



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Κατανεμημένη ανίχνευση σημείου
μέγιστης ισχύος φωτοβολταϊκής
συστοιχίας με μετατροπέα DC/AC
πολλαπλών επιπέδων**

Ανδρέας Καρόγιαννης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
Καθηγητής Κουτρούλης Ευύχιος (Επιβλέπων)
Αναπληρωτής Καθηγητής Γυφτάκης Κωνσταντίνος
Επίκουρος Καθηγητής Πέππας Γεώργιος
Χανιά Μάιος 2025

Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, συνδεδεμένο σε πολυεπίπεδο μετατροπέα DC/AC και η κατανεμημένη ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος του.

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ευτύχιου Κουτρούλη, στον οποίο εκφράζω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου, τόσο για την πολύτιμη υποστήριξή του, όσο και για την καθοδήγηση που μου προσέφερε. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τους Καθηγητές Κωνσταντίνο Γυφτάκη και Γεώργιο Πέππα για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Περίληψη

Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει οδηγήσει σε σημαντικές προόδους στα φωτοβολταϊκά (PV) συστήματα, ιδιαίτερα όσον αφορά την ενσωμάτωση τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών μετατροπής ισχύος, οι πολυεπίπεδοι αντιστροφείς έχουν αποκτήσει σημαντική σημασία, λόγω της ικανότητας τους να βελτιώνουν την ποιότητα της ισχύος, να μειώνουν την αρμονική παραμόρφωση και να αυξάνουν τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός πολυεπίπεδου αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, ο οποίος τροφοδοτείται από ανεξάρτητες φωτοβολταϊκές συστοιχίες, κάθε μια με τον δικό της, αποκεντρωμένο αλγόριθμο MPPT, σε σύγκριση με τα ευρέως προτεινόμενα συστήματα, που αυτός ο υπολογισμός είναι ενιαίος. Ο κύριος στόχος της μελέτης αυτής είναι η ανάλυση της απόδοσης του πολυεπίπεδου αντιστροφέα και η ορθή υπολογιστική προσέγγιση του MPPT για κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία ξεχωριστά, υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, εστιάζοντας κυρίως στις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας.

Αρχικά, αναλύονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες, τόσο των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όσο και των αντίστοιχων συστοιχιών, και εξετάζεται η λειτουργία τους υπό διαφορετικά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, μελετώνται και προτείνονται δύο αλγόριθμοι MPPT για το σύστημα, με ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση της τεχνικής ‘power feed-forward’, ώστε να επιταχυνθεί ο υπολογισμός του MPPT. Αφού διασφαλιστεί ότι το σύστημα λειτουργεί στη μέγιστη δυνατή ισχύ του, αξιολογούνται τα γραφήματα για την επαλήθευση της αποδοτικότητάς του. Τέλος, εξετάζεται η συνολική απόδοση τόσο του συστήματος, όσο και των αλγορίθμων MPPT υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας, προκειμένου να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητά τους.

Abstract

The increasing global demand for renewable energy has driven significant advancements in photovoltaic (PV) systems, particularly in their integration with the electrical grid. Among various power conversion technologies, multilevel inverters have gained prominence due to their ability to improve power quality, reduce harmonic distortion, and enhance overall system efficiency.

This thesis focuses on the modeling and simulation of a multilevel full-bridge inverter powered by independent PV arrays, each with its own, distributed Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm, in comparison to widely proposed systems, which have a single unit for that calculation. The primary objective of this study is to analyze the performance of the inverter, and ensure the accurate calculation of MPPT for each array individually under different operating conditions, particularly in response to variations in solar irradiance and temperature.

First, the characteristic curves of both the PV panels and arrays are analyzed, to examine their behavior under different solar irradiance levels. Next, two MPPT algorithms are studied and proposed for the system, with a strong emphasis on the power feed-forward technique, to accelerate MPPT calculations. Once the system is confirmed to be operating at its maximum possible power, key performance graphs are evaluated, to verify its efficiency. Finally, both the overall system and the MPPT algorithms are assessed under varying irradiance conditions, to determine their effectiveness and their correctness.

Πίνακας Περιεχομένων

1.Εισαγωγή.....	8
1.1 Η σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην σύγχρονη ενεργειακή κατανάλωση	8
1.2 Η ηλιακή ενέργεια στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	10
1.3 Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	12
1.4 Δομή της διπλωματικής διατριβής	15
2.Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	17
2.1 Η ιστορία του φωτοβολταϊκού στοιχείου και η λειτουργία του	17
2.2 Μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού στοιχείου	18
2.3.1 Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) και παράγοντες επίδρασης	20
2.3.2 Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) υπό την επίδραση μερικής σκίασης	23
2.4.1 Μέθοδος ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking)	24
2.4.2 Αλγόριθμοι ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).....	26
2.4.2.1 Perturb & Observe.....	26
2.4.2.2 Incremental Conductance	28
2.5 Διάταξη των φωτοβολταϊκών συστοιχιών του συστήματος και επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας.....	29
2.6 Φωτοβολταϊκός αντιστροφέας DC-AC	32
2.7 Τεχνική ‘power feed-forward’ (PFF)	38
2.8 Δομική μονάδα συγχρονισμού φάσης (PLL)	40
2.9 Μονάδα ελέγχου ρεύματος δικτύου	43
2.10 Έλεγχος τάσης εξόδου αντιστροφέα DC-AC με την τεχνική διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)	46
2.11 Σχεδιασμός χαμηλοπερατού φίλτρου LCL για τη σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο.	49
3.Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκού συστήματος στο δίκτυο σε περιβάλλον Simulink.....	53
3.1 Μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών	53
3.2 Μοντελοποίηση των αντιστροφέων DC-AC	54
3.3 Υλοποίηση ελέγχου του φωτοβολταϊκού συστήματος.....	56
3.3.1 Η μονάδα εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) και ο έλεγχος λειτουργίας της	59

3.3.2 Η δομική μονάδα του συγχρονισμού φάσης (PLL).....	61
3.3.3 Υλοποίηση του φίλτρου LCL στο Simulink.....	63
3.3.4 Η δομική μονάδα power feed-forward (PFF).....	67
3.3.5 Η δομική μονάδα ελέγχου του ρεύματος (PR)	68
4.Αποτελέσματα.....	72
4.1 1° Σενάριο Λειτουργίας.....	73
4.2 2° Σενάριο Λειτουργίας.....	79
4.3 3° Σενάριο Λειτουργίας.....	90
5.Συμπεράσματα....,	98
6.Βιβλιογραφία.....	101

Κατάλογος Συμβόλων

- Τάση ανοικτοκύκλωσης (V_{oc})
- Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})
- Σημείο βέλτιστης τάσης λειτουργίας (V_{mpp})
- Σημείο μέγιστη ισχύος (Maximum Power Point – MPP)
- Μέγιστη ισχύς Φωτοβολταϊκού (P_{mpp})
- Ανίχνευση σημείου μέγιστου ισχύος (MPPT)
- Σήμα τάσης αναφοράς (V_{ref})
- Σήμα κύκλου λειτουργίας (Duty Cycle)
- Συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD)
- Αλγόριθμος incremental conductance (INC)
- Αλγόριθμος perturb and observe (P&O)
- Τοπικό σημείο μέγιστης ισχύος (LMPP)
- Ολικό σημείο μέγιστης ισχύος (GMPP)
- Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)
- Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM)
- Μονάδα 'power feed-forward' (PFF)

1. Εισαγωγή

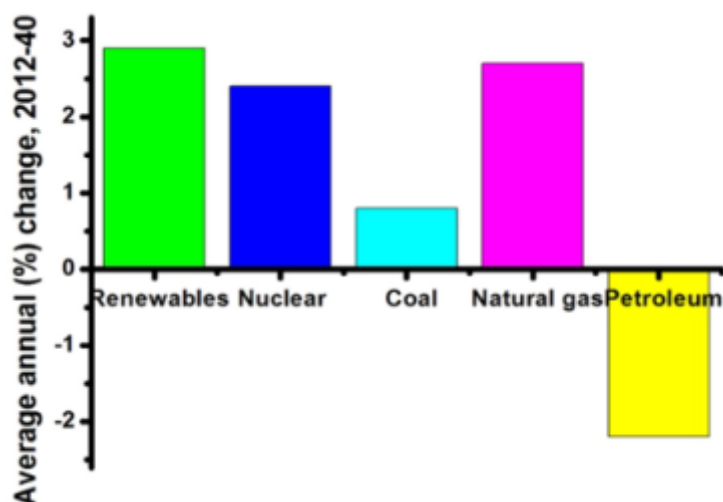
1.1 Η σημασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην σύγχρονη ενεργειακή κατανάλωση

Η διαθεσιμότητα, η εξέλιξη, καθώς και η ποσότητα της ενέργειας, έχει παίζει τεράστιο ρόλο στην τεχνολογική, πολιτισμική και οικονομική ανάπτυξη ολόκληρου του πλανήτη. Το ενεργειακό σύστημα έχει αλλάξει δραματικά από την βιομηχανική επανάσταση, και καθημερινά εξελίσσεται σταθερά λόγω της αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης, της τεχνολογικής προόδου και της πληθυσμιακής έκρηξης. Η ετήσια αύξηση της ενεργειακής ζήτησης εκτιμάται σε 3,4%, και κάθε χρόνο αυξάνεται.

Το παραπάνω στατιστικό δεδομένο, σε συνδυασμό με τις τεχνολογικές, τις οικονομικές εξελίξεις αλλά και με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται από την τρομακτική αύξηση της κατανάλωσης των ορυκτών πόρων (όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου), καθιστούν αναγκαία τη στροφή προς αξιόπιστες, οικονομικά αποδοτικές και βιώσιμες πηγές ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και σε χώρες με μεγάλα ποσοστά χρήσης ορυκτών πόρων όπως η Αμερική και η Ρωσία, υπάρχει μεγάλη επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Επομένως, έχει δημιουργηθεί μια κοινή ενεργειακή πολιτική με σκοπό την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), η οποία περιλαμβάνει την αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαδραματίζουν βασικό ρόλο σε αυτήν την αλλαγή, καθώς το ποσοστό τους στην τελική κατανάλωση έχει αυξηθεί από 9% το 2005 σε 17% σήμερα, με τον στόχο για το 2026 να έχει τεθεί στο 25%. Για το 2030, η Ε.Ε. επιδιώκει τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 32,5% και την αύξηση του ποσοστού των ανανεώσιμων πηγών στο 32% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης.



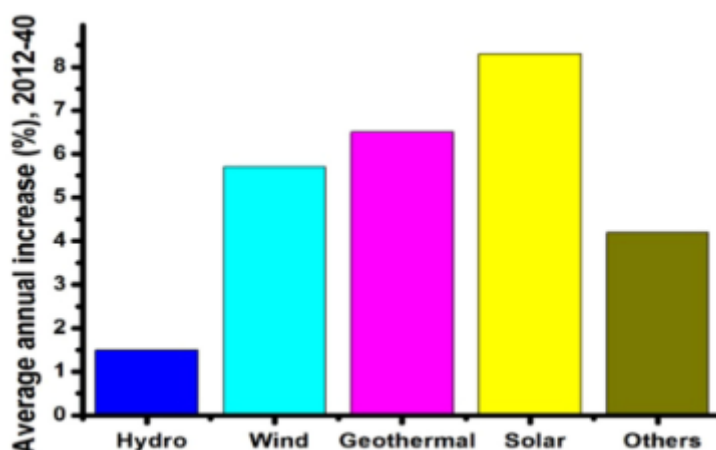
Σχήμα 1.1 Η ετήσια ποσοστιαία αλλαγή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικές ενεργειακές πηγές [28].

Όλη αυτή η στροφή προς αυτούς τους τύπους ενέργειας, έχει ήδη βοηθήσει στην μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, και αν και εφόσον επιτευχθούν τα νούμερα που έχουν τεθεί ως στόχοι, θα έχει υπερβολικά θετικό απόηχο στο περιβαλλοντικό κομμάτι. Εκτός του περιβαλλοντικού κομματιού, θα υπάρξει και σημαντική οικονομική εξέλιξη, καθώς οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι άφθονες και διαθέσιμες για αξιοποίηση από όλους.

1.2 Η ηλιακή ενέργεια στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί βασικό παράγοντα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, και η Ελλάδα είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της δυναμικής, με σημαντικά ενεργειακά μεγέθη. Το 2022, η συνολική κατανάλωση ενέργειας στην χώρα έφτασε τους 18,5 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου (ΤΙΠ), με την ηλεκτρική ενέργεια να καλύπτει το 35% της κατανάλωσης. Αυτό επιβεβαιώνει την κρίσιμη σημασία της ηλεκτρικής ενέργειας στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας. Τα τελευταία χρόνια, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) κερδίζουν συνεχώς έδαφος, συμβάλλοντας στο 43% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Το ποσοστό αυτό όχι μόνο ξεπερνά τον μέσο όρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης του 41%, αλλά αντανάκλα επίσης τη δέσμευση της Ελλάδας για μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

Μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων επιλογών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια έχει κερδίσει σημαντική προσοχή ως μια ιδιαίτερα υποσχόμενη λύση στη συνεχιζόμενη ενεργειακή κρίση. Ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια με ρυθμό 3.8×10^{23} kW, με 1.8×10^{14} kW να φτάνουν στην επιφάνεια της Γης. Αυτός ο τεράστιος ενεργειακός πόρος προσφέρει μια απaráμιλλη ευκαιρία για χώρες να αξιοποιήσουν αποτελεσματικά την ηλιακή ενέργεια. Έρευνες δείχνουν ότι η ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να καλύψει αποτελεσματικά ένα σημαντικό μέρος των αναγκών της οποιασδήποτε χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 1.2 Η ετήσια ποσοστιαία αύξηση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικές ενεργειακές πηγές με κυρίαρχη την ηλιακή ενέργεια [28].

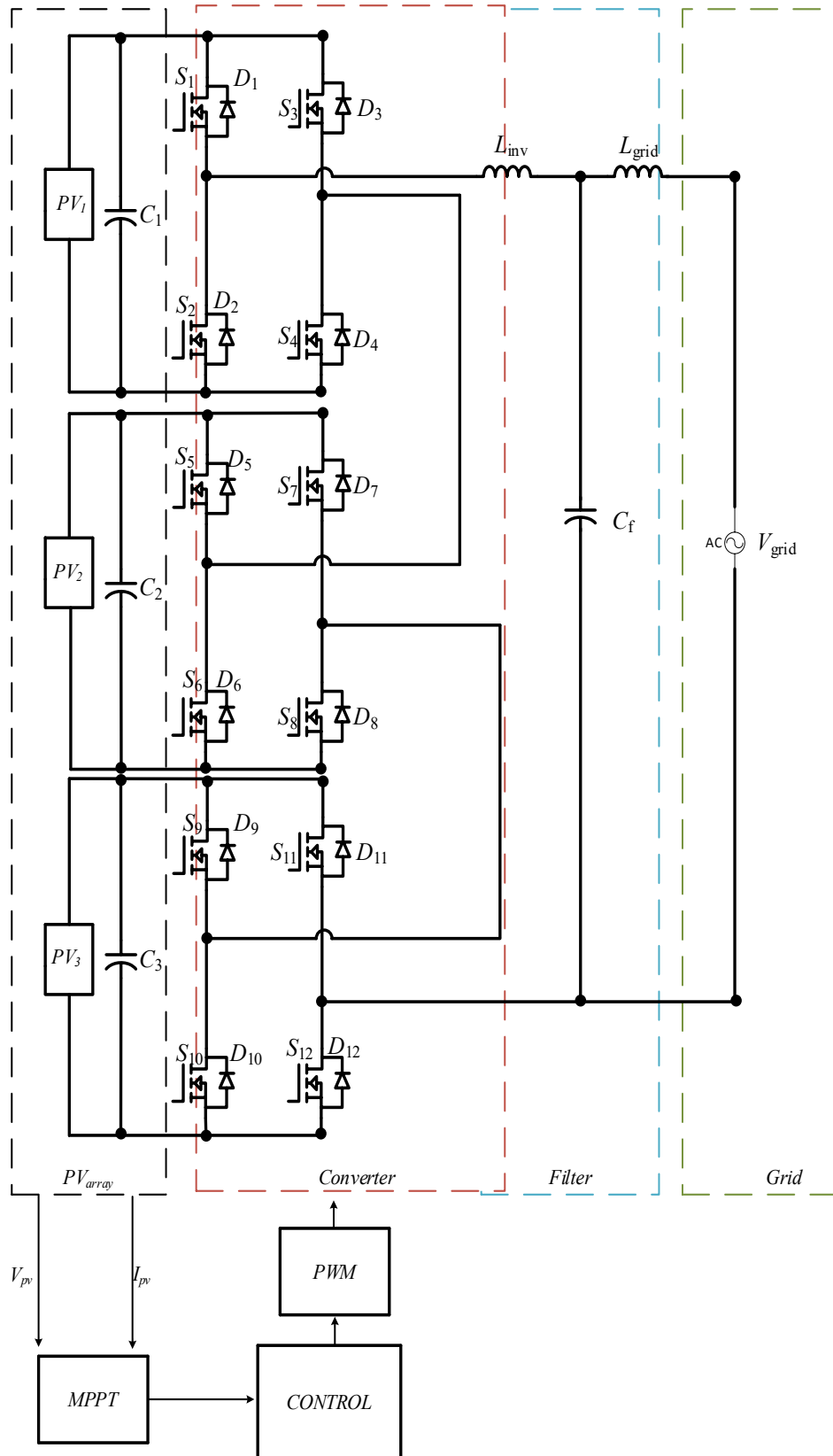
Σε ό,τι αφορά την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, οι ηλιακοί συλλέκτες αποτελούν έναν από τους πιο διαδεδομένους και αποδοτικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως τοποθετούνται στις στέγες ή σε υπαίθριους χώρους, όπου συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες: την κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας και την έντασή της. Με τις τεχνολογικές εξελίξεις της εποχής μας όμως, έχουν ήδη φτάσει σε ένα σημείο τα φωτοβολταϊκά συστήματα να μην επηρεάζονται τόσο από αυτές τις συνθήκες και να παρέχουν την μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορούν.

1.3 Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και του τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, έχει συμβάλει σημαντικά στην πρόοδο των φωτοβολταϊκών συστημάτων, οδηγώντας στην ανάπτυξη πολλαπλών τοπολογιών.

Συχνά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν έναν μετατροπέα συνεχούς ρεύματος (DC-DC) πριν από τον γενικό αντιστροφέα, ενώ η ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) πραγματοποιείται συνήθως από μία κεντρική μονάδα. Στόχος της παρούσας διπλωματικής διατριβής ήταν η μελέτη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο δεν θα απαιτούσε χρήση μετατροπέα DC-DC, ενώ παράλληλα ο υπολογισμός του σημείου μέγιστης ισχύος θα πραγματοποιούνταν ξεχωριστά για κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία. Μια τέτοια τοπολογία θα είχε ως αποτέλεσμα τον αποδοτικότερο υπολογισμό του MPPT, ανεξάρτητα από εξωτερικές συνθήκες όπως η ακτινοβολία και η θερμοκρασία, καθώς και την γενικότερη βελτίωση απόδοσης ολόκληρου του συστήματος.

Το υπό μελέτη φωτοβολταϊκό σύστημα περιλαμβάνει επιμέρους υποσυστήματα με συγκεκριμένες τοπολογίες. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται μια συνοπτική απεικόνιση του συστήματος που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 1.3 Η συνολική τοπολογία του φωτοβολταϊκού συστήματος που μελετήθηκε.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα που διασυνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο αποτελείται από διάφορα βασικά μέρη, καθένα από τα οποία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία μετατροπής και διοχέτευσης της παραγόμενης ενέργειας. Το συγκεκριμένο σύστημα περιλαμβάνει τρεις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, οι οποίες αποτελούνται από πολλαπλά φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά για την παραγωγή συνεχούς τάσης (DC).

Η έξοδος κάθε συστοιχίας οδηγείται σε έναν πυκνωτή ενδιάμεσης ζεύξης, ο οποίος εξομαλύνει την τάση και σταθεροποιεί την τροφοδοσία του κάθε αντιστροφέα του συστήματος. Επίσης, υπάρχει ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο υπολογίζει το σημείο μέγιστης ισχύος (MPPT), διασφαλίζοντας ότι κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί στη βέλτιστη δυνατή ισχύ, ανεξαρτήτως ηλιακής ακτινοβολίας. Στη συνέχεια, οι τρεις γέφυρες συνδέονται μεταξύ τους, σχηματίζοντας έναν πολυεπίπεδο αντιστροφέα επτά επιπέδων.

Ο αντιστροφέας μετατρέπει τη συνεχή τάση (DC) σε εναλλασσόμενη (AC), ώστε να είναι συμβατή με το ηλεκτρικό δίκτυο. Χρησιμοποιεί διακόπτες ισχύος (MOSFETs) που λειτουργούν με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), δημιουργώντας μια τάση εξόδου χαμηλής αρμονικής παραμόρφωσης. Ωστόσο, η διαμόρφωση αυτή εισάγει αρμονικές που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του ρεύματος. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ένα φίλτρο LCL πριν την διοχέτευση ενέργειας στο δίκτυο, το οποίο αποτελείται από δύο πηνία και έναν πυκνωτή, μειώνοντας τις αρμονικές και διασφαλίζοντας ότι το ρεύμα που εγχέεται είναι συμβατό με τις απαιτήσεις του δικτύου.

1.4 Δομή της διπλωματικής διατριβής

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια συνολική παρουσίαση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, με έμφαση στη λειτουργία τους υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Εξετάζεται η απόδοσή τους υπό την επίδραση μερικής σκίασης και αναλύονται οι επιπτώσεις της στη συνολική παραγωγή ενέργειας. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία εντοπισμού του Σημείου Μέγιστης Ισχύος (MPPT) και παρουσιάζονται δύο εναλλακτικοί αλγόριθμοι για την επίτευξή του. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην εναλλακτική προσέγγιση για την αποφυγή της χρήσης κλασικής τοπολογίας μετατροπέα DC-DC, γνωστή ως power feed-forward, καθώς και στα πλεονεκτήματά της. Παρουσιάζεται επίσης το είδος του φίλτρου που χρησιμοποιείται πριν από τη σύνδεση με το δίκτυο και αιτιολογείται η επιλογή των παραμέτρων του. Τέλος, γίνεται αναφορά στην επιλογή του κατάλληλου αντιστροφέα για το σύστημα και περιγράφεται η τεχνική PLL (phase locked loop), η οποία χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό με το δίκτυο.

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η υλοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος στο περιβάλλον του Simulink. Παρουσιάζονται τα απαραίτητα διαγράμματα από το περιβάλλον του Simulink για την κατανόηση της λειτουργίας και τον τρόπο σχηματισμού κάθε δομικής μονάδας του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυματομορφές από τα τρία σενάρια λειτουργίας που επιλέχθηκαν, προκειμένου να επιβεβαιώσουν την λειτουργία κάθε μονάδας που υλοποιήθηκε στο Simulink, καθώς και την αποδοτική λειτουργία ολόκληρου του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ακόμη συγκρίνονται τα αποτελέσματα

μεταξύ τους και καταγράφονται οι χαρακτηριστικές διαφορές, ανάλογα με την μεταβολή των εξωτερικών συνθηκών ακτινοβολίας.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συνολικά συμπεράσματα της μελέτης.

2. Φωτοβολταϊκά συστήματα

2.1 Η ιστορία του φωτοβολταϊκού στοιχείου και η λειτουργία του

Από τα αρχαιότερα χρόνια ήταν γνωστή η σημασία της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν διάφορες αρχιτεκτονικές στα κτίρια τους, όπως καθρέφτες (μέσω αντανάκλασης) για την αξιοποίηση της. Το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε το 1767 από τον Ελβετό επιστήμονα Horace Benedict de Saussure, και ήταν ένα κουτί με μόνωση και τρία στρώματα γυαλιού. Η μεγάλη πρόοδος έγινε το 1839, που ορίστηκε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και ακολούθησε στη συνέχεια το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο το 1887, που οδήγησε σε πολλές ανακαλύψεις μετέπειτα εκείνη την εποχή (όπως ο ηλιακός θερμοσίφωνας). Το 1954 δημιουργήθηκε το πρώτο πρακτικό φωτοβολταϊκό στοιχείο και στην συνέχεια εξελίχθηκε ανάλογα με την τεχνολογική πρόοδο και την πάροδο του χρόνου, όπως είναι γνωστό σήμερα.

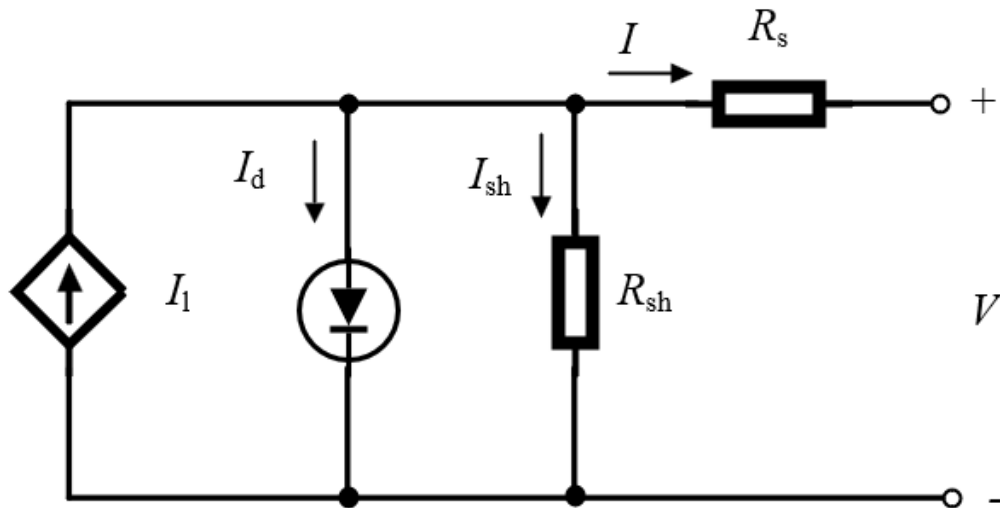
Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μια μη-μηχανική διάταξη που μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια, τα οποία έχουν συγκεκριμένα ποσά ενέργειας, που ανταποκρίνονται σε διαφορετικά μήκη κύματος στο φάσμα ακτινοβολίας. Το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ένας ημιαγωγός, με το πυρίτιο να αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή.

Όταν τα φωτόνια επομένως πέφτουν πάνω στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, είτε απορροφούνται από αυτό, είτε αντανακλώνται, είτε περνάνε μέσα από το στοιχείο. Τα φωτόνια που απορροφούνται είναι αυτά τα οποία παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια. Όταν απορροφηθεί αρκετά μεγάλη ποσότητα ακτινοβολίας από το στοιχείο, τα ηλεκτρόνια αποδεσμεύονται και κινούνται στην μπροστινή επιφάνεια του φωτοβολταϊκού συστήματος, δημιουργώντας ένα αρνητικό φορτίο και ανισορροπία μεταξύ των μπροστά και πίσω στοιχείων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό διαφοράς δυναμικού, δημιουργώντας ηλεκτρική ενέργεια.

Με την τεχνολογική εξέλιξη επομένως η χρήση των φωτοβολταϊκών έχει αυξηθεί δραματικά και πλέον χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλους τους τομείς για την μέγιστη αξιοποίηση της τόσο ωφέλιμης ηλιακής ενέργειας.

