



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ MATLAB**

Διπλωματική Εργασία

Καραμέτση Δέσποινα

Επιβλέπων: Ευμορφόπουλος Νέστωρας

Σεπτέμβριος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

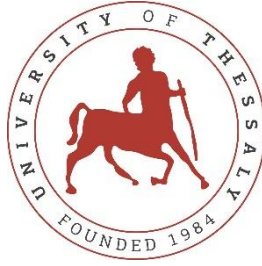
**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΟ MATLAB**

Διπλωματική Εργασία

Καραμέτση Δέσποινα

Επιβλέπων: Ευμορφόπουλος Νέστωρας

Σεπτέμβριος 2023



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**MODELING AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH
MATLAB**

Diploma Thesis

Despoina Karametsi

Supervisor: Eumorfopoulos Nestoras

September 2023

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Ευμορφόπουλος Νέστωρας

Αναπληρωτής καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Μπαργιώτας Δημήτριος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Σταμούλης Γεώργιος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Η Δηλούσα

Καραμέτση Δέσποινα

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Karametsi Despoina

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευμορφόπουλο Νέστωρα για την ανάληψη της επίβλεψης και της αξιολόγησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ.κ. Μπαργιώτα Δημήτριο και Σταμούλη Γεώργιο που αποτέλεσαν μέρος της επιτροπής. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την κατανόηση, συμπαράσταση και βοήθεια κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διατριβής. Αφιερώνεται σε εκείνους που με βοήθησαν να φτάσω ως εδώ, είτε σαν επιστήμονα είτε σαν άνθρωπος.

Μοντελοποίηση και προσομοίωση φωτοβολταϊκών συστημάτων με το MATLAB

Καραμέτση Δέσποινα

Περίληψη

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί μια παγκόσμια στροφή προς τις βιώσιμες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενισχύοντας έτσι την θέση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στον τομέα της παραγωγής ενέργειας. Λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος που παρατηρείται για τον συγκεκριμένο τρόπο παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας κρίνεται απαραίτητο να κατανοήσουμε τον τρόπο λειτουργίας με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης, τόσο για οικονομικούς όσο και περιβαλλοντικούς λόγους. Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει καθοριστική σημασία στην απεξάρτηση από τους ορυκτούς πόρους. Η παρούσα διπλωματική εμβαθύνει στα συστήματα αυτά με την βοήθεια της προσομοίωσης και της μοντελοποίησης αυτών με την χρήση του λογισμικού Matlab/Simulink. Επίσης, υλοποιείται ολόκληρο το σύστημα ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας μέσω του ήλιου με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνεται η εξαγωγή της μέγιστης ισχύος ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται ο συγχρονισμός με το δίκτυο. Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση θεωρούνται απαραίτητα εργαλεία καθώς επιτρέπουν σε ερευνητές και μηχανικούς να εξετάζουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα σε ελεγχόμενο περιβάλλον.

Λέξεις-κλειδιά:

Matlab/Simulink, φωτοβολταϊκά πάνελ, μοντελοποίηση, προσομοίωση, DC/DC Boost converter, τριφασικός μορφομετατροπέας ενέργειας, βρόχος κλειδώματος φάσης, εθνικό δίκτυο.

Modeling and simulation of photovoltaic systems with MATLAB

Karametsi Despoina

Abstract

In recent decades, a global push towards sustainable and renewable energy sources has been noticed promoting the position of photovoltaic systems in the energy production sector. Due to this great interest in this particular energy production mode, it is considered necessary to understand the way it operates in order to improve its performance, both for financial and environmental concerns. The integration of photovoltaic systems is crucial for the independence from the fossil fuels. This thesis provides a deeper insight into these systems, through the simulation and modeling of them using Matlab/Simulink software. Also, the entire system of a solar power plant is implemented in such a way that maximum power obtained while synchronization with the grid is achieved. Modeling and simulation are considered essential tools as they provide researchers and engineers the ability to examine photovoltaic systems in controlled environment.

Keywords:

Matlab/Simulink, photovoltaic panels, modeling, simulation, DC/DC Boost converter, three phase inverter, phase locked loop, national grid.

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες.....</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη.....</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων.....</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>xxi</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxiii</i>
<i>Συντομογραφίες.....</i>	<i>xxv</i>
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	3
1.1.1 Συνεισφορά.....	3
1.2 Οργάνωση του τόμου	5
Κεφάλαιο 2 Βασικές αρχές φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	7
2.1 Δομή και αρχές λειτουργίας φωτοβολταϊκού κυττάρου	7
2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα.....	8
2.2.1 Φωτόρευμα I_{ph}	9
2.2.2 Ρεύμα διόδου I_d	9
2.2.3 Ρεύμα διακλάδωσης I_p	10
2.2.4 Συνολικό ρεύμα I_{pv}	10
2.3 Προδιαγραφές φωτοβολταϊκών πλαισίων	13
2.4 Ηλιακή ακτινοβολία, γεωγραφία και τοπολογία συλλεκτών.....	13
2.4.1 Ηλιακή ακτινοβολία	13
2.4.2 Γεωμετρία	14
2.4.3 Προσανατολισμός ηλιακών συλλεκτών.....	16
Κεφάλαιο 3 Σχεδιασμός και μοντελοποίηση διασυνδεδεμένου με το δίκτυο συστήματος ηλιακής ενέργειας.....	19
3.1 Εισαγωγή σε διασυνδεδεμένο σύστημα ηλιακής ενέργειας	19

3.2 Επιλογή και χρήσεις φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 100 KW	20
3.3 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια	21
3.4 Μετατροπέας ενίσχυσης DC/DC	26
3.4.1 Συνθήκες λειτουργίας μετατροπέα ενίσχυσης DC/DC	27
3.4.2 Τρόπος λειτουργίας μετατροπής	28
3.4.3 Προσομοίωση μετατροπέα ενίσχυσης DC/DC.....	30
3.5 Παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).....	31
3.6 Τριφασικός μορφομετατροπέας ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC Inverter)...	33
3.7 Αρχές λειτουργίας του τριφασικού μορφομετατροπέα ενέργειας.....	34
3.8 Σύστημα ελέγχου μορφομετατροπέα	36
3.9 Ρύθμιση του αναλογικό-ολοκληρωτικού ελεγκτή (tuning of PI controller).....	38
3.10 Φιλτράρισμα αρμονικών	40
Κεφάλαιο 4 Σχηματικές απεικονίσεις Simulink.....	41
Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα προσομοίωσης	47
5.1 Σύνοψη κεφαλαίου.....	47
5.2 Προσομοίωση ολοκληρωμένου συστήματος	48
Κεφάλαιο 6 Σύνοψη και μελλοντικές επεκτάσεις.....	50
6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα	50
6.2 Προτεινόμενες επεκτάσεις	50
Βιβλιογραφία.....	53
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	55
Παράρτημα Α.....	57
Παράρτημα Β	60

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1 Λειτουργία ηλιακού κυττάρου [4].....	8
Εικόνα 2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού κυττάρου [6]	8
Εικόνα 2.3 Σχηματική απεικόνιση ζενιθιακής γωνίας.....	14
Εικόνα 2.4 Ύψος και αζιμούθιο ήλιου [9]	15
Εικόνα 2.5 Η κλίση (β_o) και η αζιμούθια γωνία (θ_o) [10]	17
Εικόνα 2.6 Θέση του ήλιου ανάλογα την εποχή [11].....	18
Εικόνα 3.1 Συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ.....	22
Εικόνα 3.2 Ενδεικτική διάταξη πίνακα AC φωτοβολταϊκού πάρκου	25
Εικόνα 3.3 Ο διακόπτης είναι κλειστός [13]	27
Εικόνα 3.4 Ο διακόπτης είναι ανοιχτός [13]	28
Εικόνα 3.5 Λειτουργία Συνεχούς Αγωγιμότητας (CCM) [14]	30
Εικόνα 3.6 Λειτουργία Ασυνεχούς Αγωγιμότητας (DCM) [14]	30
Εικόνα 3.7 Εύρεση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT) [16]	32
Εικόνα 3.8 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου P&O	32
Εικόνα 3.9 Κύκλωμα τριφασικού μορφομετατροπέα ενέργειας [18]	34
Εικόνα 3.10 Σύστημα ελέγχου μορφομετατροπέα ενέργειας.....	38
Εικόνα 3.11 Βασικό σύστημα βρόχου κλειδώματος φάσης 54[20].....	39
Εικόνα 4.1 Προσομοίωση ρεύματος φωτοηλεκτρικού φαινομένου	41
Εικόνα 4.2 Προσομοίωση αντίστροφου ρεύματος κορεσμού διόδου	41
Εικόνα 4.3 Προσομοίωση ρεύματος κορεσμού της διόδου	42
Εικόνα 4.4 Προσομοίωση ρεύματος διόδου.....	42
Εικόνα 4.5 Προσομοίωση ρεύματος διακλάδωσης	43
Εικόνα 4.6 Προσομοίωση συνολικού ρεύματος ηλιακού κυττάρου	43
Εικόνα 4.7 Προσομοίωση μετατροπέα ενίσχυσης DC/DC.....	44
Εικόνα 4.8 Προσομοίωση διαδικασίας εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)	44
Εικόνα 4.9 Μετατροπέας ενίσχυσης DC/DC και εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος.....	45
Εικόνα 4.10 Διακόπτες μορφομετατροπέα.....	45

Εικόνα 4.11 LCL φίλτρο μορφομετατροπέα.....	46
Εικόνα 4.12 Διάγραμμα ελεγκτή PLL.....	46
Εικόνα 5.1 Ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα σε σύνδεση με το δίκτυο	48
Εικόνα 5.2 Κυματομορφή τάσης.....	49
Εικόνα 5.3 Κυματομορφή ρεύματος.....	49
Εικόνα 5.4 Ισχύς εξόδου.....	49

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1 Εξισώσεις ρευμάτων	11
Πίνακας 2.2 Τιμές παραμέτρων	12
Πίνακας 3.1 Τιμές παραμέτρων	31
Πίνακας 3.2 Περιπτώσεις καταστάσεων διακοπών μορφομετατροπέα	36

Συντομογραφίες

Κτλ.	Και τα λοιπά
MT	Μέση τάση
KW	Kilo watt
KVA	Kilovolt ampere
Sec	Seconds
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
CCM	Continuous Conduction Mode
DCM	Discontinuous Conduction Mode
MOSFET	Metal - Oxide - Silicon Field - Effect Transistor
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturb and Observe
PLL	Phase Locked Loop
PV	Photovoltaic PWM
Pulse	Width Modulation
RMS	Root Mean Square

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Λόγω διαφόρων παραγόντων όπως η αύξηση του πληθυσμού, η αστικοποίηση και η εκβιομηχάνιση έχει παρατηρηθεί ότι η ζήτηση της ενέργειας έχει αυξηθεί. Καθώς ο συνολικός πληθυσμός της γης συνεχίζει να μεγαλώνει υπάρχει αντίστοιχη αύξηση για την ενεργειακή τροφοδότηση των οικιών, των επιχειρήσεων και των μεταφορών. Η αστικοποίηση είναι ένας ακόμη παράγοντας που ενισχύει αυτή την αυξανόμενη ζήτηση καθώς όλο και περισσότεροι άνθρωποι συσσωρεύονται στις μεγάλες πόλεις. Αντίστοιχη είναι και η κατάσταση στον κλάδο της βιομηχανίας όπου η ενέργεια είναι απαραίτητη για την τροφοδότηση των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται κατά την διαδικασία της παραγωγής. Οπότε ένα λογικό συμπέρασμα είναι ότι αυτή η ενεργειακή ζήτηση θα συνεχίσει να αυξάνεται, υπογραμμίζοντας έτσι την ανάγκη για καθαρή και βιώσιμη ενέργεια προκειμένου να εξισορροπηθεί αυτή η ζήτηση και παράλληλα να μειωθούν, όσο το δυνατόν, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι και η ηλιακή, έχει ελάχιστες έως καθόλου εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κάνοντάς τις μια βιώσιμη εναλλακτική των ορυκτών καυσίμων και γενικά των συμβατικών πόρων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι το όλο και πιο μειωμένο κόστος της τεχνολογίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το οποίο σε συνδυασμό με την αύξηση της απόδοσης των συστημάτων αυτών οδηγούν τους καταναλωτές να επενδύσουν σε τέτοιου είδους συστήματα. Πιο συγκεκριμένα το κόστος της ηλιακής ενέργειας έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα να έχει γίνει πιο προσιτή σε ένα ευρύτερο φάσμα καταναλωτών. Επομένως η στροφή προς τον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γίνεται από ένα συνδυασμό περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών παραγόντων.

Η ηλιακή ενέργεια, όπως και κάθε τεχνολογία, αντιμετωπίζει ποικίλα προβλήματα τα οποία με την σειρά τους επηρεάζουν την αποδοτικότητα του συνολικού ενεργειακού συστήματος. Ένας βασικός παράγοντας που μπορεί να περιορίσει την απόδοση είναι η μη συνεχόμενη παροχή ηλιακής ενέργειας, καθώς η έξοδος των ηλιακών συστημάτων, δηλαδή η παραγόμενη τάση, εξαρτάται από την διαθεσιμότητα του ηλιακού φωτός. Επιπλέον τα ηλιακά ενεργειακά συστήματα απαιτούν μια σημαντική αρχική επένδυση και

μπορεί να έχουν μεγάλο χρόνο απόσβεσης, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει προβληματισμό για κάποιους από τους πιθανούς καταναλωτές. Το ποσό της παραγόμενης ενέργειας, από αυτά τα συστήματα, μπορεί επίσης να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η σκίαση, η θερμοκρασία και η τοποθεσία – προσανατολισμός. Ακόμα πρέπει να ληφθεί υπόψη η χωρική απαίτηση προκειμένου να κατασκευασθεί ένα ηλιακό πάρκο ειδικά στις αστικές περιοχές, όπου συναντάται και η μεγαλύτερη ενεργειακή ζήτηση, αλλά και σε περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα γης. Σημαντικό είναι και το ενεργειακό κόστος που δαπανάται προκειμένου να κατασκευαστούν τα ηλιακά πάνελ και στην περίπτωση αντικατάστασης παλαιότερων ηλιακών πάνελ προστίθεται το περιβαλλοντικό κόστος λόγω της απόρριψής τους. Η αντιμετώπιση αυτών των εμποδίων θα είναι κρίσιμη για την αύξηση της απόδοσης των συστημάτων ηλιακής ενέργειας τα επόμενα χρόνια.

Η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων αυξάνεται ολοένα και περισσότερο ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Αυτά τα συστήματα μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια με την χρήση ηλιακών κυττάρων (solar cells), κάτι που τα καθιστά φιλικά προς το περιβάλλον και οικονομικά για την παροχή ενέργειας. Γίνεται χρήση τους σε πληθώρα εφαρμογών, από εγκαταστάσεις με μικρής κλίμακας στέγες μέχρι μεγάλα ηλιακά πάρκα. Ωστόσο η απόδοση και η αξιοπιστία των συστημάτων αυτών βρίσκονται ακόμα υπό έρευνα και προκειμένου να βελτιωθούν πρέπει να εξεταστούν κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί πολύτιμο εργαλείο για την κατανόηση της συμπεριφοράς αυτών των συστημάτων κάτω από διάφορες συνθήκες. Μέσω των προσομοιώσεων μπορεί να γίνει η αξιολόγηση των συστημάτων αυτών υπό διάφορες καιρικές συνθήκες, σενάρια σκίασης και ποικίλες διαμορφώσεις των συστημάτων αυτών. Με την βοήθεια μιας προσομοίωσης μπορεί να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του φωτοβολταϊκού συστήματος και να γίνει αξιολόγηση των διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και πώς αυτό αντιδρά κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που αφορούν την ένταση του φωτός και τη θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία θα γίνει με την χρήση ενός εργαλείου προσομοίωσης, του Matlab/Simulink. Πιο συγκεκριμένα γίνεται η περιγραφή και προσομοίωση του ισοδύναμου κυκλώματος της φωτοβολταϊκής μονάδας που είναι το ηλιακό κύτταρο. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις του ρεύματος, ξεκινώντας από την μαθηματική τους έκφραση, καταλήγουμε στο μοντέλο μιας φωτοβολταϊκής μονάδας.

Μετά από αυτή την ανάλυση η διατριβή επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση ενός ολόκληρου φωτοβολταϊκού πάρκου στο δίκτυο. Για να μπορέσει αυτή η ενσωμάτωση να γίνει όσο πιο ομαλά γίνεται πρέπει να διασφαλιστεί ότι η παραγόμενη ισχύς είναι πάντα η μέγιστη και ότι η τάση που προσφέρεται στο δίκτυο έρχεται σε συγχρονισμό με αυτή του δικτύου. Επομένως ένας ελεγκτής που ανιχνεύει την μέγιστη ισχύ κρίνεται απαραίτητος. Επίσης στο σύστημα έχουν συμπεριληφθεί ένας μετατροπέας ανύψωσης DC/DC και ένας μορφομετατροπέας DC/AC. Ο μετατροπέας ανύψωσης λαμβάνει και αυξάνει την τάση που προέρχεται από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, σε υψηλότερη και πιο ελεγχόμενη τάση η οποία μπορεί να επεξεργαστεί από τον μορφομετατροπέα. Ο έλεγχος του μορφομετατροπέα που έχει επίσης εισαχθεί στο σύστημα είναι υπεύθυνος για την διατήρηση της τιμής και της συχνότητας τις εναλλασσόμενης τάσης εξόδου κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες.

1.1.1 Συνεισφορά

Η παρούσα διατριβή εστιάζει σε δυο ερευνητικά θέματα, την μοντελοποίηση μιας μεμονωμένης φωτοβολταϊκής μονάδας και σε επέκταση τον σχεδιασμό μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης συνδεδεμένη με το εθνικό δίκτυο. Σε κάθε περίπτωση γίνεται αναλυτική περιγραφή του βασικού κυκλώματος των στοιχείων που εξετάζονται στα επιμέρους κεφάλαια της συγκεκριμένης εργασίας. Οι συνεισφορές αυτής της μελέτης παρατίθενται αριθμημένες:

1. Μελετήθηκε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση συνολικής ισχύος 100 KW, που για την υλοποίησή της επιλέχθηκε το μοντέλο AS-6P 325W της εταιρίας Amerisolar. Για την συγκεκριμένη ισχύ επιλέχθηκε μορφομετατροπέας ενέργειας της εταιρίας SMA, sunny power 20000 TL.
2. Υπολογισμοί του προσανατολισμού των φωτοβολταϊκών συλλεκτών σύμφωνα με την περιοχή για την επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης.
3. Ένας μετατροπέας DC-DC που ενισχύει την τάση που παράγεται από τους φωτοβολταϊκούς συλλέκτες.
4. Χρήση και επεξήγηση τρόπου λειτουργίας ενός τριφασικού μορφομετατροπέα ενέργειας για την μετατροπή της συνεχούς παραγόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη και σύμφωνη με το δίκτυο τάση.
5. Επεξήγηση του αλγορίθμου P&O με βάση τον οποίο γίνεται η επιλογή του μέγιστου σημείου ισχύος (MPP).
6. Ανάλυση του συστήματος ελέγχου του μορφομετατροπέα ενέργειας, όπου για αυτό τον σκοπό επιλέχθηκε το σύστημα του βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL). Μέσω αυτού του συστήματος εκτελείται ο συγχρονισμός της τάσης και της συχνότητας που εξάγεται από τον τριφασικό μορφομετατροπέα ενέργειας με αυτή του δικτύου.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια γενική εισαγωγή για τα φωτοβολταϊκά συστήματα και αναφορά στην θεματολογία της διατριβής. Το υπόλοιπο μέρος του τόμου έχει οργανωθεί ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται μαθηματικά και προσομοιώνεται το μοντέλο μιας φωτοβολταϊκής μονάδας.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται και σχεδιάζονται τα επιμέρους στοιχεία που κρίνονται απαραίτητα για ένα φωτοβολταϊκό πάρκο μεσαίας κλίμακας συνδεδεμένο με το δίκτυο.

Στο Κεφάλαιο 4 παρατίθενται τα σχήματα των προσομοιώσεων όπως αυτά προέκυψαν από το περιβάλλον του Simulink.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφονται τα τελικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας παρουσιάζοντας τις κυματομορφές που προκύπτουν μετά την προσομοίωση.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 γίνεται μια σύνοψη της μελέτης που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική επέκταση του κύριου θέματος.

