



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ Έξυπνα Δίκτυα με ΑΠΕ-Υψηλές Τάσεις.**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ Συστημάτων Ισχύος, Ανανεώσιμης και**  
**Κατανεμημένης Παραγωγής**

---

**«Ανάλυση και βελτίωση λειτουργίας/απόδοσης  
φωτοβολταϊκής μονάδας συνδεδεμένης στο δίκτυο»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**του φοιτητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και**  
**Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του**  
**Πανεπιστημίου Πατρών**

**(Στρατάκης Σταύρος του Γεωργίου)**

**Αριθμός Μητρώου:1066687**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΙΔΗΣ**

**ΠΑΤΡΑ - ΜΑΡΤΙΟΣ 2024**

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.

### Στρατάκης Σταύρος

© 2024 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος, το σύνολο της εργασίας αποτελεί πρωτότυπο έργο, παραχθέν από τον Στρατάκη Σταύρο, και δεν παραβάζει δικαιώματα τρίτων καθ' οποιονδήποτε τρόπο. Αν η εργασία περιέχει υλικό, το οποίο δεν έχει παραχθεί από την ίδιο, αυτό είναι ευδιάκριτο και αναφέρεται ρητώς εντός του κειμένου της εργασίας ως προϊόντος εργασίας τρίτου, σημειώνοντας με παρομοίως σαφή τρόπο τα στοιχεία περίπτωση χρήσης αυτούσιων γραφικών αναπαραστάσεων, εικόνων, γραφημάτων κλπ., έχει λάβει τη χωρίς περιορισμούς άδεια του κατόχου των πνευματικών δικαιωμάτων για την συμπεριληψη και επακόλουθη δημοσίευση του υλικού αυτού

## **ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ**

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με τίτλο

### **Ανάλυση και βελτίωση λειτουργίας/απόδοσης φωτοβολταϊκής μονάδας συνδεδεμένης στο δίκτυο**

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας  
Υπολογιστών

#### **ΣΤΑΥΡΟΥ ΣΤΡΑΤΑΚΗ ΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

Αριθμός Μητρώου: 1066687

Παρουσιάστηκε δημόσια στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και  
Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

4/3/2024

και εξετάστηκε από την ακόλουθη εξεταστική επιτροπή:

Αντώνιος Αλεξανδρίδης, Καθηγητής, HMTY (επιβλέπων)

Γεώργιος Κωνσταντόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής, HMTY (μέλος  
επιτροπής)

Παναγής Βοβός, Επίκουρος Καθηγητής, HMTY (μέλος επιτροπής)

Ο Επιβλέπων

Ο Διευθυντής του Τομέα

Αντώνιος Αλεξανδρίδης  
Καθηγητής

Επαμεινώνδας Μητρονίκας  
Αναπληρωτής Καθηγητής



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Αντώνιο Αλεξανδρίδη που μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση του ενδιαφέροντος αυτού θέματος και μου παρείχε βοήθεια σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της. Είναι υπόδειγμα καθηγητού και προέδρου και αποτελεί παράδειγμα προς όλους μας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον υποψήφιο διδάκτορα Ζάιντ Αλεξάκη , για τον χρόνο και την ενέργεια που αφέρωσε , βοηθώντας με σε μία πληθώρα ζητημάτων που κλήθηκα να αντιμετωπίσω κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Η υπομονή του και η βοήθεια που μου παρείχε κάθε φορά που του ζητήθηκε ήταν ανεκτίμητη και αποτελεί αναπόσπαστο αρωγό σε αυτή μου την προσπάθεια. Του εύχομαι μια λαμπρή ακαδημαϊκή πορεία .

Τελευταίο και σημαντικότερο , θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου την οικογένεια μου , για την ψυχική , οικονομική και οποιαδήποτε άλλη υποστήριξη μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια. Δίχως την συμπαράσταση , την κατανόηση, την πίστη και την βοήθεια τους δεν θα μπορούσα να διαλέξω την πορεία αυτή και να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Εκείνοι μαζί με τους φίλους μου , είχαν καταλυτικό ρόλο στο να μπορέσω να έχω μια ευχάριστη και γεμάτη από εμπειρίες και γνώσεις φοίτηση στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών. Εύχομαι σε όλους τους τα καλύτερα.

# Περίληψη

## Ανάλυση και βελτίωση λειτουργίας/απόδοσης φωτοβολταϊκής μονάδας συνδεδεμένης στο δίκτυο

**ΣΤΡΑΤΑΚΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ:**

**ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΙΔΗΣ:**

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μοντελοποίηση, ο έλεγχος και κυρίως η βελτίωση της απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα το σύστημα που μελετάται αποτελείται από μία φωτοβολταϊκή συστοιχία, έναν DC/DC Boost Converter, ένα Inverter και την προσομοίωση με το δίκτυο. Ο Boost ελέγχεται μέσω αλγορίθμων εύρεσης μέγιστης παραγωγής ισχύος (MPPT Algorithms), από τους οποίους λαμβάνουμε το ρεύμα αναφοράς στο οποίο πρέπει να λειτουργεί το σύστημα μας και το οποίο θέτουμε τον έλεγχο. Επίσης ελέγχουμε κατάλληλα τον Inverter, ώστε να μεταφέρεται κατάλληλη ποσότητα ισχύος από το σύστημα στο δίκτυο και υπό συγκεκριμένη τάση και συχνότητα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση μετασχηματισμού Park και Phased Locked Loop ελέγχου. Ασφαλώς η χρήση φύλτρων και πυκνωτών για την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος μας και την μείωση των αρμονικών διαδραμάτισε επίσης σημαντικό ρόλο. Αφού λάβαμε υπόψη μας τα παραπάνω λοιπόν, κατασκευάσαμε τα αντίστοιχα μοντέλα στο Simulink του MATLAB, προγραμμάτισαμε κατάλληλα του αλγορίθμους ελέγχου και εξήγαμε τις χαρακτηριστικές των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ασφαλώς αυτή η διαδικασία ολοκληρώθηκε σε μία σειρά βημάτων, όπου κάθε φορά ελέγχαμε την ορθή λειτουργία του συστήματος μας. Αφού καταφέραμε την εξαγωγή των χαρακτηριστικών αυτών, και γνωρίζαμε τα σημεία στα οποία το σύστημα μας βρίσκεται στην βέλτιστη κατάσταση, δηλαδή την μέγιστη παραγωγή ισχύος, λειτουργήσαμε μία σειρά από MPPT Αλγορίθμους υπό διάφορα σενάρια σκίασης και παρατηρήσαμε τις αποκρίσεις του συστήματος. Έτσι καταφέραμε να συνάγουμε βασικά συμπεράσματα για την λειτουργία τους υπό τις συνθήκες καθόλου και μερικής σκίασης, καθώς και την βαρύτητα συνυπολογισμού των απωλειών που παρουσιάζονται από τον Boost Μετατροπέα στους Αλγορίθμους. Τέλος τα παραπάνω αποτελέσματα τα επιβεβαιώσαμε και πειραματικά, χρησιμοποιώντας την συσκευή Hardware In The Loop της Typhoon συνδυαστικά με τον μικροελεγκτή C2000, παρατηρώντας το ρεύμα στο οποίο οδηγούνταν το φωτοβολταϊκό μας σύστημα με τον εκάστοτε αλγόριθμο και μοντέλο σκίασης των φωτοβολταϊκών.

Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο κάνουμε μια γενική εισαγωγή για τα ΣΗΕ και την σημασία των ΑΠΕ και της ηλιακής ενέργειας ενώ επίσης αναλύουμε τους μετατροπείς ισχύος και ποιος είναι ο σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο εξηγούμε τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, παρατηρούμε κάποια χαρακτηριστικά τους, το ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού, τι σημαίνει το MPPT και εξηγούμε πώς γίνεται η εξαγωγή των χαρακτηριστικών τους και τι πληροφορίες μπορούμε να αντλήσουμε από εκεί. Ιδιαίτερη βάση δίνουμε στις απώλειες του Boost στο φαινόμενο της μερικής σκίασης, πως το αντιμετωπίζουμε και τι παρατηρούμε με τους MPPT αλγορίθμους σε αυτές τις περιπτώσεις. Στο τρίτο κάνουμε την μοντελοποίηση του συστήματος, τόσο της DC όσο και της AC

πλευράς , ενώ στο τέταρτο σχεδιάζουμε τον έλεγχο του συστήματος μας. Στο πέμπτο εισάγουμε το HIL και τον μικροελεγκτή ενώ επίσης σχεδιάζουμε το σύστημα στον προσομοιωτή Schematic Editor και δημιουργούμε το κατάλληλο αρχείο HIL SCADA. Και Τέλος στο έκτο και το έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των πειραμάτων αντίστοιχα μαζί με μία σειρά από συμπεράσματα για την βελτίωση της απόδοσης φωτοβολταϊκής μονάδας συνδεδεμένης στο δίκτυο.

## **EXTENSIVE ENGLISH SUMMARY**

### **Analysis and improvement of operation/performance of a photovoltaic unit connected to the grid.**

**STRATAKIS STAVROS:**

**ALEXANDRIDIS ANTONIOS:**

The aim of this thesis is to model, control and mainly improve the performance of photovoltaic systems connected to the grid. More specifically, the system under study consists of a photovoltaic array , a DC/DC Boost Converter, an Inverter and the simulation of the grid. The Boost is controlled by means of Maximum Power Production Finding Algorithms (MPPT Algorithms) , from which we obtain the reference current at which our system should operate and which we set the control. We also control the Inverter appropriately , so that an appropriate amount of power is transferred from the system to the grid and under a specific voltage and frequency. This is achieved by using Park transformation and Phased Locked Loop control. Of course the use of filters and capacitors for optimal operation of our system and reduction of harmonics also played an important role. Having taken the above into account, we constructed the corresponding models in Simulink of MATLAB, programmed the control algorithms and extracted the characteristics of the photovoltaic systems. This process was completed in a series of several steps , where each time we checked the correct operation of our system. Once we were able to extract these characteristics , and we knew the points at which our system is in the optimal state, i.e. maximum power output, we ran a series of MPPT Algorithms under different shading scenarios and observed the system responses. Thus we were able to draw key conclusions about their operation under no and partial shading conditions, as well as the importance of factoring in the losses presented by the Boost Converter in the Algorithms. Finally, we confirmed the above results experimentally , using Typhoon's Hardware In The Loop device combined with the C2000 microcontroller , by observing the current at which our PV system was driven by each PV shading algorithm and model.

More specifically, in the first chapter we make a general introduction to the EEE and the importance of RES and solar energy while we also analyze the power converters and what is the purpose of this thesis. In the second we explain the PV arrays , we observe some of their characteristics, the equivalent circuit of the PV , what MPPT means and explain how their characteristics are extracted and what information we can derive from there.We pay special attention to the boost losses in the partial shading effect , how we deal with it and what we observe with the MPPT algorithms in these cases.In the third we do the system modeling , both the DC and AC side , and in the fourth we design our system control.In the fifth we introduce the HIL and the microcontroller while we also design the system in the Schematic Editor simulator and create the appropriate HIL SCADA file. And Finally in the sixth and seventh chapter we present the results of simulations and experiments respectively along with a set of conclusions to improve the performance of grid connected PV module.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....</b>	<b>12</b>
1.1 Εισαγωγή.....	12
1.2 Μικροδίκτυα-Διεσπαρμένες Παραγωγές -ΑΠΕ.....	14
1.3 Μετατροπείς Ισχύος.....	16
1.3.1 Εισαγωγή.....	16
1.3.2 Σύγκριση με Παλιότερα.....	20
1.3.3 Ημιαγωγικά Στοιχεία Ισχύος: .....	20
1.3.4 Παλμοδότηση.....	22
1.4 Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας.....	25
1.5 Βήματα και Υλοποίηση.....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....</b>	<b>29</b>
2.1 Θεωρία.....	29
2.1.1 Ισοδύναμο Κύκλωμα.....	32
2.1.2 Απόδοση Φωτοβολταϊκών.....	35
2.2 Αλγόριθμοι Εύρεσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος (MPPT Algorithms) : .....	37
2.2.1 Αλγόριθμος Perturb and Observe: .....	39
2.2.2 Αλγόριθμος Particle Swarm Optimization: .....	41
2.3.1 Απώλειες Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας: .....	46
2.3.2 Τροποποιημένος P&O και PSO: .....	50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μοντελοποίηση.....</b>	<b>54</b>
3.1 Εισαγωγή.....	54
3.2 AC Πλευρά.....	57

3.2.1 Εισαγωγή: .....	57
3.2.2 Φίλτρο LC και πηνίο Σύζευξης: .....	61
3.3 DC Πλευρά: .....	64
3.3.1 Μοντέλο DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης (Boost Conventer).....	64
3.3.2 Μοντέλο DC Διαύλου (DC Link): .....	66
3.3.3 Εξισώσεις Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας: .....	67
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Σχεδιασμός Συστήματος Ελέγχου.....</b>	<b>70</b>
4.1 Εισαγωγή.....	70
4.2 Έλεγχος ΣΡ/ΣΡ Μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.....	70
4.3 Έλεγχος στην πλευρά του φορτίου.....	71
4.3.1. Βρόγχος Κλειδώματος Φάσης (Phased-LockedLoop): .....	72
4.3.2. Εσωτερικός Βρόγχος Ελέγχου Ρεύματος: .....	73
4.3.3. Εξωτερικός Βρόγχος Ελέγχου Τάσης: .....	75
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματική Διάταξη.....</b>	<b>79</b>
5.1 Εισαγωγή .....	79
5.2 Real Time Typhoon Hardware in the Loop.....	79
5.3 Κυκλωματικό Μοντέλο Συστήματος στο Typhoon Hardware In the Loop.....	91
5.4 Σχήματα Ελέγχου Μετατροπέων Ισχύος Συστήματος:.....	94
5.5 Ο μικροελεγκτής C2000 Launchpad XL tms320f28379d.....	98
5.5.1. Εισαγωγή: .....	98
5.5.2. Χαρακτηριστικά: .....	98
5.5.3. Εφαρμογές: .....	99
5.5.4. Πλεονεκτήματα: .....	100
5.5.5. Λεπτομερής χρήση του C2000 Launchpad XL στο πείραμα φωτοβολταϊκών :.....	100

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:Προσομοιώσεις.....</b>	<b>101</b>
6.1 Εισαγωγή: .....	101
6.2 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία χωρίς Σκίαση: .....	101
6.2.1 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία χωρίς Σκίαση , σενάριο μεταβολής ακτινοβολίας :.....	108
6.3 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία υπό συνθήκες μερικής Σκίασης: .....	110
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αποτελέσματα.....</b>	<b>114</b>
7.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων υπό συνθήκες κανονικής σκίασης: .....	114
7.1.1 Perturb and Observe χωρίς απώλειες:.....	114
7.1.2 Perturb and Observe με απώλειες: .....	117
7.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων υπό συνθήκες μερικής σκίασης: .....	122
7.2.1 Perturb and Observe χωρίς απώλειες: .....	122
7.2.2 Particle Swarm Optimization χωρίς απώλειες: .....	125
7.2.3 Particle Swarm Optimization με απώλειες: .....	128
7.3 Αποτελέσματα Πειραμάτων: .....	134
7.3.1 Perturb and Observe χωρίς Σκίαση: .....	134
7.3.2 Particle Swarm Optimization χωρίς Σκίαση: .....	135
7.3.3 Perturb and Observe μερική Σκίαση: .....	136
7.3.4 Particle Swarm Optimization μερική Σκίαση χωρίς απώλειες: .....	137
7.3.5 Particle Swarm Optimization μερική Σκίαση με απώλειες: .....	138
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>140</b>



# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας**

## **1.1 Εισαγωγή :**

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί μια από τις πλέον βασικές ανάγκες όχι μόνο σε όλες τις σύγχρονες κοινωνίες , αλλά και στις αναπτυσσόμενες χώρες. Χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των βιομηχανιών, των κατοικιών, των μεταφορών ,των υποδομών και άλλων πολλών βασικών αναγκών που την καθιστούν πέρα από σημαντική και πολύ κρίσιμη. Τα παραπάνω επιβεβαιώθηκαν από τις πρόσφατες γεωπολιτικές αναταράξεις οι οποίες οδήγησαν σε ενεργειακή κρίση ,αβεβαιότητα και έντονη ανησυχία. Οι επιδράσεις ήταν άμεσες και οδυνηρές όχι μόνο σε ό,τι αφορά την παραγωγή και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και σε πολλούς άλλους τομείς όπως αυτός της βιομηχανίας , με αποτέλεσμα ο πληθωρισμός να φτάσει στα ύψη και η ανάγκη για εναλλακτικές μορφές ενέργειας να γίνει μεγαλύτερη από ποτέ.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι τα συστήματα που παράγουν, μεταδίδουν και διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια. Είναι πολύπλοκα συστήματα που αποτελούνται από διάφορα μέρη , όπως οι Σταθμοί Παραγωγής , οι Γραμμές Μεταφοράς , τα Δίκτυα Διανομής κ.α.

Πιο συγκεκριμένα , οι Σταθμοί Παραγωγής είναι οι μονάδες που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν διάφοροι τύποι σταθμών παραγωγής, ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιούν. Οι κύριοι τύποι είναι οι σταθμοί παραγωγής ορυκτών καυσίμων, όπως οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, οι αεριοστροβιλικοί σταθμοί και οι συνδυασμένου κύκλου. Οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά πάνελ που ανήκουν στις ΑΠΕ, καθώς και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και οι πυρηνικοί , οι οποίοι παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την κινητική ενέργεια του νερού και τη σχάση του ουρανίου αντίστοιχα.

Οι γραμμές μεταφοράς μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής προς τους καταναλωτές , σε διάφορες στάθμες όπως χαμηλή , μεσαία , υψηλή, υπερ-υψηλή και με την χρήση κατάλληλων μετασχηματιστών χρησιμοποιούνται στα νοικοκυριά. Με την υψηλή τάση να παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα , καθώς έχει την δυνατότητα να μεταφέρει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια σε μικρότερη διαδρομή.

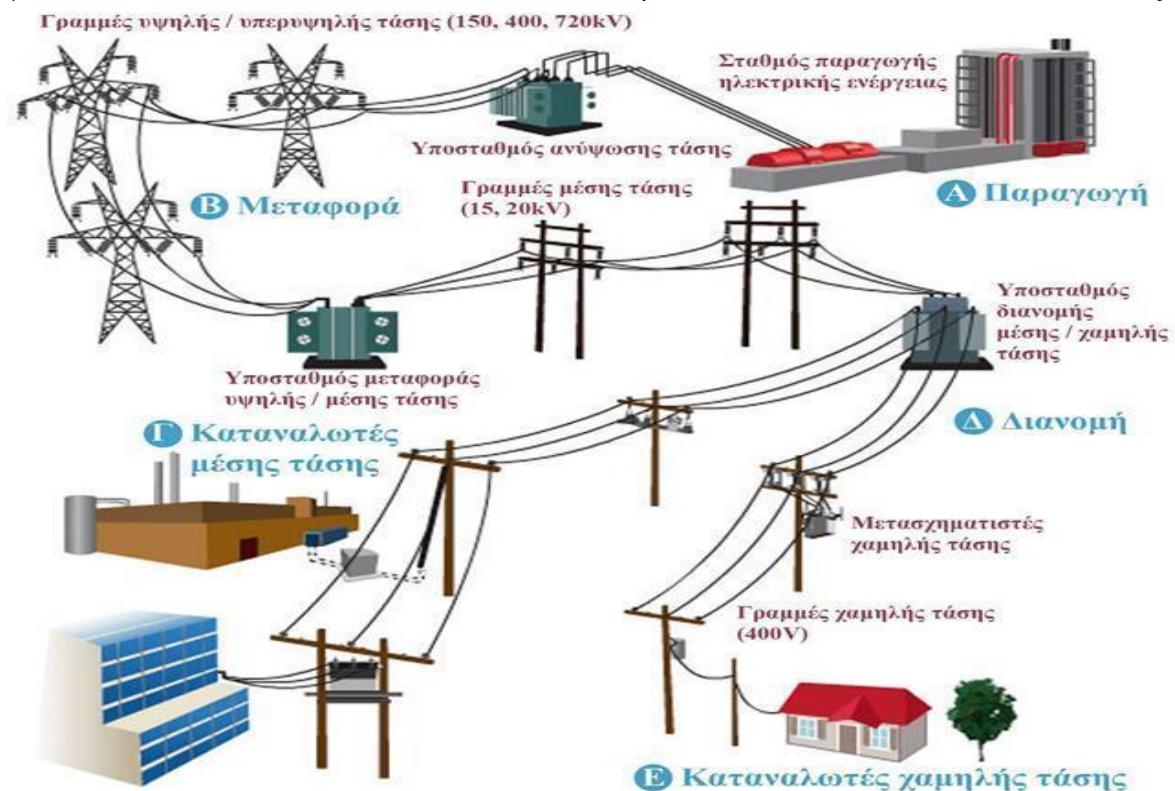
Τα δίκτυα διανομής διανέμουν την ηλεκτρική ενέργειας στους καταναλωτές , με τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης να συναντώνται συχνότερα.

Αξίζει να σημειώσουμε πως τα τελευταία χρόνια γίνονται έντονες προσπάθειες για την απανθρακοποίηση των ΣΗΕ. Ο λόγος για την προσπάθεια αυτή είναι, η αντιμετώπιση των διαρκώς αυξανόμενων επιπέδων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως CO<sub>2</sub>) και της διαρκούς αύξησης της μέσης θερμοκρασίας. Η επίτευξη ενεργειακής ασφάλειας είναι επίσης μείζονος σημασίας, δηλαδή η αποφυγή εξάρτησης της παραγωγής από ορυκτά καύσιμα , τα οποία είναι γνωστό πως παρουσιάζουν , συνεχώς μειούμενη διαθεσιμότητα και προέρχονται από χώρες με γεωπολιτικές εντάσεις , όπως το παράδειγμα της Ρωσίας με το φυσικό αέριο. Τέλος η οικονομία , αφού η παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας κατά βάση κοστίζει λιγότερο από εκείνη των συμβατικών καυσίμων.

Στην Ελλάδα , οι γραμμές μεταφοράς και τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ανήκουν στον Διαχειριστή Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) και αποτελούν φυσικό μονοπάτιο. Ο ΔΕΔΔΗΕ είναι ένας ιδιωτικός φορέας που ιδρύθηκε το 2013, μετά την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Είναι ο μόνος φορέας που μπορεί να κατασκευάζει, να λειτουργεί και να συντηρεί τα δίκτυα αυτά.

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μονοπώλιακά. Ένας λόγος είναι ότι η κατασκευή και η λειτουργία ενός δικτύου διανομής είναι μια πολύ ακριβή επένδυση. Ένας άλλος λόγος είναι ότι είναι σημαντικό να υπάρχει ένας μόνο φορέας που να είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του δικτύου, ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια και η αξιοπιστία του.

Το μονοπώλιο των δικτύων διανομής έχει ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από τη μία πλευρά, το μονοπώλιο μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερες τιμές για τους καταναλωτές, καθώς ο μονοπωλιακός φορέας έχει τη δυνατότητα να εκμεταλλεύεται οικονομίες κλίμακας. Από την άλλη πλευρά, το μονοπώλιο μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη καινοτομία, καθώς ο μονοπωλιακός φορέας δεν χρειάζεται να ανταγωνιστεί άλλους φορείς για να προσελκύσει πελάτες.



Εικόνα 1. Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Εκτός των προτερημάτων τους όμως, τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας αντιμετωπίζουν και μία σειρά από προκλήσεις. Για παράδειγμα, η αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μια σημαντική πρόκληση για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Οι ΑΠΕ, όπως ο άνεμος και ο ήλιος, είναι πιο ασταθείς από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Αυτό σημαίνει ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ μπορεί να είναι πιο δύσκολο να προβλεφθεί και να ελεγχθεί. Γι' αυτό τον λόγο μάλιστα έχουν ιδρυθεί φορείς οι οποίοι είναι αποκλειστικά υπεύθυνοι για την πρόβλεψη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Ακόμη η ασφάλεια του δικτύου, καθώς τα ΣΗΕ πρέπει να είναι ασφαλή και αξιόπιστα, ώστε να μπορούν να ικανοποιούν τις ανάγκες των καταναλωτών. Η ασφάλεια του δικτύου περιλαμβάνει την προστασία των καταναλωτών από ηλεκτροπληξία και από βλάβες στην ηλεκτρική εγκατάσταση, ενώ η αξιοπιστία του δικτύου περιλαμβάνει την ικανότητα του να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές χωρίς διακοπές. Τέλος οι σταθμοί

παραγωγής ορυκτών καυσίμων συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στην κλιματική αλλαγή επηρεάζοντας σε φαινόμενα όπως εκείνο του θερμοκηπίου. Αντίθετα, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον από τις συμβατικές, και η στροφή προς την εδραίωση τους μοιάζει μονόδρομος.

## 1.2 Μικροδίκτυα-Διεσπαρμένες Παραγωγές-ΑΠΕ:

Τα οικιακά φορτία, δηλαδή οι κοινές συσκευές που χρησιμοποιούνται από τους καταναλωτές στην καθημερινότητα τους, όπως το ψυγείο, η κουζίνα, το πλυντήριο κ.α. είναι συνήθως εναλλασσόμενο ρεύματος και τροφοδοτούνται από τους ρευματοδότες των σπιτιών. Στην Ελλάδα, όπως και σε πολλές άλλες χώρες, τα περισσότερα νοικοκυριά τροφοδοτούνται από το κύριο συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Όπου η ενέργεια μεταφέρεται από τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας στα κέντρα διανομής μέσω γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης. Η κατασκευή τέτοιων έργων είναι δαπανηρή, αλλά δικαιολογείται από το γεγονός ότι εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό καταναλωτών. Ωστόσο, τι γίνεται όταν ένα φορτίο βρίσκεται σε απομακρυσμένη περιοχή και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι αρκετά μεγάλη για να δικαιολογήσει την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς;

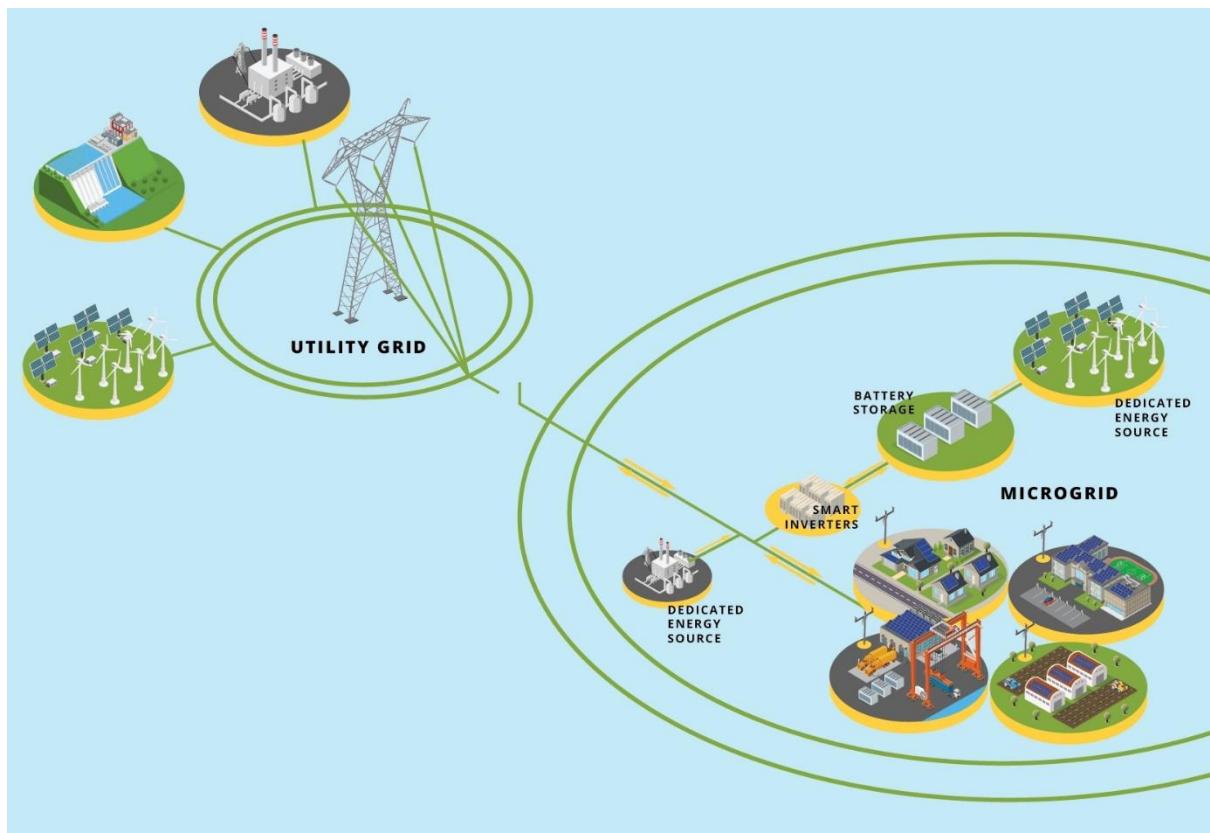
Υπάρχουν διάφορες λύσεις σε αυτό το πρόβλημα. Μια λύση είναι η χρήση ανεξάρτητων παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά πάνελ ή ανεμογεννήτριες. Αυτοί οι παραγωγοί μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια κοντά στο φορτίο και να το τροφοδοτούν απευθείας.

Μια άλλη λύση είναι η χρήση μικροδίκτυων. Τα μικροδίκτυα είναι μικρά, τοπικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελούνται από διεσπαρμένες παραγωγές, καταναλωτές και αποθηκευτικά συστήματα. Διεσπαρμένες παραγωγές (distributed generation) είναι μικρές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκονται κοντά στους καταναλωτές. Οι μονάδες αυτές μπορούν να βασίζονται σε διάφορες πηγές ενέργειας, όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η βιομάζα και τα ορυκτά καύσιμα και έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν ανεξάρτητα από το κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα μικροδίκτυα και τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής αντιπροσωπεύουν σημαντικές πτυχές στον τομέα των ηλεκτρικών ενεργειακών συστημάτων. Για παράδειγμα τα μικροδίκτυα επιδιώκουν την αυτονομία και την υψηλή αξιοπιστία, παρέχοντας παράλληλα τη δυνατότητα τοπικής παραγωγής ενέργειας. Στόχος είναι η αποδοτική χρήση των ενεργειακών πόρων σε τοπικό επίπεδο. Τεχνολογικές πτυχές όπως οι ανανεώσιμες πηγές και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας παίζουν κεντρικό ρόλο. Ακόμη οι οικονομικοί παράγοντες έχουν επίσης επιφέρει σημαντικές επιδράσεις. Η μείωση του κόστους των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών, όπως και η αύξηση του κόστους των συμβατικών πηγών ενέργειας, έχει καταστήσει οικονομικά ανταγωνιστικά τα μικροδίκτυα και τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής. Η προώθηση της έρευνας και ανάπτυξης στον τομέα αυτό έχει επιτρέψει τη δημιουργία προηγμένων τεχνολογιών όπως οι έξυπνες πλατφόρμες διαχείρισης ενέργειας, οι ενεργειακά αποδοτικές συσκευές και οι εξελιγμένοι αλγόριθμοι ελέγχου.

Στην αύξηση της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα ΣΗΕ, μπορούν να βοηθήσουν οι διεσπαρμένες παραγωγές, καθώς μπορούν να τοποθετηθούν σε περιοχές όπου δεν είναι δυνατή η κατασκευή μεγάλων σταθμών παραγωγής ΑΠΕ. Για παράδειγμα, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν σε απομακρυσμένες περιοχές με ισχυρούς

ανέμους, ενώ τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να τοποθετηθούν σε στέγες και σε άλλους χώρους. Βοηθούν στη μείωση της εξάρτησης από τα μεγάλα δίκτυα, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα από αυτά, γεγονός που μπορεί να είναι χρήσιμο σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας του κύριου δικτύου και παράλληλα μπορούν να λειτουργήσουν υποστηρικτικά σε αυτό προσφέροντας εφεδρεία σε περίπτωση βλάβης ενός μεγάλου σταθμού παραγωγής.



Εικόνα 2. Κυρίως Δίκτυο-Μικροδίκτυα

Συμπερασματικά , τα μικροδίκτυα και οι διεσπαρμένες παραγωγές παρέχουν, αύξηση της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μείωση της εξάρτησης από τα μεγάλα δίκτυα, αυξημένη ασφάλεια του δικτύου, βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου και μείωση των απωλειών ενέργειας. Αντίθετα παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα όπως υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, δυσκολίες στην ρύθμιση και τον έλεγχο και αυξημένη πιθανότητα διακοπών λειτουργίας.

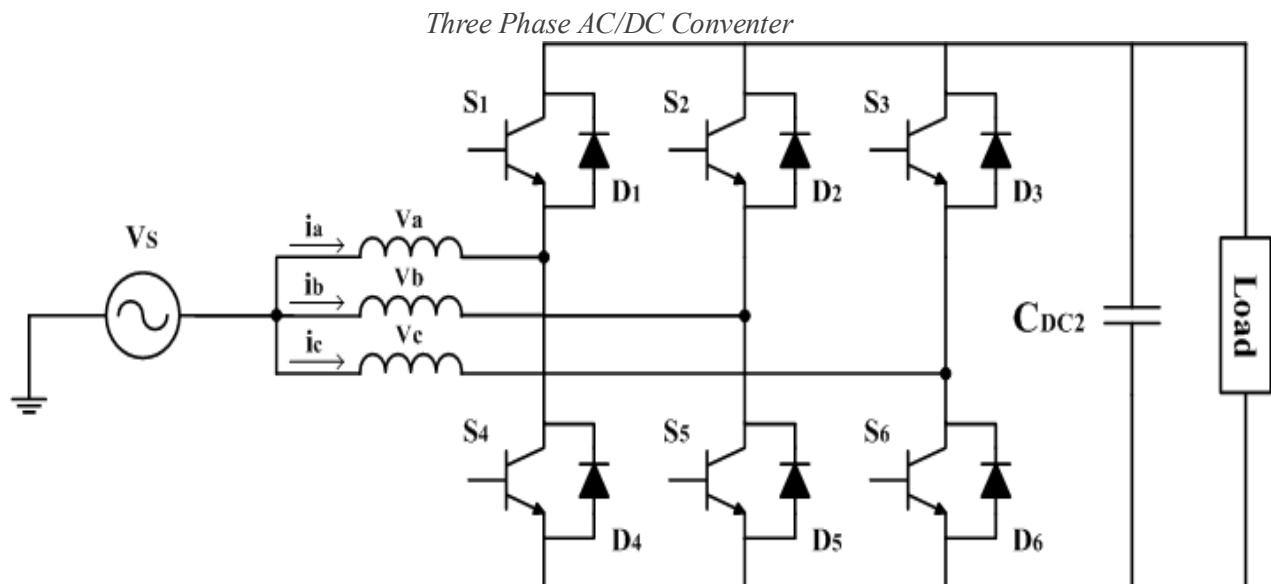
### 1.3 Μετατροπείς Ισχύος:

### 1.3.1 Εισαγωγή:

Τα όσα αναφέραμε παραπάνω, έγιναν εφικτά τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη άλλες τεχνολογίας και πιο συγκεκριμένα των μετατροπέων ισχύος, που παίζουν ζωτικό ρόλο στα μικροδίκτυα. Η ραγδαία εξέλιξη άλλες, είναι αυτή που πλέον άλλες επιτρέπει, να εντάσσουμε τέτοιους είδους συστήματα ως Σταθμούς Παραγωγής και να άλλες λαμβάνουμε σοβαρά υπόψιν στην ενδοημερήσια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, άλλες τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τα φωτοβολταϊκά παράγουν συνεχή τάση, ενώ οι ανεμογεννήτριες εναλλασσόμενη. Για να μπορούν να συνδεθούν αυτές οι πηγές σε ένα κοινό δίκτυο, απαιτείται η μετατροπή άλλες τάσης και του ρεύματος άλλες σε μια μορφή συμβατή με το δίκτυο.

Είναι ξεκάθαρο λοιπόν, πως η μετατροπή ισχύος είναι μια βασική λειτουργία των μικροδικτύων, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή άλλες ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικές πηγές σε μια κοινή μορφή. Οι συσκευές μετατροπής ισχύος που χρησιμοποιούνται στα μικροδίκτυα μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- 3) Μετατροπέις εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC-DC): Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή άλλες εναλλασσόμενης τάσης από πηγές άλλες οι ανεμογεννήτριες σε συνεχή τάση, η οποία είναι η μορφή που παράγουν και τα φωτοβολταϊκά.



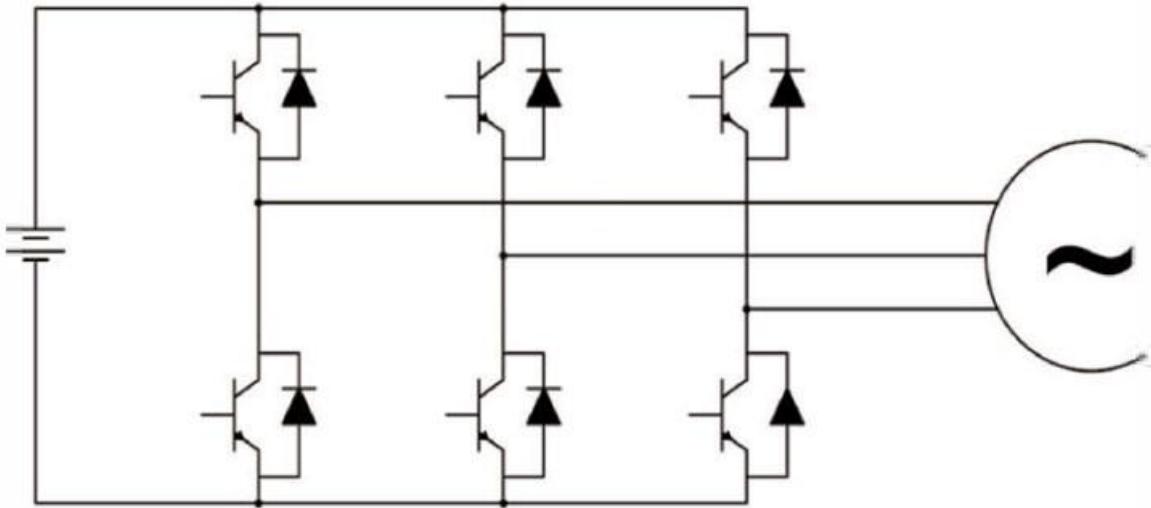
Εικόνα 3. Τριφασικός Μετατροπέας Τάσης AC σε DC

Άλλες από άλλες άλλες των μετατροπέων εναλλασσόμενου ρεύματος είναι για τη τροφοδοσία των ηλεκτρονικών συσκευών, καθώς τα περισσότερα ηλεκτρονικά φορτία, άλλες υπολογιστές, τηλεοράσεις, κινητά τηλέφωνα, κ.λπ., απαιτούν συνεχή τάση για την λειτουργία άλλες. Ακόμη οι AC/DC μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μείωση άλλες τάσης από ένα υψηλότερο επίπεδο σε ένα χαμηλότερο. Αυτό είναι χρήσιμο σε ορισμένες

εφαρμογές, άλλες η φόρτιση μπαταριών ή η τροφοδοσία φορτίων που μπορούν να λειτουργήσουν με χαμηλότερη τάση και για την προστασία άλλες από υπερτάσεις. Έτσι αποφεύγονται πιθανές βλάβες άλλες ηλεκτρονικές συσκευές, όπου είναι σημαντικό να ληφθούν μέτρα για την προστασία άλλες..