2.2 Μοντελοποίηση του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται από μια πηγή ρεύματος που συνδέεται με μια ιδανική δίοδο. Επιπλέον, δύο αντιστάσεις αντιπροσωπεύουν τις μη ιδανικές ιδιότητες του στοιχείου. Συγκεκριμένα, η μία αντίσταση (R_{sh}) σχετίζεται με τις απώλειες λόγω διαρροής ρεύματος, ενώ η άλλη (R_s) εκφράζει τις απώλειες που προκύπτουν από τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου. Το κύκλωμα που περιγράφεται παραπάνω παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει το κύκλωμα είναι η μαθηματική έκφραση:

$$I = I_{ph} - I_d \left(e^{\frac{V}{a}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

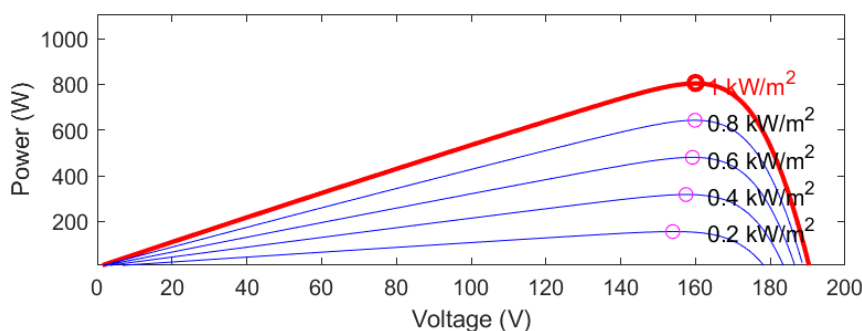
$$a = \frac{nkT_c}{q} \quad (2.2)$$

όπου:

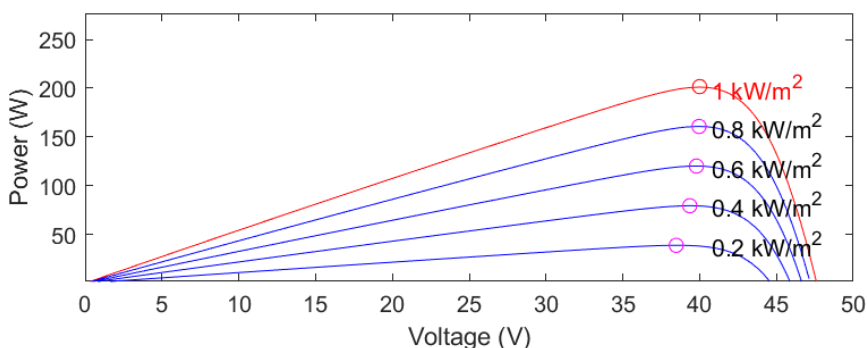
- I_{ph} – Η ένταση της πηγής ρεύματος (A).
- I_d – Το ρεύμα της διόδου (A).
- n – Συντελεστής της διόδου.
- k – Σταθερά Boltzmann (1.38065×10^{-23} J/K).
- q – Φορτίο ηλεκτρονίου (1.60218×10^{-19} C).
- T_c – Θερμοκρασία κυψέλης (K).

2.3.1 Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) και παράγοντες επίδρασης

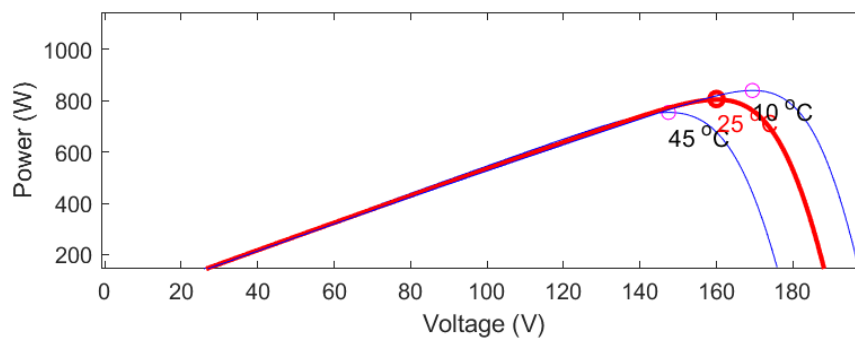
Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο χαρακτηρίζεται από μια τάση ανοικτοκύκλωσης (V_{oc}) και από ένα ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}). ἰτάσης (P-V). Εκτός από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία είναι ακόμη ένας παράγοντας που επηρεάζει τις χαρακτηριστικές καμπύλες του στοιχείου. Στα Σχήματα 2.2-2.7 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες για τα τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά, καθώς και για κάθε πλαίσιο ξεχωριστά, υπό την επίδραση διαφορετικής ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.



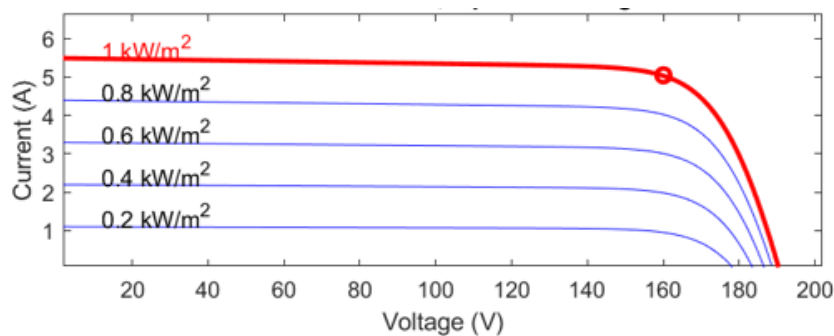
Σχήμα 2.2 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης (P-V) όλων των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών modules υπό διαφορετικές σταθερές τιμές ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.3 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης (P-V) ενός μεμονωμένου φωτοβολταϊκού module υπό διαφορετικές σταθερές τιμές ακτινοβολίας.

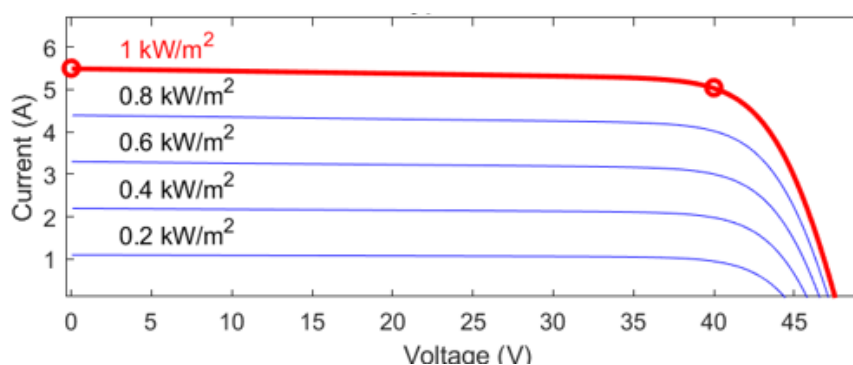


Σχήμα 2.4 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης ($P-V$) όλων των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών *modules* υπό διαφορετικές σταθερές τιμές θερμοκρασίας.

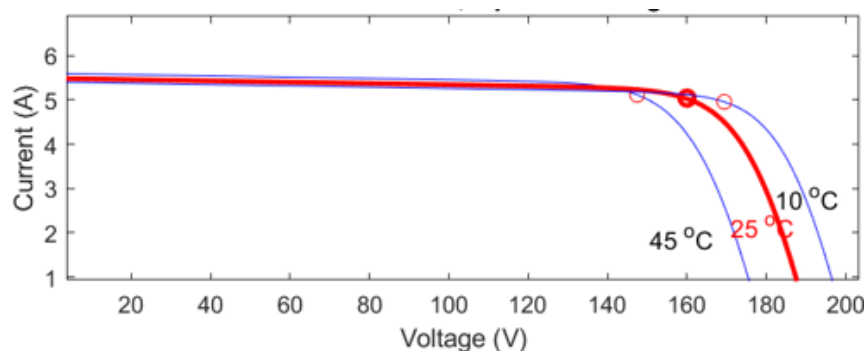


Σχήμα 2.5 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ($I-V$) όλων των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών *modules* υπό διαφορετικές σταθερές τιμές ακτινοβολίας.

;



Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ($I-V$) ενός μεμονωμένου φωτοβολταϊκού *module* υπό διαφορετικές σταθερές τιμές ακτινοβολίας.

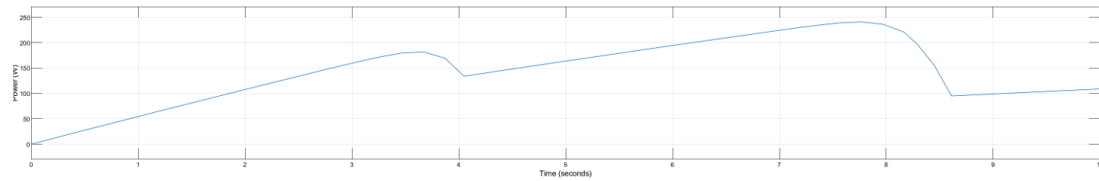


Σχήμα 2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ($I-V$) όλων των συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών modules υπό διαφορετικές σταθερές τιμές θερμοκρασίας.

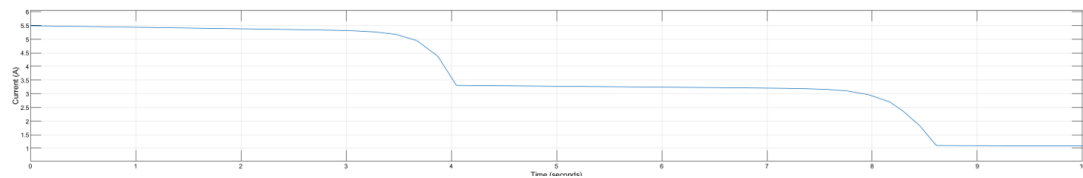
Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες παρατηρείται ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος επηρεάζεται άμεσα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και από την θερμοκρασία των κυψελών. Είναι εύκολα αντιληπτό, ότι υψηλότερη τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη φωτοβολταϊκή συστοιχία οδηγεί σε αυξανόμενη παραγόμενη ισχύ και υψηλότερο ρεύμα, ενώ αντίστοιχα χαμηλότερη θερμοκρασία συνεπάγεται με αυξημένη παραγόμενη ισχύ. Ακόμη διακρίνεται, ότι για κάθε διαφορετική τιμή ακτινοβολίας στην γραφική παράσταση υπάρχει ένα σημείο βέλτιστης τάσης λειτουργίας (V_{mpp}), στο οποίο επιτυγχάνεται το σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point-MPP). Σε αυτό το σημείο αποδίδεται η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράξει το φωτοβολταϊκό (P_{mpp}) και αποτελεί στόχο όλων των φωτοβολταϊκών συστημάτων να λειτουργούν κοντά σε αυτό το σημείο, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση.

2.3.2 Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης (I-V) και ισχύος-τάσης (P-V) υπό την επίδραση μερικής σκίασης

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, ο προσδιορισμός του σημείου μέγιστης ισχύος είναι σχετικά απλός. Ωστόσο, το σενάριο αυτό είναι ιδανικό και σπάνια συναντάται στην πράξη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μία ή περισσότερες φωτοβολταϊκές μονάδες της φωτοβολταϊκής συστοιχίας λαμβάνουν διαφορετική ποσότητα ακτινοβολίας, καθιστώντας δύσκολο τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος του συστήματος. Η σκίαση μπορεί να προκληθεί από δέντρα, κτήρια, ή οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο, με άμεσο αποτέλεσμα τον περιορισμό του ρεύματος και την μεταβολή των χαρακτηριστικών καμπύλων P-V και I-V όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.8 και 2.9. Αυτή η διαφοροποίηση εκδηλώνεται με την εμφάνιση τοπικών σημείων μέγιστης ισχύος (Local Maximum Power Point-LMMP), ανάλογα με την ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το μεγαλύτερο από αυτά τα σημεία ονομάζεται ολικό σημείο μέγιστης ισχύος (Global Maximum Power Point-GMMP). Η ύπαρξη πολλαπλών σημείων μέγιστης ισχύος αποτελεί πρόβλημα στο προσδιορισμό του συνολικού σημείου μέγιστης ισχύος από την δομική μονάδα MPPT, καθώς υπάρχει κίνδυνος ο αλγόριθμος να εγκλωβιστεί σε ένα τοπικό μέγιστο χωρίς να εντοπίσει το ολικό. Για αυτόν τον λόγο κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία πρέπει να διαθέτει ξεχωριστό υπολογισμό του σημείου μέγιστης ισχύος της.



Σχήμα 2.8 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος-τάσης ($P-V$) του φωτοβολταϊκού συστήματος σε συνθήκες μερικής σκίασης.



Σχήμα 2.9 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ($I-V$) του φωτοβολταϊκού συστήματος σε συνθήκες μερικής σκίασης.

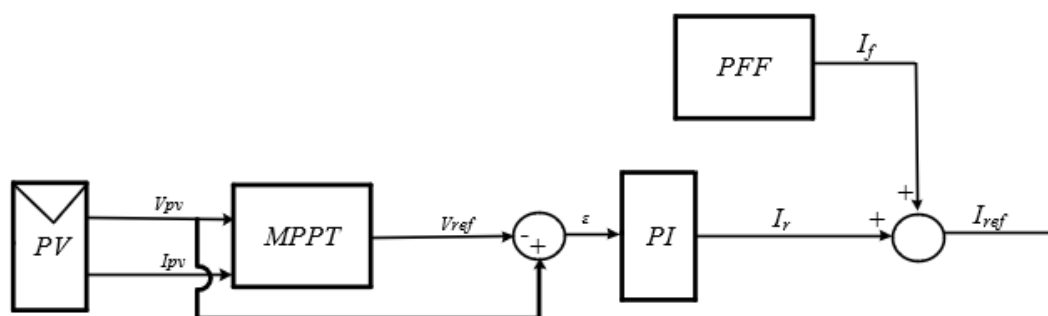
2.4.1 Μέθοδος ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking)

Η ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) αποτελεί θεμελιώδη τεχνική για την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Μέσω της τεχνικής αυτής, κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί στη μέγιστη δυνατή της ισχύ ανεξαρτήτως εξωτερικών συνθηκών.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος-τάσης ($P-V$) ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μεταβάλλονται δυναμικά ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αυτές οι μεταβολές προκαλούν μετατόπιση του σημείου μέγιστης ισχύος επί της καμπύλης, καθιστώντας απαραίτητη για την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής απόδοσης, την χρήση μιας μονάδας ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), η οποία προσαρμόζει συνεχώς το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας.

Η μονάδα MPPT λαμβάνει ως είσοδο τις στιγμιαίες τιμές του ρεύματος και της τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ρυθμίζει την έξοδο του μετατροπέα μέσω ενός σήματος. Αυτό το σήμα μπορεί να είναι είτε ένα σήμα τάσης αναφοράς (V_{ref}), είτε ένα σήμα κύκλου λειτουργίας (Duty Cycle) και τα δύο εκ των οποίων χρησιμοποιούνται στον συνολικό έλεγχο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.10.



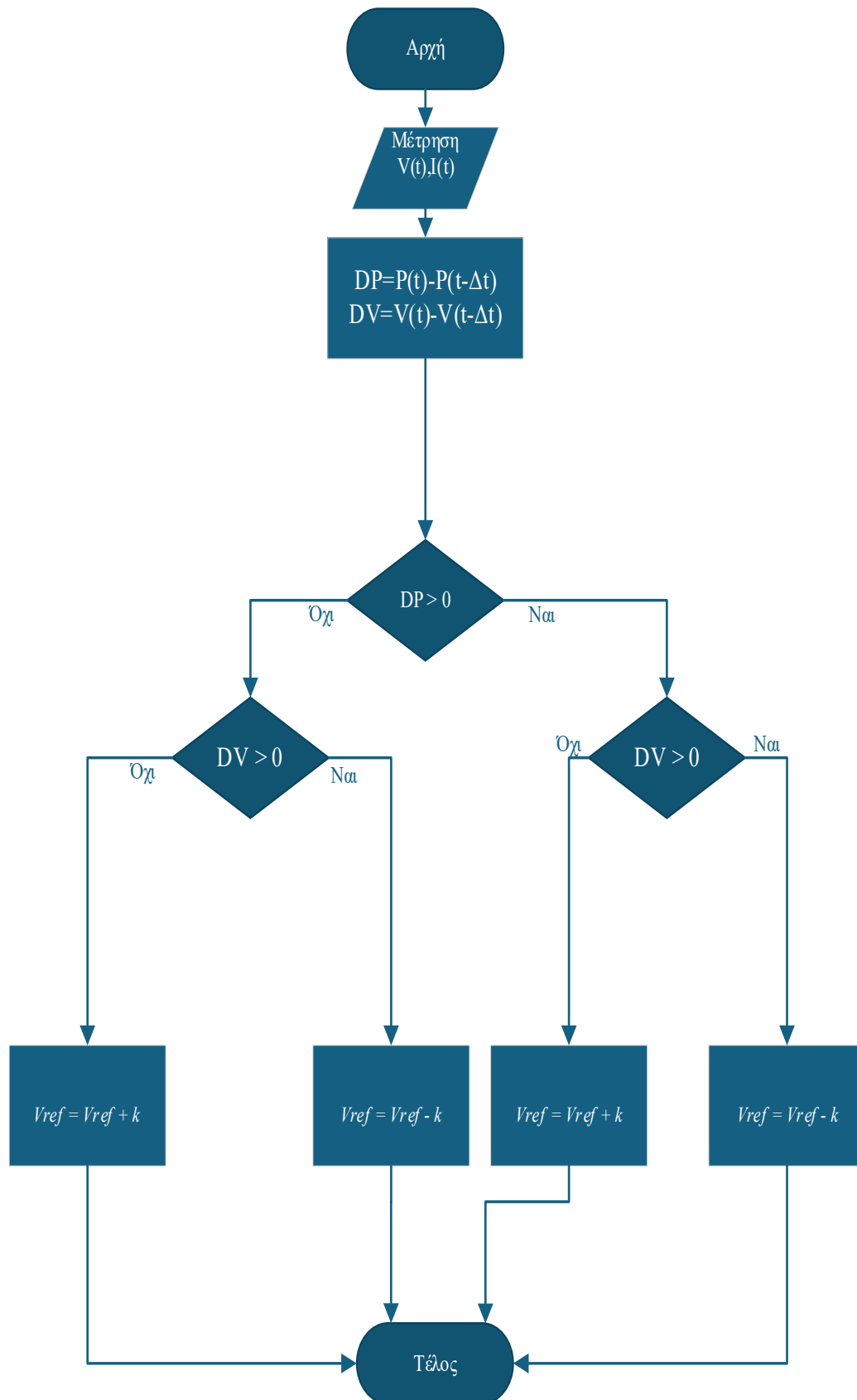
Σχήμα 2.10 Δομική απεικόνιση της μονάδας ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).

2.4.2 Αλγόριθμοι ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

1. Perturb & Observe:

Ο αλγόριθμος Perturb & Observe (P&O) είναι μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) σε φωτοβολταϊκά συστήματα, λόγω της ευκολίας υλοποίησης του και της αποδοτικότητας του σε σταθερές εξωτερικές συνθήκες. Ο αλγόριθμος αυτός αποτέλεσε την βάση για την ανάπτυξη των υπόλοιπων αλγορίθμων στην συνέχεια.

Η λειτουργία του βασίζεται στην μεταβολή της τάσης λειτουργίας (V_{pv}) της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και στην παρατήρηση της αντίστοιχης μεταβολής της παραγόμενης ισχύος (P_{pv}). Σε περίπτωση που η ισχύς αυξηθεί μετά από μια μεταβολή στην τάση, αυτό σημαίνει ότι το σύστημα πλησιάζει το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), οπότε η τάση πρέπει να συνεχίσει να αυξάνεται προς αυτή την κατεύθυνση. Αντίθετα, αν η ισχύς μειωθεί, τότε η μεταβολή στην τάση απομάκρυνε το σύστημα από το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), οπότε η τάση πρέπει να μειωθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση. Όταν το σύστημα φτάσει κοντά στο MPP, η τάση λειτουργίας αρχίζει να ταλαντώνεται γύρω από το V_{mpp} . Η ταλάντωση αυτή γύρω από την βέλτιστη τάση λειτουργίας οδηγεί σε μικρές απώλειες ισχύος. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου P&O που αναπαριστά γραφικά τον παραπάνω τρόπο λειτουργίας.

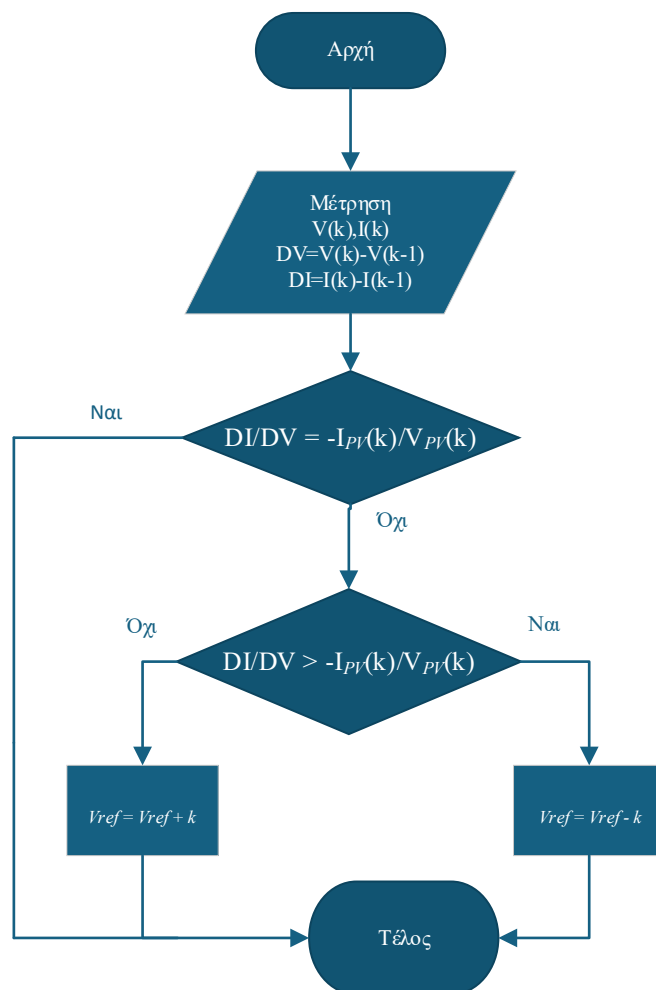


Σχήμα 2.11 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου perturb & observe.

2.Incremental Conductance:

Ο αλγόριθμος Incremental Conductance (INC) είναι μια προηγμένη μέθοδος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) για φωτοβολταϊκά συστήματα. Ο INC χρησιμοποιεί πληροφορίες τόσο για την παράγωγο $\frac{dI}{dV}$, όσο και για το πηλίκο $\frac{I}{V}$, ώστε να προσδιορίσει την κατεύθυνση προς το MPP με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ανάλογα με τη σχέση αυτών των δύο μεγεθών, μπορεί να προσδιοριστεί η θέση λειτουργίας του συστήματος σε σχέση με το MPP.

Πιο συγκεκριμένα όταν το σημείο βρίσκεται στο MPP, τότε ισχύει η σχέση $\frac{dI}{dV} = \frac{-I}{V}$. Σε εκείνο το σημείο δεν χρειάζεται να αλλάξει η τάση, καθώς το σύστημα λειτουργεί ήδη στο MPP. Αν το σύστημα λειτουργεί σε σημείο αριστερά του MPP, τότε ισχύει η σχέση $\frac{dI}{dV} > \frac{-I}{V}$ και για να φτάσει λοιπόν το σύστημα στην ιδανική κατάσταση, θα πρέπει να αυξηθεί η τάση. Τέλος, αν το σύστημα λειτουργεί σε σημείο αριστερά του MPP, τότε ισχύει $\frac{dI}{dV} < \frac{-I}{V}$ και άρα πρέπει να μειωθεί η τάση για να επιστρέψει το σύστημα στο σημείο λειτουργίας MPP. Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου INC που αναπαριστά γραφικά τον παραπάνω τρόπο λειτουργίας.

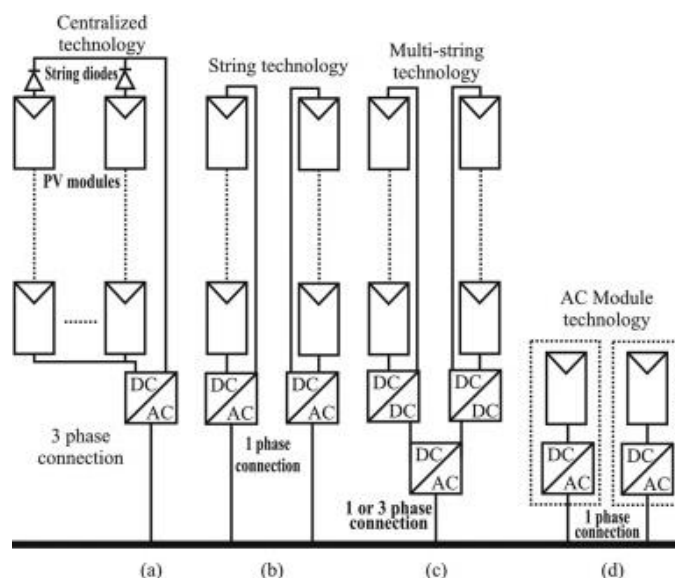


Σχήμα 2.12 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου *incremental conductance*.

2.5 Διάταξη των φωτοβολταϊκών συστοιχιών του συστήματος και επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας

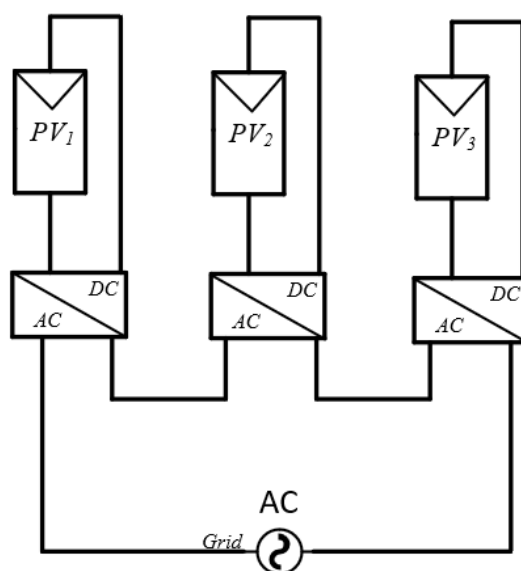
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να υλοποιηθούν με διάφορες τοπολογίες αντιστροφών, ανάλογα με τον τρόπο διασύνδεσης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών με το δίκτυο. Οι πιο διαδεδομένες τοπολογίες είναι η κεντρική τοπολογία, η τοπολογία σειρών, η τοπολογία πολυσειρών και η αρθρωτή τοπολογία. Η παρουσίαση των παραπάνω τοπολογιών απεικονίζεται στο Σχήμα 2.13.

- **Κεντρική Τοπολογία (Central Topology):** Όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται σε ένα κεντρικό αντιστροφέα DC-AC, διοχετεύοντας την ενέργεια στο δίκτυο.
- **Τοπολογία Σειρών (String Topology):** Κάθε σειρά από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέεται σε έναν ξεχωριστό αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει απευθείας την παραγόμενη (DC) ισχύ σε εναλλασσόμενη τάση (AC) για το δίκτυο.
- **Τοπολογία Πολυσειρών (Multi-String Topology):** Κάθε σειρά από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέεται στον δικό τους DC-DC μετατροπέα, που συνδέεται σε ένα κοινό DC-AC αντιστροφέα για την μετατροπή σε AC.
- **Τοπολογία Αρθρωτή (Cascaded Topology):** Κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία συνδέεται σε έναν DC/AC αντιστροφέα. Στην συνέχεια, οι έξοδοι αυτών των μετατροπέων συνδέονται διαδοχικά σε σειρά, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης και βελτίωση του ελέγχου της ισχύος, λόγω της δημιουργίας της απαιτούμενης τάσης στο δίκτυο.



Σχήμα 2.13 Διαφορετικοί τύποι τοπολογιών των φωτοβολταϊκών συστημάτων ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των αντίστοιχων φωτοβολταϊκών πλαισίων [27].

Από τις παραπάνω τοπολογίες, σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα στο οποίο χρησιμοποιείται μετατροπέας πολλαπλών επιπέδων, κρίνεται σκόπιμη η επιλογή της αρθρωτής τοπολογίας. Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η αρθρωτή τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος. Στις κλασικές τοπολογίες, η παραγόμενη DC τάση από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν είναι επαρκής για την απευθείας σύνδεση στο δίκτυο, απαιτώντας μετατροπείς ανύψωσης τάσης DC-DC. Αντίθετα, στην αρθρωτή τοπολογία (Cascaded topology), οι γέφυρες συνδέονται σε σειρά και σχηματίζουν την απαιτούμενη τάση χωρίς μετατροπέα ενίσχυσης DC-DC, προσφέροντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων τοπολογιών. Ακόμη, η δυνατότητα της αρθρωτής συνδεσμολογίας να υποστηρίζει ξεχωριστή μονάδα υπολογισμού για το σημείο μέγιστης ισχύος (MPPT) του κάθε αντιστροφέα, είναι τεράστιο προτέρημα. Το πλεονέκτημα αυτό έγκειται στο γεγονός, ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί στην μέγιστη δυνατή του ισχύ, ακόμη και υπό συνθήκες ανομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.14 Χρήση αρθρωτής τοπολογίας για την υλοποίηση του φωτοβολταϊκού συστήματος.