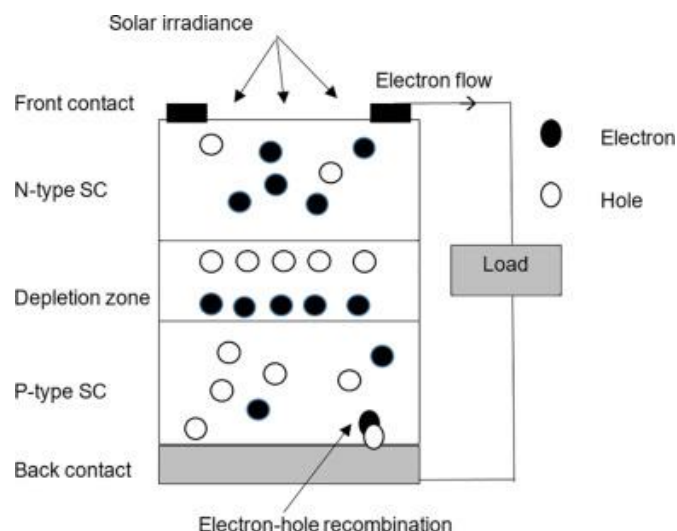
—Τέλος Κεφαλαίου—

Κεφάλαιο 2 Βασικές αρχές φωτοβολταϊκών συστημάτων

2.1 Δομή και αρχές λειτουργίας φωτοβολταϊκού κυττάρου

Το ηλιακό κύτταρο είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Το φως που φτάνει στο κύτταρο παράγει ρεύμα και τάση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η διαδικασία αρχικά απαιτεί ένα υλικό το οποίο όταν απορροφά φως ανυψώνει ένα ηλεκτρόνιο σε κατάσταση υψηλότερης ενέργειας και δεύτερον την μετακίνηση αυτού του ηλεκτρονίου υψηλότερης ενέργειας από το ηλιακό κύτταρο σε ένα εξωτερικό κύκλωμα [1]. Τέτοιου είδους υλικά είναι η σιλικόνη που χρησιμοποιείται κατά κόρον, ο περοβσκίτης, τελλουρίδιο του καδμίου(CdTe) και δισηλίνιο γαλλίου χαλκού ίνδιο (CIGS) τα οποία τοποθετούνται σε λεπτές στρώσεις πάνω σε υλικά βάσης, οργανικές ενώσεις άνθρακα, μικροσωματίδια ημιαγωγών καθώς και στρώσεις ημιαγωγών [2]. Στη συνέχεια το ηλεκτρόνιο διαχέει την ενέργεια του στο εξωτερικό σύστημα και επιστρέφει στο ηλιακό κύτταρο. Μια ποικιλία υλικών και διεργασιών μπορεί ενδεχομένως να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για μετατροπή της φωτοβολταϊκής ενέργειας, αλλά στην πράξη όλες οι μετατροπές φωτοβολταϊκής ενέργειας χρησιμοποιούν υλικά ημιαγωγών σε p-n σύνδεση [1].

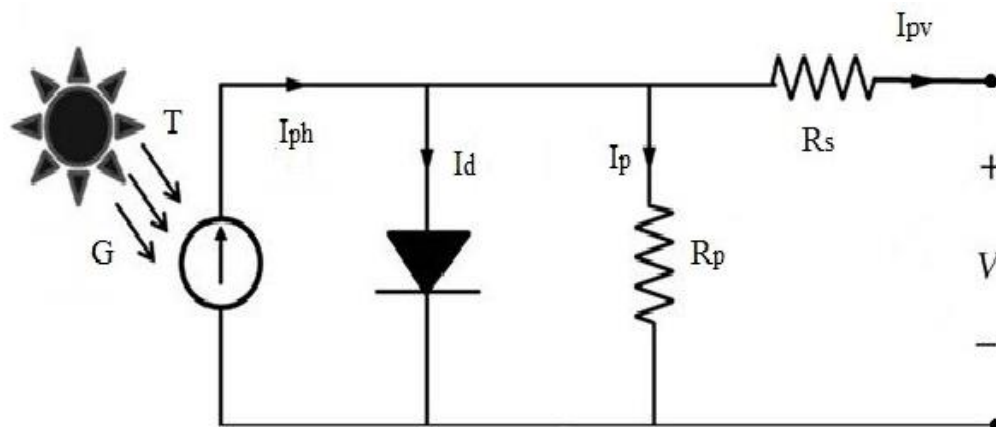
Το n-τύπου στρώμα του φωτοβολταϊκού κυττάρου είναι πολύ λεπτό για να επιτρέπει τη διείσδυση του φωτός στην p-τύπου περιοχή. Το πάχος ολόκληρου του κυττάρου είναι στην πραγματικότητα περίπου ίσο με το πάχος του κελύφους του αυγού. Όταν ένα φωτόνιο διεισδύσει είτε στην n είτε στην p τύπου περιοχή και προσκρούσει πάνω σε ένα άτομο πυριτίου κοντά στην p-n σύνδεση με την κατάλληλη ενέργεια για να μετακινήσει ένα ηλεκτρόνιο από την ζώνη σθένους, το ηλεκτρόνιο γίνεται ελεύθερο και αφήνει μια τρύπα στην ζώνη σθένους. Τα ηλεκτρόνια συσσωρεύονται στην n περιοχή, δημιουργώντας αρνητικό φορτίο. Και αντίστοιχα δημιουργούνται οπές στην p περιοχή όπου έχουμε θετικό φορτίο. Οπότε αναπτύσσεται μια τάση μεταξύ των επαφών των p και n περιοχών [Εικόνα 2.1] [3].



Εικόνα 2.1 Λειτουργία ηλιακού κυττάρου [4]

2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα

Στην Εικόνα 2.2 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του ηλιακού κυττάρου, δηλαδή αυτό της απλής διόδου. Αποτελείται από μία πηγή ρεύματος, μία δίοδο και δύο αντιστάσεις. Η αντίσταση σειράς R_s οφείλεται στην αντίσταση φορτίου του ημιαγωγικού υλικού, στις μεταλλικές επαφές και διασυνδέσεις και στις αντιστάσεις επαφής μεταξύ ημιαγωγού και μεταλλικών επαφών. Η αντίσταση διαφυγής (shunt) R_p οφείλεται σε μη ιδανικές καταστάσεις και ακαθαρσίες στην p-n σύνδεση [5]. Το I_{ph} είναι το ρεύμα που παράγεται από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και I_d είναι το ρεύμα της διόδου. Η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία αποτελούν τις εισόδους του συστήματος και συμβολίζονται με G και T αντίστοιχα.



Εικόνα 2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού κυττάρου [6]

Σύμφωνα με το ισοδύναμο σύστημα της Εικόνα 2.2 η χαρακτηριστική εξίσωση που δίνει το ρεύμα που παρέχεται στα άκρα είναι:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad [2.1]$$

2.2.1 Φωτόρευμα I_{ph}

Το ρεύμα I_{ph} λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i (T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad [2.2]$$

Όπου το I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης στα άκρα του κυκλώματος, k_i είναι ο συντελεστής του ρεύματος βραχυκύκλωσης, T_{ref} και G_{ref} είναι οι τιμές αναφοράς της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας αντίστοιχα [7].

Η προσομοίωση έγινε με βάση τις Τυπικές Συνθήκες Δοκιμής (STC), σύμφωνα με τις οποίες έχουμε μάζα αέρα ίση με 1,5, $T_{ref} = 300^\circ \text{K}$ (25°C) και $G_{ref} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

2.2.2 Ρεύμα διόδου I_d

Το ρεύμα που διαρρέει την διόδο εκφράζεται με την εξής μαθηματική εξίσωση [1]

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{q(V+I R_s)}{AKT}} - 1 \right) \quad [2.3]$$

Όπου το I_o είναι το ρεύμα κορεσμού της διόδου, q είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, V η τάση στα άκρα της διόδου, A είναι ο παράγοντας ιδανικής κατάστασης της διόδου που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 και 2, K είναι η σταθερά Boltzman και T η απόλυτη θερμοκρασία. Το I_o δίνεται από την σχέση :

$$I_o = I_{o,n} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \left[e^{\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \right] \quad [2.4]$$

Όπου το $I_{o,n}$ είναι το αντίστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου, E_g είναι η ενέργεια του διακένου.

Το $I_{o,n}$ δίνεται από την σχέση :

$$I_{o,n} = \frac{I_{sc}}{\frac{V_{oc}}{e^{AVT}-1}} \quad [2.5]$$

Η V_{oc} τάση είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος που μπορεί να ανακτηθεί από το φυλλάδιο που δίνεται από τον κατασκευαστή.

Η ισοδύναμη θερμική τάση V_t δίνεται από την εξίσωση:

$$V_t = \frac{N_s K T}{q} \quad [2.6]$$

Όπου N_s είναι ο αριθμός των ηλιακών κυττάρων στην σειρά που στην περίπτωση μας είναι ίσος με 1.

2.2.3 Ρεύμα διακλάδωσης I_p

Η επίδραση που έχει μια αντίσταση διασταύρωσης είναι σημαντική σε περιπτώσεις χαμηλού φωτισμού καθώς παρέχει ένα εναλλακτικό μονοπάτι στο ρεύμα. Επίσης σε κατάσταση χαμηλής τάσης, όπου η τιμή της αντίστασης σειράς είναι μεγάλη, η επίδραση της αντίστασης διασταύρωσης που συνδέεται παράλληλα είναι σημαντική. Το ρεύμα διακλάδωσης, που διέρχεται μέσα από την αντίσταση R_p , σύμφωνα με τον νόμο του Ωμ είναι:

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} \quad [2.7]$$

Αναλύοντας το κύκλωμα παίρνουμε ότι

$$V_d = V_{pv} + I_{pv}R_p \quad [2.8]$$

Έτσι καταλήγουμε ότι το ρεύμα στην αντίσταση διασταύρωσης γράφεται:

$$I_p = \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_p} \quad [2.9]$$

2.2.4 Συνολικό ρεύμα I_{pv}

Έχοντας αναλύσει ξεχωριστά τους όρους της γενικής εξίσωσης του συστήματος, συνδυάζοντας τες κατάλληλα μπορούμε να υλοποιήσουμε το ηλιακό κύτταρο και να το δοκιμάσουμε σε διάφορες καταστάσεις με βάση τα στοιχεία που δίνει ο κατασκευαστής. Συγκεντρωτικά οι εξισώσεις και οι παράμετροι με τις τιμές τους στον Πίνακα 2.1 και στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.1 Εξισώσεις ρευμάτων

Όρος	Έκφραση
I_{pv}	$I_{ph} - I_d - I_p$
I_p	$\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_p}$
I_d	$I_o \left(e^{\frac{q(V+I R_s)}{AKT}} - 1 \right)$
I_{ph}	$[I_{sc} + k_i (T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}}$
I_o	$I_o, n \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \left[e^{\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \right]$
$I_{o,n}$	$\frac{I_{sc}}{e^{\frac{V_{oc}}{AVT}} - 1}$

Πίνακας 2.2 Τιμές παραμέτρων

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή	Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
V_{oc}	Τάση ανοιχτού κυκλώματος	45,7 V	q	Φορτίο ηλεκτρονίου	$1,16 \cdot 10^{-19}$
I_{sc}	Ρεύμα βραχυκύκλωσης	9,28 A	A	Συντ. ιδανικής κατάστασης διόδου	1,2
k	Σταθερά Boltzman	$1,38 \cdot 10^{-23}$	E_g	Ενέργεια διακένου	1,11eV
G_{ref}	Ηλιακή ακτινοβολία	$1000 \frac{W}{m^2}$	R_p	Αντίσταση διασταύρωσης	0,42 Ω
K_i	Συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης	0,05%/°C	R_s	Αντίσταση σειράς	229,14 Ω
T_{ref}	Θερμοκρασία	300 K	K_v	Συντελεστής τάσης	-0,30%/°C
N_s	Αριθμός κυττάρων σε σειρά	72	N_p	Αριθμός κυττάρων παράλληλα	1

2.3 Προδιαγραφές φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, θα πρέπει να πληρούν τις παρακάτω προδιαγραφές πιστοποιημένες από αναγνωρισμένο φορέα (ή αντίστοιχες):

- IEC 61215, EN-61215:2005 and type approval for crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules [1993-04] τα πολυκρυσταλλικά ή μονοκρυσταλλικά πλαίσια
- IEC 61646 - “Thin film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval” για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λεπτού υμενίου (thin film)
- IEC 61730-1, IEC 61730-2, EN-61730-1:2007, EN-61730-2:2007 “Photovoltaic (PV) module safety qualification” (Application class A - safety class II)
- Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα πρέπει ακόμη να διαθέτουν «Declaration of conformity CE» του κατασκευαστή σύμφωνα με την 2004/108/EC (ή 93/97/EC ή 89/336/EC) «Electromagnetic compatibility directive» και την 2006/95/EC (ή 93/68/EC ή 73/23/EC) «Low voltage directive».

2.4 Ηλιακή ακτινοβολία, γεωγραφία και τοπολογία συλλεκτών

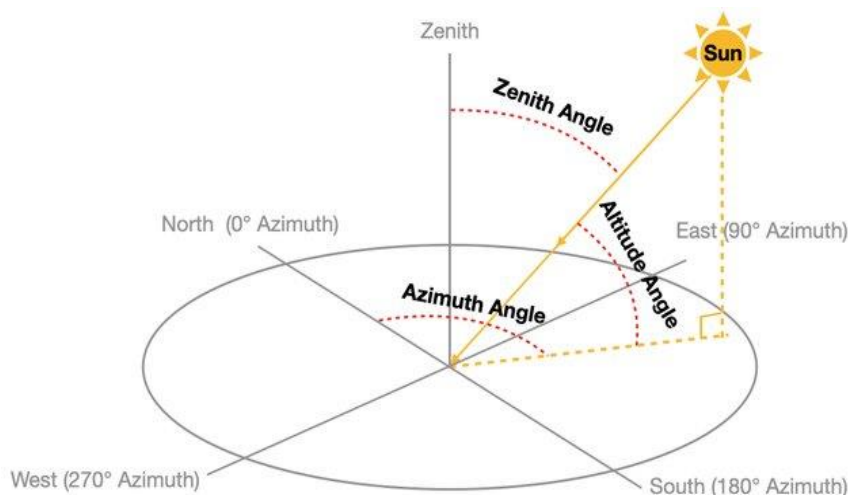
2.4.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Πέρα από την γεωγραφική θέση και το υψόμετρο, η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης, εξαρτάται από τις τρέχουσες μετεωρολογικές συνθήκες και, προπάντων, τη θέση του ηλίου στον ουρανό και την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε υγρασία. Καταρχάς, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα από την ατμόσφαιρα της γης μέχρι την επιφάνεια, που οφείλεται στη θέση του ηλίου, χαρακτηρίζεται από την κλίμακα της μάζας του αέρα AM (air mass, ονομάζεται επίσης οπτική αέρια μάζα) και αξιολογείται με βάση την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημίτονου) της ζενιθιακής γωνίας (ζ), η οποία είναι η γωνία ανάμεσα στη θέση του ηλίου και την κατακόρυφη γραμμή [Εικόνα 2.3]. Η κλίμακα της μάζας αέρα ουσιαστικά μας δείχνει πόσες φορές η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.

Πιο συγκεκριμένα, η συνθήκη AM1 αντιστοιχεί στη θέση του ηλίου κατά το ζενίθ, όπου το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ελάχιστο, με γωνία 45° από το ζενίθ. Η AM2 αντιστοιχεί στον ήλιο υπό γωνία 60° και ούτω καθεξής. Το μηδέν της κλίμακας

(AM0) αντιστοιχεί σε περιοχή όπου δεν υπάρχει ατμοσφαιρική παρεμβολή, δηλαδή σε θέση όπου η ηλιακή ακτινοβολία διανύει τη μέση απόσταση από τη Γη προς τον ήλιο.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις μετεωρολογικές συνθήκες είναι η ατμοσφαιρική υγρασία, η οποία μετριέται με το ύψος της στήλης του νερού (σε εκατοστά), που σχηματίζεται από την υποθετική συμπύκνωση των υδρατμών της ατμόσφαιρας σε συγκεκριμένη τοποθεσία και χρόνο.



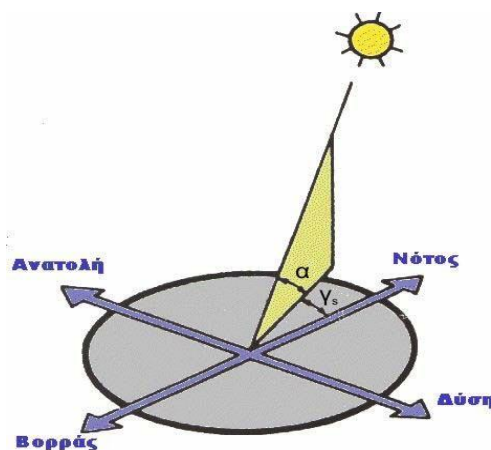
Εικόνα 2.3 Σχηματική απεικόνιση ζενιθιακής γωνίας

2.4.2 Γεωμετρία

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από την χρονική στιγμή, την εποχή, τις κλιματολογικές συνθήκες και το περιεχόμενο της ατμόσφαιρας σε υγρασία, σκόνη, και άλλες ουσίες. Επιπλέον, η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι ηλιακές κηλίδες, οι ηλιακές εκρήξεις και η ατμοσφαιρική ρύπανση. Ο κυριότερος παράγοντας που καθορίζει την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ηλίου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Κατά τη διάρκεια ενός έτους, η θέση του ηλίου υποβάλλεται σε σημαντικές μεταβολές λόγω της απόκλισης (δ), δηλαδή της γωνίας μεταξύ της γραμμής που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ηλίου και του ισημερινού επιπέδου. Η απόκλιση του ηλίου έχει θετικές τιμές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο, με τις μέγιστες τιμές της να είναι + 23,450 μοίρες στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και - 23,450 μοίρες στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο).

Ως αποτέλεσμα αυτών των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ηλίου, οι πορείες που περιγράφει στον ουρανό κατά τη διάρκεια του χρόνου αλλάζουν. Το καλοκαίρι, τον δρόμο του ήλιου χαρακτηρίζουν πιο ψηλές τροχιές, που προκαλούν νωρίτερη ανατολή και πιο αργή δύση στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ τον χειμώνα συμβαίνει το αντίστροφο. Αυτές οι αλλαγές στη θέση του ηλίου συνδυάζονται με διαφορετικές μετεωρολογικές και κλιματολογικές συνθήκες κατά τις διάφορες εποχές του έτους. Σημαντικές παράμετροι για την εκτίμηση της ημερήσιας και εποχιακής διακύμανσης της ακτινοβολίας σε έναν τόπο είναι η ηλιακή ώρα, που είναι το χρονικό διάστημα από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου, καθώς και η μέση πραγματική ηλιοφάνεια, που αντιπροσωπεύει τον μέσο όρο των ωρών που ο ήλιος δεν είναι καλυμμένος από σύννεφα. Επίσης, σημαντικό είναι να μετράται ο αριθμός των ηλιόλουστων ημερών, κατά τους οποίους ο ήλιος δεν καλύπτεται καθόλου από σύννεφα, και των ανήλιων ημερών, όπου ο ήλιος είναι καλυμμένος από σύννεφα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

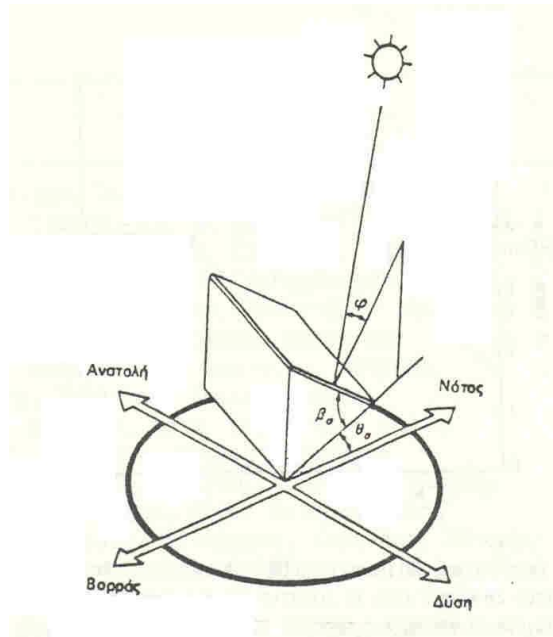
Για να περιγράψουμε τη θέση του ηλίου στον ουρανό ενός τόπου, χρησιμοποιούμε συνήθως δύο γωνίες: το ύψος του ηλίου (α), που είναι η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ηλίου και τον ορίζοντα. Επιπλέον, χρησιμοποιείται το ηλιακό αζιμούθιο (γ_s), που είναι η γωνία που σχηματίζεται στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατεύθυνσης του ηλίου και τον τοπικό μεσημβρινό βορρά - νότου. Και οι δύο γωνίες φαίνονται στην Εικόνα 2.4. Το ηλιακό αζιμούθιο έχει θετικές τιμές προς τα δεξιά από τον νότο και αρνητικές προς τα αριστερά. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, το ύψος και το αζιμούθιο του ηλίου αλλάζουν διαρκώς καθώς ο ήλιος διανύει τον ουρανό.