**2) Μετατροπείς συνεχούς Τάσης σε Εναλλασσόμενη (DC-AC):** Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή άλλες συνεχούς τάσης από πηγές άλλες τα φωτοβολταϊκά σε εναλλασσόμενη τάση, η οποία είναι η μορφή που απαιτείται για την παροχή και την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε οικιακά και εμπορικά φορτία.

*Three Phase DC/AC Inverter*



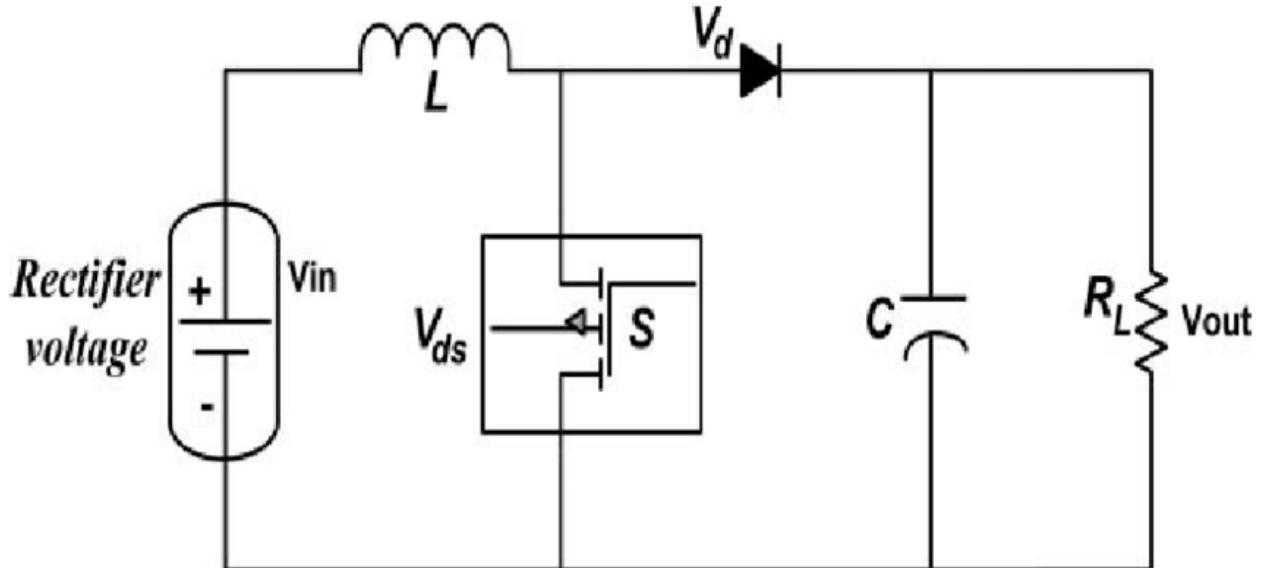
*Εικόνα 4.Τριφασικός Αντιστροφέας Τάσης*

Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC-AC) χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία εφαρμογών, άλλες για τη δημιουργία εναλλασσόμενης τάσης με διαφορετικές παραμέτρους. Ορισμένες από αυτές άλλες παραμέτρους μπορεί να είναι η τάση , η συχνότητα και το σχήμα κύματος. Αυτό είναι χρήσιμο σε ορισμένες εφαρμογές, άλλες η τροφοδοσία βιομηχανικών φορτίων ή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τη μεταφορά άλλες. Σε αυτόνομα συστήματα ηλιακής ενέργειας, οι DC-AC μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή άλλες συνεχούς τάσης που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά σε εναλλασσόμενη τάση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οικιακές συσκευές ή να συνδεθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Αντίστοιχα σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή άλλες συνεχούς τάσης που αποθηκεύεται άλλες μπαταρίες σε εναλλασσόμενη τάση.

Μία ακόμη εφαρμογή είναι σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου οι DC-AC μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία εναλλασσόμενης τάσης με διαφορετικές παραμέτρους για τη λειτουργία βιομηχανικών φορτίων, άλλες κινητήρες και εξοπλισμό φωτισμού. Τέλος σε συστήματα τηλεπικοινωνιών, χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή άλλες συνεχούς τάσης που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά σε εναλλασσόμενη τάση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση δεδομένων ,οι οποίοι θα ενημερώνουν για παράδειγμα με σήματα που λαμβάνονται από αισθητήρες ή άλλες ηλεκτρονικές συσκευές.

3) Μετατροπείς Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή (DC-DC): Οι DC-DC μετατροπείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετατρέψουν μια τάση συνεχούς ρεύματος σε άλλη τάση συνεχούς ρεύματος με διάφορα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετατρέψουν μια υψηλή τάση σε μια χαμηλότερη τάση, ή για να μετατρέψουν μια τάση με ένα συγκεκριμένο σχήμα σε μια άλλη τάση με ένα διαφορετικό σχήμα. Η επιλογή του κατάλληλου DC-DC μετατροπέα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η απαιτούμενη ισχύς, η τάση εισόδου και εξόδου, και τα χαρακτηριστικά της τάσης εξόδου.



Εικόνα 5. DC-DC Μετατροπέας Ισχύος

Οι DC/DC μετατροπείς είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι, ορισμένες από τις πολλές εφαρμογές είναι οι εξής:

- Φωτοβολταϊκά συστήματα: Τα φωτοβολταϊκά πάνελ παράγουν τάση συνεχούς ρεύματος, η οποία μπορεί να είναι πολύ υψηλή ή πολύ χαμηλή για να χρησιμοποιηθεί απευθείας από τα ηλεκτρικά συστήματα ενός κτιρίου ή μιας συσκευής. Οι DC-DC μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της τάσης των φωτοβολταϊκών πάνελ ώστε να ταιριάζει με την τάση των μπαταριών ή του φορτίου.
- Ηλεκτρονικά οχήματα: Τα ηλεκτρονικά οχήματα χρησιμοποιούν μπαταρίες για την αποθήκευση ενέργειας. Οι DC-DC μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της τάσης από τις μπαταρίες σε τάση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τα ηλεκτρικά συστήματα του οχήματος, όπως ο κινητήρας, οι ηλεκτρικές συσκευές και τα συστήματα ασφαλείας.
- Συστήματα ασφαλείας: Τα συστήματα ασφαλείας, όπως τα συστήματα πυρανίγνευσης και τα συστήματα ασφαλείας βιομηχανικών εγκαταστάσεων, πρέπει να λειτουργούν συνεχώς, ανεξάρτητα από την παροχή ρεύματος. Οι DC-DC μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τη τροφοδοσία των συστημάτων ασφαλείας με τάση που είναι αποθηκευμένη σε μπαταρίες, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή και διαρκής λειτουργία τους.

Ωστόσο οι συσκευές μετατροπής ισχύος στα μικροδίκτυα πρέπει να πληρούν και μία σειρά απαιτήσεων, όπως:

- **Υψηλή αποδοτικότητα:** Δηλαδή να μην χάνεται ενέργεια κατά τη διαδικασία μετατροπής είτε από εναλλασσόμενη σε συνεχή είτε το αντίστροφο.
- **Αντοχή σε διαταραχές:** Να είναι ανθεκτικές σε διαταραχές, όπως υπερτάσεις και βραχυκυκλώματα. Φαινόμενα τα οποία συναντώνται συχνά, ειδικά σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου αναπτύσσονται μεγάλα ρεύματα και κατ' επέκταση έντονες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- **Καλά χαρακτηριστικά ελέγχου:** Να έχουν καλά χαρακτηριστικά ελέγχου, ώστε να μπορούν να ρυθμίζονται για να διασφαλίζεται η σταθερότητα του δικτύου, είτε ως προς την συγχρόνη είτε ως προς την τάση και το ρεύμα.

Η επιλογή των σωστών συσκευών μετατροπής ισχύος για ένα μικροδίκτυο είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου. Πρέπει να επιλέγονται με βάση τις απαιτήσεις του δικτύου, όπως το μέγεθος του, το επίπεδο τάσης και η φύση των πηγών ενέργειας που συνδέονται σε αυτό. Μάλιστα, μερικές πτυχές των μικροδικτύων που έχουν εφαρμογή οι μετατροπείς ισχύος είναι:

- Η διαχείριση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης σε ένα μικροδίκτυο. Για παράδειγμα, οι μετατροπείς DC-AC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη φόρτιση μπαταριών από πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου σε περίπτωση έλλειψης παραγωγής.
- Η βελτίωση της αξιοπιστίας του εφοδιασμού με ηλεκτρική ενέργεια σε ένα μικροδίκτυο. Για παράδειγμα, οι μετατροπείς AC-DC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία τοπικών πηγών ενέργειας εφεδρείας σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας του κεντρικού δικτύου.
- Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από ένα μικροδίκτυο. Για παράδειγμα, οι μετατροπείς DC-AC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση φωτοβολταϊκών σε ένα δίκτυο που υποστηρίζεται από ορυκτά καύσιμα.

Όλα τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των μετατροπέων και οι δυνατότητες που μας παρέχουν, κατέστησαν ικανή την σημερινή πραγματικότητα. Όπου μπορούμε πλέον να λειτουργούμε και να σχεδιάζουμε το μέλλον βασιζόμενοι σε ΑΠΕ και διεσπαρμένες παραγωγές, βελτιώνοντας την απόδοση των ΣΗΕ, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας και προστατεύοντας όχι μόνο το δίκτυο και την παροχή από πιθανές βλάβες, αλλά και τον πλανήτη μας από φαινόμενα όπως εκείνο του θερμοκηπίου.

### 1.3.2 Σύγκριση με Παλιότερα:

Όπως έγινε κατανοητό, η χρήση των μετατροπέων ισχύος άλλαξε δραματικά τον τρόπο που βλέπουμε τα Σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Συγκριτικά με παλαιότερα, όπου

γινόταν χρήση ηλεκτρομηχανικών διατάξεων ή γραμμικά ελεγχόμενων ηλεκτρονικών διατάξεων, οι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα:

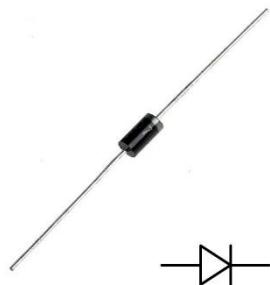
- Μικρότερος όγκος, βάρος και κόστος αγοράς, για αντίστοιχες τιμές ισχύος.
- Λιγότερες απώλειες ισχύος, με συνέπεια τον υψηλό βαθμό απόδοσης, που μπορεί να ξεπερνά το 90%.
- Ελάχιστες ανάγκες συντήρησης, καθώς δεν έχουν κινητά μέρη, δεν απαιτούν ισχυρές βάσεις στήριξης και επιπρόσθετα χαρακτηρίζονται από αθόρυβη λειτουργία
- Λόγω του ηλεκτρονικού ελέγχου προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη απόκριση στη ρύθμιση των μεγεθών εξόδου (τάση, ρεύμα, ροπή, στροφές κλπ.).

Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί πως με την χρήση τους παρουσιάζονται ανώτερες αρμονικές τόσο στην πλευρά της τροφοδοσίας, όσο και στην πλευρά του φορτίου γεγονός που προκαλεί την ύπαρξη Ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, αύξηση της Άεργου Ισχύος καθώς και των απωλειών.

### 1.3.3 Ημιαγωγικά Στοιχεία Ισχύος:

Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος αποτελούν το βασικό δομικό στοιχείο για όλους τους μετατροπείς ισχύος. Απαρτίζονται από στρώσεις ημιαγωγών οι οποίοι περιέχουν προσμίξεις και χωρίζονται με βάση την ικανότητα ελέγχου τους σε τρεις βασικές κατηγορίες :

- 1) Μη Ελεγχόμενα (π.χ. Δίοδοι)



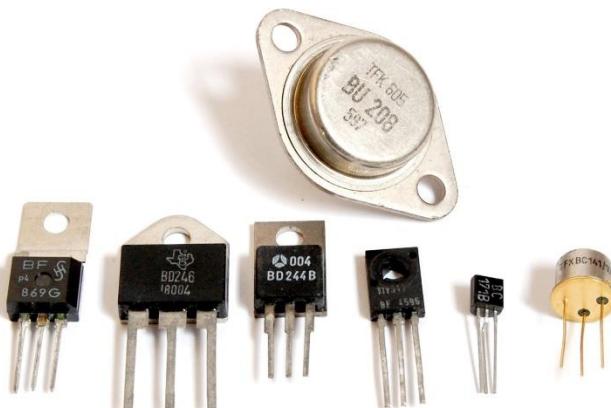
Εικόνα 6.Δίοδος

- 2) Μερικώς Ελεγχόμενα (π.χ. Θυρίστορ)



Εικόνα 7. Θυρίστορ

### 3) Πλήρως Ελεγχόμενα(π.χ.τρανζίστορ)



Εικόνα 8. Διάφορα Είδη Τρανζίστορ

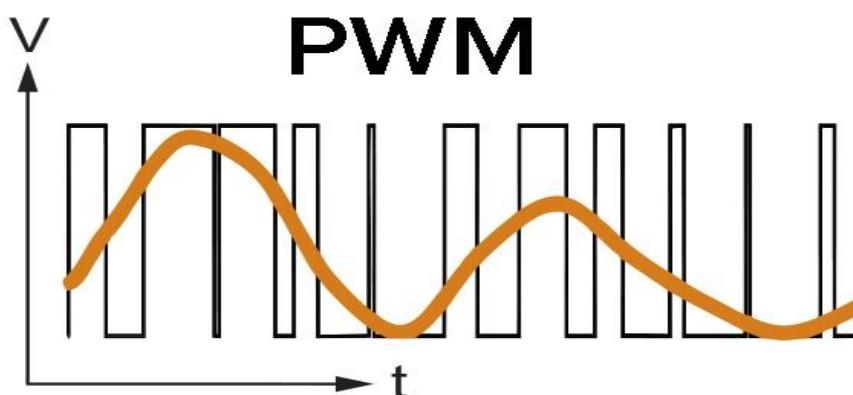
Η δομή από την οποία αποτελούνται τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος είναι περίπλοκη, ειδικά εάν τεθεί σε σύγκριση με εκείνη των στοιχείων χαμηλής τάσης, ωστόσο παρουσιάζουν μια σειρά από ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που τα καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμα. Πρώτον, η υψηλή αντοχή σε τάσεις διάσπασης εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία των ημιαγωγικών στοιχείων κάτω από αυξημένες ηλεκτρικές φορτίσεις. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές ισχύος που απαιτούν υψηλές επιδόσεις. Δεύτερον, η ικανότητα διέλευσης υψηλών τιμών ρεύματος επιτρέπει την αποτελεσματική λειτουργία των ημιαγωγικών στοιχείων ακόμη και υπό έντονες φορτίσεις, προσφέροντας σταθερή και αξιόπιστη επίδοση. Επιπλέον, οι μικρές πτώσεις τάσης κατά την κατάσταση αγωγής, οι χαμηλές αντιστάσεις αγωγής και τα μικρά ρεύματα διαρροής συνεισφέρουν στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος και εξασφαλίζουν αποδοτική λειτουργία. Οι μικροί διακοπτικοί χρόνοι κατά την έναυση και τη σβέση προάγουν την ασφαλή λειτουργία και αποτελούν σημαντικό πλεονέκτημα σε εφαρμογές που απαιτούν γρήγορες αλλαγές καταστάσεων. Η ικανότητα αντοχής σε υψηλές θερμοκρασίες διασφαλίζει σταθερή απόδοση ακόμη και σε περιβάλλοντα με αυξημένες θερμοκρασίες. Τέλος, οι χαμηλές απαιτήσεις ισχύος στο κύκλωμα ελέγχου και το χαμηλό κόστος συνολικής υλοποίησης καθιστούν τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος οικονομικά αποδοτικά και ευέλικτα για διάφορες εφαρμογές.

#### 1.3.4 Παλμοδότηση:

Η χρήση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος όπως αναφέραμε και προηγουμένως, απαιτεί και τον κατάλληλο έλεγχο τους. Η παλμοδότηση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος είναι η διαδικασία ελέγχου της λειτουργίας των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος με τη χρήση ημιτονοειδών (Sinusoidal Pulse Width Modulation) ή μη ημιτονοειδών παλμών (Pulse Width Modulation). Οδηγεί συνήθως τρανζίστορ, IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) ή MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) και χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως τροφοδοτικά, κινητήρες, μετασχηματιστές και ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος. Ως σκοπό έχει την ρύθμιση της ποσότητας ενέργειας που παρέχεται στο φορτίο. Αυτό επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της διάρκειας των παλμών, ρυθμίζοντας τον χρόνο κατά τον οποίο το ημιαγωγικό στοιχείο είναι ενεργοποιημένο ή απενεργοποιημένο. Η παλμοδότηση αυτή επιτρέπει αποδοτικό έλεγχο της ισχύος και της τάσης που παρέχεται στο φορτίο, μειώνει τις απώλειες από την θερμοπαραγωγή και επιτρέπει την γρήγορη αλλαγή επιπέδων ισχύος. Κατά την διάρκεια κάθε παλμού, το ημιαγωγικό στοιχείο είναι ενεργοποιημένο, επιτρέποντας έτσι την διέλευση ρεύματος. Η συχνότητα την οποία θα έχουν οι παλμοί καθορίζεται από την εφαρμογή στην οποία τοποθετείται ο μετατροπέας ισχύος. Με τον συνδυασμό όλων των παραπάνω επιτυγχάνεται τόσο μείωση της κατανάλωσης ενέργειας όσο και μείωση του θορύβου, καθώς επιτρέπει τη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων λειτουργίας. Γίνεται εύκολα αντιληπτό λοιπόν, πως η παλμοδότηση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και υλοποίηση. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα της παλμοδότησης μπορεί να είναι σημαντικά, καθιστώντας την μια ελκυστική επιλογή για μια ποικιλία εφαρμογών ισχύος.

#### Pulse Width Modulation (PWM):

Η PWM είναι μια μέθοδος ελέγχου της μέσης ισχύος που παρέχεται από ένα αναλογικό σήμα μέσω της ψηφιακής εξόδου ενός μικροελεγκτή. Η μέση τιμή της τάσης ή του ρεύματος που παρέχεται στο φορτίο ελέγχεται με εναλλαγή της τροφοδοσίας μεταξύ 0 και 100% με ρυθμό ταχύτερο από ό,τι χρειάζεται για να αλλάξει σημαντικά το φορτίο. Όσο περισσότερο είναι ενεργοποιημένος ο διακόπτης, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνολική ισχύς που παρέχεται στο φορτίο.



Εικόνα 9. Pulse Width Modulation

Οι παραλλαγές της PWM διαμόρφωσης βασίζονται στη μορφή των σημάτων αναφοράς και οδήγησης. Οι πιο συνηθισμένες παραλλαγές είναι:

- Delta PWM: Η διάρκεια του παλμού είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ του σήματος αναφοράς και του σήματος οδήγησης.
- Delta-sigma PWM: Η διάρκεια του παλμού είναι ίση με τον λογάριθμο της διαφοράς μεταξύ του σήματος αναφοράς και του σήματος οδήγησης.
- Space vector modulation (SVM): Η διάρκεια του παλμού είναι ίση με το ποσοστό του χώρου φορέα που καταλαμβάνει το σήμα αναφοράς.
- Direct torque control: Η διάρκεια του παλμού είναι ίση με τη δύναμη που απαιτείται για τον έλεγχο του κινητήρα.

Η PWM χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως:

- Σερβομηχανισμοί: Η PWM χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της θέσης, της ταχύτητας και της ροπής των σερβομηχανισμών.
- Τηλεπικοινωνίες: Η PWM χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ψηφιακών σημάτων.
- Μεταφορά ενέργειας: Η PWM χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης και του ρεύματος σε συστήματα μεταφοράς ενέργειας.
- Ηλεκτρονικά ισχύος: Η PWM χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης και του ρεύματος σε μετατροπείς ισχύος.
- Ηχητικά εφέ και ενίσχυση: Η PWM χρησιμοποιείται για τη δημιουργία διαφορετικών μορφών μορφών κύματος, όπως τετραγωνικών, τριγωνικών, ημιπλευρών, ή ακόμα και τυχαίων μορφών κύματος.
- Ένδειξη LED: Η PWM χρησιμοποιείται για τη δημιουργία διαφορετικών επιπέδων φωτεινότητας στα LED.

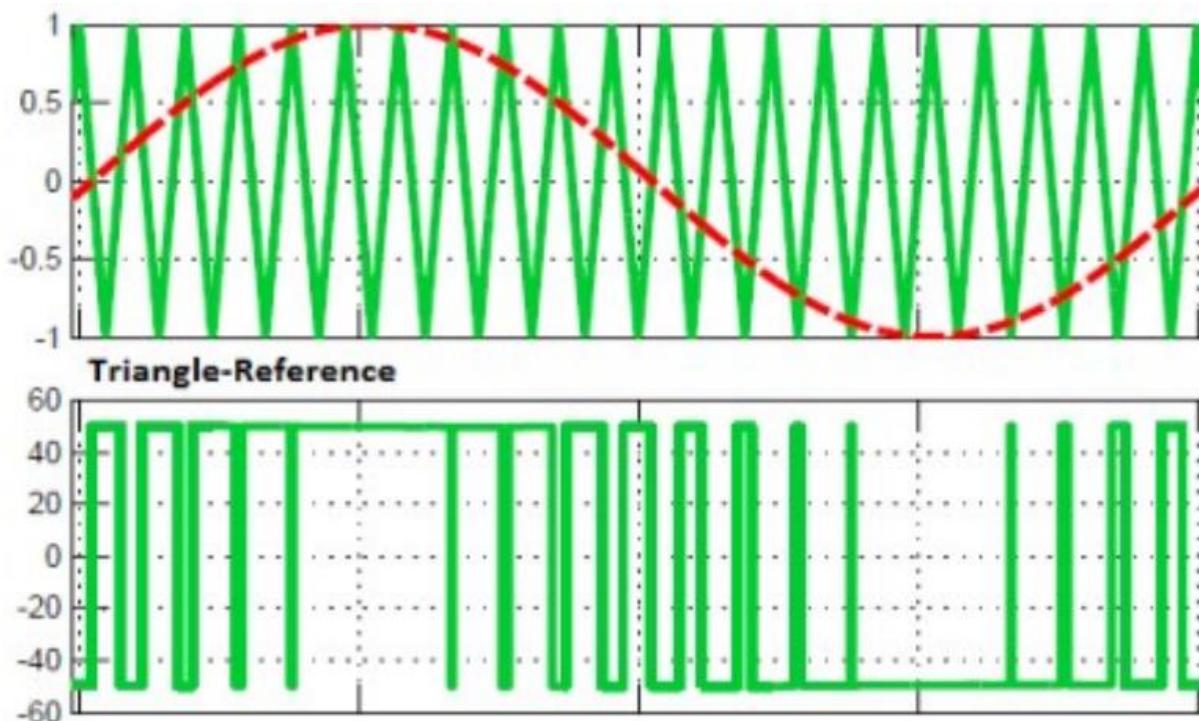
Η PWM είναι μια μη γραμμική διαδικασία, που σημαίνει ότι η ανάκτηση σήματος φίλτρου χαμηλής διέλευσης δεν είναι τέλεια. Ωστόσο, το θεώρημα δειγματοληψίας PWM δείχνει ότι η μετατροπή PWM μπορεί να είναι τέλεια, υπό την προϋπόθεση ότι η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερη από 2 φορές την πλάτος ζώνης του σήματος αναφοράς.

Η συχνότητα δειγματοληψίας καθορίζει τον αριθμό των παλμών στην κυματομορφή PWM. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα δειγματοληψίας, τόσο μικρότερο είναι το πλάτος του κάθε παλμού και τόσο πιο κοντά είναι η κυματομορφή PWM στο αρχικό σήμα αναφοράς.

Η PWM είναι μια αποτελεσματική μέθοδος ελέγχου της μέσης ισχύος που παρέχεται από ένα ηλεκτρικό σήμα. Είναι απλή στην εφαρμογή και προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση του θορύβου και βελτίωση της απόδοσης.

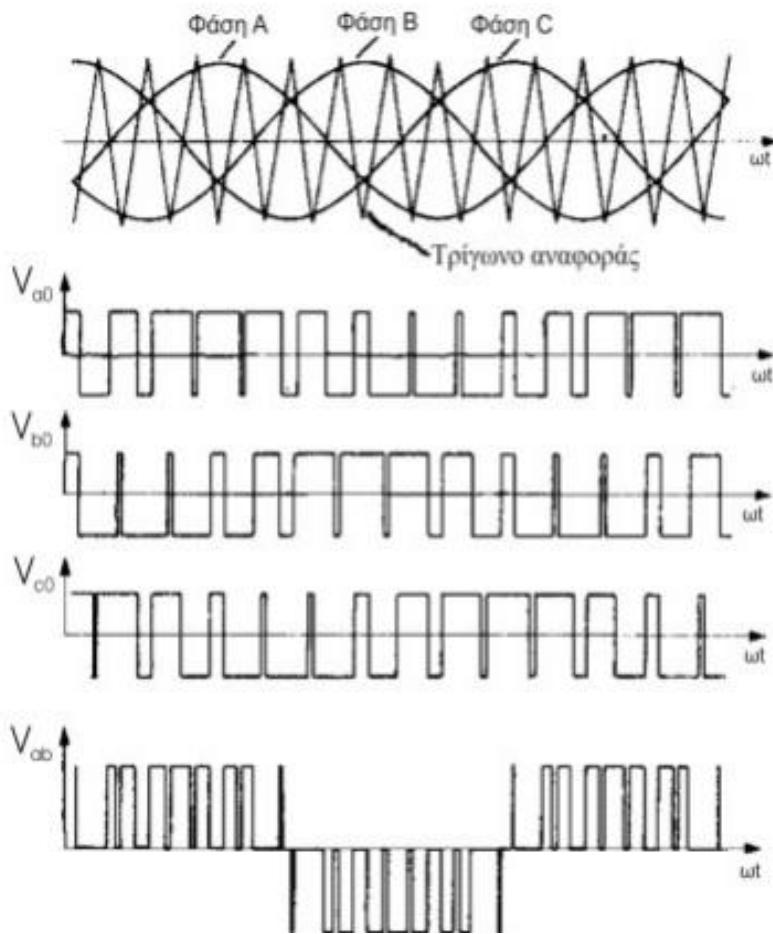
### Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM):

Στην τεχνική της Διαμόρφωσης Παλμών με Ημιτονοειδές Σχήμα (SPWM), ένα σήμα τριγωνικής μορφής, γνωστό ως φέρον σήμα και υψηλής συχνότητας, συγκρίνεται με ένα ημιτονοειδές σήμα, το οποίο αναπαριστά την επιθυμητή συχνότητα στην έξοδο του μετατροπέα και ονομάζεται σήμα αναφοράς. Όταν η τιμή του σήματος αναφοράς υπερβαίνει το φέρον σήμα, παράγεται ένας θετικός παλμός από τον συγκριτή. Αντιστρόφως, όταν η τιμή του σήματος αναφοράς είναι μικρότερη από το φέρον σήμα, παράγεται αρνητικός παλμός. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει αρχικά τα συγκρινόμενα σήματα και στη συνέχεια τους παραγόμενους παλμούς.



Εικόνα 10. Sinusoidal Pulse Width Modulation

Ρυθμίζοντας το πλάτος και τη συχνότητα του σήματος αναφοράς, ελέγχουμε τη συχνότητα και την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Παράλληλα, με τη μεταβολή της αρχικής φάσης του σήματος αναφοράς, προκύπτει αλλαγή στη φάση του εναλλασσομένου ρεύματος στην είσοδο του μετατροπέα, ελέγχοντας έτσι τον συντελεστή ισχύος της διάταξης. Η παλμοδότηση των τρανζίστορ συμβαίνει στον άνω κλάδο με τη χρήση του αντίστοιχου τριγώνου σήματος, ενώ στον κάτω κλάδο χρησιμοποιείται η αντίστροφη κυματομορφή του. Για την παλμοδότηση του τριφασικού μετατροπέα, δημιουργούνται τρία σήματα αναφοράς, ένα για κάθε φάση, με διαφορετική φάση 120 μοιρών μεταξύ τους. Αυτά τα σήματα συγκρίνονται με το ίδιο τριγωνικό σήμα και εφαρμόζονται σε κάθε κλάδο του μετατροπέα. Τα αντίστοιχα σήματα αναφοράς τροφοδοτούν τους αντίστοιχους κάτω κλάδους. Οι κυματομορφές των φασικών και πολικών τάσεων παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 11. Κυματομορφές Φασικών και Πολικών Τάσεων

#### 1.4 Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας:

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βελτίωση της απόδοσης φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο, υπό την ιδιαίτερη περίπτωση της μερικής σκίασης. Πιο συγκεκριμένα δημιουργούμε το σενάριο όπου φωτοβολταϊκές συστοιχίες λαμβάνουν διαφορετική ηλιακή ακτινοβολία και δείχνουμε τις αποκρίσεις που έχουν μέσω των χαρακτηριστικών Ισχύος-Τάσης (P-V). Στην συνέχεια, παρατηρούμε τις γραφικές αυτές και πως προσεγγίζονται από αλγορίθμους εύρεσης του μέγιστου σημείου λειτουργίας/MPP(Maximum Power Point). Συγκρίνοντας τα παραπάνω, καταφέρνουμε να δείξουμε ορισμένες αδυναμίες τις οποίες παρουσιάζει ένας από τους πιο διαδεδομένους ευρητικούς αλγόριθμους ο Perturb and Observe. Ο αλγόριθμος Perturb and Observe (P&O) είναι ένας από τους πιο απλούς και αποτελεσματικούς αλγόριθμους εντοπισμού του μέγιστου σημείου ισχύος (MPP) σε φωτοβολταϊκά συστήματα (PV). Λειτουργεί με τη διαδοχική τροποποίηση της τάσης εξόδου του συστήματος και την παρακολούθηση της μεταβολής της ισχύος εξόδου. Εάν η ισχύς εξόδου αυξηθεί, ο αλγόριθμος συνεχίζει να αυξάνει την τάση εξόδου μέχρι να φτάσει στο MPP. Εάν η ισχύς εξόδου μειωθεί, ο αλγόριθμος μειώνει την τάση εξόδου μέχρι να βρει ξανά το MPP. Έτσι, σταματάει στο πρώτο μέγιστο ισχύος που συναντάει, το οποίο μπορεί να είναι το τοπικό μέγιστο της χαρακτηριστικής με αποτέλεσμα το σύστημα μας να μην λειτουργεί στο MPP υπό ορισμένες περιπτώσεις μερικής σκίασης. Αντίθετα χρησιμοποιώντας τον ευρητικό αλγόριθμο Particle Swarm Optimization, όπου κάθε σωματίδιο

στον αλγόριθμο αντιπροσωπεύει μια πιθανή λώση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και τα σωματίδια κινούνται στον χώρο λύσεων, μαθαίνοντας από τις δικές τους προηγούμενες εμπειρίες και τις εμπειρίες άλλων σωματιδίων, δείχνοντας πως η εύρεση του MPP είναι πάντα εφικτή . Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα πως είναι αποδοτικότερος στα σενάρια σκίασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Σαφώς όλα τα παραπάνω διαδραματίζονται σε ένα σύστημα όπου το φωτοβολταϊκό είναι συνδεδεμένο με έναν Μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης(Boost), ο οποίος με την σειρά του συνδέεται με τον Μετατροπέα Αντιστροφής Τάσης(Inveter) και τελικά το δίκτυο. Πρέπει συνεπώς να συνυπολογίζουμε τις απώλειες που δημιουργούνται στους μετατροπείς και την καλωδίωση που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης (Boost Converter) που παράγει το φωτοβολταϊκό καθώς και την αντιστροφή του από συνεχή σε εναλλασσόμενη (Inveter). Με τον τρόπο αυτό γίνεται εμφανής η μεταβολή του σημείου Μέγιστης Ισχύος και η αδυναμία του P&O να βρει το Global MPP.

Για να είναι εφικτή η υλοποίηση του συστήματος αυτού , απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός του συστήματος ελέγχου και της διασύνδεσης μεταξύ των μετατροπέων. Δηλαδή , είναι σημαντικό να σχεδιάσουμε τους εσωτερικούς βρόγχους ελέγχου , ώστε ο Boost να λειτουργεί κατάλληλα και η παλμοδότηση του να οδηγεί στην επιθυμητή ανύψωση της τάσης. Το ίδιο ισχύει και για τον Inveter ενώ είναι σημαντικός και ο συγχρονισμός με το δίκτυο καθώς και η οδήγηση των d,q συνιστωσών στα επιθυμητά επίπεδα αναφοράς.

Τελικός στόχος της εργασίας είναι ασφαλώς όσα αναφέραμε να αποδειχθούν και στο εργαστήριο, όπου με την χρήση του Προσδομοιωτή Hardware In the Loop της Typhoon , τόσο του Schematic Editor , όσο και του Scada Περιβάλλοντος του , και σε συνδυασμό με τον μικροελεγκτή C2000 της Texas Instruments , παλμοδοτούμε τον Boost και τον Inverter , λαμβάνομε τις μετρήσεις , δηλαδή πως αποκρίνεται η τάση και το ρεύμα του φωτοβολταϊκού συστήματος και παρατηρούμε με την χρήση κάθε αλγορίθμου πως το σύστημα μας οδηγείται σε διαφορετικά σημεία ισορροπίας που αναγνωρίζονται από αυτούς ως μέγιστα σημεία παραγωγής ισχύος.

## 1.5 Βήματα και Υλοποίηση:

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε με την σειρά τα βήματα που ακολουθήσαμε ώστε να μπορέσουμε αρχικά να κατασκευάσουμε το σύστημα των φωτοβολταϊκών και να το συνδέσουμε κατάλληλα με τους μετατροπείς ισχύος στο MATLAB Simulink και στην συνέχεια να μεταφέρουμε το μοντέλο αυτό στο Schematic Editor του Hardware in the Loop, καθώς και όλα τα επόμενα βήματα μέχρι την τελική υλοποίηση του συστήματος στο εργαστήριο , αποτελούμενο από τον μικροελεγκτή , και το HIL.

Αρχικά ξεκινήσαμε με την σταδιακή μελέτη του συστήματος και των αλγορίθμων. Στο πρώτο στάδιο δημιουργήσαμε στο MATLAB του Simulink ένα μοντέλο το οποίο περιείχε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο με έναν Boost μετατροπέα . Σχεδιάσαμε κατάλληλα τον εσωτερικό βρόγχο ελέγχου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης στην πλευρά της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και επιβεβαιώσαμε πως το σύστημα πράγματι οδηγείται στο επιθυμητό ρεύμα αναφοράς. Μετέπειτα προκειμένου να μπορέσουμε να διασταυρώσουμε την ορθή λειτουργία των αλγορίθμων που σκοπεύαμε να εισαγάγουμε , προχωρήσαμε στην εξαγωγή των χαρακτηριστικών P-V και I-V . Οι χαρακτηριστικές αυτές είναι που μας δείχνουν ακριβώς το σημείο (MPP) στο οποίο θα πρέπει οι αλγόριθμοι να οδηγούν το σύστημα ελέγχου

και κατ' επέκταση την λειτουργία του φωτοβολταϊκού . Για να επιτευχθεί αυτό , συνδέσαμε σε σειρά με την φωτοβολταϊκή συστοιχία , Ελεγχόμενη Πηγή Ρεύματος στην οποία θέσαμε ως σήμα εισόδου μια ράμπα από το 0 έως το ρεύμα βραχυκύλωσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Έτσι μπορέσαμε να βρούμε την χαρακτηριστική και κατά συνέπεια το MPP, στο οποίο θα πρέπει να μας οδηγούν οι αλγόριθμοι. Επόμενο βήμα βεβαίως ήταν οι αλγόριθμοι τους οποίους θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε στο σύστημα μας. Αρχικά μελετήσαμε τον πιο διαδεδομένο αλγόριθμο Perturb and Observe , είδαμε την φιλοσοφία που ακολουθεί και την εφαρμόσαμε στο δικό μας σύστημα , με την διαφορά πως εμείς βασιστήκαμε στην μεταβολή του ρεύματος αναφοράς, αντί εκείνη της ισχύος όπως συνηθίζεται σε τέτοιου είδους συστήματα. Αφού ολοκληρώσαμε τον αλγόριθμο, τον τοποθετήσαμε σε MATLAB Function Block σε κοινό αρχείο Simulink με την αρχική συστοιχία φωτοβολταϊκών και επιβεβαιώσαμε πως λειτουργεί ορθά. Στην συνέχεια προσθέσαμε στο σύστημα τον Inverter και συνεπώς τον κατάλληλο έλεγχο που απαιτείται. Ο έλεγχος αυτός αποτελείται από τον εξωτερικό βρόγχο ελέγχου της Vdc δηλαδή της τάσης μετά τον Boost και πριν τον Inverter ( DC δίαυλος ) , που στην περίπτωση μας θέλουμε να είναι 1200 Volt, τον έλεγχο στην πλευρά του φορτίου και τον τον Βρόγχο Κλειδώματος Φάσης ( Phased-Locked Loop).Ο Βρόγχος Κλειδώματος Φάσης είναι υπεύθυνος για τον συγχρονισμό του συστήματος με το δίκτυο , ενώ ο έλεγχος στην πλευρά του φορτίου , φροντίζει να διατηρείται σταθερή η τάση και η συχνότητα και αφενός να μηδενίζεται η τάση στον άξονα q ,αφετέρου να οδηγείται σε μία επιθυμητή τιμή στον άξονα d της πλευράς του δικτύου. Με τα τρία αυτά κυκλώματα ελέγχου πετυχαίνουμε:

- Ο εξωτερικός βρόγχος της τάσης παράγει ένα σήμα αναφοράς ρεύματος για τον άξονα d και ο εσωτερικός βρόγχος απαλλαγμένος από τις μη γραμμικότητες παράγει την κατάλληλη μεταβλητή έναυσης του μετατροπέα ισχύος μέσω της τεχνικής S.P.W.M.
- Το PLL παράγει την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας ενώ παράλληλα μηδενίζουμε την τάση στον άξονα q στην πλευρά του φορτίου.
- Μηδενίζεται η ροή ρεύματος στον άξονα q προς μείωση των απωλειών ισχύος και της άεργου ισχύος πιο συγκεκριμένα.

Αφού ολοκληρώσαμε αυτά και βεβαιωθήκαμε για την ορθή λειτουργία του συστήματος και των αλγορίθμων , εφαρμόσαμε το φαινόμενο της μερικής σκίασης. Για να επιτευχθεί αυτό, τοποθετήσαμε σε σειρά αντί για μία φωτοβολταϊκή συστοιχία με κοινή ακτινοβολία τρεις με διαφορετική ακτινοβολία η κάθε μία. Ακόμη τοποθετήσαμε παράλληλα στην κάθε μία Bypass Δίοδο η οποία επιτρέπει στο ρεύμα να παρακάμψει το σκιασμένο κελί, διατηρώντας έτσι τη ροή του ρεύματος στον υπόλοιπο κύκλωμα και αντιμετωπίζοντας φαινόμενα όπως εκείνο του Hot Spot. Αυτό βοηθά στην ελαχιστοποίηση των απωλειών από σκίαση και διατηρεί υψηλή απόδοση του ηλιακού συστήματος.

Για ακόμη μία φορά και με τον ίδιο τρόπο όπως προηγουμένως εξαγάγαμε τις χαρακτηριστικές του συστήματος και επιβεβαιώσαμε την ορθή λειτουργία των αλγορίθμων και στην περίπτωση της μερικής σκίασης , με την βασική διαφορά πως σε αυτή την περίπτωση η χαρακτηριστική P-V παρουσιάζει 2 μέγιστα , ένα τοπικό και ένα ολικό. Εδώ γίνεται εμφανής η αδυναμία του Perturb and Observe να διαχωρίσει αυτά τα δύο , με αποτέλεσμα να καταλήγει στο τοπικό μέγιστο και όχι στο MPP. Αντίθετα με την χρήση του Particle Swarm Optimization η εύρεση του MPP είναι ορθή , καταλήγοντας έτσι στο συμπέρασμα πως είναι αποδοτικότερος αλγόριθμος στο σενάριο αυτό.