2.6 Φωτοβολταϊκός αντιστροφέας DC-AC

Το κύκλωμα που τροφοδοτείται από μια DC πηγή τάσης και τη μετατρέπει σε εναλλασσόμενη τάση, είναι ο αντιστροφέας DC/AC. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο, η DC τάση είναι αυτή που παράγεται από την φωτοβολταϊκή συστοιχία και ο αντιστροφέας τη μετατρέπει σε AC, για να τροφοδοτήσει το δίκτυο, σε καθορισμένη τάση και συχνότητα.

Ο αντιστροφέας αποτελεί το βασικό στοιχείο διασύνδεσης μεταξύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και του ηλεκτρικού δικτύου. Σε περιπτώσεις όπως αυτήν, που δεν γίνεται χρήση ενός DC-DC μετατροπέα για την ανύψωση της τάσης, ο ρόλος του αντιστροφέα καθίσταται κρίσιμος, καθώς μέσω του συστήματος ελέγχου εκτελείται το MPPT και επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός φάσης με το δίκτυο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιούνται τρεις μονοφασικοί αντιστροφείς πλήρους γέφυρας και με την σύνδεση τους σε σειρά, επιτυγχάνεται ο σχηματισμός του ζητούμενου πολυεπίπεδου αντιστροφέα. Το κύκλωμα ισχύος του μονοφασικού αντιστροφέα σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.15.

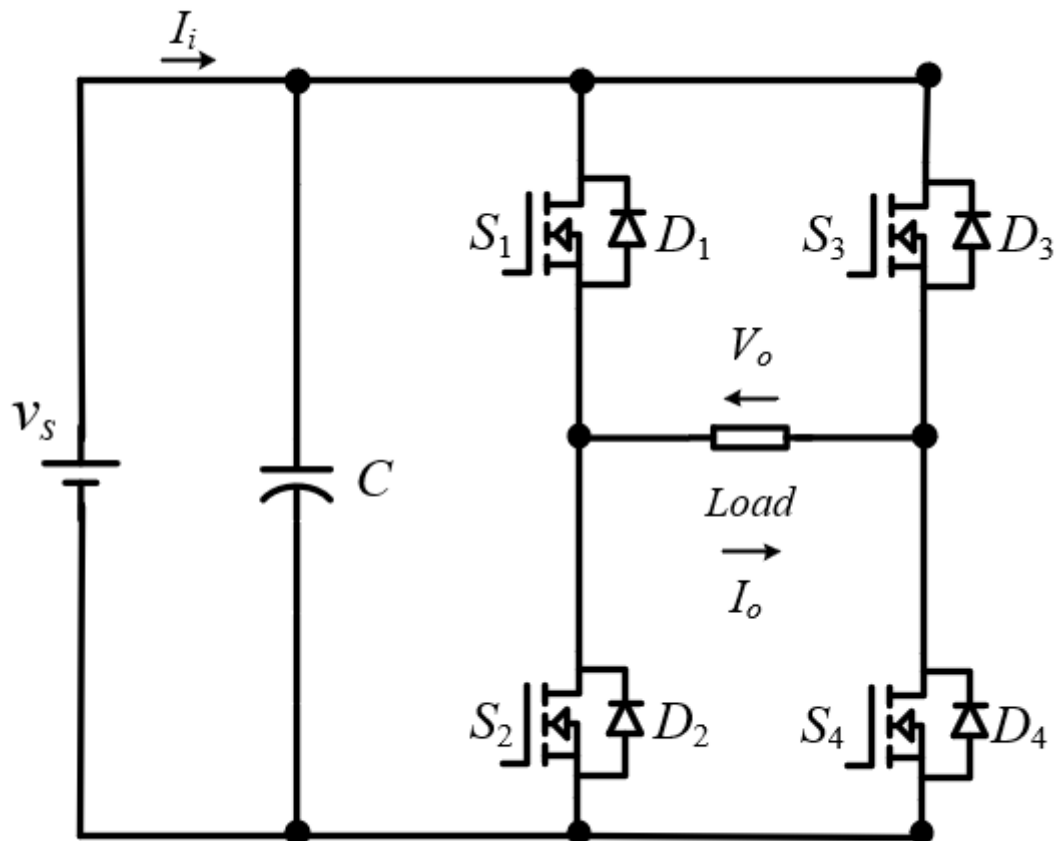
Η διακοπτική λειτουργία του μονοφασικού αντιστροφέα έχει ως εξής:

Έξοδος V_o	Ενεργοί διακόπτες
$+V_{dc}$	(S1, S4)
0	0
$-V_{dc}$	(S2, S3)

Επομένως, με την κατάλληλη διαδοχική σύνδεση τριών αντιστροφών, παράγονται επτά ξεχωριστά επίπεδα τάσης στην έξοδο του πολυεπίπεδου αντιστροφέα $\{-3V_{dc}, -2V_{dc}, -V_{dc}, 0, +V_{dc}, +2V_{dc}, +3V_{dc}\}$.

Η διακοπτική λειτουργία του πολυεπίπεδου αντιστροφέα έχει ως εξής:

Έξοδος V_o	Έξοδος H1	Έξοδος H2	Έξοδος H3	Ενεργοί διακόπτες
$+3V_{dc}$	$+V_{dc}$	$+V_{dc}$	$+V_{dc}$	(S1,S4)(S5,S8)(S9,S12)
$+2V_{dc}$	$+V_{dc}$	$+V_{dc}$	0	(S1,S4)(S5,S8)
$+V_{dc}$	$+V_{dc}$	0	0	(S1,S4)
0	0	0	0	0
$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0	0	(S2,S3)
$-2V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0	(S2,S3)(S6,S7)
$-3V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	(S2,S3)(S6,S7)(S10,S11)



Σχήμα 2.15 Κύκλωμα ισχύος του μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

Στο κύκλωμα του Σχήματος 2.15:

- V_s : είναι η τάση εισόδου (V).
- V_o : είναι η τάση εξόδου AC (V).
- I_i : είναι το ρεύμα της πηγής (A).
- C : είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή (F).
- $S1, S2, S3, S4$: είναι οι ημιαγωγικοί διακόπτες (πχ. MOSFET).
- $D1, D2, D3, D4$: είναι οι αντιπαράλληλες δίοδοι.
- $Load$: είναι το φορτίο στην έξοδο του μονοφασικού αντιστροφέα.

Οι βασικές εξισώσεις για ένα μονοφασικό αντιστροφή πλήρους γέφυρας είναι:

$$V_o = V_s * S(\omega t) \quad (2.3)$$

$$I_i = I_o * S(\omega t) \quad (2.4)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum V_{o,n}^2}}{V_{o,1}} \text{ για } n = 3,5,7 \quad (2.5)$$

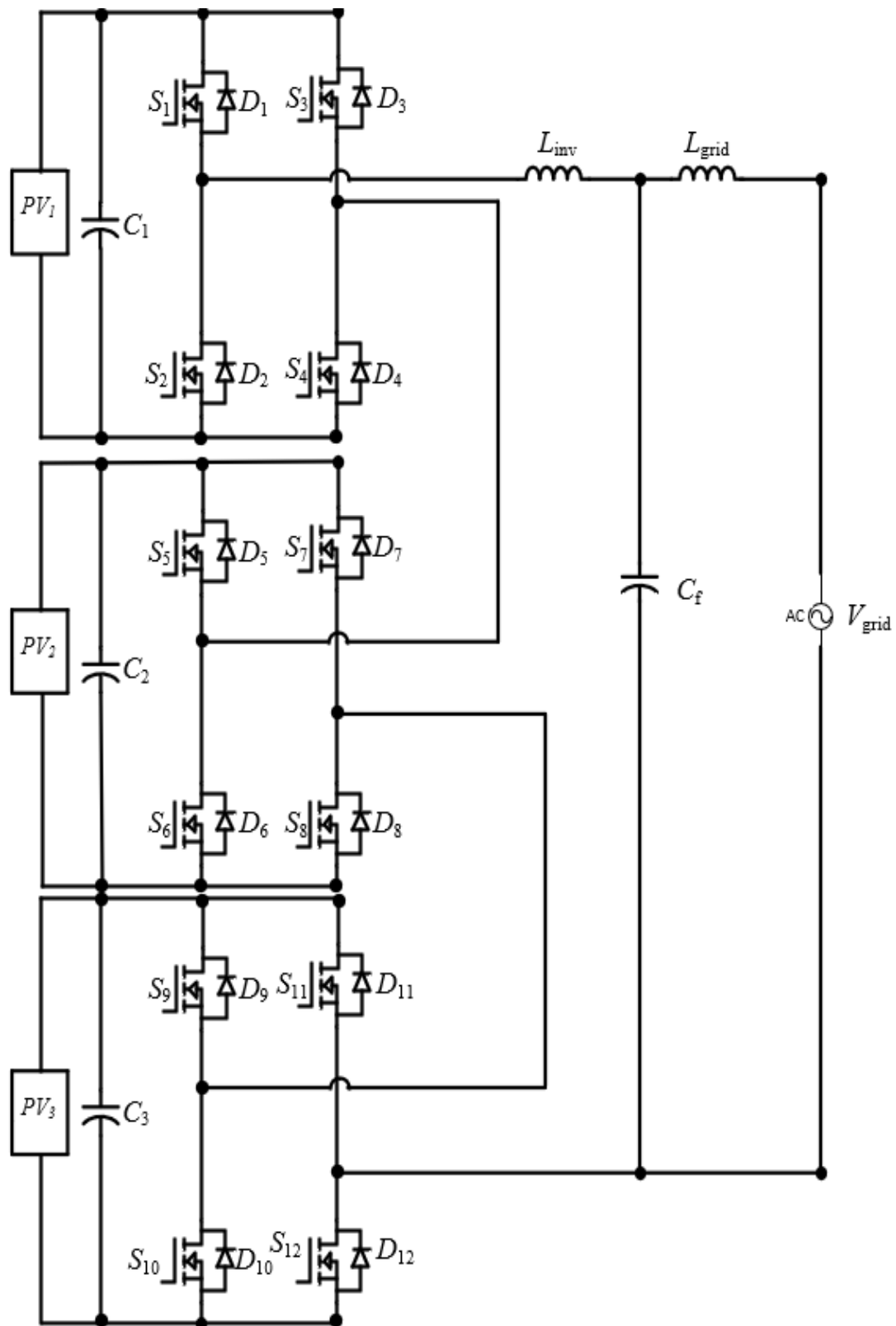
$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum I_{o,n}^2}}{I_{o,1}} \text{ για } n = 3,5,7 \quad (2.6)$$

όπου:

- V_o : είναι η εναλλασσόμενη τάση εξόδου του αντιστροφέα (V).
- V_s : είναι η τάση εισόδου του αντιστροφέα (V).

- $S(\omega t)$: είναι η διακοπτική συνάρτηση – μια περιοδική κυματομορφή που εναλλάσσεται μεταξύ $+V_{in}$ και $-V_{in}$, ανάλογα με το πότε η ημιτονική κυματομορφή αναφοράς υπερβαίνει ή όχι την τριγωνική κυματομορφή του φορέα (carrier) της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών.
- I_o : είναι το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα (A).
- I_i : είναι το ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα (A).
- THD_v : είναι ο συνολικός συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) για την τάση εξόδου.
- $V_o, 1$: είναι η ενεργός τιμή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας για την τάση εξόδου.
- V_o, n : είναι η ενεργός τιμή της n-οστής αρμονικής συνιστώσας για την τάση εξόδου.
- THD_i : είναι ο συνολικός συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) για το ρεύμα εξόδου.
- $I_o, 1$: είναι η ενεργός τιμή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας για το ρεύμα εξόδου.
- I_o, n : είναι η ενεργός τιμή της n-οστής αρμονικής συνιστώσας για το ρεύμα εξόδου.

Το κύκλωμα του πολυεπίπεδου μετατροπέα για την σύνδεση του φωτοβολταϊκού συστήματος στο δίκτυο φαίνεται στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16 Το κύκλωμα του πολυεπίπεδου μετατροπέα για την σύνδεση του φωτοβολταϊκού συστήματος στο δίκτυο.

Οι βασικές εξισώσεις για ένα πολυεπίπεδο αντιστροφέα είναι:

$$V_o = V_{H1} + V_{H2} + V_{H3} \quad (2.7)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum V_{o,n}^2}}{V_{o,1}} \text{ για } n = 3,5,7 \quad (2.8)$$

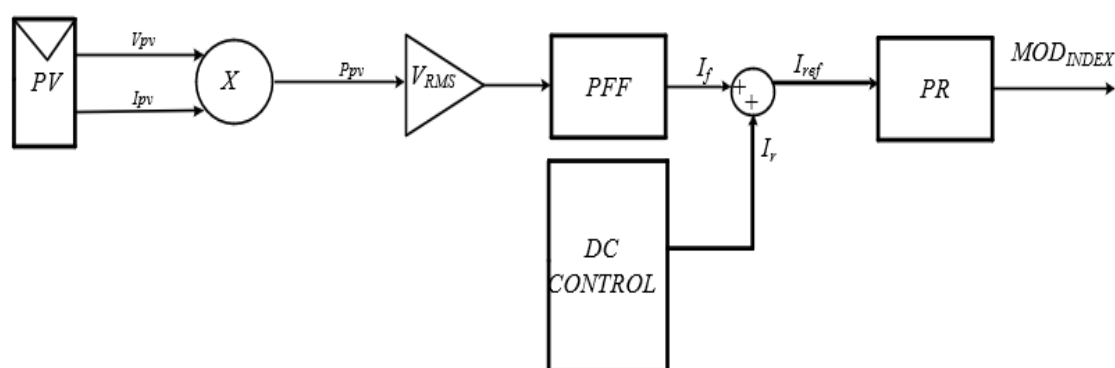
$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum I_{o,n}^2}}{I_{o,1}} \text{ για } n = 3,5,7 \quad (2.9)$$

όπου:

- V_o : είναι η εναλλασσόμενη τάση εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα (V).
- V_{Hn} : είναι η τάση εξόδου του κάθε αντιστροφέα (V).
- THD_v : είναι ο συνολικός συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) για την τάση εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα.
- $V_{o,1}$: είναι η ενεργός τιμή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας για την τάση εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα.
- $V_{o,n}$: είναι η ενεργός τιμή της n-οστής αρμονικής συνιστώσας για την τάση εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα.
- THD_i : είναι ο συνολικός συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) για το ρεύμα εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα.
- $I_{o,1}$: είναι η ενεργός τιμή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας για το ρεύμα εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα.
- $I_{o,n}$: είναι η ενεργός τιμή της n-οστής αρμονικής συνιστώσας για το ρεύμα εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα.

2.7 Τεχνική ‘power feed-forward’ (PFF)

Οι μέθοδοι ελέγχου της ισχύος στην περίπτωση μιας διάταξης συστήματος φωτοβολταϊκών συστοιχιών χωρίς χρήση μετατροπέα DC-DC, παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις κατά τη λειτουργία τους. Για αυτό τον λόγο, υλοποιείται μια εναλλακτική στρατηγική ελέγχου, γνωστή ως power feed-forward (PFF).



Σχήμα 2.17 Δομική απεικόνιση της μονάδας power feed-forward.

Το διάγραμμα υλοποίησης της μονάδας power feed-forward παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.17. Σύμφωνα με την στρατηγική αυτή, η υπολογισμένη τιμή της αναφοράς του πλάτους του ρεύματος, που εξάγεται από την στιγμιαία ισχύ του φωτοβολταϊκού (P_{pv}) και την ενεργό τιμή της εναλλασσόμενης τάσης (V_{acrms}), προστίθεται στην έξοδο του ελεγκτή τάσης DC (I_r), οδηγώντας στην τιμή αναφοράς του ρεύματος (I_{ref}). Στη συνέχεια, το ρεύμα αναφοράς που σχηματίστηκε, εισέρχεται στον ελεγκτή PR και σχηματίζονται τα πλάτη διαμόρφωσης για τον έλεγχο των αντιστροφών.

Ο υπολογισμός της τιμής ρεύματος (I_f) από την μονάδα power feed-forward περιγράφεται από την μαθηματική έκφραση:

$$I_f = \frac{P_{pv} * \sqrt{2}}{V_{acrms}} \quad (2.10)$$

όπου:

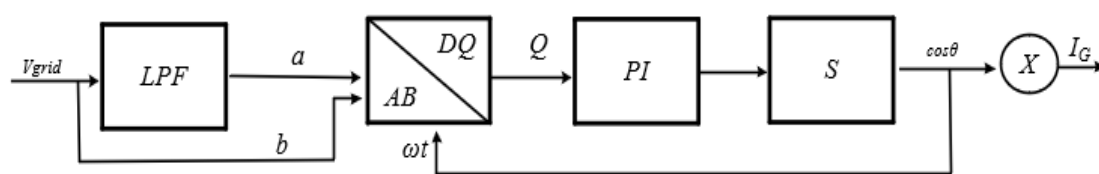
- I_f : είναι η τιμή αναφοράς του πλάτους του ρεύματος από την μονάδα power feed-forward.
- P_{pv} : είναι η στιγμιαία ισχύς που παράγεται από την φωτοβολταϊκή συστοιχία (W).
- V_{acrms} : είναι η ενεργός τιμή (rms) της εξόδου το αντιστροφέα σε εναλλασσόμενη τάση (V).

Η τεχνική power feed-forward επιτρέπει άμεση προσαρμογή στις μεταβολές της παραγόμενης ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του άμεσου υπολογισμού του ρεύματος αναφοράς, χωρίς την ανάγκη καθυστέρησης για διόρθωση μέσω ανάδρασης. Η μέθοδος αυτή βελτιώνει της δυναμική συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού συστήματος, αυξάνοντας την ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου P&O, ο οποίος χωρίς την χρήση DC-DC μετατροπέα για την ενίσχυση τάσης, έχει σχετικά αργή απόκριση.

2.8 Δομική μονάδα συγχρονισμού φάσης (PLL)

Η σύνδεση ενός αντιστροφέα απαιτεί τον ακριβή συγχρονισμό της φάσης, του ρεύματος και της τάσης του με το δίκτυο. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται διατάξεις που μέσω της συνεχούς παρακολούθησης και διόρθωσης της φάσης, επιτυγχάνουν τον ομοιόμορφο συντελεστή ισχύος προστατεύοντας το δίκτυο από αστάθειες, αλλά και διασφαλίζοντας τη σωστή λειτουργία του συστήματος. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για αυτόν τον σκοπό είναι η δομική μονάδα του phase-locked loop (PLL, Σχήμα 2.18).

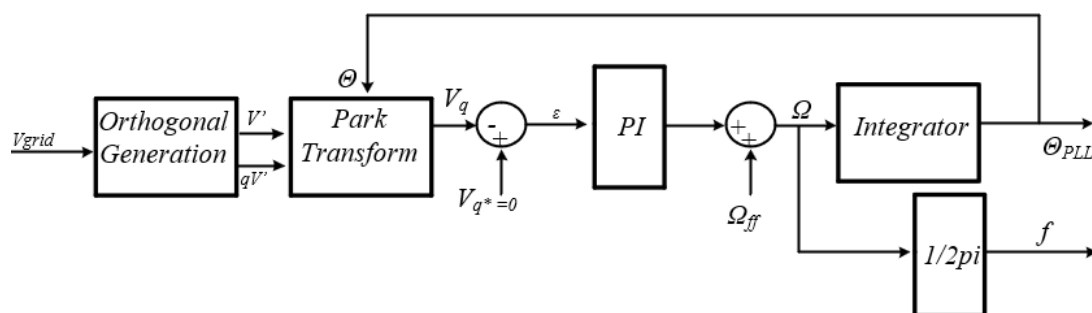
Το PLL είναι ένα σύστημα ανάδρασης, που εξασφαλίζει τον συγχρονισμό της φάσης του σήματος εξόδου, με τη φάση του σήματος αναφοράς. Ο συγχρονισμός αυτός επιτυγχάνεται με την συνεχή ρύθμιση της συχνότητας του ταλαντωτή, ώστε να παράγεται ένα σήμα εξόδου ευθυγραμμισμένο με το σήμα αναφοράς. Ο συγχρονισμός φάσης, επιτυγχάνεται μέσω τριών βασικών δομικών μονάδων.



Σχήμα 2.18 Δομική απεικόνιση της μονάδας συγχρονισμού φάσης (phase-locked loop).

- Phase detector (PD): Συγκρίνει τις φάσεις του σήματος ανάδρασης και του σήματος αναφοράς, δημιουργώντας ένα σήμα σφάλματος από την διαφορά τους.
- Loop filter (LF): Φιλτράρει το σήμα σφάλματος απομακρύνοντας τις υψηλές συχνότητες, με σκοπό την δημιουργία ενός σταθερού σήματος ελέγχου.
- Voltage controlled oscillator (VCO): Ρυθμίζει τη συχνότητα εξόδου βάσει του σήματος ελέγχου, ώστε να μειώνεται το σφάλμα φάσης.

Το διάγραμμα ελέγχου ενός μονοφασικού συστήματος συγχρονισμού φάσης PLL, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.19. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία η τοπολογία ανάδρασης που χρησιμοποιήθηκε, βασίζεται στην μετατροπή Park. Πιο αναλυτικά, το σύστημα PLL κατασκευάστηκε με την χρήση ενός μπλοκ μετατροπής Park που λειτούργησε ως ανιχνευτής φάσης, ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με την μορφή ενός PI ελεγκτή και ενός ταλαντωτή ελεγχόμενης τάσης (VCO) που υλοποιήθηκε από έναν ολοκληρωτή.



Σχήμα 2.19 Το διάγραμμα ελέγχου του μονοφασικού συστήματος PLL [2].

Η κύρια λειτουργία του ανιχνευτή φάσης βασίζεται στην μετατροπή των στατικών στοιχείων α και β , που προέκυψαν από την τεχνική των γενικευμένων ολοκληρωτών δεύτερης τάξης, σε περιστρεφόμενα, χρησιμοποιώντας την εκτιμώμενη γωνία φάσης. Τα σήματα α και β στην συνέχεια οδηγήθηκαν στον ελεγκτή PI και από εκεί στον ολοκληρωτή για την εύρεση γωνίας (θ) συγχρονισμού.

Στα μονοφασικά συστήματα, η τακτική των γενικευμένων ολοκληρωτών δεύτερης τάξης, είναι πολύ χρήσιμη, καθώς εξάγει το ορθογώνιο στοιχείο α από την μονοφασική είσοδο β . Αναλυτικότερα, χρησιμοποιούνται δύο χαμηλοπερατά φίλτρα για να δημιουργηθεί η ζητούμενη διαφορά ενενήντα μοιρών μεταξύ των δύο σημάτων.

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$TF_{LPF} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c}, s = j\omega \quad (2.11)$$

$$TF_{LPF} = \frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c} \quad (2.12)$$

$$TF_{LPF} = \frac{\omega_c}{\sqrt{\omega^2 + \omega_c^2}} < -\tan^{-1} \frac{\omega}{\omega_c} \quad \omega = \omega_c \quad (2.13)$$

$$TF_{LPF} = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \omega_c^2}} < -\tan^{-1} \frac{\omega}{\omega_c} \quad (2.14)$$

$$TF_{LPF} = \frac{1}{\sqrt{2}} < -45 \quad (2.15)$$

$$TF_{LPF} = \frac{1}{\sqrt{2}} * \frac{1}{\sqrt{2}} < -45 - 45 \quad (2.16)$$

$$TF_{LPF} = \frac{1}{2} < -90 \quad (2.17)$$

όπου:

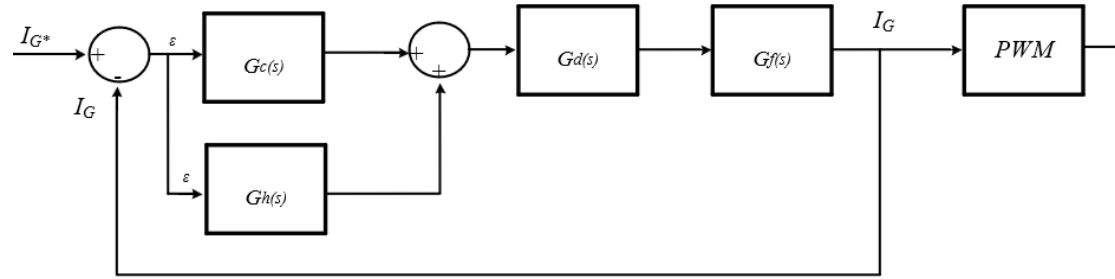
- TF_{LPF} : είναι η συνάρτηση μεταφοράς του χαμηλοπερατού φίλτρου.
- ω_c : είναι η συχνότητα αποκοπής (Hz).

2.9 Μονάδα ελέγχου ρεύματος δικτύου

Σε φωτοβολταϊκούς αντιστροφεείς συνδεδεμένους στο δίκτυο, ο βρόχος ελέγχου του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο, κρίνεται απαραίτητος για την ρύθμιση της απόδοσης της παραγόμενης ισχύος και την παράλληλη διατήρηση χαμηλών επιπέδων αρμονικής παραμόρφωσής (THD). Η κλασική προσέγγιση της μονάδας ελέγχου βασίζεται στην χρήση PI ελεγκτών, καθώς έχουν την ικανότητα να βελτιώσουν την απόδοση των αντιστροφέων σε δυναμικές συνθήκες, ελέγχοντας παράλληλα τα DC στοιχεία του συστήματος. Ωστόσο οι ελεγκτές PI δεν διαθέτουν την ικανότητα να παρακολουθήσουν ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς χωρίς σφάλμα μόνιμης κατάστασης, προκαλώντας υψηλές αρμονικές στην κυματομορφή του ρεύματος.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω περιορισμών χρησιμοποιείται ένας proportional resonant (PR) ελεγκτής. Ο συγκεκριμένος ελεγκτής είναι ένα σύστημα ελέγχου σχεδιασμένο για την παρακολούθηση ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς, χωρίς σφάλμα μόνιμης κατάστασης και την αποτελεσματική απόσβεση αρμονικών σε συγκεκριμένες συχνότητες. Αναλυτικότερα, ο ελεγκτής PR επιτυγχάνει απόσβεση 140dB και πάνω από 125dB στην 5^η και 7^η αρμονική, έναντι μόλις 17dB και 8dB που επιτυγχάνει αντίστοιχα ο PI ελεγκτής.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η επιλογή του ελεγκτή PR, κρίνεται κατάλληλη για το υπό μελέτη φωτοβολταϊκό σύστημα. Στο Σχήμα 2.20 παρουσιάζεται η υλοποίηση του ελεγκτή PR, ενώ ακολουθεί το μαθηματικό μοντέλο του.



Σχήμα 2.20 Η δομική απεικόνιση του ελεγκτή ρεύματος.

Η συνάρτηση μεταφοράς $G_c(s)$ του PR ελεγκτή ορίζεται από την σχέση:

$$G_c(s) = K_p + K_i \frac{s}{s^2 + \omega_o^2} \quad (2.18)$$

όπου:

- K_p : είναι το αναλογικό κέρδος που καθορίζει την απόκριση στο σφάλμα.
- K_i : είναι το κέρδος του συντονιστικού όρου.
- ω_o : είναι η θεμελιώδης συχνότητα του συστήματος (Hz).

Η συνάρτηση μεταφοράς του αρμονικού αντισταθμιστή (harmonic compensator) $G_h(s)$ που έχει σχεδιαστεί για την απόσβεση της 3^{ης}, 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής, που είναι οι πιο κυρίαρχες στο φάσμα, ορίζεται από την σχέση:

$$G_h(s) = \sum_{h=3,5,7} K_{ih} \frac{s}{s^2 + (\omega_o h)^2} \quad (2.19)$$

όπου:

- K_{Ih} : είναι το κέρδος του συντονιστικού όρου για την h αρμονική.
- h : είναι ο δείκτης της αρμονικής.
- ω_o : είναι η γωνιακή θεμελιώδης συχνότητα (Hz).

Επίσης, εισάγεται μια καθυστέρηση επεξεργασίας μέσω της συνάρτησης μεταφοράς

$G_d(s)$. Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου ορίζεται ως εξής:

$$G_f(s) = \frac{I_i(s)}{V_i(s)} = \frac{1(s^2 + Z_{lc}^2)}{L_i s(s^2 + Z_{lc}^2)} \quad (2.20)$$

όπου:

- $Z_{LC}^2 = [L_g C_f]^{-1}$.
- $\omega_{res}^2 = \frac{(L_i + L_g) Z_{LC}^2}{L_i}$.
- L_i : είναι η αυτεπαγωγή σύνδεσης με το φίλτρο (H).
- L_g : είναι η αυτεπαγωγή σύνδεσης με το δίκτυο (H).

Η συνολική ικανότητα απόρριψης του τρέχοντος λόγου σφάλματος-διαταραχής σε μηδενική αναφορά ορίζεται ως εξής:

$$\frac{\varepsilon(s)}{V_g(s)} = \frac{G_f(s)}{1 + (G_c(s) + G_h(s))G_d(s)G_f(s)} \quad (2.21)$$

όπου:

- ε : είναι το σφάλμα ρεύματος.
- V_g : είναι η τάση του δικτύου (V).