Εικόνα 2.4 Ύψος και αζιμούθιο ήλιου [9]

2.4.3 Προσανατολισμός ηλιακών συλλεκτών

Ο προσανατολισμός του ηλιακού συλλέκτη είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία στα ηλιακά συστήματα, καθώς επηρεάζει την απόδοση τους. Οι δύο βασικές γωνίες που χρησιμοποιούνται για να περιγραφεί ο προσανατολισμός είναι η κλίση (β_0) και η αζιμούθια γωνία (θ_0). Η κλίση (β_0) του ηλιακού συλλέκτη αναφέρεται στην κλίση του επιπέδου του συλλέκτη σε σχέση με τον ορίζοντα και επηρεάζει πόσο "κάθετο" είναι το επίπεδο του συλλέκτη στην ηλιακή ακτινοβολία. Η βέλτιστη κλίση εξαρτάται από τη γεωγραφική τοποθεσία του συστήματος και την εποχή του χρόνου, καθώς η θέση του ηλίου στον ουρανό αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους. Ο στόχος είναι να βρεθεί η κλίση που επιτρέπει στον συλλέκτη να λαμβάνει τη μέγιστη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του χρόνου. Η αζιμούθια γωνία (θ_0) αναφέρεται στον προσανατολισμό του συλλέκτη στον οριζόντιο άξονα και υποδεικνύει πότε κατά την διάρκεια της μέρας ο συλλέκτης θα είναι περισσότερο εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία. Το εύρος τιμών της κυμαίνεται από -180° μέχρι $+180^\circ$. Οι γωνίες (κλίση και αζιμούθια) παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.5. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση από ένα ηλιακό σύστημα, πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο η κλίση όσο και η αζιμούθια γωνία και να ρυθμιστούν ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες. Όπως είναι προφανές η μέγιστη απόδοση εξασφαλίζεται όταν η επιφάνεια των συλλεκτών είναι κάθετη στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Αυτή η συνθήκη είναι δύσκολο να επιτευχθεί καθώς ο ήλιος κινείται συνεχώς κατά την διάρκεια της μέρας. Προκειμένου να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα τοποθετούνται αυτόματα μηχανικά ρυθμιζόμενα στηρίγματα ώστε τα πάνελ να μπορούν να ακολουθούν την πορεία του ήλιου και να είναι πάντα κάθετα στις ακτίνες του (solar trackers). Με την βοήθεια αυτών των στηριγμάτων τα κινούμενα πλέον πλαίσια μπορούν να παρέχουν ανά πάσα στιγμή την μέγιστη ισχύ τους. Πράγματι σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα (Φωτοβολταϊκό Πάρκο, Ηράκλειο 1992) έχει αποδειχθεί μια αύξηση της απόδοσης αυτών των συστημάτων της τάξης του 24% σε σχέση με τα συστήματα σταθερής βάσης [10].



Εικόνα 2.5 Η κλίση (β_{σ}) και η αζιμούθια γωνία (θ_{σ}) [10]

Στην συνέχεια θα αναλυθεί ο τρόπος υπολογισμού της βέλτιστης κλίσης. Συνήθως, οι συλλέκτες τοποθετούνται σε σταθερή κλίση και αζιμουθιακή γωνία, επιλεγμένες έτσι ώστε η γωνία που σχηματίζει η ηλιακή ακτινοβολία με την επιφάνεια του συλλέκτη να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη κατά τη διάρκεια όλου του έτους. Η γωνία αυτή συνδέεται με άλλες γωνίες στην ηλιακή γεωμετρία, όπως περιγράφηκε παραπάνω, με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\sin \varphi = \sin \beta_{\sigma} \sin \beta_{\sigma} \sin (\theta_{\sigma} - \theta) + \sin \beta_{\sigma} \cos \beta_{\sigma} \cos (\theta_{\sigma} - \theta) \quad [2.10]$$

Στο βόρειο ημισφαίριο, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη για όλο το έτος είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, ενώ η αζιμουθιακή γωνία είναι 0° (προς το νότο). Ωστόσο, λόγω της μεταβολής της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους, η βέλτιστη κλίση του συλλέκτη πρέπει να προσαρμόζεται για κάθε εποχή, [Εικόνα 2.6].

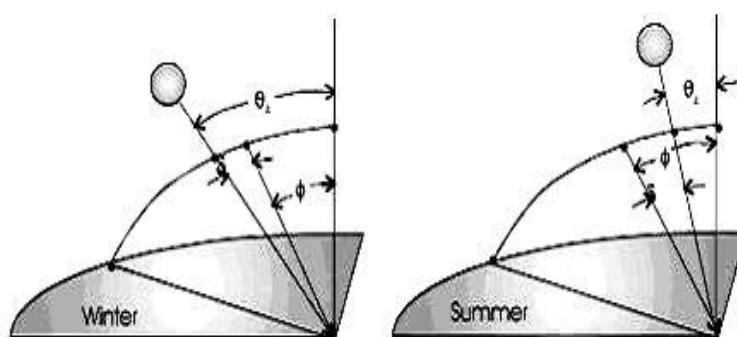
Για παράδειγμα, για την παραγωγή μέγιστης ενέργειας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση του συλλέκτη είναι περίπου 10° έως 15° λιγότερη από τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου, ενώ για τον χειμώνα είναι περίπου 10° έως 15° μεγαλύτερη από τον γεωγραφικό παράλληλο.

Τα παραπάνω ισχύουν για τη συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από τον ήλιο. Σε άλλες περιπτώσεις, όπου η συγκεκριμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας δεν είναι τόσο

σημαντική, η κλίση του συλλέκτη επιλέγεται αποκλειστικά με βάση την απόλυτη τιμή της, ανεξάρτητα από τη θέση του ήλιου.

Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση που έχει ο συλλέκτης από το οριζόντιο επίπεδο, τόσο περισσότερη ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος μπορεί να συλλέξει, αλλά ταυτόχρονα θα λαμβάνει λιγότερη διάχυση ακτινοβολίας από τον ουρανό.

Για παράδειγμα, σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων νερού στην ατμόσφαιρα, ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για όλο το έτος είναι περίπου 10 - 15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους.



Εικόνα 2.6 Θέση του ήλιου ανάλογα την εποχή [11]

—Τέλος Κεφαλαίου—

Κεφάλαιο 3 Σχεδιασμός και μοντελοποίηση διασυνδεδεμένου με το δίκτυο συστήματος ηλιακής ενέργειας

3.1 Εισαγωγή σε διασυνδεδεμένο σύστημα ηλιακής ενέργειας

Αυτό το σύστημα που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αφορούσε φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο βρίσκεται εκτός του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς ο σκοπός ήταν η περιγραφή και κατανόηση του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος αυτού. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί το πλήρες σύστημα ελέγχου ενός φωτοβολταϊκού συστήματος προκειμένου να εξασφαλιστεί σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση με το δίκτυο. Η βασική δομή ενός τέτοιου συστήματος έχει περιγραφεί στο εισαγωγικό κείμενο αυτής της εργασίας και σε αυτό το σημείο θα γίνει περαιτέρω ανάπτυξη. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια στην μορφή συνεχούς ρεύματος DC, η τιμή του ρεύματος αυτού υπάρχει περίπτωση να μην βρίσκεται στο επιθυμητό επίπεδο για να μπορέσει να γίνει η μετατροπή του σε εναλλασσόμενο ρεύμα AC. Για αυτό τον λόγο κρίνεται απαραίτητη η τοποθέτηση και σύνδεση ενός μετατροπέα ενίσχυσης DC (DC boost converter) με την βοήθεια του οποίου η αρχική DC τάση θα ρυθμιστεί στο κατάλληλο επίπεδο. Προκειμένου να ρυθμιστεί σωστά ο κύκλος του μετατροπέα κρίνεται απαραίτητο η τοποθέτηση ενός ελεγκτή MPPT (Maximum Power Point Tracker), που είναι υπεύθυνος για την βελτιστοποίηση της ισχύος εξόδου. Στην συνέχεια ο μορφομετατροπέας DC/AC (inverter DC/AC) την σταθερή τάση DC σε εναλλασσόμενη AC η οποία είναι σύγχρονη και σε φάση με το ρεύμα του δικτύου.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα εξής βασικά στοιχεία:

- **Ηλιακά πάνελ:** το βασικό στοιχείο του συστήματος τα οποία παράγουν ενέργεια από τον ήλιο σε μορφή DC τάσης και ρεύματος.
- **Πίνακας συνεχούς ρεύματος (DC):** Ασφαλίζει τα στοιχεία του συστήματος (καλώδια, inverter, κλπ.) που διαρρέονται από συνεχές ρεύμα που παράγεται από τους ηλιακούς συλλέκτες. Επίσης φέρει τις αντικεραυνικές διατάξεις προστασίας από άμεση επαφή κεραυνικού πλήγματος με τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

- Πίνακας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC): Ασφαλίζει τα στοιχεία του συστήματος (καλώδια, inverter, κλπ.) που διαρρέονται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που μετατρέπεται από τους inverter. Φέρει τις αντικεραυνικές διατάξεις προστασίας από έμμεση επαφή κεραυνικού πλήγματος (μέσω του δημοσίου δικτύου). Φέρει τις ηλεκτρικές διατάξεις απομόνωσης - διακοπής του φωτοβολταϊκού συστήματος από το δημόσιο δίκτυο. Επίσης φέρει τις διατάξεις προστασίας έναντι διαρροής για την προστασίας του προσωπικού και της εγκατάστασης.
- Μορφομετατροπέας ενέργειας (Inverter): Πραγματοποιεί την αλλαγή της "φάσης" του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο στην ίδια τάση και συχνότητα με αυτή του δημόσιου δικτύου, καθώς πρέπει να είναι συγχρονισμένο με αυτό του ηλεκτρικού δικτύου για να μπορέσει να λάβει χώρα ο παραλληλισμός των "γεννητριών" μας με το δίκτυο για την χωρίς προβλήματα σύνδεσή τους.
- Μετρητής ενέργειας: χρησιμοποιείται για να μετρήσει το ποσό της ενέργειας που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα αλλά και την ενέργεια που ανατροφοδοτείται στο δίκτυο.

Με το πέρας της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου γίνονται όλες οι απαραίτητες μετρήσεις των στοιχείων του (γείωση, αντίσταση μόνωσης των καλωδίων, την επαφή των ισοδυναμικών γειώσεων των μεταλλικών μερών του συστήματος κλπ) που προβλέπονται στο ισχύον πρότυπο ΕΛΟΤ 60364. Τέλος πραγματοποιείται η σύνδεση του συστήματος με το δίκτυο, η οποία γίνεται από τον διαχειριστή του δημοσίου δικτύου ΔΕΔΔΗΕ παρουσία εξουσιοδοτημένου Ηλεκτρολόγο Μηχανικό πάντα σύμφωνα με τους εκάστοτε κανονισμούς.

3.2 Επιλογή και χρήσεις φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 100 kW_{peak}

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί ένα μεσαίας κλίμακας 100 kW_{peak} φωτοβολταϊκό πάρκο. Πιο συγκεκριμένα το όριο της ισχύος της εγκατάστασης θα είναι ίσο με 99,9 kW, καθώς για εγκαταστάσεις μεγαλύτερες των 100 kW ο διαχειριστής του δικτύου απαιτεί την κατασκευή υποσταθμού για την σύνδεση του φωτοβολταϊκού πάρκου στο δίκτυο της μέσης τάσης. Μια τέτοια κατασκευή αυξάνει σε μεγάλο βαθμό το κόστος της εγκατάστασης αλλά και καταλαμβάνει χώρο σε αυτή για τους μετασχηματιστές του

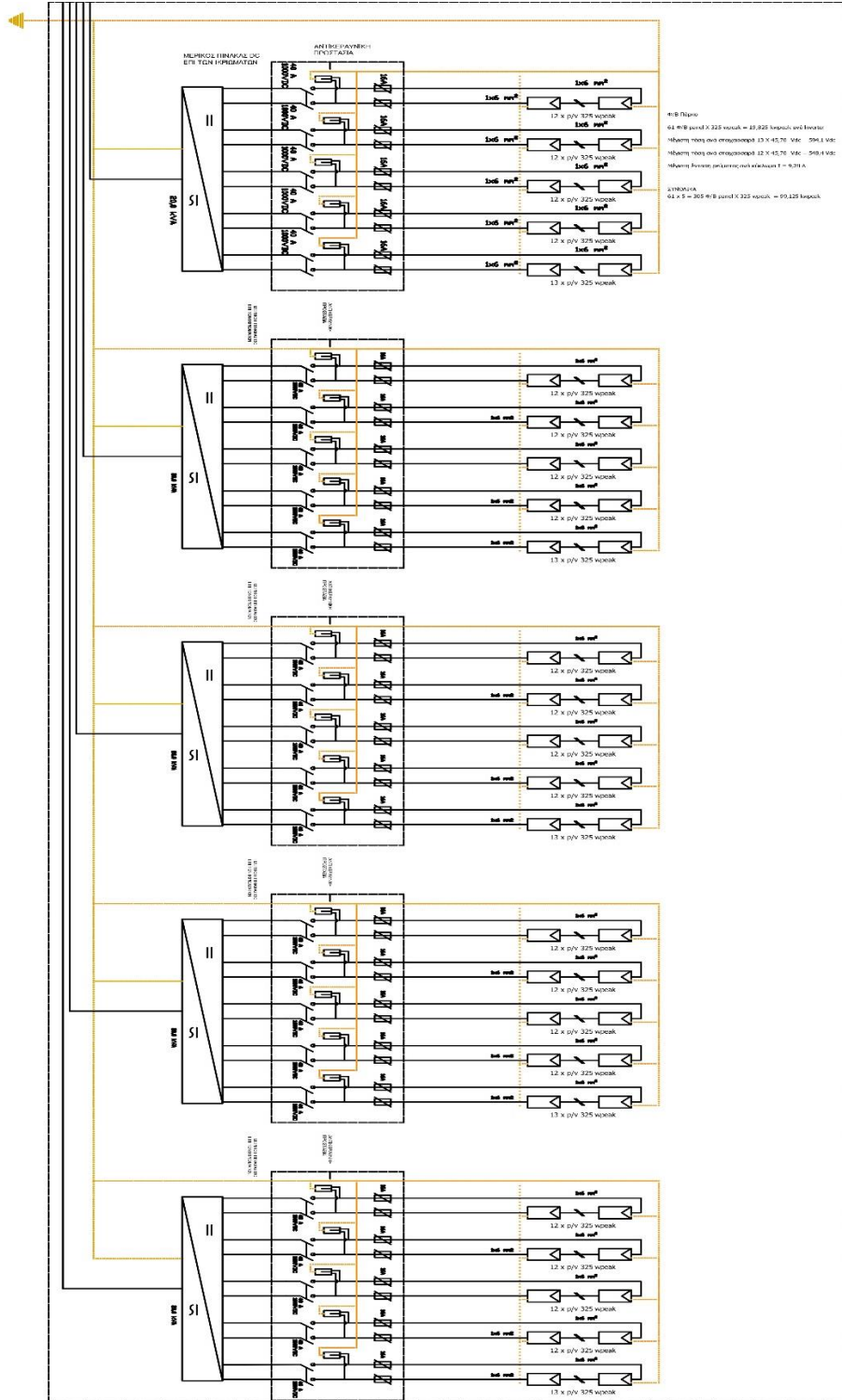
υποσταθμού, τους διακόπτες μέσης τάση όπως και για τα επιμέρους βοηθητικά συστήματα αυτών. Αυτού του μεγέθους εγκατάσταση μπορεί να εξυπηρετήσει διάφορους σκοπούς ανάλογα με τις ανάγκες και τους στόχους του ιδιοκτήτη. Για παράδειγμα ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν παραγωγική μονάδα ενέργειας με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στον πάροχο ή σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας μέσω του συστήματος net metering, χαμηλής ή μέσης τάσης, καθιστώντας την εγκατάσταση σαν μια πρόσθετη πηγή εισοδήματος. Το σύστημα net metering αφορά την κάλυψη των καταναλώσεων μέρους των ενεργειακών απαιτήσεων μιας εγκατάστασης. Αυτή την χρονική περίοδο επιτρέπεται η σύνδεση φωτοβολταϊκού πάρκου με σύστημα net-metering, με ισχύ ίση με το μισό της εγκατεστημένης ισχύς της ηλεκτρικής εγκατάστασης του πελάτη (στην εξεταζόμενη περίπτωση η εγκατάσταση θα πρέπει να έχει παροχή N7 (την μεγαλύτερη σε χαμηλή τάση 250 kVA) της τάξεως των 200 kVA .

Επίσης μπορεί να τοποθετηθεί σε εγκατάσταση μέσης τάσης MT, με την σύνδεση βέβαια στο πεδίο χαμηλής μέσω κατάλληλου διακόπτη απομόνωσης , τηλεχειριζόμενου διακόπτη κατάλληλης ισχύος και προγραμματιζόμενου ελεγκτή σύμφωνα με τις προδιαγραφές του διαχειριστή του δικτύου.

3.3 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Για την προσομοίωση έχει επιλεγεί το φωτοβολταϊκό πάνελ της AmeriSolar και πιο συγκεκριμένα το μοντέλο AS-6P των 325 Wpeak του οποίου τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται στο φυλλάδιο του κατασκευαστή που παρατίθεται στο Παράρτημα Α. Ξεκινώντας από την επιλογή του μορφομετατροπέα ενέργειας κατάλληλου για τις συγκεκριμένες προδιαγραφές, τυχαία επιλέγεται μοντέλο της εταιρίας SMA, συγκεκριμένα το sunny Tri power 20000 TL (ισχύος 20,0 KVA) τα χαρακτηριστικά του οποίου αναγράφονται στο φυλλάδιο του κατασκευαστή (Παράρτημα Β). Θα χρειαστούν πέντε (5) μονάδες από το μοντέλο που επιλέχθηκε ώστε να καλυφτεί η εγκατεστημένη ισχύς του πάρκου ($5 \times 20,0 \text{ kVA} = 100,0 \text{ kVA}$). Ο κάθε μορφομετατροπέας διαθέτει δυο εισόδους MPP (Maximum Power Point) στις οποίες θα συνδεθεί ίδιος αριθμός από συστοιχίες συλλεκτών. Σύμφωνα με το φυλλάδιο του κατασκευαστή σε κάθε είσοδο MPP μπορούν να συνδεθούν δώδεκα (12) φωτοβολταϊκά πλαίσια των 325 W. Συνολικά σε κάθε

μορφομετατροπέα ενέργειας θα συνδεθούν εξήντα μία (61) φωτοβολταϊκές γεννήτριες, έτσι ώστε $61 \times 325 \text{ kW}_{\text{peak}} = 19,825 \text{ kW}_{\text{peak}}$. Στην Εικόνα 3.1. φαίνεται το πολυγραμμικό διάγραμμα σύνδεσης του κάθε μορφομετατροπέα.



Εικόνα 3.1 Συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ

Ο ηλεκτρικός πίνακας AC του μορφομετατροπέα ενέργειας θα διαθέτει όλες τις απαραίτητες ασφάλειες για την εγκατάσταση και τη λειτουργία του, σε σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο και θα είναι πλήρως συμβατός με τους σχετικούς κανονισμούς. Μια ενδεικτική διάταξη του πίνακα AC του φωτοβολταϊκού πάρκου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2, στην οποία δίνονται δύο εναλλακτικές διατάξεις ασφαλείας, μια με ρελέ ισχύος και μια με τηλεχειριζόμενο διακόπτη ισχύος με πηνίο εργασίας και πηνίο έλλειψης τάσης. Στην δεύτερη διάταξη προστασίας το πηνίο εργασίας είναι υπεύθυνο για το άνοιγμα του διακόπτη και το πηνίο έλλειψης τάσης για το κλείσιμο αυτού. Ο μορφομετατροπέας ενέργειας θα έχει ενσωματωμένες όλες τις διατάξεις ηλεκτρονόμων ορίου τάσης, ορίου συχνότητας, ασυμμετρίας τάσης και υπερέντασης ενώ υποχρεωτικά θα διαθέτει προστασία έναντι του φαινομένου της νησιδοποίησης κάτι που σημαίνει ότι θα διακόψει αυτόματα τη λειτουργία του σε περίπτωση διακοπής του δικτύου ΔΕΔΔΗΕ. Για λόγους ασφαλείας η επανασύνδεση του φωτοβολταϊκού πάρκου με το δημόσιο δίκτυο θα γίνεται μετά από 180 sec από την στιγμή που το δίκτυο ισορροπήσει ύστερα από κάθε διακοπή. Επίσης θα πρέπει να διαθέτουν τις παρακάτω πιστοποιήσεις σε ισχύ:

- Για τα πρότυπα σύνδεσης στο δίκτυο DIN VDE V 0126-1-1:2006
- Για την ασφάλεια IEC-62103 (EN50178)
- CE Επιπλέον οι μορφομετατροπείς ενέργειας θα έχουν τις εξής παραμέτρους δικτύου:
- Εύρος τάσεως εναλλασσόμενου ρεύματος: +15% έως -20% επί της ονομαστικής τιμής του δικτύου (230 V)
- Περιοχή συχνοτήτων εναλλασσόμενου ρεύματος: $\pm 0,5\%$ Hz της ονομαστικής (50Hz)
- DC-Current Injection: $< 0,5\%$ του ονομαστικού ρεύματος.