Έτσι , αφού πλέον ολοκληρώσαμε το σύστημα μας στο Simulink , μεταφέραμε το μοντέλο αυτό στο αντίστοιχο περιβάλλον του HIL , το Schematic Editor , χωρίς να συμπεριλάβουμε το κομμάτι του ελέγχου. Για τον έλεγχο και την παλμοδότηση των μετατροπέων , δημιουργήσαμε ένα καινούριο αρχείο Simulink , στο οποίο τοποθετήσαμε Blocks που εισάγουν τις αναλογικές εισόδους , και τον κατάλληλο έλεγχο που είχαμε σχεδιάσει, όπως και τον αλγόριθμο Particle Swarm Optimization και λάβαμε ως έξοδο τους παλμούς που χρειαζόταν για τον Boost μετατροπέα και τους οποίους θέσαμε ως είσοδο στην συσκευή HIL. Συνδέοντας λοιπόν κατάλληλα τον μικροελεγκτή με το HIL και τον υπολογιστή , αφού φορτώσαμε το Simulink αρχείο του ελέγχου και των σημάτων στον C2000 και έχοντας δημιουργήσει παράλληλα ένα μοντέλο SCADA στο HIL , καταφέραμε να επιβεβαιώσουμε και πειραματικά τα όσα αναφέραμε προηγουμένως. Δηλαδή , χρησιμοποιώντας τους 2 αλγορίθμους στο φωτοβολταϊκό σύστημα που είχαμε κατασκευάσει , και παρατηρώντας τις μετρήσεις μέσω του Code Composer Studio και του SCADA , διαπιστώσαμε πως πράγματι ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization είναι βέλτιστος και οδηγεί το φωτοβολταϊκό στο MPP σε αντίθεση με τον Perturb and Observe που σταματάει στο πρώτο τοπικό μέγιστο. Έτσι ολοκληρώσαμε και την πειραματική μελέτη και είμαστε πλέον βέβαιοι για τα συμπεράσματα μας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία που μετατρέπει ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η τεχνολογία έχει επαναπροσδιορίσει τον τρόπο

παραγωγής ενέργειας, προσφέροντας μια βιώσιμη και καθαρή εναλλακτική λύση. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξετάσουμε την ιστορία, την κατασκευή, τη λειτουργία και τις διάφορες κατηγορίες των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς επίσης θα αναλύσουμε τις απώλειες που παρουσιάζονται σε αυτά και αλγόριθμους κατάλληλους για την μέγιστη απόδοση τους.

## 2.1 Θεωρία :

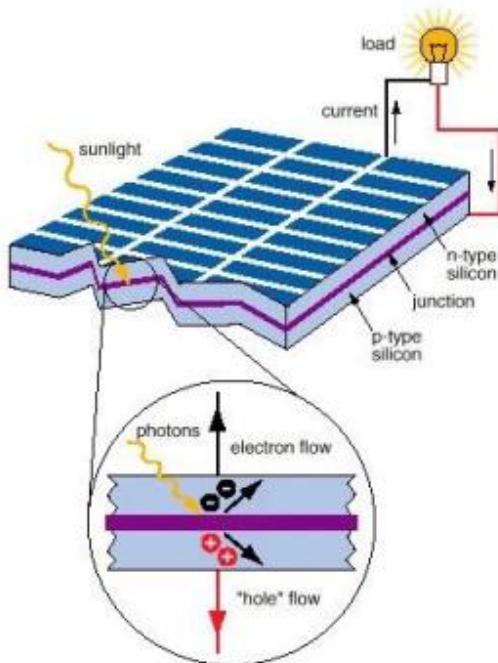
Η έννοια της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια ξεκίνησε τον 19ο αιώνα, όταν ο φυσικός Alexandre-Edmond Becquerel ανακάλυψε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Ωστόσο, ήταν το 1954 που οι Αμερικανοί φυσικοί Daryl Chapin, Calvin Fuller και Gerald Pearson κατασκεύασαν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο που μπορούσε να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα με απόδοση 6%. Στη συνέχεια, η απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων αυξήθηκε σημαντικά, χάρη στις εξελίξεις στην τεχνολογία των υλικών και των διαδικασιών κατασκευής. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση έως και 25%. Η εμπορική τους χρήση ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1970. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν σε μικρές συσκευές, όπως ραδιοφωνικές συσκευές και υπολογιστές και μετέπειτα σε μεγαλύτερες εφαρμογές, όπως φωτισμός, συστήματα τηλεπικοινωνιών και συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, που αποτελούν την καρδιά των φωτοβολταϊκών συστημάτων, κατασκευάζονται συνήθως από ημιαγωγικά υλικά. Τα πιο κοινά χρησιμοποιούμενα υλικά περιλαμβάνουν το πυρίτιο και το γάλλιο, ενώ η διαδικασία κατασκευής των κυττάρων συνίσταται σε πολλαπλά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, κατασκευάζεται ο ημιαγωγός από τον οποίο θα κατασκευαστεί το φωτοβολταϊκό κύτταρο. Το πιο κοινό υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του ημιαγωγού είναι το πυρίτιο, το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί με διάφορες μεθόδους, όπως η κρυστάλλωση, η εκτύπωση και η χημική επικάλυψη. Στο δεύτερο στάδιο, κατασκευάζεται το φωτοβολταϊκό κύτταρο από τον ημιαγωγό που επιλέχθηκε στο πρώτο στάδιο. Το φωτοβολταϊκό κύτταρο αποτελείται από δύο περιοχές με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Αυτές οι περιοχές ονομάζονται περιοχή p και περιοχή n. Η περιοχή p έχει πλεόνασμα ηλεκτρονίων, ενώ η περιοχή n έχει έλλειψη ηλεκτρονίων. Η διαφορά αυτή στις ηλεκτρικές ιδιότητες δημιουργεί μια ηλεκτρική τάση μεταξύ των δύο περιοχών. Για να δημιουργηθεί η διαφορά αυτή στις ηλεκτρικές ιδιότητες, οι περιοχές p και n συνδέονται μεταξύ τους με ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο. Το μεταλλικό ηλεκτρόδιο που συνδέεται με την περιοχή p ονομάζεται αναγωγικό ηλεκτρόδιο, ενώ το μεταλλικό ηλεκτρόδιο που συνδέεται με την περιοχή n ονομάζεται οξειδωτικό ηλεκτρόδιο. Η κατασκευή του φωτοβολταϊκού κυττάρου ολοκληρώνεται με την εφαρμογή ενός προστατευτικού στρώματος στην επιφάνεια του κυττάρου που προστατεύει το κύτταρο από τις εξωτερικές επιδράσεις, όπως η υγρασία και η σκόνη. Η δομή αυτή επιτρέπει στα φωτοβολταϊκά κύτταρα να απορροφούν το ηλιακό φως και να δημιουργούν φωτοηλεκτρικό ρεύμα. Η ποικιλομορφία των διαδικασιών κατασκευής έχει ως αποτέλεσμα διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυττάρων, καθιστώντας τα κατάλληλα για διάφορες εφαρμογές.

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων λοιπόν, βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο είναι ένα φυσικό φαινόμενο που περιλαμβάνει τη μετατόπιση ηλεκτρονίων σε ημιαγώγιμα υλικά υπό την επίδραση του ηλιακού φωτός. Ας αναλύσουμε τα βήματα αυτής της διαδικασίας:

- Απορρόφηση Φωτός:** Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα περιλαμβάνουν ένα ημιαγώγιμο υλικό. Όταν τα φωτόνια από το ηλιακό φως συναντούν αυτό το υλικό, ενεργοποιούν τα ηλεκτρόνια στον ημιαγώγιο.
- Απελευθέρωση Ηλεκτρονίων:** Τα φωτόνια με την πρόσπτωση τους μεταφέρουν ενέργεια στα εσωτερικά ηλεκτρόνια του ημιαγώγιου, επιτρέποντας σε ορισμένα ηλεκτρόνια να αποσπαστούν από τα άτομα του υλικού. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ηλεκτρικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και οπές (κενά όπου προηγουμένως βρίσκονταν ηλεκτρόνια).
- Διακίνηση Φορτίου:** Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από την εξωτερική στοιβάδα του ημιαγώγιου μπορούν να κινηθούν μέσα στον ημιαγώγιο, δημιουργώντας ένα ρεύμα ηλεκτρικού φορτίου. Αυτό το ηλεκτρικό ρεύμα είναι το αποτέλεσμα της ροής ηλεκτρονίων προς την έξοδο του φωτοβολταϊκού κυττάρου.
- Συγκέντρωση και Χρήση Ρεύματος:** Οι επαγγελματίες στις δύο πλευρές του φωτοβολταϊκού κυττάρου συλλέγουν τα ηλεκτρόνια και μεταφέρουν το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα προς το εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό το ρεύμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τροφοδοσία ηλεκτρικών συσκευών ή να αποθηκευτεί για μετέπειτα χρήση.

Η διαδικασία αυτή της μετατόπισης της ηλεκτρικής φόρτισης με τη χρήση του φωτοηλεκτρικού αποτελέσματος εξηγεί πώς τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, προσφέροντας μια καθαρή και βιώσιμη πηγή ενέργειας.



Εικόνα 12. Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες :

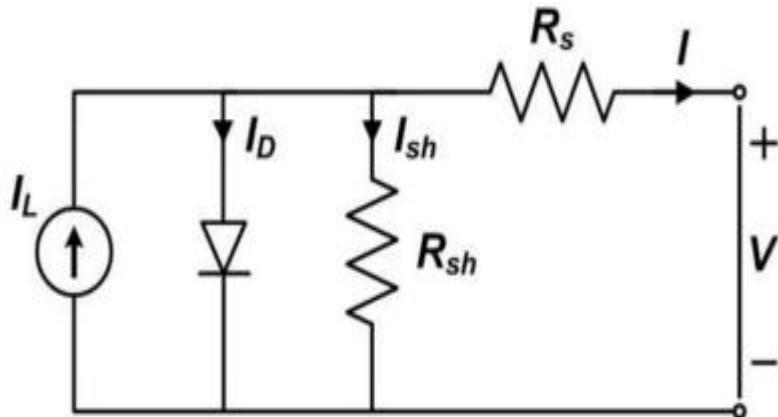
- 1) Κρυσταλλικού πυριτίου τύπου Σιλικόνης (Silicon Solar Cells): Συναντώνται συχνότερα από όλα στην αγορά και κατασκευάζονται από κρυσταλλικό πυρίτιο. Μάλιστα αποτελούνται από τρεις υποκατηγορίες:

- a) Μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Monocrystalline Solar Cells - Sc-Si): Παρουσιάζουν υψηλή απόδοση και αποτελεσματικότητα, αλλά η διαδικασία παραγωγής τους είναι πιο δαπανηρή. Το πάχος τους κυμαίνεται περίπου στα 0,3 χιλιοστά. Στη βιομηχανία, η απόδοσή τους κυμαίνεται μεταξύ 15% - 18% για το πλαίσιο. Σε εργαστηριακές συνθήκες, έχουν επιτευχθεί ακόμη υψηλότερες αποδόσεις, φτάνοντας ακόμα και το 24,7%.
- b) Πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Polycrystalline Solar Cells - mc-Si): Αυτά είναι οικονομικότερα, αλλά παρουσιάζουν ελαφρώς χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές, έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20%, ενώ στην εμπορική διάθεση τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13% έως 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ).
- c) Ταινία Πυριτίου (Ribbon-Si): Είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Ένα από τα πλεονεκτήματά τους είναι η μείωση έως και 50% στη χρήση πυριτίου σε σύγκριση με τις κλασικές τεχνικές κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοσή τους έχει φτάσει περίπου στο 12-13%, με το πάχος τους να κυμαίνεται περίπου στα 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο, έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.
- 2) Λεπτών επιστρώσεων (Thin-Film Solar Cells): Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αυτά κατασκευάζονται με λεπτές στρώσεις διαφόρων υλικών, είναι ελαφριά και ευέλικτα, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές. Ωστόσο, συνήθως παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τα φωτοβολταϊκά κύτταρα από κρυσταλλικό πυρίτιο. Τα υλικά κατασκευής περιλαμβάνουν το δισεληνοϊνδιούχο χαλκό (CuInSe<sub>2</sub> - με απόδοση έως 11%), το άμιορφο πυρίτιο (a-Si - με απόδοση από 6 έως 8%), το τελουριούχο κάδμιο (CdTe - με απόδοση γύρω στο 6-8%) και το αρσενιούχο γάλλιο (GaAs), το οποίο επιδεικνύει απόδοση που αγγίζει το 29%. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι επίσης ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες και αντέχουν σε υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας κάνοντας τα ελκυστικά. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.
- 3) Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία: Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο περιλαμβάνει στρώσεις υλικών από διάφορες τεχνολογίες. HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Το πιο διαδεδομένο αποτελείται από δύο στρώσεις άμιορφου πυριτίου (μία στο πάνω μέρος και μία στο κάτω) ενώ μεταξύ τους υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου, ο οποίος φτάνει το 17,2% σε εμπορικές εφαρμογές. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μικρότερη επιφάνεια για να επιτευχθεί η ίδια εγκατεστημένη ισχύς σε σύγκριση με άλλα φωτοβολταϊκά συστήματα.

### 2.1.1 Ισοδύναμο Κύκλωμα:

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης αποτελεί ένα απλοποιημένο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη λειτουργία της κυψέλης κατά την

έκθεσή της στην ηλιακή ακτινοβολία. Το συγκεκριμένο κύκλωμα συνδράμει στον υπολογισμό της ηλεκτρικής απόδοσης της φωτοβολταϊκής κυψέλης και στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατά τη λειτουργία της.



Εικόνα 13. Ισοδύναμο Κύκλωμα Φωτοβολταϊκού

Η βασική εξίσωση που περιγράφει το κύτταρο είναι :

$$I = I_L - I_O * (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

Στον παραπάνω τύπο το  $I_0$  αποτελεί το ρεύμα κόρου της διόδου και το  $I_L$  αποτελεί το φωτόρευμα , το ρεύμα δηλαδή που ευθύνεται στην προσπίπτουσα ακτινοβολία που δέχεται το ηλιακό κύτταρο. Οι τύποι υπολογισμού των μεγεθών αυτών είναι :

$$I_0 = A_{Cell} * \left( \frac{q * D_e * n i^2}{L_e * N_A} + \frac{q * D_h * n i^2}{L_h * N_D} \right)$$

$$IL = q * A * G * (Le + W + Lh)$$

Οπου :

- q: Το φορτίο ηλεκτρονίου)
- T: Η απόλυτη θερμοκρασία του κυττάρου
- k: Η σταθερά του Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)
- ACell: Η διατομή του κυττάρου
- V: Η τάση στην έξοδο του κυττάρου
- Le: Το μήκος διάχυσης ηλεκτρονίων =  $\sqrt{D_e * \tau e}$
- Lh: Το μήκος διάχυσης οπών =  $\sqrt{D_h * \tau h}$
- $\tau e, \tau h$  : Η διάρκεια ζωής των ηλεκτρονίων (οπών) σαν φορείς μειονότητας
- W: Το εύρος της επαφής (Depletion Region)
- G: Ο ρυθμός παραγωγής για την ηλιακή ακτινοβολία

Η βασική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου είναι η εξίσωση Shockley-Queisser, η οποία περιγράφει τη λειτουργία ενός ηλιακού κυττάρου ως δίοδος p-n. Η εξίσωση αυτή είναι μια καλή προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς του ηλιακού κυττάρου, αλλά δεν είναι ακριβής σε όλες τις περιπτώσεις.

Οι πειραματικές παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι η βασική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου δεν αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την πραγματική I-V χαρακτηριστική καμπύλη ενός κυττάρου σε πρακτικούς σκοπούς. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν λαμβάνει υπόψη ορισμένους παράγοντες που επηρεάζουν την πραγματική συμπεριφορά του ηλιακού κυττάρου, όπως:

- Το εξωτερικό βραχυκύκλωμα: Η βασική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου υποθέτει ότι το εξωτερικό κύκλωμα είναι ανοιχτό. Στην πραγματικότητα, το εξωτερικό κύκλωμα είναι συνήθως συνδεδεμένο σε ένα φορτίο, το οποίο επηρεάζει την καμπύλη I-V του ηλιακού κυττάρου.
- Οι απώλειες στο εξωτερικό κύκλωμα: Οι απώλειες στο εξωτερικό κύκλωμα, όπως οι απώλειες αντίστασης και οι απώλειες χωρητικότητας, επηρεάζουν επίσης την καμπύλη I-V του ηλιακού κυττάρου.
- Οι εσωτερικές απώλειες: Οι εσωτερικές απώλειες, όπως οι απώλειες λόγω της ρευστοποίησης της φωτοβολταϊκής τάσης(η φωτοβολταϊκή τάση αρχίζει να μειώνεται καθώς αυξάνεται η ένταση του ρεύματος) και οι απώλειες λόγω της θερμικής ροής, επηρεάζουν επίσης την καμπύλη I-V του ηλιακού κυττάρου.

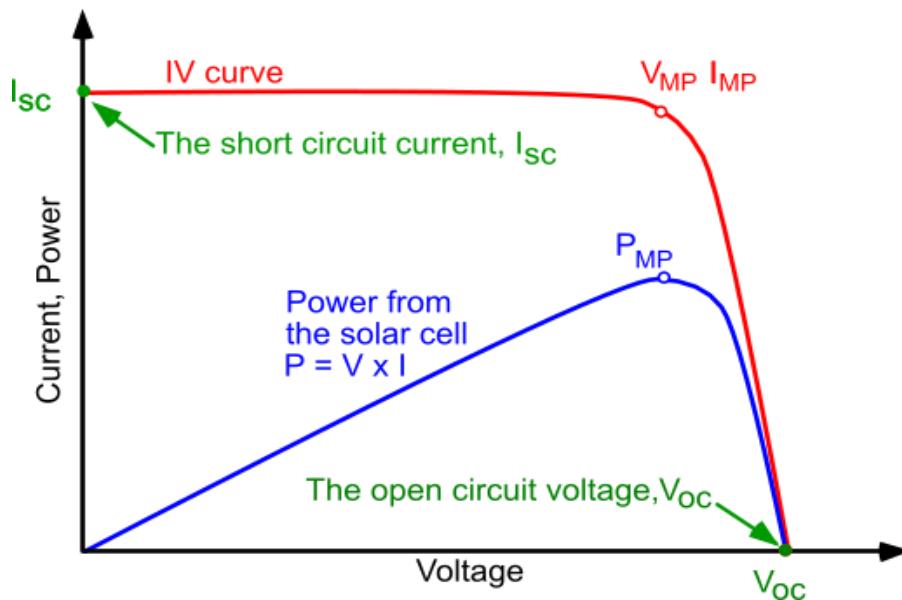
Για να βελτιώσουν την ακρίβεια της βασικής εξίσωσης του ηλιακού κυττάρου, οι ερευνητές έχουν εισαγάγει τρεις πρόσθετες παραμέτρους:

- Rs: Η εν σειρά αντίσταση του κυττάρου αντιπροσωπεύει την αντίσταση που συναντούν οι φορείς κατά την ροή τους μέσα στο κύτταρο. Η αντίσταση αυτή προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως η αντίσταση του κυρίως ημιαγωγού, η αντίσταση της επιφανειακής στρώσης και η αντίσταση της ωματικής επαφής(η περιοχή όπου συναντώνται δύο διαφορετικά υλικά, όπως ο ημιαγωγός και το μεταλλικό ηλεκτρόδιο του φωτοβολταϊκού κυττάρου).
- Rsh: Η παράλληλη αντίσταση του κυττάρου αντιπροσωπεύει την αντίσταση που συναντούν οι φορείς που διαρρέουν το κύτταρο. Η αντίσταση αυτή προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως η επανασύνδεση των φορέων στην περιοχή επαφής, η διαρροή των φορέων στην εξωτερική επιφάνεια του κυττάρου και η διαρροή των φορέων σε ανωμαλίες του κρυστάλλου.
- A: Η σταθερά A αντιπροσωπεύει τα φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή επαφής. Η τιμή της A κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2, ανάλογα με το είδος του υλικού από το οποίο κατασκευάζεται το κύτταρο και τις συνθήκες λειτουργίας του.

Βάσει των παραπάνω προκύπτει ο τελικός τύπος :

$$I = I_L - I_0 * \left( e^{\frac{q*(V+I*R_S)}{A*kT}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}}$$

Οι I-V, P-V χαρακτηριστικές καμπύλες στην έξοδο ενός κυττάρου παριστάνονται ως εξής :



Εικόνα 14. P-V και I-V Χαρακτηριστικές Φωτοβολταϊκού

- Τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{OC}$ ): Η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι η τάση που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ όταν δεν αντλείται ρεύμα από αυτό. Σε ιδανικές συνθήκες, είναι σχετικά σταθερή υπό μεταβαλλόμενη φωτεινότητα. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η τάση κυττάρου στο σημείο ανοικτού κυκλώματος μειώνεται.
- Ρεύμα βραχυκυκλώσεως ( $I_{SC}$ ): Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι το μέγιστο ρεύμα που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ όταν οι ακροδέκτες του είναι βραχυκυκλωμένοι. Σε ιδανικές συνθήκες, είναι επίσης σχετικά σταθερό υπό μεταβαλλόμενη φωτεινότητα. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως αυξάνεται.
- Τάση μέγιστης ισχύος ( $V_{MP}$ ): Η τάση μέγιστης ισχύος είναι η τάση στην οποία ένα φωτοβολταϊκό πάνελ παράγει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ. Αυτή η τάση είναι μικρότερη από την τάση ανοιχτού κυκλώματος και μεγαλύτερη από την τάση βραχυκυκλώσεως.
- Ρεύμα μέγιστης ισχύος ( $I_{MP}$ ): Το ρεύμα μέγιστης ισχύος είναι το ρεύμα στο οποίο ένα φωτοβολταϊκό πάνελ παράγει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ. Αυτό το ρεύμα είναι μικρότερο από το ρεύμα βραχυκυκλώσεως και μεγαλύτερο από μηδέν.
- Σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου ( $P_{MP}$ ): Το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου είναι το σημείο στο οποίο η καμπύλη ισχύος-τάσης ενός φωτοβολταϊκού πάνελ φτάνει στο μέγιστο. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί στην τάση μέγιστης ισχύος και στο ρεύμα μέγιστης ισχύος.

## 2.1.2 Απόδοση Φωτοβολταϊκών:

Η I-V καμπύλη ενός ηλιακού κυττάρου εξαρτάται από δύο κύριους παράγοντες: την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία. Όταν αυξάνεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, αυξάνεται και ο αριθμός των φωτονίων που απορροφούνται από

το ηλιακό κύτταρο. Αυτό οδηγεί σε αύξηση του αριθμού των φορέων σε κίνηση, δηλαδή του ρεύματος. Η τάση  $V_{oc}$  μειώνεται επίσης ελαφρώς, καθώς αυξάνεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του ηλιακού κυττάρου, αυξάνεται η κινητικότητα των φορέων σε κίνηση. Αυτό οδηγεί σε αύξηση του ρεύματος  $I_{sc}$  και της τάσης  $V_{oc}$ . Η  $R_s$  επίσης αυξάνεται ελαφρώς, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του ηλιακού κυττάρου. Η γρήγορη απόκριση της I-V καμπύλης στην ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας καθιστά τα ηλιακά κύτταρα κατάλληλα για εφαρμογές όπου η παροχή ενέργειας πρέπει να προσαρμόζεται γρήγορα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες ακτινοβολίας.

Ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{MP}$  που παράγει το κύτταρο προς το γινόμενο της επιφάνειας A του κυττάρου και της έντασης ακτινοβολίας G. Ο τύπος για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης είναι ο εξής:

$$n = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{V_{MP} * I_{MP}}{A * G}$$

- η είναι ο βαθμός απόδοσης
- $P_{MP}$  είναι η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς
- A είναι η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού κυττάρου
- G είναι η ένταση ακτινοβολίας

Η ένταση ακτινοβολίας G εκφράζεται σε βατ ανά τετραγωνικό μέτρο ( $W/m^2$ ). Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς εκφράζεται σε βατ (W). Η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού κυττάρου A εκφράζεται σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ ).

Ο βαθμός απόδοσης των ηλιακών κυττάρων του εμπορίου βρίσκεται στην περιοχή 14% μέχρι 20%. Οι υψηλότεροι βαθμοί απόδοσης επιτυγχάνονται με την χρήση εξειδικευμένων τεχνολογιών, όπως η χρήση υλικών με χαμηλό ενεργειακό χάσμα, η χρήση στρωμάτων αντιανακλάσεως και η χρήση τεχνολογιών συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες είναι πιο ακριβές από τις συμβατικές τεχνολογίες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος των ηλιακών κυττάρων. Αξίζει να σημειώσουμε πως ο βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός και μεταβάλλεται από διάφορους παράγοντες, όπως:

### *Εξωτερικοί παράγοντες:*

- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας
- Θερμοκρασία

- Σκίαση
- Ανάκλαση
- Αντίσταση

#### ***Εσωτερικοί παράγοντες:***

- Το υλικό κατασκευής
- Η ποιότητα κατασκευής του στοιχείου
- Η ηλικία του

Αξίζει να δώσουμε ιδιαίτερη μνεία στο φαινόμενο του Hot Spot , μιας και το ιδιαίτερο αυτό σενάριο θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην παρούσα διπλωματική εργασία.

#### ***Hot Spot:***

Το φαινόμενο του hotspot είναι ένα σημαντικό πρόβλημα που μπορεί να εμφανιστεί στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οφείλεται στην ύπαρξη ενός ή περισσοτέρων φωτοβολταϊκών (Φ/Β) στοιχείων που παράγουν χαμηλότερο ρεύμα (λόγω σκίασης, αστοχίας υλικού, αντίθετης πολικότητας κτλ.) σε σχέση με τα υπόλοιπα στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση στα συγκεκριμένα στοιχεία, με επακόλουθο την υπερθέρμανση τους. Τα πιο συνηθισμένα αίτια που προκαλούν το φαινόμενο του hotspot είναι τα εξής:

- **Σκίαση:** Η σκίαση ενός ή περισσοτέρων Φ/Β στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της παραγωγής ρεύματος από αυτά. Αυτό συμβαίνει επειδή η σκιά μειώνει την ποσότητα φωτός που φτάνει στα συγκεκριμένα στοιχεία και κατ' επέκταση το ρεύμα.
- **Αστοχία υλικού:** Η αστοχία υλικού, όπως η ρωγμή σε ένα Φ/Β στοιχείο, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μείωση της παραγωγής ρεύματος από το συγκεκριμένο στοιχείο.
- **Αντιστροφή πολικότητας:** Η αντίστροφή πολικότητα συμβαίνει όταν τα δύο ηλεκτρόδια ενός Φ/Β στοιχείου συνδέονται με αντίθετη φορά. Αυτό μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης ή της συντήρησης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Το φαινόμενο του hotspot μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι πιο σημαντικές είναι οι εξής:

- **Μείωση της απόδοσης του συστήματος:** Το φαινόμενο του hotspot μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος κατά 10% ή περισσότερο.

- Βλάβη στα Φ/Β στοιχεία: Η υπερβολική θέρμανση των Φ/Β στοιχείων μπορεί να προκαλέσει βλάβη σε αυτά, με αποτέλεσμα να μειωθεί η διάρκεια ζωής τους.
- Πυρκαγιά: Σε ακραίες περιπτώσεις, το φαινόμενο του hotspot μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε πυρκαγιά.

Για τους παραπάνω λόγους κρίνεται λοιπόν αναγκαίο να λαμβάνουμε μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης του φαινομένου Hot Spot. Οι πιο αποτελεσματικές μέθοδοι είναι :

- Προγραμματισμένη συντήρηση: Η προγραμματισμένη συντήρηση του φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να βοηθήσει στην έγκαιρη ανίχνευση και αντιμετώπιση προβλημάτων που μπορεί να προκαλέσουν το φαινόμενο του hotspot.
- Χρήση ειδικών εξαρτημάτων: Υπάρχουν ειδικές διατάξεις που μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση του φαινόμενου του hotspot, όπως οι αντιστάτες ισορρόπησης τάσης.
- Αλλαγή της διαρρύθμισης των Φ/Β στοιχείων: Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αλλαγή της διαρρύθμισης των Φ/Β στοιχείων μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή του φαινομένου του hotspot.

## 2.2 Αλγόριθμοι Εύρεσης Μέγιστρου Σημείου Ισχύος (MPPT Algorithms) :

Οι μέθοδοι MPPT (Maximum Power Point Tracking) χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και την αναζήτηση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Το MPP είναι το σημείο λειτουργίας του πάνελ όπου παράγεται η μέγιστη ισχύς και επομένως το φωτοβολταϊκό σύστημα λειτουργεί βέλτιστα.

Οι μέθοδοι MPPT χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Άμεσες μέθοδοι MPPT
2. Έμμεσες μέθοδοι MPPT
3. Μέθοδοι MPPT με την χρήση Artificial Intelligence

### Άμεσες μέθοδοι MPPT:

Οι άμεσες μέθοδοι MPPT εντοπίζουν το MPP μελετώντας απευθείας τη καμπύλη ισχύος (P-V) του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η καμπύλη ισχύος είναι μια γραφική παράσταση της εξόδου ισχύος του πάνελ έναντι της τάσης του πάνελ. Το MPP είναι το σημείο της καμπύλης όπου η ισχύς είναι μέγιστη. Οι άμεσες μέθοδοι MPPT είναι συνήθως πιο ακριβείς από τις έμμεσες μεθόδους, αλλά και πιο αργές. Αυτό συμβαίνει επειδή πρέπει να εξετάσουν ολόκληρη την

καμπύλη ισχύος για να βρουν το MPP. Μερικές από τις πιο γνωστές άμεσες μεθόδους MPPT είναι οι εξής:

- Perturb and Observe: Αυτή η μέθοδος ξεκινά με μια αρχική τιμή τάσης και, στη συνέχεια, αυξάνει ή μειώνει τη τάση ώστε ότου βρεθεί το MPP. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα στην παρούσα διπλωματική εργασία μεταβάλλαμε το ρεύμα αναφοράς του εσωτερικού βρόγχου ελέγχου αντί για την τάση.
- Sequential Search: Αυτή η μέθοδος δοκιμάζει μια σειρά από πιθανές τιμές τάσης μέχρι να βρει το MPP.
- Divide-and-Conquer: Αυτή η μέθοδος χωρίζει τη καμπύλη ισχύος σε μικρότερα τμήματα και, στη συνέχεια, χρησιμοποιεί μια άμεση μέθοδο MPPT για να βρει το MPP σε κάθε τμήμα.

#### Έμμεσες μέθοδοι MPPT:

Οι έμμεσες μέθοδοι MPPT εντοπίζουν το MPP χρησιμοποιώντας μια παράμετρο που είναι συνδεδεμένη με το MPP. Για παράδειγμα, η τάση ανοικτού κυκλώματος (Voc) και το ρεύμα βραχικυκλώματος (Isc) του φωτοβολταϊκού πάνελ είναι συνδεδεμένα με το MPP. Είναι συνήθως πιο γρήγορες από τις άμεσες μεθόδους, αλλά και λιγότερο ακριβείς. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν χρειάζονται να εξετάσουν ολόκληρη την καμπύλη ισχύος για να βρουν το MPP.

- Μέθοδος P&O με εκθετική εξομάλυνση (P&O with Exponential Smoothing): Αυτή η μέθοδος είναι μια παραλλαγή της μεθόδου ανάβασης που χρησιμοποιεί μια εκθετική εξομάλυνση για να βελτιώσει την ακρίβεια.
- Μέθοδος P&O με μεταβολή πλάτους παλμού (P&O with Pulse Width Modulation): Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ως μεταβλητή το duty cycle για να ελέγξει την τάση του φωτοβολταϊκού πάνελ.

#### Μέθοδοι MPPT με τεχνητή νοημοσύνη:

Οι μέθοδοι MPPT με τεχνητή νοημοσύνη (AI) χρησιμοποιούν τεχνικές μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης για να εντοπίσουν το MPP ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν τη δυνατότητα να μάθουν και να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες

συνθήκες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πάνελ, προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα από τις παραδοσιακές μεθόδους MPPT.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μεθόδων MPPT με AI που έχουν αναπτυχθεί, μερικές από τις πιο γνωστές είναι:

- Μέθοδοι που βασίζονται σε νευρωνικά δίκτυα: Τα νευρωνικά δίκτυα είναι μια μορφή μηχανικής μάθησης που μιμείται τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση ενός μοντέλου που μπορεί να προβλέψει την ισχύ εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πάνελ για μια δεδομένη τάση.

- Μέθοδοι που βασίζονται σε μηχανική μάθηση: Η μηχανική μάθηση είναι ένα ευρύτερο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης που περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές, όπως η ταξινόμηση, η ανίχνευση παρατυπιών και η πρόβλεψη. Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη μοντέλων που μπορούν να εντοπίσουν το MPP ενός φωτοβολταϊκού πάνελ.

Οι μέθοδοι MPPT με AI είναι ακόμα υπό ανάπτυξη, αλλά έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, να μειώσουν το κόστος τους και να τα κάνουν πιο αξιόπιστα.

Μερικά συγκεκριμένα πλεονεκτήματα των μεθόδων MPPT με AI είναι τα εξής:

- Μπορούν να προσαρμοστούν σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η σκιάση.
- Είναι πιο ακριβείς από τις παραδοσιακές μεθόδους MPPT, με αποτέλεσμα να προσφέρουν μεγαλύτερη ισχύ εξόδου.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία πιο απλών και οικονομικών συστημάτων MPPT.

Τα μειονεκτήματα των μεθόδων MPPT με AI είναι τα εξής:

- Είναι πιο περίπλοκες από τις παραδοσιακές μεθόδους MPPT και απαιτούν περισσότερο χρόνο εκπαίδευσης.
- Μπορεί να είναι πιο ευαίσθητες σε σφάλματα δεδομένων.

Συνολικά, οι μέθοδοι MPPT με AI έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους MPPT. Ωστόσο, είναι ακόμα υπό ανάπτυξη και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης τους.

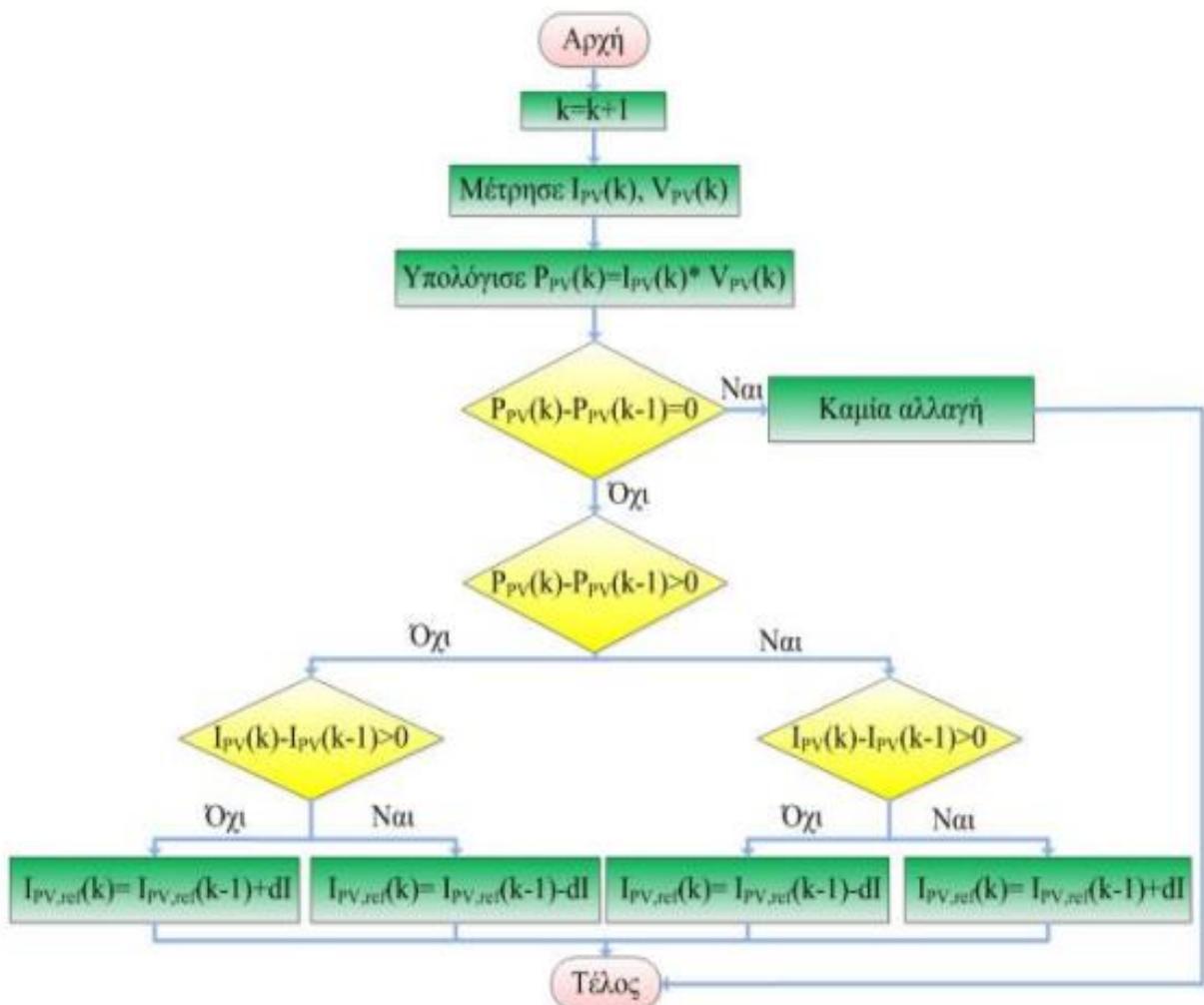
### 2.2.1 Αλγόριθμος Perturb and Observe:

Ο αλγόριθμος Perturb and Observe (P&O) είναι μια μέθοδος MPPT που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και την αναζήτηση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Είναι ένας απλός αλγόριθμος που επιδοτείται από την ευκολία υλοποίησης και την αποδοτικότητά του σε ποικίλες συνθήκες λειτουργίας. Ο αλγόριθμος λειτουργεί παρατηρώντας την απόκριση της ισχύος του φωτοβολταϊκού συστήματος όταν πραγματοποιούνται μικρές διαταράξεις (perturbations) στην τάση ή στο ρεύμα. Εάν η

απόκριση δείχνει αύξηση της ισχύος, ο αλγόριθμος συνεχίζει να πραγματοποιεί διαταραχές προς την ίδια κατεύθυνση, πλησιάζοντας περαιτέρω στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος (MPP). Αντίθετα, εάν η απόκριση δείχνει μείωση της ισχύος, ο αλγόριθμος αλλάζει τη διαταραχή προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Ο αλγόριθμος P&O δηλαδή λειτουργεί με τον εξής τρόπο:

1. Αρχικά, ο αλγόριθμος ξεκινά με μια αρχική τιμή τάσης.
2. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος αυξάνει ή μειώνει τη τάση κατά ένα μικρό ποσό.
3. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού πάνελ για τη νέα τάση.
4. Εάν η ισχύς εξόδου είναι μεγαλύτερη από την ισχύ εξόδου στη προηγούμενη τάση, τότε ο αλγόριθμος αυξάνει τη τάση. Διαφορετικά, ο αλγόριθμος μειώνει τη τάση.
5. Ο αλγόριθμος συνεχίζει να επαναλαμβάνει αυτά τα βήματα έως ότου βρεθεί το MPP.