2.10 Έλεγχος τάσης εξόδου αντιστροφέα DC-AC με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)

Με βάση τα συμπεράσματα της προηγούμενης παραγράφου, καθίσταται σαφές ότι η έξοδος ενός αντιστροφέα έχει την μορφή μιας κυματομορφής που αποτελείται από παλμούς τετραγωνικής μορφής, οι οποίοι περιέχουν υψηλές αρμονικές συνιστώσες. Παρά την ενσωμάτωση διάφορων μονάδων ελέγχων και φίλτρων, παραμένει απαραίτητη η περαιτέρω εξομάλυνση και αύξηση ποιότητας της τάσης εξόδου, με σκοπό την βελτίωση ποιότητας ισχύος.

Μια από τις βασικές τεχνικές ελέγχου της διακοπτικής συχνότητας του αντιστροφέα είναι η διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation-PWM). Οι τεχνικές PWM αποτελούν σημαντικό κομμάτι για τον έλεγχο των πολυεπίπεδων μετατροπέων. Ένας διαμορφωτής PWM χαρακτηρίζεται από δύο βασικές παραμέτρους: τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) και την συχνότητα διαμόρφωσης. Ο κύκλος λειτουργίας εκφράζει τον αριθμό των φορών που ένα σήμα βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας, ενώ η συχνότητα καθορίζει πόσο γρήγορα ολοκληρώνεται ένας κύκλος. Οι σχέσεις που διέπουν τα παραπάνω μεγέθη είναι οι εξής:

$$T_{period} = T_{on} + T_{off} \quad (2.22)$$

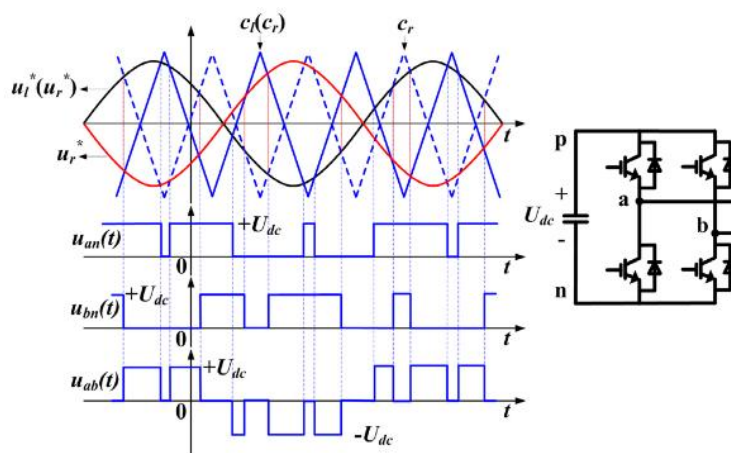
$$F = \frac{1}{T_{period}} \quad (2.23)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{off} + T_{on}} * 100 \quad (2.24)$$

όπου:

- T_{on} : είναι ο χρόνος (s) που ο διακόπτης βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση (ON).
- T_{off} : είναι ο χρόνος (s) που ο διακόπτης βρίσκεται σε ανενεργή κατάσταση (OFF).
- D : είναι ο κύκλος λειτουργίας του διαμορφωτή.
- F : είναι η συχνότητα διαμόρφωσης (Hz).
- T_{period} : είναι η περίοδος διαμόρφωσης (s).

Η πιο δημοφιλής τεχνική διαμόρφωσης για έναν μονοφασικό αντιστροφέα είναι η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse With Modulation-SPWM), λόγω της παραγωγής λιγότερων αρμονικών συνιστωσών, της απαίτησης μικρότερου φίλτρου στην έξοδο του αντιστροφέα και των μικρότερων απωλειών κατά τη διακοπτική λειτουργία. Η βασική αρχή λειτουργίας της τεχνικής SPWM, βασίζεται στην σύγκριση ενός ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς με μία τριγωνική κυματομορφή φορέα, για την παραγωγή παλμών οδήγησης για τους διακόπτες του μετατροπέα (Σχήμα 2.21).



Σχήμα 2.21 Αρχή λειτουργίας τεχνικής SPWM για αντιστροφέα πλήρους γέφυρας [9].

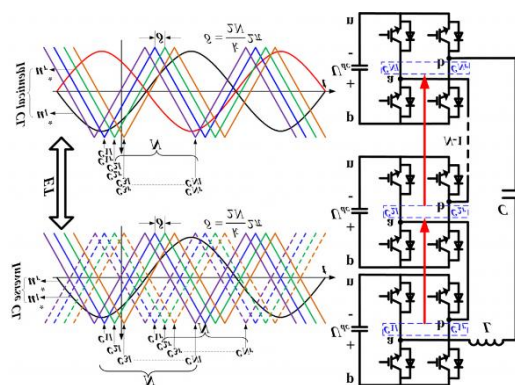
Στην περίπτωση πολυεπίπεδων μετατροπέων, απαιτείται μια πιο εξελιγμένη εκδοχή της τεχνικής, γνωστή ως διαμόρφωση εύρους παλμών με μετατοπισμένο φορέα (phase shifted-SPWM). Η κύρια διαφορά με την προηγούμενη τεχνική έγκειται στην χρήση πολλαπλών τριγωνικών κυματομορφών φορέα, οι οποίες έχουν διαφορά φάσης. Κάθε σήμα αναφοράς που παράγεται από τον έλεγχο του φωτοβολταϊκού συστήματος, συγκρίνεται διαρκώς με τα μετατοπισμένα σήματα, δημιουργώντας τους κατάλληλους παλμούς οδήγησης για τους διακόπτες του αντιστροφέα (Σχήμα 2.22).

Ο αριθμός των μετατοπισμένων φορέων που απαιτούνται, καθορίζεται από την εξής μαθηματική σχέση:

$$N_{carriers} = N_{levels} - 1 \quad (2.25)$$

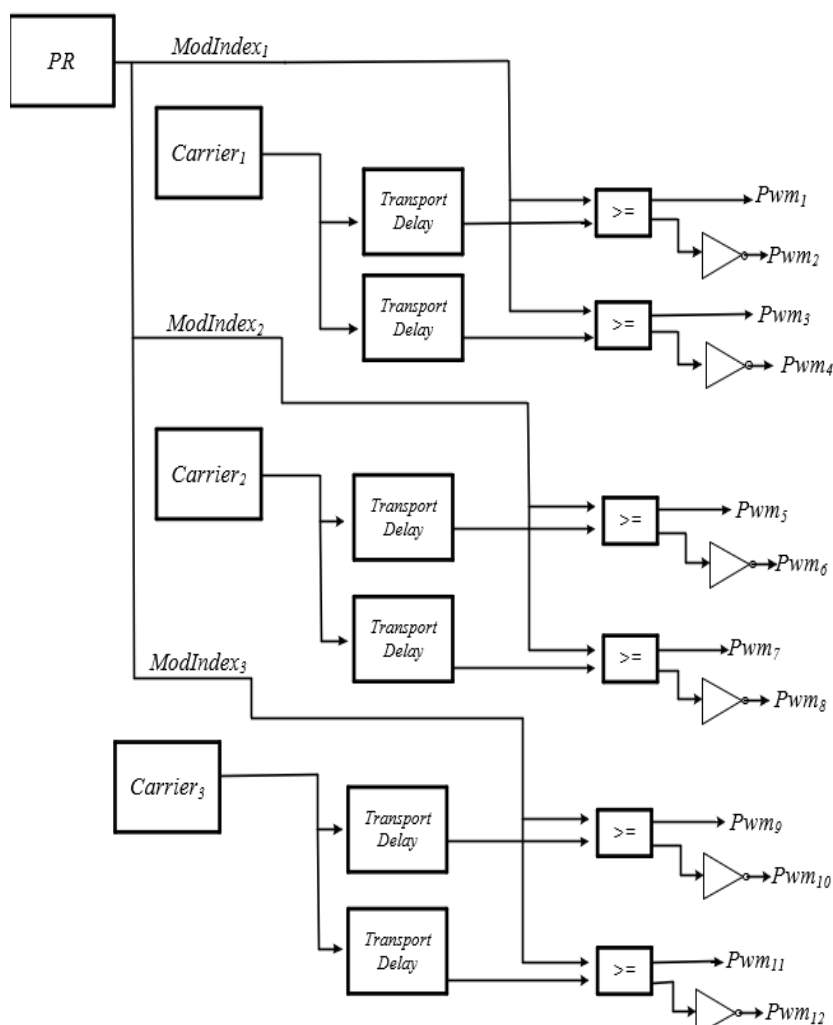
όπου:

- $N_{carriers}$: είναι ο αριθμός των μετατοπισμένων φορέων.
- N_{levels} : είναι το επίπεδο του αντιστροφέα.



Σχήμα 2.22 Αρχή λειτουργίας τεχνικής PS-SPWM για αντιστροφέα πλήρους γέφυρας N επιπέδων [9].

Στο Σχήμα 2.23 παρουσιάζεται το διάγραμμα διαμόρφωσης εύρους παλμών που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη περίπτωση.

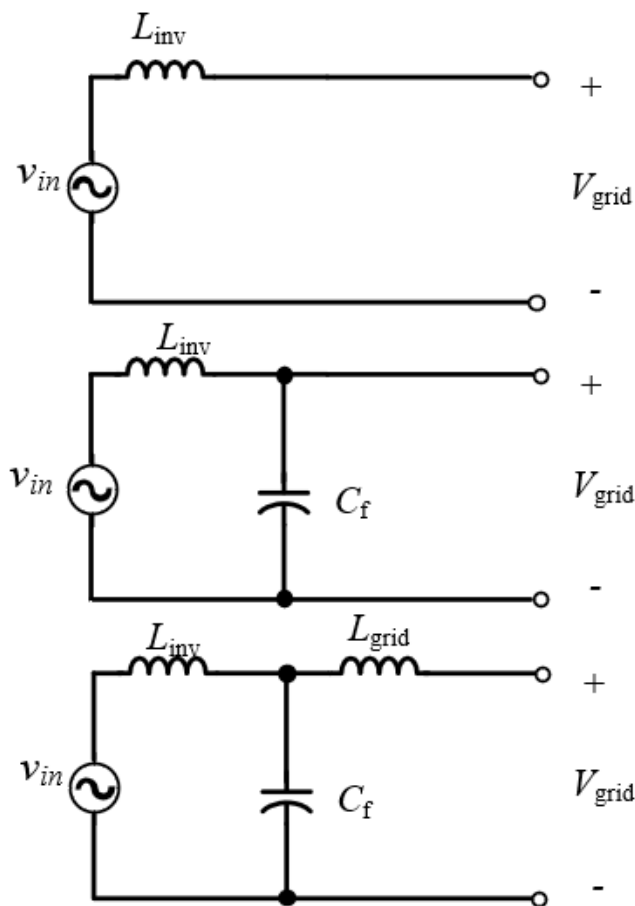


Σχήμα 2.23 Το διάγραμμα διαμόρφωσης παλμών οδήγησης του πολυεπίπεδου αντιστροφέα με χρήση τεχνικής PS-SPWM.

2.11 Σχεδιασμός χαμηλοπερατού φίλτρου LCL για τη σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο

Η διαμόρφωση εύρους παλμών, η οποία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συνιστωσών υψηλής συχνότητας. Οι αρμονικές αυτές συνιστώσες, προκαλούν επιπλέον παραμορφώσεις στο ρεύμα του δικτύου, επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητας ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, χρησιμοποιούνται φίλτρα

στην έξοδο του αντιστροφέα. Υπάρχουν διάφορες τοπολογίες φίλτρων, όπως τα φίλτρα τύπου L, LC και LCL που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.24 Τα κυκλώματα των L, LC και LCL φίλτρων, αντίστοιχα.

Σε σύγκριση με τα φίλτρα L και LC η τοπολογία LCL, προσφέρει μεγαλύτερη απόσβεση των υψηλών συχνοτήτων στην έξοδο του αντιστροφέα. Επομένως, κρίνεται σκόπιμη η επιλογή του για την χρήση του στο συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό σύστημα. Αναλυτικότερα, το φίλτρο LCL αποτελείται από δύο επαγωγικά στοιχεία (L_1 , L_2) και έναν πυκνωτή (C_f) τοποθετημένο ανάμεσα τους.

Η τοπολογία αυτή επιτρέπει την δυνατότητα απόσβεσης των αρμονικών της διακοπτικής συχνότητας, με ρυθμό περίπου -60 dB/decade πέραν της συχνότητας συντονισμού. Παράλληλα, επιτυγχάνει καλύτερη απόζευξη μεταξύ του φίλτρου και της σύνθετης αντίστασης του δικτύου. Τα παραπάνω καθιστούν την απόκριση του φίλτρου LCL ιδιαίτερα αποτελεσματική ακόμη και με μικρές τιμές αυτεπαγωγής, διατηρώντας παράλληλα χαμηλές απώλειες. Ακόμη, η ύπαρξη του πυκνωτή στο κύκλωμα, μειώνει την κυμάτωση του ρεύματος που διέρχεται από το πηνίο του φίλτρου προς το δίκτυο (L_{grid}), οδηγώντας σε βελτίωση της συνολικής ποιότητας ισχύος. Το μοντέλο ενός μονοφασικού φίλτρου LCL απεικονίζεται στο Σχήμα 2.25 και περιγράφεται από τις εξής εξισώσεις [29]:

$$f_{res} = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{L_{inv} + L_{grid}}{L_{inv} * L_{grid} * C_f}} \quad (2.26)$$

$$R_d = \frac{1}{3 * \omega_{res} * C_f} \quad (2.27)$$

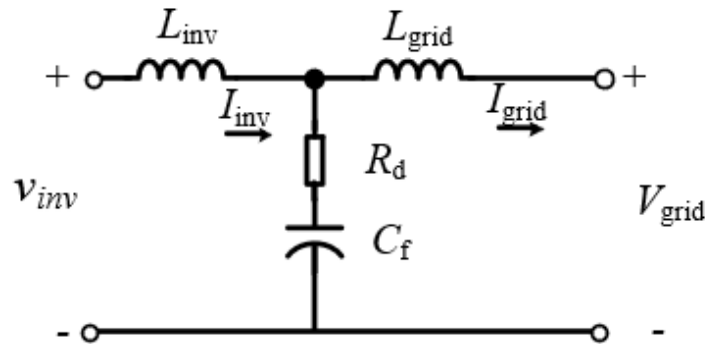
$$H_{LCL}(s) = \frac{I_{grid}}{V_{inv}} \quad (2.28)$$

$$H_{LCL-without}(s) = \frac{1}{L_{inv} C_f L_{grid} s^3 + (L_{inv} + L_{grid}) s} \quad (2.29)$$

$$H_{LCL-with}(s) = \frac{C_f R_d s + 1}{L_{inv} C_f L_{grid} s^3 + C_f (L_{inv} + L_{grid}) R_d s^2 + (L_{inv} + L_{grid}) s} \quad (2.30)$$

όπου:

- f_{res} : είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου (Hz).
- L_{inv} : είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου στην πλευρά του αντιστροφέα (H).
- L_{grid} : είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου στην πλευρά του δικτύου (H).
- C_f : είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή στην βάση του φίλτρου (F).
- ω_{res} : είναι η γωνιακή συχνότητα αποκοπής του φίλτρου (rad/s).
- R_d : είναι η αντίσταση απόσβεσης του φίλτρου (Ohm).
- $H_{LCL}(s)$: είναι η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου.
- $H_{LCL-without}(s)$: είναι η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου χωρίς αντίσταση απόσβεσης.
- $H_{LCL-with}(s)$: είναι η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου με αντίσταση απόσβεσης.
- V_{inv} : είναι η τάση εισόδου του φίλτρου (V).
- I_{grid} : είναι το ρεύμα του πηνίου στην πλευρά του δικτύου (A).
- I_{inv} : είναι το ρεύμα του πηνίου στην πλευρά του αντιστροφέα (A).
- V_{grid} : είναι η τάση από την πλευρά του δικτύου (V).



Σχήμα 2.25 Το ισοδύναμο κύκλωμα του φίλτρου LCL.

3. Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκού συστήματος σε δίκτυο σε περιβάλλον *Simulink*

3.1 Μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών

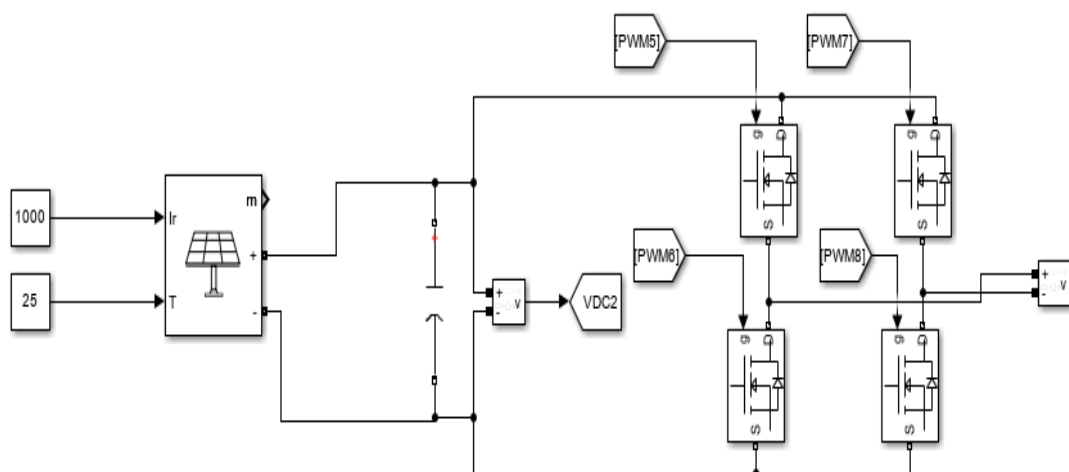
Για την υλοποίηση της τοπολογίας, η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι απαραίτητη η χρήση τριών φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Η κάθε μια συστοιχία αποτελείται από 4 φωτοβολταϊκά πλαίσια, συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους. Τα δεδομένα κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Σε περίπτωση που απαιτείται αύξηση των επιπέδων του πολυεπίπεδου μετατροπέα, είναι δυνατή η επέκταση του συστήματος με επιπλέον φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες αναπαρίστανται στο περιβάλλον του Simulink, με την χρήση του μπλοκ PV Array από την βιβλιοθήκη Simscape.

Πίνακας 3.1 Δεδομένα φωτοβολταϊκού πλαισίου.	
Μέγιστη ισχύς (W)	201.6
Τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc} (V)	44.86
Τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος v_{mp} (V)	40
Συντελεστής θερμοκρασίας της V_{oc} (%/deg.C)	-0.364

Κύτταρα ανά μονάδα (N_{cell})	72
Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} (A)	5.5
Ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος I_{mp} (A)	5.04
Συντελεστής θερμοκρασίας του I_{sc} (%/deg.C)	0.102

3.2 Μοντελοποίηση των αντιστροφέων DC-AC

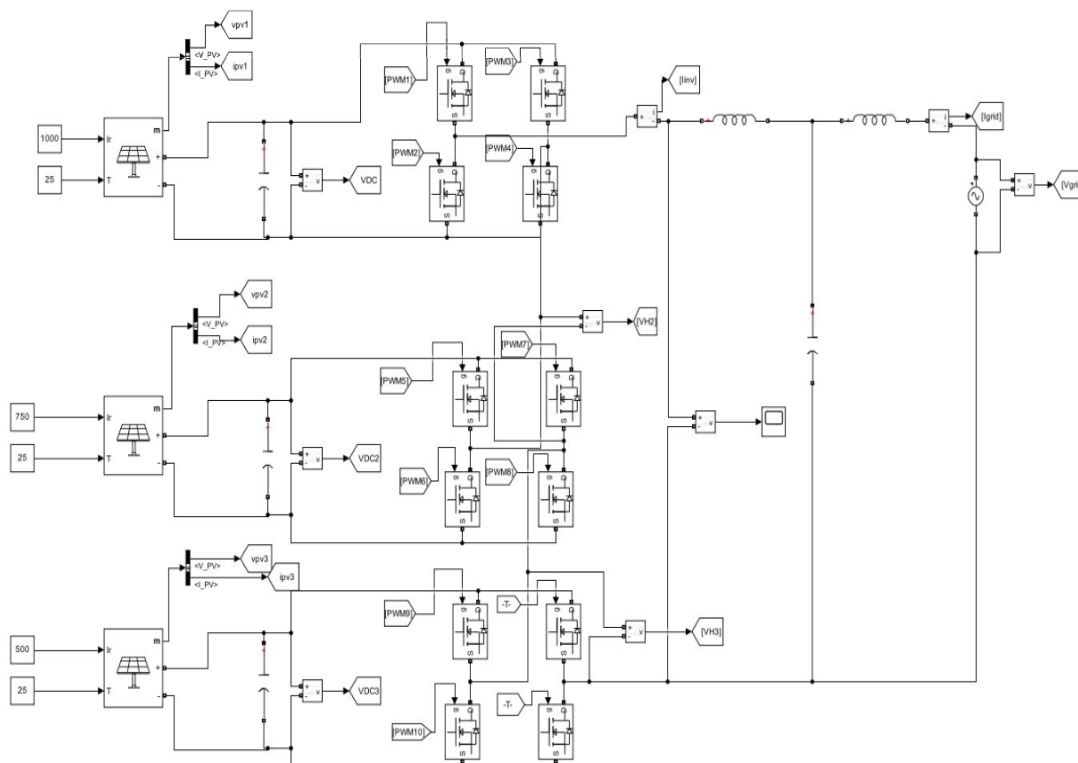
Κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι συνδεδεμένη με ένα μονοφασικό αντιστροφέα DC-AC τριών επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Ο κάθε αντιστροφέας ελέγχεται από το συνολικό σύστημα παλμών οδήγησης των διακοπών, ώστε να παράγει τάση εξόδου τριών επιπέδων $\{-V, 0, V\}$. Οι τύποι των διακοπών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται, είναι MOSFET και οι παράμετροι τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.1 Ο μονοφασικός αντιστροφέας DC-AC στο περιβάλλον του Simulink.

Πίνακας 3.2 Παράμετροι διακοπών MOSFET του αντιστροφέα DC-AC.	
Αντίσταση R_{on} (Ohms)	0.1Ω
Εσωτερική αντίσταση διόδου R_d (Ohms)	0.01Ω
Τάση αγωγής διόδου (Volt)	0.7V

Σε συνέχεια των παραπάνω, ο κάθε μονοφασικός αντιστροφέας DC-AC συνδέεται σε σειρά με τον επόμενο, σχηματίζοντας την τελική τοπολογία του πολυεπίπεδου μετατροπέα. Ο πολυεπίπεδος μετατροπέας αποτελείται από τρεις διαδοχικά συνδεδεμένους αντιστροφείς, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2, αποδίδοντας επτά επίπεδα στην τάση εξόδου του συστήματος.



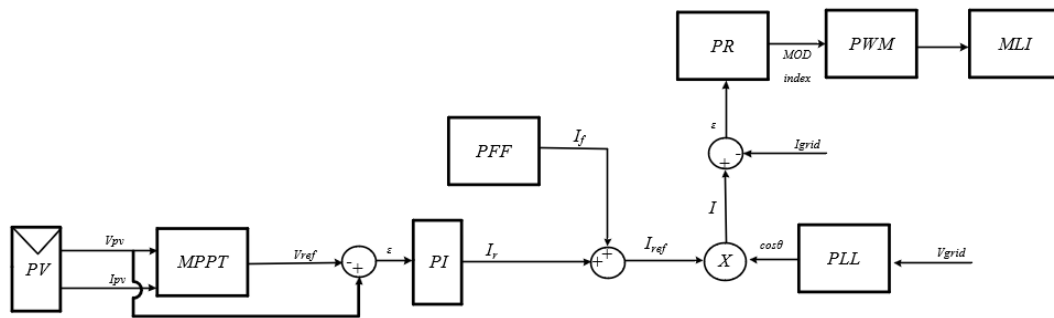
Σχήμα 3.2 Η σύνδεση των τριών αντιστροφέων μεταξύ τους για τον σχηματισμό του πολυεπίπεδου μετατροπέα στο περιβάλλον του Simulink.

Ο κάθε αντιστροφέας διαθέτει, στην είσοδο του, ένα πυκνωτή DC link, ο οποίος παρεμβάλλεται στην σύνδεση μεταξύ της DC εξόδου του φωτοβολταϊκού και της εισόδου του αντιστροφέα DC-AC. Ο ρόλος του πυκνωτή DC link είναι καθοριστικός, καθώς περιορίζει τις διακυμάνσεις που δημιουργούνται στην τάση μεταξύ των τριών επιπέδων εξόδου του αντιστροφέα. Οι διακυμάνσεις αυτές θα πρέπει να περιορίζονται σε ποσοστά μικρότερα από 2%. Η ενέργεια που παρέχεται από την φωτοβολταϊκή συστοιχία προς τον κόμβο του DC link, φορτίζει τον πυκνωτή, οδηγώντας στην αύξηση της τάσης του. Αντίθετα στην περίπτωση που το δίκτυο απορροφά ενέργεια από το σύστημα, ο πυκνωτής εκφορτίζεται, οδηγώντας σε μείωση της τάσης του. Μετά από πειραματισμούς στις τιμές της χωρητικότητας του πυκνωτή και λαμβάνοντας υπόψη ότι η τελική τιμή του θα πρέπει να βρίσκεται εντός αποδεκτών τεχνικών ορίων, επιλέχθηκε χωρητικότητα $C_{dc-link} = 6mF$. Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης τιμής, παρατηρήθηκε ικανοποιητική απόκριση, με την κυματομορφή της τάσης στον πυκνωτή να συγκλίνει στην επιθυμητή τιμή λειτουργίας της κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας, με ελάχιστη κυμάτωση.

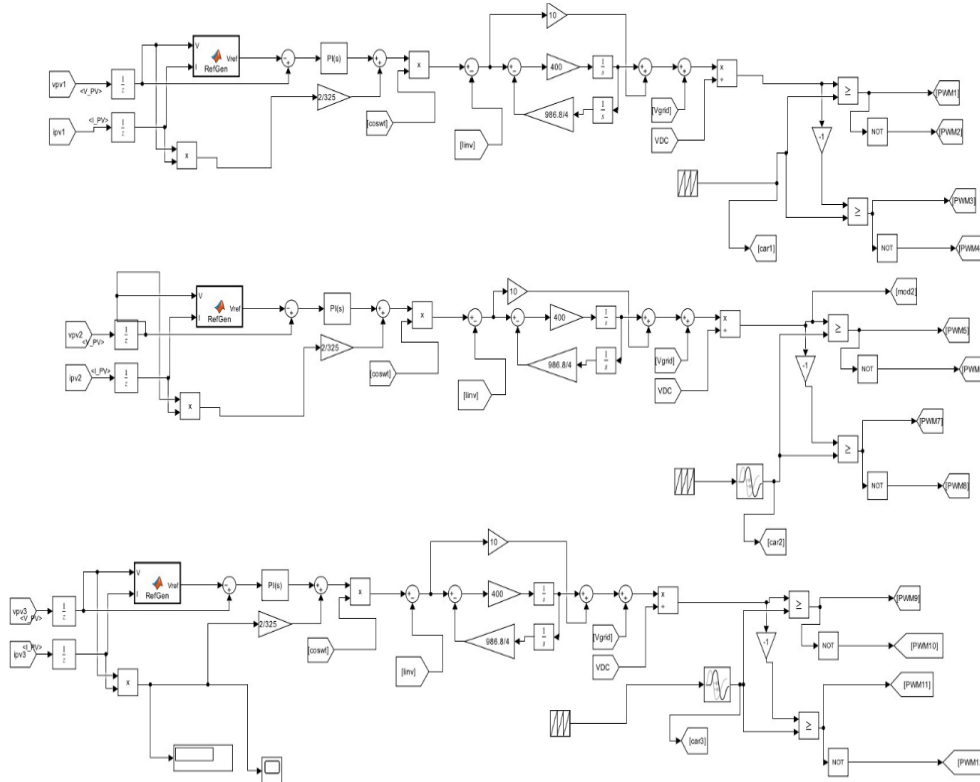
3.3 Υλοποίηση ελέγχου του φωτοβολταϊκού συστήματος

Ο έλεγχος ολόκληρου του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ζωτικής σημασίας. Η σημασία του έγκειται στην ρύθμιση της ροής της παραγόμενης ισχύος προς το δίκτυο, την διατήρηση του συγχρονισμού με αυτό, την λειτουργία των αντιστροφέων και την γενικότερη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος υπό διαφορετικές εξωτερικές συνθήκες.

