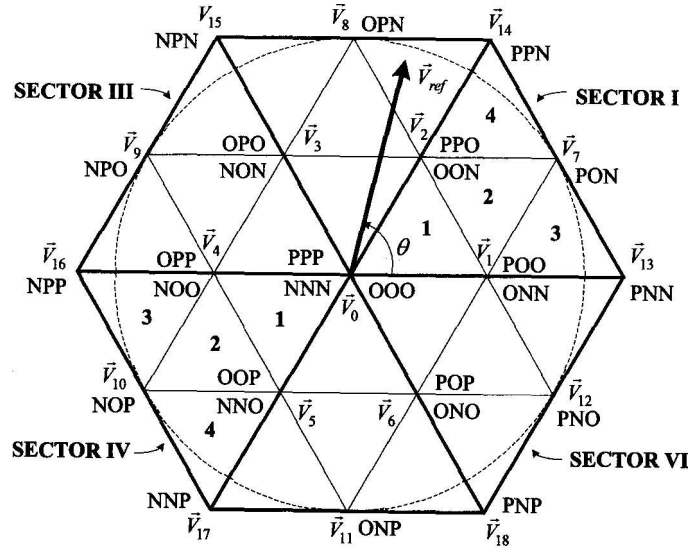
Πίνακας 5 Διανύσματα τάσεων και διακοπτικές καταστάσεις



Σχήμα 7 Διανυσματικό διάγραμμα του NPC αντιστροφέα

2.3.2 Υπολογισμός Χρονικών Διαστημάτων

Για να διευκολύνουμε τον υπολογισμό των χρονικών διαστημάτων, το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 7 μπορεί να χωριστεί σε 6 τριγωνικούς τομείς (I έως VI), κάθε ένας εκ των οποίων μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε 4 τριγωνικές περιοχές (1 έως 4) όπως φαίνεται στο σχήμα 8. Στο σχήμα διακρίνονται και οι διακοπτικές καταστάσεις όλων των διανυσμάτων.



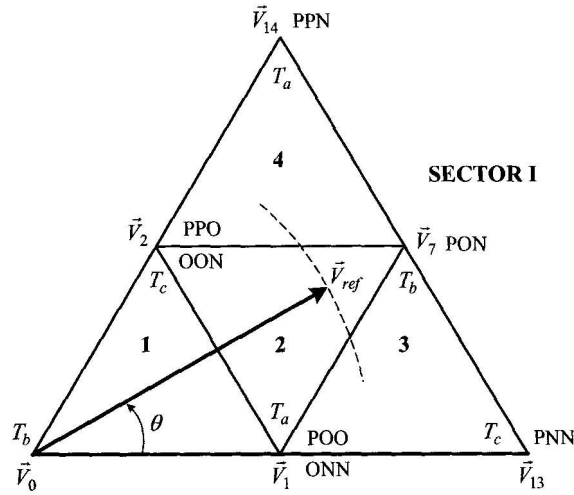
Σχήμα 8 Διαχωρισμός σε τομείς και περιοχές

Παρόμοια με τον SVM αλγόριθμο για τον αντιστροφέα δύο επιπέδων, η space vector διαμόρφωση για τον NPC αντιστροφέα είναι επίσης βασισμένη στην αρχή: το γινόμενο της τάσης αναφοράς \vec{V}_{ref} και της περιόδου δειγματοληψίας T_s ισούται με το άθροισμα των τάσεων πολλαπλασιασμένων με το χρονικό διάστημα των επιλεγμένων διανυσμάτων. Στον NPC αντιστροφέα, το διάνυσμα αναφοράς τάσης \vec{V}_{ref} μπορεί να κατασκευαστεί από τα τρία πλησιέστερα στατικά διανύσματα. Για παράδειγμα, όταν το \vec{V}_{ref} βρίσκεται στην περιοχή 2 του τομέα I όπως απεικονίζεται στο σχήμα 9, τα τρία πλησιέστερα διανύσματα είναι τα \vec{V}_1 , \vec{V}_2 , και \vec{V}_7 , εκ των οποίων

$$\vec{V}_{ref} T_s = \vec{V}_1 T_a + \vec{V}_7 T_b + \vec{V}_2 T_c \quad (2.3.2-1)$$

$$T_s = T_a + T_b + T_c \quad (2.3.2-2)$$

όπου T_a, T_b, T_c είναι τα χρονικά διαστήματα για τα διανύσματα \vec{V}_1 , \vec{V}_7 και \vec{V}_2 αντίστοιχα.



Σχήμα 9 Διανύσματα τάσης και τα χρονικά τους διαστήματα

Βλέποντας το σχήμα 9, έχουμε

$$\vec{V}_{ref} = V_{ref} e^{j\theta}, \quad \vec{V}_1 = \frac{1}{3} V_d, \quad \vec{V}_2 = \frac{1}{3} V_d e^{j\pi/3}, \quad \vec{V}_7 = \frac{\sqrt{3}}{3} V_d e^{j\pi/6} \quad \text{και} \quad \vec{V}_0 = 0 \quad (2.3.2-3)$$

Λύνοντας τις εξισώσεις (2.3.3-1), (2.3.3-2) και (2.3.3-3) παίρνουμε

$$\begin{aligned} T_a &= T_s [1 - 2m_\alpha \sin \theta] \\ T_b &= T_s \left[2m_\alpha \sin \left(\frac{\pi}{3} + \theta \right) - 1 \right] \\ T_c &= T_s \left[1 - 2m_\alpha \sin \left(\frac{\pi}{3} - \theta \right) \right] \end{aligned} \quad (2.3.2-4)$$

για $0 \leq \theta < \pi/3$

όπου m_α είναι ο συντελεστής διαμόρφωσης που ορίζεται ως

$$m_\alpha = \frac{\sqrt{3} V_{ref}}{V_d} \quad (2.3.2-5)$$

Το μέγιστο μήκος του διανύσματος αναφοράς \vec{V}_{ref} αντιστοιχεί στην ακτίνα του μεγαλύτερου κύκλου που μπορεί να εγγραφεί μέσα στο εξάγωνο του σχήματος 8, το οποίο συμβαίνει να είναι το μήκος των μεσαίων διανυσμάτων

$$V_{ref,max} = \sqrt{3} V_d / 3 \quad (2.3.2-6)$$

Αντικαθιστώντας τη (2.3.2-6) στη (2.3.2-5)

$$m_{\alpha,max} = 1$$

Ο πίνακας 6 δίνει τις εξισώσεις για τον υπολογισμό των χρονικών διαστημάτων στον τομέα I.

region	T_α		T_b		T_c	
1	\vec{V}_1	$T_s \left[2m_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \right]$	\vec{V}_0	$T_s \left[1 - 2m_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \right]$	\vec{V}_2	$T_s [2m_\alpha \sin\theta]$
2	\vec{V}_1	$T_s [1 - 2m_\alpha \sin\theta]$	\vec{V}_7	$T_s \left[2m_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) - 1 \right]$	\vec{V}_2	$T_s \left[1 - 2m_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \right]$
3	\vec{V}_1	$T_s \left[2 - 2m_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \right]$	\vec{V}_7	$T_s [2m_\alpha \sin\theta]$	\vec{V}_{13}	$T_s \left[2m_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - 1 \right]$
4	\vec{V}_{14}	$T_s [2m_\alpha \sin\theta - 1]$	\vec{V}_7	$T_s \left[2m_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \right]$	\vec{V}_2	$T_s \left[2 - 2m_\alpha \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \right]$

Πίνακας 6 Υπολογισμός των χρονικών διαστημάτων για το V_{ref} στον τομέα I

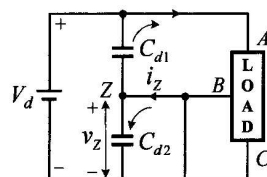
Οι εξισώσεις στον πίνακα 6 μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των χρονικών διαστημάτων όταν το \vec{V}_{ref} βρίσκεται σε άλλους τομείς (II to VI) δεδομένου ότι ένα πολλαπλάσιο του $\pi/3$ αφαιρείται από την πραγματική γωνία θ , τέτοιο ώστε η νέα γωνία να πέφτει μέσα στο διάστημα 0 και $\pi/3$.