Εικόνα 15. Διάγραμμα Perturb and Observe

Στην δική μας περίπτωση, όπως ήδη αναφέραμε, χρησιμοποιήσαμε μία τροποποιημένη μορφή του Perturb and Observe όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή που κάνουμε όταν παρατηρείται διαφορά στην ισχύ είναι στο επιθυμητό ρεύμα αναφοράς και όχι στην τάση. Έτσι προέκυψε ο παρακάτω αλγόριθμος γραμμένος σε MATLAB :

```

function iref = P_and_O(Vpv, Ipv)
persistent Vold Pold iref_old Ipv_old;
if isempty(Vold) % Initialize Vold, Pold, and iref_old with isempty
    Vold = 0;
    Pold = 0;
    iref_old = 0;
    Ipv_old = 0;
end
P = Vpv * Ipv;
dP = P - Pold;
dVpv = Vpv - Vold;
dI = Ipv - Ipv_old;
d = 0.02;
if dP ~ 0
    if dP > 0
        if dI > 0
            iref = iref_old + d; % Change iref directly inside the if loop
        else
            iref = iref_old - d;
        end
    else
        if dI > 0
            iref = iref_old - d; % Change iref directly inside the if loop
        else
            iref = iref_old + d;
        end
    end
else
    iref = iref_old;
end
Vold = Vpv;
Pold = P;
iref_old = iref;
Ipv_old = Ipv;
end

```

## 2.2.2 Αλγόριθμος Particle Swarm Optimization:

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης με συμήνος σωματιδίων (PSO) είναι ένας αλγόριθμος προσσομοίωσης που έχει σχεδιαστεί για να μιμείται τη συμπεριφορά των σμηνών πουλιών κατά τη διάρκεια της αναζήτησης για τροφή. Έχει αποδειχθεί αποτελεσματικός για την επίλυση πολλών προβλημάτων βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένων των προβλημάτων εντοπισμού σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Ξεκινά με ένα αρχικό συμήνος σωματιδίων, όπου κάθε σωματίδιο αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα. Κάθε σωματίδιο έχει δύο συνιστώσες: τη θέση του και την ταχύτητα του. Η θέση του σωματιδίου αντιπροσωπεύει την τιμή της παραμέτρου που βελτιώνεται, ενώ η ταχύτητα του σωματιδίου αντιπροσωπεύει την τάση αλλαγής της παραμέτρου.

Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, κάθε σωματίδιο υπολογίζει την απόσταση του από το καλύτερο σωματίδιο που έχει βρει μέχρι στιγμής, καθώς και την απόσταση του από τη θέση του παγκόσμιου καλύτερου σωματιδίου. Στη συνέχεια, τα σωματίδια προσαρμόζουν τις ταχύτητες τους με βάση αυτές τις αποστάσεις και τις θέσεις των καλύτερων γειτόνων τους. Η

προσαρμογή της ταχύτητας κάθε σωματιδίου καθορίζεται από μια μαθηματική συνάρτηση που λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά του σμήνος συνολικά. Ο αλγόριθμος συνεχίζει να επαναλαμβάνει αυτά τα βήματα έως ότου βρεθεί μια λύση που ικανοποιεί τα αποδεκτά κριτήρια.

Έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την επίλυση προβλημάτων εντοπισμού σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) σε φωτοβολταϊκά συστήματα και αποδείχθηκε πως μπορεί να εντοπίσει το MPP με μεγαλύτερη ακρίβεια από τις παραδοσιακές μεθόδους MPPT, όπως ο αλγόριθμος Perturb and Observe (P&O). Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει είναι τα εξής :

#### Πλεονεκτήματα του αλγορίθμου PSO:

- Είναι ένας ευέλικτος αλγόριθμος που μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Είναι αποτελεσματικός και μπορεί να εντοπίσει το MPP με ακρίβεια.
- Μπορεί να εκτελεστεί γρήγορα και εύκολα σε λογισμικό.

#### Μειονεκτήματα του αλγορίθμου PSO:

- Μπορεί να είναι ευαίσθητος σε σφάλματα μέτρησης.
- Μπορεί να χρειαστεί περισσότερος χρόνος για να εντοπίσει το MPP σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας.

Ο PSO αναπαρίσταται μαθηματικά ως εξής:

Έστω  $x_i(t)$  η θέση του i-οστού μέλους του σμήνους στο χρόνο t, και  $v_i(t)$  η ταχύτητά του. Κάθε μέλος επιχειρεί να βρει το βέλτιστο σημείο  $p_i$  στο οποίο έχει φτάσει μέχρι στιγμής, καθώς και το γενικό βέλτιστο σημείο g που έχει εντοπιστεί από όλο το σμήνος. Η θέση ενημερώνεται ως εξής :

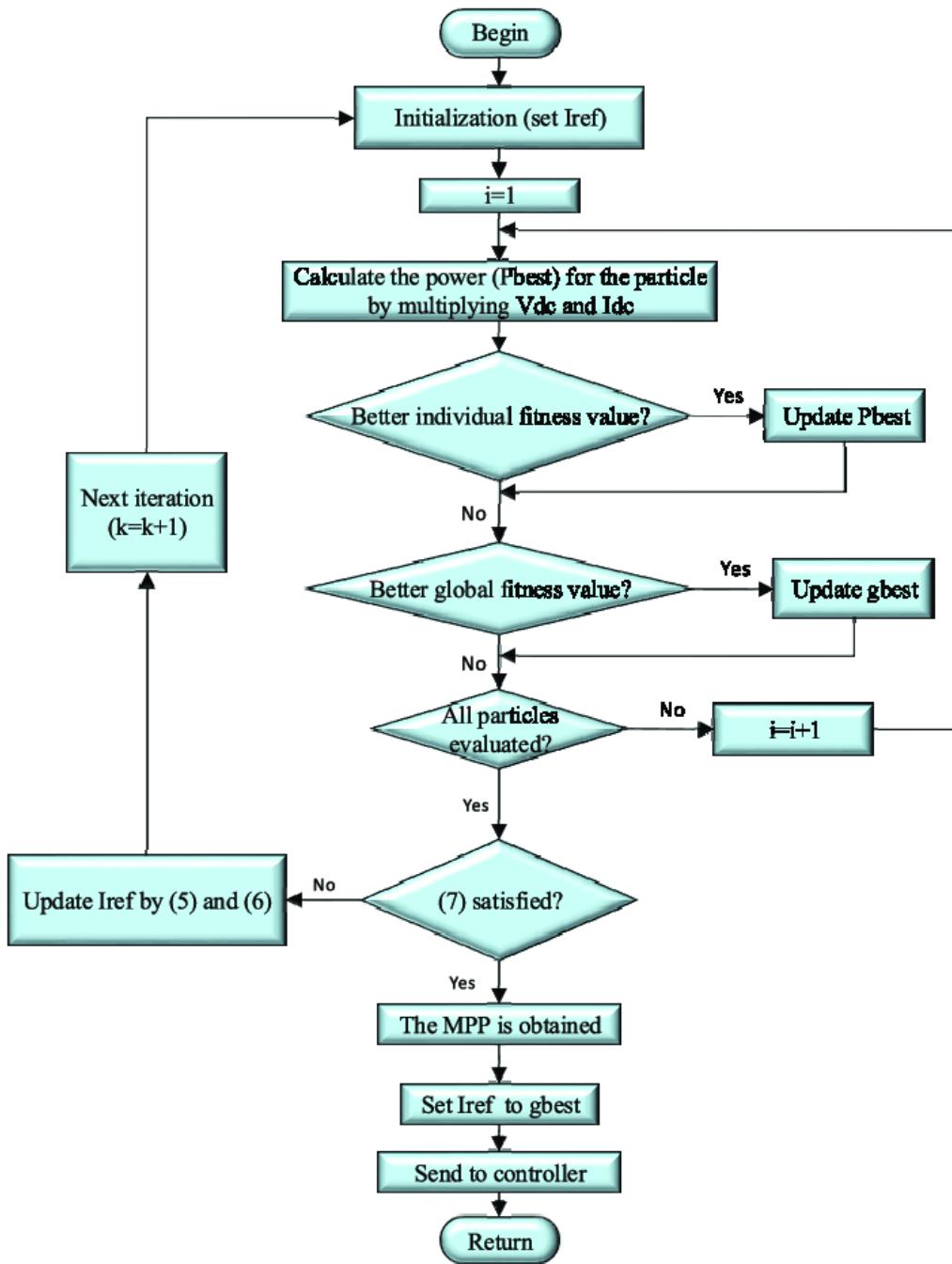
$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

Και η ταχύτητα ενημερώνεται ως εξής :

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i - x_i(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g - x_i(t))$$

Οι παράμετροι  $w$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  είναι σημαντικές καθώς επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο τα μέλη του σμήνους ενημερώνουν τη θέση και την ταχύτητά τους. Το  $w$  είναι ο συντελεστής εξόδου (inertia weight) που καθορίζει την επίδραση της προηγούμενης ταχύτητας. Τα  $c_1$ ,  $c_2$  είναι οι σταθερές επιτάχυνσης που διαιρούν τις επιδράσεις της τοπικής και γενικής βέλτιστης θέσης. Οι τυχαίοι αριθμοί  $r_1, r_2$  χρησιμοποιούνται για να δώσουν τυχαιότητα στην ενημέρωση, ενώ  $p_i$  είναι η τρέχουσα τοπική βέλτιστη θέση του μέλους και  $g$  είναι η γενική βέλτιστη θέση στο σύνολο του σμήνους. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να επιτευχθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού, όπως ο επιθυμητός αριθμός επαναλήψεων ή η επίτευξη ικανοποιητικής τιμής της συνάρτησης κόστους.

Το γενικό δομικό διάγραμμα του PSO για την εύρεση MPP είναι το εξής :



Εικόνα 16. Διάγραμμα Ροής Particle Swarm Optimization

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω αναπτύξαμε τον παρακάτω κώδικα στο MATLAB και τον οποίο χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα διπλωματική εργασία:

```

function I_pso = PSO(Vpv,Ipv,Ppv,n,Isc,Control)

persistent u; % current particle
persistent Icurrent; % current I
persistent p; % power
persistent pbest;
persistent I; % current
persistent v; % velocity (delta I)
persistent counter;
  
```

```

persistent gbest;
if Control==1
    I_pso=37;
    counter = 0;
    Icurrent = 0.7*Isc;
    gbest = Icurrent;
    p = zeros(n,1);
    for j = 1:n
        p(j) = -100000000;
    end
    v = zeros(n,1);
    pbest = zeros(n,1);
    u = 0;
    I = zeros(n, 1);
    for j = 1:n
        I(j) = 15 + rand() * (Isc - 15); % Generate a random value between 20 and Isc
    end
    return
else
    if isempty(counter)
        counter = 0;
    end

    if isempty(Icurrent)
        Icurrent = 0.7*Isc;
    end

    if isempty(gbest)
        gbest = Icurrent;
    end

    if isempty(p)
        p = zeros(n,1);
        for j = 1:n
            p(j) = -100000000;
        end
    end

    if isempty(v)
        v = zeros(n,1);
    end

    if isempty(pbest)
        pbest = zeros(n,1);
    end

    if isempty(u)
        u = 0;
    end

    if isempty(I)
        I = zeros(n, 1);
        for j = 1:n
            I(j) = 15 + rand() * (Isc - 15); % Generate a random value between 20 and Isc
        end
    end

% if (counter >= 1 && counter < 500)
%     I_pso = Icurrent;
%     counter = counter + 1;

```

```

%    return;
% end

counter = 0;

if (u >= 1 && u <= n)
    p(u)
    if ((Ppv) > p(u))
        p(u) = Ppv;
        pbest(u) = Icurrent
    end
end

u = u + 1;

if u == (n+2)
    u = 1;
end

if (u >= 1 && u <= n)
    L_pso = I(u);
    Icurrent = L_pso;
    counter = 1;
    return;
elseif u == (n+1)
    [m,i] = max(p);
    pbest
    gbest = pbest(i)
    L_pso = gbest;
    Icurrent = L_pso;
    counter = 1;
    for j = 1:n
        v(j) = updatevelocity(v(j), pbest(j), I(j), gbest);
        I(j) = updateI(I(j), v(j));
    end
    v
    I
    return
else
    L_pso = 30;
end
end
end

function vfinal = updatevelocity(vel, pobest, I, gwbest)

w = 0.9;
c1 = 1;
c2 = 1;

vfinal = w*vel + c1*(pobest-I) + c2*(gwbest-I);

end

function Ifinal = updateI(I, vel)

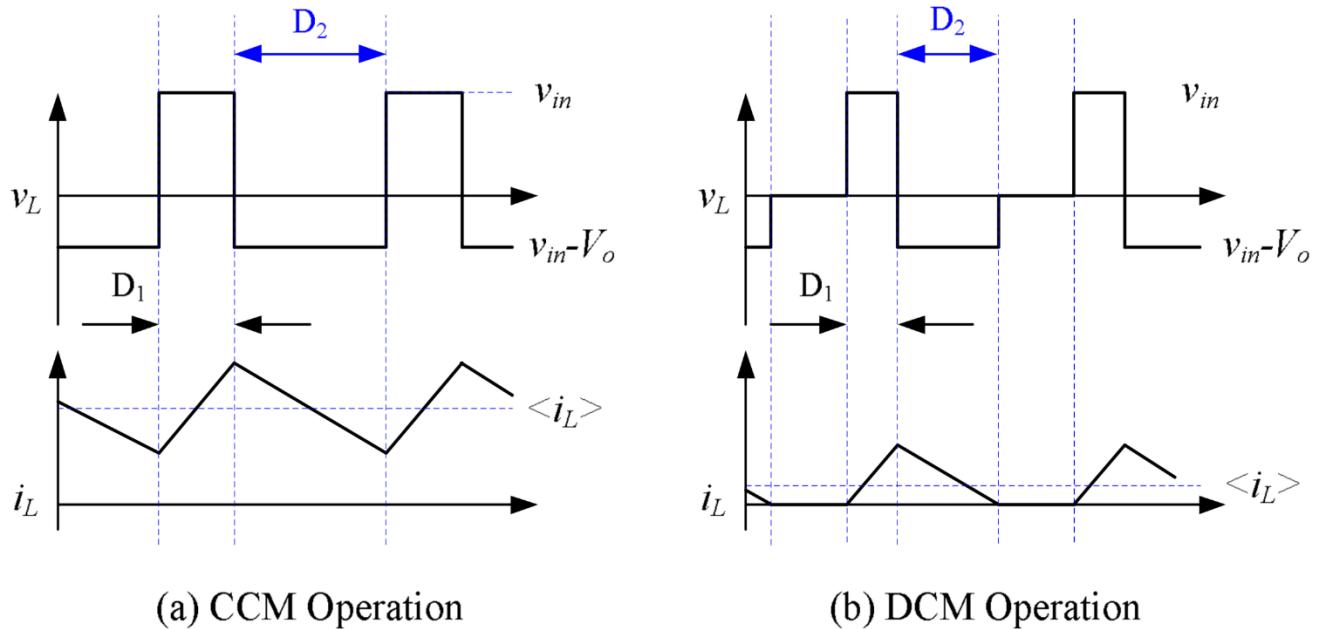
```

$I_{final} = I + vel;$

End

### 2.3.1 Απώλειες Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας:

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, ο μετατροπέας ισχύος dc/dc (Boost) είναι το βασικό όργανο διασύνδεσης ισχύος. Λειτουργεί συνήθως σε λειτουργία συνεχούς αγωγιμότητας (CCM), λόγω των υψηλών ρευμάτων που διαρρέουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ, γεγονός που σημαίνει ότι το ρεύμα του μετατροπέα δεν μειώνεται ποτέ σε μηδέν. Ο μετατροπέας ισχύος Boost μπορεί να λειτουργήσει σε δύο συνθήκες κυκλώματος: όταν το τρανζίστορ είναι ανοικτό και όταν το τρανζίστορ είναι κλειστό. Οι δύο αυτές συνθήκες είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και μπορούν να αναλυθούν ξεχωριστά.



Εικόνα 17. Συνεχής-Ασυνεχής Λειτουργία Boost Convereter

Για απλοποίηση, η συσσωρευμένη αντίσταση λόγω των καλωδίων μπορεί να θεωρηθεί ως μέρος της αντίστασης επαγωγής του μετατροπέα Boost. Επιπλέον, το ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ με πολικότητα προς εμπρόσθια κατεύθυνση μπορεί να θεωρηθεί ως μια μικρή αντίσταση, ενώ η δίοδος μπορεί να αντικατασταθεί από μια αντίσταση συνοδευόμενη από πτώση τάσης κοντά σε 0,7 Volt.

Ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle), που συμβολίζεται με το  $d$ , αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το τρανζίστορ είναι ενεργό δηλαδή άγει, διαιρεμένο με την περίοδο  $T$ . Αντίστοιχα, η δίοδος λειτουργεί για το υπόλοιπο διάστημα της περιόδου, δηλαδή για  $(1-d)T$ , όπου  $T$  είναι η περίοδος της κυματομορφής και προκύπτει από την αντίστροφη της συχνότητας ανοίγματος/κλεισμάτος του τρανζίστορ με χρήση παλμού (PWM). Η συχνότητα του σήματος PWM επιλέγεται ανάλογα με την εφαρμογή.

Όταν το τρανζίστορ είναι ενεργό, το ρεύμα του φωτοβολταϊκού συλλέκτη ρέει μέσω του ημιαγωγού, αποφεύγοντας το κλάδο της διόδου. Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα επαγωγής αυξάνεται με ρυθμό ίσο με:

$$\frac{V_{PV} - I_{PV,tr}(R_{tr,on} + R_{eq})}{L_H}$$

Καθώς η είσοδος του Boost προέρχεται από την τάση των φωτοβολταϊκών πάνελ, ο υπολογισμός του ρεύματος του πηνίου γίνεται εύκολα, καθώς το προκύπτων κύκλωμα είναι ένα κλασικό R-L. Η εξίσωση που περιγράφει το αντίστοιχο ρεύμα παρατίθεται παρακάτω.

$$I_{PV,tr} = \frac{1}{L_H} \int_0^{\delta} (V_{PV} - I_{PV,tr}(R_{tr,on} + R_{eq})) dt$$

Όπου  $V_{PV}$  είναι ταυτόχρονα η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού και η τάση εσόδου του Boost μετατροπέα,  $I_{PV,tr}$  αντιστοιχεί στο ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ,  $R_{eq}$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση της καλωδίωσης και του πηνίου και τέλος  $\frac{\delta}{T}$ . Είναι ίσο με το duty cycle  $d$ .

Η παραπάνω σχέση αποτελεί μία συνήθη διαφορική εξίσωση πρώτου βαθμού παρόμοια με εκείνη ενός συμβατικού R-L κυκλώματος και η αναλυτική λύση μπορεί εύκολα να υπολογιστεί.

Όταν το τρανζίστορ είναι σε κατάσταση απενεργοποίησης, το ρεύμα από τον φωτοβολταϊκά διέρχεται μέσω της διόδου και εισέρχεται στον πυκνωτή στην έξοδο. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, τώρα το ρεύμα του πηνίου θα μειωθεί στην αρχική τιμή του προηγούμενου σταδίου για να αυξήσει την τάση εξόδου. Το μειωμένο ρεύμα θα έχει κλίση ίση με:

$$\frac{V_{PV} - I_{PV,di}(R_{di,on} + R_{eq}) - V_{di,on} - V_{out}}{L_H}$$

Με τον ίδιο τρόπο, το τελικό κύκλωμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα συμβατικό R-L καταλήγοντας στις παρακάτω εξισώσεις:

$$I_{PV,di} = \frac{1}{L_H} \int_{\delta}^T (V_{PV} - I_{PV,di}(R_{di,on} + R_{eq}) - V_{di,on} - V_{out}) dt$$

Όπου  $I_{PV,di}$  είναι το ρεύμα που ρέει από την δίοδο όταν το τρανζίστορ δεν άγει,  $V_{di,on}$  είναι η τάση της διόδου και  $V_{out}$  είναι η τάση στην έξοδο το Boost. Η πρόσθεση αυτών των δύο κυματομορφών αποτελεί το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα. Για να απλοποιηθεί ο υπολογισμός, το ρεύμα θα θεωρηθεί σταθερό και ίσο με την μέση τιμή του φωτοβολταϊκού. Στην πράξη, η ρίζα της μέσης τετραγωνικής τιμής του ρεύματος του μετατροπέα είναι περίπου 0,5% μεγαλύτερη από εκείνη του φωτοβολταϊκού. Για να υπολογίσουμε την πραγματική ισχύ που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα, θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση της μέσης ισχύος. Δεδομένου ότι το εισερχόμενο ρεύμα και η τάση είναι σταθερές τιμές, η τελική εξίσωση ισχύος θα είναι:

$$P_{PV} = \frac{1}{T} \int_0^T (V_{PV} I_{PV}) dt = \frac{1}{T} (V_{PV} I_{PV}) T = (V_{PV} I_{PV})$$

Για τον υπολογισμό των απωλειών επαγωγής, έχουμε :

$$P_{Loss,con} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{con} I_{PV,tr} dt$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm στην εξίσωση αυτή προκύπτει :

$$P_{Loss,con} = R_{tr,on} \frac{1}{T} \int_0^T I_{PV,tr}^2 dt = R_{tr,on} I_{PV,tr,RMS}$$

$$\text{Οπου } I_{PV,tr,RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_{PV,tr}^2 dt} = I_{PV} \sqrt{d}$$

Βάσει των παραπάνω προκύπτει συνεπώς ότι οι απώλειες του τρανζίστορ και της διόδου είναι :

$$P_{Loss,con} = R_{tr,on} I_{PV}^2 d \quad P_{Loss,con.di} = R_{di,on} I_{PV}^2 (1 - d)$$

Τώρα, ο υπολογισμός της θερμικής απώλειας λόγω των αντιστάσεων των καλωδίων που συνδέουν το PV με τον ενισχυτή μετατροπής είναι απλός. Αυτό κυρίως οφείλεται στο γεγονός ότι το πηνίο λειτουργεί υπό CCM και επομένως υπάρχει πάντα ένα ρεύμα που ρέει μέσω του ίδιου πηνίου και της αντίστοιχης αντίστασης του. Επομένως, ακολουθώντας τα ίδια βήματα που πραγματοποιήθηκαν προηγουμένως, οι απώλειες μπορούν να βρεθούν να είναι:

$$P_{Loss,cables} = R_{eq} I_{PV}^2$$

Πρέπει ακόμη να υπολογίσουμε την απώλεια που πραγματοποιείται κατά την ορθή πόλωση της διόδου όπου υπάρχει πτώση τάσης. Η πτώση τάσης της διόδου εμφανίζεται μόνο όταν είναι εμπρόσθια πόλωση και αυτό συμβαίνει μόνο όταν ρέει ρεύμα μέσω της διόδου. Προκειμένου να γίνει αυτό, η  $V_{di}$  ον δεν πρέπει να θεωρείται σταθερή, αλλά η διάρκεια του αντίστοιχου σήματος είναι ίση με αυτή του  $I_{PV,di}$  1-d, με αποτέλεσμα την ακόλουθη έκφραση:

$$P_{Loss,fw} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{di,on} I_{PV,di} dt = (1 - d) V_{di,on} I_{PV}$$

Απώλειες μπορούν επίσης να αποδοθούν στη διακοπτική φύση των ημιαγωγικών στοιχείων. Υπάρχουν πολλοί τρόποι εφαρμογής για τη μείωση τους, αλλά η ελαχιστοποίηση μέσω της ρύθμισης του ρεύματος έχει ελάχιστη επίδραση όσον αφορά την βελτιστοποίηση.

Τα τρανζίστορ είναι ημιαγωγικά στοιχεία που θεωρούνται ότι κάνουν την αντιστροφή αγωγή, δηλαδή αν η τάση εισόδου είναι υψηλή, η έξοδος τους θα είναι χαμηλή. Η αλλαγή κατάστασης ενός τρανζίστορ δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί ακαριαία, λόγω του γεγονότος ότι μεταξύ εισόδου και εξόδου παρεμβάλλονται χωρητικά στοιχεία. Επομένως, όταν η είσοδος του τρανζίστορ είναι υψηλή, πρέπει να περάσει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα για να φορτιστούν πλήρως οι πυκνωτές και να αλλάξουν την τάση εξόδου τους, με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί το τρανζίστορ. Προς το σκοπό αυτό, η ισχύς από την πηγή τάσης εισόδου στο Gate εγχέεται στο τρανζίστορ. Το ίδιο ισχύει όταν το τρανζίστορ πρόκειται να απενεργοποιηθεί, αλλά σε αυτή την περίπτωση είναι θέμα εκφόρτισης των πυκνωτών. Η ισχύς που χρειάζεται να εγχυθεί στο πύλη του τρανζίστορ θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται σημαντικά από το ρεύμα που ρέει στο τρανζίστορ. Κατά συνέπεια, οι απώλειες τάσης εισόδου του

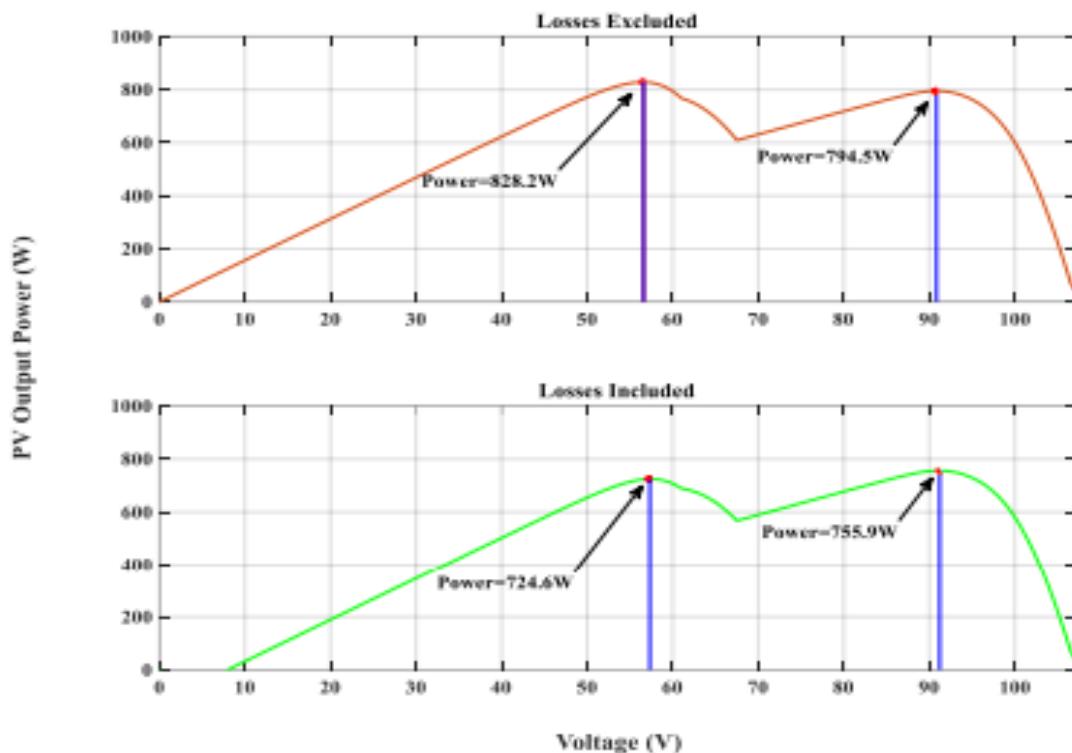
τρανζίστορ δεν θα περιλαμβάνονται σε αυτή την ανάλυση. Μία ακριβής προσέγγιση των διακοπτικών απωλειών είναι η ακόλουθη :

$$P_{SW} = V_{PV} I_{PV} f_{sw} \frac{Q_{GS} + Q_{GD}}{I_G}$$

Όπου  $f_{sw}$  είναι η διακοπτική συχνότητα ,  $I_G$  είναι το ρεύμα στην πύλη του τρανζίστορ και  $Q_{GS} + Q_{GD}$  είναι τα χρονικά περιθώρια που χρειάζονται στα χωρητικά στοιχεία στην πύλη και την πηγή για να φορτίσουν. Αθροίζοντας όλα όσα αναφέραμε παραπάνω ο τελικός τύπος της ισχύος προκύπτει ως εξής:

$$P_{true} = P_{PV} - P_{Loss,con} - P_{Loss,condi} - P_{Loss,cables} - P_{Loss,fw} - P_{SW}$$

Σαφώς παρατηρείται ότι οι απώλειες συστήματος δεν επηρεάζουν μόνο την καμπύλη P-V υπό κανονικές συνθήκες σκίασης, αλλά και υπό μερική σκίαση. Ανάλογα με την διασύνδεση των κελιών του φωτοβολταϊκού πίνακα, η μορφή της καμπύλης P-V μεταβάλλεται σημαντικά, ειδικά υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Εάν οι διορθώσεις της συνάρτησης ισχύος ενσωματωθούν στην προηγούμενη χρησιμοποιούμενη εξίσωση ισχύος, τότε μπορεί να αναμένεται αύξηση της ισχύος εξόδου κατά 5%. Συγκεκριμένα, λόγω της ύπαρξης πολλών τοπικών MPP υπό συνθήκες μερικής σκίασης, αυτή η διόρθωση θα μπορούσε να αποδειχθεί ζωτικής σημασίας κατά την επιλογή του Global MPP.



Εικόνα 18. Μετατόπιση Global Maximum Power Point

Αυτό ακριβώς δείχνουν οι παραπάνω εικόνες όπου , στο πρώτο σενάριο ο υπολογισμός της Ισχύος δεν συνυπολογίζει τις απώλειες που αναφέραμε προηγουμένως , σε αντίθεση με το δεύτερο. Παρατηρείται λοιπόν ότι η προσθήκη απωλειών μπορεί να είναι καθοριστικής

σημασίας και να επιφέρει μετατόπιση του Global MPP. Το σενάριο ακριβώς αυτό επικαλεστήκαμε και εμείς στην παρούσα διπλωματική εργασία , αποδεικνύοντας την σημαντικότητα που έχει η διόρθωση των τύπων υπολογισμού της Ισχύος. Η μεταβολή αυτή οφείλεται όπως γίνεται κατανοητό κυρίως σε μεγάλα ρεύματα που δημιουργούνται και κατά συνέπεια μεγάλες απώλειες λόγω θερμότητας.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε πως η μεταβολή του τύπου της Ισχύος μπορεί να αποδειχθεί προβληματική για την χρήση ευρητικών αλγόριθμων. Αυτό συμβαίνει γιατί τέτοιου είδους αλγόριθμοι όπως ο Perturb and Observe βασίζονται στην στιγμιαία απόκριση του συστήματος και την παράγωγο του . Έτσι μια ανακρίβεια στην μέτρηση, θα μπορούσε να προκαλέσει λανθασμένη λειτουργία των ελεγκτών. Η μέτρηση της στιγμιαίας ισχύς στην έξοδος, λόγω μεταβλητότητας της κατάστασης του μετατροπέα, θα έχει ως αποτέλεσμα μία διακοπτόμενη κυματομορφή ρεύματος. Συνεπώς για έναν έγκυρο υπολογισμό της ισχύος , απαραίτητη είναι η χρήση της RMS τιμής του ρεύματος, η οποία όμως όπως είναι αναμενόμενο προσθέτει στο σύστημα υψηλότερες αρμονικές και ταλαντώσεις . Μία λύση θα αποτελούσε η χρήση φίλτρων και εξοπλισμού εξομάλυνσης της καμπύλης , ωστόσο αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την δραματική αύξηση του κόστους. Έτσι μια νέα λύση προκύπτει, η οποία αντί να μεγιστοποιεί το Ppv , μεγιστοποιεί το Ptrue που αναφέραμε παραπάνω . Δεν χρειάζονται πλέον ξεχωριστές μετρήσεις για την ισχύ αφού μια P-V καμπύλη που συμπεριλαμβάνει της απώλειες και δεν έχει αρμονικές είναι εύκολο να κατασκευαστεί. Απλοποιώντας την εξίσωση ισχύος και διατηρώντας τα σημαντικότερα μέρη της , δηλαδή τις απώλειες των τρανζίστορ, των διόδων και των καλωδίων , καταλήγουμε στον τελικό τύπο :

$$P_{MPP} = P_{PV} - [R_{tr,on}d + R_{eq} + R_{di,on}(1-d)]I_{PV}^2$$

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως βάσει της αναλυτικότερης και πιο ακριβούς σχέσης ισχύος , είναι αποτελεσματικότερο και πιο ορθό να χρησιμοποιούμε μεταευρετικούς αλγορίθμους αντί για ευρητικούς καθώς βρίσκουν αποτελεσματικότερα το Global MPP.

### 2.3.2 Τροποποιημένος P&O και PSO:

Βάσει των όσων μεταφέραμε παραπάνω μετατρέψαμε τους αλγόριθμους Perturb and Observe και Particle Swarm Optimization , ώστε να υπάρχει καλύτερη προσέγγιση του Global Maximum Power Point. Αυτό όπως γίνεται αντιληπτό επιτεύχθηκε με την τροποποίηση του τύπου υπολογισμού της Ισχύος. Έτσι οι νέοι αλγόριθμοι είναι οι εξής :

#### Perturb and Observe:

```
function iref = P_and_O(Vpv,Ipv)
    persistent Vold Pold iref_old Ipv_old;
    if isempty(Vold) % Initialize Vold, Pold, and iref_old with isempty
        Vold = 0;
        Pold = 0;
        iref_old =0;
        Ipv_old=0;
    end
    P = Vpv * Ipv-(0.001 * d + 1 + 0.001 * (1 - d)) * Ipv * Ipv;
    dP = P - Pold;
    dVpv = Vpv - Vold;
    dI = Ipv - Ipv_old;
    d = 0.02;
    if dP ~= 0
```

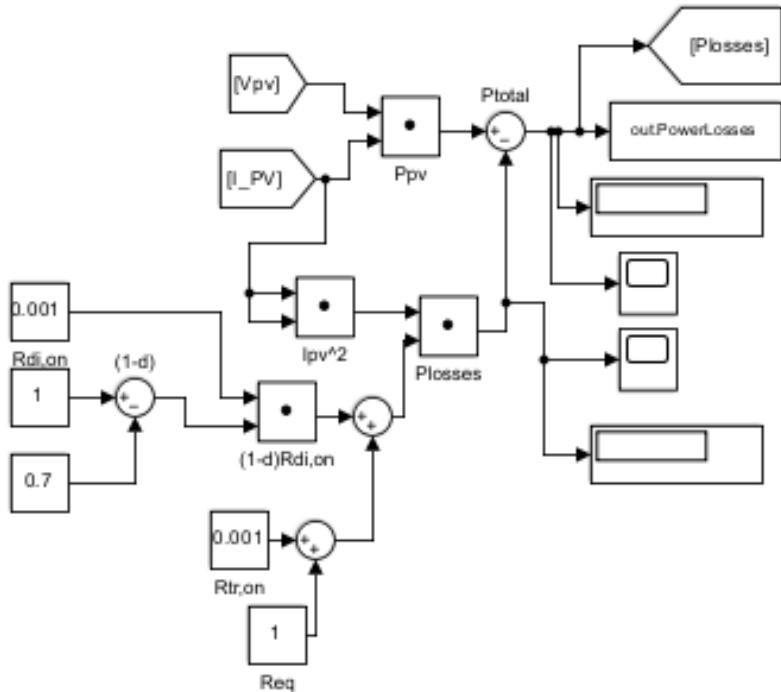
```

if dP > 0
    if dI > 0
        iref = iref_old + d; % Change iref directly inside the if loop
    else
        iref = iref_old - d;
    end
else
    if dI > 0
        iref = iref_old - d; % Change iref directly inside the if loop
    else
        iref = iref_old + d;
    end
end
iref = iref_old;
end
Vold = Vpv;
Pold = P;
iref_old = iref;
Ipv_old=Ipv;
end

```

### Particle Swarm Optimization:

Ουσιαστικά στο Block του PSO η τιμή της ισχύος έμπαινε ως είσοδος , συνεπώς δεν χρειάστηκε να αλλάξουμε κάτι στο σώμα του κώδικα , αλλά υπολογίσαμε με blocks την σωστή τιμή της ισχύος. Η συνδεσμολογία αυτή είναι η παρακάτω :



Εικόνα 19. Υπολογισμός Πραγματικής Ισχύος

Σημαντικό ρόλο έχει επίσης η ταχύτητα ανταπόκρισης του συστήματος ελέγχου η οποία επηρεάζεται από , την επιλογή του αλγορίθμου, τις ρυθμίσεις των παραμέτρων και τον χρόνο επεξεργασίας του συστήματος. Επίσης η ύπαρξη αρμονικών μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των αλγόριθμων Maximum Power Point Tracker . Λύση στο πρόβλημα αυτό δίνει η ενσωμάτωση φίλτρων για την απομάκρυνση τους . Η επιλογή του φίλτρου πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς επηρεάζει την ταχύτητα και την ακρίβεια του συστήματος και μία λάθος προσέγγιση θα μπορούσε να επιφέρει τα αντίθετα από τα επιθυμητά αποτελέσματα.