Τα βασικά δομικά υποσυστήματα του συστήματος ελέγχου, όπως παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 2.6, 2.9 και 2.11, αντίστοιχα, περιλαμβάνουν τη μονάδα ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος, τη μονάδα power feed-forward και την μονάδα ελέγχου του ρεύματος. Αρχικά, οι στιγμιαίες τιμές τάσης και ρεύματος κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας εισέρχονται στην μονάδα MPPT. Με την εφαρμογή του κατάλληλου αλγορίθμου, επιτυγχάνεται η λειτουργία κάθε συστοιχίας στο σημείο μέγιστης ισχύος και ως έξοδος λαμβάνεται μια τάση αναφοράς (V_{ref}). Η τάση αναφοράς V_{ref} συγκρίνεται με την τάση του DC link πυκνωτή κάθε αντιστροφέα. Η προκύπτουσα διαφορά τροφοδοτείται σε έναν PI ελεγκτή, που ελαχιστοποιεί το σφάλμα τάσης και δημιουργεί ένα ρεύμα αναφοράς I_r . Το ρεύμα αυτό προστίθεται στο ρεύμα από την μονάδα power feed-forward (I_f) και δημιουργεί το τελικό ρεύμα αναφοράς I_{ref} . Στην συνέχεια, το I_{ref} πολλαπλασιάζεται με το $\cos\theta$, όπου θ είναι η απαιτούμενη φασική γωνία για τον συγχρονισμό με το δίκτυο, που προκύπτει από την δομική μονάδα του PLL. Επομένως, σχηματίζεται το τελικό ρεύμα αναφοράς που θα οδηγηθεί στον ελεγκτή PR και εξάγονται οι δείκτες διαμόρφωσης πλάτους για κάθε αντιστροφέα. Οι δείκτες αυτοί, μέσω της τεχνικής PS-SPWM, θα συγκριθούν με τα κατάλληλα μετατοπισμένα τριγωνικά σήματα (carrier), δημιουργώντας τους απαραίτητους παλμούς οδήγησης για τον κάθε διακόπτη του πολυεπίπεδου μετατροπέα, εξασφαλίζοντας την σωστή λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το κύκλωμα ελέγχου των αντιστροφέων του φωτοβολταϊκού συστήματος που έχει περιγραφεί παραπάνω, ενώ στο Σχήμα 3.4 απεικονίζεται η αντίστοιχη υλοποίηση στο περιβάλλον του Simulink.



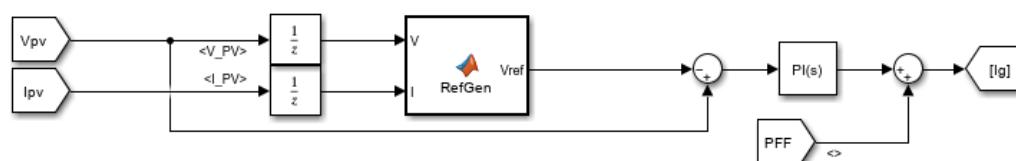
Σχήμα 3.3 Το κύκλωμα ελέγχου των αντιστροφών του φωτοβολταϊκού συστήματος.



Σχήμα 3.4 Υλοποίηση του ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου στο περιβάλλον του Simulink.

3.3.1 Η μονάδα εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) και ο έλεγχος λειτουργίας της

Η μονάδα ελέγχου MPPT αποτελεί βασικό στοιχείο στην ορθή λειτουργία ολόκληρης της τοπολογίας, καθώς φροντίζει ώστε το φωτοβολταϊκό σύστημα να λειτουργεί συνεχώς στην μέγιστη ισχύ του, επιτυγχάνοντας βέλτιστη ενεργειακή απόδοση. Στο περιβάλλον του Simulink, η εν λόγω μονάδα υλοποιείται, μέσω ενός μπλοκ συνάρτησης MATLAB, εντός του οποίου έχει αναπτυχθεί ο αλγόριθμος Perturb & Observe (P&O) που επιλέχθηκε, σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Στο πλαίσιο της παρούσας διάταξης, απαιτείται η χρήση τριών μονάδων MPPT, μία για κάθε αντιστροφέα DC-AC, προκειμένου να επιτυγχάνεται ξεχωριστός έλεγχος κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.5, το μπλοκ συνάρτησης MATLAB δέχεται σαν είσοδο την τιμή του ρεύματος και της τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κάθε χρονική στιγμή και παράγει ως έξοδο την τάση αναφοράς V_{ref} .



Σχήμα 3.5 Η υλοποίηση της μονάδας εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος στο περιβάλλον Simulink.

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου Perturb & Observe (P&O) που εφαρμόστηκε, κρίνεται απαραίτητη η σύγκριση μεταξύ των θεωρητικά αναμενόμενων τιμών και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές ισχύος της μονάδας MPPT, σε σύγκριση με τις αναμενόμενες θεωρητικές τιμές και το ποσοστό απόκλισης μεταξύ τους.

Πίνακας 3.3 Τα αποτελέσματα της μονάδας MPPT με την χρήση P&O.			
Ακτινοβολία πλαισίου (W/m ²)	Ισχύς θεωρητικά (W)	Ισχύς Simulink (W)	Απόκλιση (%)
1000	806.4	804.2	0.27
750	604.8	602.4	0.39
500	403.2	399.7	0.86
250	201.6	199.9	0.84

Από τον Πίνακα 3.3 παρατηρείται ότι αλγόριθμος P&O επιτυγχάνει πολύ μικρές τιμές απόκλισης, κάτι που αποδεικνύει ότι βρίσκει το μέγιστο σημείο ισχύος ανεξαρτήτως εξωτερικών συνθηκών ακτινοβολίας. Οι τιμές απόκλισης στα αποτελέσματα του αλγορίθμου P&O οφείλονται στη χρήση συγκεκριμένου βήματος μεταβολής της τάσης. Σε περίπτωση εφαρμογής μικρότερου βήματος, τα ποσοστά απόκλισης θα ήταν μικρότερα, καθώς ο αλγόριθμος θα συνέκλινε με μεγαλύτερη ακρίβεια στην ζητούμενη θεωρητική τιμή. Αυτό όμως θα είχε ως αποτέλεσμα την σημαντική επιβράδυνση της σύγκλισης, γεγονός που θα μείωνε την συνολική απόδοση του συστήματος σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας.

Για σκοπούς σύγκρισης μεταξύ των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.4.2, πραγματοποιήθηκε και μία προσομοίωση με την χρήση του INC

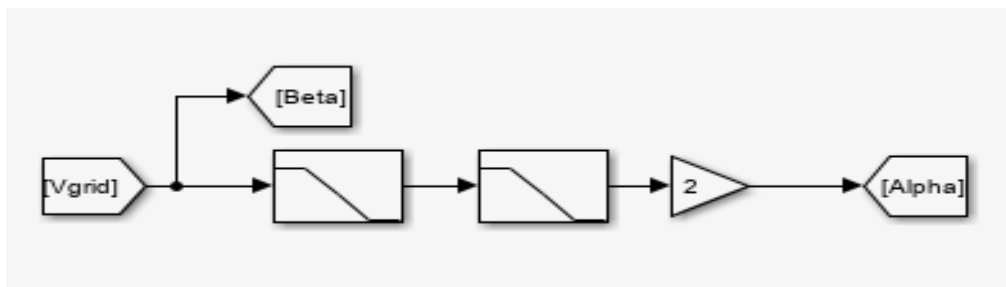
αλγόριθμου. Ωστόσο τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τιμές απόκλισης του, τόσο στην παραγόμενη ισχύς αλλά και στην τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος, ήταν ελάχιστα μεγαλύτερες από αυτές του P&O. Αυτό συμβαίνει, καθώς ο αλγόριθμος INC βασίζεται στον υπολογισμό παραγώγων μέσω της διαφοράς τάσης ΔV . Ως αποτέλεσμα, αντί ο αλγόριθμος να σταθεροποιείται κοντά στο MPP, προχωρά σε περιττές μεταβολές, οδηγώντας σε αυξημένη απόκλιση, η οποία ενισχύεται από το μέγεθος του βήματος μεταβολής της τάσης. Επιπλέον, από την ανάλυση των κυματομορφών της ισχύος της κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας, παρατηρήθηκε ότι με την χρήση του αλγόριθμου INC εμφανίστηκαν μεγαλύτερες ταλαντώσεις και αργότερη σύγκλιση στην μέγιστη τιμή. Επομένως, επιλέχθηκε η χρήση του P&O, κυρίως για την αποδοτικότητα του αλλά και για την απλότητα του.

3.3.2 Η δομική μονάδα του συγχρονισμού φάσης (PLL)

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, η δομική μονάδα συγχρονισμού φάσης PLL αποτελεί κρίσιμο υποσύστημα για τη σωστή λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, το PLL εξασφαλίζει την δημιουργία ενός συγχρονισμένου και ημιτονοειδούς ρεύματος αναφοράς, επιτυγχάνοντας εξαιρετική απόδοση λειτουργίας του συστήματος.

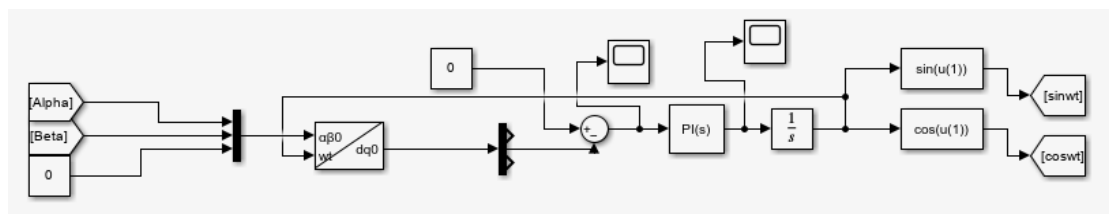
Όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 2.9, για την εφαρμογή του μετασχηματισμού Clarke είναι απαραίτητη η δημιουργία των δύο σημάτων αναφοράς, τα α και β . Τα δύο αυτά σήματα υλοποιούνται στο περιβάλλον του Simulink, με την χρήση δύο χαμηλοπερατών φίλτρων από την βιβλιοθήκη Filters του Simulink, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Το σήμα β αντιγράφει την τάση του δικτύου, ενώ το σήμα α περνώντας

από τα δύο φίλτρα και ένα μπλοκ ενίσχυσης, αντιγράφει το σήμα β , επιτυγχάνοντας την απαιτούμενη φασική διαφορά 90 μοιρών.



Σχήμα 3.6 Το πρώτο τμήμα της μονάδας συγχρονισμού φάσης για τον σχηματισμό των σημάτων αναφοράς α και β στο περιβάλλον Simulink.

Σε συνέχεια των παραπάνω, τα δύο σήματα εισάγονται σε ένα μπλοκ μετατροπής $ab0$ σε $dq0$. Η έξοδος του παραπάνω μπλοκ τροφοδοτείται σε ένα βρόχο ανάδρασης και με την χρήση ενός ελεγκτή PI και ενός μπλοκ ολοκληρωτή, υπολογίζεται η απαιτούμενη γωνία για τον συγχρονισμό του ρεύματος αναφοράς με το δίκτυο. Τέλος, με την χρήση δύο μπλοκ συναρτήσεων MATLAB (ημιτονοειδής και συνημιτονοειδής συνάρτηση), σχηματίζονται οι κυματομορφές $\sin\theta$ και $\cos\theta$, που είναι απαραίτητες για την διαμόρφωση του τελικού ρεύματος αναφοράς. Το δεύτερο τμήμα της μονάδας συγχρονισμού φάσης, που έχει περιγραφεί παραπάνω, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Το δεύτερο τμήμα της μονάδας του συγχρονισμού φάσης για την εύρεση της απαραίτητης γωνίας για τον συγχρονισμό στο περιβάλλον Simulink.

Η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων του ελεγκτή PI πραγματοποιείται μέσω της λειτουργίας PID tuning του Simulink, εξασφαλίζοντας γρήγορη απόκριση του συστήματος και ελαχιστοποίηση των ταλαντώσεων και του overshooting.

3.3.3 Υλοποίηση του φίλτρου LCL στο Simulink

Όπως αναλύθηκε και στο αντίστοιχο θεωρητικό κεφάλαιο, το φίλτρο τύπου LCL είναι απαραίτητο για την απόσβεση των αρμονικών που προκύπτουν από την λειτουργία του πολυεπίπεδου αντιστροφέα. Οι διαταραχές αυτές στο ρεύμα προκύπτουν κυρίως από τους ημιαγωγικούς διακόπτες των συνδεδεμένων αντιστροφέων.

Στο περιβάλλον Simulink, το φίλτρο LCL υλοποιείται σύμφωνα με την ονομασία του, δηλαδή με την σε σειρά σύνδεση δυο επαγωγικών στοιχείων και ενός πυκνωτή τοποθετημένου παράλληλα μεταξύ τους. Η αντίστοιχη υλοποίηση απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8. Τα παραπάνω στοιχεία προέρχονται από την βιβλιοθήκη Electrical Elements του Simulink. Η τοποθέτηση του φίλτρου γίνεται αμέσως μετά την έξοδο του πολυεπίπεδου αντιστροφέα και πριν την σύνδεση με το δίκτυο.

Για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση του φίλτρου LCL όμως, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί η σωστή επιλογή των τιμών των επαγωγικών στοιχείων και του πυκνωτή. Ο υπολογισμός του πυκνωτή βασίζεται στην άεργο ισχύ υπό ονομαστικές συνθήκες. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, προτείνεται η άεργος ισχύς που απορροφάται από τον πυκνωτή, να είναι ίση περίπου με το 5% της ονομαστικής ισχύς του συστήματος.

Η σχέση για τον υπολογισμό της αέργου ισχύος δίνεται από την μαθηματική έκφραση:

$$Q = \frac{V_{grid}^2}{\left(\frac{1}{2 * \pi * f * C_f}\right)} \quad (3.1)$$

όπου:

- V_{grid} : είναι η τάση του δικτύου στα 50Hz (V).
- f : είναι η συχνότητα του δικτύου (Hz).
- C_f : είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή του φίλτρου (F).

Με αντικατάσταση στην εξίσωση για τις ονομαστικές τιμές λειτουργίας του συστήματος, προκύπτει ότι η τιμή του πυκνωτή στην βάση ισούται με $C_f = 2.427\mu F$.

Στην συνέχεια, προσδιορίζεται η τιμή της αυτεπαγωγής από την πλευρά του αντιστροφέα L_{inv} , με βάση την μέγιστη επιτρεπτή κυμάτωση του ρεύματος. Η κυμάτωση αυτή περιορίζεται στο 20% της ονομαστικής τιμής του ρεύματος εξόδου.

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης αυτεπαγωγής γίνεται με βάση την παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$L_{inv} = \frac{V_{dc}}{4 * F_{sw} * \Delta I_{max}} \quad (3.2)$$

όπου:

- V_{dc} : είναι η τάση του DC link (V).
- F_{sw} : είναι η διακοπτική συχνότητα (Hz).
- ΔI_{max} : είναι η μέγιστη κυμάτωση του ρεύματος που επιτρέπεται (A).
- L_{inv} : είναι η αυτεπαγωγή από την πλευρά του αντιστροφέα (H).

Με αντικατάσταση των τιμών, προκύπτει ότι $L_{inv} = 4.034 \text{ mH}$.

Η συνολική αυτεπαγωγή του φίλτρου $L_{inv} + L_{grid}$ καθορίζεται, με βάση την μέγιστη επιτρεπτή πτώση τάσης κατά μήκος αυτών των πηνίων. Αυτή η πτώση ορίζεται ως το 10% της ονομαστικής τάσης της λειτουργίας του συστήματος. Η εξίσωση για τον υπολογισμό της συνολικής αυτεπαγωγής δίνεται από την εξής σχέση:

$$V_{L_{inv} + L_{grid}} = I * 2 * \pi * f * (L_{inv} + L_{grid}) \quad (3.3)$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει $L_{inv} + L_{grid} = 6.956 \text{ mH}$, επομένως με απλή αφαίρεση $L_{grid} = 2.926 \text{ mH}$. Από την σχέση που έχει παρατεθεί στο αντίστοιχο θεωρητικό μέρος, η συχνότητα συντονισμού του φίλτρου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{res} = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{L_{inv} + L_{grid}}{L_{inv} * L_{grid} * C f}} \quad (3.4)$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$F_{res} = 2458.7Hz$$

Η συχνότητα συντονισμού του φίλτρου ικανοποιεί την παρακάτω ανισότητα:

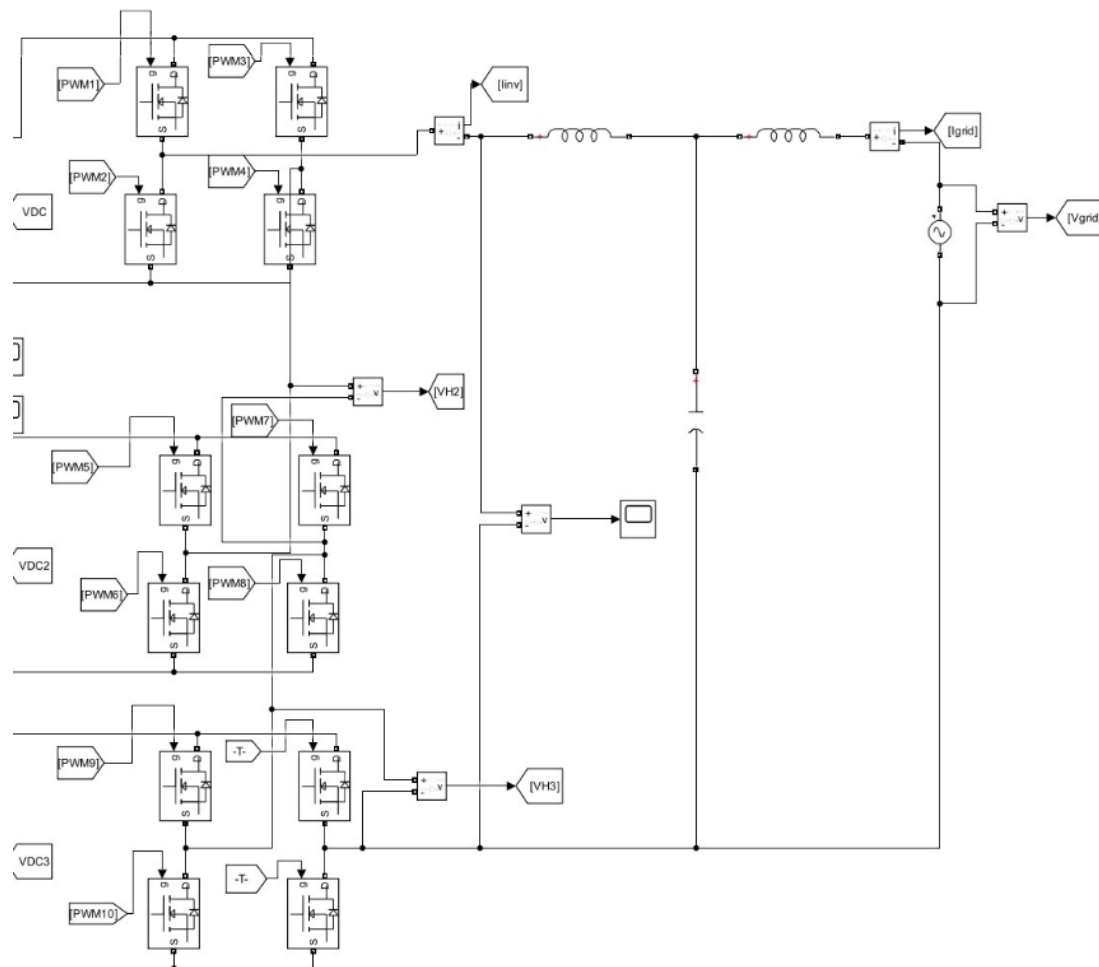
$$10F_g < F_{res} < 0.5 F_{sw} \quad (3.5)$$

όπου:

- F_g : είναι η συχνότητα του δικτύου (H).
- F_{sw} : είναι η διακοπτική συχνότητα (H).
- F_{res} : είναι η συχνότητα συντονισμού του φίλτρου (H).

Οι τιμές των παραμέτρων των στοιχείων του φίλτρου συνοψίζονται στον Πίνακα 3.4.

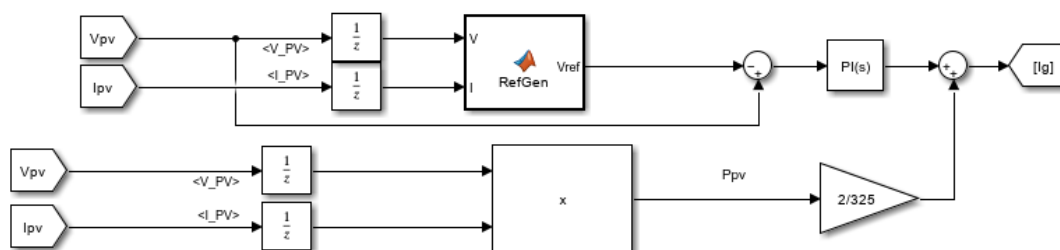
Πίνακας 3.4 Οι παράμετροι του χαμηλοπερατού φίλτρου LCL.	
Πηνίο L_{inv}	4.034 mH
Πηνίο L_{grid}	2.926 mH
Πυκνωτής C_f	2.427 uF
Συχνότητα συντονισμού F_{res}	2458.7 Hz



Σχήμα 3.8 Η υλοποίηση του φίλτρου LCL στο περιβάλλον του Simulink.

3.3.4 Η δομική μονάδα power feed-forward (PFF)

Η δομική μονάδα power feed-forward (PFF) αποτελεί σημαντικό κομμάτι του συνολικού συστήματος ελέγχου, καθώς συμβάλλει καθοριστικά στην ταχύτερη και σταθερότερη σύγκλιση του αλγορίθμου της δομικής μονάδας MPPT. Η πλήρης υλοποίηση της δομικής μονάδας στο περιβάλλον του Simulink παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Η τοπολογία της power feed-forward υλοποιημένη στο περιβάλλον Simulink.

Για την υλοποίηση του PFF (δηλαδή της εξίσωσης 2.10), χρησιμοποιείται ένα μπλοκ πολλαπλασιασμού, λαμβάνοντας ως εισόδους το ρεύμα και την τάση που παράγεται από την κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία. Το αποτέλεσμα αυτού του μπλοκ, είναι η ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και οδηγείται σε ένα μπλοκ ενίσχυσης με συντελεστή $\frac{\sqrt{2}}{V_{acrms}}$. Το παραγόμενο ρεύμα αναφοράς I_f , προστίθεται στην έξοδο ενός PI ελεγκτή, ο οποίος ρυθμίζει την διαφορά μεταξύ της τάσης αναφοράς και της DC τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (δηλαδή την απόκλιση από το σημείο MPP).

3.3.5 Η δομική μονάδα ελέγχου του ρεύματος (PR)

Το τελευταίο τμήμα της δομής ελέγχου του συστήματος, είναι η υλοποίηση ενός PR ελεγκτή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον δυναμικό έλεγχο του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο.

Στο περιβάλλον του Simulink, η υλοποίηση του ελεγκτή ρεύματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10. Ο ελεγκτής PR δέχεται ως είσοδο το σφάλμα ρεύματος, (την διαφορά

μεταξύ του ρεύματος αναφοράς I_{ref} και του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα), το οποίο υλοποιείται με ένα μπλοκ αφαίρεσης.

Το σφάλμα τροφοδοτείται σε ένα μπλοκ ενίσχυσης (K_p), σύμφωνα με την σχέση:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.6)$$

Για τον υπολογισμό του K_p χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$K_p = \frac{L_f}{T_c} \quad (3.7)$$

όπου:

- L_f : είναι η αυτεπαγωγή από την πλευρά του φίλτρου (H).
- T_c : είναι η σταθερά χρόνου του ελεγκτή (s).

Με επιλογή της τιμής σταθεράς χρόνου του ελεγκτή και με την χρήση του εργαλείου PID Tuning του Simulink, υπολογίζεται η τιμή $K_p = 9$.

Ταυτόχρονα, το ίδιο σφάλμα εισέρχεται στον βρόχο για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος στην συχνότητα του δικτύου. Αρχικά, εισέρχεται σε ένα μπλοκ ενίσχυσης (K_r) και στην συνέχεια σε έναν ολοκληρωτή. Η έξοδος αυτή εισάγεται σε ένα ακόμη μπλοκ ενίσχυσης και έναν ακόμη ολοκληρωτή και αποτελεί το κομμάτι της ανάδρασης που ανατροφοδοτεί την είσοδο του ελεγκτή. Η ανάδραση δημιουργεί ένα δεύτερης τάξης σύστημα, με συνάρτηση μεταφοράς.

$$u(t) = K_r \frac{s^2}{s^2 + \omega_o^2} \quad (3.8)$$

Για τον υπολογισμό του κέρδους συντονισμού χρησιμοποιείται η σχέση:

$$G_n = \frac{k_r \omega_n}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad (3.9)$$

$$\text{με } \omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ και } G_n = 0.1.$$

όπου:

- G_n : είναι το κέρδος συντονισμού (Hz).
- ω_n : είναι η φυσική συχνότητα συντονισμού (Hz).
- ω : είναι η γωνιακή συχνότητα του δικτύου (rad/s).

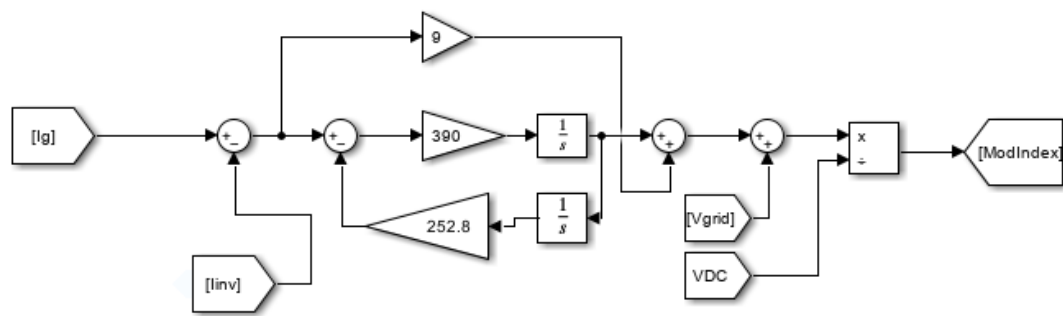
Αντικαθιστώντας, επιλέγεται η τιμή $K_r = 390$.

Τέλος, για τη σωστή λειτουργία του ανατροφοδοτούμενου βρόχου, είναι απαραίτητος ο σωστός ορισμός του μπλοκ ενίσχυσης στο τέλος του βρόχου, που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K = \frac{\omega^2}{k_r} \quad (3.10)$$

Αντικαθιστώντας, επιλέγεται η τιμή $K = 252.8$.

Η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων για τον PR ελεγκτή, επιτρέπει την αποτελεσματική παρακολούθηση του ρεύματος αναφοράς, την ελαχιστοποίησή του σφάλματος και την μείωση των αρμονικών στο ρεύμα που εγχέεται στο δίκτυο.



Σχήμα 3.10 Η υλοποίηση του ελεγκτή ρεύματος στο περιβάλλον του Simulink.

4. Αποτελέσματα

Η προσομοίωση των προτεινόμενων τοπολογιών πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Simulink του MATLAB. Για την αξιολόγηση, τόσο των τοπολογιών, όσο και του φωτοβολταϊκού συστήματος, υπό διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας, εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

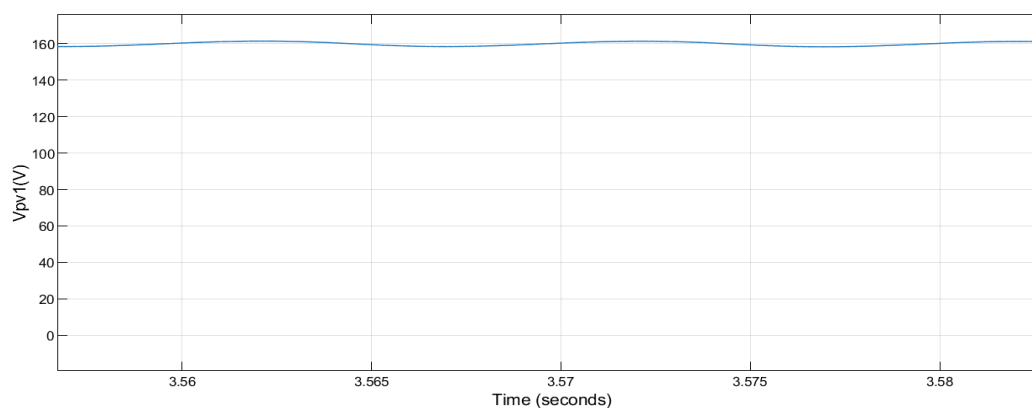
Τα 3 σενάρια λειτουργίας αυτά είναι:

- 1^ο σενάριο λειτουργίας: και οι τρεις φωτοβολταϊκές συστοιχίες λειτουργούν υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία έντασης 1000 W/m^2 .
- 2^ο σενάριο λειτουργίας: λειτουργία της πρώτης φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε σειρά στα 1000 W/m^2 , της δεύτερης φωτοβολταϊκής συστοιχίας στα 750 W/m^2 και της τρίτης στα 500 W/m^2 .
- 3^ο σενάριο λειτουργίας: λειτουργία της πρώτης φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε σειρά στα 1000 W/m^2 , της δεύτερης φωτοβολταϊκής συστοιχίας στα 600 W/m^2 και της τρίτης στα 400 W/m^2 .