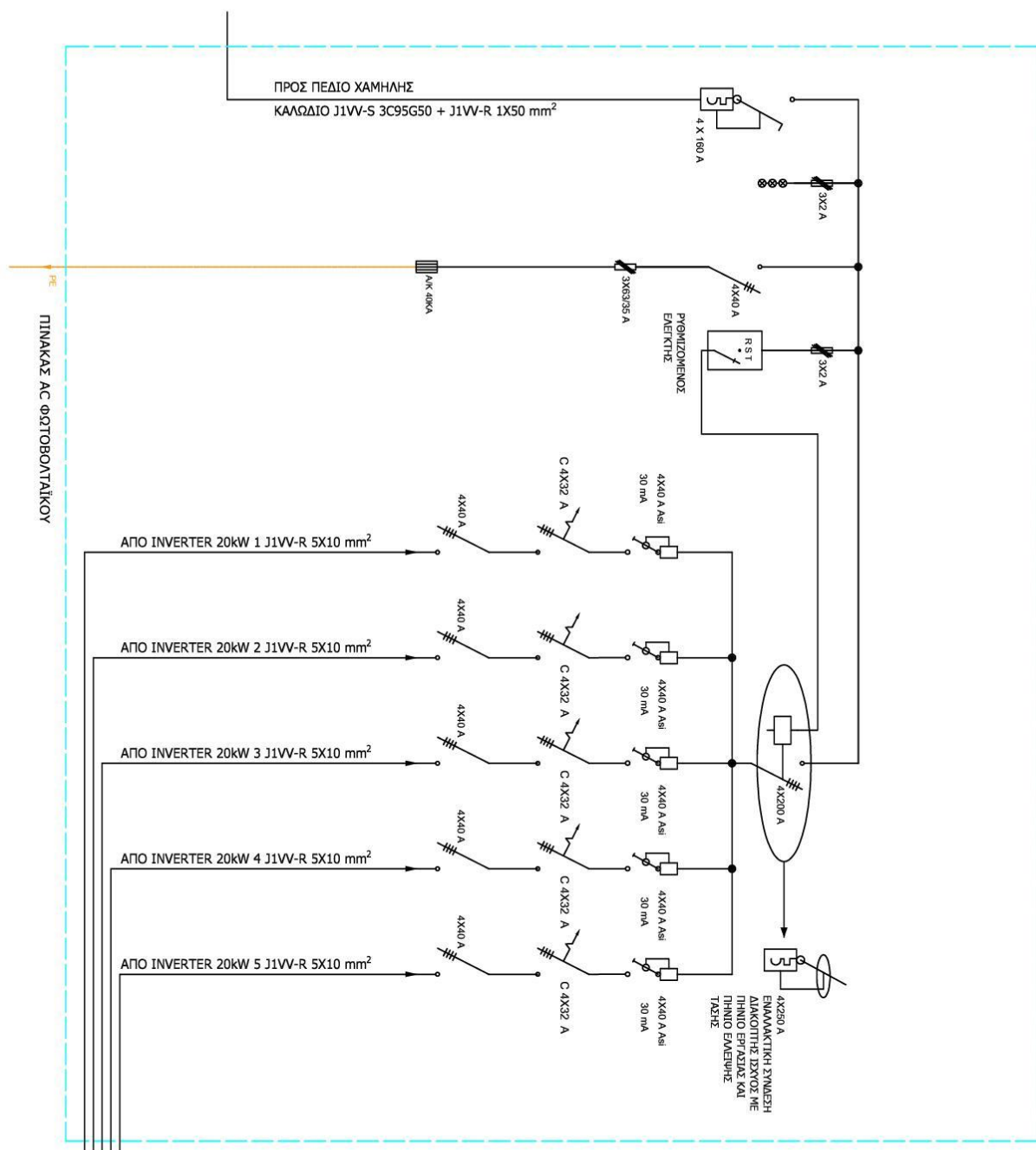
Από τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών και του μορφομετατροπέα ενέργειας είναι σαφές ότι στην παρούσα εγκατάσταση μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους καθώς η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση εισόδου του μορφομετατροπέα ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

$$V_{\max} \quad 1000 \text{ Vdc} > 13 \times 47,5 \text{ (Voc)} = 617,5 \text{ Vdc}$$

Επίσης η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος στις εισόδους του μορφομετατροπέα είναι επίσης μεγαλύτερη από αυτή των φωτοβολταϊκών πάνελ:

$$I_{\max} \quad 18/10 \text{ A} > 9,28 \text{ Idc (isc)}$$

Επομένως οι επιλογές για φωτοβολταϊκά πάνελ και μορφομετατροπείς ενέργειας πληρούν τις προδιαγραφές για την συγκεκριμένη εγκατάσταση καθώς συμβαδίζουν με τα όρια του μέγιστου ρεύματος εισόδου, της μέγιστης εισερχόμενης τάσης λειτουργίας DC και της τάσης MPP.



Εικόνα 3.2 Ενδεικτική διάταξη πίνακα AC φωτοβολταϊκού πάρκου

Στις επόμενες ενότητες θα περιγραφούν αναλυτικά καθένα από τα στοιχεία που αποτελούν το πλήρως λειτουργικό φωτοβολταϊκό σύστημα.

3.4 Μετατροπέας ενίσχυσης DC/DC

Οι μετατροπείς DC/DC χρησιμοποιούνται ευρέως σε εγκαταστάσεις συνεχούς ρεύματος με ελεγχόμενο διακόπτη. Η είσοδος τους είναι μια μη ρυθμιζόμενη DC τάση η οποία προέρχεται από την φωτοβολταϊκή συστοιχία, δηλαδή είναι εξαρτώμενη από την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία και ως εκ τούτου θα παρουσιάζει διακυμάνσεις στην τιμή της. Σε αυτούς τους μετατροπείς η μέση DC τάση εξόδου θα πρέπει να ελέγχεται ώστε να εξισώνεται με την επιθυμητή τάση ακόμα και αν η τιμή της τάσης εισόδου εναλλάσσεται. Η ρύθμιση αυτής της τάσης επιτυγχάνεται προσαρμόζοντας συνεχώς το ποσό της ενέργειας που απορροφάται από την πηγή και αυτής που εγχέεται στο φορτίο[12].

Ένας DC/DC μετατροπέας αποτελείται από πολλά ηλεκτρικά στοιχεία 4 από τα βασικά είναι τα εξής:

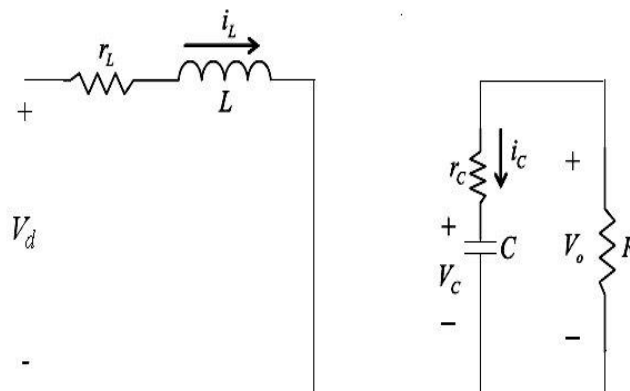
- Πηνίο (L): αποθηκεύει ενέργεια κατά την διάρκεια της ενεργής κατάστασης-‘on’-, δηλαδή της κλειστής θέσης του διακόπτη, την οποία απελευθερώνει στην έξοδο όταν ο διακόπτης βρεθεί στην ανενεργή κατάσταση-‘off’-δηλαδή στην ανοιχτή θέση του. Βοηθά στην εξομάλυνση του ρεύματος και στην ρύθμιση της τάσης εξόδου.
- Διακόπτης (S): σε μια τέτοια διάταξη είναι συνήθως ένα τρανζίστορ φαινομένου πεδίου, ένα MOSFET. Ελέγχει την ροή του ρεύματος μέσα στο κύκλωμα. Όταν είναι κλειστός επιτρέπει στο ρεύμα να περάσει μέσω του πυκνωτή, αποθηκεύοντας έτσι ενέργεια. Ενώ στην περίπτωση που είναι ανοιχτός η αποθηκευμένη ενέργεια αποδίδεται στην έξοδο.
- Δίοδος (D): τοποθετείται παράλληλα με το φορτίο και σκοπός της είναι να προσδίδει μια διαδρομή στο ρεύμα όταν ο διακόπτης είναι απενεργοποιημένος. Δεν επιτρέπει την ροή αντίστροφου ρεύματος μέσα στον διακόπτη εξασφαλίζοντας έτσι ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο παρέχεται ολοκληρωτικά στην έξοδο του συστήματος.
- Πυκνωτής (C): συνδέεται παράλληλα με το φορτίο για να φιλτράρει τυχόν υπολείμματα θορύβου ή ρεύματος κυματισμού στην τάση εξόδου. Σταθεροποιεί την τάση εξόδου και βελτιώνει την συνολική απόδοση του μετατροπέα.

3.4.1 Συνθήκες λειτουργίας μετατροπέα ενίσχυσης DC/DC

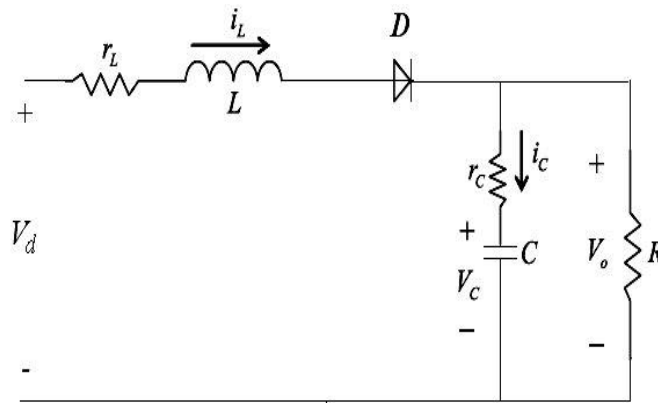
Δύο είναι οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ο μετατροπέας και με την συνεχόμενη εναλλαγή αυτών των δυο αυτός λειτουργεί. Η πρώτη είναι η κατάσταση ενεργή 'on' κατά την οποία ο διακόπτης του κυκλώματος παραμένει κλειστός, [Εικόνα 3.3].

Σε αυτή την κατάσταση το πηνίο του κυκλώματος αποθηκεύει ενέργεια στο μαγνητικό του πεδίο. Καθώς αποθηκεύει ενέργεια αντιστέκεται στις αλλαγές της ροής του ρεύματος αυξάνοντας έτσι σταδιακά το ρεύμα που το διαπερνά. Επίσης η διόδος είναι σε ανάστροφη πόλωση (reverse-bias) αλλά και σε μη αγώγιμη κατάσταση μην αφήνοντας το ρεύμα να την διαπεράσει. Αυτές οι συνθήκες προετοιμάζουν την επερχόμενη μεταφορά ενέργειας όταν ο διακόπτης θα βρίσκεται στην ανενεργή 'off' κατάσταση του προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή μεταφορά τάσης.

Η δεύτερη κατάσταση είναι η ανενεργή 'off' στην διάρκεια της οποίας ο διακόπτης βρίσκεται στην ανοιχτή του θέση, [Εικόνα 3.4]. Το πηνίο αντιστέκεται στις εναλλαγές του ρεύματος και αρχίζει και αποδίδει την αποθηκευμένη του ενέργεια. Αυτή η εναλλαγή ενέργειας από την κατάρρευση του μαγνητικού πεδίου, η οποία προκαλεί την εμφάνιση τάσης στα άκρα του πηνίου. Η διόδος βρίσκεται σε κατάσταση προς τα εμπρός πόλωσης (forward-bias) επιτρέποντας έτσι στην ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο να μεταφερθεί στο φορτίο ή στην έξοδο. Έτσι εξασφαλίζεται η αδιάκοπη παροχή ρεύματος στο φορτίο και η διατήρηση σταθερής τάσης εξόδου.



Εικόνα 3.3 Ο διακόπτης είναι κλειστός [13]



Εικόνα 3.4 Ο διακόπτης είναι ανοιχτός [13]

3.4.2 Τρόπος λειτουργίας μετατροπής

Αυτού του είδους οι μετατροπείς μπορούν να λειτουργήσουν σε δύο κύριες λειτουργίες μετατροπής. Η πρώτη είναι η λειτουργία συνεχούς αγωγιμότητας (Continuous Conduction Mode (CCM)) κατά την οποία το ρεύμα του πηνίου δεν φτάνει ποτέ την τιμή μηδέν στην διάρκεια ενός πλήρους κύκλου μεταγωγής. Αυτό σημαίνει πως το ρεύμα του πηνίου είναι πάντα μεγαλύτερο του μηδενός πριν την στιγμή όπου ο διακόπτης ανοίγει ξανά. Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας το ρεύμα στο φορτίο είναι συνήθως υψηλότερο και ο μετατροπέας λειτουργεί με ρεύμα χαμηλότερο αυτού του ρεύματος κυματισμού. Ο όρος ρεύμα κυματισμού αναφέρεται στην κυμαινόμενη συνιστώσα του ρεύματος που εμφανίζεται κατά την λειτουργία μεταγωγής, η οποία προκαλείται από την περιοδική φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή και του πηνίου.

Η δεύτερη λειτουργία ονομάζεται λειτουργία ασυνεχούς αγωγιμότητας (Discontinuous Conduction Mode (DCM)) που σε αντίθεση με την συνεχή το ρεύμα του πηνίου πέφτει στην τιμή μηδέν πριν από το τέλος κάθε κύκλου μεταγωγής. Υπάρχουν διαστήματα κατά την διάρκεια του κύκλου όπου το ρεύμα του πηνίου γίνεται μηδενικό ή ακόμα και αρνητικό πριν ανοίξει ο διακόπτης. Αυτή η κατάσταση πραγματοποιείται όταν το ρεύμα του φορτίου έχει πάρει μια χαμηλή τιμή, και όταν το πηνίο δεν έχει τον απαραίτητο χρόνο για να επαναφορτιστεί. Ο μετατροπέας λειτουργεί με υψηλότερο ρεύμα κυματισμού, σε αντίθεση με την συνεχή λειτουργία.

Η τελική τιμή της τάσης εξόδου εξαρτάται από τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα. Ο κύκλος λειτουργίας (D) αναφέρεται στον λόγο ενεργοποίησης του διακόπτη προς τον

συνολικό χρόνο μεταγωγής. Πιο συγκεκριμένα η τιμή του κύκλου λειτουργίας δίνεται από την σχέση:

$$D = \frac{T_{on}}{T_t} \quad [3.1] ,$$

όπου T_{on} είναι ο χρόνος ενεργής κατάστασης 'on' και

T_t είναι ο συνολικός χρόνος λειτουργίας.

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι στην λειτουργία ασυνεχούς αγωγιμότητας η ανενεργή κατάσταση 'off' διαρκεί για μικρότερο χρονικό διάστημα. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη του χρόνου αδράνειας ο οποίος προκύπτει όταν η τιμή του φορτίου που είναι συνδεδεμένο με τον μετατροπέα είναι χαμηλή και όταν το ρεύμα του πηνίου πέφτει στην τιμή μηδέν κατά την διάρκεια ενός κύκλου μεταγωγής.

Στην ενεργή κατάσταση 'on' , σύμφωνα με το κύκλωμα της Εικόνα 3.3, παρατηρούμε ότι $V_L = V_i$ όμως στην ανενεργή κατάσταση 'off' η πολικότητα της τάσης V_L έχει αντιστραφεί και τώρα είναι ίση με $V_i - V_o$. Η V_o ισούται με $V_o + V_i$ οπότε είναι μεγαλύτερη της V_i άρα η κλίση είναι αρνητική σε αυτή την κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα I_L μειώνεται γιατί το πηνίο αποδεσμεύει την ενέργεια του.

Εν τέλει μια εξίσωση που δείχνει την σχέση της τάσης εξόδου V_o και του κύκλου λειτουργίας D , λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το ολοκλήρωμα της V_L είναι ίσο με 0, είναι:

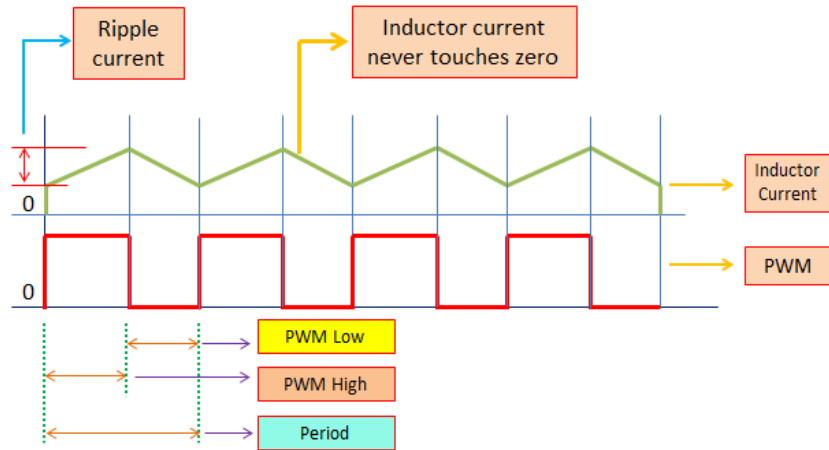
$$DTtV_i + (1 - D)Tt(V_i - V_o) = 0 \quad [3.2]$$

Διαιρώντας με το T_t και λύνοντας ως προς V_o καταλήγουμε στην εξής σχέση :

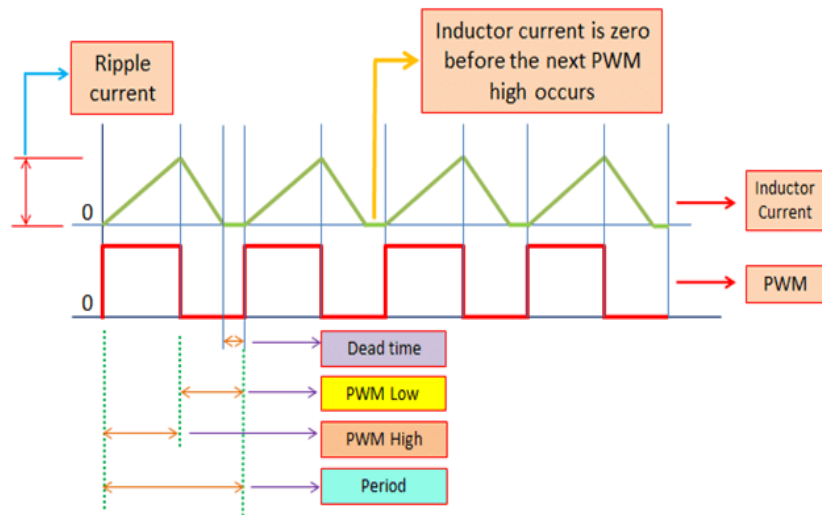
$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i \quad [3.3]$$

Από την ακριβώς παραπάνω σχέση γίνεται ξεκάθαρο ότι η τάση εξόδου V_o είναι αντιστρόφως ανάλογη του κύκλου λειτουργίας D [12].

Στην Εικόνα 3.5 και στην Εικόνα 3.6 μπορούμε να δούμε τις κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης του πυκνωτή.