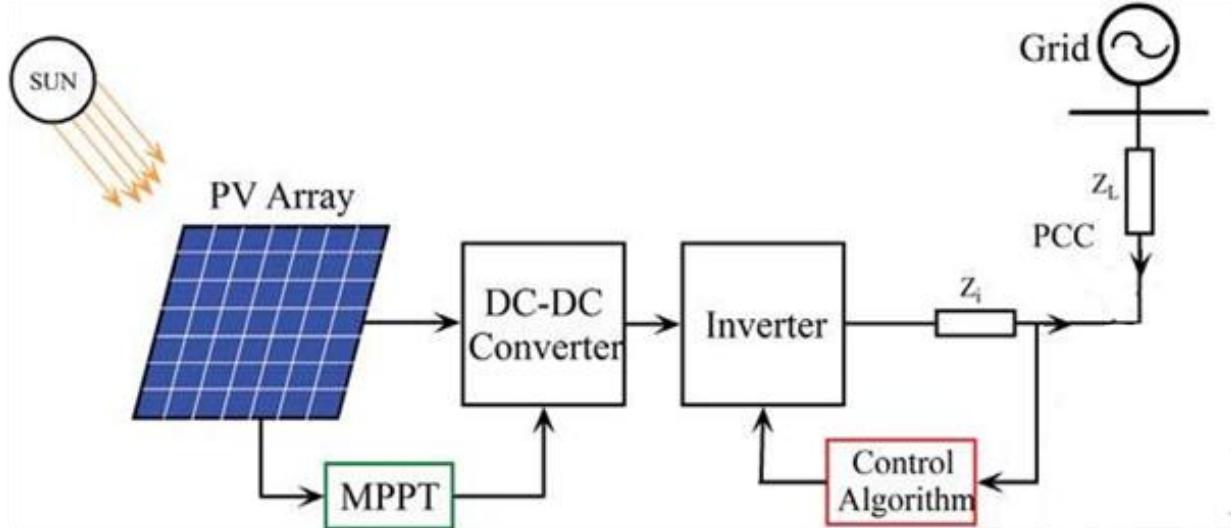
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Μοντελοποίηση

### 3.1 Εισαγωγή:

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την εκτενή ανάλυση και εξαγωγή μαθηματικών μοντέλων για τα συστήματα που απαρτίζουν το μικροδίκτυο μας. Πιο συγκεκριμένα τα συστήματα αυτά είναι :

- 1) Η φωτοβολταϊκή συστοιχία
- 2) Ανυψωτής Τάσης ( Boost Converter)
- 3) Αντιστροφέας Τάσης ( Inverter )
- 4) DC Δίαυλος
- 5) Φίλτρο και Δίκτυο

Η τοπολογία που δημιουργήσαμε παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα :

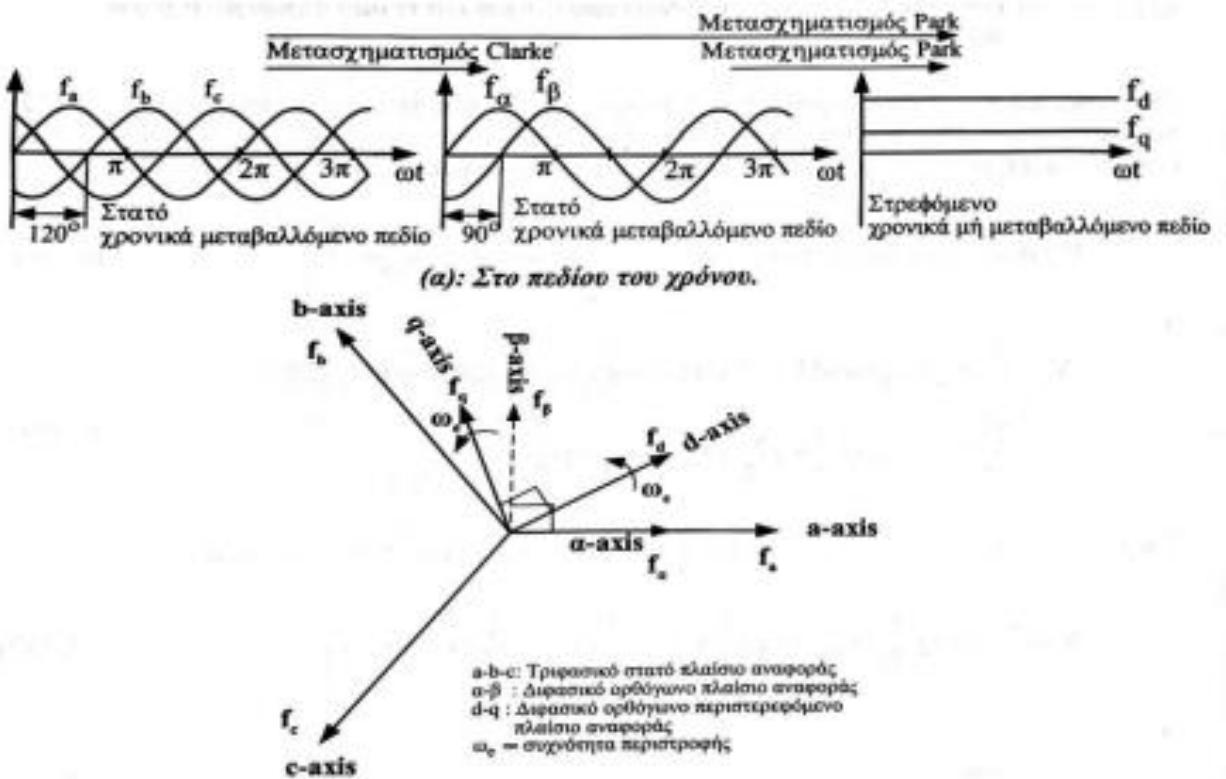


Εικόνα 20. Παρουσίαση Συστήματος

Στην αριστερή πλευρά της εικόνας έχουμε την συστοιχία φωτοβολταϊκών η οποία δέχεται ακτινοβολία από τον ήλιο και στην συνέχεια συνδέεται στον DC δίαυλο μέσω του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Από τον DC δίαυλο υπάρχει ροή ισχύος προς το δίκτυο. Στην συνέχεια περνώντας στην πλευρά του δικτύου, δεξιά από τον DC δίαυλο έχουμε τον Αντιστροφέα Τάσης (Inverter) και στην συνέχεια το RL φίλτρο και τελικά το Δίκτυο. Συνδυαστικά έχουν ως στόχο τη μετατροπή της DC τάσης σε AC τάση και μάλιστα επιθυμητού πλάτους και συχνότητας ενώ συγχρόνως γίνεται και αποκοπή των ανώτερων αρμονικών συχνοτήτων βελτιώνοντας τη συνολική λειτουργία του δικτύου. Για την εξαγωγή των απαραίτητων μοντέλων χρησιμοποιήσαμε μια σειρά από μαθηματικά εργαλεία, όπως ο μετασχηματισμός Park.

### Μετασχηματισμός Park:

Προς απλοποίηση του ελέγχου ορισμένων ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος με αντιστροφέα, χρησιμοποιούνται οι γνωστοί μετασχηματισμοί Clarke και Park. Με αυτούς, μπορούμε να μετατρέψουμε τις αναδράσεις τριφασικών εναλλασσόμενων τάσεων και ρευμάτων από το σταθερό τριφασικό πλαίσιο αναφοράς των  $120^\circ$  σε διφασικό πλαίσιο αναφοράς (Clarke) ή ακόμη καλύτερα σε δύο περιστρεφόμενες ορθογώνιες συνιστώσες σταθερής τιμής (Park). Οι υπολογισμοί στο πλαίσιο αναφοράς των τριών συνιστώσων a-b-c είναι πολύπλοκοι λόγω του αριθμού των τριών μεταβλητών και της χρονικής μεταβολής τους. Στο συνέχεια φαίνονται οι μετασχηματισμοί Clarke και Park στον χρόνο και σε διανυσματική μορφή.



Εικόνα 21. Γραφική Αναπαράσταση Μετασχηματισμών Clarke-Park

Λόγω της χρήσης Sinusoidal Pulse Width Modulation για τον Inverter, θα προτιμήσουμε την απευθείας ανάλυση του Park. Μέσω του συγκεκριμένου μετασχηματισμού, μπορούμε να μεταφερθούμε από το τριφασικό πλαίσιο αναφοράς a-b-c σε τρία σταθερά διανύσματα dq0. Αυτά τα διανύσματα περιστρέφονται γύρω από το φανταστικό σύστημα συντεταγμένων με ταχύτητα ίση με τη συχνότητα των ημιτοοειδών μεγεθών. Ωστόσο, για να επιτευχθεί η τελική μορφή δύο σύγχρονων στρεφόμενων διανυσμάτων, αντί για τρία απαιτείται η ύπαρξη καθαρά συμμετρικής ακολουθίας. Ο μετασχηματισμός Park δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega_e * t) & \cos(\omega_e * t - 120^\circ) & \cos(\omega_e * t - 240^\circ) \\ -\sin(\omega_e * t) & -\sin(\omega_e * t - 120^\circ) & -\sin(\omega_e * t - 240^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

Και αντίστροφα:

$$\begin{bmatrix} fa \\ fb \\ fc \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega_e * t) & -\sin(\omega_e * t) & \frac{1}{2} \\ \cos(\omega_e * t - 120^\circ) & -\sin(\omega_e * t - 120^\circ) & \frac{1}{2} \\ \cos(\omega_e * t - 240^\circ) & -\sin(\omega_e * t - 240^\circ) & \frac{1}{2} \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} fd \\ fq \\ f0 \end{bmatrix}$$

Όπου  $f0$ , είναι η μηδενική συνιστώσα και  $\omega e$  είναι η στρεφόμενη συχνότητα. Για ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\begin{bmatrix} fd \\ fq \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega_e * t) & \cos(\omega_e * t - 120^\circ) & \cos(\omega_e * t - 240^\circ) \\ -\sin(\omega_e * t) & -\sin(\omega_e * t - 120^\circ) & -\sin(\omega_e * t - 240^\circ) \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} fa \\ fb \\ fc \end{bmatrix}$$

όταν:  $fa + fb + fc = 0$  Και επίσης ο μετασχηματισμός Park από το α-β πλαίσιο αναφοράς στο d-q δίνεται από την παρακάτω σχέση όταν ισχύει πάλι ότι  $fa + fb + fc = 0$ :

$$\begin{bmatrix} fd \\ fq \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega_e * t) & \sin(\omega_e * t) \\ -\sin(\omega_e * t) & \cos(\omega_e * t) \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} f\alpha \\ f\beta \end{bmatrix}$$

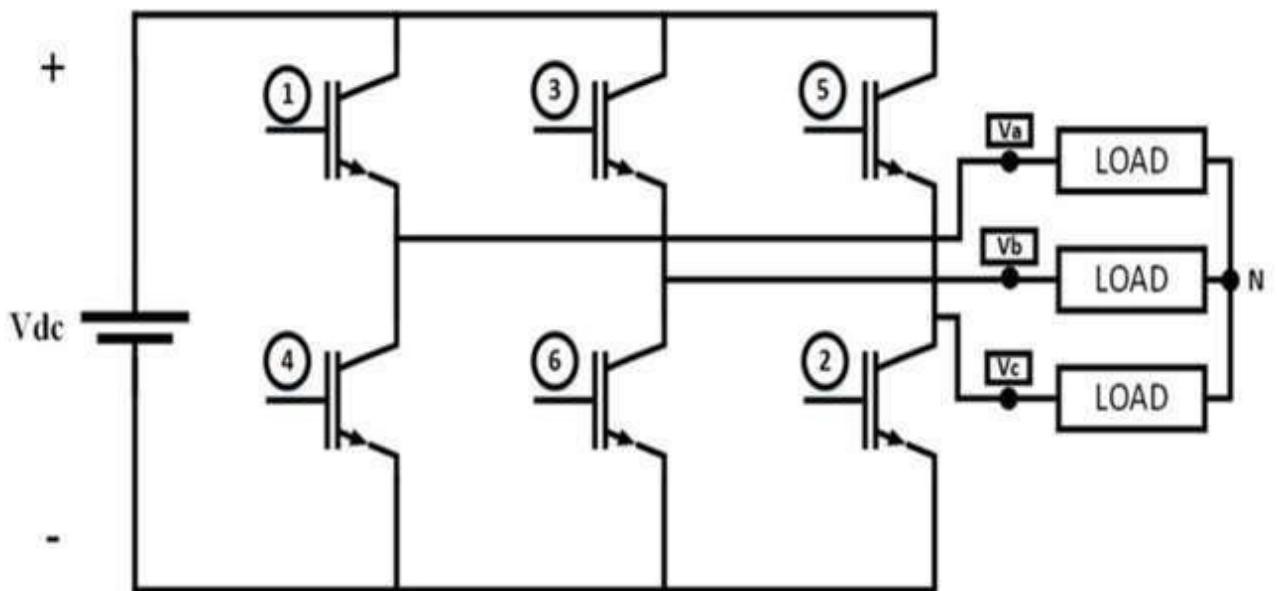
και αντίστροφα:

$$\begin{bmatrix} f\alpha \\ f\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega_e * t) & -\sin(\omega_e * t) \\ \sin(\omega_e * t) & \cos(\omega_e * t) \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} fd \\ fq \end{bmatrix}$$

### 3.2 AC Πλευρά:

### 3.2.1 Εισαγωγή:

Στην πλευρά του συστήματος μας, όπου χαρακτηρίζεται από εναλλασσόμενη τάση, ανήκει ο Αντιστροφέας και η αναπαράσταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Ο αντιστροφέας πηγής τάσης ανήκει στα ημιαγωγικά στοιχεία της διάταξης μας και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μέρη της, όπως και γενικότερα στα σύγχρονα ΣΗΕ. Ρόλος του, όπως μαρτυράει η ονομασία του, είναι η αντιστροφή της τάσης από συνεχή σε εναλλασσόμενη, με στόχο την σύνδεση με το δίκτυο, την τροφοδότηση φορτίων, την μεταφορά ενέργειας και άλλων πολλών εφαρμογών του. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ελέγχου αυτού του μετατροπέα ισχύος, με επικρατέστερη εκείνη της Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Παλμών (S.P.W.M), την οποία χρησιμοποιούμε και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στην συνέχεια θα αναλύσουμε την λειτουργία του Αντιστροφέα, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 22. Τριφασικός Αντιστροφέας

Σε αυτήν την περίπτωση για την μαθηματική περιγραφή του αντιστροφέα χρησιμοποιείται το μοντέλο μέσης τιμής σύμφωνα με το οποίο έχουμε τους κάτωθι λόγους κατάτμησης στους άξονες d-q :

$$m_{id} = \frac{V_{ld}}{\frac{V_{DC}}{2}} \quad m_{iq} = \frac{V_{lq}}{\frac{V_{DC}}{2}}$$

Οπου  $V_{ld}$ ,  $V_{lq}$  : οι τάσεις στους άξονες d-q στην έξοδο του αντιστροφέα.

Στην συνέχεια θα αναλύσουμε εκτενέστερα την τεχνική της S.P.W.M. Η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM) είναι μια τεχνική διαμόρφωσης σχήματος που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, όπως ο έλεγχος κινητήρων, οι μετασχηματιστές και οι γεννήτριες. Στην SPWM, ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς με πλάτος  $A_R$  και συχνότητα  $f_R$  συγκρίνεται με ένα τριγωνικό σήμα φορέα με πλάτος  $A_C$  και συχνότητα

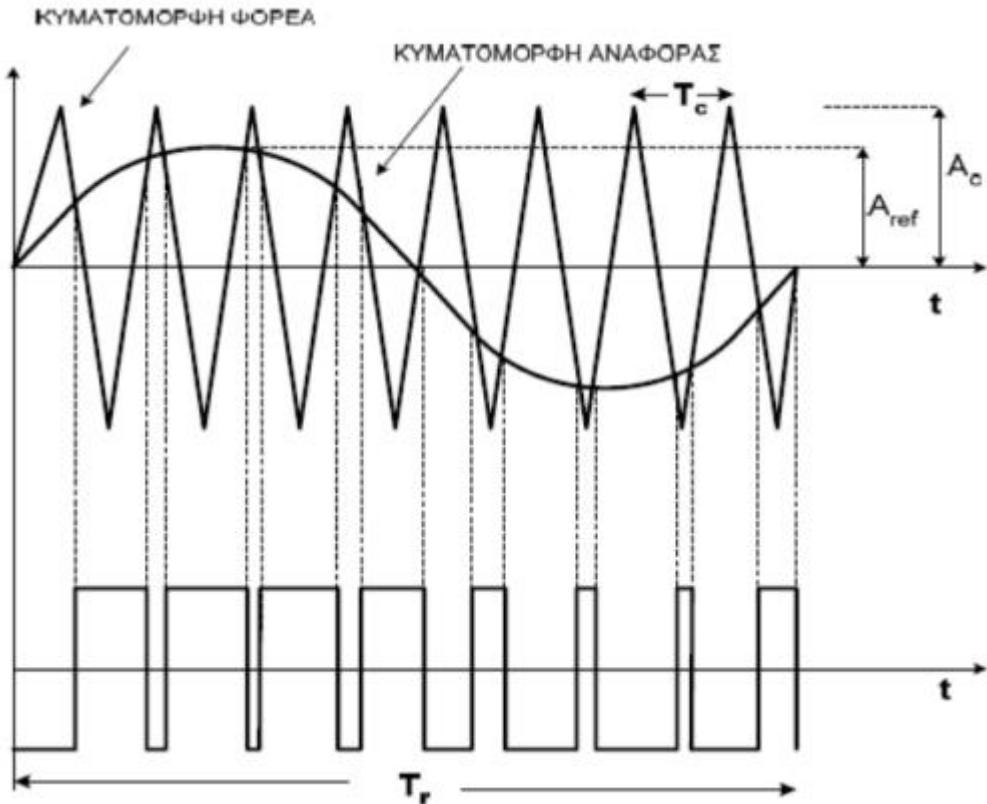
$f_C$ . Η σύγκριση αυτή παράγει μια παλμοσειρά με πλάτος που είναι ανάλογο της διαφοράς των δύο σημάτων.



Εικόνα 23. Δημιουργία SPWM Παλμών

Η αρχή λειτουργίας της SPWM είναι η εξής:

1. Το σήμα αναφοράς περνάει από ένα φίλτρο χαμηλής συχνότητας για να αφαιρεθεί το περιεχόμενό του σε υψηλές συχνότητες.
2. Το φιλτραρισμένο σήμα αναφοράς συγκρίνεται με ένα τριγωνικό σήμα φορέα.
3. Η σύγκριση αυτή παράγει ένα σήμα λογικής που είναι λογικό "1" όταν το σήμα αναφοράς είναι μεγαλύτερο από το σήμα φορέα και λογικό "0" όταν το σήμα αναφοράς είναι μικρότερο από το σήμα φορέα.
4. Το σήμα λογικής περνάει από ένα ενισχυτή για να αυξηθεί η ισχύς του.
5. Το ενισχυμένο σήμα λογικής χρησιμοποιείται για να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει τους ημιαγωγικούς διακόπτες ενός αντιστροφέα.

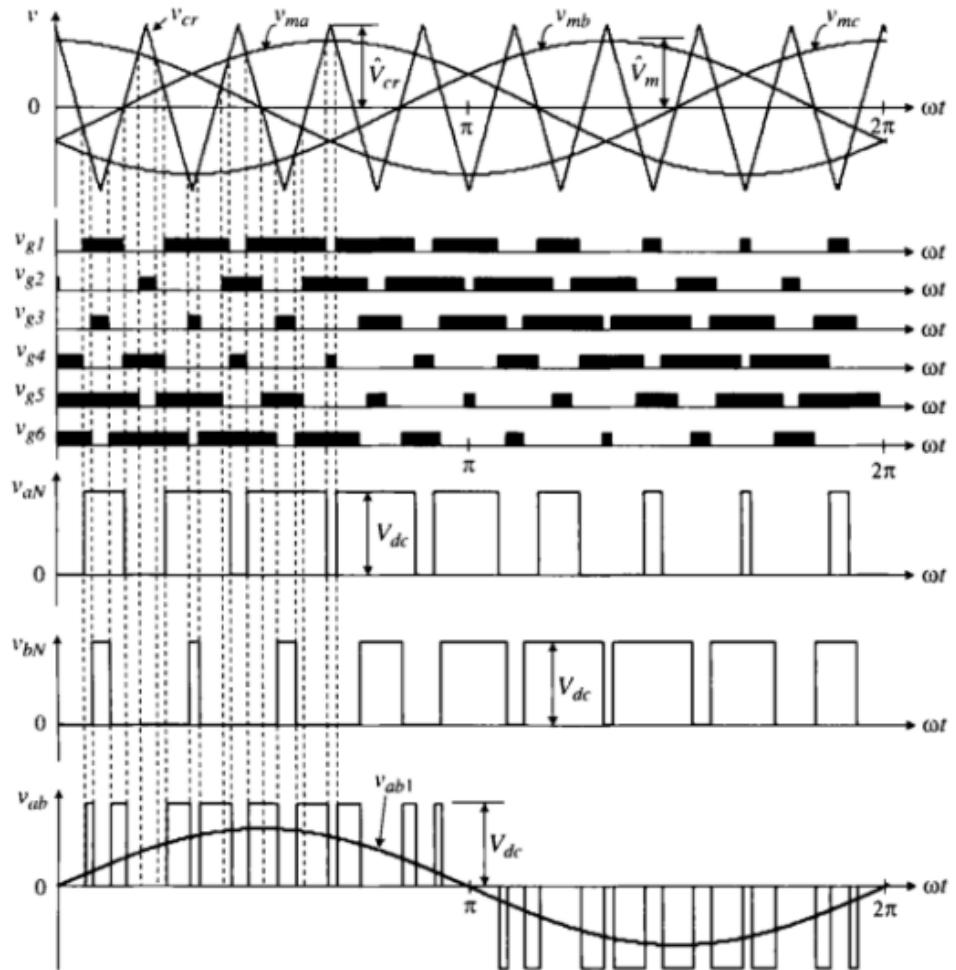


Εικόνα 24. SPWM Λειτουργία

Έτσι, όταν παράγεται η εναλλασσόμενη τάση στην έξοδο του αντιστροφέα, παρατηρούμε την παρουσία αρμονικών λόγω της διαδικασίας του SPWM. Οι αρμονικές αυτές εμφανίζονται σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων κοντά στα ακέραια πολλαπλάσια της διακοπτικής συχνότητας, δηλαδή της συχνότητας του φορέα.

Το καλό είναι ότι αυτές οι αρμονικές συχνότητες μπορούν σχετικά εύκολα να απομονωθούν και να αποκοπούν με τη χρήση φίλτρων. Αυτό επιτρέπει την εξάλειψη ή τη μείωση των ανεπιθύμητων αρμονικών, παρέχοντας έτσι μια πιο καθαρή εναλλασσόμενη τάση στο φορτίο. Στην περίπτωση των τριφασικών αντιστροφέων, η μέθοδος SPWM εφαρμόζεται με παρόμοια λογική, αλλά με τη διαφορά ότι τώρα έχουμε τρία ημίτονα αναφοράς. Κάθε ένα από αυτά τα ημίτονα έχει μια διαφορετική φάση, όπου κάθε ένα από αυτά συγκρίνεται με την ίδια τριγωνική κυματομορφή φορέα.

Συγκεκριμένα, τα τρία ημίτονα αναφοράς έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους ίση με  $120^\circ$ . Στη συνέχεια, αυτά τα ημίτονα συγκρίνονται με την τριγωνική κυματομορφή του φορέα. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται λεπτομερώς η λειτουργία της τεχνικής SPWM για τον τριφασικό αντιστροφέα, με την παραγωγή των παλμών έναυσης για τα ημιαγωγικά στοιχεία, καθώς και τον τρόπο παραγωγής της τάσης εξόδου.



Εικόνα 25. Αναπαράσταση από Ημίτονα σε Παλμούς

Για ευκολία, μπορούμε να υιοθετήσουμε την προσέγγιση ότι, εάν ένα τρανζίστορ του πάνω κλάδου είναι ενεργοποιημένο, η εναλλασσόμενη τάση στην έξοδο είναι ίση με  $V_{DC}/2$ . Αντίστοιχα, αν ο τρανζίστορ του κάτω κλάδου είναι ενεργοποιημένος, η τάση θα είναι  $-V_{DC}/2$ . Έτσι, με αυτήν την προσέγγιση, μπορούμε να αναπαραστήσουμε διακοπτική λειτουργία ως εξής:

$$V_{out}(t) = \frac{V_{DC}}{2}, \text{ όταν το πάνω τρανζίστορ είναι ενεργοποιημένο}$$

$$V_{out}(t) = -\frac{V_{DC}}{2}, \text{ όταν το κάτω τρανζίστορ είναι ενεργοποιημένο}$$

Αντή η απλοποίηση επιτρέπει μια ευκολότερη περίγραφη της διακοπτικής λειτουργίας του συστήματος.

$$v_a = \frac{M_a V_{DC}}{2} \cos(\omega_s t)$$

Όπου Ma είναι η κατάσταση για τα τρανζίστορ του ίδιου κλάδου , εάν το τρανζίστορ του κάτω κλάδου είναι ενεργό τότε έχουμε Ma=-1, ενώ εάν το τρανζίστορ του πάνω κλάδου είναι ενεργό έχουμε Ma=1. Αντή η αναπαράσταση, που χρησιμοποιεί τις τιμές 1 και -1 αντί των πραγματικών τιμών τάσης, είναι πιο κατάλληλη για τη μοντελοποίηση ενός συστήματος μέσης τιμής.

Ωστόσο, στον υπολογισμό των μεταβλητών ελέγχου του αντιστροφέα τάσης, χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τα συνημίτονα της πριονωτής τριγωνικής περιοδικής συνάρτησης με πλάτος  $m$ . Αυτές οι μεταβλητές λαμβάνουν τιμές από -1 έως 1, αντικαθιστώντας τις αντίστοιχες τιμές της πραγματικής συνάρτησης στο μοντέλο μέσης τιμής ισχύει :

$$\tilde{m}_i = m_i \cos (\omega_s t)$$

Όπου το i καθορίζει την φάση.

Χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Park, στο dq0 σύστημα έχουμε :

$$v_{sd} = m_{sd} \frac{V_{DC}}{2} \quad v_{sq} = m_{sq} \frac{V_{DC}}{2}$$

- $v_{sd}, v_{sq}$  οι εναλλασσόμενες τάσεις στην είσοδο του μετατροπέα
- $V_{DC}$  η συνεχής τάση του πυκνωτή του DC διαύλου .
- $m_{sd}$  είναι τα μετασχηματισμένα ,σε dq0, συνημιτονοειδή μεγέθη και αποτελούν τις μεταβλητές ελέγχου του αντιστροφέα .

### **3.2.2 Φίλτρο LC και πηνίο Σύζευξης:**

Η χρήση LC κατωδιαβατού φίλτρου και πηνίου σύζευξης σε μία τοπολογία όπου χρησιμοποιείται Inverter για την διασύνδεση με το δίκτυο, μπορεί να προσφέρει πολλαπλά οφέλη. Ορισμένα από αυτά είναι τα παρακάτω :

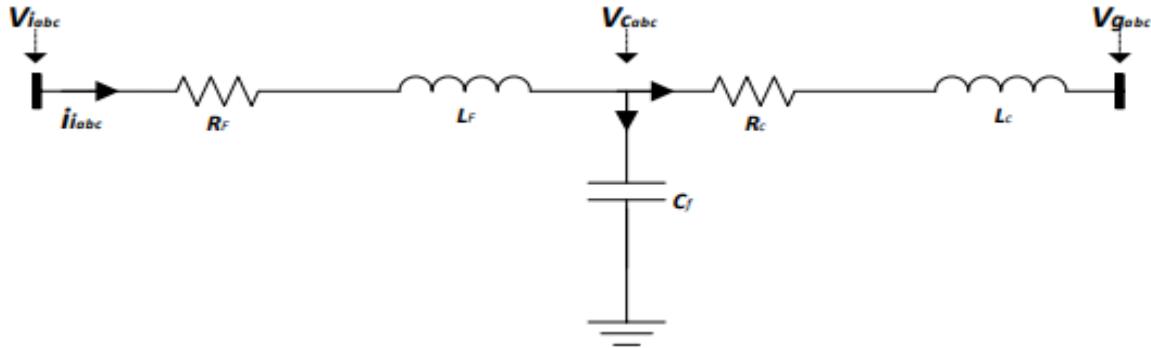
1. Προστατεύει το δίκτυο από τις αρμονικές που παράγονται από τον inverter. Οι αρμονικές είναι συχνότητες που είναι πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας του δικτύου. Όταν ένας inverter λειτουργεί, παράγει αρμονικές που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στο δίκτυο, όπως αύξηση της θερμοκρασίας των καλωδίων, απώλεια ισχύος και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε άλλες συσκευές. Το LC κατωδιαβατό φίλτρο απομακρύνει τις αρμονικές από το δίκτυο, προστατεύοντάς το από ζημιές.
2. Βελτιώνει την ποιότητα της τάσης εξόδου του Inverter. Η τάση εξόδου του inverter περιέχει επίσης αρμονικές, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στα φορτία που συνδέονται με τον inverter, όπως μείωση της ισχύος και αύξηση της θερμοκρασίας. Το LC κατωδιαβατό φίλτρο μειώνει τις αρμονικές της τάσης εξόδου, βελτιώνοντας την ποιότητα της τάσης.
3. Περιορίζει την ενέργεια που επιστρέφει από το δίκτυο προς το σύστημα. Η τάση εξόδου του inverter περιέχει επίσης αρμονικές, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στα φορτία που συνδέονται με τον inverter, όπως μείωση της ισχύος και αύξηση της θερμοκρασίας. Το LC κατωδιαβατό φίλτρο μειώνει τις αρμονικές της τάσης εξόδου, βελτιώνοντας την ποιότητα της τάσης.

Το LC κατωδιαβατό φίλτρο αποτελείται από ένα πηνίο και έναν πυκνωτή. Το πηνίο έχει υψηλή αντίσταση στις χαμηλές συχνότητες, ενώ ο πυκνωτής έχει υψηλή αντίσταση στις υψηλές συχνότητες. Η συνδυασμένη δράση των δύο αυτών στοιχείων δημιουργεί ένα κατωδιαβατό φίλτρο που επιτρέπει την διέλευση της βασικής συχνότητας του δικτύου και απομακρύνει τις αρμονικές.

Το πηνίο σύζευξης συνδέεται μεταξύ του inverter και του δικτύου και έχει δύο λειτουργίες:

1. Δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που συνδέει το inverter με το δίκτυο. Το μαγνητικό πεδίο αυτό επιτρέπει την μεταφορά ισχύος από τον inverter στο δίκτυο.
2. Προστατεύει τον inverter από τις διαρροές ρεύματος από το δίκτυο. Οι διαρροές ρεύματος μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στον inverter. Το πηνίο σύζευξης περιορίζει τις διαρροές ρεύματος, προστατεύοντας τον inverter.

Η τοπολογία του LC φίλτρου και του πηνίου σύζευξης είναι η εξής:



Εικόνα 26. LC Φίλτρο και Πηνίο Σύζευξης

Στην έξοδο του αντιστροφέα έχουμε :

$$\begin{bmatrix} v_{ia} \\ v_{ib} \\ v_{ic} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_F & 0 & 0 \\ 0 & R_F & 0 \\ 0 & 0 & R_F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ i_{ic} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_F & 0 & 0 \\ 0 & L_F & 0 \\ 0 & 0 & L_F \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ i_{ic} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix}$$

Στην έξοδο της διάταξης κατωδιαβατού φίλτρου έχουμε :

$$\begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c & 0 & 0 \\ 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_c & 0 & 0 \\ 0 & L_c & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix}$$

Ισχύει ότι :

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ i_{ic} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_F & 0 & 0 \\ 0 & C_F & 0 \\ 0 & 0 & C_F \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix}$$

Οπου :

$v_{ia}$  ,  $v_{ib}$  και  $v_{ic}$  είναι η τάση στην έξοδο του αντιστροφέα κατευθυνόμενο στην πλευρά του δικτύου , στις τρείς φάσεις a,b,c αντίστοιχα .

$v_{ca}$  ,  $v_{cb}$  και  $v_{cc}$  είναι η τάση στην έξοδο του κατωδιαβατού φίλτρου LC , στις τρείς φάσεις a,b,c αντίστοιχα.

$v_{ga}$  ,  $v_{gb}$  και  $v_{gc}$  είναι η τάση στην έξοδο της διάταξης , στις τρείς φάσεις a,b,c αντίστοιχα .

$i_{ia}$  ,  $i_{ib}$  και  $i_{ic}$  είναι τα ρεύματα που βγαίνουν από τον αντιστροφέα και εισέρχονται στο κατωδιαβατό φίλτρο ,στις τρείς φάσεις a,b,c αντίστοιχα .

$i_{ca}$  ,  $i_{cb}$  και  $i_{cc}$  είναι τα ρεύματα στην έξοδο του RC φίλτρου ,στις τρείς φάσεις a,b,c αντίστοιχα.

$R_F$  , $C_F$  και  $L_F$  αποτελούν την παρασιτική αντίσταση του πηνίου , την χωρητικότητα του πυκνωτή και την αυτεπαγωγή του φίλτρου αντίστοιχα .

$R_C$  και  $L_C$  αποτελούν την παρασιτική αντίσταση και την αυτεπαγωγή του πηνίου σύζευξης Κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού Park , οι τελικές σχέσεις για το LC κατωδιαβατό φίλτρο προκύπτουν ως εξής :

$$L_F \cdot \frac{d I_{id}}{dt} + R_F \cdot I_{id} = v_{id} - v_{cd} + \omega_s \cdot L_F \cdot I_{iq}$$

$$L_F \cdot \frac{d I_{iq}}{dt} + R_F \cdot I_{sq} = v_{iq} - v_{cq} - \omega_s \cdot L_F \cdot I_{id}$$

$$L_C \cdot \frac{d I_{cd}}{dt} + R_C \cdot I_{cd} = v_{cd} - v_{gd} + \omega_s \cdot L_C \cdot I_{cq}$$

$$L_C \cdot \frac{d I_{cq}}{dt} + R_C \cdot I_{cq} = v_{cq} - v_{gq} - \omega_s \cdot L_C \cdot I_{id}$$

$$C_F \cdot \frac{d V_{cd}}{dt} = i_{id} - i_{cd} + \omega_s \cdot C_F \cdot V_{cq}$$

$$C_F \cdot \frac{d V_{cq}}{dt} = i_{iq} - i_{cq} - \omega_s \cdot C_F \cdot I_{id}$$

Όπου :

$v_{id}$  και  $v_{iq}$  είναι οι τάσεις στην έξοδο του αντιστροφέα κατευθυνόμενο στην πλευρά του δικτύου, στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα .

$v_{cd}$  και  $v_{cq}$  είναι η τάση στην έξοδο του κατωδιαβατού φίλτρου LC , στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα .

$i_{id}$  και  $i_{iq}$  είναι τα ρεύματα που βγαίνουν από τον αντιστροφέα και εισέρχονται στο κατωδιαβατό φίλτρο , στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα .

$i_{cd}$  και  $i_{cq}$  είναι τα ρεύματα στην έξοδο του RC φίλτρου ,στους δύο άξονες d και q αντίστοιχα.

$\omega_s$  καλούμε την συχνότητα της τάσης που ρυθμίζεται μέσω του αντιστροφέα και συμπίπτει με την συχνότητα που χρησιμοποιείται για την μήτρα Park , δηλαδή η συχνότητα της τάσης του αντιστροφέα είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα του στρεφόμενου πλαισίου dq0.

### **3.3 DC Πλευρά:**

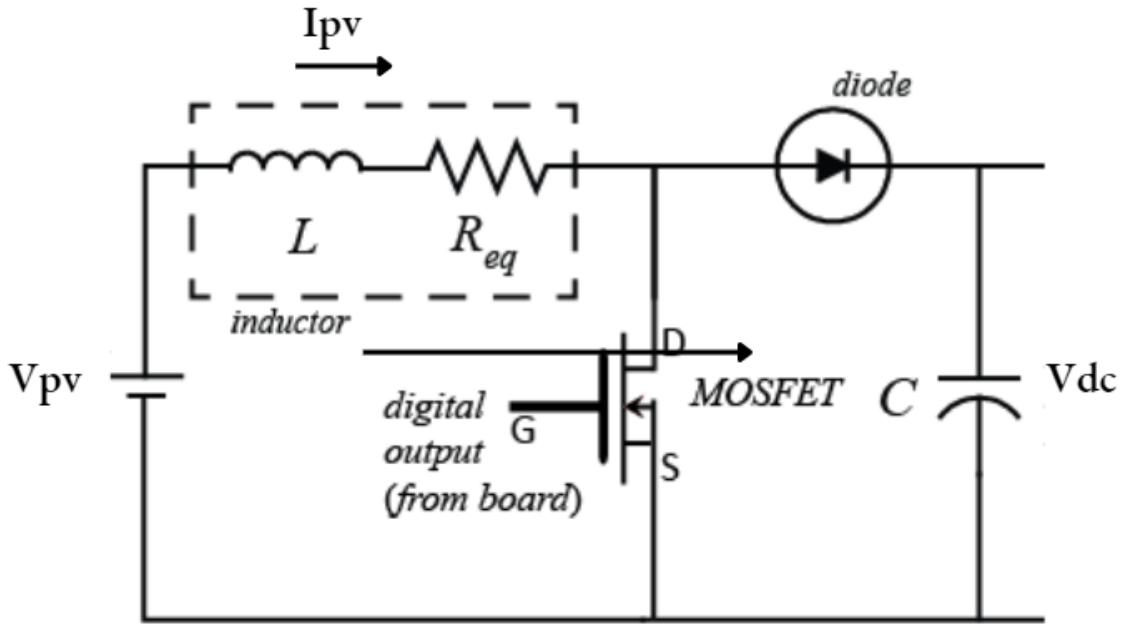
Η DC πλευρά του συστήματος που αναπτύσσουμε στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελείται από τις εξής παρακάτω συσκευές :

1. Την φωτοβολταϊκή συστοιχία όπου γίνεται μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική
2. Τον DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης (Boost Conventer) , που είναι υπεύθυνος για την ανύψωση της τάσης στην επιθυμητή τιμή , ώστε να συνδέεται κατάλληλα με τον Inverter και κατ' επέκταση με το δίκτυο.

#### **3.3.1 Μοντέλο DC/DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης (Boost Conventer) :**

Η χρήση του μετατροπέα αυτού στο σύστημα μας , γίνεται όπως είδαμε και παραπάνω μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και του Inverter. Η παρουσία του είναι απαραίτητη καθώς προσφέρει στο σύστημα ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα όπως :

- Αύξηση της τάσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο επίπεδο που απαιτείται από τον inverter. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ παράγουν ενέργεια σε χαμηλή τάση. Ο DC/DC Boost Converter αυξάνει αυτήν την τάση σε επίπεδα που μπορούν να είναι πιο αποτελεσματικά για τον Inverter.
- Μεγιστοποίηση της ισχύος που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η ισχύς μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας εξαρτάται από τη τάση και το ρεύμα που παράγει. Ο μετατροπέας DC/DC Boost μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετακίνηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP), όπου παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ.
- Βελτιστοποίηση Απόδοσης: Ο Inverter απαιτεί υψηλή τάση εισόδου για να λειτουργήσει αποδοτικά. Ο Boost Converter εξασφαλίζει ότι η τάση από τα φωτοβολταϊκά είναι στο επιθυμητό επίπεδο, βελτιστοποιώντας έτσι την απόδοση του συστήματος.
- Προστασία από Υπερτάσεις: Ο Boost Converter μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως προστασία από υπερτάσεις, προστατεύοντας τον Inverter από υψηλές τάσεις που θα μπορούσαν να προκληθούν από τις αλλαγές φωτεινότητας ή άλλες ανωμαλίες.



Εικόνα 27. Boost Converter

Σε έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης, η λειτουργία ανύψωσης επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ημιαγωγικού στοιχείου, όπως ενός τρανζίστορ MOSFET ή μιας διόδου. Το ημιαγωγικό στοιχείο ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται για να ελέγχει την ροή του ρεύματος από την πηγή DC στην έξοδο του μετατροπέα. Κατάλληλο τρόπο έναυσης του τρανζίστορ αποτελεί η συμβατική μέθοδος PWM. Η PWM χρησιμοποιεί ένα σήμα ελέγχου που ταλαντεύεται μεταξύ των τιμών 1 και 0. Όταν το σήμα ελέγχου είναι 1, το ημιαγωγικό στοιχείο ενεργοποιείται και ρέει ρεύμα από την πηγή DC στην έξοδο του μετατροπέα. Όταν το σήμα ελέγχου είναι 0, το ημιαγωγικό στοιχείο απενεργοποιείται και δεν ρέει ρεύμα από την πηγή DC στην έξοδο του μετατροπέα. Όντας ένα διακοπτικό στοιχείο, το τρανζίστορ διακρίνει την διάταξη αυτή σε δύο καταστάσεις ανάλογα δηλαδή με το εάν ο μέσος κλάδος του τρανζίστορ Q άγει ή όχι.

Στην περίπτωση ενός τρανζίστορ MOSFET, ο μέσος κλάδος του τρανζίστορ είναι ενεργός όταν το τρανζίστορ είναι ενεργοποιημένο. Στην περίπτωση μίας διόδου, ο μέσος κλάδος της διόδου είναι ενεργός όταν η δίοδος είναι forward biased. Έτσι, έχουμε μια μεταβλητή ελέγχου  $i$ , η οποία θα πάρει τιμές 1 ή 0 όταν το MOSFET είναι ενεργοποιημένο ή όχι αντίστοιχα.

Η μεταβλητή ελέγχου  $i$  είναι μια συνεχής μεταβλητή που λαμβάνει τιμές στο διάστημα (0,1). Η τιμή  $i=1$  αντιστοιχεί στην κατάσταση ενεργοποίησης του τρανζίστορ και η τιμή  $i=0$  αντιστοιχεί στην κατάσταση απενεργοποίησης του τρανζίστορ. Αντικαθιστώντας το διακριτό  $u$  με την συνεχή μεταβλητή  $i$ , η οποία λαμβάνει τιμές στο διάστημα (0,1), καταλήγουμε στο μοντέλο μέσης τιμής του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και αναπαρίσταται με την παρακάτω εξίσωση.