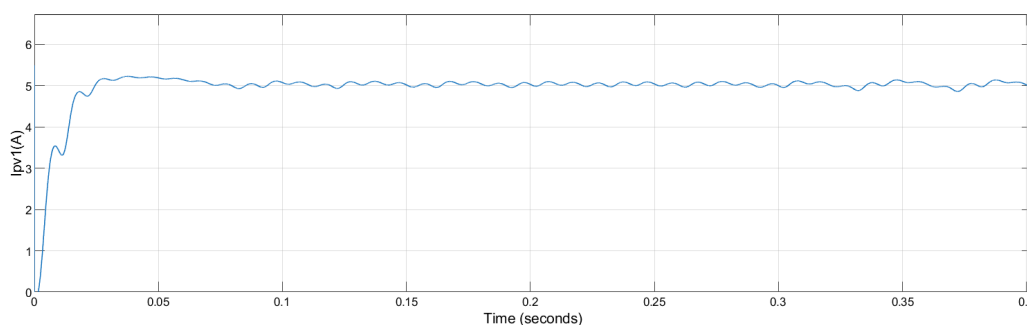
Στόχος κάθε σεναρίου, είναι η λειτουργία κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο σημείο μέγιστης ισχύος της και η σωστή εξαγωγή των κατάλληλων κυματομορφών, που θα επιβεβαιώσουν την ορθή λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

4.1 1^ο Σενάριο Λειτουργίας

Στο συγκεκριμένο σενάριο, κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία βρίσκεται υπό συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας (1000 W/m^2). Υπό αυτές τις συνθήκες, κάθε συστοιχία αποδίδει συγκεκριμένες τιμές τάσης και ρεύματος, όπως φαίνονται στα Σχήματα 4.1 και 4.2, αντίστοιχα. Το γινόμενο αυτών των δύο μεγεθών προσδιορίζει την ισχύ εξόδου της κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

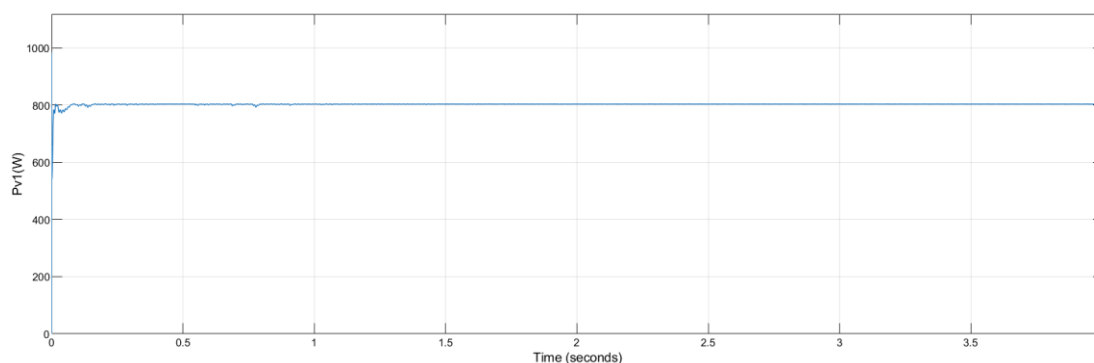


Σχήμα 4.1 Η κυματομορφή της τάσης που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες.



Σχήμα 4.2 Η κυματομορφή του ρεύματος που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες.

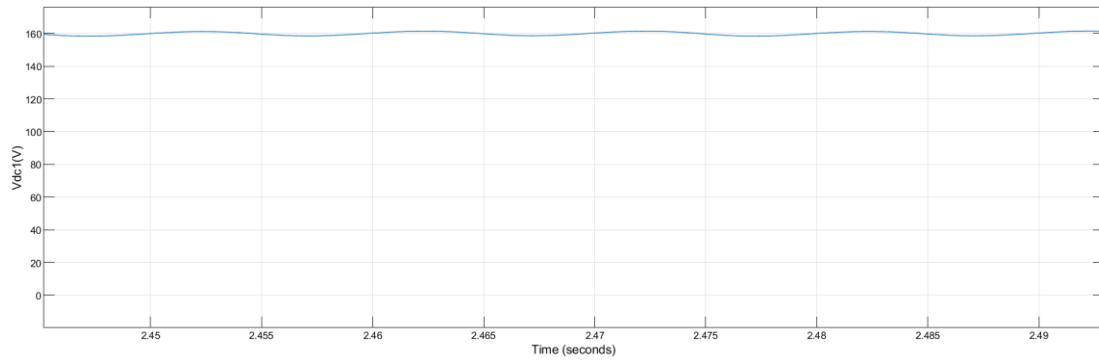
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, η αναμενόμενη μέγιστη ισχύ λειτουργίας κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας υπό συνθήκες ομοιόμορφης ακτινοβολίας είναι περίπου 804 W. Η επιτυχής σύγκλιση της ισχύος σε αυτή την τιμή αποτυπώνεται στη χρονική εξέλιξη του Σχήματος 4.3. Όπως φαίνεται, η ισχύς συγκλίνει γρήγορα και με μεγάλη σταθερότητα στην θεωρητικά αναμενόμενη τιμή. Δεδομένου ότι και οι τρεις φωτοβολταϊκές συστοιχίες δέχονται την ίδια ακτινοβολία, η συμπεριφορά τους είναι πανομοιότυπη. Συνεπώς, για λόγους συντομίας, παρουσιάζεται μόνο ένα αντιπροσωπευτικό γράφημα για την ισχύ εξόδου.



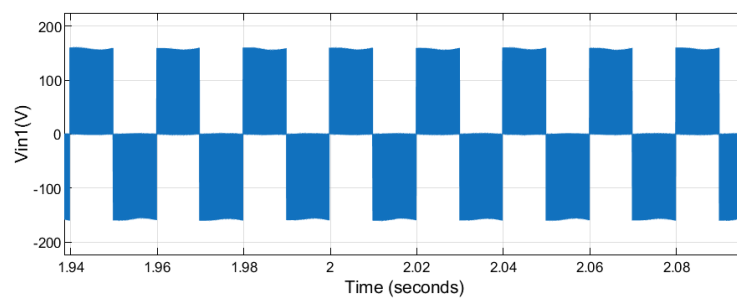
Σχήμα 4.3 Η γραφική παράσταση της ισχύος για την πρώτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Η σταθερότητα της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος επιβεβαιώνεται περαιτέρω από την κυματομορφή της τάσης στα άκρα του κάθε DC link πυκνωτή. Η τάση DC link διατηρείται κοντά στην απαιτούμενη ονομαστική τιμή, με κυμάτωση μικρότερη του 3%. (Σχήμα 4.4)

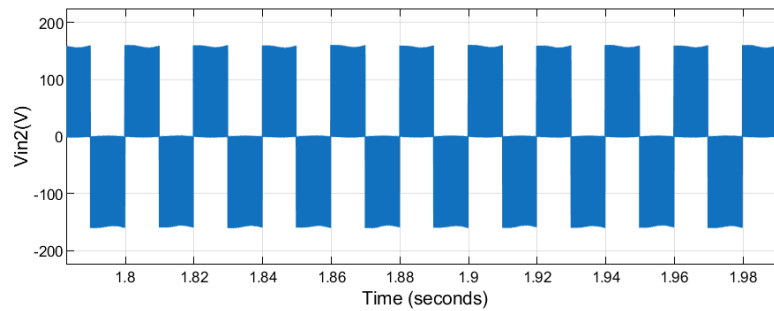
Η σταθερότητα της συγκεκριμένης κυματομορφής αποδεικνύει την σωστή λειτουργία του αντιστροφέα, που επιβεβαιώνεται περαιτέρω στα Σχήματα 4.5, 4.6 και 4.7, αντίστοιχα, όπου καταγράφονται τα τρία επίπεδα εξόδου τάσης της γέφυρας κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας, V_{dc} , 0, $+V_{dc}$, με το σωστό πλάτος.



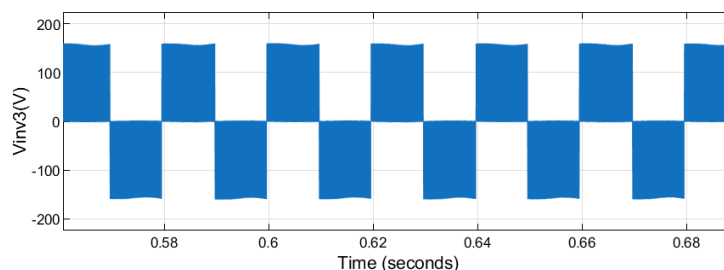
Σχήμα 4.4 Η κυματομορφή της τάσης του πυκνωτή DC link.



Σχήμα 4.5 Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου της γέφυρας της πρώτης φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



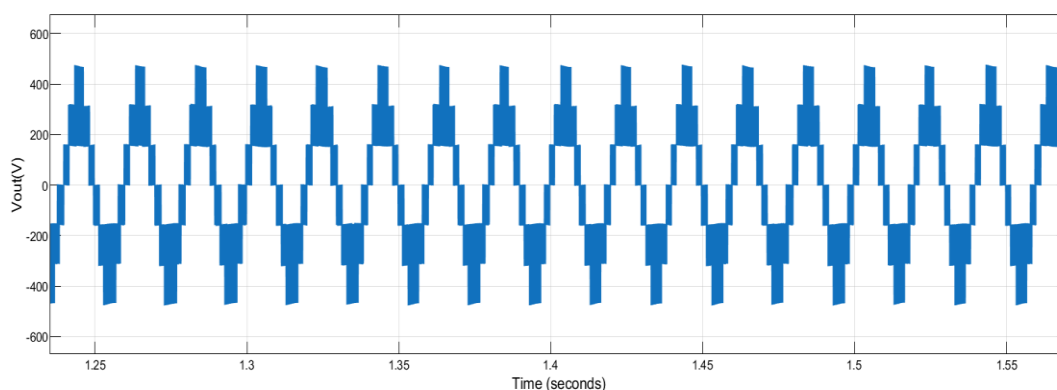
Σχήμα 4.6 Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου της γέφυρας της δεύτερης φωτοβολταϊκής συστοιχίας .



Σχήμα 4.7 Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου της γέφυρας της τρίτης φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

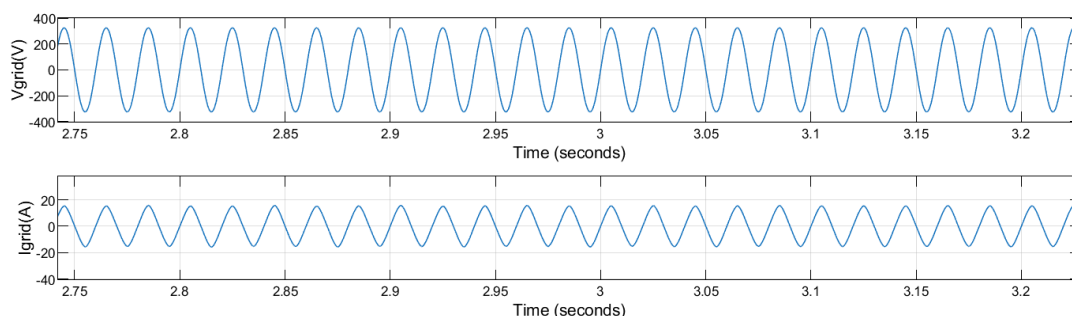
Ο συνδυασμός των τριών επιπέδων τάσης, που παράγεται από κάθε έναν από τους τρεις αντιστροφείς, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, διαμορφώνει την επιθυμητή κυματομορφή του αντιστροφέα 7 επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8.

Τα επτά επίπεδα είναι της μορφής $\{-3V_{dc}, -2V_{dc}, -V_{dc}, 0, +V_{dc}, +2V_{dc}, +3V_{dc}\}$ με το σωστό πλάτος τάσης, το οποίο είναι τρεις φορές το πλάτος του ενός αντιστροφέα σύμφωνα με τις θεωρητικές προβλέψεις.



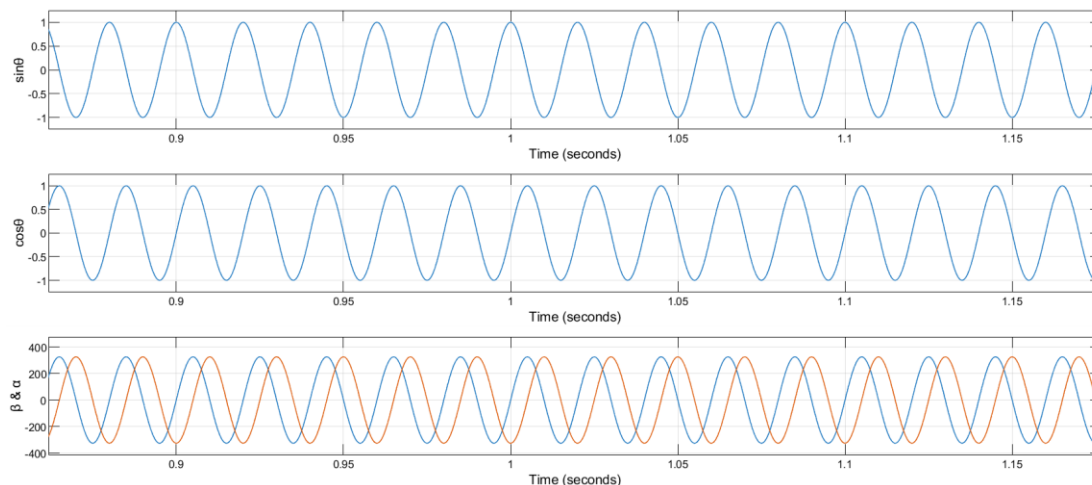
Σχήμα 4.8 Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο και της τάσης του. Τα δύο αυτά σήματα πρέπει να είναι ημιτονοειδή και συγχρονισμένα, που είναι άμεση συνέπεια του να βρίσκονται στην ίδια φάση. Η γραφική παράσταση επιβεβαιώνει την καλή ποιότητα ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο, καθώς παρατηρούνται δύο ημιτονοειδή σήματα, χωρίς σημαντικές παραμορφώσεις, που δεν έχουν φασική διαφορά.



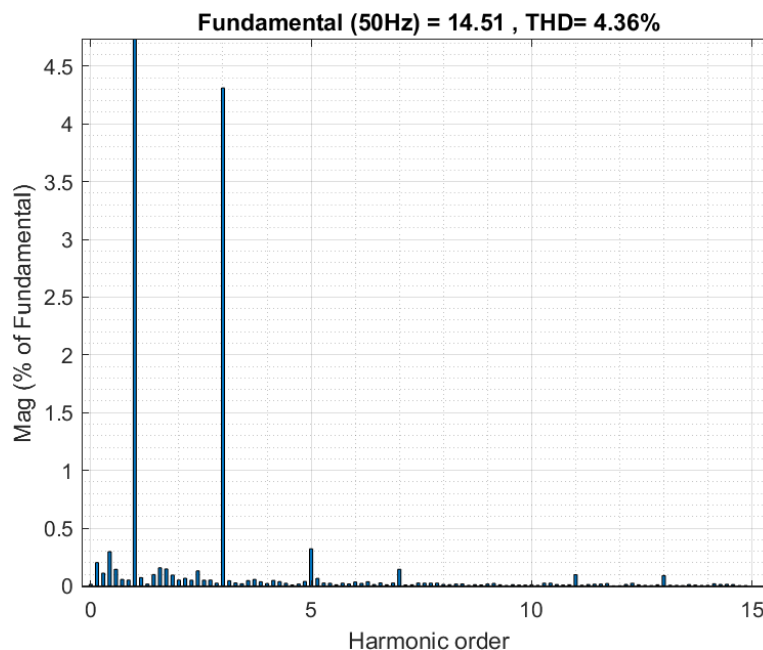
Σχήμα 4.9 Οι γραφικές παραστάσεις της τάσης και του ρεύματος δικτύου του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Ο σχηματισμός του ρεύματος δικτύου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην σωστή λειτουργία της δομικής μονάδας του PLL. Η σωστή του λειτουργία επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 4.10, που απεικονίζονται αντίστοιχα οι γραφικές παραστάσεις του $\sin\theta$ και του $\cos\theta$, όπου θ αντιπροσωπεύει την γωνία συγχρονισμού, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις των μεταβλητών α και β , που διατηρούν μεταξύ τους την απαιτούμενη φασική διαφορά 90° . Η τριγωνομετρική συνάρτηση του $\cos\theta$, μέσω του πολλαπλασιασμού της με το παραγόμενο ρεύμα, επιτυγχάνει τον συγχρονισμό με το δίκτυο. Ο συγχρονισμός αυτός αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.10 Οι γραφικές παραστάσεις των $\sin\theta$, $\cos\theta$, α και β που προκύπτουν από την δομική μονάδα του PLL.

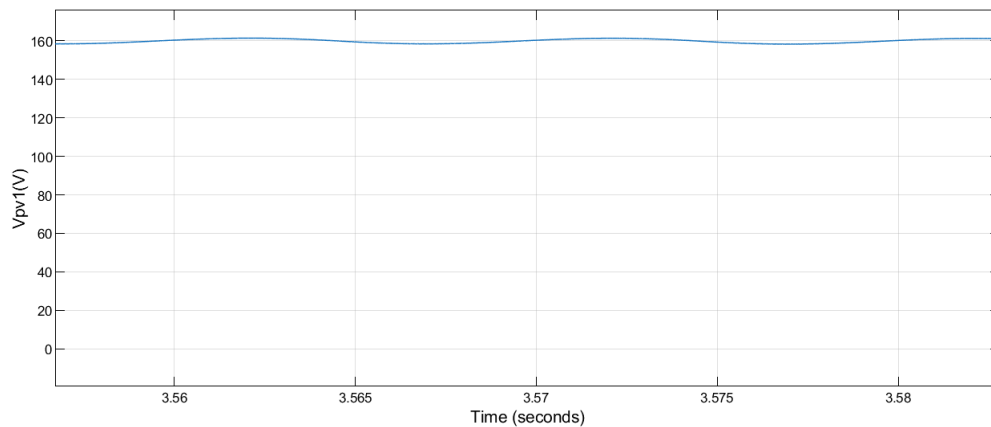
Για την εξασφάλιση της ποιότητας ισχύος στο δίκτυο, είναι απαραίτητο να αξιολογείται η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος, καθώς οι υψηλές τιμές μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ο συντελεστής THD_g του ρεύματος δικτύου καταγράφεται στο Σχήμα 4.11. Παρατηρείται ότι η αρμονική στην θεμελιώδη συχνότητα στα 50 Hz, είναι η επικρατέστερη και στην συνέχεια επιτυγχάνεται απόσβεση των υπόλοιπων αρμονικών. Ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης ανέρχεται σε ποσοστό 4.36%, ικανοποιώντας την συνθήκη του επιτρεπτού ορίου THD ρεύματος, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEEE 1547 και IEEE 519-2014 (<5%), διασφαλίζοντας την καλή ποιότητα ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο.



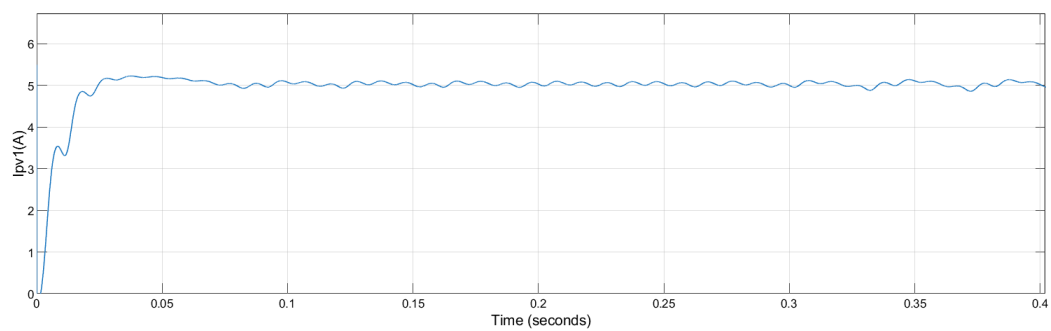
Σχήμα 4.11 Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος του δικτύου στο πρώτο σενάριο λειτουργίας.

4.2 2^ο Σενάριο Λειτουργίας

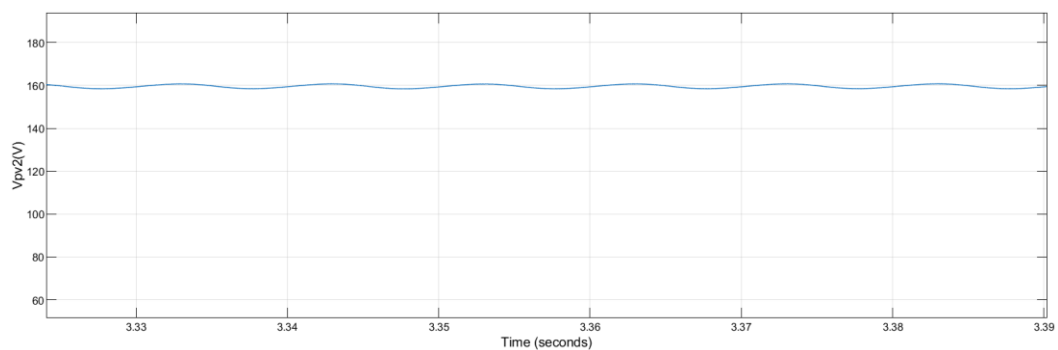
Στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας, το φωτοβολταϊκό σύστημα προσομοιώνεται υπό ανομοιόμορφη κατανομή ηλιακής ακτινοβολίας στις τρεις φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Η διαφορά στην κατανομή της ακτινοβολίας επηρεάζει άμεσα το παραγόμενο ρεύμα της κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας, καθώς όσο μειώνεται η προσπίπτουσα ακτινοβολία, μειώνεται και το ρεύμα της. Η τάση κατά κύριο λόγο, παραμένει κοντά στις προηγούμενες τιμές, παρουσιάζοντας μικρές μειώσεις καθώς μειώνεται η ακτινοβολία. Στα Σχήματα 4.12-4.17 που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι κυματομορφές για την τάση και το ρεύμα της κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας για τις συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας.



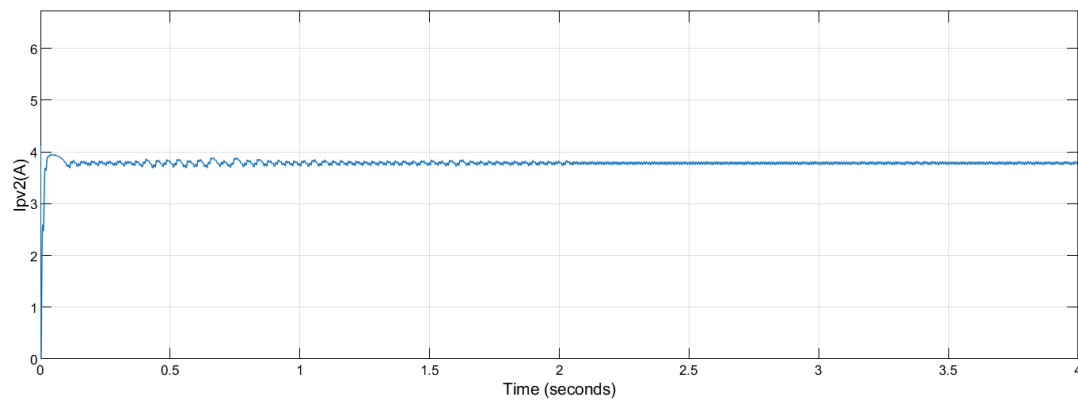
Σχήμα 4.12 Η κυματομορφή της τάσης που παράγεται από την πρώτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



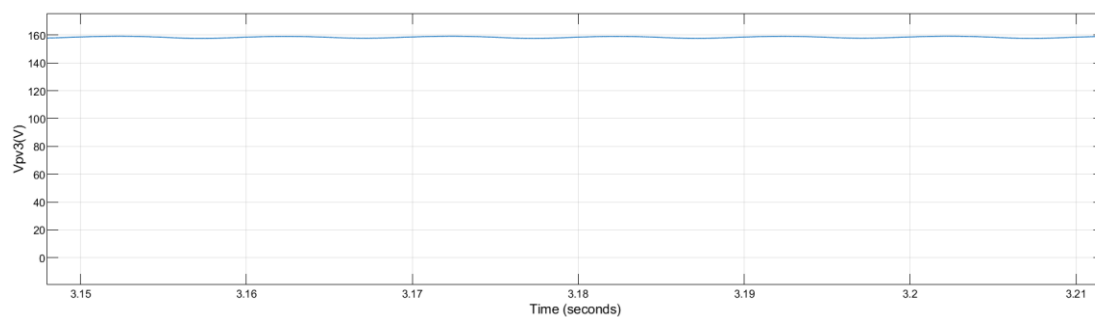
Σχήμα 4.13 Η κυματομορφή του ρεύματος που παράγεται από την πρώτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



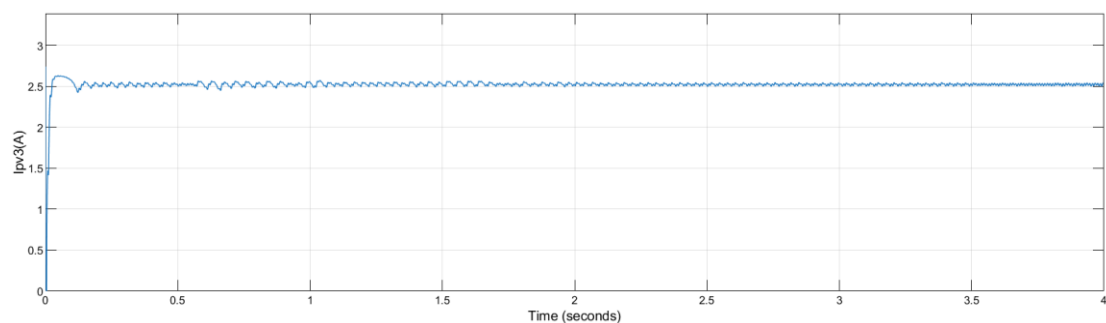
Σχήμα 4.14 Η κυματομορφή της τάσης που παράγεται από την δεύτερη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



Σχήμα 4.15 Η κυματομορφή του ρεύματος που παράγεται από την δεύτερη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



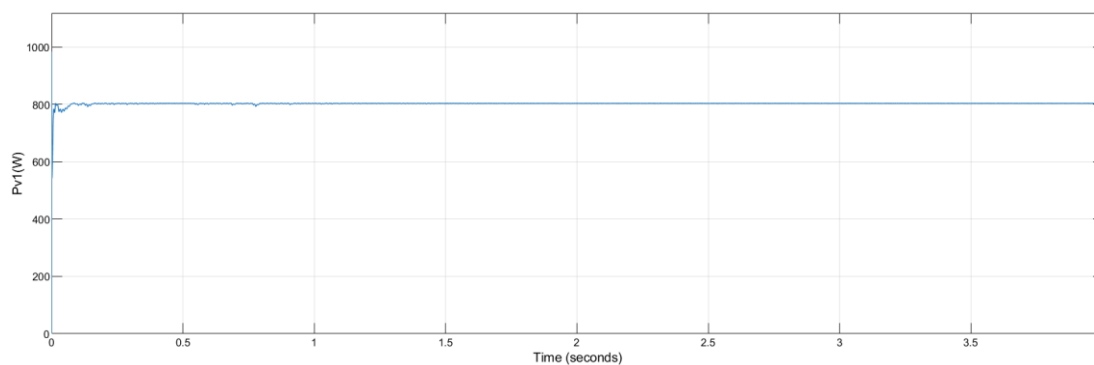
Σχήμα 4.16 Η κυματομορφή της τάσης που παράγεται από την τρίτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



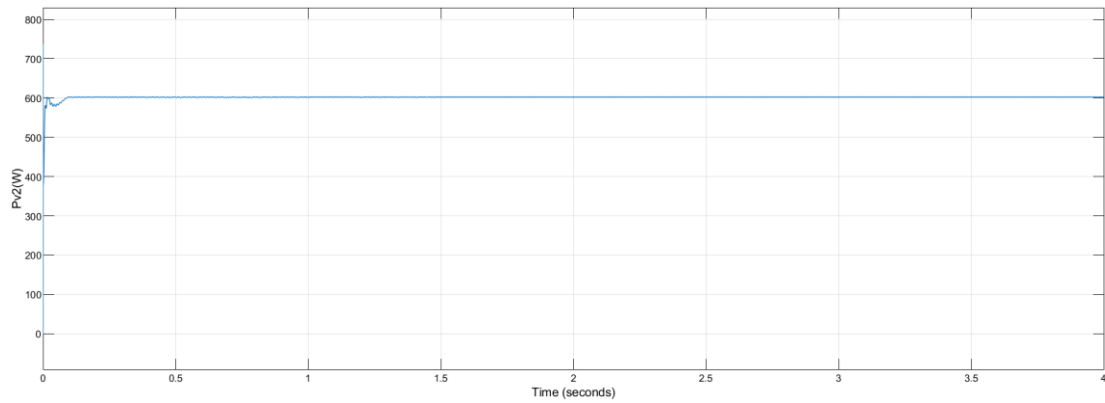
Σχήμα 4.17 Η κυματομορφή του ρεύματος που παράγεται από την τρίτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Σε σύγκριση λοιπόν, με τα γραφήματα του προηγούμενου σεναρίου λειτουργίας, η ανομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζει άμεσα την παραγόμενη ισχύ. Η ισχύς που παράγεται από την μονάδα του MPPT παραμένει μέγιστη σε σχέση με τις δυνατές συνθήκες για την κάθε συστοιχία, με μικρότερη τιμή, όπως και είναι φυσιολογικό στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες που δέχονται μικρότερη ποσότητα ακτινοβολίας. Οι γραφικές παραστάσεις της σύγκλισης της μονάδας του MPPT για κάθε συστοιχία παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.18, 4.19 και 4.20. Από τις καμπύλες παρατηρείται η ομαλή σύγκλιση σε μικρό χρόνο απόκρισης κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας προς τις μέγιστες τιμές ισχύος 806W, 603W και 402W αντίστοιχα.