2.3.3 Σχεδιασμός Διακοπτικής Ακολουθίας

Η τάση στο ουδέτερο σημείο v_z , που ορίζεται ως η τάση μεταξύ του σημείου Z και του αρνητικού DC ακροδέκτη, συνήθως διαφέρει ανάλογα με τη διακοπτική κατάσταση του NPC αντιστροφέα. Κατά τη σχεδίαση της διακοπτικής ακολουθίας, πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε το φαινόμενο της απόκλισης τάσης. Αναλογιζόμενοι τις δύο απαιτήσεις που παρουσιάστηκαν νωρίτερα για τον αντιστροφέα δύο επιπέδων, καταλήγουμε στις εξής απαιτήσεις που πρέπει να τηρεί ο NPC αντιστροφέας:

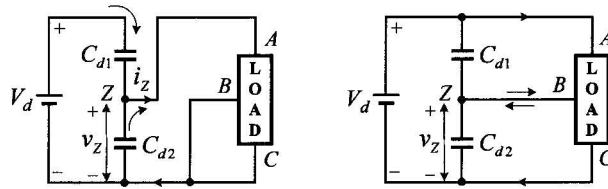
- (α) Η μετάβαση από μία διακοπτική κατάσταση στην επόμενη περιλαμβάνει μόνο δύο διακοπές στο ίδιο πόδι του μετατροπέα, ο ένας διακόπτης ανοίγει και ο άλλος κλείνει.
- (β) Η μετάβαση για το \vec{V}_{ref} όταν κινείται από έναν τομέα (ή περιοχή) στον επόμενο προϋποθέτει κανένα ή τον ελάχιστο αριθμό από διακοπές.
- (γ) Το φαινόμενο της απόκλισης τάσης στο ουδέτερο σημείο ελαχιστοποιείται.

Αν προσπαθήσουμε να ερευνήσουμε το φαινόμενο της απόκλισης τάσης στο ουδέτερο σημείο, πρέπει να εστιάσουμε στο σχήμα 10 που δείχνει τη λειτουργία του μετατροπέα με τύπου P διακοπτική κατάσταση [P00] του μικρού διάνυσματος V_1 .



Σχήμα 10 [P00] μικρό διάνυσμα τύπου P

Αφού το τριφασικό φορτίο είναι συνδεδεμένο μεταξύ του θετικού DC ακροδέκτη και του ουδέτερου σημείου Z, το ουδέτερο ρεύμα i_Z ρέει προς το Z, προκαλώντας αύξηση του δυναμικού v_Z . Αντιθέτως, η διακοπτική κατάσταση τύπου N [ONN] του V_1 κάνει τη v_Z να μειωθεί στο σχήμα 11.



Σχήμα 11 [ONN] μικρό διάνυσμα τύπου N

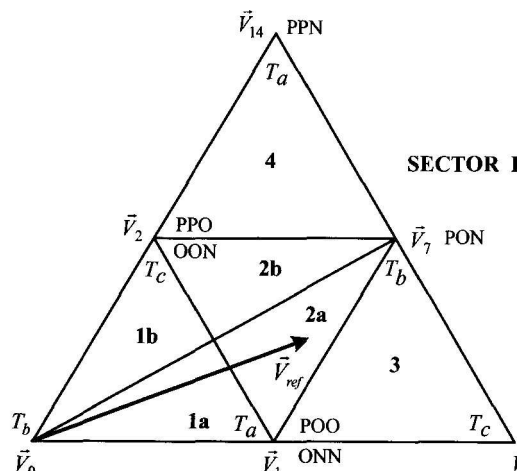
Σχήμα 12 [PON] μεσαίο διάνυσμα

Τα μεσαία διανύσματα τάσης επίσης επηρεάζουν την τάση στο ουδέτερο σημείο. Για το μεσαίο διάνυσμα V_7 με διακοπτική κατάσταση [PON] στο σχήμα 12, οι ακροδέκτες του φορτίου A, B και C είναι συνδεδεμένοι στο θετικό ακροδέκτη, στο ουδέτερο σημείο και στο αρνητικό ακροδέκτη αντίστοιχα. Ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες του αντιστροφέα, η τάση στο ουδέτερο σημείο v_Z μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί.

Περίληπτικά έχουμε:

- Το μηδενικό διάνυσμα δεν επηρεάζει την τάση v_Z .
- Τα μικρά διανύσματα V_1 έως V_6 επηρεάζουν σημαντικά την v_Z . Ένα μικρό διάνυσμα P-τύπου προκαλεί αύξηση της v_Z , ενώ ένα N-τύπου οδηγεί σε μείωσή της.
- Τα μεσαία διανύσματα V_7 to V_{12} επηρεάζουν και αυτά τη v_Z , αλλά το πρόσημο της απόκλισης είναι ακαθόριστο.
- Τα μεγάλα διανύσματα V_{13} to V_{18} δεν παίζουν ρόλο στο φαινόμενο της απόκλισης τάσης.

Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, ένα μικρό διάνυσμα τύπου P προξενεί αύξηση της v_Z ενώ ένα τύπου N τη μείωσή της. Για την ελαχιστοποίηση αυτού του φαινομένου, ο χρόνος ενός δοσμένου μικρού διανύσματος μπορεί να κατανεμηθεί εξίσου ανάμεσα σε διακοπτικές καταστάσεις τύπου P και τύπου N για μία περίοδο δειγματοληψίας. Η παρατήρηση αυτή σε συνδιασμό με περαιτέρω διερεύνηση οδηγεί σε χωρισμό του ενός τομέα σε έξι περιοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα 13.



Σχήμα 13 Διαχωρισμός των 6 περιοχών του τομέα I για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου απόκλισης τάσης

Όταν το \vec{V}_{ref} είναι στην περιοχή 1 ή 2 του τομέα I, όπως φαίνεται στο σχήμα 9, δύο από τα τρία επιλεγμένα διανύσματα είναι μικρά. Για να μειωθεί η απόκλιση τάσης, κάθε μία από τις 2

περιοχές χωρίζεται περαιτέρω σε δύο υποπεριοχές όπως απεικονίζεται στο σχήμα 13. Υποθέτοντας ότι το \vec{V}_{ref} βρίσκεται στην περιοχή 2a, μπορεί να συντεθεί από τα διανύσματα V_1 , V_2 , και V_7 . Αφού το \vec{V}_{ref} βρίσκεται πιο κοντά στο V_1 απ' ότι στο V_2 , ο αντίστοιχος χρόνος T_a για το V_1 είναι μεγαλύτερος από τον T_c για το V_2 . Το διάνυσμα V_1 αναφέρεται και ως κυρίαρχο μικρό διάνυσμα, του οποίου ο χρόνος είναι εξίσου μοιρασμένος μεταξύ του V_{1P} and V_{1N} όπως φαίνεται στον πίνακα 7.