Η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο μέσης τιμής του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι η εξής:

$$L \frac{d}{dt} i_{PV} + R_{eq} i_{PV} = V_{pv} - (1 - m)V_{dc}$$

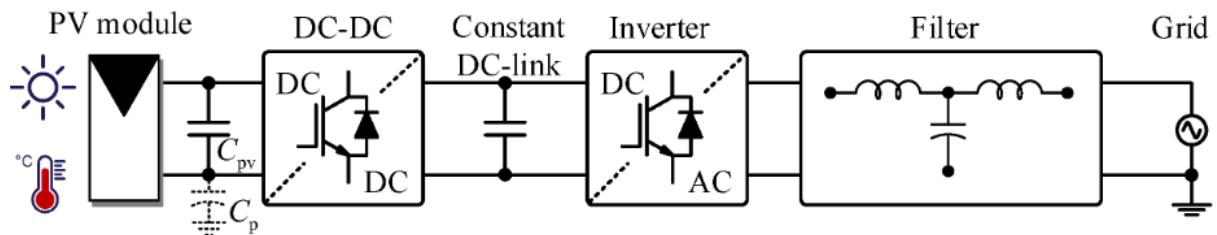
όπου  $R_b$  είναι η παρασιτική αντίσταση του μετατροπέα ,  $L_b$  είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου του μετατροπέα και  $m$  ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα (duty cycle).

Εάν θεωρήσουμε την παρασιτική αντίσταση αμελητέα , τότε στην μόνιμη κατάσταση προκύπτει :

$$V_{dc} = \frac{V_{pv}}{1 - m}$$

### 3.3.2 Μοντέλο DC Διαύλον (DC Link):

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται μεταξύ τους μέσω των σημαντικότερουν μη γραμμικού στοιχείου , τον DC Δίαυλο. Στην ουσία όλες οι διατάξεις συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός πυκνωτή και με αυτόν τον τρόπο μπορούν να αλληλεπιδρούν. Στο δικό μας σύστημα ο DC Δίαυλος συνδέει τον Boost Μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης με τον Inverter (Αντιστροφέα Τάσης).



Εικόνα 28. Ολοκληρωμένο Σύστημα

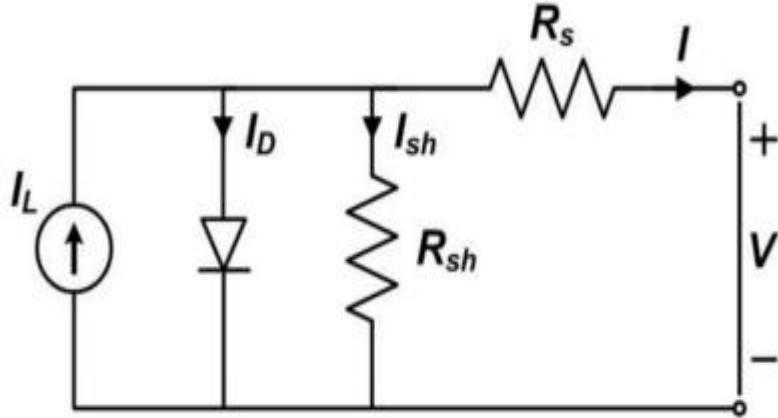
$$C_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} = (1 - m_{PV})I_{PV} + I_{Grid}$$

Όπου :

- $C_{DC}$  η χωρητικότητα του πυκνωτή .
- $V_{DC}$  η τάση που επάγεται στους οπλισμούς του πυκνωτή .
- $I_{PV}$  το ρεύμα στην έξοδο της συστοιχίας φωτοβολταικών .
- $I_{Grid}$  το ρεύμα που προέρχεται από τον μετατροπέα που είναι κατευθυνόμενος προς το δίκτυο .

### 3.3.3 Εξισώσεις Φωτοβολταικής Συστοιχίας:

Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης αποτελεί ένα απλοποιημένο ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη λειτουργία της κυψέλης κατά την έκθεσή της στην ηλιακή ακτινοβολία. Το συγκεκριμένο κύκλωμα συνδράμει στον υπολογισμό της ηλεκτρικής απόδοσης της φωτοβολταϊκής κυψέλης και στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατά τη λειτουργία της.



Εικόνα 29. Ισοδύναμο Κύκλωμα Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας

Η βασική εξίσωση που περιγράφει το κύτταρο είναι :

$$I = I_L - I_0 * (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$$

Στον παραπάνω τύπο το  $I_0$  αποτελεί το ρεύμα κόρου της διόδου και το  $I_L$  αποτελεί το φωτόρευμα , το ρεύμα δηλαδή που ευθύνεται στην προσπίπτουσα ακτινοβολία που δέχεται το ηλιακό κύτταρο. Οι τύποι υπολογισμού των μεγεθών αυτών είναι :

$$I_0 = A_{Cell} * \left( \frac{q * D_e * n i^2}{L_e * N_A} + \frac{q * D_h * n i^2}{L_h * N_D} \right)$$

$$IL = q * A * G * (Le + W + Lh)$$

Οπου :

- $q$ : Το φορτίο ηλεκτρονίου)
- $T$ : Η απόλυτη θερμοκρασία του κυττάρου
- $k$ : Η σταθερά του Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)
- $A_{Cell}$ : Η διατομή του κυττάρου
- $V$ : Η τάση στην έξοδο του κυττάρου
- $Le$ : Το μήκος διάχυσης ηλεκτρονίων  $= \sqrt{D_e * \tau e}$
- $Lh$ : Το μήκος διάχυσης οπών  $= \sqrt{D_h * \tau h}$
- $\tau e, \tau h$  : Η διάρκεια ζωής των ηλεκτρονίων (οπών) σαν φορείς μειονότητας
- $W$ : Το εύρος της επαφής (Depletion Region)
- $G$ : Ο ρυθμός παραγωγής για την ηλιακή ακτινοβολία

Η βασική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου είναι η εξίσωση Shockley-Queisser, η οποία περιγράφει τη λειτουργία ενός ηλιακού κυττάρου ως δίοδος p-n. Η εξίσωση αυτή είναι μια

καλή προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς του ηλιακού κυττάρου, αλλά δεν είναι ακριβής σε όλες τις περιπτώσεις.

Οι πειραματικές παρατηρήσεις έχουν δείξει ότι η βασική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου δεν αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την πραγματική I-V χαρακτηριστική καμπύλη ενός κυττάρου σε πρακτικούς σκοπούς. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν λαμβάνει υπόψη ορισμένους παράγοντες που επηρεάζουν την πραγματική συμπεριφορά του ηλιακού κυττάρου, όπως:

- Το εξωτερικό βραχυκύλωμα: Η βασική εξίσωση του ηλιακού κυττάρου υποθέτει ότι το εξωτερικό κύκλωμα είναι ανοιχτό. Στην πραγματικότητα, το εξωτερικό κύκλωμα είναι συνήθως συνδεδεμένο σε ένα φορτίο, το οποίο επηρεάζει την καμπύλη I-V του ηλιακού κυττάρου.
- Οι απώλειες στο εξωτερικό κύκλωμα: Οι απώλειες στο εξωτερικό κύκλωμα, όπως οι απώλειες αντίστασης και οι απώλειες χωρητικότητας, επηρεάζουν επίσης την καμπύλη I-V του ηλιακού κυττάρου.
- Οι εσωτερικές απώλειες: Οι εσωτερικές απώλειες, όπως οι απώλειες λόγω της ρευστοποίησης της φωτοβολταϊκής τάσης(η φωτοβολταϊκή τάση αρχίζει να μειώνεται καθώς αυξάνεται η ένταση του ρεύματος) και οι απώλειες λόγω της θερμικής ροής, επηρεάζουν επίσης την καμπύλη I-V του ηλιακού κυττάρου.

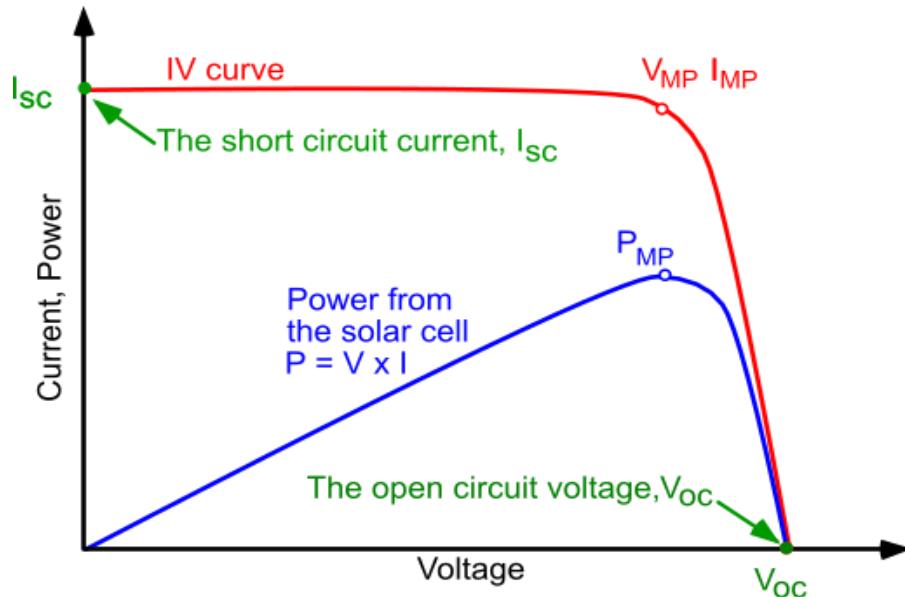
Για να βελτιώσουν την ακρίβεια της βασικής εξίσωσης του ηλιακού κυττάρου, οι ερευνητές έχουν εισαγάγει τρεις πρόσθετες παραμέτρους:

- Rs: Η εν σειρά αντίσταση του κυττάρου αντιπροσωπεύει την αντίσταση που συναντούν οι φορείς κατά την ροή τους μέσα στο κύτταρο. Η αντίσταση αυτή προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως η αντίσταση του κυρίως ημιαγωγού, η αντίσταση της επιφανειακής στρώσης και η αντίσταση της ωματικής επαφής(η περιοχή όπου συναντώνται δύο διαφορετικά υλικά, όπως ο ημιαγωγός και το μεταλλικό ηλεκτρόδιο του φωτοβολταϊκού κυττάρου).
- Rsh: Η παράλληλη αντίσταση του κυττάρου αντιπροσωπεύει την αντίσταση που συναντούν οι φορείς που διαρρέουν το κύτταρο. Η αντίσταση αυτή προέρχεται από διάφορες πηγές, όπως η επανασύνδεση των φορέων στην περιοχή επαφής, η διαρροή των φορέων στην εξωτερική επιφάνεια του κυττάρου και η διαρροή των φορέων σε ανωμαλίες του κρυστάλλου.
- A: Η σταθερά A αντιπροσωπεύει τα φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή επαφής. Η τιμή της A κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2, ανάλογα με το είδος του υλικού από το οποίο κατασκευάζεται το κύτταρο και τις συνθήκες λειτουργίας του.

Βάσει των παραπάνω προκύπτει ο τελικός τύπος :

$$I = I_L - I_0 * \left( e^{\frac{q*(V+I*R_S)}{A*kT}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}}$$

Οι I-V, P-V χαρακτηριστικές καμπύλες στην έξοδο ενός κυττάρου παριστάνονται ως εξής :



Εικόνα 30. I-V, P-V Χαρακτηριστικές Φωτοβολταϊκού Κυττάρου

- Τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{OC}$ ): Η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι η τάση που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ όταν δεν αντλείται ρεύμα από αυτό. Σε ιδανικές συνθήκες, είναι σχετικά σταθερή υπό μεταβαλλόμενη φωτεινότητα. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η τάση κυττάρου στο σημείο ανοικτού κυκλώματος μειώνεται.
- Ρεύμα βραχυκυκλώσεως ( $I_{SC}$ ): Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως είναι το μέγιστο ρεύμα που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πάνελ όταν οι ακροδέκτες του είναι βραχυκυκλωμένοι. Σε ιδανικές συνθήκες, είναι επίσης σχετικά σταθερό υπό μεταβαλλόμενη φωτεινότητα. Ωστόσο, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως αυξάνεται.
- Τάση μέγιστης ισχύος ( $V_{MP}$ ): Η τάση μέγιστης ισχύος είναι η τάση στην οποία ένα φωτοβολταϊκό πάνελ παράγει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ. Αυτή η τάση είναι μικρότερη από την τάση ανοιχτού κυκλώματος και μεγαλύτερη από την τάση βραχυκυκλώσεως.
- Ρεύμα μέγιστης ισχύος ( $I_{MP}$ ): Το ρεύμα μέγιστης ισχύος είναι το ρεύμα στο οποίο ένα φωτοβολταϊκό πάνελ παράγει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ. Αυτό το ρεύμα είναι μικρότερο από το ρεύμα βραχυκυκλώσεως και μεγαλύτερο από μηδέν.
- Σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου ( $P_{MP}$ ): Το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου είναι το σημείο στο οποίο η καμπύλη ρεύματος-τάσης ενός φωτοβολταϊκού πάνελ φτάνει στο μέγιστο. Αυτό το σημείο αντιστοιχεί στην τάση μέγιστης ισχύος και στο ρεύμα μέγιστης ισχύος.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχεδιασμός Συστήματος Ελέγχου

## 4.1 Εισαγωγή :

Οι μονάδες που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, απαιτούν τον κατάλληλο έλεγχο για την ορθή λειτουργία τους. Αυτό συμπεριλαμβάνει μια σειρά από τεχνάσματα και τεχνικές για την εφαρμογή του. Για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, οι τρόπου ελέγχου διαφέρουν όσον αφορά τον τρόπο έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων. Τα ημιαγωγικά στοιχεία δεν είναι ιδανικά και, ως εκ τούτου, η συχνότητα έναυσης/σβέσης πρέπει να παραμένει εντός ορισμένων ορίων. Υπερβολικά υψηλές συχνότητες μπορεί να προκαλέσουν βλάβες στα ημιαγωγικά στοιχεία. Με τους μετατροπείς αυτούς, στοχεύουμε κυρίως στον έλεγχο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, στη συχνότητα λειτουργίας της τάσης φορτίου μετά το LC φίλτρο, καθώς και στην τάση στα άκρα του πυκνωτή του DC διαύλου. Με την κατάλληλη μέθοδο έναυσης για κάθε μετατροπέα, μπορούμε να επιτύχουμε μια ελεγχόμενη λειτουργία του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ασφαλώς κύριο στοιχείο του ελέγχου μας θα αποτελέσει η χρήση των ευρέως διαδεδομένων PI ελεγκτών.

## 4.2. Έλεγχος ΣΡ/ΣΡ Μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας :

Η εξίσωση από την οποία χαρακτηρίζεται ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης, είναι μη γραμμική, συνεπώς για να μπορέσουμε να τον ελέγξουμε θα τροφοδοτήσουμε στον PI ελεγκτή το σφάλμα μεταξύ του ρεύματος αναφοράς και του πραγματικού ρεύματος που ρέει το φωτοβολταϊκό. Στην συνέχεια αφαιρούμε από την έξοδο του ελεγκτή την τάση V<sub>PV</sub> που προσμετράτε από το βολτόμετρο στα άκρα του φωτοβολταϊκού συστήματος και διαιρούμε με την V<sub>dc</sub>. Καταλήγουμε να λαμβάνουμε τον λόγο κατάτμησης (Duty Cycle) για τον έλεγχο του DC/DC Boost Converter από την παρακάτω σχέση :

$$m_{PV} = 1 + \frac{1}{V_{DC}} \cdot \left[ K_{pI_{PV}} \cdot (I_{PV,Ref} - I_{PV}) + K_{iI_{PV}} \cdot \int (I_{PV,Ref} - I_{PV}) - V_{PV} \right]$$

Τώρα για τον προσδιορισμό των συντελεστών K πρέπει να εξάγουμε τις συναρτήσεις μεταφοράς κλειστού βρόγχου για τα ρεύματα  $I_{PV,Ref}, I_{PV}$ . Κάνοντας αντικατάσταση από τον τύπο του Boost προκύπτει ότι :

$$L \frac{d}{dt} i_{PV} + R_{eq} i_{PV} = \left[ K_{pI_{PV}} \cdot (I_{PV,Ref} - I_{PV}) + K_{iI_{PV}} \cdot \int (I_{PV,Ref} - I_{PV}) dt \right]$$

Κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού Laplace θα καταλήξουμε στο παρακάτω σύστημα πρώτης τάξης για την συνάρτηση μεταφοράς :

$$\frac{I_{PV}}{I_{PV,Ref}} = \frac{1}{\left( \frac{L \cdot s + R_{eq}}{K_p \cdot s + K_i} \right) \cdot s + 1}$$

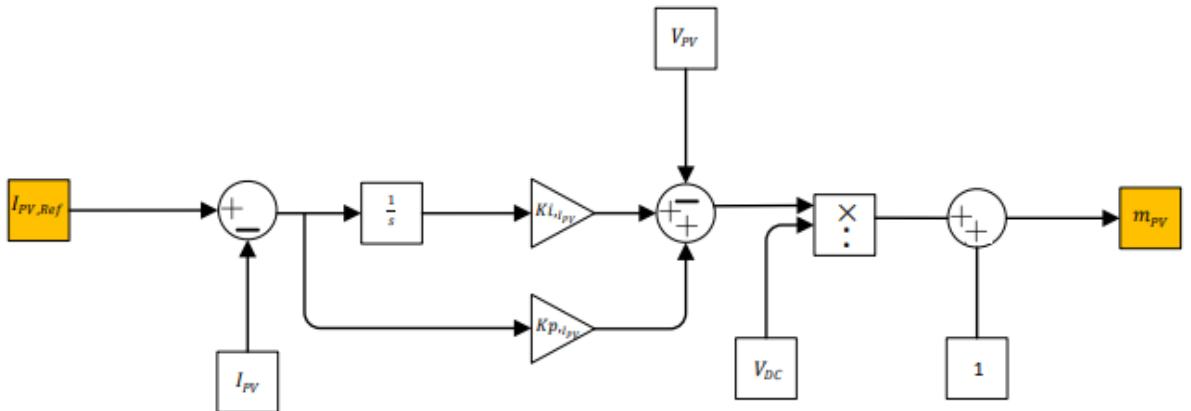
Έτσι, με την σωστή επιλογή κερδών, προκύπτει ότι :

$$K_{p,I_{PV}} = \frac{L}{\tau_{i,PV}}$$

Και

$$K_{i,I_{PV}} = \frac{R_{eq}}{\tau_{i,PV}}$$

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του εσωτερικού βρόγχου ελέγχου του μετατροπέα ανύψωσης τασης :



Εικόνα 31. Εσωτερικός Βρόγχος Ελέγχου Boost Converter

### 4.3 Έλεγχος στην πλευρά του φορτίου:

Κύριος στόχος του κυκλώματος ελέγχου που εφαρμόζεται στον αντιστροφέα είναι η διατήρηση σταθερής τάσης και συχνότητας καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, ανεξάρτητα από μεταβολές στις πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση και συχνότητα αναφέρονται στο δίκτυο, το οποίο ακολουθεί το L-C κατωδιαβατό φίλτρο. Το φίλτρο αυτό αφαιρεί τις ανώτερες αρμονικές της τάσης που παράγεται από τον αντιστροφέα, παρέχοντας ένα σχεδόν καθαρό ημιτονοειδές σήμα.

Η τακτική ελέγχου βασίζεται στον διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό τάσης (Voltage Oriented Control) και εφαρμόζεται στο διφασικό στρεφόμενο πλαίσιο dq0 με χρήση PI ελεγκτών.

Η συχνότητα λειτουργίας χρησιμοποιείται επίσης για διάφορους μετασχηματισμούς Park στον έλεγχο, αλλά είναι επίσης η συχνότητα λειτουργίας στην πλευρά του φορτίου. Ο σειριακός έλεγχος χρησιμοποιείται για να επιτύχουμε την ευσταθή λειτουργία του συστήματος ελέγχου και να εξασφαλίσουμε την ασυμπτωτική ευστάθειά του. Με το σειριακό έλεγχο, χρησιμοποιούμε έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό βρόγχο ελέγχου. Ο εσωτερικός βρόγχος είναι υπεύθυνος για την παραγωγή του κατάλληλου σήματος που αφορά τον λόγο κατάτμησης που αντιστοιχεί στην παλμοδότηση PWM του μετατροπέα αντιστροφής τάσης. Αυτό το σήμα οδηγεί τον μετατροπέα για την παραγωγή της επιθυμητής τάσης εξόδου. Ο εξωτερικός βρόγχος

ελέγχου είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση της επιθυμητής τάσης DC στο διαύλου και τη ρύθμισή της ανάλογα με τις ανάγκες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης του εσωτερικού βρόγχου ρεύματος, ο οποίος αναλαμβάνει να διαχειριστεί την έξοδο του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ενώ ο εξωτερικός βρόγχος τάσης παρακολουθεί την τάση DC και ρυθμίζει τον εσωτερικό βρόγχο ρεύματος ανάλογα. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η σταθεροποίηση της τάσης του DC διαύλου στην επιθυμητή στάθμη. Ο έλεγχος σχεδιάζεται ώστε η τάση στον άξονα q της πλευράς του δικτύου να μηδενίζεται, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες και την παρουσία άεργου ισχύος. Ενώ στον άξονα d η τάση θέλουμε να οδηγείται στην τιμή της τάση αναφοράς, η οποία στην περίπτωση μας βρίσκεται στα 1200 Volt. Ο παραπάνω έλεγχος υλοποιείται με τη χρήση ενός βρόγχου κλειδώματος φάσης (Phased-Locked Loop), έναν συμβατικό PI ελεγκτή που δέχεται ως αναφορά την τάση για μηδενισμό και προσθέτει την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας ως σφάλμα στην έξοδο.

Συνεπώς βάση των παραπάνω απαιτούνται τρία κυκλώματα ελέγχου για τον αντιστροφέα :

1. Κύκλωμα ελέγχου της τάσης στον άξονα d στην πλευρά του φορτίου:
  - a. Ο εξωτερικός βρόγχος της τάσης παράγει ένα σήμα αναφοράς ρεύματος για τον άξονα d.
  - b. Ο εσωτερικός βρόγχος, απαλλαγμένος από τις μη γραμμικότητες, παράγει την κατάλληλη μεταβλητή έναυσης του μετατροπέα ισχύος μέσω της τεχνικής S.P.W.M.
2. Βρόγχος Κλειδώματος Φάσης ( Phased- Locked- Loop) : Παράγει την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας και ταυτόχρονα μηδενίζει την τάση στον άξονα q στην πλευρά του φορτίου.
3. Βρόγχος που μηδενίζει τη ροή ρεύματος στον άξονα q: Χρησιμοποιείται για τη μείωση των απωλειών ισχύος.

#### **4.3.1. Βρόγχος Κλειδώματος Φάσης (Phased-Locked Loop):**

Η λειτουργία του βρόγχου κλειδώματος φάσης (PLL) είναι σημαντική για τη σωστή λειτουργία του αντιστροφέα. Βασικός ρόλος του PLL είναι ο προσανατολισμός του στρεφόμενου πλαισίου μέσω της γωνιακής συχνότητας με την οποία στρέφεται. Συγκεκριμένα, ο στόχος ελέγχου της μονάδας είναι ο προσανατολισμός του πλαισίου των τάσεων στο διφασικό στρεφόμενο πλαίσιο  $dq\theta$  προς την κατεύθυνση του μηδενισμού της τάσης  $v_{gq}$ . Ο σκοπός του ελεγκτή είναι να διατηρεί τη γωνία  $\theta$  στην επιθυμητή τιμή, ώστε η τάση να μηδενίζεται, επιτρέποντας έτσι τον ασφαλή προσανατολισμό του πλαισίου των τάσεων. Ο ελεγκτής περιγράφεται από την παρακάτω σχέση :

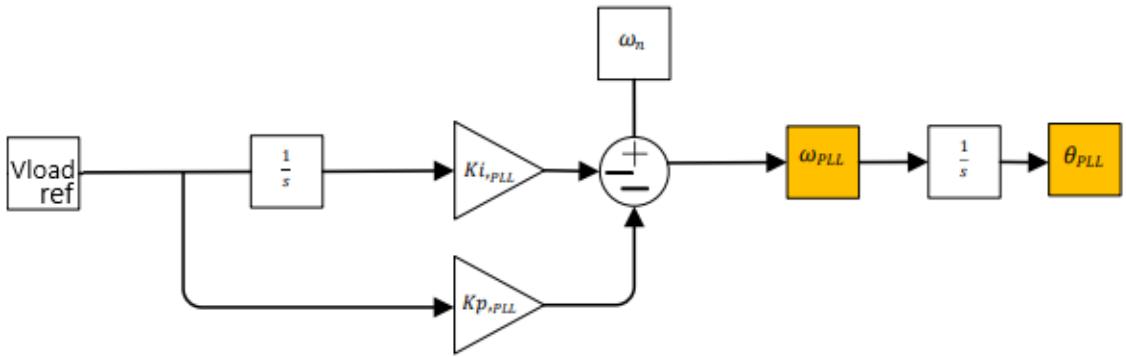
$$\omega_{PLL} = \omega_n - K_{p,PLL} \cdot (v_{gq,Ref} - v_{gq}) - K_{i,PLL} \cdot \int (v_{gq,Ref} - v_{gq}) dt$$

Θέτουμε  $v_{gq,Ref} = 0$ , αλλά μπορούμε μέσω του PLL να επιτύχουμε μία επιθυμητή γωνία ισχύος για κάθε ζυγό ανάμεσα στις τάσεις των d και q αξόνων.

Αξίζει να σημειωθεί πως η είσοδος στα Block του μετασχηματισμού Park είναι γωνία και όχι συχνότητα, εξού και η ολοκλήρωση στην έξοδο του ελεγκτή ως προς την γωνία  $\theta$  :

$$\theta = \int \omega_{PLL} dt$$

Το δομικό διάγραμμα ελέγχου του PLL είναι το εξής :



Εικόνα 32. Phase Locked Loop

### 4.3.2. Εσωτερικός Βρόγχος Ελέγχου Ρεύματος:

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα ρεύματα στην γραμμή μετά τον αντιστροφέα στην πλευρά του φορτίου είναι μη γραμμικές και η επιτυχής απαλοιφή των μη γραμμικών όρων τους από τους δύο βρόγχους ελέγχου μας δίνει την δυνατότητα να καταλήξουμε σε μία συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης, περιλαμβάνοντας την μαθηματική έκφραση για τα αναλογικά και τα ολοκληρωτικά κέρδη. Το σύστημα ελέγχου θα αποτελείται από PI ελεγκτές, έναν για κάθε άξονα d και q. Οι ελεγκτές αυτοί θα λαμβάνουν ως είσοδο τη διαφορά μεταξύ της τιμής αναφοράς ρεύματος και του πραγματικού ρεύματος ( $i_{q,ref} - i_q$ ), κάνοντας έτσι χρήση του κλειστού συστήματος ανατροφοδότησης για τη βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος. Το ηλεκτρικό σύστημα μετά τον αντιστροφέα περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$L \cdot \frac{I_d}{dt} + R \cdot I_d = Vin_d - Vout_d + \omega_s \cdot L \cdot I_q$$

$$L \cdot \frac{I_q}{dt} + R \cdot I_q = Vin_q - Vout_q + \omega_s \cdot L \cdot I_d$$

Απλοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις και αντικαθιστώντας τις τάσεις στην έξοδο του αντιστροφέα προκύπτει :

$$m_d = \frac{2}{V_{DC}} \cdot \left[ K_{p,I_d} \cdot (I_{d,Ref} - I_d) + K_{i,I_d} \cdot \int (I_{d,Ref} - I_d) dt - \omega_s \cdot L \cdot I_q \right]$$

$$m_q = \frac{2}{V_{DC}} \cdot \left[ K_{p,I_q} \cdot (I_{q,Ref} - I_q) + K_{i,I_q} \cdot \int (I_{q,Ref} - I_q) dt + \omega_s \cdot L \cdot I_d \right]$$

Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace, καταλήγουμε στην συνάρτηση μεταφοράς από την οποία προκύπτουν τα εξής αναλογικά και ολοκληρωτικά κέρδη του PI ελεγκτή :

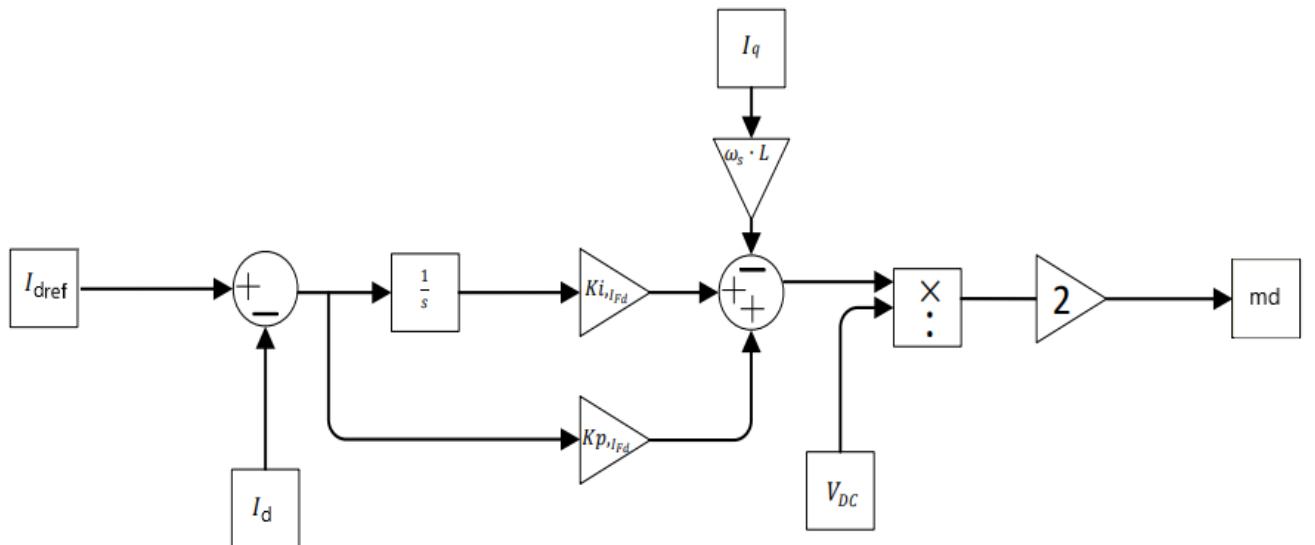
$$K_{p,I_d} = K_{p,I_q} = \frac{L}{\tau_i}$$

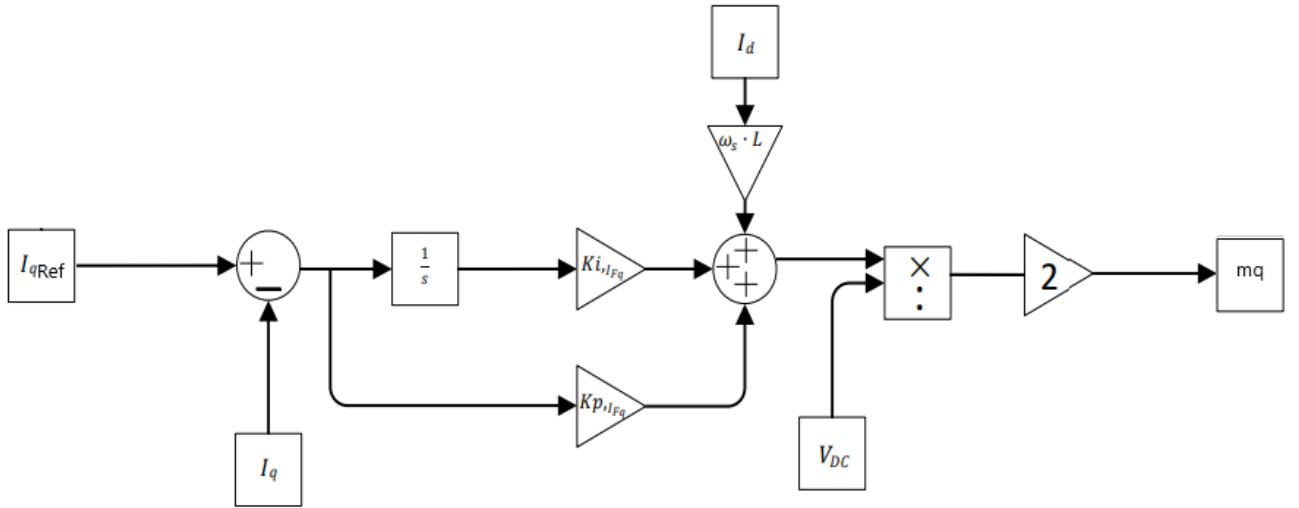
$$K_{i,I_d} = K_{i,I_q} = \frac{R}{\tau_i}$$

Συνεπώς

$$\frac{I}{I_{Ref}} = \frac{1}{\left( \frac{L \cdot s + R}{K_p \cdot s + K_i} \right) \cdot s + 1}$$

Βάσει των παραπάνω το δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου εσωτερικού βρόγχου είναι το εξής :





Εικόνα 33. Εσωτερικοί Βρόγχοι Ελέγχου Ρεύματος στην Πλευρά του Φορτίου

#### 4.3.3. Εξωτερικός Βρόγχος Ελέγχου Τάσης:

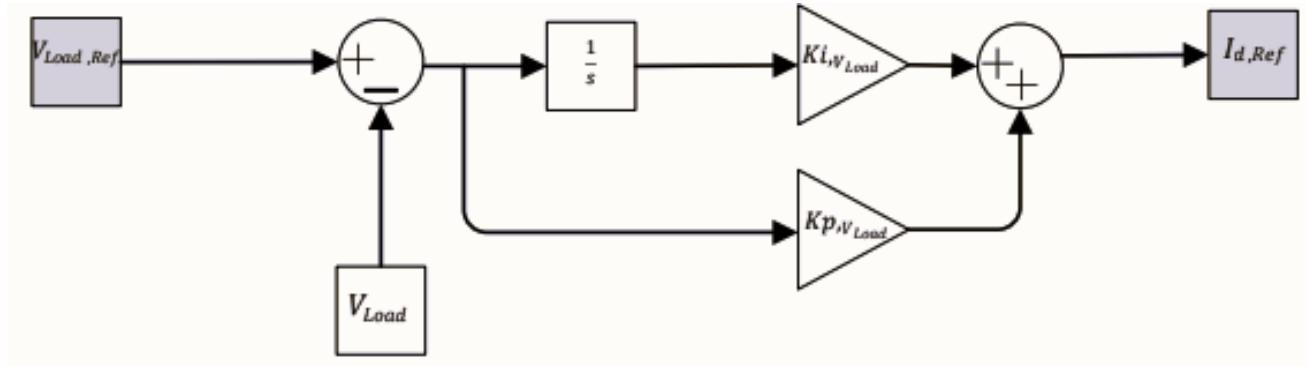
Η τάση του φορτίου αναφέρεται στη διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στο φορτίο. Σε αυτήν την περίπτωση, το φορτίο τοποθετείται μετά από ένα LC κατωδιαβατό φίλτρο. Για το σχεδιασμό του εξωτερικού βρόγχου αρνητικής ανατροφοδότησης τάσης, χρησιμοποιείται ένας PI ελεγκτής, με είσοδο το σφάλμα μεταξύ της τιμής αναφοράς και της μετρούμενης τάσης του φορτίου.

Για την περίπτωση αυτή, η εξαγωγή μιας συνάρτησης μεταφοράς για την τάση του φορτίου απαιτεί εκτενή ανάλυση και τεχνάσματα μη γραμμικού ελέγχου. Συνεπώς, χρησιμοποιείται η μέθοδος πειραματισμού και σφάλματος (Trial and Error) για τον προσδιορισμό των αναλογικών και ολοκληρωτικών συντελεστών. Αυτό σημαίνει ότι τα κέρδη του ελεγκτή μεταβάλλονται συστηματικά μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή απόκριση.

Τέλος, η έξοδος του ελεγκτή αποτελεί το ρεύμα αναφοράς που χρησιμοποιείται ως είσοδος στον εσωτερικό βρόγχο ελέγχου του άξονα d,  $I_{d,Ref}$  προκειμένου να διαμορφωθεί ο συντελεστής  $m_d$ . Παρακάτω παρουσιάζεται η μαθηματική έκφραση αυτής της περιγραφής.