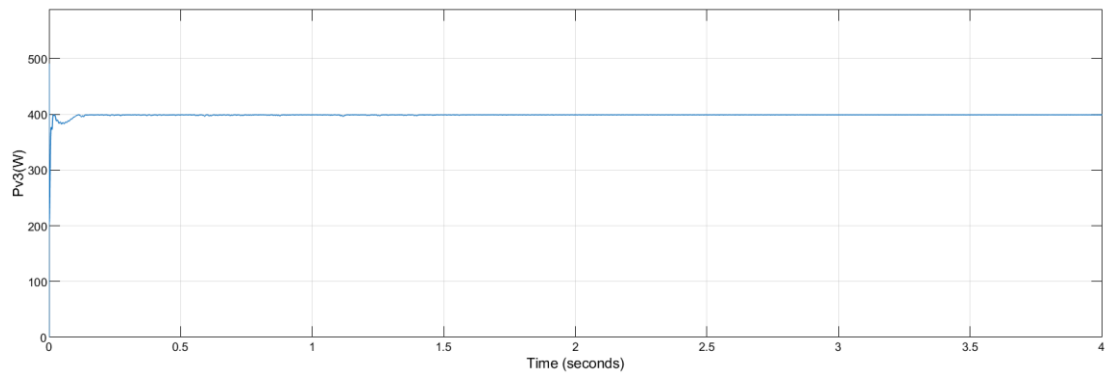
Το γεγονός ότι η μέγιστη ισχύς εξάγεται με μεγάλη ακρίβεια, ακόμη και σε διαφορετικές συνθήκες, επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του αλγορίθμου P&O, αλλά και ολόκληρου του φωτοβολταϊκού συστήματος.



Σχήμα 4.18 Η γραφική παράσταση της ισχύος για την πρώτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



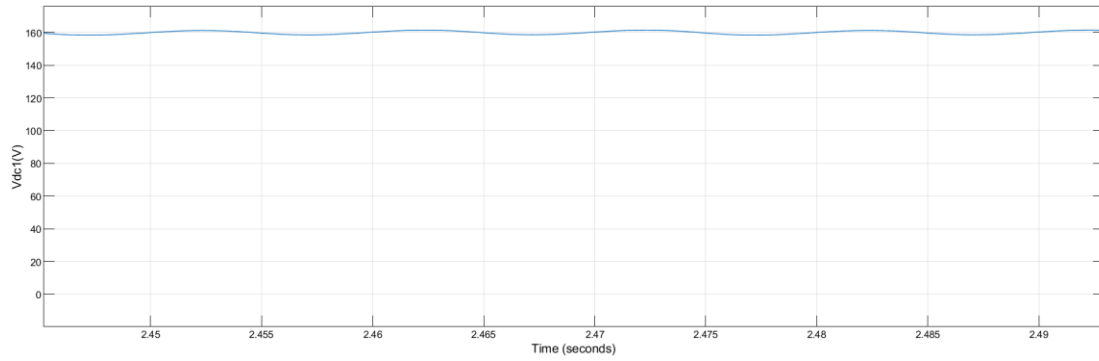
Σχήμα 4.19 Η γραφική παράσταση της ισχύος για την δεύτερη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



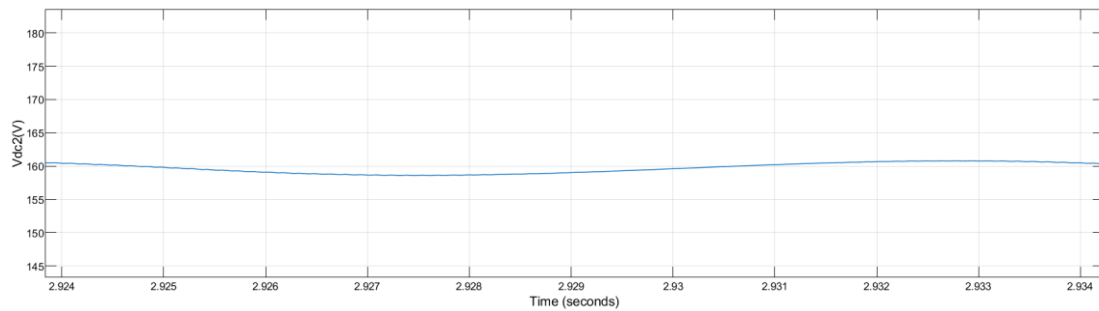
Σχήμα 4.20 Η γραφική παράσταση της ισχύος για την τρίτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Ακόμη, παρατηρείται από τις γραφικές παραστάσεις των τάσεων των πυκνωτών DC-link, πως οι τιμές παραμένουν σταθερές και συγκλίνουν ομαλά προς την ονομαστική τιμή λειτουργίας, γεγονός που αποτυπώνεται στα Σχήματα 4.21, 4.22 και 4.23.

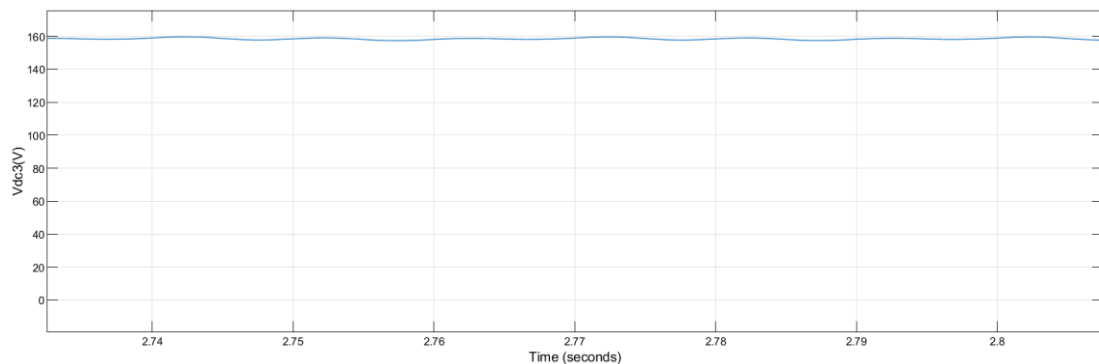
Παρά τις συνθήκες ανομοιόμορφης ακτινοβολίας και κατά συνέπεια το μειωμένο ρεύμα, η τάση διατηρείται στα ίδια λειτουργικά επίπεδα, καταδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα του συστήματος ελέγχου στην διατήρηση σταθερότητας των DC συνθηκών λειτουργίας.



Σχήμα 4.21 Η κυματομορφή της τάσης του πυκνωτή DC link της πρώτης σε σειρά φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



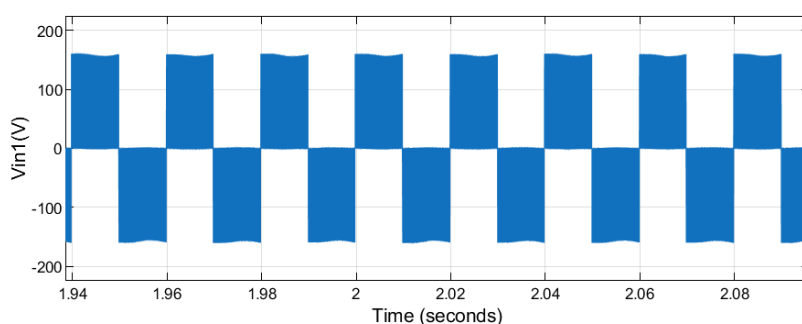
Σχήμα 4.22 Η κυματομορφή της τάσης του πυκνωτή DC link της δεύτερης σε σειρά φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



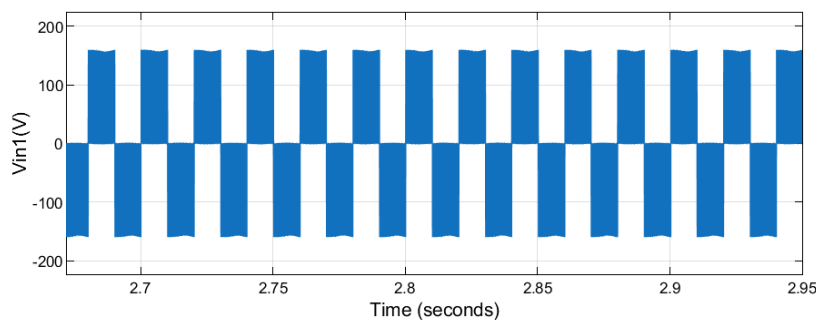
Σχήμα 4.23 Η κυματομορφή της τάσης του πυκνωτή DC link της τρίτης σε σειρά φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Τα παραπάνω συμπεράσματα καταδεικνύουν την σωστή λειτουργία των DC-AC αντιστροφέων. Η μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένες φωτοβολταϊκές συστοιχίες έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της παραγόμενης ισχύος. Επομένως, η τάση λειτουργίας στο MPP των επηρεαζόμενων φωτοβολταϊκών συστοιχιών είναι μειωμένη. Για παράδειγμα, όταν η ακτινοβολία πέφτει στα 750 W/m^2 , η τάση MPP μειώνεται κατά $0.87V_{rms}$ ανά συστοιχία, ενώ σε συνθήκες 500 W/m^2 , η μείωση φτάνει στα $1.84V_{rms}$ ανά συστοιχία σε σύγκριση με τις ιδανικές συνθήκες ακτινοβολίας 1000 W/m^2 . Επομένως, σε συνθήκες ανομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας στις συστοιχίες, η τάση εξόδου του επηρεαζόμενου αντιστροφέα είναι μειωμένη.

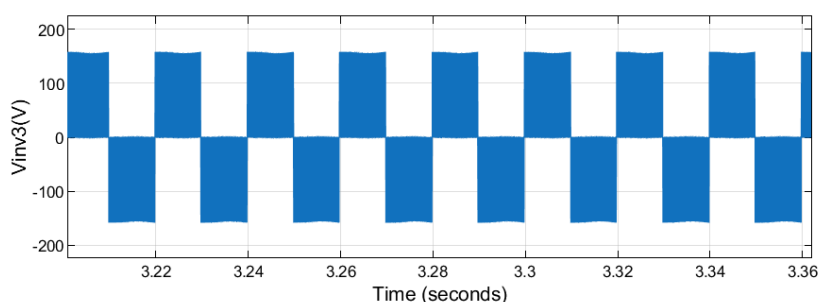
Παρά τη μείωση της ισχύος συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών συστοιχιών, χάρη στην ικανότητα του συστήματος να λειτουργεί πάντα στην μέγιστη ισχύ, επιτυγχάνεται η ορθή του λειτουργία. Οι κυματομορφές των αντιστροφέων DC-AC παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.24, 4.25 και 4.26.



Σχήμα 4.24 Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου της γέφυρας της πρώτης φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



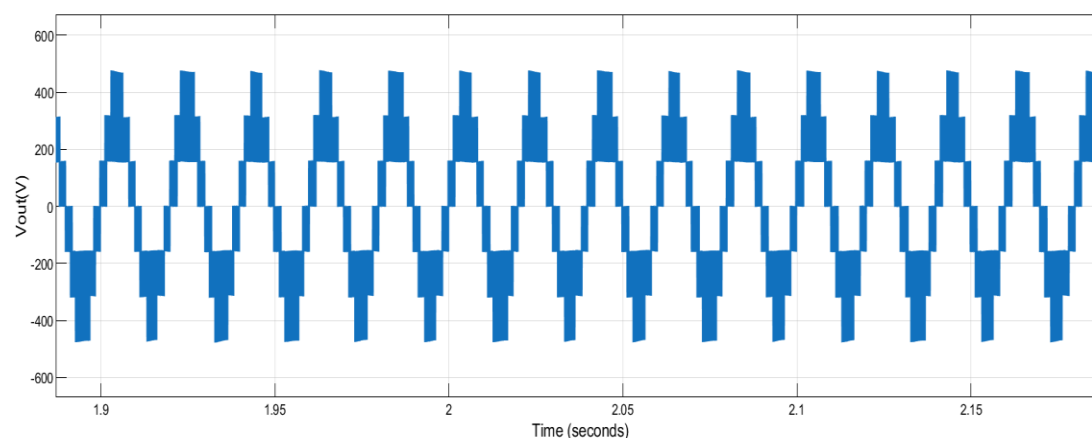
Σχήμα 4.25 Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου της γέφυρας της δεύτερης φωτοβολταϊκής συστοιχίας. .



Σχήμα 4.26 Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου της γέφυρας της τρίτης φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Η κυματομορφή εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα, παρά την ανομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, διατηρεί τις σωστές μεταβάσεις. Ωστόσο, η συνολική τάση εξόδου είναι μειωμένη σε σύγκριση με την περίπτωση ομοιόμορφης ακτινοβολίας 1000 W/m^2 , λόγω της χαμηλότερης ισχύος που παράγουν οι επιμέρους συστοιχίες υπό συνθήκες μειωμένης ακτινοβολίας. Παρόλα αυτά, χάρη στην ικανότητα του συστήματος να λειτουργεί στο MPP για κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία, η μορφή της κυματομορφής εξόδου διατηρείται λειτουργικά σωστή, επιβεβαιώνοντας την αποδοτική λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος, ανεξαρτήτως των συνθηκών ανομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας.

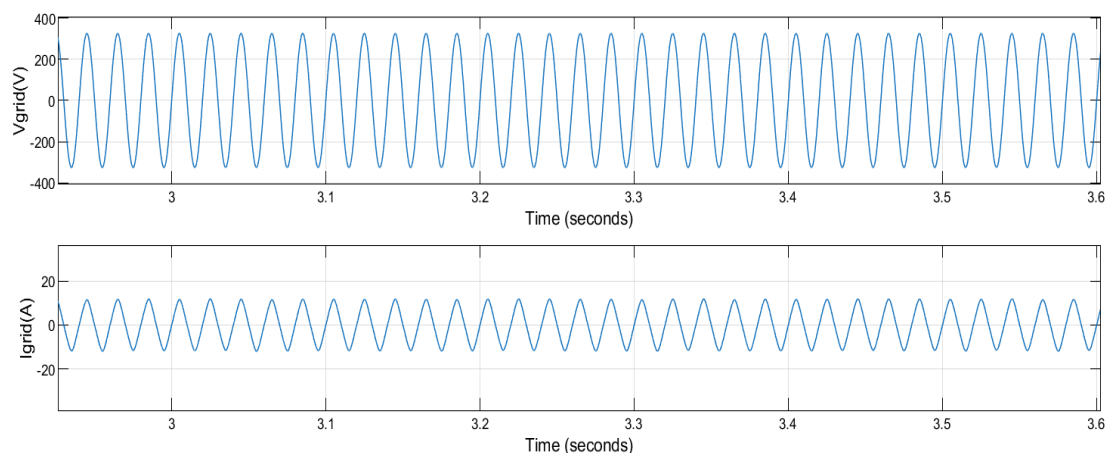
Η γραφική παράσταση της τελικής τάσης εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.27, αποτυπώνει ξεκάθαρα τα επτά απαιτούμενα επίπεδα λειτουργίας.



Σχήμα 4.27 Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του πολυεπίπεδου αντιστροφέα υπό συνθήκες ανομοιόμορφης ακτινοβολίας.

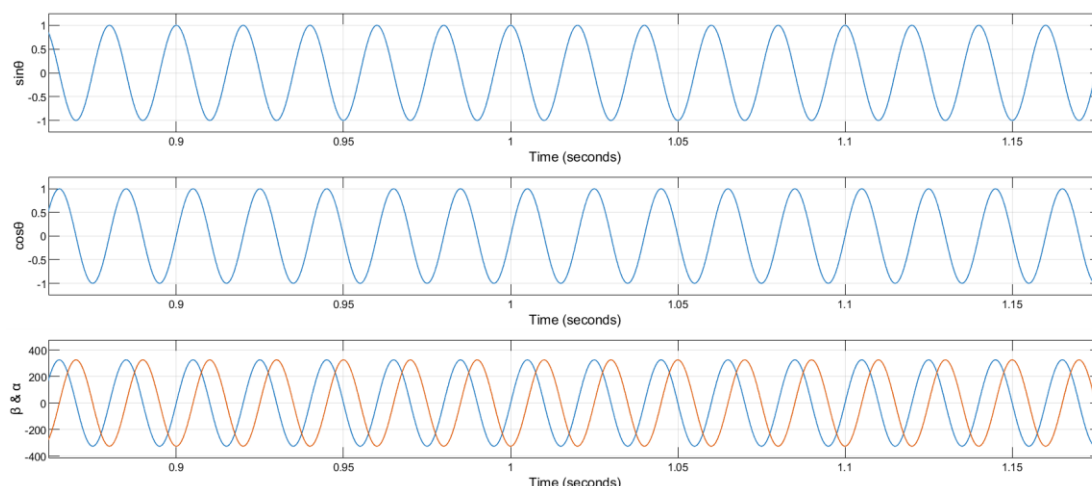
Το ρεύμα εξόδου προς το δίκτυο είναι μειωμένου πλάτους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω της μεμονωμένης χαμηλότερης ισχύος που λειτουργούν οι σύστοιχες δύο και τρία αντίστοιχα.

Ωστόσο η κυματομορφή του ρεύματος διατηρεί μορφή ημιτονοειδούς σήματος, χωρίς σημαντικές διαταραχές και παραμένει συγχρονισμένη με την τάση του δικτύου, όπως παρατηρείται από το ίδιο σχήμα.



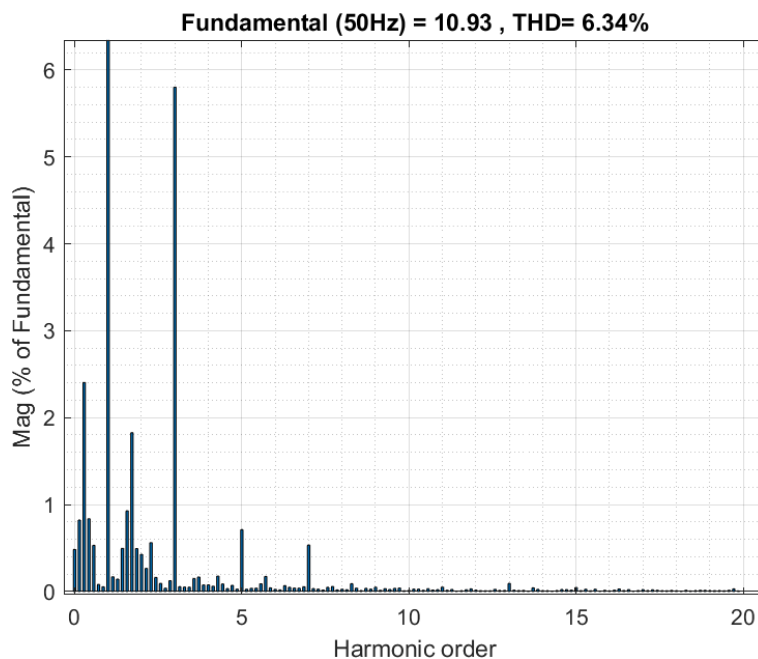
Σχήμα 4.28 Οι γραφικές παραστάσεις της τάσης και του ρεύματος δικτύου του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Για την παραγωγή συγχρονισμένου ρεύματος με το δίκτυο, ευθύνεται η δομική μονάδα του PLL, που η σωστή της λειτουργία τεκμηριώνεται με το διάγραμμα του Σχήματος 4.29. Στο αντίστοιχο σχήμα απεικονίζονται τα σήματα α και β , τα οποία αποτελούν τις ορθογώνιες συνιστώσες της τάσης του δικτύου, με φασική διαφορά 90 μοιρών. Οι συνιστώσες αυτές, με την βοήθεια της δομικής μονάδας PLL, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της γωνίας συγχρονισμού με το δίκτυο. Η γωνία αυτή χρησιμοποιείται για την δημιουργία των τριγωνομετρικών συναρτήσεων, με κυριότερη την συνάρτηση $\cos\theta$, η οποία μέσω του πολλαπλασιασμού της με το παραγόμενο ρεύμα, εξασφαλίζει τον συγχρονισμό με το δίκτυο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.28.



Σχήμα 4.29 Οι γραφικές παραστάσεις των $\sin\theta$, $\cos\theta$, α και β που προκύπτουν από την δομική μονάδα του PLL.

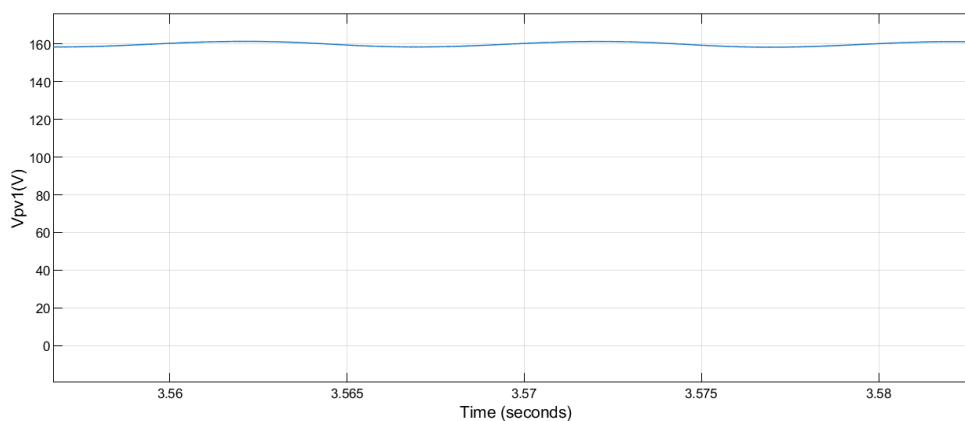
Στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας, η τιμή του THD ανέρχεται στο 6.34%, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.30. Η τιμή του είναι αυξημένη σε σύγκριση με την περίπτωση της ομοιόμορφης ακτινοβολίας (4.36%), κάτι που αποδίδεται στην ανισοκατανομή ισχύος μεταξύ των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, που προκαλεί ήπιες διαταραχές στην κυματομορφή του ρεύματος. Παρόλα αυτά η τιμή του THD που παρατηρείται στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας, δεν αποκλίνει σημαντικά από την αντίστοιχη τιμή που καταγράφηκε στην περίπτωση ομοιόμορφης ακτινοβολίας και επιβεβαιώνει την καλή ποιότητα παρεχόμενης ισχύς στο δίκτυο.



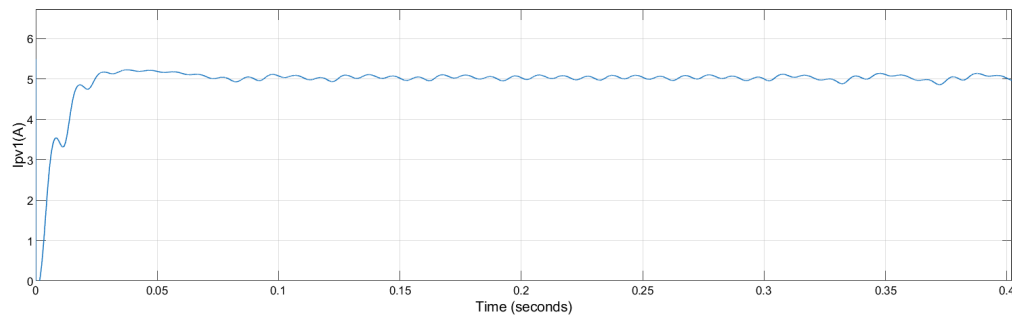
Σχήμα 4.30 Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος του δικτύου στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας.

4.3 3^ο Σενάριο Λειτουργίας

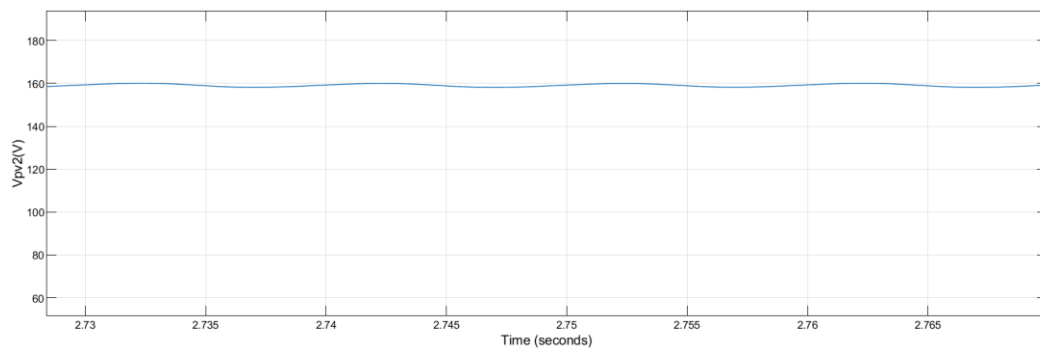
Στο τελευταίο σενάριο οι τρεις φωτοβολταϊκές συστοιχίες λειτουργούν υπό άνισες συνθήκες ακτινοβολίας λαμβάνοντας 1000 W/m^2 , 600 W/m^2 και 400 W/m^2 , αντίστοιχα. Στα Σχήματα 4.31-4.36 που ακολουθούν απεικονίζονται οι κυματομορφές των τάσεων και τα ρεύματα των αντίστοιχων φωτοβολταϊκών συστοιχιών.