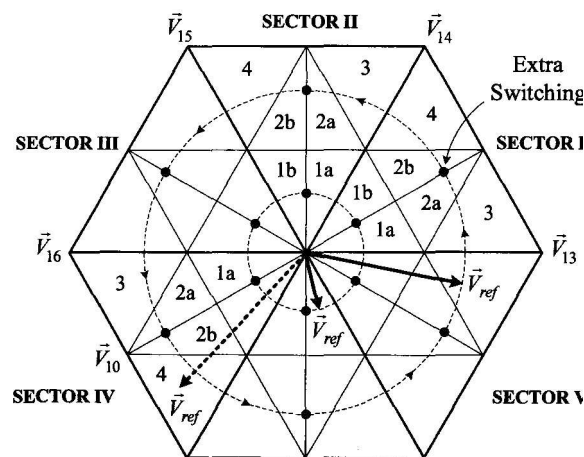
Segment:	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th
Voltage Vector:	V_{1N}	V_{2N}	V_7	V_{1P}	V_7	V_{2N}	V_{1N}
Switching State:	[ONN]	[OON]	[PON]	[POO]	[PON]	[OON]	[ONN]
Dwell Time:	$T_d/4$	$T_d/2$	$T_b/2$	$T_d/2$	$T_b/2$	$T_d/2$	$T_d/4$

Πίνακας 7 Διακοπτική ακολουθία 7 τμημάτων για το \vec{V}_{ref} στον τομέα I-2a

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα, όλες οι διακοπτικές ακολουθίες για τον τομέα I βρίσκονται στον πίνακα 8. Παρατηρείται ότι (1) όταν το \vec{V}_{ref} περνάει το σύνορο μεταξύ των τομέων I και II, η μετάβαση δεν συνεπάγεται καμία διακοπή και (2) μία επιπλέον διακοπή συμβαίνει όταν το \vec{V}_{ref} κινείται από μια περιοχή a στη b ενός τομέα. Η γραφική απεικόνιση φαίνεται στο σχήμα 14, όπου ο μεγάλος και μικρός κύκλος δείχνουν την τροχιά του \vec{V}_{ref} και οι τελείες αντιπροσωπεύουν την επιπλέον διακοπή.

Sector I												
Sgmt	1a		1b		2a		2b		3		4	
1 st	V_{1N}	[ONN]	V_{2N}	[OON]	V_{1N}	[ONN]	V_{2N}	[OON]	V_{1N}	[ONN]	V_{2N}	[OON]
2 nd	V_{2N}	[OON]	V_0	[OOO]	V_{2N}	[OON]	V_7	[PON]	V_{13}	[PNN]	V_7	[PON]
3 rd	V_0	[OOO]	V_{1P}	[POO]	V_7	[PON]	V_{1P}	[POO]	V_7	[PON]	V_{14}	[PPN]
4 th	V_{1P}	[POO]	V_{2P}	[PPO]	V_{1P}	[POO]	V_{2P}	[PPO]	V_{1P}	[POO]	V_{2P}	[PPO]
5 th	V_0	[OOO]	V_{1P}	[POO]	V_7	[PON]	V_{1P}	[POO]	V_7	[PON]	V_{14}	[PPN]
6 th	V_{2N}	[OON]	V_0	[OOO]	V_{2N}	[OON]	V_7	[PON]	V_{13}	[PNN]	V_7	[PON]
7 th	V_{1N}	[ONN]	V_{2N}	[OON]	V_{1N}	[ONN]	V_{2N}	[OON]	V_{1N}	[ONN]	V_{2N}	[OON]

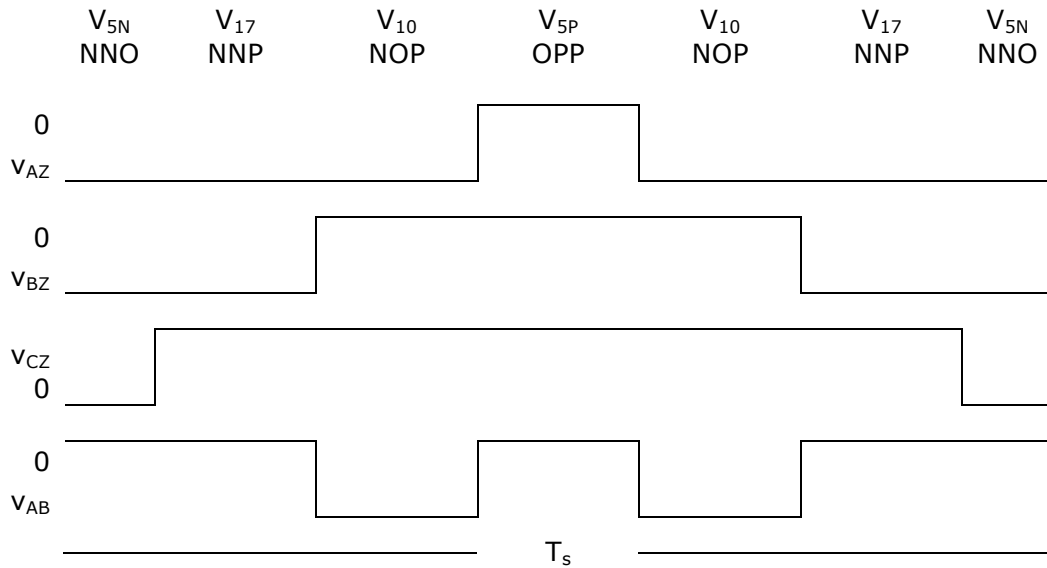
Πίνακας 8 Διακοπτική ακολουθία 7 τμημάτων



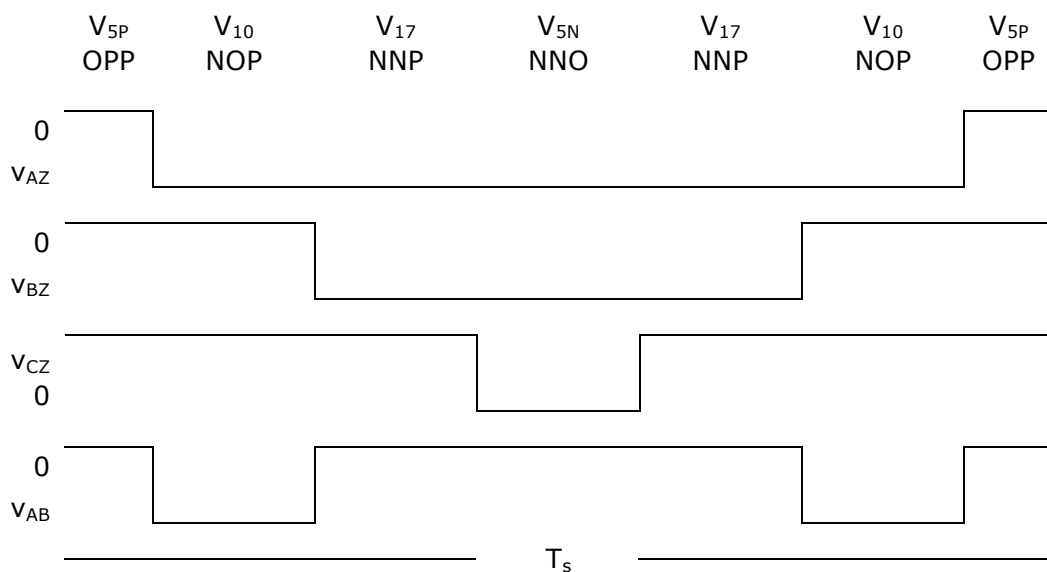
Σχήμα 14 Γραφική αναπαράσταση των επιπλέον διακοπών όταν \vec{V}_{ref} κινείται από την περιοχή a στην b

2.3.4 Περιορισμός Αρμονικών Άρτιας Τάξης

Για τη διερεύνηση του μηχανισμού περιορισμού των άρτιων αρμονικών, ας μελετήσουμε την περίπτωση όπου το διάνυσμα αναφοράς \vec{V}_{ref} βρίσκεται στον τομέα IV-4 του διαγράμματος στο σχήμα 13. Το σχήμα 15 δείχνει δύο έγκυρες διακοπτικές ακολουθίες για το \vec{V}_{ref} στον τομέα IV-4.