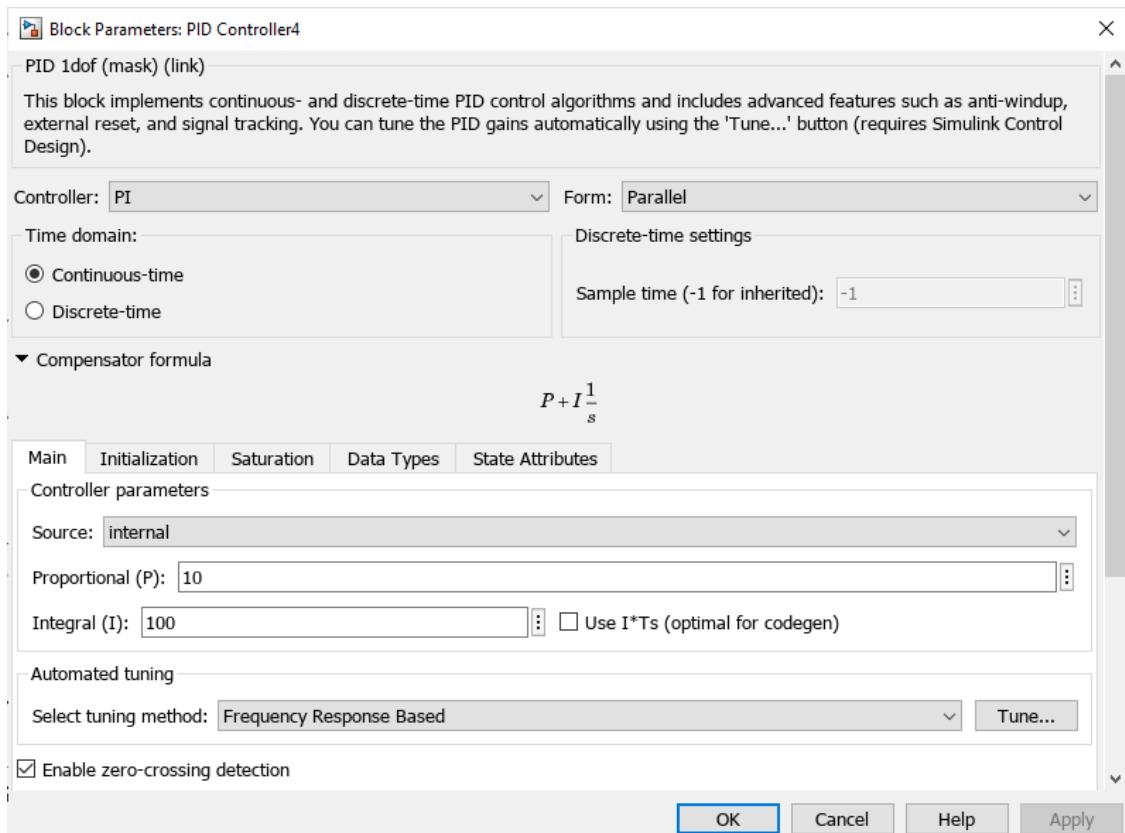
$$I_{d,Ref} = \left[ K_{p,V_{LOAD}} \cdot (V_{LOAD,Ref} - V_{LOAD}) + K_{i,V_{LOAD}} \cdot \int (V_{LOAD,Ref} - V_{LOAD}) dt \right]$$

Βάσει των παραπάνω το δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου τάσης εξωτερικού βρόγχου είναι το εξής :

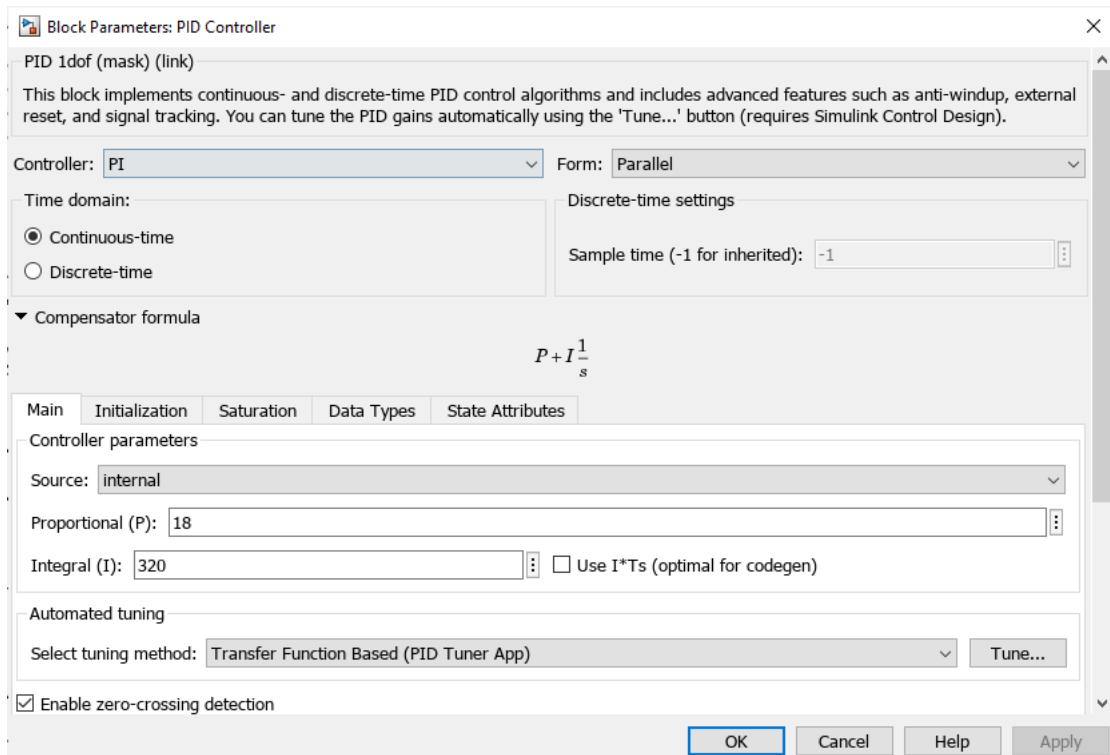


Εικόνα 34. Εξωτερικός Βρόγχος Ελέγχου Τάσης στην Πλευρά του Φορτίου

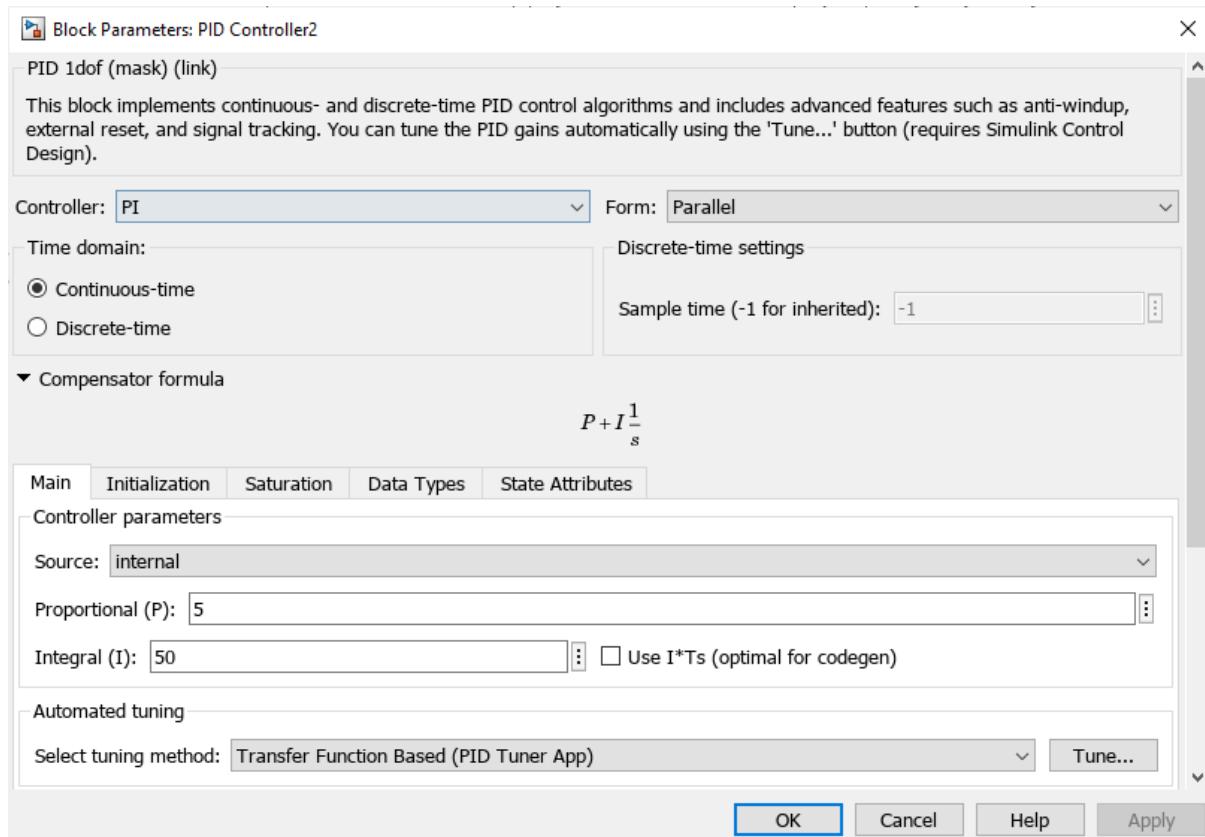
Βάσει των παραπάνω αναλύσεων τα κέρδη στα οποία καταλήγουμε για τους PI ελεγκτές , είναι τα εξής:



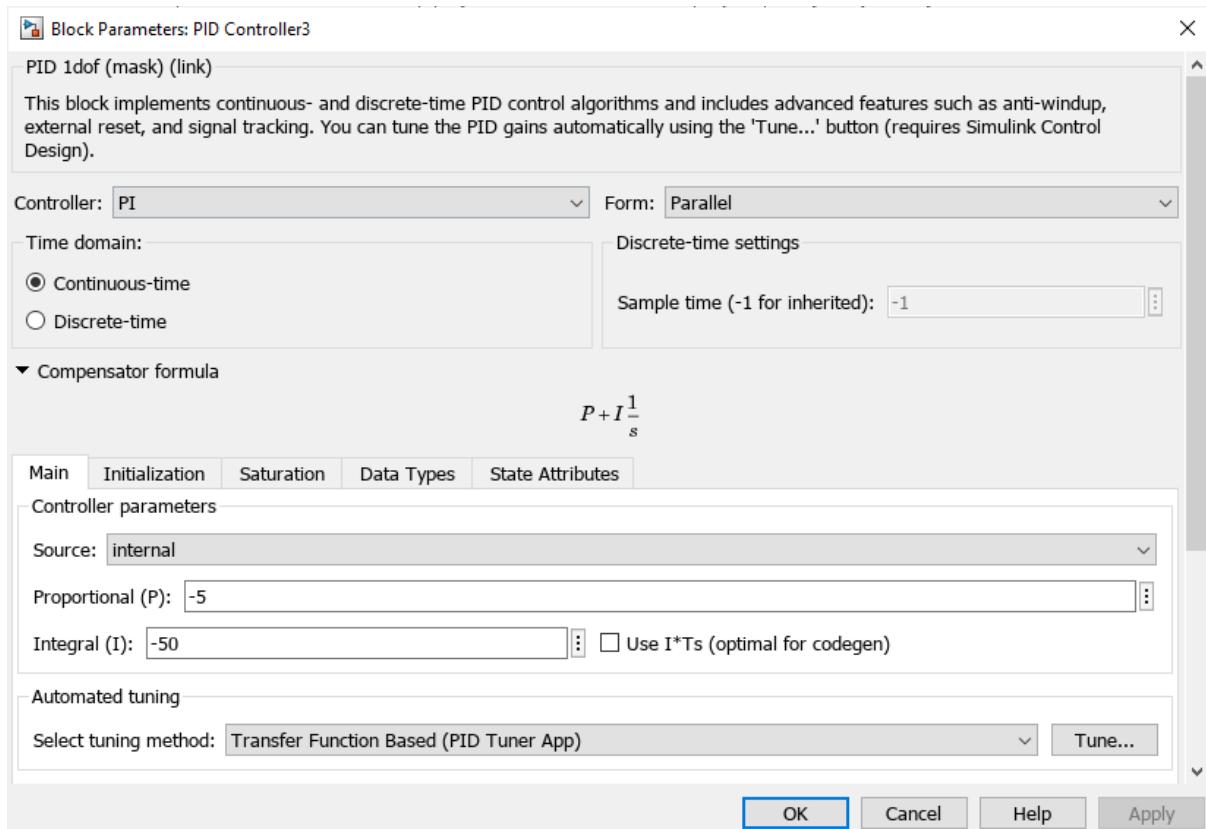
Εικόνα 35.Κέρδη PI Ελεγκτή Εσωτερικού Βρόγχου Boost Μετατροπέα



Εικόνα 36. Κέρδη PI Ελεγκτή PLL



Εικόνα 37. Κέρδη PI Ελεγκτή Εσωτερικού Βρόγχου Ρεύματος στην πλευρά του Φορτίου.



Εικόνα 38. Κέρδη PI Ελεγκτή Εξωτερικού Βρόγχου Ελέγχου Τάσης στην πλευρά του Φορτίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματική Διάταξη

### 5.1 Εισαγωγή:

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλύσουμε το σύστημα το οποίο δημιουργήσαμε , χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μαθηματικά εργαλεία και τεχνικές ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιάσουμε τον προσομοιωτή πραγματικού χρόνου Hardware In the Loop καθώς και τρόπο με τον οποίο κατασκευάσαμε το σύστημα σε αυτόν, και πιο συγκεκριμένα στο Schematic Editor . Ακόμη θα δείξουμε την λειτουργία του Scada περιβάλλοντος του και τον τρόπο με τον οποίο ελέγχαμε σε πραγματικό χρόνο τα διάφορα χαρακτηριστικά του και παρατηρήσαμε μετρήσεις από μία σειρά μετρητικών οργάνων του προσομοιωτή. Τέλος θα δείξουμε την χρήση του περιβάλλοντος του μικροελεγκτή C2000 της Texas Instruments που χρησιμοποιήσαμε για την παλμοδότηση του HIL και την μέτρηση των ρευμάτων και τάσεων που παράγει το μοντέλο καθώς και την σύνδεση αναλογικών και ψηφιακών εισόδων και εξόδων για την ολοκλήρωση της διασύνδεσης τους.

### 5.2 Real Time Typhoon Hardware In the Loop:

Το πραγματικού χρόνου HIL (Real-Time Hardware-in-the-Loop) αναφέρεται σε έναν ελεγκτή που αποτελείται τόσο από hardware όσο και από software. Το hardware μέρος προγραμματίζεται με τις κατάλληλες παραμέτρους για οποιοδήποτε πρόβλημα πραγματικού χρόνου που μια προσομοίωση μέσω λογισμικού, όπως το Simulink, δεν μπορεί να αντιμετωπίσει.

Συγκεκριμένα, στο HIL, εισάγονται ξεχωριστά οι μαθηματικές εξισώσεις και τα μοντέλα που περιγράφουν αναλυτικά και ικανοποιητικά κάθε πρόβλημα πραγματικού χρόνου. Έτσι, το υπό μελέτη σύστημα μπορεί να συμπεριφερθεί σαν ένα πραγματικό σύστημα πραγματικού χρόνου όταν λειτουργεί στο πλαίσιο του HIL. Μέσω αυτής της διαδικασίας, επιτυγχάνεται η εξομοίωση και η αξιολόγηση της απόδοσης ενός συστήματος ελέγχου ή μιας συσκευής πριν από την πραγματική της εφαρμογή.



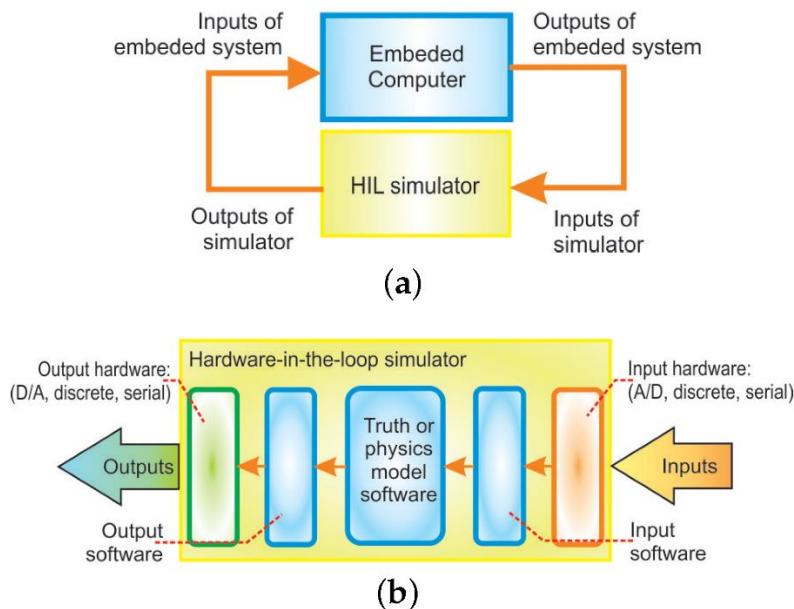
Εικόνα 39. Συσκευή HIL

Τα βασικά στοιχεία που αποτελούν ένα σύστημα HIL περιλαμβάνουν την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (Electronic Control Unit, ECU), δίαυλο επικοινωνίας μεταξύ των ECU, λογισμικά και εργαλεία υποστήριξης, διεπαφή συστήματος, μπαταρία, αισθητήρες και ενεργοποιητές

(sensors and actuators), μικροεπεξεργαστή, μνήμη, μετρητές (timers) και θύρες εισόδου/εξόδου (I/O). Οι θύρες I/O μπορεί να είναι ψηφιακές ή αναλογικές, ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων που ανταλλάσσονται με το HIL. Οι ενώσεις και η ανταλλαγή σημάτων μεταξύ των στοιχείων φαίνονται στην Εικόνα 4.3.

Οι βασικοί έλεγχοι που εφαρμόζονται στο HIL περιλαμβάνουν τον έλεγχο του υλικού, όπου ελέγχεται κυκλωματικά αν υπάρχουν προβλήματα με τον εξοπλισμό (αισθητήρες, ενεργοποιητές, μνήμη, I/Os), τη διακοπή προς τη γη, όπου ελέγχεται η συμπεριφορά των συστατικών, τη διακοπή προς την τάση τροφοδοσίας, όπου ελέγχεται η συμπεριφορά του συστήματος στη μεταφορά σημάτων, τους έλεγχους ανοικτού κυκλώματος, τους έλεγχους υπέρτασης, τον έλεγχο RAM και τον έλεγχο EEPROM, καθώς και τον έλεγχο του χρονοδιακόπτη WDG.

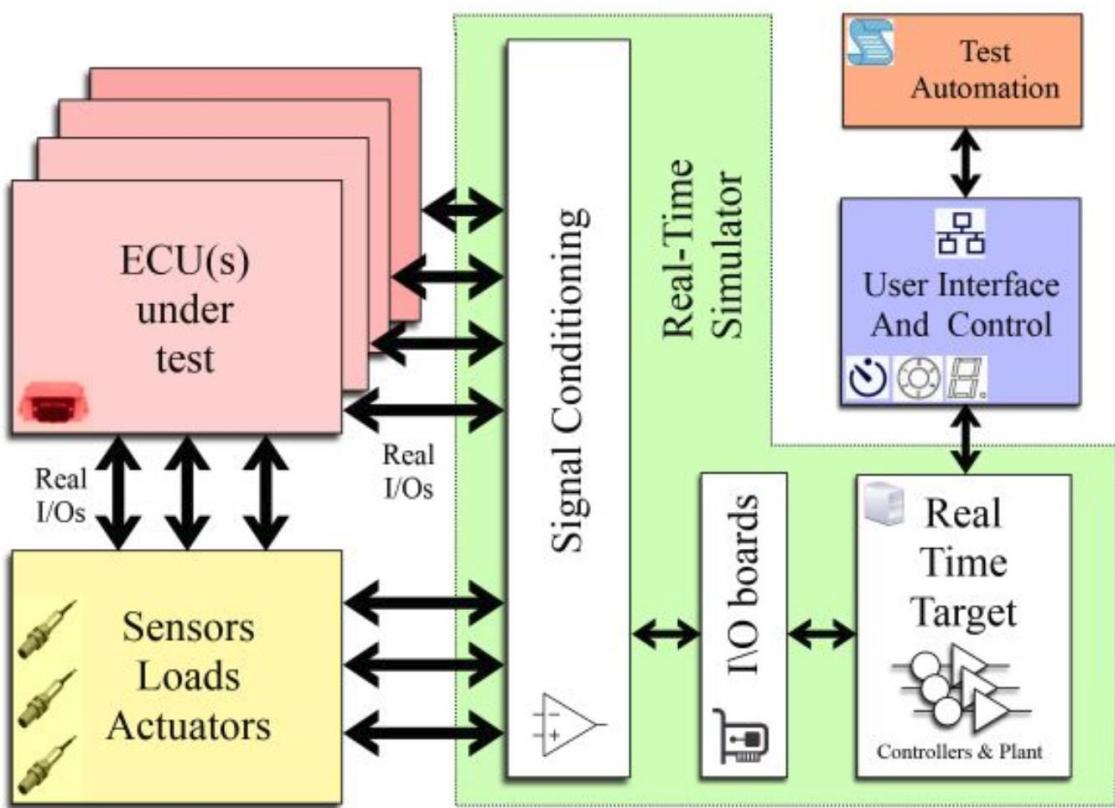
Οι εφαρμογές του HIL είναι σημαντικές σε πολλούς τομείς, όπως στον έλεγχο των συστημάτων αυτοκινήτων, τα ραντάρ, τη ρομποτική, τα συστήματα ισχύος και τα offshore συστήματα.



Εικόνα 40. Δομή Hardware του HIL

Το σύστημα υπό μελέτη, είτε πρόκειται για μία ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (ECU), έναν πλήρως αυτόνομο ψηφιακό ελεγκτή ηλεκτρονικών (FADEC), ή έναν προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC), αποστέλλει τα επιθυμητά σήματα μεγεθών στη μονάδα ρύθμισης σημάτων του HIL. Αυτά τα σήματα περνούν στη μονάδα I/O του HIL, προσαρμόζονται σε σήματα πραγματικού χρόνου και στέλνονται στη διεπαφή χρήστη για επεξεργασία και έλεγχο. Έτσι, μέσω αυτών των σημάτων, είναι δυνατή η πραγματοποίηση των απαραίτητων δοκιμών αυτοματισμού του συστήματος.

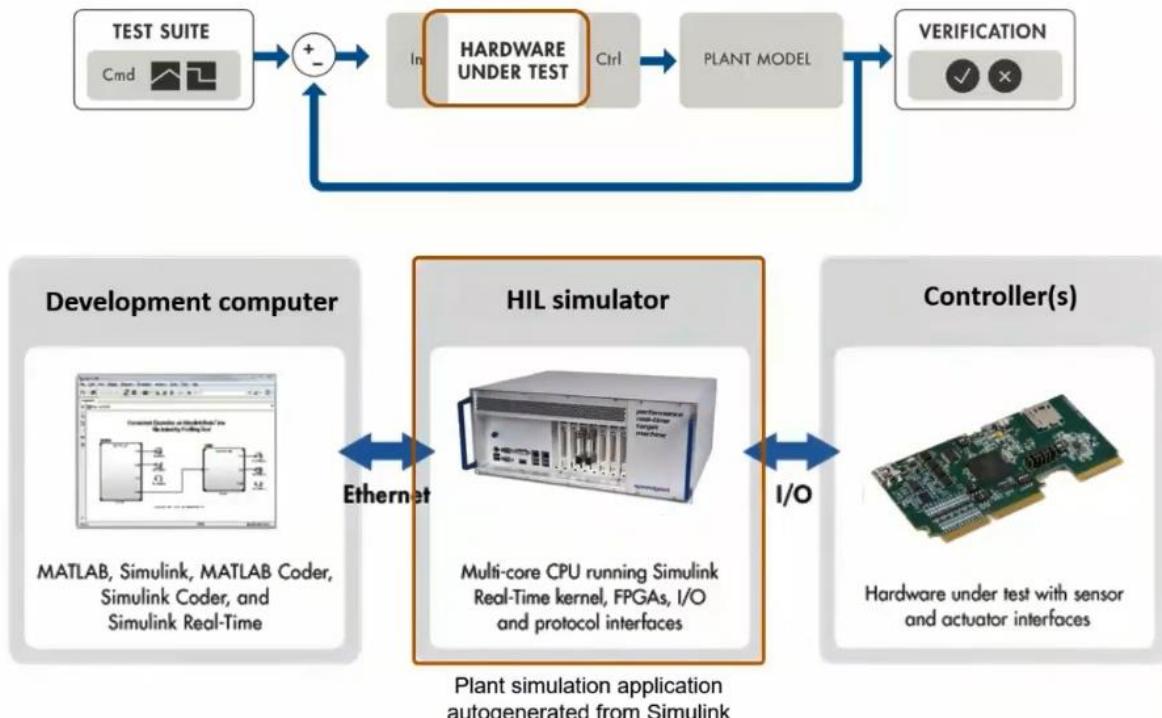
Η διαδικασία προσομοίωσης ενός HIL φαίνεται είναι η εξής : Σε έναν υπολογιστή κατασκευάζεται το μοντέλο του συστήματος σε λογισμικό, συμπεριλαμβανομένου του σχήματος ελέγχου, και μέσω συσκευών I/O επικοινωνεί με το HIL. Στο HIL, γίνεται η προσαρμογή του συστήματος σε πραγματικό χρόνο μέσω ενός μικροεπεξεργαστή πραγματικού χρόνου, ο οποίος δέχεται εντολές ελέγχου από έναν εξωτερικό πραγματικό ελεγκτή που υλοποιεί ένα λογισμικό μοντέλο αυτού στην περίπτωση μας τον ρόλο αυτό έχει το Laptop.



Εικόνα 41. Αναπαράσταση Σύνδεσης Hardware Συστήματος

Το HIL μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κλειστός βρόχος (closed loop) είτε ως ανοιχτός βρόχος (open loop) με το υπό μελέτη σύστημα. Στην πραγματικότητα, ο ανοιχτός βρόχος χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές ελέγχου και προστασίας συστημάτων ηλεκτρικής

ενέργειας (ΣΗΕ), ενώ ο κλειστός βρόχος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές παρακολούθησης της λειτουργίας συστημάτων.



Εικόνα 42. Διασύνδεση-Επικοινωνία και Ανατροφοδότηση Συστήματος

Η επικοινωνία μεταξύ της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) του υπολογιστή και του HIL μπορεί να γίνει είτε με φυσική διασύνδεση μέσω καλωδίων είτε με τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση. Υπάρχουν διάφορα λογισμικά προσομοίωσης HIL πραγματικού χρόνου (RTHIL), γνωστά ως Virtual HIL, τα οποία λειτουργούν σε βήματα χρόνου μικρότερα από τον πραγματικό χρόνο. Μερικά από αυτά είναι τα RTDS, Typhoon HIL και OPAL-RT.

Σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και εργαστήρια ελέγχου χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα συστήματα HIL με πολλές θύρες εισόδων-εξόδων.



Εικόνα 43. Βιομηχανικό Μοντέλο HIL

Το Typhoon HIL 606 είναι ένας υψηλής απόδοσης προσομοιωτής hardware-in-the-loop (HIL) που σχεδιάστηκε για να ανταποκριθεί στις απαιτητικές απαιτήσεις των εφαρμογών ηλεκτρονικών ισχύος και εκσυγχρονισμού δικτύου. Είναι το προϊόν σήμα κατατεθέν της εταιρείας και προσφέρει απαράμιλλη απόδοση, ευελιξία και δυνατότητα κλιμάκωσης.

Κύριες προδιαγραφές:

- Χρόνος ανάλυσης: Έως 200 ns, επιτρέποντας ακριβή προσομοίωση συστημάτων ελέγχου πραγματικού χρόνου
- Κανάλια εισόδου αναλογικού σήματος: 160 κανάλια
- Κανάλια εξόδου αναλογικού σήματος: 128 κανάλια
- Κανάλια εισόδου ψηφιακού σήματος: 128 κανάλια
- Κανάλια εξόδου ψηφιακού σήματος: 64 κανάλια
- Δυνατότητα μοντελοποίησης: Υποστηρίζει ευρύ φάσμα φυσικών μοντέλων, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος, μηχανών και συστημάτων ελέγχου
- Διεπαφές επικοινωνίας: Ethernet, USB, CAN και LIN

Ο Typhoon HIL 606 είναι ένας υψηλής απόδοσης προσομοιωτής hardware-in-the-loop (HIL) που σχεδιάστηκε για να ανταποκριθεί στις απαιτητικές απαιτήσεις των εφαρμογών

ηλεκτρονικών ισχύος και εκσυγχρονισμού δικτύου. Είναι το προϊόν-πρότυπο της εταιρείας και προσφέρει απαράμιλλη απόδοση, ευελιξία και δυνατότητα κλιμάκωσης.

Κύριες προδιαγραφές:

- Χρόνος ανάλυσης: Έως 200 ns, επιτρέποντας ακριβή προσομοίωση συστημάτων ελέγχου πραγματικού χρόνου
- Κανάλια εισόδου αναλογικού σήματος: 160 κανάλια
- Κανάλια εξόδου αναλογικού σήματος: 128 κανάλια
- Κανάλια εισόδου ψηφιακού σήματος: 128 κανάλια
- Κανάλια εξόδου ψηφιακού σήματος: 64 κανάλια
- Δυνατότητα μοντελοποίησης: Υποστηρίζει ευρύ φάσμα φυσικών μοντέλων, συμπεριλαμβανομένων ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος, μηχανών και συστημάτων ελέγχου
- Διεπαφές επικοινωνίας: Ethernet, USB, CAN και LIN

Δυνατότητες:

- Δοκιμή hardware-in-the-loop (HIL): Προσομοιώνει το πραγματικό περιβάλλον ενός συστήματος, επιτρέποντας στους προγραμματιστές να δοκιμάσουν και να επιλύσουν προβλήματα στον λογισμικό ελέγχου τους χωρίς να το συνδέσουν με το πραγματικό σύστημα.
- Δοκιμή Power-HIL: Προσομοιώνει την δυναμική απόκριση των συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος, συμπεριλαμβανομένων μετατροπέων, κινητήρων και μπαταριών.
- Μοντελοποίηση και προσομοίωση: Επιτρέπει στους προγραμματιστές να δημιουργήσουν και να δοκιμάσουν προσαρμοσμένα φυσικά μοντέλα των συστημάτων τους.
- Απόκτηση και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο: Συλλέγει και αναλύει δεδομένα από το προσομοιωμένο σύστημα για την αξιολόγηση της απόδοσης και την αντιμετώπιση προβλημάτων.
- Scripting και αυτοματοποίηση: Ενεργοποιεί τη δημιουργία αυτοματοποιημένων ακολουθιών δοκιμών και προσομοιώσεων.



Εικόνα 44. Μοντέλο HIL 606

Οι κάρτες διασύνδεσης που είναι συχνότερα σε χρήση σε ένα HIL σύστημα είναι:

Ας προσθέσουμε περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις κάρτες διασύνδεσης της Typhoon για τα HIL συστήματα:

#### 1. Διεπαφή DSP 180:

- Διαθέτει δίαυλο με 24 αναλογικές εξόδους ή 24 ψηφιακές εισόδους και 16 ψηφιακές εξόδους.
- Παρέχει υψηλή απόδοση για εφαρμογές ηλεκτρονικής ισχύος.
- Χρησιμοποιείται για γρήγορη ανάπτυξη εφαρμογών.

#### 2. Launchpad:

- Συνδέεται με δίαυλο 16 αναλογικών εξόδων και 4 αναλογικών εισόδων.
- Χρησιμοποιείται για επικοινωνίες και παροχή ισχύος.
- Προσφέρει γρήγορη ανάπτυξη εφαρμογών επικοινωνιών.

#### 3. HIL Breakout:

- Χρησιμοποιείται ως τερματική πλακέτα για τις εισόδους και εξόδους του HIL.
- Επιτρέπει εύκολη σύνδεση των συσκευών ελέγχου και των αισθητήρων.

#### 4. HIL dSPACE:

- Υπάρχουν δύο τύποι: τύπου-A και τύπου-B.

- Η διεπαφή τύπου-Α προσφέρει απευθείας διασύνδεση μεταξύ συσκευών HIL.
- Η διεπαφή τύπου-Β δεν παρέχει απευθείας διασύνδεση μεταξύ των συσκευών HIL.

## 5. HIL Connect:

- Παρέχει ρεαλιστική προσομοίωση για μετατροπείς, συνθήκες ελέγχου και αισθητήρες.
- Προσφέρει ευέλικτη σύνδεση με το HIL.

Κάθε κάρτα διασύνδεσης προσφέρει μοναδικές δυνατότητες και προσαρμόζεται σε διαφορετικές ανάγκες εφαρμογών HIL. Συνδέονται με τις αντίστοιχες θύρες εισόδου/εξόδου του HIL μέσω DIN συνδέσεων. Επιπλέον, κάθε κάρτα διαθέτει μία θύρα USB που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ του μικροεπεξεργαστή που φιλοξενείται στην κάρτα και του κεντρικού υπολογιστή. Στον κεντρικό υπολογιστή βρίσκεται υλοποιημένο το μοντέλο του συστήματος που μελετάται, και η επικοινωνία με το HIL γίνεται μέσω αυτής της θύρας USB. Με αυτόν τον τρόπο, ο υπολογιστής μπορεί να ελέγχει και να παρακολουθεί τη λειτουργία του HIL συστήματος και να αλληλεπιδρά με αυτό για διάφορους σκοπούς, όπως η ανάπτυξη, η επικύρωση και ο έλεγχος του συστήματος που δοκιμάζεται.

To Hardware In the Loop της Typhoon , όπως αντιλαμβανόμαστε καλύπτει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και προσφέρει στον χρήστη πολλαπλές δυνατότητες. Κατά την χρήση του υλικολογισμικού αυτού συστήματος , παρέχονται δύο κύρια περιβάλλοντα τα οποία χρησιμοποιήσαμε κατά την διεξαγωγή των εργαστηριακών πειραμάτων και υλοποίησης του συστήματος μας.

### 1. Schematic Editor :

To Schematic Editor HIL είναι ένα λογισμικό που επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν και να τροποποιούν γραφικά κυκλώματα για προσομοιώσεις HIL. Είναι ένα ισχυρό εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

Δημιουργία κυκλωμάτων:

- Σχεδίαση κυκλωμάτων με drag & drop εξαρτημάτων από μια βιβλιοθήκη προκατασκευασμένων στοιχείων.
- Προσθήκη και τροποποίηση παραμέτρων εξαρτημάτων.
- Σύνδεση εξαρτημάτων με καλώδια.
- Ορισμός τάσεων, ρευμάτων και άλλων μετρήσεων.

Τροποποίηση κυκλωμάτων:

- Αλλαγή της διάταξης των εξαρτημάτων.
- Επεξεργασία παραμέτρων εξαρτημάτων.
- Προσθήκη και αφαίρεση εξαρτημάτων.

- Αλλαγή συνδέσεων καλωδίων.

Εκτέλεση προσομοιώσεων:

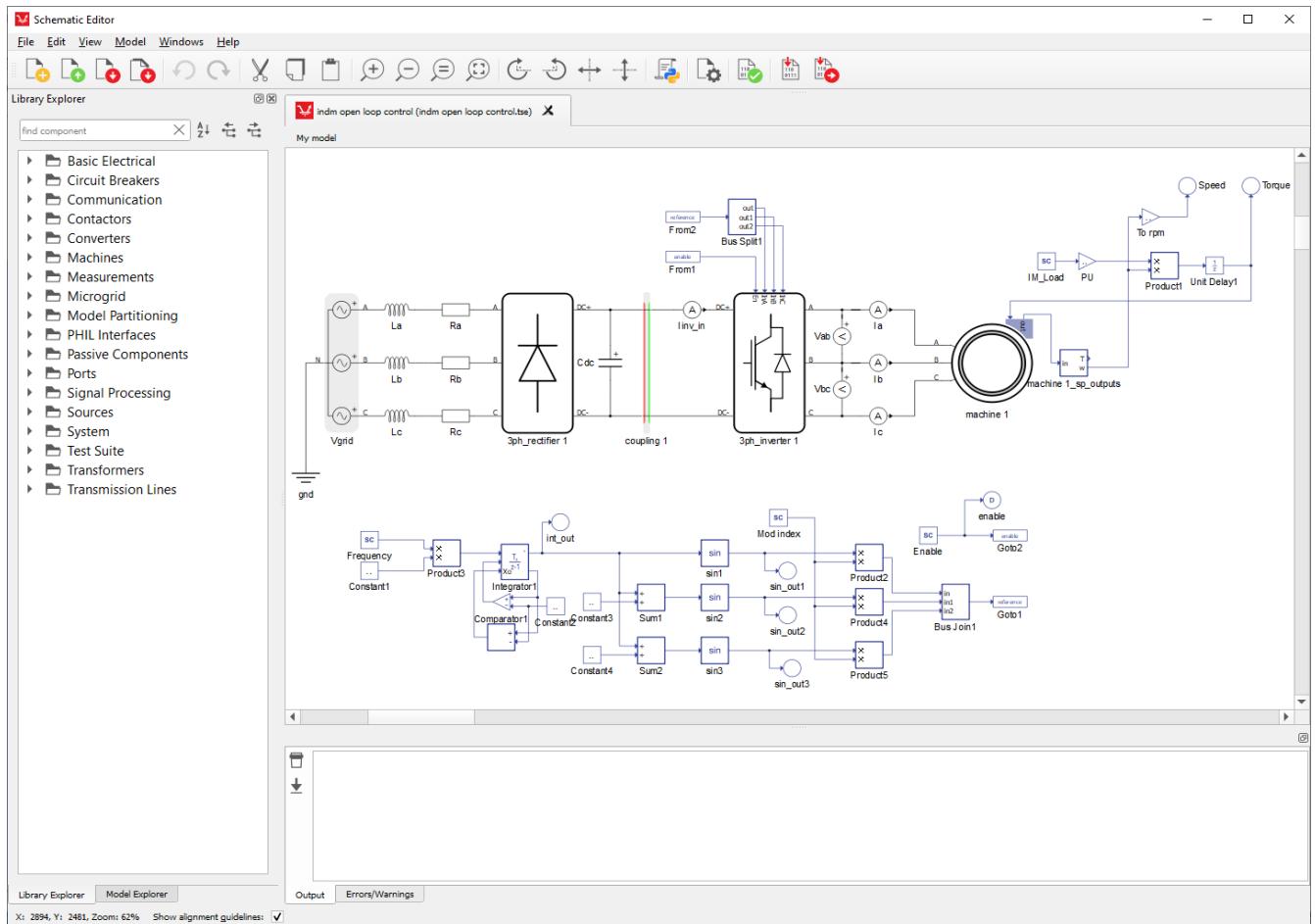
- Εκκίνηση προσομοιώσεων HIL για να δείτε πώς λειτουργεί το κύκλωμα.
- Παρακολούθηση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.
- Ανάλυση αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Πλεονεκτήματα του Schematic Editor HIL:

- Ευκολία χρήσης: Το γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI) καθιστά εύκολη τη δημιουργία και τροποποίηση κυκλωμάτων.
- Ευελιξία: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός ευρέος φάσματος κυκλωμάτων.
- Ακρίβεια: Παρέχει ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς του κυκλώματος.
- Εξοικονόμηση χρόνου: Βοηθά στην εξοικονόμηση χρόνου και προσπάθειας κατά την ανάπτυξη και δοκιμή κυκλωμάτων.

Εφαρμογές του Schematic Editor HIL:

- Εκπαίδευση: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς για να διδάξει στους μαθητές πώς λειτουργούν τα κυκλώματα.
- Έρευνα: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ερευνητικούς σκοπούς για να αναπτύξει και να δοκιμάσει νέα κυκλώματα.
- Βιομηχανία: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές για να αναπτύξει και να δοκιμάσει κυκλώματα για προϊόντα.



Εικόνα 45. Περιβάλλον SCADA

## 2. HIL SCADA :

Το HIL SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) είναι ένα λογισμικό γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (GUI) που επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν και να παρακολουθούν προσομοιώσεις Hardware-in-the-Loop (HIL). Παρέχει μια εύχρηστη διεπαφή για:

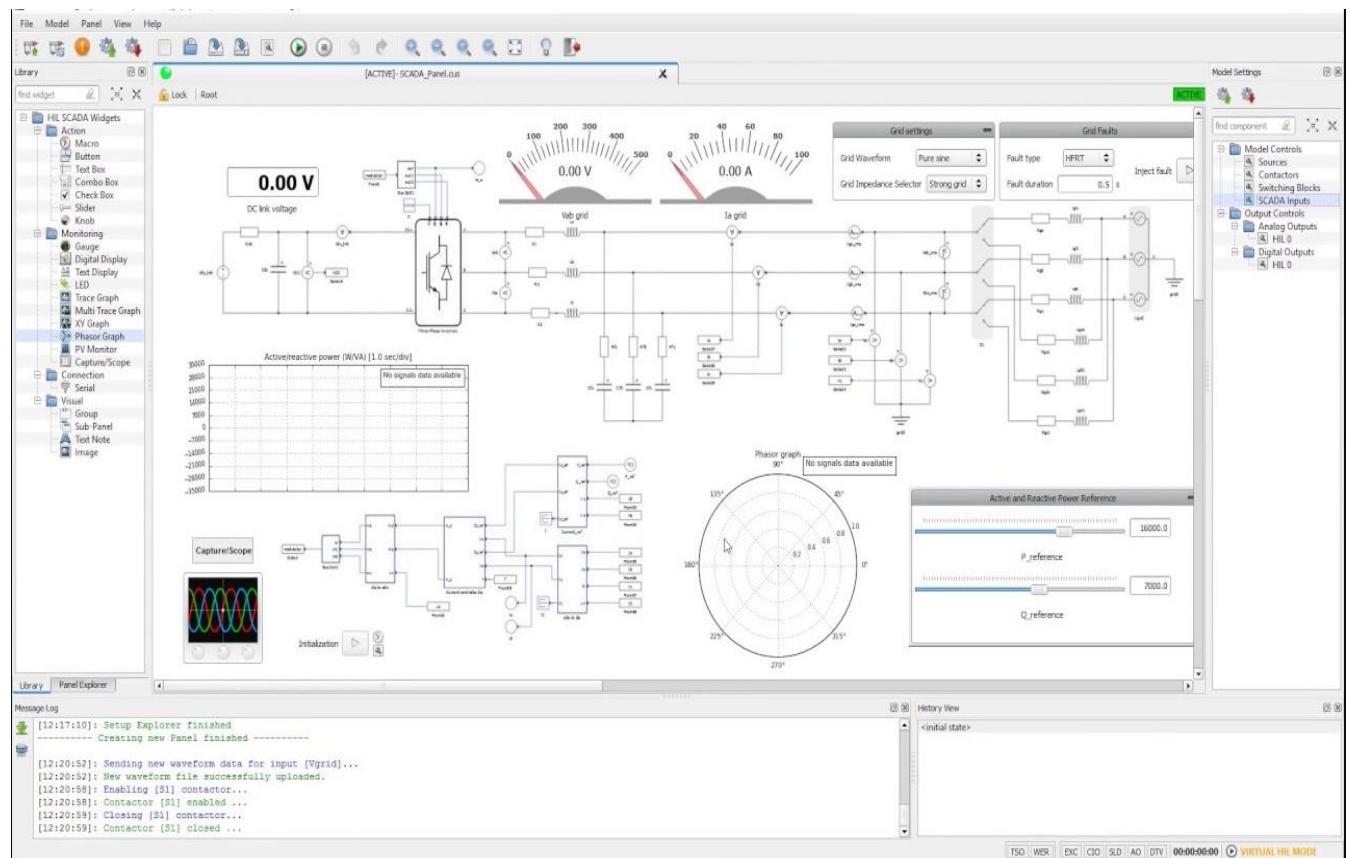
- Ελεγχος:
  - Ρύθμιση παραμέτρων του κυκλώματος.
  - Ενεργοποίηση και απενεργοποίηση εξαρτημάτων.
  - Εισαγωγή σημάτων ελέγχου.
- Παρακολούθηση:
  - Εμφάνιση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.
  - Οπτικοποίηση της συμπεριφοράς του κυκλώματος.
  - Καταγραφή δεδομένων προσομοίωσης.