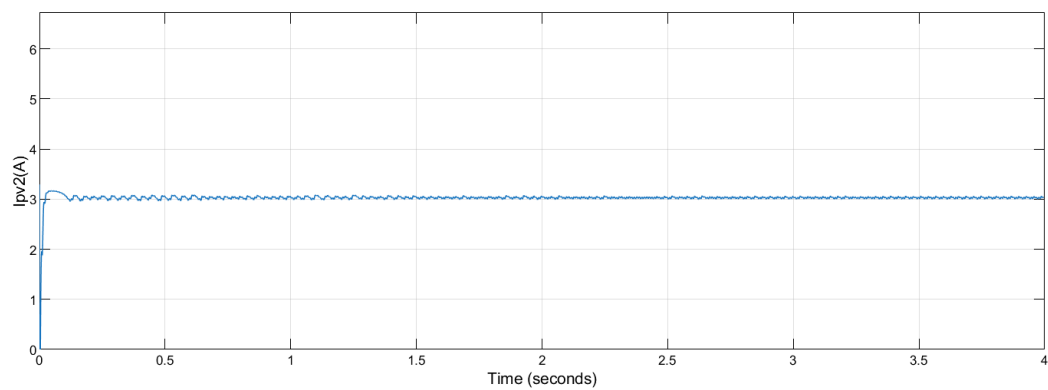
Σχήμα 4.31 Η κυματομορφή της τάσης που παράγεται από την πρώτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



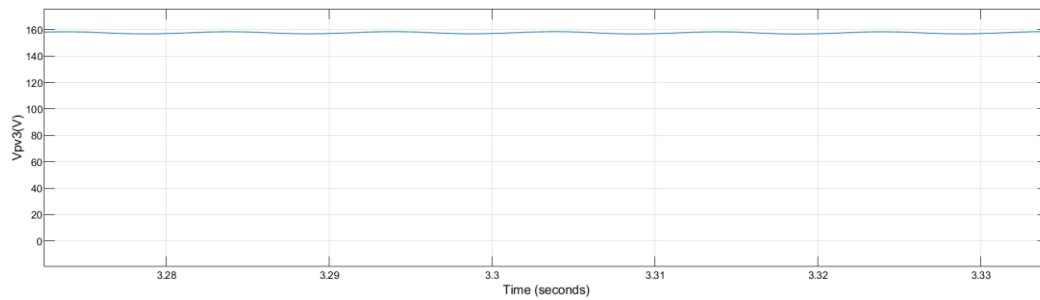
Σχήμα 4.32 Η κυματομορφή του ρεύματος που παράγεται από την πρώτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



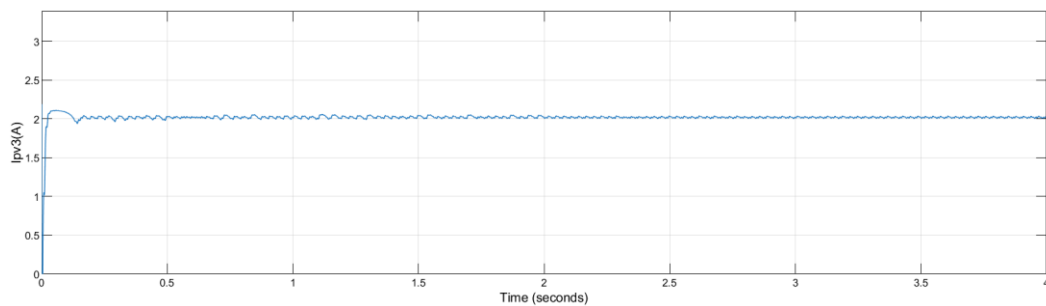
Σχήμα 4.33 Η κυματομορφή της τάσης που παράγεται από την δεύτερη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



Σχήμα 4.34 Η κυματομορφή του ρεύματος που παράγεται από την δεύτερη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

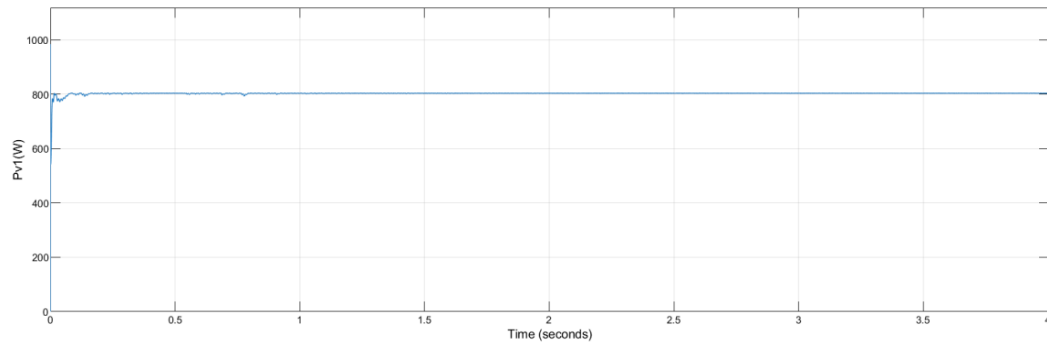


Σχήμα 4.35 Η κυματομορφή της τάσης που παράγεται από την τρίτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

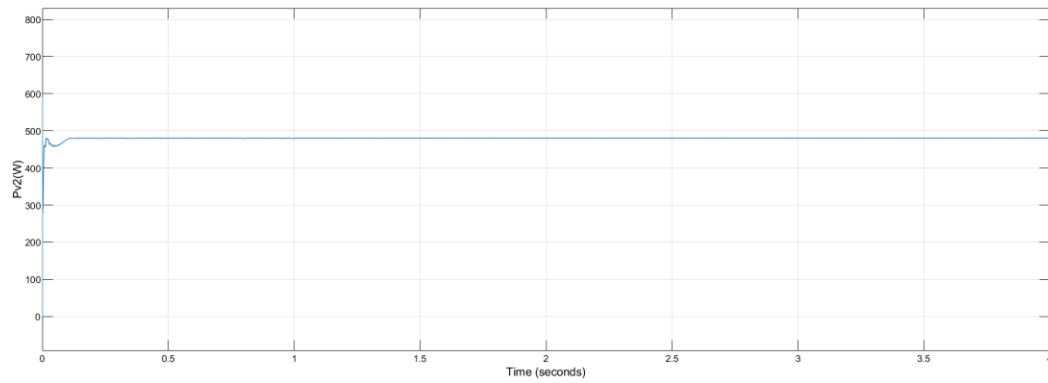


Σχήμα 4.36 Η κυματομορφή του ρεύματος που παράγεται από την τρίτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

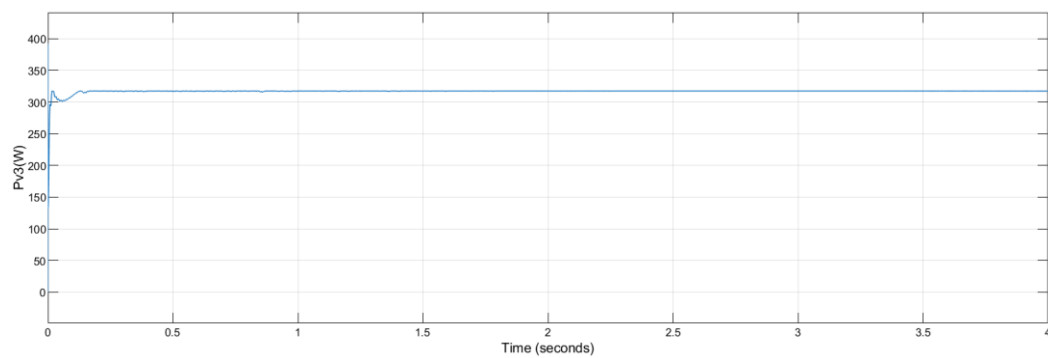
Παρατηρείται εκ νέου η σταθερή λειτουργία του συστήματος, καθώς η τάση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών παραμένει κοντά στην ονομαστική τιμή, ενώ η μείωση του ρεύματος στις λιγότερο φωτισμένες συστοιχίες είναι απόλυτα αναμενόμενη. Επιπλέον, ο αλγόριθμος P&O συνεχίζει να εντοπίζει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας για κάθε συστοιχία ξεχωριστά, όπως αποτυπώνεται στα Σχήματα 4.37, 4.38 και 4.39, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.37 Η γραφική παράσταση της ισχύος για την πρώτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

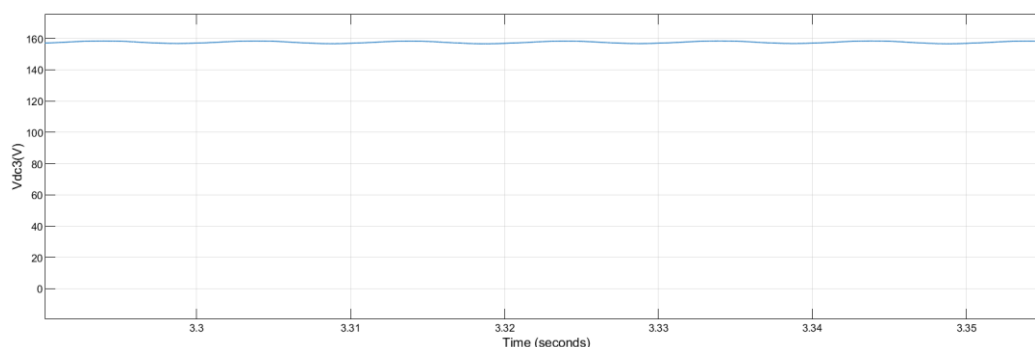


Σχήμα 4.38 Η γραφική παράσταση της ισχύος για την δεύτερη φωτοβολταϊκή συστοιχία.



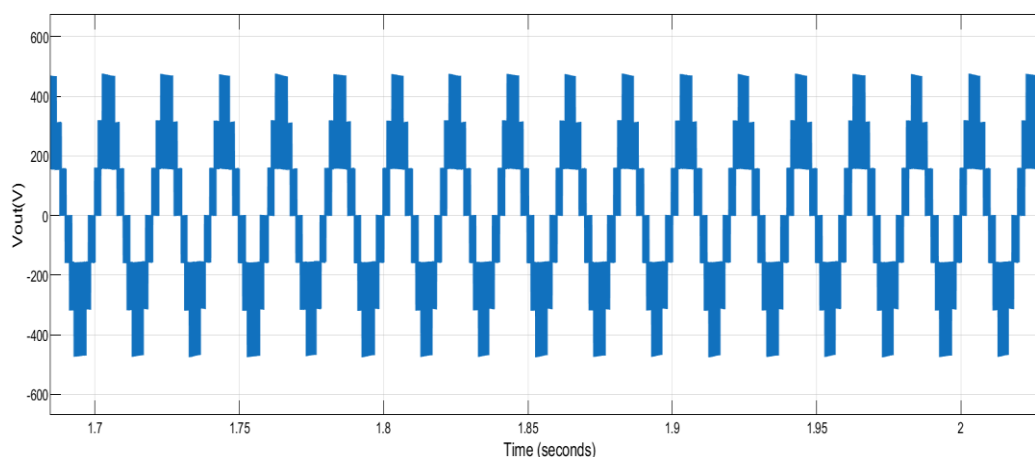
Σχήμα 4.39 Η γραφική παράσταση της ισχύος για την τρίτη φωτοβολταϊκή συστοιχία.

Οι τάσεις των πυκνωτών DC-link παρουσιάζουν υψηλό βαθμό σταθερότητας, με χαμηλό ποσοστό κυμάτωσης, εξασφαλίζοντας την σωστή λειτουργία του πολυεπίεδου αντιστροφέα. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4.40 παρουσιάζεται η τάση του πυκνωτή DC-link της τρίτης φωτοβολταϊκής συστοιχίας.



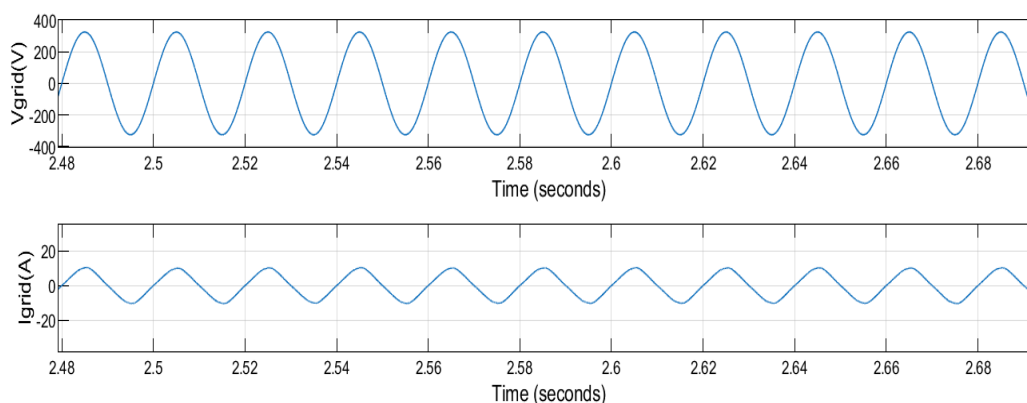
Σχήμα 4.40 Η κυματομορφή της τάσης του πυκνωτή DC-link της τρίτης σε σειρά φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Η κυματομορφή του πολυεπίεδου αντιστροφέα παραμένει στα σωστά επτά επίπεδα τάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.41. Το πλάτος της τάσης εξόδου, είναι αντίστοιχα μειωμένο, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο σενάριο λειτουργίας. Το αποτέλεσμα αυτό παρατηρείται, λόγω της μειωμένης παραγόμενης ισχύος των επηρεαζόμενων φωτοβολταϊκών συστοιχιών από την μειωμένη προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

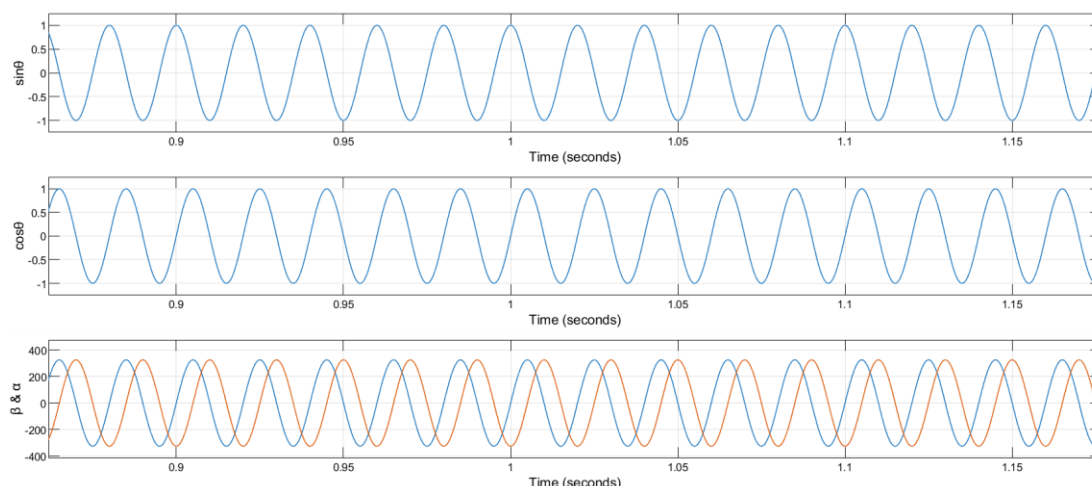


Σχήμα 4.41 Η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου του πολυεπίεδου αντιστροφέα υπό συνθήκες ανομοιόμορφης ακτινοβολίας.

Το ρεύμα εξόδου προς το δίκτυο είναι και πάλι μειωμένου πλάτους όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.42 και διατηρεί μορφή ημιτονοειδούς σήματος χωρίς σημαντικές διαταραχές, παραμένοντας συγχρονισμένο με την τάση του δικτύου. Για τον σχηματισμό του σωστού σήματος ρεύματος, ευθύνεται η δομική μονάδα του PLL, που η σωστή του λειτουργία τεκμηριώνεται με το διάγραμμα του Σχήματος 4.43. Στο γράφημα απεικονίζεται το σήμα β , το οποίο αντιπροσωπεύει την τάση του δικτύου, καθώς και το σήμα α , που αναπαράγει το σήμα β με φασική διαφορά 90 μοιρών. Οι δύο ορθογώνιες συνιστώσες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της κατάλληλης γωνίας θ . Η γωνία συγχρονισμού θ χρησιμοποιείται για την παραγωγή των σημάτων $\sin\theta$ και $\cos\theta$. Το σήμα $\cos\theta$, μέσω του πολλαπλασιασμού του με το παραγόμενο ρεύμα, επιτυγχάνει το συγχρονισμό με το δίκτυο, όπως έχει περιγραφεί και στα προηγούμενα κεφάλαια.

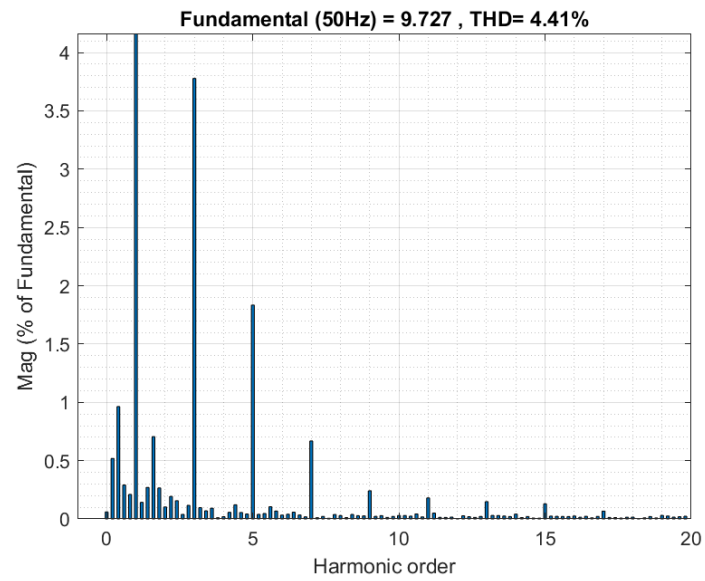


Σχήμα 4.42 Οι γραφικές παραστάσεις της τάσης και του ρεύματος δικτύου του φωτοβολταϊκού συστήματος.



Σχήμα 4.43 Οι γραφικές παραστάσεις των $\sin\theta$, $\cos\theta$, α και β που προκύπτουν από την δομική μονάδα του PLL.

Στο τελευταίο σενάριο λειτουργίας, η τιμή του THD ανέρχεται στο 4.41%, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.44. Η τιμή του είναι αυξημένη, κάτι το οποίο οφείλεται και πάλι στην ανομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Η τιμή του THD παραμένει όμως κοντά στην τιμή 4.36%, που καταγράφηκε για τις συνθήκες ομοιόμορφης κατανομής ηλιακής ακτινοβολίας, επιβεβαιώνοντας την ορθή λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος και την καλή ποιότητα παρεχόμενης ισχύος στο δίκτυο. Τέλος, το THD παραμένει κάτω από τα όρια που τίθενται από τα διεθνή πρότυπα IEEE 1547 και IEEE 519-2014 (<5%).



Σχήμα 4.44 Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος του δικτύου στο τρίτο σενάριο λειτουργίας.

5. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία, επικεντρώθηκε στην ανάλυση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, συνδεδεμένου στο δίκτυο μέσω ενός πολυεπίπεδου αντιστροφέα, τύπου Cascaded H-Bridge. Στόχος ήταν η επαλήθευση της λειτουργίας του συστήματος, υπό ομοιόμορφες αλλά και ανομοιόμορφες συνθήκες προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και η αποτίμηση της ποιότητας του ρεύματος και της ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, συμπεραίνεται ότι το σύστημα, ανταποκρίθηκε επαρκώς στις απαιτήσεις λειτουργίας του. Ο αλγόριθμος P&O που χρησιμοποιήθηκε στη δομική μονάδα MPPT, λειτούργησε αποτελεσματικά, οδηγώντας κάθε φωτοβολταϊκή συστοιχία στο αντίστοιχο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Η συμβολή του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτυγχάνει την παρακολούθηση του MPP ανεξαρτήτως εξωτερικών συνθηκών, ακόμα και σε περιπτώσεις ανομοιόμορφης ακτινοβολίας. Έτσι διασφαλίζεται η μέγιστη εκμετάλλευση της παραγόμενης ισχύος από κάθε επιμέρους συστοιχία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η εξαγωγή της ισχύος από την κάθε φωτοβολταϊκή μονάδα, επιτεύχθηκε με ικανοποιητική ταχύτητα απόκρισης, χάρη στην μονάδα ‘Power Feed-Forward’. Παρά τις διαφορετικές συνθήκες ακτινοβολίας που είχαν ως αποτέλεσμα την μεμονωμένη μείωση του ρεύματος συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών συστοιχιών, η τάση εξόδου του κάθε αντιστροφέα διατηρήθηκε σταθερή και με σωστά επίπεδα τάσης. Άμεσο αποτέλεσμα της σωστής λειτουργίας του αντιστροφέα, κάθε φωτοβολταϊκής συστοιχίας ήταν η σωστή τάση εξόδου του συνολικού πολυεπίπεδου αντιστροφέα, με μορφοποίηση επτά επιπέδων επιβεβαιώνοντας την

ορθή λειτουργία της πολυεπίπεδης αρχιτεκτονικής για το φωτοβολταϊκό σύστημα. Όλα αυτά επιτεύχθηκαν χωρίς την χρήση ενός DC-DC μετατροπέα, για την αύξηση της τάσης πριν την είσοδο στον πολυεπίπεδο μετατροπέα. Ένα ακόμη μέτρο για την σωστή λειτουργία του συστήματος, αποτελεί η ποιότητα του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο. Με χρήση του συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD), ως βασικό μέτρο αξιολόγησης της ποιότητας του ρεύματος, οι αριθμητικές τιμές που προέκυψαν, βρίσκονται κάτω του επιτρεπτού ορίου του 5% σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Στις περιπτώσεις ανομοιομόρφης ακτινοβολίας παρατηρήθηκε μικρή αύξηση, της τάξης του 1% περίπου, με τον συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης, να παραμένει όμως εντός των επιθυμητών ορίων, με εξαίρεση μια συγκεκριμένη συνθήκη. Το γεγονός, ότι ανεξαρτήτως των εξωτερικών συνθηκών οι τιμές του THD, παραμένουν χαμηλές, αποδεικνύει την παροχή υψηλής ποιότητας ρεύματος, με χαμηλή παραμόρφωση. Συνολικά, η μελέτη κατέδειξε την ικανότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος που μελετήθηκε, να λειτουργεί στην μέγιστη δυνατή του απόδοση, προσφέροντας ευελιξία στις εξωτερικές συνθήκες μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας και παρέχοντας ταυτόχρονα σταθερότητα στην τάση εξόδου και υψηλή ποιότητα στο ρεύμα που παρέχεται στο δίκτυο. Σε μελλοντικές μελέτες, θα μπορούσε να εξεταστεί η χρήση πολυεπίπεδου μετατροπέα με την χρήση περισσότερων γεφυρών συνδεδεμένων σε σειρά, προκειμένου να διερευνηθεί η λειτουργία του συστήματος για μεγάλες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Επιπλέον προτείνεται η εύρεση ενός πιο προηγμένου αλγορίθμου MPPT, που θα είναι βασισμένος στην τεχνητή νοημοσύνη, για την βελτιστοποίηση της απόδοσης της δομικής μονάδας MPPT, αλλά και τη μείωση του χρόνου απόκρισης του συστήματος.

6. Βιβλιογραφία

[1] Cecati, C., et al. "A Passivity-Based Multilevel Active Rectifier with Adaptive Compensation for Traction Applications." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 5, Sept. 2003, pp. 1404–1413.

<https://doi.org/10.1109/TIA.2003.816552>.

[2] Ciobotaru, Mihai, et al. "Control of Single-Stage Single-Phase PV Inverter." *EPE Journal*, vol. 16, no. 3, Sept. 2006, pp. 20–26.

<https://doi.org/10.1080/09398368.2006.11463624>.

[3] de Abreu Mateus, Tiago Henrique, et al. "Distributed MPPT scheme for grid connected operation of photovoltaic system using cascaded H-bridge multilevel converter under partial shading." *2017 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, 2017, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SPEC.2017.8333660>.

[4] Dehedkar, Madhura N., and Subhash Vitthalrao Murkute. "Optimization of PV System using Distributed MPPT Control." *2018 International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*, IEEE, 2018, pp. 216–220. <https://doi.org/10.1109/SYSMART.2018.8746931>.

[5] Dell'Aquila, Antonio, et al. "Overview of PI-Based Solutions for the Control of DC Buses of a Single-Phase H-Bridge Multilevel Active Rectifier." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 3, 2008, pp. 857–866. <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.921405>.

[6] Hasan, Nor Shahida, et al. "Reviews on multilevel converter and modulation techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, Dec. 2017, pp. 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.163>.

[7] Kannan, Nadarajah, and Divagar Vakeesan. "Solar Energy for Future World: - A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, Sept. 2016, pp. 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>.

[8] Krismadinata, et al. "Photovoltaic Module Modeling Using Simulink/Matlab." *Procedia Environmental Sciences*, vol. 17, 2013, pp. 537–546.

<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.069>.

[9] Li, Yufei, et al. "Generalized Theory of Phase-Shifted Carrier PWM for Cascaded H-Bridge Converters and Modular Multilevel Converters." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 2, June 2016, pp. 589–605. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2476699>.

[10] Reshmi, N., and M. Nandakumar. "Grid-connected PV system with a seven-level inverter." *ICNGIS 2016*, IEEE, 2016, pp. 1–6.

<https://doi.org/10.1109/ICNGIS.2016.7854065>.

[11] Teodorescu, R., et al. "A new control structure for grid-connected LCL PV inverters with zero steady-state error and selective harmonic compensation." *APEC '04*, vol. 1, IEEE, 2004, pp. 580–586. <https://doi.org/10.1109/APEC.2004.1295865>.

[12] Villanueva, E., et al. "Control of a Single-Phase Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Grid-Connected Photovoltaic Systems." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, Nov. 2009, pp. 4399–4406

. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2029579>.

[13] Xiao, Bailu, et al. "Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter with Distributed MPPT for Grid-Connected Applications." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, Mar. 2015, pp. 1722–1731.

<https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2354396>.

[14] Xiao, B., F. Filho, and L. M. Tolbert. "Single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter with non-active power compensation for grid-connected photovoltaic generators." *ECCE 2011*, IEEE, 2011, pp. 2733–2737. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2011.6064135>

[15] Xiao, B., K. Shen, J. Mei, F. Filho, and L. M. Tolbert. "Control of cascaded H-bridge multilevel inverter with individual MPPT for grid-connected photovoltaic generators." *ECCE 2012*, IEEE, 2012, pp. 3715–3721. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342474>.

[16] Mateus, T.H.d.A., et al. "VSG Control Applied to Seven-Level PV Inverter for Partial Shading Impact Abatement." *Energies*, vol. 15, 2022, 6409.

<https://doi.org/10.3390/en15176409>.

[17] Fatima, Khemili & Bouhali, Omar & Lefouili, Moussa & Chaib, Lakhdar & El-Fergany, Attia & Agwa, Ahmed. (2023). Design of Cascaded Multilevel Inverter and Enhanced MPPT Method for Large-Scale Photovoltaic System Integration. *Sustainability*. 15. 9633.

<https://doi.org/10.3390/su15129633>.

[18] Adamas-Pérez, H., et al. "A New LCL Filter Design Method for Single-Phase Photovoltaic Systems Connected to the Grid via Micro-Inverters." *Technologies*, vol. 12, 2024, 89.

<https://doi.org/10.3390/technologies12060089>.

[19] Nyamathulla, S., and D. Chittathuru. "A Review of Multilevel Inverter Topologies for Grid-Connected Sustainable Solar Photovoltaic Systems." *Sustainability*, vol. 15, 2023, 13376.

<https://doi.org/10.3390/su151813376>.

[20] Kameswari, Y., and Obbu Sekhar. "Fuzzy Logic Controlled Harmonic Suppressor in Cascaded Multilevel Inverter." *IJPEDS*, vol. 7, 2016, pp. 303–310. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v7.i2.pp303-310>.

[21] Agarwal, Vivek. "DC-AC converters (inverters)." *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, edited by Jorge García, Elsevier, 2023, pp. 36–45. ScienceDirect, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00158-6>.

[22] Ançay, Antonin Stampbach, and Jessy. "Synchronous Reference Frame (SRF) PLL." Imperix, 9 April 2021, <https://imperix.com/doc/implementation/synchronous-reference-frame-pll>.

[23] Cherix, Antonin Stampbach, and Nicolas. "SOGI PLL." Imperix, 22 March 2021, <https://imperix.com/doc/implementation/sogi-pll>.

[24] "Client Challenge." Monolithic Power Systems,

<https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/Z`Z`-ac-converters/pulse-width-modulation-techniques>.

[25] "Full-Bridge Inverter - an overview." ScienceDirect Topics,

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/full-bridge-inverter>. Accessed 19 April 2025.

[26] "Sinusoidal Pulse Width Modulation - an overview." ScienceDirect Topics, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sinusoidal-pulse-width-modulation>.

[27] Panda, Ramaprasad and Tripathy, Ashok. (2012). Evolution of Single Phase Photovoltaic Inverters. *International Journal of Power System Operation and Energy Management*. 1. 19-24.

<https://doi.org/10.47893/IJPSOEM.2012.1041>

[28] Chatterjee, Aditi & Mohanty, Kanungo. (2018). "Current control strategies for single phase grid integrated inverters for photovoltaic applications -a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, September 2018, pp. 554–69.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.115>.

[29] Kahlane, H., Hassaine, L., and Larbes, C. (2015). “LCL filter design with passive damping for photovoltaic grid connected systems.” 2015 6th International Renewable Energy Congress (IREC) (pp. 1–6). IEEE.

<https://doi.org/10.1109/IREC.2015.7110945>