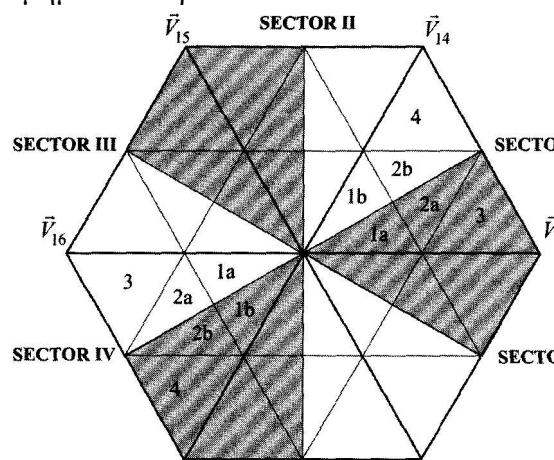
Σχήμα 15 (a) Ακολουθία τύπου Α



Σχήμα 15 (b) Ακολουθία τύπου β

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η ακολουθία τύπου A ξεκινάει με ένα μικρό διάνυσμα τύπου N ενώ η ακολουθία τύπου B με ένα μικρό διάνυσμα τύπου P. Παρότι οι κυματομορφές των v_{AZ} , v_{BZ} , v_{CZ} και v_{AB} στα διαγράμματα (a) και (b) φαίνονται αρκετά διαφορετικές, είναι ουσιαστικά οι ίδιες με μία χρονική μετατόπιση $T_s/2$, που γίνεται εμφανής εάν οι κυματομορφές σχεδιαστούν για πάνω από δύο περιόδους.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 15 (a), η κυματομορφή δεν είναι συμμετρική ως προς τον οριζόντιο άξονα. Αυτό οδηγεί στην παραγωγή αρμονικών άρτιας τάξης. Ας λάβουμε υπόψιν μας τώρα την διακοπτική ακολουθία τύπου B που φαίνεται στο σχήμα 15 (b). Είναι εμφανές ότι αυτή η ακολουθία θα οδηγούσε σε $v_{AB}(\omega t) = -v_{AB}(\omega t + \pi)$. Σαν αποτέλεσμα, η κυματομορφή της v_{AB} δεν θα περιείχε καθόλου άρτιες αρμονικές. Στην συμβατική SVM τεχνική εφαρμόζεται μόνο η διακοπτική ακολουθία τύπου A. Για τον περιορισμό των αρμονικών άρτιας τάξης στην v_{AB} , οι ακολουθίες τύπου A και B μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά όπως φαίνεται στο σχήμα 16, όπου το σκιασμένο τμήμα αναπαριστά τον τύπο A και το υπόλοιπο το B.



Σχήμα 16 Εναλλάξ χρήση των διακοπτικών ακολουθιών τύπου A και B για τον περιορισμό των αρμονικών άρτιας τάξης

Στον πίνακα 9 περιγράφονται αναλυτικά οι διακοπτικές καταστάσεις και η ακολουθία τους για την βελτιωμένη SVM τεχνική. Συγκρινόμενη με την συμβατική SVM τεχνική, η βελτιωμένη προκαλεί μία μικρή αύξηση στη διακοπτική συχνότητα.

Sector I											
1a		1b		2a		2b		3		4	
V_{1P}	[POO]	V_{2N}	[OON]	V_{1P}	[POO]	V_{2N}	[OON]	V_{1P}	[POO]	V_{2N}	[OON]
V_0	[OOO]	V_0	[OOO]	V_7	[PON]	V_7	[PON]	V_7	[PON]	V_7	[PON]
V_{2N}	[OON]	V_{1P}	[POO]	V_{2N}	[OON]	V_{1P}	[POO]	V_{13}	[PNN]	V_{14}	[PPN]
V_{1N}	[ONN]	V_{2P}	[PPO]	V_{1N}	[ONN]	V_{2P}	[PPO]	V_{1N}	[ONN]	V_{2P}	[PPO]
V_{2N}	[OON]	V_{1P}	[POO]	V_{2N}	[OON]	V_{1P}	[POO]	V_{13}	[PNN]	V_{14}	[PPN]
V_0	[OOO]	V_0	[OOO]	V_7	[PON]	V_7	[PON]	V_7	[PON]	V_7	[PON]
V_{1P}	[POO]	V_{2N}	[OON]	V_{1P}	[POO]	V_{2N}	[OON]	V_{1P}	[POO]	V_{2N}	[OON]

Sector II											
1a		1b		2a		2b		3		4	
V_{2N}	[OON]	V_{3P}	[OPO]	V_{2N}	[OON]	V_{3P}	[OPO]	V_{2N}	[OON]	V_{3P}	[OPO]
V_0	[OOO]	V_0	[OOO]	V_8	[OPN]	V_8	[OPN]	V_8	[OPN]	V_8	[OPN]
V_{3P}	[OPO]	V_{2N}	[OON]	V_{3P}	[OPO]	V_{2N}	[OON]	V_{14}	[PPN]	V_{15}	[NPN]

V _{2P}	[PPO]	V _{3N}	[NON]	V _{2P}	[PPO]	V _{3N}	[NON]	V _{2P}	[PPO]	V _{3N}	[NON]
V _{3P}	[OPO]	V _{2N}	[OON]	V _{3P}	[OPO]	V _{2N}	[OON]	V ₁₄	[PPN]	V ₁₅	[NPN]
V ₀	[OOO]	V ₀	[OOO]	V ₈	[OPN]	V ₈	[OPN]	V ₈	[OPN]	V ₈	[OPN]
V _{2N}	[OON]	V _{3P}	[OPO]	V _{2N}	[OON]	V _{3P}	[OPO]	V _{2N}	[OON]	V _{3P}	[OPO]

Sector III											
1a		1b		2a		2b		3		4	
V _{3P}	[OPO]	V _{4N}	[NOO]	V _{3P}	[OPO]	V _{4N}	[NOO]	V _{3P}	[OPO]	V _{4N}	[NOO]
V ₀	[OOO]	V ₀	[OOO]	V ₉	[NPO]	V ₉	[NPO]	V ₉	[NPO]	V ₉	[NPO]
V _{4N}	[NOO]	V _{3P}	[OPO]	V _{4N}	[NOO]	V _{3P}	[OPO]	V ₁₅	[NPN]	V ₁₆	[NPP]
V _{3N}	[NON]	V _{4P}	[OPP]	V _{3N}	[NON]	V _{4P}	[OPP]	V _{3N}	[NON]	V _{4P}	[OPP]
V _{4N}	[NOO]	V _{3P}	[OPO]	V _{4N}	[NOO]	V _{3P}	[OPO]	V ₁₅	[NPN]	V ₁₆	[NPP]
V ₀	[OOO]	V ₀	[OOO]	V ₉	[NPO]	V ₉	[NPO]	V ₉	[NPO]	V ₉	[NPO]
V _{3P}	[OPO]	V _{4N}	[NOO]	V _{3P}	[OPO]	V _{4N}	[NOO]	V _{3P}	[OPO]	V _{4N}	[NOO]

Sector IV											
1a		1b		2a		2b		3		4	
V _{4N}	[NOO]	V _{5P}	[OOP]	V _{4N}	[NOO]	V _{5P}	[OOP]	V _{4N}	[NOO]	V _{5P}	[OOP]
V ₀	[OOO]	V ₀	[OOO]	V ₁₀	[NOP]	V ₁₀	[NOP]	V ₁₀	[NOP]	V ₁₀	[NOP]
V _{5P}	[OOP]	V _{4N}	[NOO]	V _{5P}	[OOP]	V _{4N}	[NOO]	V ₁₆	[NPP]	V ₁₇	[NNP]
V _{4P}	[OPP]	V _{5N}	[NNO]	V _{4P}	[OPP]	V _{5N}	[NNO]	V _{4P}	[OPP]	V _{5N}	[NNO]
V _{5P}	[OOP]	V _{4N}	[NOO]	V _{5P}	[OOP]	V _{4N}	[NOO]	V ₁₆	[NPP]	V ₁₇	[NNP]
V ₀	[OOO]	V ₀	[OOO]	V ₁₀	[NOP]	V ₁₀	[NOP]	V ₁₀	[NOP]	V ₁₀	[NOP]
V _{4N}	[NOO]	V _{5P}	[OOP]	V _{4N}	[NOO]	V _{5P}	[OOP]	V _{4N}	[NOO]	V _{5P}	[OOP]