Εικόνα 3.5 Λειτουργία Συνεχούς Αγωγιμότητας (CCM) [14]



Εικόνα 3.6 Λειτουργία Ασυνεχούς Αγωγιμότητας (DCM) [14]

3.4.3 Προσομοίωση μετατροπέα ενίσχυσης DC/DC

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να γίνει η ανάλυση είναι οι εξής:

$$V_{DC} = \frac{V_{PV}}{1-D} \quad [3.4]$$

$$L_{boost} = \frac{V_{PV}(V_{DC}-V_{PV})}{\Delta i_{Lboost} f_s V_{DC}} \quad [3.5]$$

$$C_B = \frac{\Delta i_L}{8 f_s \Delta V_{PV}} \quad [3.6]$$

$$C_{DC} = \frac{P_{PV}}{2 \omega g V_{DC} \Delta V_{DC}} \quad [3.7]$$

Όπου V_{DC} είναι η τάση στα άκρα του πυκνωτή DC, L_{boost} το πηνίο, Δi_{lboost} είναι το πλάτος της κυμάτωσης του πηνίου και είναι ίσο με 1,4% του ρεύματος I_{mp} , f_s είναι η συχνότητα μεταγωγής, ΔV_{PV} είναι το πλάτος της κυμάτωσης της τάσης εξόδου V_{pv} ίσο με 0,4% της τάσης εξόδου, P_{PV} είναι η ονομαστική ισχύς, ωg είναι η γωνιακή συχνότητα του δικτύου και το ΔV_{DC} που είναι το πλάτος της τάσης του πυκνωτή που είναι ίσο με το 10% της τάσης εξόδου.

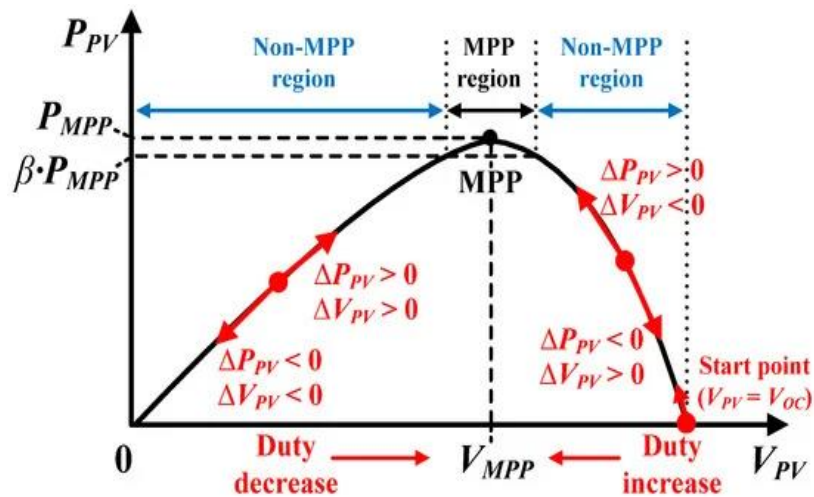
Στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί δίνονται οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων.

Πίνακας 3.1 Τιμές παραμέτρων

V_{DC}	L_{boost}	Δi_{lboost}	f_s	ΔV_{PV}	P_{PV}
500 V	1,88mH	12,27 A	5000 Hz	127,96 V	100 kW
C_B	C_{DC}	ωg	V_{pv}	ΔV_{DC}	R_{load}
2,4μF	2489μF	314 rad/s	319,9 V	3,199V	10Ω

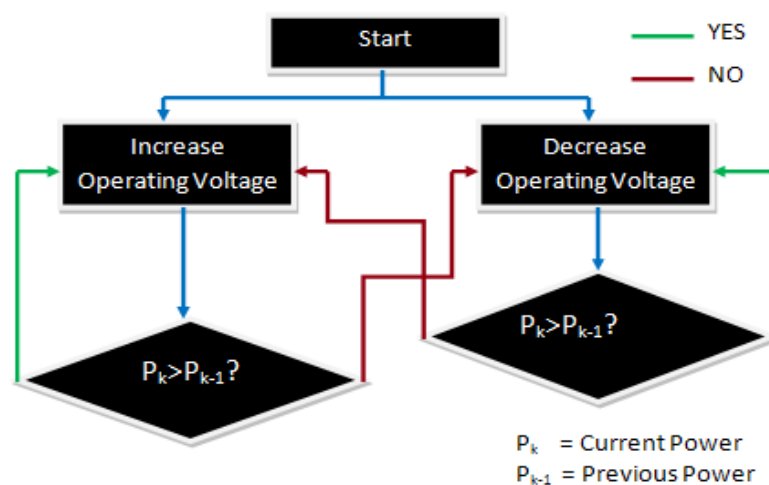
3.5 Παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει η ανάλυση της μεθόδου μέσω της οποίας γίνεται η βελτιστοποίηση της ισχύος εξόδου, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υπό κεφάλαιο. Έτσι εξασφαλίζεται ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί με την μέγιστη δυνατή απόδοση και παράγει την μέγιστη δυνατή ποσότητα ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) και την κατάλληλη προσαρμογή των συνθηκών λειτουργίας, [Εικόνα 3.7]. Ο περισσότερο διαδεδομένος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για αυτή την παρακολούθηση είναι ο P&O (Perturb & Observe) λόγω της απλότητάς του όπως υποδηλώνει και το όνομα του, λειτουργεί εισάγοντας μια διαταραχή (offset) στην τάση ή στο ρεύμα λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος σύμφωνα με την μεταβολή της ισχύος λειτουργίας που παρατηρείται χρησιμοποιώντας δείγματα από τις τιμές της τάσης και του ρεύματος [15].



Εικόνα 3.7 Εύρεση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT) [16]

Τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος είναι τα εξής: Ξεκινώντας από ένα οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας, αρκεί μόνο να υπάρχει μέσα στο εύρος της λειτουργίας του συστήματος, το οποίο ορίζεται ως αρχικό. Πολλαπλασιάζοντας την τάση με την ένταση του ρεύματος στο αρχικό σημείο υπολογίζεται η ισχύς. Η μετρούμενη τιμή της ισχύος συγκρίνεται με την ακριβώς προηγούμενη τιμή που μετρήθηκε. Αν η τρέχουσα τιμή είναι υψηλότερη της προηγούμενης υποδεικνύεται ότι το υπό εξέταση σημείο είναι κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Ενώ αν η τιμή βρεθεί μικρότερη τότε το εξεταζόμενο σημείο απομακρύνεται από το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Ο αλγόριθμος συγκρίνει συνεχώς τις τιμές της ισχύος πριν και μετά το εξεταζόμενο σημείο και προσαρμόζει ανάλογα τις συνθήκες λειτουργίας. Το διάγραμμα με τα βήματα φαίνεται στην Εικόνα 3.8.



Εικόνα 3.8 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου P&O

Ως προς την απόδοση του αλγορίθμου το βήμα και η ταχύτητα με την οποία παρακολουθείται η διαδικασία παίζουν μεγάλο ρόλο. Η ταχύτητα του αλγορίθμου εξαρτάται από το βήμα παρακολούθησης που έχει επιλεγεί. Με ένα μεγάλο μέγεθος βήματος επιτυγχάνεται καλύτερη ταχύτητα αλλά με αυτή την τακτική μπορεί να ξεπεραστεί το σημείο μέγιστης ισχύος. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια επιλέγεται ένα μικρότερο βήμα, το οποίο αναπόφευκτα οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο τρεξίματος του αλγορίθμου. Το μέγεθος του βήματος συνήθως καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί παρακολούθησης οι οποίοι επηρεάζουν την απόδοση του αλγορίθμου. Στην περίπτωση του μεγάλου βήματος μπορεί το αποτέλεσμα να ταλαντώνεται γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος χωρίς ποτέ να το προσεγγίζει ακριβώς. Επίσης σε ταχέως μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες, όπως μερικής σκίαση των φωτοβολταϊκών πάνελ ή γρήγορα μεταβαλλόμενη ακτινοβολία, μπορεί να μην είναι εύκολη η εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος.

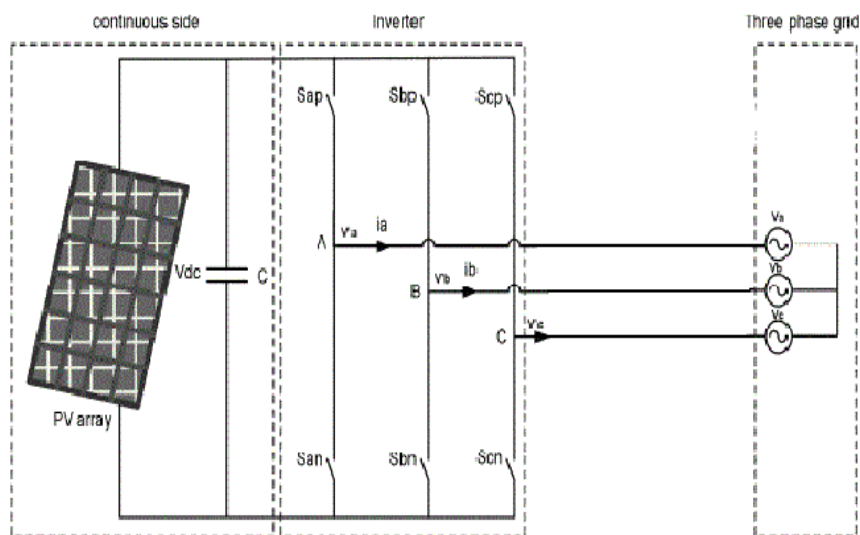
3.6 Τριφασικός μορφομετατροπέας ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC Inverter)

Ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ο μορφομετατροπέας ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο ρόλος του είναι η μετατροπή του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος (DC), που παράγεται από τους ηλιακούς συλλέκτες, σε σύγχρονο με το δίκτυο εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Παρέχει τιμές ρεύματος, συχνότητας και τάσης όσο πιο κοντά στις τιμές του δικτύου. Η εγκατάσταση του θα πρέπει αν γίνεται όσο πιο κοντά στο κουτί διακλάδωσης ώστε να μειωθούν οι απώλειες ενέργειας που προκύπτουν μέσω του κύριου καλωδίου συνεχούς ρεύματος καθώς και το κόστος της εγκατάστασης. Θα πρέπει επίσης να πληρούνται οι απαιτήσεις που θέτει ο κατασκευαστής ειδικά όσον αφορά τις συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας⁵⁴[17].

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι παροχές ενός τριφασικού μορφομετατροπέα ενέργειας, τα βασικά στοιχεία και στάδιο λειτουργίας του και πώς επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός της εξόδου του μορφομετατροπέα με την τάση και την συχνότητα του δικτύου.

3.7 Αρχές λειτουργίας του τριφασικού μορφομετατροπέα ενέργειας

Ένας τριφασικός μορφομετατροπέας ενέργειας αποτελείται από έξι διακόπτες οι οποίοι τοποθετούνται σε διάταξη γέφυρας. Ανά ζεύγος αυτοί οι διακόπτες αντιστοιχούν σε μία φάση του δικτύου, όπου ο ένας συνδέεται με τον θετικό αγωγό της συνεχούς τάσης και ο άλλος στον αρνητικό ή σε ουδέτερο σημείο (γείωση). Οι καταστάσεις μεταγωγής των διακοπών επιλέγονται ανάλογα με την επιθυμητή κυματομορφή του εναλλασσόμενου ρεύματος εξόδου. Όπως φαίνεται στο σχήμα από την Εικόνα 3.9 οι διακόπτες που συνδέονται στην θετική τάση αναφέρονται ως S_{ap} , S_{bp} , S_{cp} όπου p αντιστοιχεί στο θετικό (positive) και οι S_{an} , S_{bn} , S_{cn} είναι οι συνδεδεμένοι με τον αρνητικό (negative) αγωγό. Οι διακόπτες που ανήκουν στην ίδια γέφυρα έχουν συμπληρωματικές καταστάσεις, δηλαδή όταν ο ένας είναι σε ανοικτή θέση ('off') τότε ο άλλος είναι στην κλειστή ('on'). Αυτό γίνεται για να διασφαλίζεται τόσο η αποδοτικότητα όσο και η ασφάλεια του μορφομετατροπέα ενέργειας. Η καθυστέρηση μεταξύ των τριών γεφυρών είναι συνήθως ίση με 120° . Για να γίνει πιο κατανοητή η τοπολογία του μορφομετατροπέα ενέργειας παρατίθεται διάγραμμα της Εικόνα 3.9 στο οποίο απεικονίζεται το κύκλωμα του μορφομετατροπέα.



Εικόνα 3.9 Κύκλωμα τριφασικού μορφομετατροπέα ενέργειας [18]

Ανάλογα με το ποιοί διακόπτες βρίσκονται στην ανοικτή κατάσταση προκύπτουν 4 ισοδύναμα κυκλώματα. Για λόγους απλότητας, θα ληφθούν υπόψη μόνο οι καταστάσεις των διακοπών S_1 , S_3 και S_5 καθώς οι καταστάσεις των S_2 , S_4 και S_6 είναι

συμπληρωματικές των πρώτων διακοπών. Συνολικά υπάρχουν οκτώ (8) καταστάσεις, έξι (6) ενεργές και δύο (2) μη ενεργές, μηδενικές. Παρακάτω θα αναλυθούν οι τέσσερις (4) από αυτές.

- Πρώτη κατάσταση: Όλοι οι διακόπτες βρίσκονται στην ανοιχτή θέση (off). Το φορτίο δεν διαπερνάται από ρεύμα οπότε η τάση αυτής της κατάστασης είναι μηδενική

$$V_1 = 0 \text{ V [3.8]}$$

- Δεύτερη κατάσταση: Όλοι οι διακόπτες βρίσκονται στην κλειστή τους θέση (on). Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση έτσι και τώρα το ρεύμα δεν φτάνει στο φορτίο

$$V_2 = 0 \text{ V [3.9]}$$

- Τρίτη κατάσταση: Ένας από τους διακόπτες, έστω ο S1, είναι ανοιχτός. Οι αντιστάσεις των διακοπών που είναι κλειστοί είναι παράλληλες, η συνολική αντίσταση αυτών των δύο είναι ίση με το μισό της αντίστασης του S1 όταν το φορτίο είναι συμμετρικό.

$$I_{ON} = -I_{OFF} \leftrightarrow \frac{V_{ON}}{Z_{ON}} = -\frac{V_{OFF}}{Z_{OFF}} \leftrightarrow V_{ON} = -\frac{V_{OFF}}{2} \text{ [3.10]}$$

Έχουμε ότι

$$V_{ON} - V_{OFF} = V_{DC}, \quad \text{συνεπώς}$$

$$V_{ON} = \frac{1}{3} V_{DC}, \quad V_{OFF} = -\frac{2}{3} V_{DC} \quad \text{[3.11]}$$

- Τέταρτη κατάσταση: Η συμπληρωματική της προηγούμενης κατάστασης όπου δύο διακόπτες είναι ανοιχτοί, έστω οι S3 και S5. Αντίστοιχα με την τρίτη περίπτωση που περιεγράφηκε ακριβώς από πάνω παίρνουμε ότι:

$$V_{OFF} = -\frac{V_{ON}}{2} \quad \text{[3.12]}$$

σύμφωνα με το οποίο καταλήγουμε στις σχέσεις

$$V_{ON} = \frac{2}{3} V_{DC}, \quad V_{OFF} = -\frac{1}{3} V_{DC} \quad \text{[3.13]}$$

$$I_{ON} = -I_{OFF} \leftrightarrow \frac{V_{ON}}{Z_{ON}} = -\frac{V_{OFF}}{Z_{OFF}} \leftrightarrow V_{ON} = -\frac{V_{OFF}}{2} \text{ [3.10]} H(s)_{AB} = V_g (K_p + K_i \frac{1}{s}) \frac{1}{s} \text{ [3.15]}$$

Ένα σχόλιο που θα ήταν καλό να αναφερθεί είναι ότι οι περιπτώσεις της πρώτης και της δεύτερης κατάστασης είναι αδύνατο να γίνουν πράξη διότι η στρατηγική ελέγχου και ο

σχεδιασμός του μορφομετατροπέα ενέργειας δεν θα επέτρεπαν ένα τέτοιο σενάριο. Ακόμα και στην περίπτωση που τέτοιου είδους σενάρια ήταν απαραίτητα, θα απαιτούνταν πολύ προσεκτική εξέταση των απαιτήσεων του φορτίου και του σχεδιασμού του μορφομετατροπέα ενέργειας.

Για να είναι πιο εύκολη η ανάγνωση αλλά και η σύγκριση των 8 συνολικά καταστάσεων που μπορεί να βρεθεί ένας μορφομετατροπέας ενέργειας παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας, [Πίνακας 3.2]. Αναγράφονται συγκεντρωτικά οι τιμές που αφορούν στην θέση των διακοπών, 1 για την κλειστή θέση του διακόπτη και 0 για την ανοιχτή. Γίνεται επίσης η αντιστοίχιση με τις 4 καταστάσεις που αναλύθηκαν παραπάνω και αναγράφονται οι τιμές των τάσεων όπως αυτές υπολογίστηκαν.

Πίνακας 3.2 Περιπτώσεις καταστάσεων διακοπών μορφομετατροπέα

S_1	S_2	S_3	Αριθμός κατάστασης	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
0	0	0	Πρώτη	0	0	0
0	0	1	Τέταρτη	$-\frac{1}{3} V_{DC}$	$-\frac{1}{3} V_{DC}$	$\frac{2}{3} V_{DC}$
0	1	0	Τέταρτη	$-\frac{1}{3} V_{DC}$	$\frac{2}{3} V_{DC}$	$-\frac{1}{3} V_{DC}$
0	1	1	Τρίτη	$-\frac{2}{3} V_{DC}$	$\frac{1}{3} V_{DC}$	$\frac{1}{3} V_{DC}$
1	0	0	Τέταρτη	$\frac{2}{3} V_{DC}$	$-\frac{1}{3} V_{DC}$	$-\frac{1}{3} V_{DC}$
1	0	1	Τρίτη	$\frac{1}{3} V_{DC}$	$-\frac{2}{3} V_{DC}$	$\frac{1}{3} V_{DC}$
1	1	0	Τρίτη	$\frac{1}{3} V_{DC}$	$\frac{1}{3} V_{DC}$	$-\frac{2}{3} V_{DC}$
1	1	1	Δεύτερη	0	0	0

3.8 Σύστημα ελέγχου μορφομετατροπέα

Προκειμένου να βεβαιωθεί ότι η λειτουργία και η ρύθμιση του μορφομετατροπέα ενέργειας γίνεται με τον βέλτιστο και αποδοτικότερο τρόπο, κρίνεται απαραίτητη η παρουσία ενός συστήματος ελέγχου. Αυτό το σύστημα μπορεί να αναλυθεί στα εξής τρία κομμάτια:

1. Βρόχος κλειδώματος φάσης (PLL)

2. Ρυθμιστής τάσης

3. Ρυθμιστής ρεύματος

Ο βρόχος κλειδώματος φάσης χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό του μορφομετατροπέα ενέργειας με το δίκτυο [19].

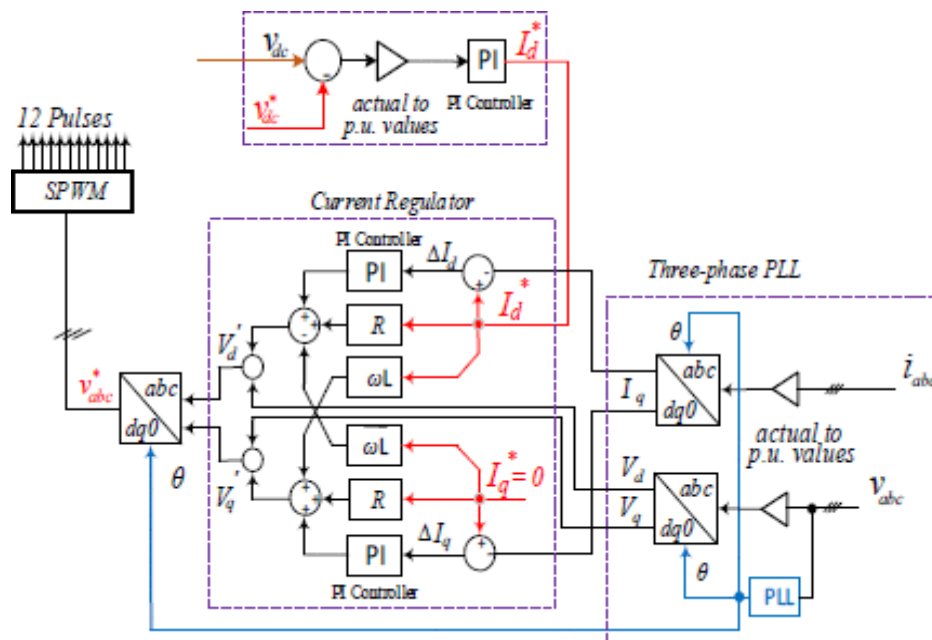
Πιο συγκεκριμένα συγχρονίζει την φάση και την συχνότητα ενός σήματος εξόδου, όπου εδώ έξοδος θεωρείται ο μορφομετατροπέας ενέργειας, με τις αντίστοιχες τιμές ενός σήματος αναφοράς, στην περίπτωση αυτή το σήμα αναφοράς είναι το εθνικό δίκτυο. Σαν κύρια λειτουργία έχει την διατήρηση μιας ομαλής σχέσης μεταξύ των δυο αυτών σημάτων, ακόμα και κάτω από συνθήκες διαταραχών.

Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από ελεγκτές τάσης και ρεύματος για την βελτίωση του συντελεστή ισχύος και την ικανοποίηση των απαιτήσεων του συγχρονισμού του μορφομετατροπέα ενέργειας με το δίκτυο[19].

Ο ρυθμιστής τάσης βοηθάει στην διατήρηση μιας σταθερής τάσης εξόδου παρά τις διακυμάνσεις που πιθανώς θα προκύψουν στην είσοδο. Έτσι προστατεύονται τα εξαρτήματα του συστήματος και διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία του μορφομετατροπέα ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του αναλογικό-ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI controller), ο οποίος ρυθμίζει την τιμή της τάσης με βάση την διαφορά του επιθυμητού σημείου ρύθμισης και της πραγματικής μεταβλητής. Ο ρυθμιστής τάσης παράγει ρεύμα εντολής (I_d) στη διαδικασία του ρυθμιστή ρεύματος μέσω της σύγκρισης της τάσης συνεχούς ρεύματος μέτρησης με την τάση συνεχούς ρεύματος ρύθμισης (V_{dc}). Ο ρυθμιστής ρεύματος αποτελείται από ελεγκτές PI τόσο για τα ρεύματα i_d όσο και για τα ρεύματα i_q . Το ρεύμα εντολής (I_d) προκύπτει από τον ρυθμιστή τάσης και συγκρίνεται με το ρεύμα δικτύου (I_d) [19].

Ο αναλογικό-ολοκληρωτικός ελεγκτής επεξεργάζεται το σήμα I_d προκειμένου να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα και παράγει ένα σήμα που προσθέτει στο σήμα της τάσης V_d και έπειτα συγκρίνει με το ωL για την παραγωγή του V_d . Επίσης το ρεύμα I_q μηδενίζεται για να μπορέσει να αυξηθεί ο συντελεστής ισχύος του μορφομετατροπέα ενέργειας και να γίνει ίσος με την μονάδα. Όπως με το σήμα I_d , έτσι και με το σήμα I_q γίνεται η επεξεργασία του από τον ελεγκτή για να παραχθεί ένα σήμα το οποίο προστίθεται στην τάση V_q και μετά την σύγκρισή του με το ωL παράγεται το V_q . Για να περιοριστούν τα σφάλματα μεταξύ άνω και κάτω ορίων γίνεται χρήση της ζώνης υστέρησης στις εξόδους

των αναλογικό-ολοκληρωτικών ελεγκτών. Τα ρεύματα, οι τάσεις όπως και το σε ποιό σημείο του συστήματος ελέγχου του μορφομετατροπέα ενέργειας αναλογούν φαίνονται στην Εικόνα 3.10 που ακολουθεί.

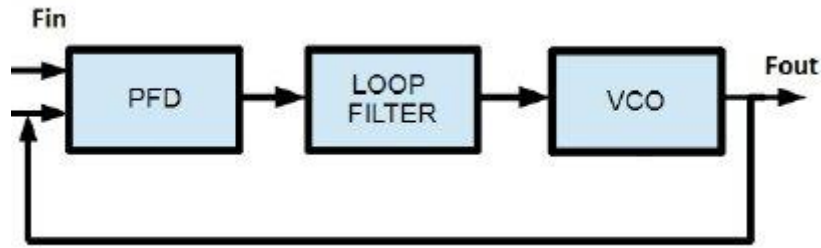


Εικόνα 3.10 Σύστημα ελέγχου μορφομετατροπέα ενέργειας

3.9 Ρύθμιση του αναλογικό-ολοκληρωτικού ελεγκτή (tuning of PI controller)

Ο βρόχος κλειδώματος φάσης (PLL) είναι από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους μηχανισμούς σε περιπτώσεις που χρειάζεται συγχρονισμός με το δίκτυο, γεγονός το οποίο οφείλεται στην υψηλή απόδοσή του, στην ευκολία της υλοποίησής του αλλά και στην ικανότητα συγχρονισμού ενός σήματος εισόδου με την είσοδο και την γωνία φάσης. Η περίπτωση που εξετάζεται έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να διαχειρίζεται μετασχηματισμούς σημάτων και μηχανισμούς ελέγχου με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης της διαδικασίας του συγχρονισμού.

Το βασικό σύστημα ενός βρόχου κλειδώματος φάσης αποτελείται από τρία μέρη: έναν ανιχνευτή φάσης (Phase Detector), ένα φίλτρο βρόχου (Loop Filter) και έναν ταλαντωτή ελεγχόμενο από τάση (Voltage Control Oscillator), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11 Βασικό σύστημα βρόχου κλειδώματος φάσης 54[20]

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα γίνεται χρήση του μετασχηματισμού $abc \rightarrow dq$ και το 'κλείδωμα' πραγματοποιείται θέτοντας την τάση V_d^* ίση με μηδέν. Ένας ρυθμιστής, σε αυτή την περίπτωση ο αναλογικό-ολοκληρωτικός ελεγκτής, χρησιμοποιείται για να ελέγχει την μεταβλητή V_d^* και η έξοδος του ορίζει την συχνότητα του δικτύου. Η χρήση του τελεστή υπολοίπου γίνεται για να διατηρηθεί η γωνία τάσης στο εύρος $[0, 2\pi]$ και δεν επηρεάζει την συνάρτηση μεταφοράς [21]. Αφού γίνει η ολοκλήρωση της συχνότητας, λαμβάνεται η γωνία της τάσης ωt . Λαμβάνοντας αυτά υπόψη έχουμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου είναι η εξής:

$$H(s)_{AB} = V_g (K_p + K_i \frac{1}{s}) \frac{1}{s} \quad [3.15]$$

όπου η V_g είναι η μέγιστη τάση μεταξύ φάσης και ουδετέρου (ίση με $\sqrt{2} * 230V = 325V$). Με βάση την συνάρτηση ανοιχτού βρόχου μπορούμε να εξάγουμε αυτή του κλειστού, η οποία ορίζεται ως:

$$H(s)_{KB} = \frac{H(s)_{AB}}{1+H(s)_{AB}} \quad [3.16]$$

Αντικαθιστώντας την συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου στην σχέση παραπάνω

$H(s)_{KB} = \frac{H(s)_{AB}}{1+H(s)_{AB}}$ εξάγεται η εξής συνάρτηση:

$$H(s)_{KB} = \frac{sV_g K_p + V_g K_i}{s^2 + sV_g K_p + V_g K_i} \quad [3.17]$$

Συγκρίνοντας την εξίσωση παραπάνω με την συνάρτηση μεταφοράς δευτέρου βαθμού, η οποία έχει την μορφή:

$$G(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad [3.18]$$

Θεωρώντας σαν τιμή του ζ το 0,707 και την ω_n ίση με την ονομαστική τιμή του δικτύου 314 rad/s γίνεται ο υπολογισμός των κερδών K_p και K_i του ελεγκτή. Πιο συγκεκριμένα έχουμε ότι:

$$2\zeta\omega_n s = sV_g K_p \Leftrightarrow K_p = \frac{2\zeta\omega_n}{V_g} \Leftrightarrow K_p = 1,36$$

$$\omega_n^2 = V_g K_i \Leftrightarrow K_i = \frac{\omega_n^2}{V_g} \Leftrightarrow K_i = 303,37.$$

3.10 Φιλτράρισμα αρμονικών

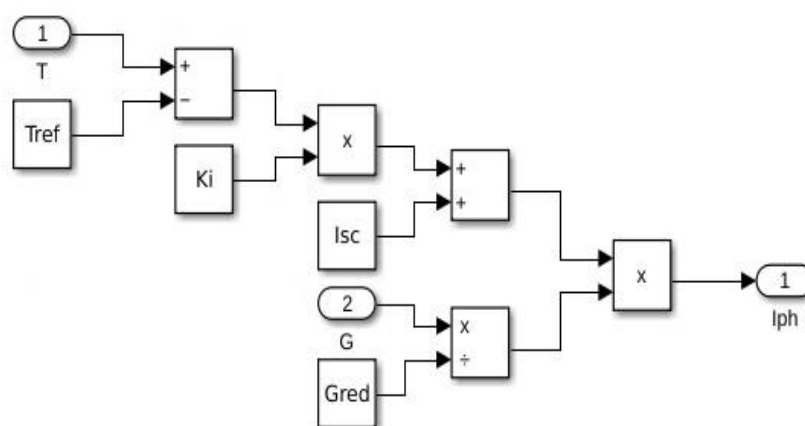
Οι αρμονικές ορίζονται ως ηλεκτρικές κυματομορφές ρεύματος ή τάσης που η συχνότητά τους είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας. Η θεμελιώδης συχνότητα είναι η βασική ημιτονοειδής κυματομορφή που υποδεικνύει την κανονική συχνότητα λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Η τιμή της θεμελιώδους συχνότητας είναι 50 ή 60 Hz, στην Ευρώπη 50 Hz. Τα ακέραια πολλαπλάσια της δημιουργούν παραμόρφωση στην κυματομορφή εξόδου, δηλαδή δεν έχει ημιτονοειδή μορφή. Οι αρμονικές θεωρούνται ως ανεπιθύμητα σήματα που παρουσιάζονται στο σύστημα λόγω μη γραμμικών φορτίων [22].

Οι μορφομετατροπείς ενέργειας που έχουν επιλεγεί για την συγκεκριμένη εγκατάσταση, σύμφωνα πάντα με το φυλλάδιο του κατασκευαστή, διαθέτει φίλτρο αρμονικών. Πιο συγκεκριμένα η έγχυση των αρμονικών στο δίκτυο, του συγκεκριμένου μοντέλου, είναι $\leq 3\%$, ποσοστό μικρότερο από το 5% που ορίζει το πρότυπο για παραγωγή και μεταφορά ενέργειας. Επομένως δεν απαιτείται η τοποθέτηση ενός δεύτερου φίλτρου αρμονικών, γεγονός που θα αύξανε κατά πολύ το κόστος της εγκατάστασης.

—Τέλος Κεφαλαίου—

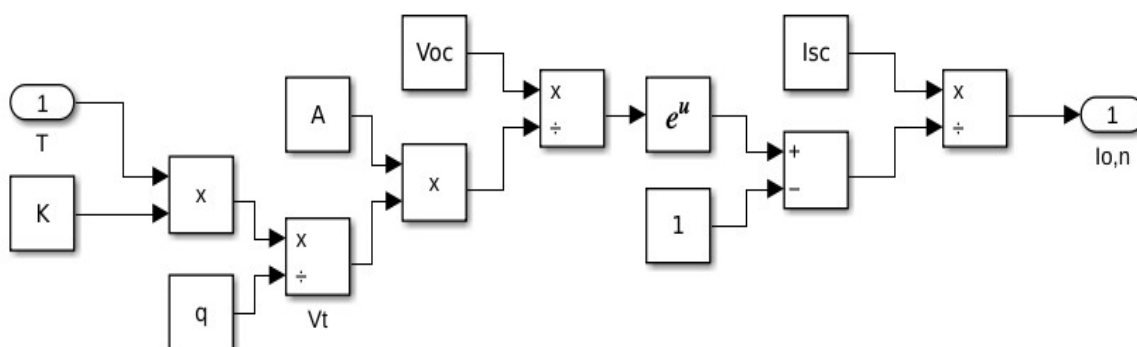
Κεφάλαιο 4 Σχηματικές απεικονίσεις Simulink

Με βάση την εξίσωση που αναλύθηκε στην υποενότητα 2.2.1 η υλοποίηση του ρεύματος I_{ph} στο Matlab/Simulink παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1, όπου θερμοκρασία T και ακτινοβολία G είναι οι είσοδοι του συστήματος. Οι τιμές των παραμέτρων I_{sc} και k_i δίνονται από τον κατασκευαστή στο φυλλάδιο πληροφοριών, που συνοδεύει τα ηλιακά πάνελ, στην περίπτωση που εξετάζουμε δηλαδή αυτή των Τυπικών Συνθηκών.



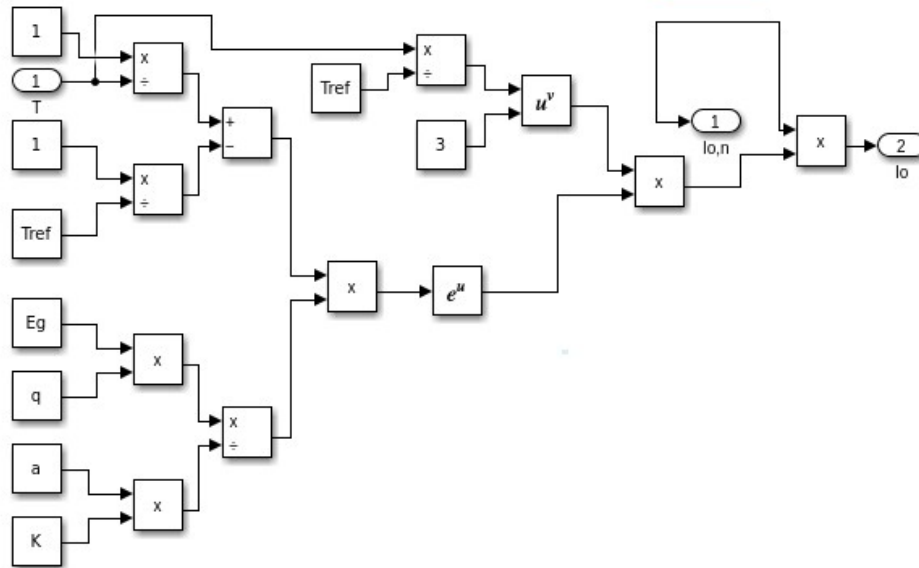
Εικόνα 4.1 Προσομοίωση ρεύματος φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Το αντίστροφο ρεύμα κορεσμού του οποίου η ανάλυση έγινε στην υποενότητα 2.2.2 περιγράφεται στο Matlab/Simulink όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 4.2.



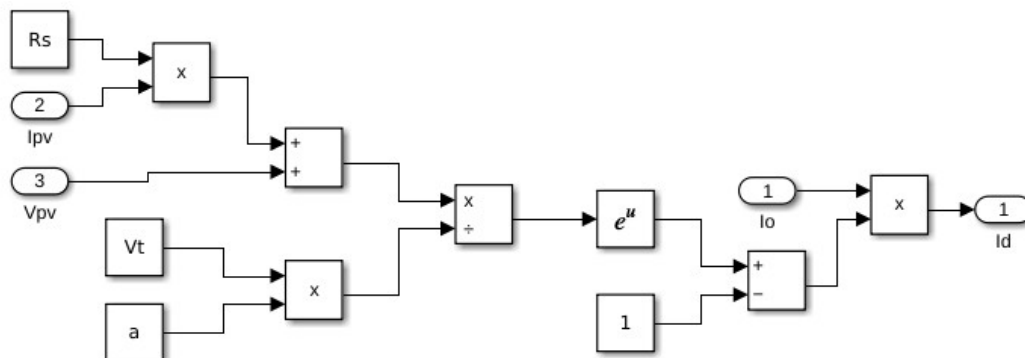
Εικόνα 4.2 Προσομοίωση αντίστροφου ρεύματος κορεσμού διόδου

Έχοντας την σχέση του $I_{o,n}$ τώρα μπορούμε να προσομοιώσουμε το I_o , το οποίο στο Matlab/Simulink και αυτό φαίνεται στην Εικόνα 4.3.



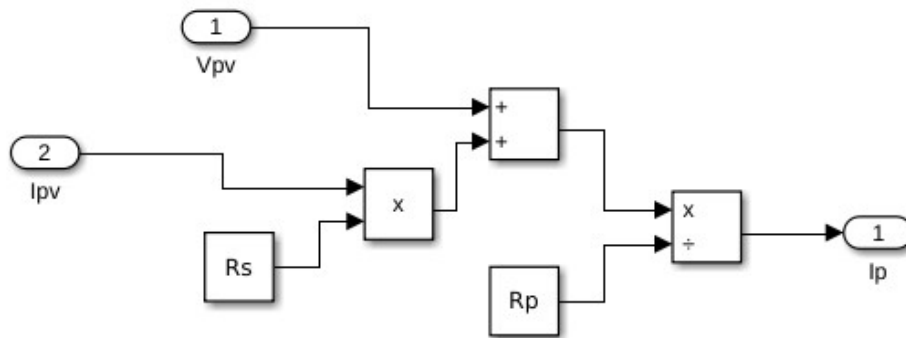
Εικόνα 4.3 Προσομοίωση ρεύματος κορεσμού της διόδου

Έχοντας εξετάσει τα επί μέρους ρεύματα η ανάλυση του ρεύματος της διόδου στο Matlab/Simulink είναι αυτή που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.4.



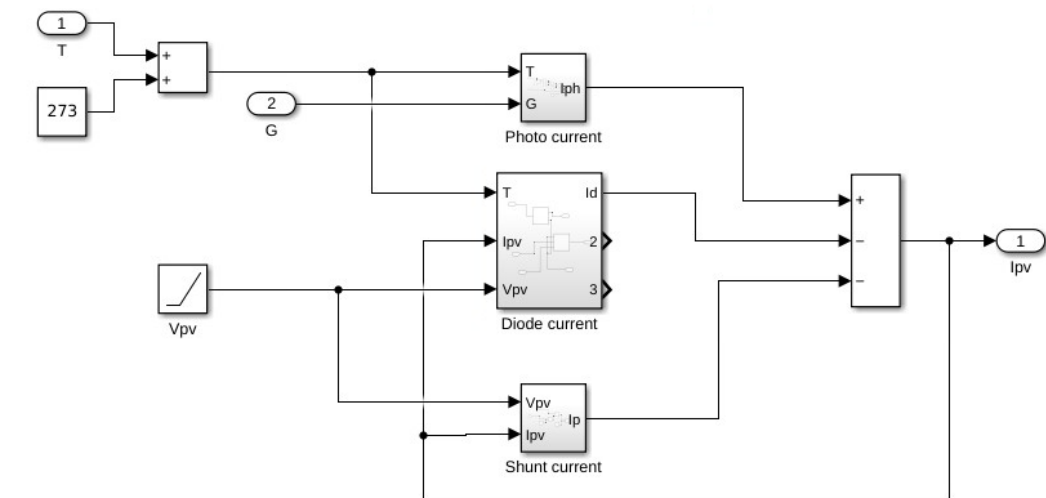
Εικόνα 4.4 Προσομοίωση ρεύματος διόδου

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε για το ρεύμα διακλάδωσης στην υποενότητα 2.2.3, η προσομοίωση αυτής της εξίσωσης στο Matlab/Simulink είναι αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.5.



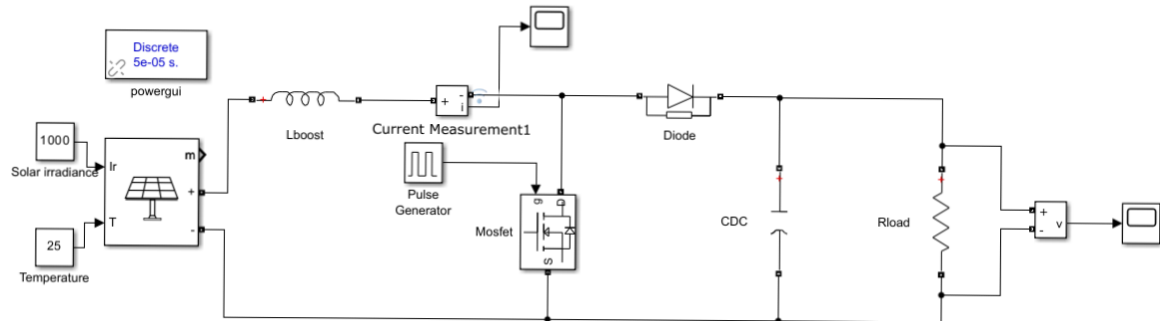
Εικόνα 4.5 Προσομοίωση ρεύματος διακλάδωσης

Η τελική υλοποίηση του ρεύματος I_{pv} στο Matlab/Simulink παρατίθεται στην Εικόνα 4.6.