Sector V											
1a		1b		2a		2b		3		4	
V _{5P}	[OOP]	V _{6N}	[ONO]	V _{5P}	[OOP]	V _{6N}	[ONO]	V _{5P}	[OOP]	V _{6N}	[ONO]
V ₀	[OOO]	V ₀	[OOO]	V ₁₁	[ONP]	V ₁₁	[ONP]	V ₁₁	[ONP]	V ₁₁	[ONP]
V _{6N}	[ONO]	V _{5P}	[OOP]	V _{6N}	[ONO]	V _{5P}	[OOP]	V ₁₇	[NPN]	V ₁₈	[PNP]
V _{5N}	[NNO]	V _{6P}	[POP]	V _{5N}	[NNO]	V _{6P}	[POP]	V _{5N}	[NNO]	V _{6P}	[POP]
V _{6N}	[ONO]	V _{5P}	[OOP]	V _{6N}	[ONO]	V _{5P}	[OOP]	V ₁₇	[NPN]	V ₁₈	[PNP]
V ₀	[OOO]	V ₀	[OOO]	V ₁₁	[ONP]	V ₁₁	[ONP]	V ₁₁	[ONP]	V ₁₁	[ONP]
V _{5P}	[OOP]	V _{6N}	[ONO]	V _{5P}	[OOP]	V _{6N}	[ONO]	V _{5P}	[OOP]	V _{6N}	[ONO]

Sector VI											
1a		1b		2a		2b		3		4	
V _{6N}	[ONO]	V _{1P}	[POO]	V _{6N}	[ONO]	V _{1P}	[POO]	V _{6N}	[ONO]	V _{1P}	[POO]
V ₀	[OOO]	V ₀	[OOO]	V ₁₂	[PNO]	V ₁₂	[PNO]	V ₁₂	[PNO]	V ₁₂	[PNO]
V _{1P}	[POO]	V _{6N}	[ONO]	V _{1P}	[POO]	V _{6N}	[ONO]	V ₁₈	[PNP]	V ₁₃	[PNN]
V _{6P}	[POP]	V _{1N}	[ONN]	V _{6P}	[POP]	V _{1N}	[ONN]	V _{6P}	[POP]	V _{1N}	[ONN]
V _{1P}	[POO]	V _{6N}	[ONO]	V _{1P}	[POO]	V _{6N}	[ONO]	V ₁₈	[PNP]	V ₁₃	[PNN]
V ₀	[OOO]	V ₀	[OOO]	V ₁₂	[PNO]	V ₁₂	[PNO]	V ₁₂	[PNO]	V ₁₂	[PNO]
V _{6N}	[ONO]	V _{1P}	[POO]	V _{6N}	[ONO]	V _{1P}	[POO]	V _{6N}	[ONO]	V _{1P}	[POO]

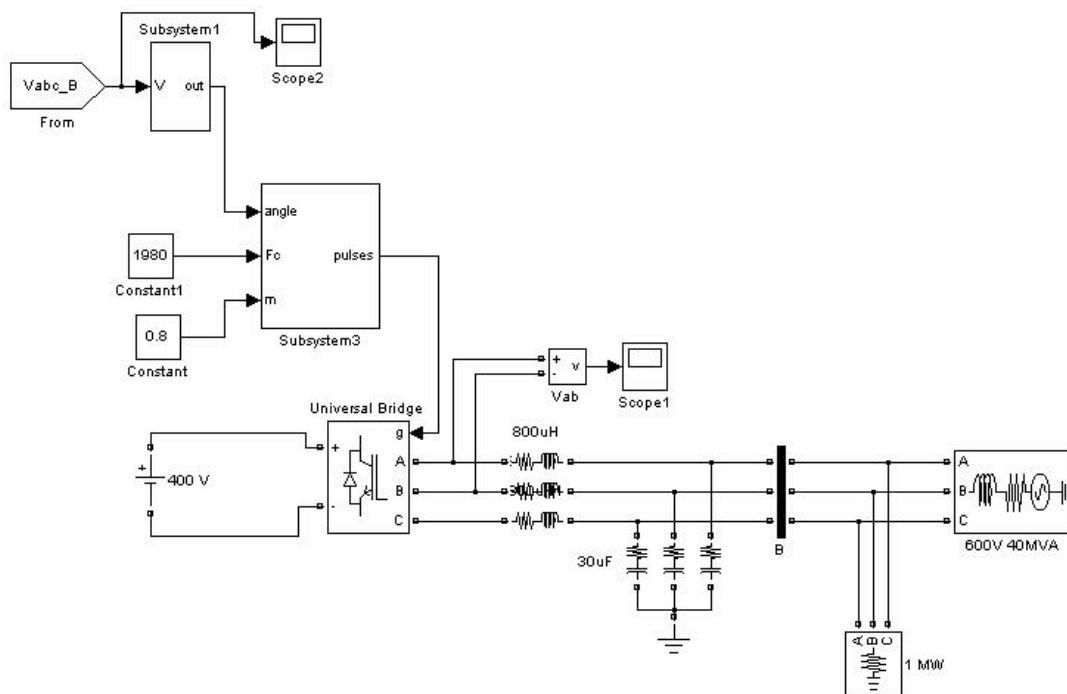
Πίνακας 9 Διακοπτική ακολουθία 7 τμημάτων για τον αντιστροφέα τριών επιπέδων με περιορισμό των αρμονικών άρτιας τάξης

3. Μοντελοποίηση

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να προσομοιώσει το κύκλωμα οδήγησης ενός NPC αντιστροφέα τριών επιπέδων, κάνοντας χρήση της SVMWM τεχνικής. Βέβαια, είναι σκόπιμο να ξεκινήσουμε με την προσομοίωση ενός αντιστροφέα δύο επιπέδων, μιας και ακολουθεί τις ίδιες αρχές λειτουργίας και δεν είναι τόσο πολύπλοκος.

3.1 Αντιστροφέας δύο επιπέδων

Το μοντέλο που σχεδιάστηκε φαίνεται στο σχέδιο 17.

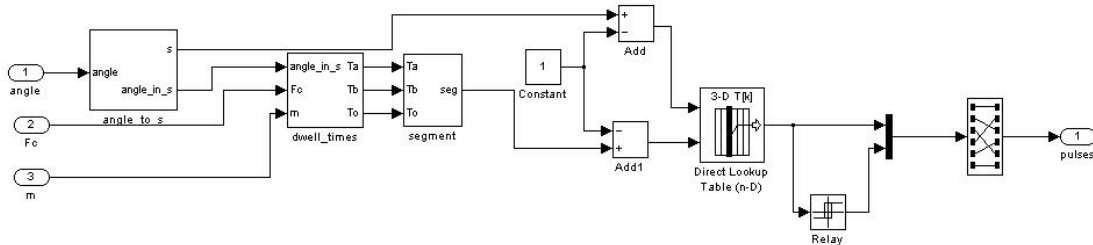


Σχήμα 17 Ο αντιστροφέας δύο επιπέδων συνδεδεμένος σε δίκτυο

Το κύκλωμα αντιπροσωπεύει έναν αντιστροφέα συνδεδεμένο σε ένα 50 Hz, 400 V δίκτυο. Ο τριφασικός, τριών επιπέδων IGBT αντιστροφέας σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας το Universal

Bridge block που παρέχουν οι βιβλιοθήκες του SIMULINK. Φίλτρα LC χρησιμοποιούνται για τη μείωση των αρμονικών που αναπτύσσονται στον 600 V ζυγό B. Επειδή τα στοιχεία που συνθέτουν το κύκλωμα είναι ιδανικά, δεν χρειάζεται σύστημα ελέγχου για την SVPWM γεννήτρια παλμών. Στην εργασία αυτή εστιάζουμε μόνο στην παλμογεννήτρια.

Στο σχήμα 18 φαίνεται καλύτερα η γεννήτρια παλμών. Ως εισόδους δέχεται τη γωνία του \vec{V}_{ref} , τη διακοπτική συχνότητα F_c , καθώς και τον συντελεστή διαμόρφωσης m . Έξοδοι της είναι οι 6 παλμοί, έναν για κάθε IGBT.

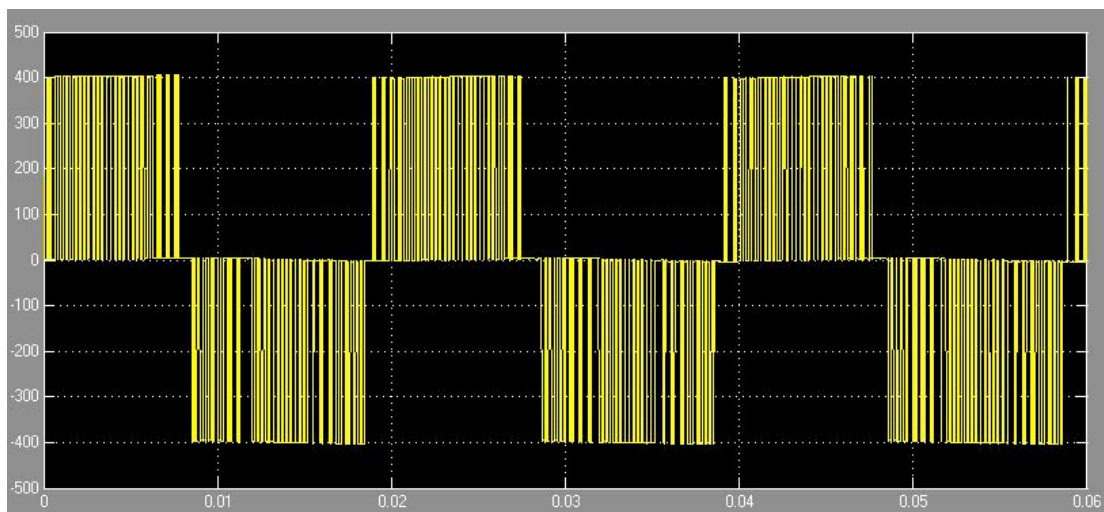


Σχήμα 18 Διάγραμμα της γεννήτριας παλμών με SVPWM

Αρχικά, το υποσύστημα "angle_to_s" μετατρέπει την πραγματική γωνία θ στη νέα θ' έτσι ώστε να εμπίπτει στον τομέα I σύμφωνα με τη σχέση (2.2.2-5). Επίσης, αναγνωρίζει τον τρέχων τομέα (I έως VI). Μετά, το υποσύστημα "dwell_times" παίρνοντας ως είσοδο τη γωνία θ' , τη διακοπτική συχνότητα και τον δείκτη διαμόρφωσης, υπολογίζει τα χρονικά διαστήματα σύμφωνα με την εξίσωση (2.2.2-4).

Μετά τον υπολογισμό των χρονικών διαστημάτων, το υποσύστημα "segment" ελέγχει σε ποιο τμήμα βρισκόμαστε, σύμφωνα με τον χρόνο. Μετά από αυτά τα βήματα, ξέρουμε την ακριβή θέση του \vec{V}_{ref} . Ο πίνακας "lookup" έχει διαστάσεις (3, 6, 7) (3 καταστάσεις, 6 τομείς, 7 τμήματα) και αποθηκεύει όλες τις διακοπτικές καταστάσεις που φαίνονται στον πίνακα 3. Μετά την επιλογή των καταστάσεων για τους 3 άνω διακόπτες, οι καταστάσεις αντιστρέφονται για τους κάτω διακόπτες, και όλες μαζί αποτελούν την έξοδο της γεννήτριας παλμών.

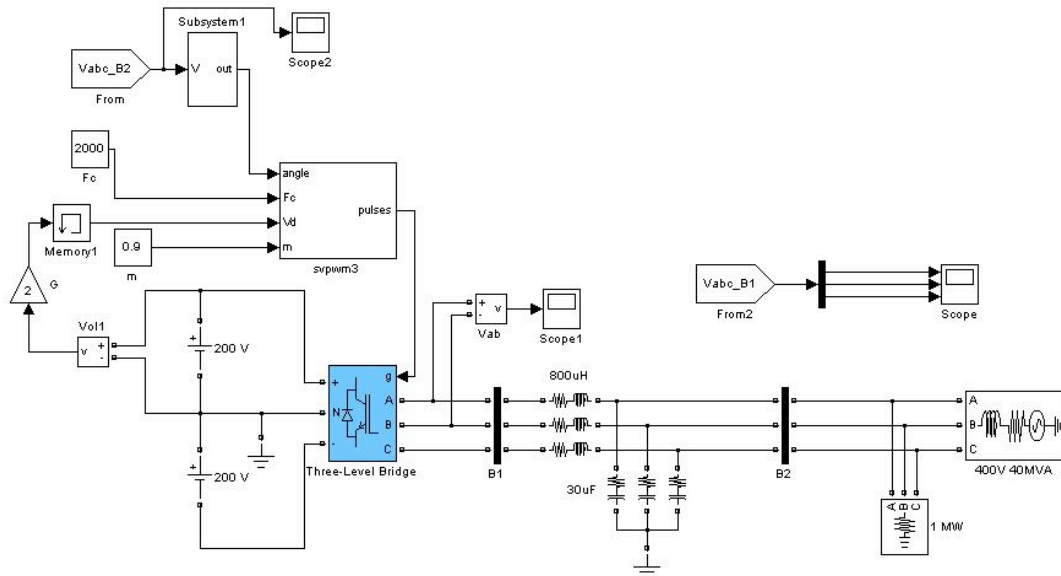
Για την διακριτοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε χρόνος βήματος 50 μ s. Η προσομοίωση δίνει ως έξοδο την ακόλουθη κυματομορφή (σχήμα 19) για την φασική τάση που καταγράφεται στο Scope1. Η κυματομορφή αυτή ήταν αναμενόμενη.



Σχήμα 19 Φασική τάση για τον αντιστροφέα δύο επιπέδων

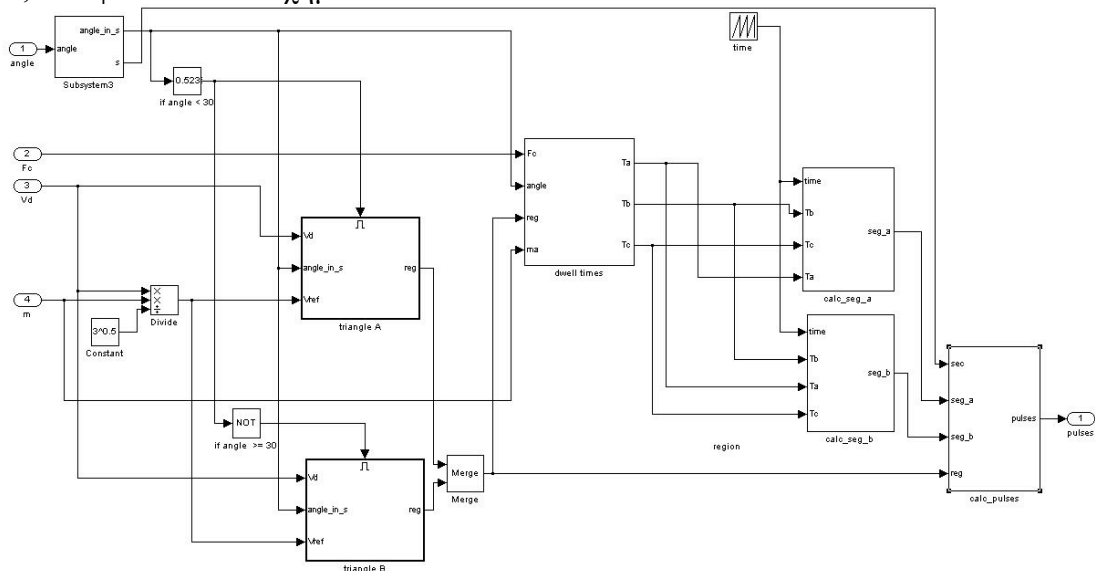
3.2 NPC αντιστροφείας τριών επιπέδων

Το μοντέλο που σχεδιάστηκε φαίνεται στο σχήμα 20.