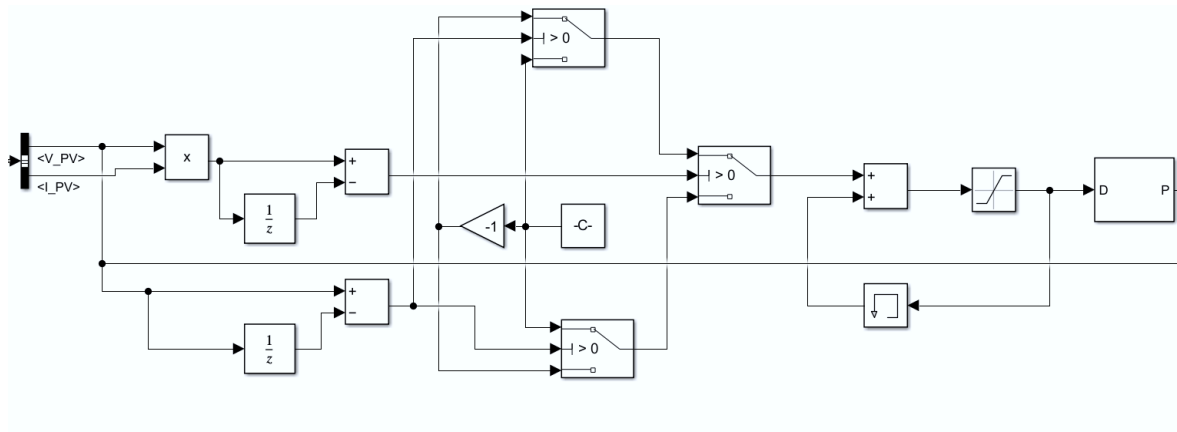
Εικόνα 4.6 Προσομοίωση συνολικού ρεύματος ηλιακού κυττάρου

Το μοντέλο προσομοίωσης του μετατροπέα DC/DC στο Matlab/Simulink παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.7 σύμφωνα με τις εξισώσεις που δίνονται στην υποενότητα 3.4.3.



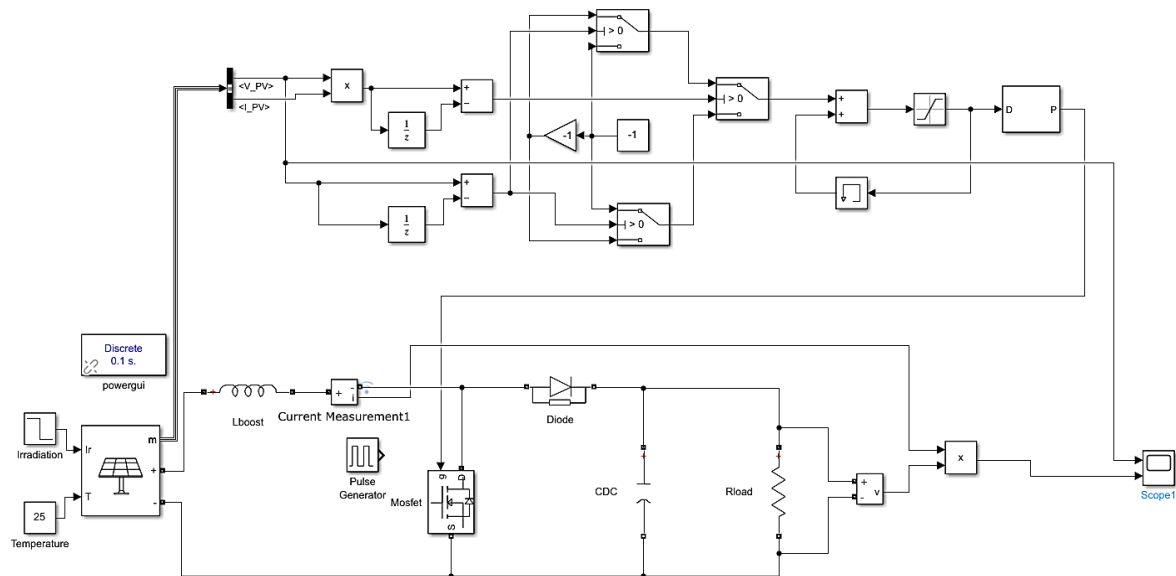
Εικόνα 4.7 Προσομοίωση μετατροπέα ενίσχυσης DC/DC

Η προσομοίωση του μοντέλου της εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος στο Simulink με βάση τον αλγόριθμο που περιγράφηκε στην ενότητα 3.5 γίνεται ως εξής, [Εικόνα 4.8].



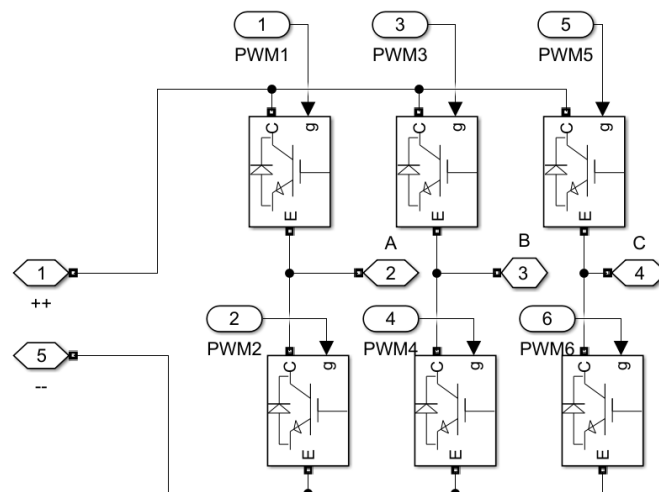
Εικόνα 4.8 Προσομοίωση διαδικασίας εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

Στο διάγραμμα της Εικόνα 4.9 που ακολουθεί φαίνονται ο μετατροπές ενίσχυσης σε σύνδεση με την διαδικασία εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος.

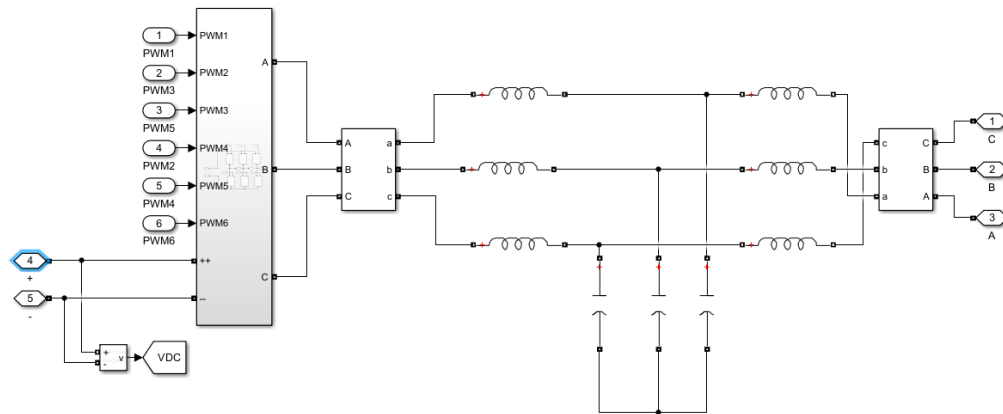


Εικόνα 4.9 Μετατροπέας ενίσχυσης DC/DC και εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος

Στην Εικόνα 4.10 φαίνονται οι διακόπτες, όπως αυτοί προσομοιώνονται στο Simulink, και στην Εικόνα 4.11 φαίνονται οι είσοδοι-παλμοί των διακοπών και το φίλτρο LCL.

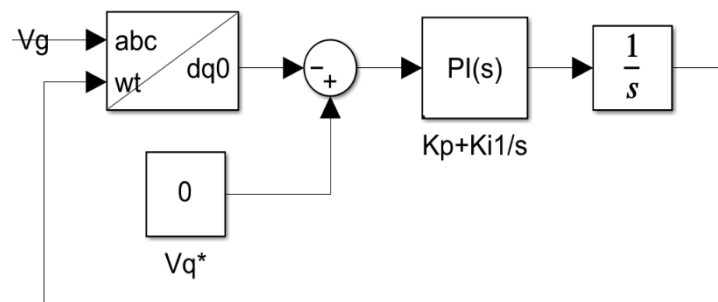


Εικόνα 4.10 Διακόπτες μορφομετατροπέα



Εικόνα 4.11 LCL φίλτρο μορφομετατροπέα

Για τον συγχρονισμό του τριφασικού μορφομετατροπέα ενέργειας που είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο μια από τις πρακτικές που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος PLL που υλοποιείται σε ένα πλαίσιο dq, της οποίας το σχηματικό διάγραμμα απεικονίζεται στην Εικόνα 4.12.



Εικόνα 4.12 Διάγραμμα ελεγκτή PLL

–Τέλος Κεφαλαίου–

Κεφάλαιο 5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

5.1 Σύνοψη κεφαλαίου

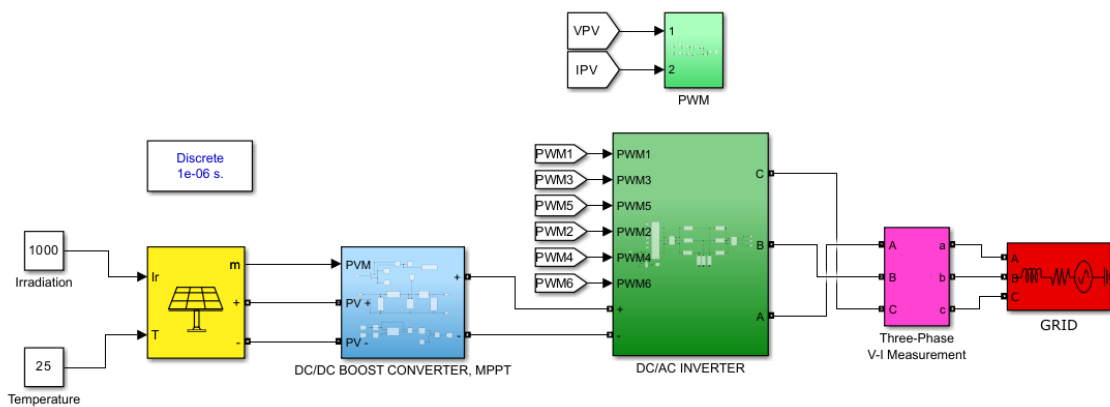
Ο βασικός στόχος αυτού του κεφαλαίου ήταν ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου μέσης κλίμακας ηλιακού πάρκου συνδεδεμένο με το δίκτυο ενώνοντας τα επιμέρους τμήματα που περιεγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Το αντικείμενο αυτής της μελέτης είναι η εξαγωγή της μέγιστης διαθέσιμης ηλεκτρικής ισχύος από ένα φωτοβολταϊκό πάρκο κάτω από δεδομένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας με απώτερο σκοπό η όσο πιο αποδοτική παροχή της στο δίκτυο κοινής ωφέλειας. Για να γίνουν πιο κατανοητά ο σχεδιασμός και ο τρόπος λειτουργίας κάθε στοιχείου που αποτελεί μέρος του φωτοβολταϊκού συστήματος αποφασίστηκε να αναλυθούν ξεχωριστά τα στοιχεία αυτά και στην συνέχεια να γίνει η μεταξύ τους συνένωση για να εξαχθεί το τελικό αποτέλεσμα. Τα στοιχεία που μελετήθηκαν και αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον προσομοίωσης του Matlab είναι τα εξής:

- Ο μετατροπέας ανύψωσης DC/DC (DC/DC boost converter), πρόκειται για μια ηλεκτρονική διάταξη ισχύος που μετατρέπει μια είσοδο χαμηλής συνεχούς τάσης, η τάση που προέρχεται από το φωτοβολταϊκό πάρκο, σε μια ελεγχόμενη έξοδο υψηλότερης τάσης.
- Παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), είναι η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για να βελτιωθεί η ηλεκτρική έξοδος ώστε να διασφαλιστεί η μέγιστη εξαγωγή ισχύος από το φωτοβολταϊκό πάρκο αυξάνοντας έτσι την ενεργειακή του απόδοση. Για να επιτευχθεί αυτή η τεχνική εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος P&O.
- Ο μορφομετατροπέας DC/AC (DC/AC inverter) είναι η ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει την τάση συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες σε τάση εναλλασσόμενου ρεύματος για να μπορέσει να τροφοδοτηθεί στο δίκτυο. Είναι πολύ σημαντικό αυτή η τάση που διοχετεύεται να είναι συγχρονισμένη και ίσου δυναμικού με την τάση του δικτύου. Το έργο αυτό υλοποιεί το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα, το οποίο αποτελείται από έναν ελεγκτή βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL) και ρυθμιστές τάσης και ρεύματος.

Μετά την ανάπτυξη αυτών των κύριων στοιχείων έγινε κατάλληλη σύνδεση προκειμένου να εξαχθούν και να επαληθευθεί η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία του συστήματος αυτού κάτω από τις Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (STS).

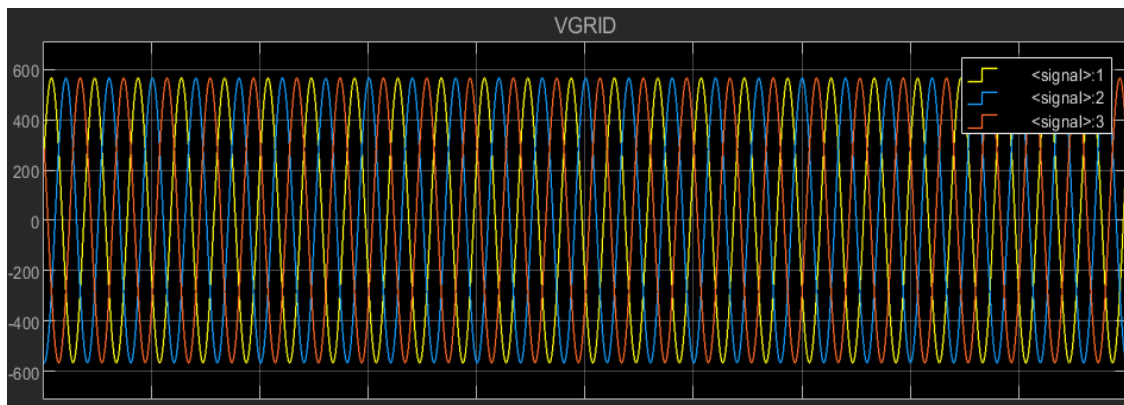
5.2 Προσομοίωση ολοκληρωμένου συστήματος

Το ολοκληρωμένο διασυνδεδεμένο με το δίκτυο σύστημα παρουσιάζεται στο σχήμα της Εικόνα 5.1. Έχει προστεθεί ένας μετρητής τάσης και ρεύματος, με την βοήθεια του οποίου εξάχθηκαν οι κυματομορφές ρεύματος, τάσης και συνολικής ισχύς εξόδου που προκύπτει από το γινόμενο τάσης και ρεύματος.



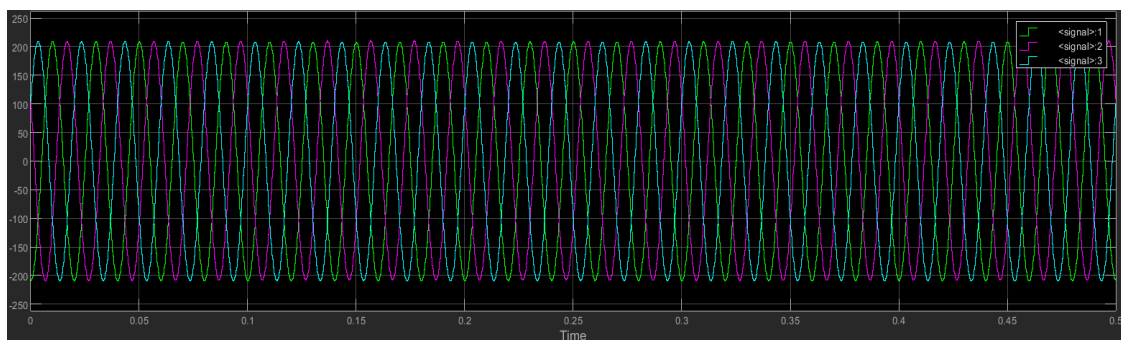
Εικόνα 5.1 Ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα σε σύνδεση με το δίκτυο

Για ηλιακή ακτινοβολία ίση με 1000 W/m^2 και θερμοκρασία ίση με 25 βαθμούς Κελσίου παρατηρείται τάση εξόδου 399 V(rms) , συχνότητα ίση με 50 Hz τιμές που έρχονται σε συμφωνία με τα καθορισμένα όρια για το δίκτυο, [Εικόνα 5.2].



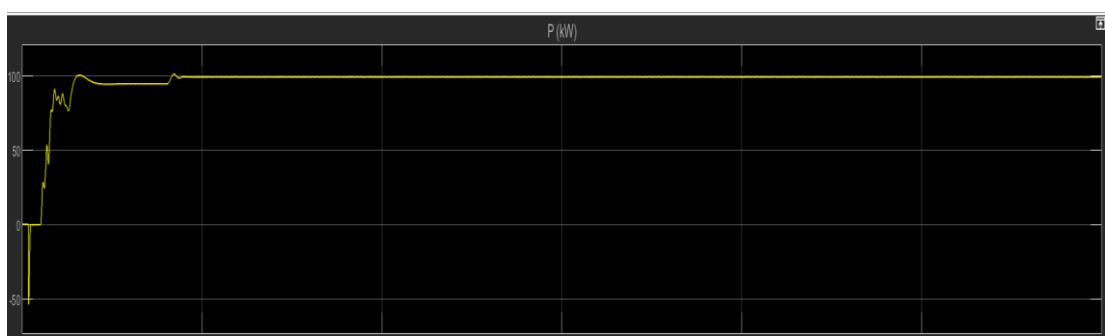
Εικόνα 5.2 Κυματομορφή τάσης

Εξετάζοντας τις κυματομορφές των ρευμάτων των οποίων η μέση τιμή είναι ίση με 147,6 A, [Εικόνα 5.3].



Εικόνα 5.3 Κυματομορφή ρεύματος

Αναφορικά με την τιμή της ισχύος εξόδου, αυτή γίνεται ίση με 99,44 στα 0,04 δευτερόλεπτα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4 Ισχύς εξόδου

—Τέλος Κεφαλαίου—

Κεφάλαιο 6 Σύνοψη και μελλοντικές επεκτάσεις

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, η παρούσα διπλωματική εργασία εμβάθυνε στην μοντελοποίηση και τον σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος. Ξεκινώντας από μια μεμονωμένη φωτοβολταϊκή μονάδα και φτάνοντας μέχρι ένα ολοκληρωμένο συνδεδεμένο με το δίκτυο φωτοβολταϊκό πάρκο προσεγγίστηκε μια ολοκληρωμένη κατανόηση αρχικά των επιμέρους στοιχείων και στην συνέχεια η συνεργατική τους ενσωμάτωση στο εθνικό δίκτυο. Παρατηρήθηκε ότι η συνολική ισχύς εξόδου αυξάνεται καθώς η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται και η θερμοκρασία μειώνεται, με την ακτινοβολία να έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο. Θεωρήθηκε απαραίτητη η ύπαρξη ενός μετατροπέα ανύψωσης DC/DC για την ενίσχυση και ρύθμιση της συνεχούς τάσης των φωτοβολταϊκών. Για την μετατροπή από συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση επιλέχθηκε ο τριφασικός μορφομετατροπέας και το σύστημα ελέγχου του. Μέσω της ανάλυσης της απόδοσης του συστήματος έγινε σαφής η κρισιμότητα για τροποποιήσεις και βελτιώσεις, έτσι ώστε η συνολική απόδοση, επίδοση και αξιοπιστία του συστήματος να εξασφαλίζονται κάτω από οποιεσδήποτε καταστάσεις.

6.2 Προτεινόμενες επεκτάσεις

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας αναδεικνύεται ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω των αδιαμφισβήτητων οικονομικών και περιβαλλοντικών ωφελειών της. Αυτός είναι ο λόγος που το ενδιαφέρον της παγκόσμιας κοινότητας έχει επικεντρωθεί στην έρευνα για βελτιστοποίηση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών. Η παρούσα διατριβή εστίασε στον σχεδιασμό και την μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών πάρκων με στόχο να αποτελέσει μια βάση για μελλοντικές έρευνες με όμοια θεματική.

Μερικές από τις προτάσεις για επέκταση για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι οι εξής:

- Εφαρμογή στον πραγματικό κόσμο: Επέκταση της έρευνας ώστε να δοκιμαστεί το σύστημα κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας με σκοπό να επικυρωθούν τα αποτελέσματα και να αξιολογηθεί η απόδοση τους υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Προστασία από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως σκόνη, υγρασία και διαβρωτικούς παράγοντες που μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση του συστήματος.
- Αποθήκευση ενέργειας: Ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως συσσωρευτές, στο φωτοβολταϊκό σύστημα για την εξασφάλιση της διαθεσιμότητας της ενέργειας σε περιόδους με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία ή κατά την διάρκεια διακοπών δικτύου.
- Υβριδικά συστήματα: Μοντελοποίηση και ενσωμάτωση άλλων συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η βιομάζα, για την δημιουργία πιο αξιόπιστων και βιώσιμων συστημάτων παραγωγής ενέργειας.
- Ανάλυση διαφόρων περιπτώσεων από επιτυχημένες εφαρμογές φωτοβολταϊκών πάρκων σε ποικίλες γεωγραφικές τοποθεσίες οι οποίες αναδεικνύουν την προσαρμοστικότητα και την αποτελεσματικότητα του συστήματος.
- Προστασία υπερέντασης: Ανάπτυξη και προσομοίωση μηχανισμών προστασίας από υπερένταση του συστήματος για να προστατευθεί από υπερβολική ροή ρεύματος που μπορεί να προκαλέσει βλάβη στα στοιχεία του συστήματος.
- Προστασία κατά της νησιδοποίησης: Μελέτη συστημάτων κατά της νησιδοποίησης για να αποτραπεί η συνεχής παροχή ισχύος από το φωτοβολταϊκό σύστημα στο δίκτυο κατά την διάρκεια διακοπών δικτύου, γεγονός που αποτελεί κίνδυνο για τους εργαζόμενους στο εθνικό δίκτυο.