Σχήμα 20 Ο αντιστροφείας τριών επιπέδων συνδεδεμένος σε δίκτυο

Εδώ έχουμε ακριβώς το ίδιο κύκλωμα με το μοντέλο των δύο επιπέδων, εκτός από τον αντιστροφεία. Ο αντιστροφείας έχει σχεδιαστεί με τη χρήση του Three-Level Bridge block, που χρησιμοποιεί IGBT και διόδους. Δεν υπάρχουν πυκνωτές παράλληλα με την πηγή τάσης, καθώς τότε θα δημιουργούταν η απαίτηση για ένα σύστημα ελέγχου. Η εστίαση γίνεται στη γεννήτρια παλμών, που φαίνεται στο σχήμα 21.



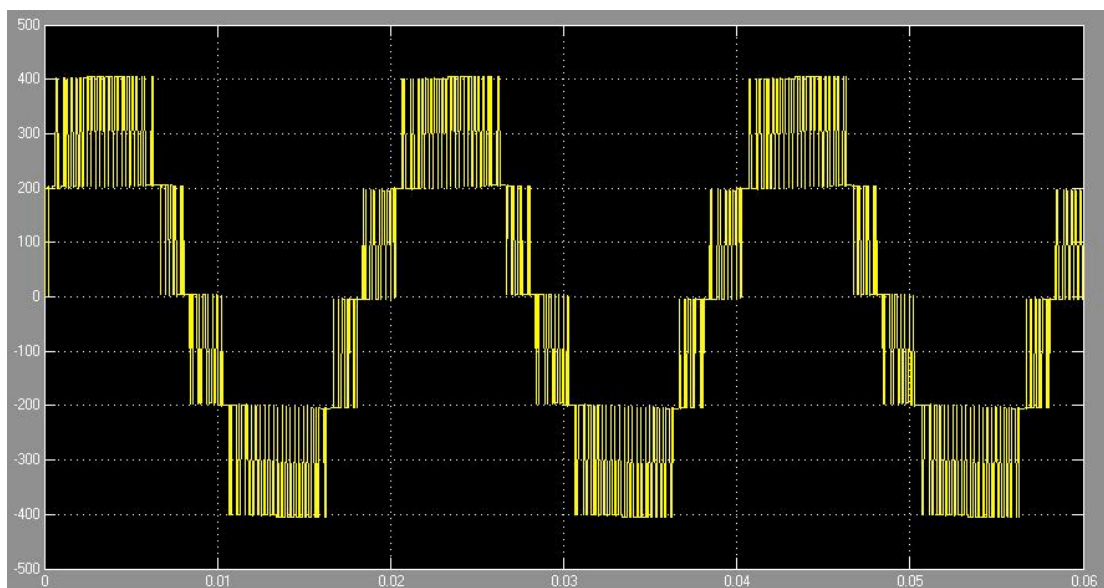
Σχήμα 21 Διάγραμμα της γεννήτριας παλμών με SVPWM τριών επιπέδων

Η κύρια διαφορά στη γεννήτρια παλμών μεταξύ του αντιστροφεία δύο και τριών επιπέδων βρίσκεται στον εντοπισμό του \vec{V}_{ref} . Τώρα, κάθε ένας από τους 6 τομείς αποτελείται από 6 περιοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα 13. Ας δούμε λίγο καλύτερα τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό της περιοχή μέσα στην οποία βρίσκεται το \vec{V}_{ref} .

Ο τομέας I μπορεί να χωρισθεί σε δύο ίδια τρίγωνα. Το τρίγωνο A περιέχει τις περιοχές 1a, 2a και 3, ενώ το τρίγωνο B τις περιοχές 1b, 2b και 4. Γνωρίζοντας τη γωνία του \vec{V}_{ref} και συγκρίνοντας τη με αυτή των 30 μοιρών, μπορούμε να βρούμε σε ποιο από τα 2 τρίγωνα βρίσκεται το \vec{V}_{ref} . Εάν η γωνία είναι μικρότερη των 30 μοιρών, τότε το σωστό τρίγωνο είναι το A, αλλιώς το B. Αφού γνωρίζουμε τώρα το σωστό τρίγωνο, αρκεί να εντοπίσουμε μία από τις 3 περιοχές στην οποία βρίσκεται το \vec{V}_{ref} . Αυτό επιτυγχάνεται ελέγχοντας αν το διάνυσμα \vec{V}_{ref} τέμνει κάποια από τις πλευρές των τριγώνων που αποτελούν τα όρια των περιοχών. Για παράδειγμα, κοιτώντας το σχήμα 13, πρώτο βήμα είναι να συγκρίνουμε τη γωνία του \vec{V}_{ref} με αυτή των 30 μοιρών. Προφανώς, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, είναι μικρότερη. Έτσι λοιπόν, το \vec{V}_{ref} βρίσκεται στο τρίγωνο A. Επόμενο βήμα είναι να ελέγξουμε αν το \vec{V}_{ref} τέμνει το ευθύγραμμο τμήμα V_1V_2 . Αν όχι, σημαίνει ότι βρίσκεται στην περιοχή 1a. Αλλιώς, βρίσκεται στην περιοχή 2a ή 3. Από το σχήμα βλέπουμε ότι το τέμνει. Επομένως, συνεχίζουμε ελέγχοντας αν τέμνει το τμήμα V_1V_7 . Αν τέμνονται, σημαίνει ότι το \vec{V}_{ref} βρίσκεται στην περιοχή 3, αλλιώς στην περιοχή 2a. Εδώ, το \vec{V}_{ref} δεν τέμνει το V_1V_7 , επομένως βρίσκεται στην περιοχή 2a. Με αυτό τον τρόπο, τα υποσυστήματα "triangle A" και "triangle B" μπορούν να εντοπίσουν την περιοχή στην οποία βρίσκεται το \vec{V}_{ref} .

Το υποσύστημα "dwell times" υπολογίζει τα χρονικά διαστήματα σύμφωνα με τον πίνακα 6. Μετά, πρέπει να ξέρουμε σε ποιο τμήμα βρισκόμαστε. Εξαιτίας του περιορισμού των περιπτώσεων αρμονικών υπάρχουν δύο τύποι ακολουθίας τμημάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 15. Επομένως, σύμφωνα με το χρόνο και την περιοχή, η σωστή ακολουθία επιλέγεται. Τέλος, όλες οι διακοπτικές καταστάσεις του πίνακα 9 αποθηκεύονται στον πίνακα "lookup" (3, 6, 6, 7) από τον οποίο γίνεται η επιλογή. 12 παλμοί παράγονται και στέλνονται στους διακόπτες της γέφυρας τριών επιπέδων.

Με μια διακοπτική συχνότητα των 2 KHz, συντελεστή διαμόρφωσης 0.9 και χρόνο δειγματοληψίας 50 μ s, η φασική τάση φαίνεται στο σχήμα 22.



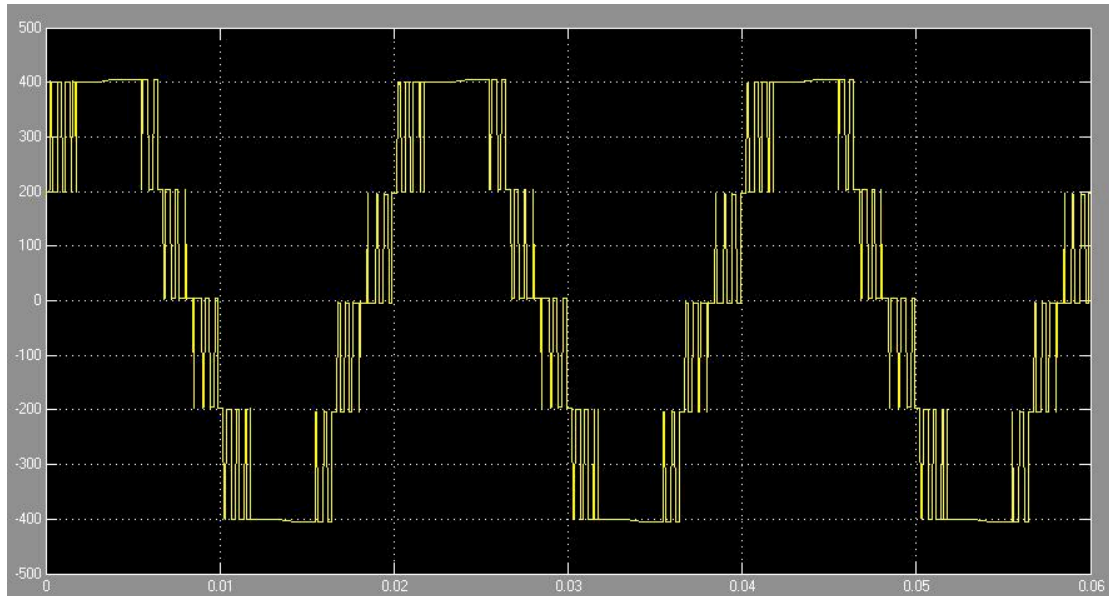
Σχήμα 22 Φασική τάση εξόδου του αντιστροφέα τριών επιπέδων

Είναι μια τάση τριών επιπέδων και συμβαδίζει με τη θεωρητική προσέγγιση.

Παρουσιάζει ενδιαφέρον να παρατηρήσει κάποιος τί συμβαίνει στην περίπτωση της υπερδιαμόρφωσης (overmodulation). Έχει επισημανθεί ότι $V_{ref,max} = \sqrt{3}V_d/3$ (2.3.3-6), όπου $m_a=1$. Ας δούμε τί συμβαίνει εάν το \vec{V}_{ref} γίνει ίσο με το πλάτος ενός μεγάλου διανύσματος. Με άλλα λόγια

$$V_{ref} = 2V_d/3 \Rightarrow m_a = 2\frac{\sqrt{3}}{3} = 1.1547$$

Το επόμενο σχήμα δείχνει τη φασική τάση όταν $m_a=1.15$.



Σχήμα 23 Υπερδιαμόρφωση

Είναι εμφανές ότι αυτή είναι μια μη αποδεκτή κυματομορφή και μας υπενθυμίζει ότι αυτή η SVPWM μέθοδος είναι σχεδιασμένη για να δουλεύει μόνο με $V_{ref,max} = \sqrt{3}V_d/3$.

4. Συμπεράσματα

Η χρήση πολυεπίπεδων αντιστροφών οδηγεί σε πιο αποδοτικά κυκλώματα, με μικρότερες απώλειες και καλύτερη ποιότητα παραγόμενης ισχύος και τάσης. Μειονεκτήματα όπως η πολυπλοκότητα και ο μεγάλος αριθμός διακοπών και DSPs είναι σημαντικά, αλλά με την εξέλιξη που παρατηρείται σε αυτούς τους τομείς και την ταυτόχρονη πτώση των τιμών, τα μειονεκτήματα αυτά δείχνουν να χάνουν τη σπουδαιότητά τους στα επόμενα χρόνια. Παράλληλα, η χρήση της τεχνικής SVPWM λόγω των πλεονεκτημάτων της, δείχνει να προτιμάται σε εφαρμογές μέσης και υψηλής τάσης.

Σε αυτή την εργασία, παρουσιάστηκε μια μοντελοποίηση του κυκλώματος οδήγησης ενός SVPWM αντιστροφέα τριών επιπέδων. Το μοντέλο αποδείχθηκε ότι δουλεύει σωστά, επομένως από εδώ και πέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την ανάπτυξη και άλλων εφαρμογών.

Μελλοντικά, παρουσιάζει ενδιαφέρον η ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα χρησιμοποιεί αυτή τη γεννήτρια παλμών αλλά θα περιλαμβάνει και ένα σύστημα ελέγχου, ώστε να προσεγγίζει την πραγματική λειτουργία ενός αντιστροφέα.

Βιβλιογραφία

[1] PV Efficiency Hits 25%

<http://photonics.com/content/news/2008/October/23/93618.aspx>

[2] RoseStreet Labs Licenses High Efficiency Solar Cell Technology

http://thefraserdomain.typepad.com/energy/2005/12/rocestreet_labs.html

[3] An unexpected discovery could yield a full spectrum solar cell

<http://www.lbl.gov/Science-Articles/Archive/MSD-full-spectrum-solar-cell.html>

[4] N-doped Si, Wikipedia

http://en.wikibooks.org/wiki/File:N-doped_Si.svg

[5] P-doped Si, Wikipedia

http://en.wikibooks.org/wiki/File:P-doped_Si.svg

[6] Silicon Solar cell structure and mechanism, Wikipedia

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Silicon_Solar_cell_structure_and_mechanism.svg

[7] Solar cell equivalent circuit, Wikipedia

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Solar_cell_equivalent_circuit.svg

[8] Φωτοβολταϊκή τεχνολογία, Κ. Καγκαράκη, σελ 58

[9] Φωτοβολταϊκή τεχνολογία, Κ. Καγκαράκη, σελ 56

[10] I-V Curve T, Wikipedia

http://en.wikipedia.org/wiki/File:I-V_Curve_T.png

[11] Σ. Τσελεπή, Ειδικό τέλος ΑΠΕ και επιβάρυνση του μέσου νοικοκυριού από την μεγάλη διείσδυση φωτοβολταϊκών και αιολικών στην Ελλάδα, 2007-2020

[12] Kame Khouzam and Keith Hoffman, Real-Time Simulation of Photovoltaic Modules

[13] Sharp NUS5E3E / NU185E1 185W datasheet

http://www.solaraccess.fr/produits/panneaux-solaires/pdf/Sharp_NU-S5E3E_185Wp%20-%20EN.pdf

[14] solarex msx-60 datasheet

<http://www.californiasolarcenter.org/newssh/pdfs/Solarex-MSX64.pdf>

[15] Hind Djeghloud, Hocine Benalla “Space Vector Pulse Width Modulation Applied to the Three-Level Voltage Inverter”, *Electrotechnic's Laboratory of Constantine Mentouri-Constantine University*

[16] Pou Fèlix, Josep “Modulation and control of three-phase PWM multilevel converters” Technical University of Catalonia, Chapter 2

[17] T. Brükner, D. G. Holmes. “Optimal Pulse-Width Modulation for Three- Level Inverters”. *IEEE TRANS. Power Electron.*, Vol.20, N° 1, pp 82-89 January 2005.