Η επέκταση σε αυτούς τους τομείς μπορεί να συμβάλει στην πρακτική εφαρμογή και την εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο πλαίσιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της αειφορίας.

—Τέλος Κεφαλαίου—

Βιβλιογραφία

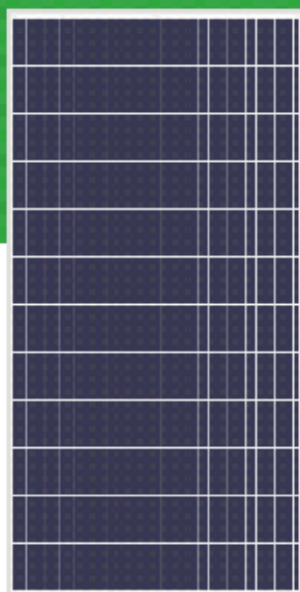
- [1] C.B.Honsberg and S.G.Bowden, “Photovoltaics Education Website” www.pveducation.org, 2019.
- [2] Solar Photovoltaic Cell Basics, Solar Energy Technologies Office, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy.
- [3] Photovoltaic (PV) Cell: Structure & Working Principle, electricala2z.com.
- [4] Adel Mellit, Soteris Kalogirou, Handbook of Artificial Intelligence Techniques in Photovoltaic Systems, Modeling, Control, Optimization, Forecasting and Fault Diagnosis 2022, σελίδες 1-41.
- [5] Josean Ramos-Hernanz, Jose Manuel Lopez-Guede, Ekaitz Zulueta, Unai Fernandez-Gamiz, Reverse Saturation Current Analysis in Photovoltaic Cell Models, Volume 12, 2017, σελίδες 231-237.
- [6] Fahad Rasool, M. Driberg, N. Badruddin, B. Singh, Mahinder Singh, Modeling of PV panels performance based on datasheet values for solar micro energy harvesting, 2016.
- [7] Haixin Wang, Jianxin Shen, Analysis of the Characteristics of Solar Cell Array Based on MATLAB/Simulink in Solar Unmanned Aerial Vehicle, 18 April 2018, σελίδες 21195 – 21201.
- [8] Yichao Zhang , Lakitha O. H. Wijeratne , Shawhin Talebi and David J. Lary, Machine Learning for Light Sensor Calibration, 2021.
- [9] Ύψος και αζιμούθιο ήλιου, emd Engineering consultants, Τετάρτη 2 Ιανουαρίου 2013.
- [10] Ι.Ε.Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, 2^η έκδοση, 2006.
- [11] Alin Argeseanu, Ewen Ritchie, Krisztina Leban, A New Solar Position Sensor Using Low Cost Photosensors Matrix for Tracking Systems, Issue 6, Volume 4, June 2009, σελίδες 189-198.

- [12] B. M. Hasaneen, Adel A. Elbaset Mohammed, Design and simulation of DC/DC boost converter, March 2008.
- [13] K. Ramash Kumar, Dr.S.Jeevananthan, Design of a Hybrid Posicast Control for a DC-DCBoost Converter Operated in Continuous Conduction Mode, 2011, σελίδες 240-248.
- [14] Sizing the Inductor of Buck Converter and Setting its Operation, electronicsbeliever.com.
- [15] Saad Motahhir, Aboubakr El Hammoumi, Abdelaziz El Ghzizal, The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm, Journal of Cleaner Production, Volume 246, 10 February 2020.
- [16] Hyeon-Seok Lee, Jae-Jung Yun, Advanced MPPT Algorithm for Distributed Photovoltaic Systems, Methods, Algorithms and Circuits for Photovoltaic Systems Diagnosis and Control, 2019.
- [17] Ahmed G. Abo-Khalil, Khairy Sayed, Ali Radwan, IbrahimI.A. El-Sharkawy, Analysis of the PV system sizing and economic feasibility study in a grid-connected PV system, Case Studies in Thermal Engineering Volume 45, May 2023.
- [18] Fatima Zahra Amatoul, Moulay Tahar Lamchich, Abdelkader Outzourhit, Design control of DC/AC converter for a grid connected PV systems with maximum power tracking using Matlab/Simulink, 2011.
- [19] Adel A. Elbaset, M. S. Hassan, Hamdi Ali, Performance analysis of grid-connected PV system, 2016.
- [20] Ashish Kr, Ashish Roy, Bakul Bapat, Chinmoy Bhattacharya, Shashikala Gangal, Design of Transmitter-Receiver for FM-CW Imaging Radar at L-band, 2013.
- [21] Adrian Timbus, Remus Teodorescu and Frede Blaabjerg, Marco Liserre, Synchronization Methods for Three Phase Distributed Power Generation Systems. An Overview and Evaluation, 2005, σελίδες 2474-2481.
- [22] Anita Gusai , S. N. Joshi K. G. Sharma , N. K. Gupta, Harmonic Analysis in PV Connected Power System, 2020.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α

AS-6P 325W~355W POLYCRYSTALLINE CRYSTALLINE CRYSTALLINE CRYSTALLINE MODULE DATASHEET



AS-6P

325W~355W

POLYCRYSTALLINE MODULE

ADVANCED PERFORMANCE & PROVEN ADVANTAGES

- High module conversion efficiency up to 18.30% through innovative five busbar cell technology.
- Low degradation and excellent performance under high temperature and low light conditions.
- Robust aluminum frame ensures the modules to withstand wind loads up to 3600Pa and snow loads up to 5400Pa.
- High reliability against extreme environmental conditions (passing salt mist, ammonia and hail tests).
- Potential induced degradation (PID) resistance.

CERTIFICATIONS

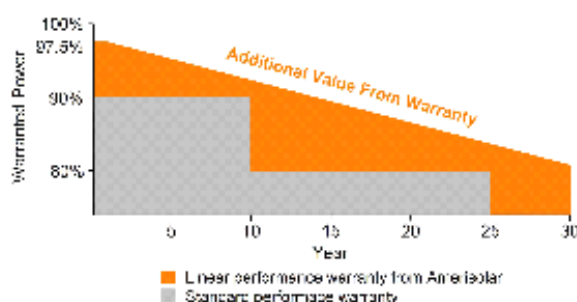
- IEC 61215, IEC 61730, UL 1703, IEC 62716, IEC 61701, IEC TS 62804, CE, CQC, ETL(USA), JET(Japan), J-PEC(Japan), KS(South Korea), BIS(India), MCS(UK), CEC(Australia), CSI Eligible(CA-USA), Israel Electric(Israel), InMetro(Brazil), TSE(Turkey)
- ISO 9001:2015: Quality management system
- ISO 14001:2015: Environmental management system
- ISO 45001:2018: Occupational health and safety management system



SPECIAL WARRANTY

- 20 years product warranty
- 30 years linear power output warranty

Passionately
committed to
delivering innovative
energy solution



ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC

Maximum Power (P_{max})	325W	330W	335W	340W	345W	350W	355W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	45.7V	45.9V	46.1V	46.3V	46.5V	46.7V	46.9V
Short Circuit Current (I_{sc})	9.28A	9.36A	9.44A	9.52A	9.60A	9.68A	9.76A
Voltage at Maximum Power (V_{mp})	37.1V	37.3V	37.5V	37.7V	37.9V	38.1V	38.3V
Current at Maximum Power (I_{mp})	8.77A	8.85A	8.94A	9.02A	9.11A	9.19A	9.27A
Module Efficiency (%)	16.75	17.01	17.26	17.52	17.78	18.04	18.30
Operating Temperature	-40°C to +85°C						
Maximum System Voltage	1000V DC/1500V DC						
Fire Resistance Rating	Type 1 (In accordance with UL 1703)/Class C (IEC 61730)						
Maximum Series Fuse Rating	15A						

STC: Irradiance 1000W/m², Cell temperature 25°C, AM1.5; Tolerance of P_{max} : ±3%; Measurement Tolerance: ±3%

ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT NOCT

Maximum Power (P_{max})	241W	244W	248W	252W	256W	259W	263W
Open Circuit Voltage (V_{oc})	42.0V	42.2V	42.4V	42.6V	42.8V	43.0V	43.2V
Short Circuit Current (I_{sc})	7.52A	7.58A	7.65A	7.71A	7.78A	7.84A	7.91A
Voltage at Maximum Power (V_{mp})	33.7V	33.9V	34.1V	34.3V	34.5V	34.7V	34.9V
Current at Maximum Power (I_{mp})	7.16A	7.20A	7.28A	7.35A	7.42A	7.47A	7.54A

NOCT: Irradiance 800W/m², Ambient temperature 20°C, Wind Speed 1 m/s

MECHANICAL CHARACTERISTICS

Cell type	Polycrystalline 6inch
Number of cells	72 (6x12)
Module dimensions	1956x992x35mm (77.01x39.06x1.38inches)
Weight	21kg (46.3lbs)
Front cover	3.2mm (0.13inches) tempered glass with AR coating
Frame	Anodized aluminum alloy
Junction box	IP67, 3 diodes
Cable	4mm ² (0.006inches ²), 1000mm (39.37inches)
Connector	MC4 or MC4 compatible

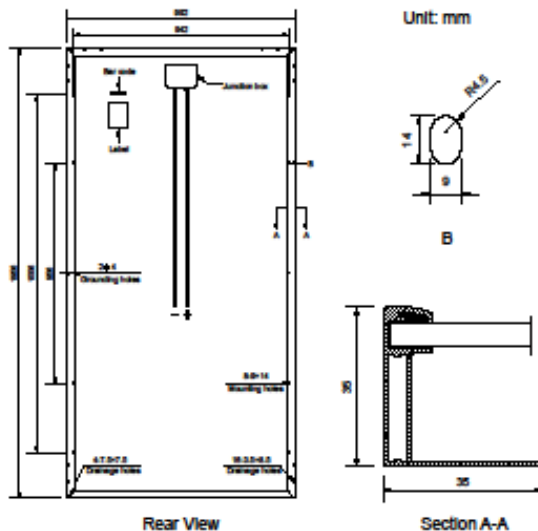
TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	45°C±2°C
Temperature Coefficients of P_{max}	-0.39%/°C
Temperature Coefficients of V_{oc}	-0.30%/°C
Temperature Coefficients of I_{sc}	0.05%/°C

PACKAGING

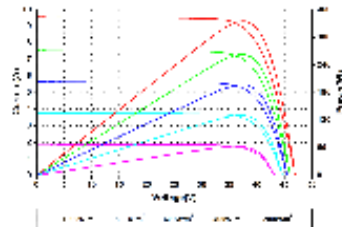
Standard packaging	31pcs/pallet
Module quantity per 20' container	310pcs
Module quantity per 40' container	744pcs(GP)/816pcs(HQ)

ENGINEERING DRAWINGS

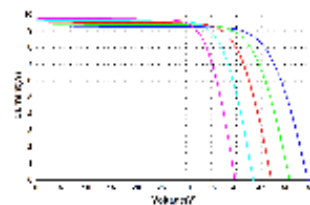


Specifications in this datasheet are subject to change without prior notice.

IV CURVES



Current-Voltage and Power-Voltage Curves at Different Irradiances



Current-Voltage Curves at Different Temperatures

Amerisolar and Amerisolar logo denoted with ® are registered trademarks of Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd.

Παράρτημα Β

SUNNY TRIPOWER 20000TL DATASHEET

SUNNY TRIPOWER 15000TL / 20000TL / 25000TL



STP 15000TL-30 / STP 20000TL-30 / STP 25000TL-30



**Intelligent service with
SMA Smart Connected**



SMA ShadeFix
FITTING LEVEL OPTIMIZATION

Efficient • Maximum efficiency of 98.4% • Yield increase without installation effort due to integrated shade management SMA ShadeFix	Safe • DC surge arrester (SPD type II) can be integrated	Flexible • DC input voltage of up to 1000 V • Multistring capability for optimum system design • Optional display	Innovative • Cutting-edge grid management functions with Integrated Plant Control • Reactive power available 24/7 (Q on Demand 24/7)
---	--	---	---

SUNNY TRIPOWER 15000TL / 20000TL / 25000TL

The versatile specialist for large-scale commercial plants and solar power plants

The Sunny Tripower is the ideal inverter for large-scale commercial and industrial plants. Not only does it deliver extraordinary high yields with an efficiency of 98.4%, but it also offers enormous design flexibility and compatibility with many PV modules thanks to its multistring capabilities and wide input voltage range.

The future is now: the Sunny Tripower comes with cutting-edge grid management functions such as Integrated Plant Control, which allows the inverter to regulate reactive power at the point of common coupling. Separate controllers are no longer needed, lowering system costs. Another new feature—reactive power provision on demand (Q on Demand 24/7).

SMA SMART CONNECTED

The integrated service for ease and comfort

SMA Smart Connected* is the free monitoring of the inverter via the SMA Sunny Portal. If there is an inverter fault, SMA proactively informs the PV system operator and the installer. This saves valuable working time and costs.

With SMA Smart Connected, the installer benefits from rapid diagnoses by SMA. They can thus quickly rectify the fault and score points with the customer thanks to the attraction of additional services.



ACTIVATION OF SMA SMART CONNECTED

During registration of the system in the Sunny Portal, the installer activates SMA Smart Connected and benefits from the automatic inverter monitoring by SMA.



AUTOMATIC INVERTER MONITORING

SMA takes on the job of inverter monitoring with SMA Smart Connected. SMA automatically checks the individual inverters for anomalies around the clock during operation. Every customer thus benefits from SMA's long years of experience.



PROACTIVE COMMUNICATION IN THE EVENT OF FAULTS

After a fault has been diagnosed and analyzed, SMA informs the installer and end customer immediately by e-mail. Everyone is thus optimally prepared for the troubleshooting. This minimizes the downtime and saves time and money. The regular power reports also provide valuable information about the overall system.



REPLACEMENT SERVICE

If a replacement device is necessary, SMA automatically supplies a new inverter within one to three days of the fault diagnosis. The installer can contact the PV system operator of their own accord and replace the inverter.

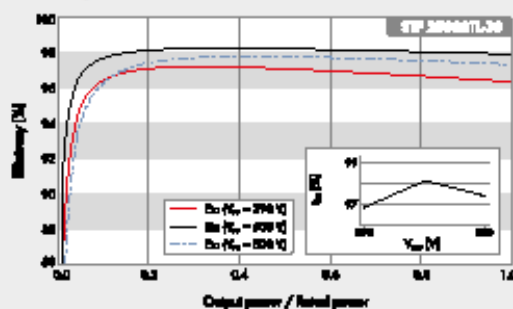


PERFORMANCE SERVICE

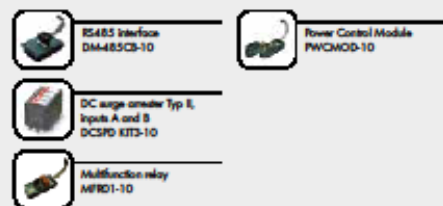
The PV system operator can claim compensation from SMA if the replacement inverter cannot be delivered within three days.

* Details: see document "Description of Services – SMA SMART CONNECTED"

Efficiency Curve



Accessory



• Standard features ○ Optional features – Not available
Data at nominal conditions
Status: 02/2021

Technical Data

Input (DC)	
Max. generator power	27000 W _p
DC rated power	15330 W
Max. input voltage	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	240 V to 800 V / 600 V
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	33 A / 33 A
Max. DC short-circuit current input A / input B	43 A / 43 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A-3; B-3
Output (AC)	
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	15000 W
Max. AC apparent power	15000 VA
AC nominal voltage	3 / N / PE; 220 V / 380 V 3 / N / PE; 230 V / 400 V 3 / N / PE; 240 V / 415 V
AC voltage range	180 V to 280 V
AC grid frequency / range	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz 60 Hz / 54 Hz to 65 Hz
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V
Max. output current / Rated output current	29 A / 21.7 A
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor	1 / 0 overexcited to 0 underexcited
THD	≤ 3%
Feedin phases / connection phases	3 / 3
Efficiency	
Max. efficiency / European Efficiency	98.4% / 98.0%
Protective devices	
DC side disconnection device	•
Ground fault monitoring / grid monitoring	• / •
DC surge arrester (Type II) can be integrated	○
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated	• / • / –
All-pole sensitive residual-current monitoring unit	•
Protection class (according to IEC 62109-1) / overvoltage category (according to IEC 62109-1)	I / AC; II; DC: II
General data	
Dimensions (W / H / D)	661 / 682 / 264 mm (26.0 / 26.9 / 10.4 inch)
Weight	61 kg (134.48 lb)
Operating temperature range	-25 °C to +60 °C (-13 °F to +140 °F)
Noise emission (typical)	51 dB(A)
Selfconsumption (at night)	1 W
Topology / cooling concept	Transformerless / Optical
Degree of protection (as per IEC 60529)	IP65
Climatic category (according to IEC 60721-3-4)	4K4H
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	100%
Features / function / Accessories	
DC connection / AC connection	SUNCLIX / spring-cage terminal
Display	○
Interface: RS485, Speedwire/Webconnected	○ / •
Data interface: SMA Modbus / SunSpec Modbus	• / •
Multifunction relay / Power Control Module	○ / ○
Shade management SMA ShadeFix / Integrated Plant Control / Q on Demand 24/7	• / • / •
Off-Grid capable / SMA Fuel Save Controller compatible	• / •
Guarantee: 5 / 10 / 15 / 20 years	• / ○ / ○ / ○
Certificates and permits (more available on request)	
* Does not apply to all national appendices of EN 50438	

Sunny Tripower 15000TL	Sunny Tripower 20000TL	Sunny Tripower 25000TL
27000 W _p	36000 W _p	45000 W _p
15330 W	20440 W	25550 W
1000 V	1000 V	1000 V
240 V to 800 V / 600 V	320 V to 800 V / 600 V	390 V to 800 V / 600 V
150 V / 188 V	150 V / 188 V	150 V / 188 V
33 A / 33 A	33 A / 33 A	33 A / 33 A
43 A / 43 A	43 A / 43 A	43 A / 43 A
2 / A-3; B-3	2 / A-3; B-3	2 / A-3; B-3
15000 W	20000 W	25000 W
15000 VA	20000 VA	25000 VA
	3 / N / PE; 220 V / 380 V 3 / N / PE; 230 V / 400 V 3 / N / PE; 240 V / 415 V	
	180 V to 280 V	
	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz 60 Hz / 54 Hz to 65 Hz	
	50 Hz / 230 V	
29 A / 21.7 A	29 A / 29 A	36.2 A / 36.2 A
	1 / 0 overexcited to 0 underexcited	
	≤ 3%	
	3 / 3	
98.4% / 98.0%	98.4% / 98.0%	98.3% / 98.1%
	•	
	• / •	
	○	
	• / • / –	
	•	
	I / AC; II; DC: II	
	661 / 682 / 264 mm (26.0 / 26.9 / 10.4 inch)	
	61 kg (134.48 lb)	
	-25 °C to +60 °C (-13 °F to +140 °F)	
	51 dB(A)	
	1 W	
	Transformerless / Optical	
	IP65	
	4K4H	
	100%	
	SUNCLIX / spring-cage terminal	
	○	
	○ / •	
	• / •	
	○ / ○	
	• / • / •	
	• / •	
	• / ○ / ○ / ○	
	AS 4777, BDEW 2008, C10/11, CE, CEI 0-16, CEI 0-21, CHS 15382, CHS 15426, DEWA 2.0, DK1, DK2, EN 50549-1, EN 50549-2, G99/1, EN 50438:2013*, IEC 60068-3-4, IEC 61727, IEC 62109-1/2, IEC 62114, IS 16221-1/2, IS 16149, MEA 2013, NBR 16149, NBN EN 50438, NRS 097-3-1, RIA 2013, NTS, PPC, RD 1696/413, RD 641/2007, Res. n°7/2013, IEC-compliant, SM777, TIG generator, UTE C15-713-1, VDE 0126-1-1, VDE-ARN 4105, VDE-ARN 4110, VDE 2014	
STP 15000TL-30	STP 20000TL-30	STP 25000TL-30