## Πλεονεκτήματα του HIL SCADA:

- Ευκολία χρήσης: Το GUI καθιστά εύκολο τον έλεγχο και την παρακολούθηση προσομοιώσεων HIL.
- Διαδραστικότητα: Επιτρέπει στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με το κύκλωμα σε πραγματικό χρόνο.
- Ευελιξία: Μπορεί να προσαρμοστεί για να καλύψει τις ανάγκες διαφορετικών εφαρμογών.
- Ισχυρές δυνατότητες: Παρέχει πλήθος λειτουργιών για έλεγχο, παρακολούθηση και ανάλυση.

## Εφαρμογές του HIL SCADA:

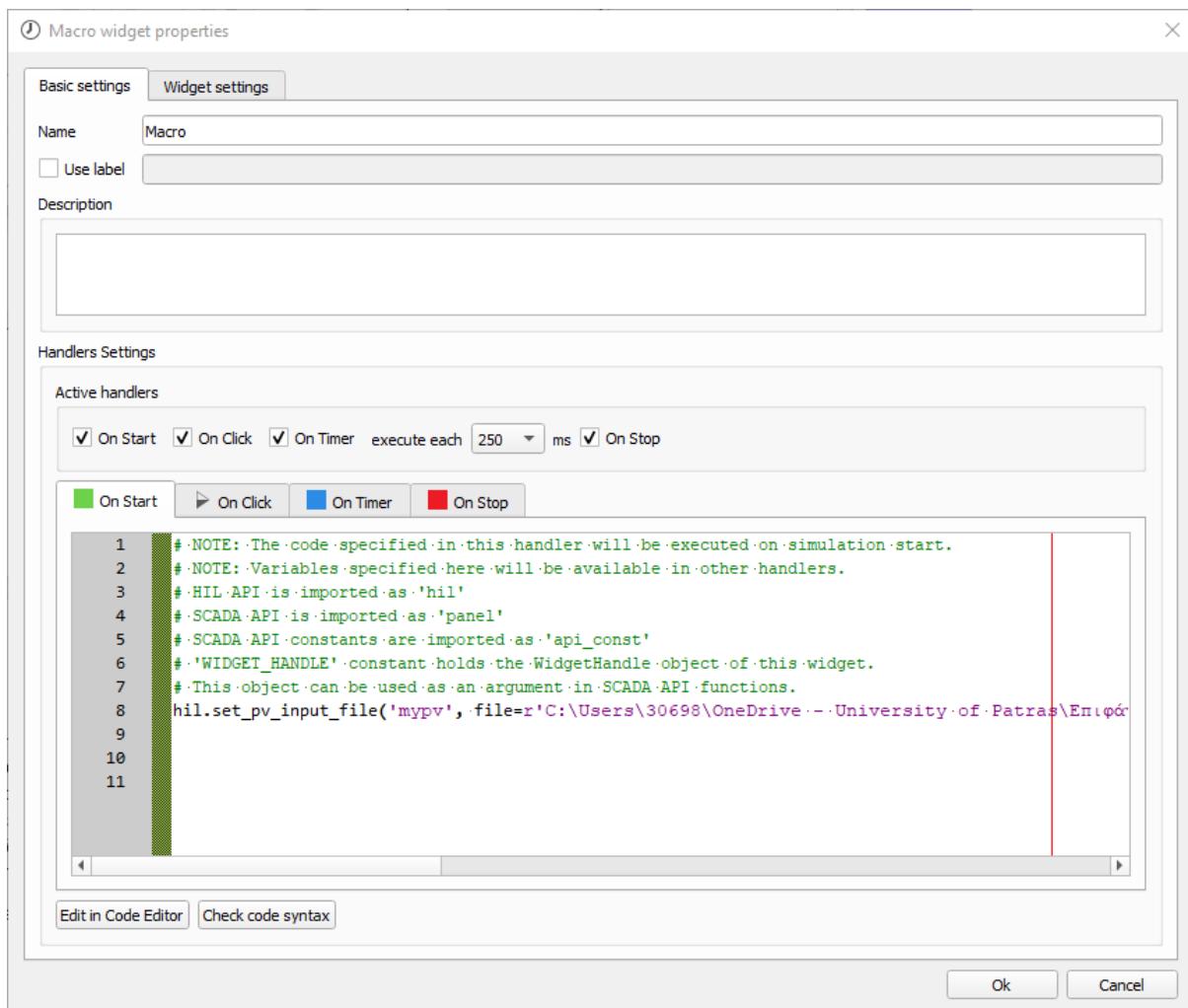
- Εκπαίδευση: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκπαιδευτικούς σκοπούς για να διδάξει στους μαθητές πώς να ελέγχουν και να παρακολουθούν κυκλώματα.
- Έρευνα: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ερευνητικούς σκοπούς για να αναπτύξει και να δοκιμάσει νέες μεθόδους ελέγχου και παρακολούθησης.
- Βιομηχανία: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές για τον έλεγχο και την παρακολούθηση κυκλωμάτων σε πραγματικά συστήματα.



Εικόνα 46. Περιβάλλον και Gadgets Scada

Πέρα από την εύχρηστη διεπαφή και τα βασικά χαρακτηριστικά ελέγχου και παρακολούθησης, το HIL SCADA προσφέρει μια σειρά από εξειδικευμένες δυνατότητες που ενισχύουν την ευελιξία και την αποτελεσματικότητά του. Στην εικόνα βλέπουμε το περιβάλλον του, όπου παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο οι μετρήσεις που μας ενδιαφέρουν. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια σειρά από gadgets ανάλογα τι θέλουμε να αναλύσουμε, θα δούμε στην συνέχεια ορισμένα παραδείγματα ώστε να γίνει πιο κατανοητό.

**Macros:** Αυτοματοποιούν επαναλαμβανόμενες εργασίες με προγραμματιζόμενα σενάρια, εξοικονομώντας χρόνο και προσπάθεια. Εκτελούν σύνθετες εργασίες με ένα κλικ, βελτιώνοντας την συνέπεια και την ακρίβεια.



Εικόνα 47. Macro Widget

Οπως βλέπουμε στην εικόνα, υπάρχει η δυνατότητα εκτέλεσης συγκεκριμένων εντολών για το σύστημα μας σε πραγματικό χρόνο, είτε με την εκκίνηση του μοντέλου, είτε μετά το κλικ, είτε μετα από συγκεκριμένο χρόνο, καθώς και η διακοπή τους.

**PV Monitor:** Παρακολουθούμε και αναλύουμε μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, εντοπίζοντας και αντιμετωπίζοντας προβλήματα κατά την προσομοίωση. Βελτιστοποιούμε έτσι την απόδοση του κυκλώματος και αξιολογούμε την συμπεριφορά του συστήματος υπό διάφορες συνθήκες.

**Probes:** Τοποθετούμε εικονικούς αισθητήρες και μετρητικά σε οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος για λήψη μετρήσεων, λαμβάνοντας λεπτομερή ανάλυση και πρόσβαση σε σημεία που δεν είναι μετρήσιμα στο πραγματικό σύστημα.

**Trace Graphs:** Οπτικοποιούμε την χρονική εξέλιξη μετρήσεων, εντοπίζοντας τάσεις και ρεύματα, συγκρίνοντας την συμπεριφορά διαφορετικών μετρήσεων και αξιολογώντας την σταθερότητα και την απόκριση του συστήματος.

**Gauge Widgets:** Εμφανίζουν μετρήσεις σε εύχρηστα γραφικά στοιχεία μετρητών, παρακολουθώντας γρήγορα και εύκολα σημαντικές μετρήσεις, οπτικοποιούν την συμπεριφορά του συστήματος σε πραγματικό χρόνο και προσαρμόζουν την εμφάνιση και την λειτουργία των μετρητών.

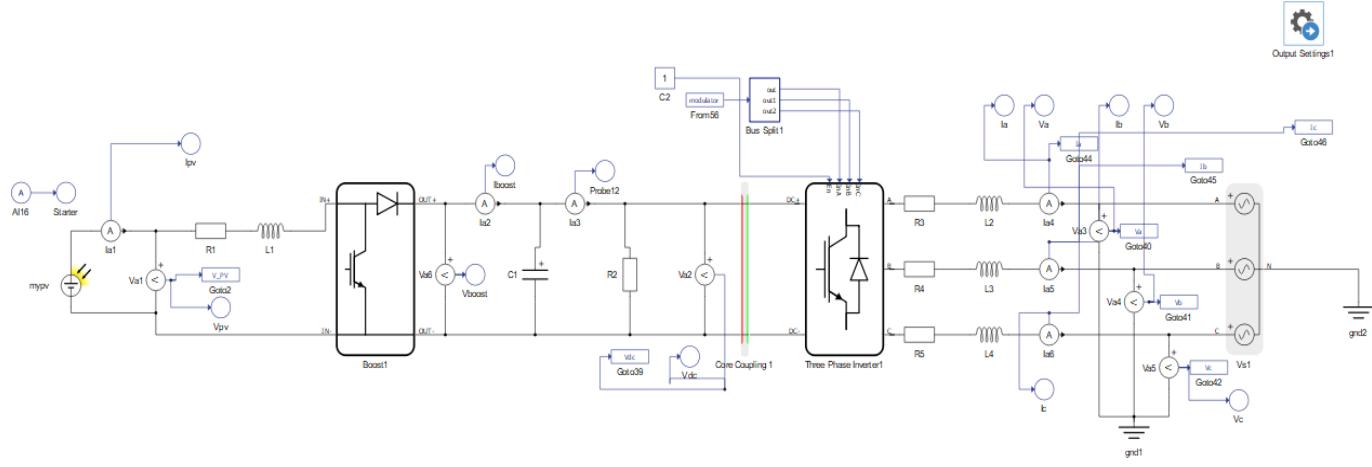
Στο δικό μας πείραμα το μοντέλο του Typhoon Hardware In the Loop που χρησιμοποιήσαμε είναι το HIL402 το οποίο είναι ένας ισχυρός και ευέλικτος προσομοιωτής Hardware-in-the-Loop (HIL) που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και τη δοκιμή συστημάτων ελέγχου ισχύος. Προσφέρει μια ρεαλιστική και αλληλεπιδραστική πλατφόρμα για τη δοκιμή συστημάτων ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, εξαλείφοντας την ανάγκη για δαπανηρά και χρονοβόρα πρωτότυπα.

#### Χαρακτηριστικά:

- 4 πυρήνες επεξεργαστή Intel Xeon
- 16 GB RAM
- 256 GB SSD
- 2 θύρες Gigabit Ethernet
- 4 θύρες USB 3.0
- 1 θύρα HDMI
- 1 θύρα VGA
- Λειτουργικό σύστημα Windows 10 IoT Enterprise

### 5.3 Κυκλωματικό Μοντέλο Συστήματος στο Typhoon Hardware In the Loop:

Η λογική με την οποία σχεδιάστηκε το μοντέλο, βασίζεται στην σύνδεση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης, τον αντιστροφέα, και τελικά το κυρίως δίκτυο. Όπως έχει αναφερθεί ήδη, ο έλεγχος του συστήματος αυτού αποτελεί βασική πτυχή του σχεδιασμού, αφού η τάση στην οποία ανυψώνεται η έξοδος του φωτοβολταϊκού και το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στο δίκτυο μέσω του Inventer αποτελούν βασικό στόχο.



*Εικόνα 48. Schematic Editor του HIL*

Η συνολική υλοποίηση του συστήματος διασπαρμένης παραγωγής, το οποίο σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας το Schematic Editor του λογισμικού Typhoon HIL, παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα. Η ροή ενέργειας στο σύστημα προορίζεται να είναι από το φωτοβολταϊκό σύστημα προς το κύριο δίκτυο. Παρατηρούμε λοιπόν αρχικά την φωτοβολταϊκής μας συστοιχία , στην οποία προσομοιώνεται το ειδικό σενάριο της μερικής σκίασης , να βρίσκεται σε σειρά με τον Μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης. Αξίζει να σχολιάσουμε πως ο συγκεκριμένος μετατροπέας , δεν δέχεται παλμοδότηση από κάποιο στοιχείο στο Schematic Editor αλλά ελέγχεται από Digital Inputs. Αυτό σημαίνει πως ελέγχεται από τον μικροελεγκτή C2000 της Texas Instruments τον οποίο συνδέουμε στο HIL , και ο οποίος είναι αρμόδιος για την κατάλληλη ανύψωση της τάσης στην είσοδο του Inventer.

Στην συνέχεια βρίσκεται ο DC Δίαυλος και όπως παρατηρούμε, υπάρχει ένα κυκλωματικό στοιχείο που ονομάζεται Core Coupling. Το Core Coupling στο Schematic Editor του Hardware In the Loop (HIL) είναι μια λειτουργία που επιτρέπει στους χρήστες να συνδέσουν δύο ή περισσότερα cores (πυρήνες) επεξεργασίας σε ένα ενιαίο σύστημα. Αυτό μπορεί να χρησιμεύσει για:

## 1. Βελτίωση της απόδοσης:

- Η σύνδεση πολλαπλών cores μπορεί να κατανείμει τον υπολογιστικό φόρτο, βελτιώνοντας την ταχύτητα και την απόδοση της προσομοίωσης.
  - Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για πολύπλοκα κυκλώματα που απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ.

## 2. Αύξηση της χωρητικότητας:

- Η σύνδεση πολλαπλών cores μπορεί να αυξήσει τον αριθμό των μεταβλητών και των σημάτων που μπορούν να χειριστούν οι προσομοιώσεις.

- Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώσουν μεγαλύτερα και πιο πολύπλοκα κυκλώματα.

### 3. Υλοποίηση σύνθετων λειτουργιών:

- Η σύνδεση πολλαπλών cores μπορεί να υλοποιήσει σύνθετες λειτουργίες που απαιτούν παράλληλη επεξεργασία.
- Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης, επεξεργασία εικόνων και άλλες επεξεργασίες υψηλής απόδοσης.

Στην δεξιά πλευρά του συστήματος, βλέπουμε την τοποθέτηση του Αντιστροφέα, ο οποίος παλμοδοτείται από Internal Modulator και όχι μικροελεγκτή όπως ο Boost, τον έλεγχο του οποίου θα αναλύσουμε σε επόμενο στάδιο, ενώ ασφαλώς δεν θα μπορούσαν να απουσιάζουν η παρουσία του RL Φίλτρου και η προσομοίωση του κυρίως δικτύου. Ο διαφορετικός τρόπος ελέγχου μεταξύ των δύο μετατροπέων έχει στόχο να αναδείξει τις δυνατότητες που προσφέρει στον χρήστη το Υλικολογισμικό αυτό σύστημα της Typhoon, και την αρμονική σύνδεση των δύο αυτών μοντέλων. Παράλληλα η ύπαρξη 2 διαφορετικών τρόπων ελέγχου λειτούργησε ως εκπαιδευτικό εργαλείο, συμβάλλοντας στην βαθύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων του λογισμικού και των διαφορών στις μεθόδους ελέγχου καθώς προσέφερε μια πολύτιμη ευκαιρία για συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης και της συμπεριφοράς τους, φέρνοντας στο φως τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μεθόδου. Παρατηρούμε επίσης πως, σε όλα τα μέρη του συστήματος παρουσιάζεται πληθώρα από Probes, τα οποία μας δίνουν την δυνατότητα να παρακολουθήσουμε και να αναλύσουμε τα επιθυμητά σήματα, τα οποία στην δική μας περίπτωση είναι κυρίως ρεύματα και τάσεις.

Τέλος με την χρήση του Block Output Settings, επιτυγχάνεται η σύνδεση του μοντέλου συστήματος με το πραγματικό χρόνου Hardware In the Loop.

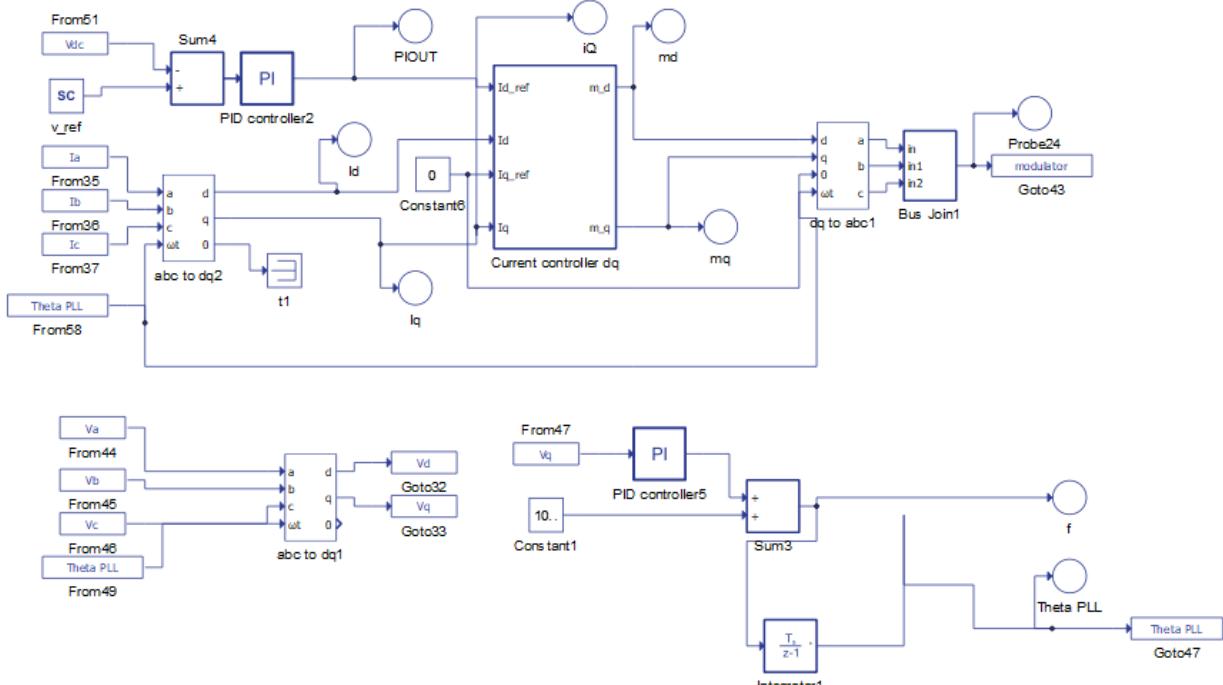


Output Settings

Πιο συγκεκριμένα μας δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποιώντας την λειτουργία αυτή, να συνδέσουμε την συσκευή HIL με τον μικροελεγκτή και στην συνέχεια το Laptop μας και μέσω του Code Composer Studio, να παρακολουθήσουμε τις μεταβολές και τις τιμές που λαμβάνουν διάφοροι παράμετροι. Εμείς επιλέξαμε να αναλύσουμε με τον τρόπο αυτό τις τιμές της τάσεως στον DC Δίαυλο όπως και την τάση και το ρεύμα στην Φωτοβολταϊκή Συστοιχία. Συνεπώς κατά την σύνδεση του Typhoon HIL με τον μικροελεγκτή, χρησιμοποιούμε 1 pin για σύνδεση με Digital Input που στόχο έχει την παλμοδότηση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και 3 pin ως Analog Output τα οποία χρησιμεύουν στην μέτρηση των παραπάνω σημάτων.

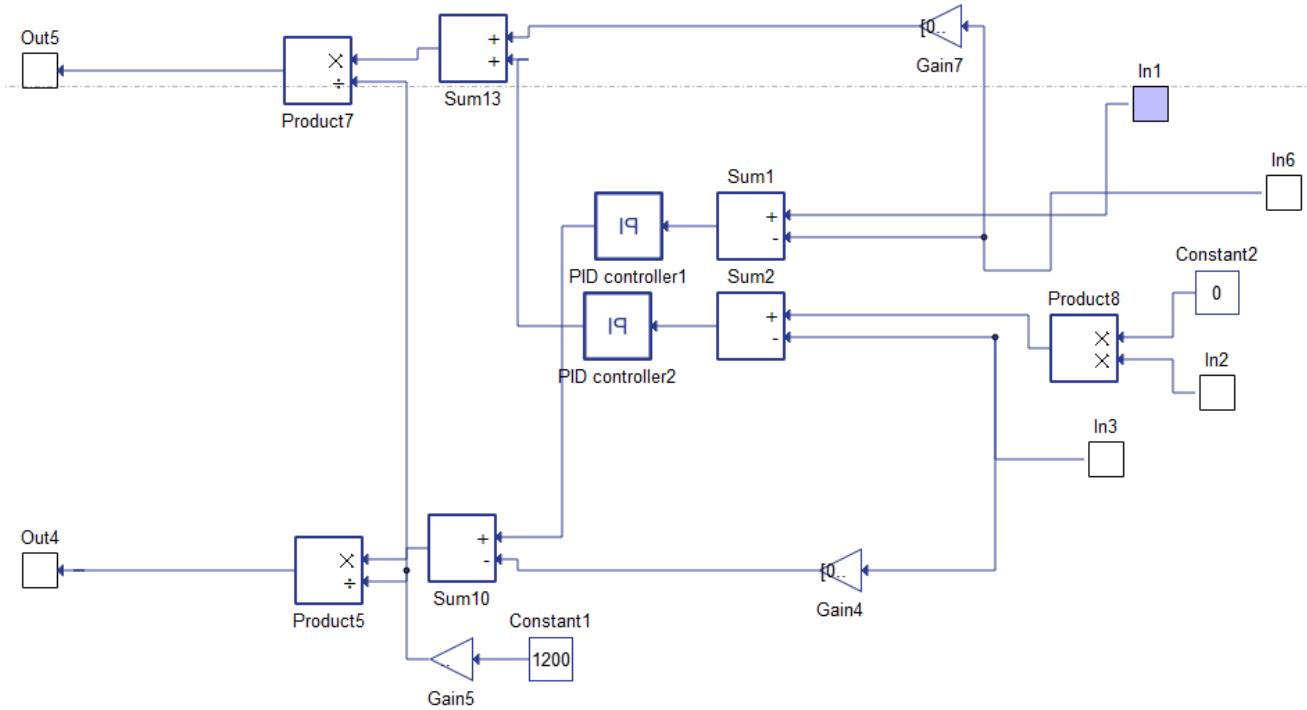
## 5.4 Σχήματα Ελέγχου Μετατροπέων Ισχύος Συστήματος:

Αναλύοντας παραπάνω το κυκλωματικό μοντέλο του συστήματος το οποίο δημιουργήσαμε , αναφερθήκαμε στον διαφορετικό τρόπο με τον οποίο επιλέξαμε να υλοποιηθεί ο έλεγχος και η παλμοδότηση των δύο μετατροπέων. Ο έλεγχος του μετατροπέα αντιστροφής τάσης γίνεται με την κυκλωματική υλοποίηση στο Schematic Editor και ακολουθεί την πορεία που ακολουθήσαμε στο κεφάλαιο 3.



Εικόνα 49.Σχεδιασμός Ελέγχου Inventer στο Schematic Editor

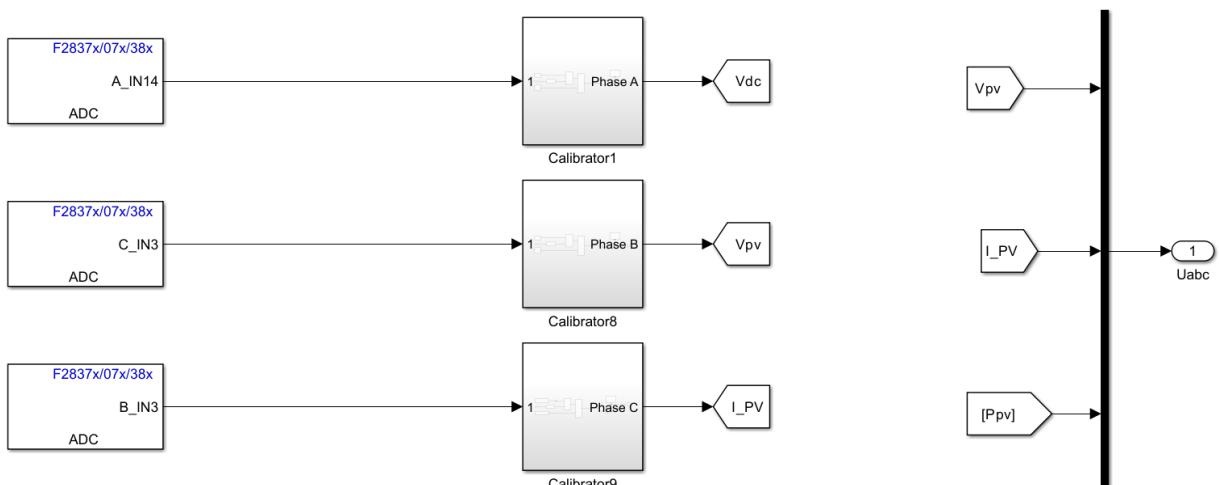
Πιο συγκεκριμένα στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε πως υλοποιούνται οι έλεγχοι στην πλευρά του φορτίου. Στο κάτω μέρος της εικόνας βρίσκεται ο έλεγχος για την λειτουργία του βρόγχου κλειδώματος φάσης (PLL) από όπου παράγεται η επιθυμητή γωνία Theta PLL , η οποία απαιτείται για την ολοκλήρωση στην έξοδο του ελεγκτή και την είσοδο στον μετασχηματισμό Park. Επίσης Στην πάνω αριστερά πλευρά της εικόνας υλοποιείται ο εξωτερικός βρόγχος ελέγχου τάσης. Χρησιμοποιούμε ένα στοιχείο SCADA INPUT για τον ορισμό της τάσης αναφοράς , ώστε να μας δοθεί η δυνατότητα σε πραγματικό χρόνο να πράξουμε μεταβολές μέσω του HIL SCADA περιβάλλοντος και να παρατηρήσουμε την ευστάθεια του συστήματος μας και τον χρόνο απόκρισης του συστήματος ελέγχου που έχουμε κατασκευάσει. Ο εσωτερικός βρόγχος ελέγχου ρεύματος υλοποιείται μέσα στο Block που ονομάζεται Current Controller και παρουσιάζεται παρακάτω.



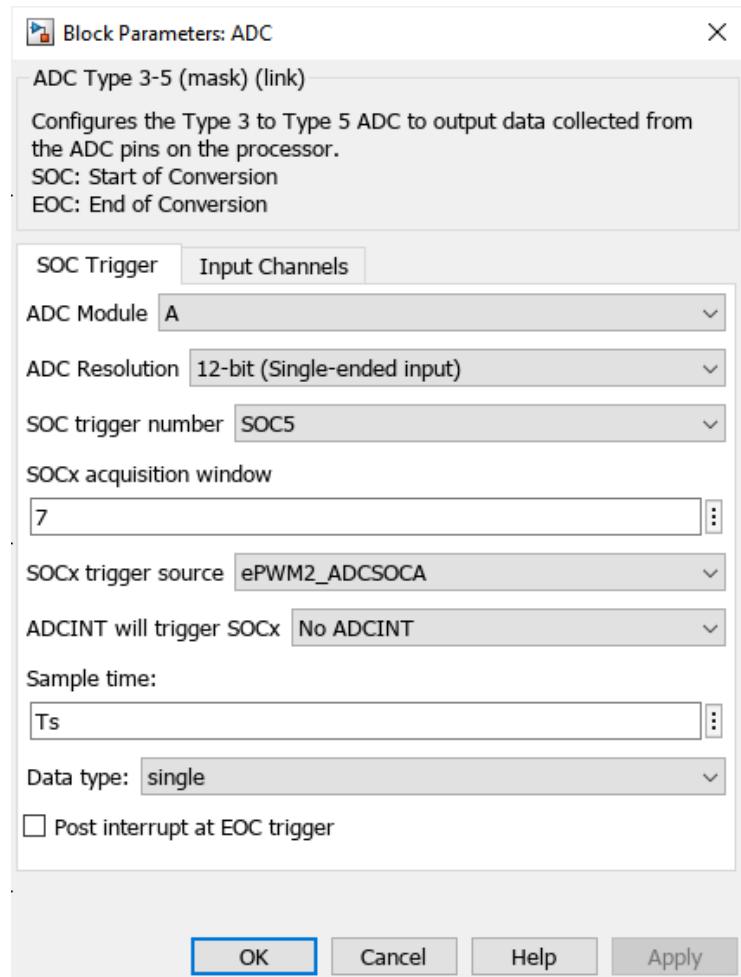
Εικόνα 50. Εσωτερικός Έλεγχος d,q Συνιστωσών Ρεύματος

Τα μαθηματικά εργαλεία και η λογική πίσω από τον σχεδιασμό των ελεγκτών αυτών, περιεγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, γι' αυτό και θα παραληφθεί η επεξήγηση τους στο σημείο αυτό.

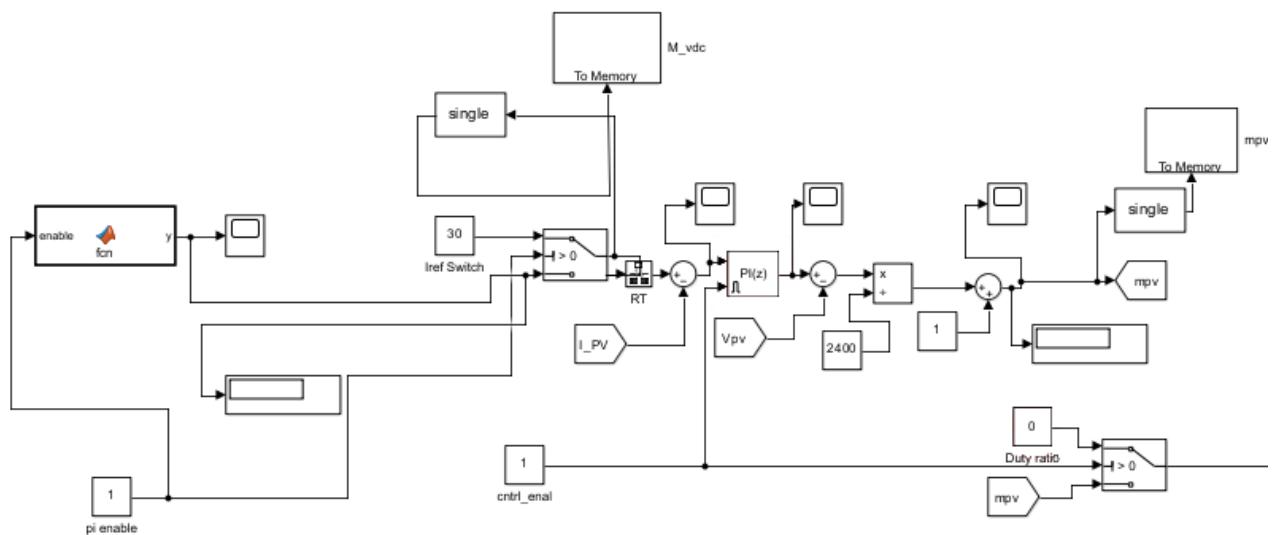
Αντιθέτως ο έλεγχος του μετατροπέα ανύψωσης τάσης γίνεται δημιουργώντας ένα Simulink αρχείο στο οποίο υλοποιούμε τις κατάλληλες συνδέσεις, το «φορτώνουμε» στον μικροελεγκτή και η παλμοδότηση γίνεται μέσω Analog Outputs από το HIL τις τιμές για το ρεύμα του φωτοβολταϊκού, την τάση του, και την τάση του DC Διαύλου, χρησιμοποιούμε το FeedBack αυτό για την νέα μεταβολή των παραμέτρων ελέγχου και την οδήγηση του συστήματος στην επιθυμητή κατάσταση. Παραθέτουμε εικόνες από το σύστημα ελέγχου που δημιουργήθηκε στο MATLAB Simulink.



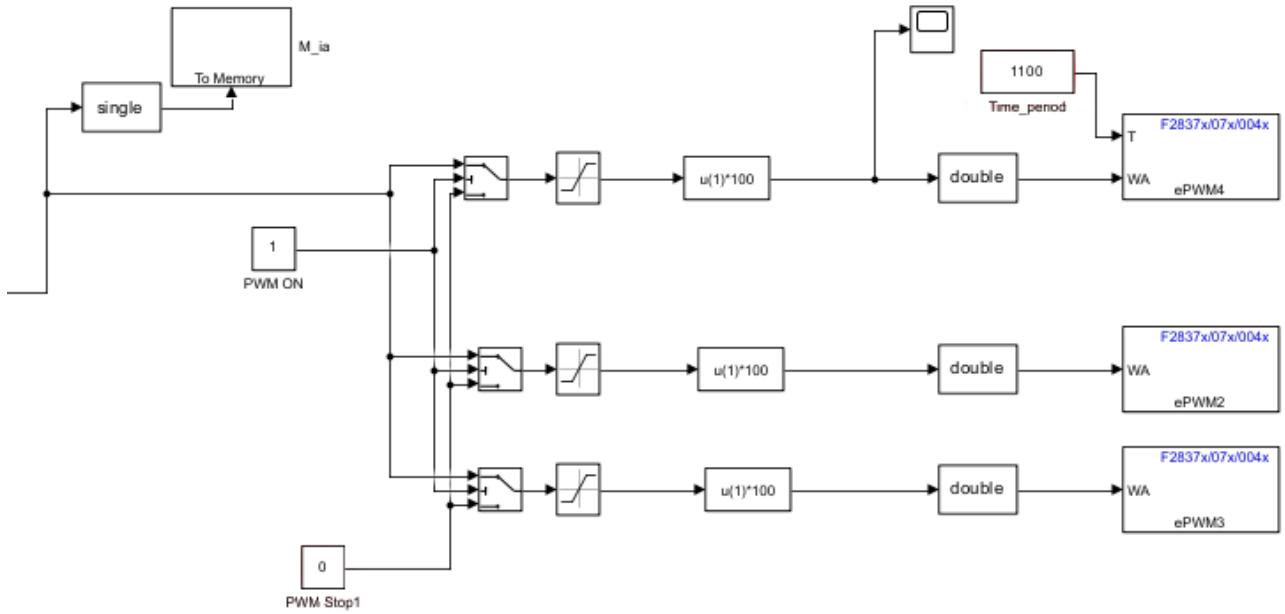
Εικόνα 51. Είσοδοι από τον μικροελεγκτή στο Simulink



Εικόνα 52. Block Parameters του ADC Block



Εικόνα 53. Έλεγχος του Inverter στο Simulink που φορτώνεται στον μικροελεκτή



Εικόνα 54. Έλεγχος του Inverter στο Simulink που φορτώνεται στον μικροελεκτή

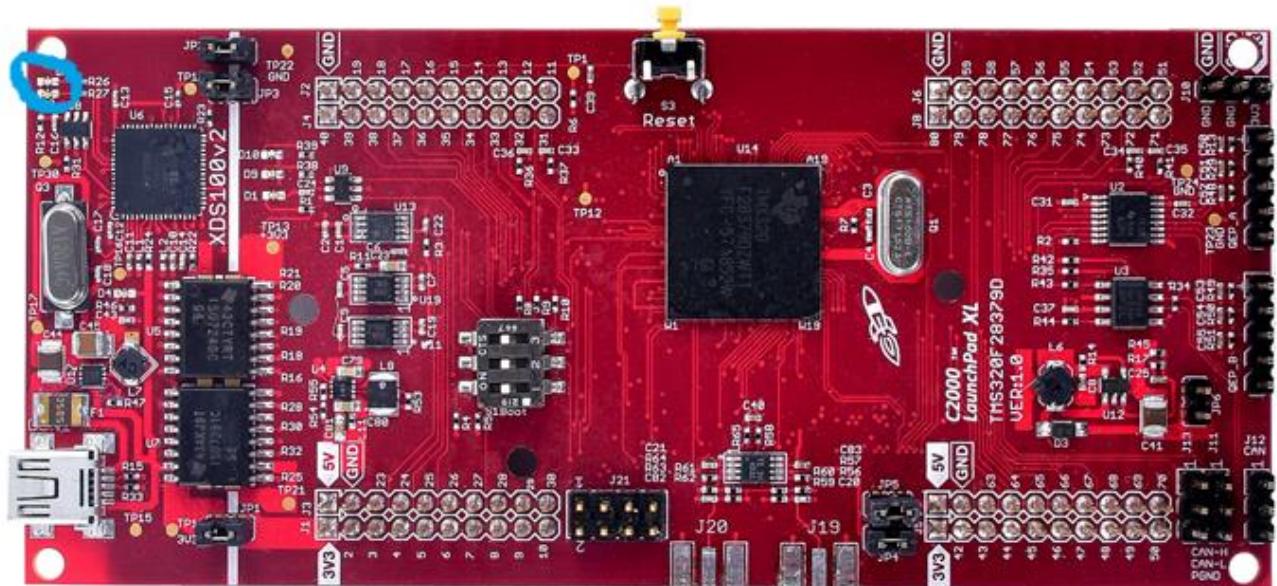
Στην πρώτη εικόνα βλέπουμε τα blocks που εισάγουν τις μετρήσεις του ρεύματος και της τάσης του φωτοβολταϊκού , καθώς και την τάση του DC Διαύλου. Όπως βλέπουμε στην δεύτερη , εκεί ορίζουμε την σύνδεση με τον μικροελεγκτή, δηλαδή από ποιο pin τις πλακέτας θα λάβουμε το αντίστοιχο μέγεθος καθώς και άλλα χαρακτηριστικά , όπως ο χρόνος δειγματοληψίας. Στην τρίτη και την τέταρτη παρουσιάζουμε τον έλεγχο , πιο συγκεκριμένα , ξεκινάμε με το MATLAB FUNCTION BLOCK στο οποίο κάθε φορά τοποθετούμε τον αλγόριθμο με τον οποίο θέλουμε να ελέγχουμε τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης , είτε αυτός είναι Perturb and Observe , είτε Particle Swarm Optimization .Στην συνέχεια υλοποιείται ο έλεγχος που αναλύσαμε στο κεφάλαιο 4 για τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης , δηλαδή ο εσωτερικός βρόγχος ελέγχου ρεύματος. Αν παρατηρήσουμε προσεκτικά , θα διακρίνουμε την παρουσία ορισμένων block ελέγχου που στόχο έχουν την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση λειτουργιών όπως PI ελεγκτές , διακόπτες επιλογής Duty Cycle (αν θα λαμβάνει μία τιμή που ορίζουμε αυθαίρετα ή την έξοδο από τον έλεγχο) και άλλα στοιχεία όπως το Rate Transmition Block. Τα Rate Transition Blocks (RTB) στο Simulink χρησιμεύουν για τη διαχείριση ρυθμών δειγματοληψίας σε διαφορετικά τμήματα ενός μοντέλου. Ουσιαστικά, λειτουργούν ως γέφυρες μεταξύ υποσυστημάτων που τρέχουν με διαφορετικές συχνότητες, διασφαλίζουν ότι τα δεδομένα ανταλλάσσονται με συγχρονισμένο τρόπο, αποφεύγοντας ασυμβατότητες ρυθμού, χειρίζονται τυχόν απώλεια δεδομένων που μπορεί να προκύψουν και επιτρέπουν εύκολη τροποποίηση του ρυθμού δειγματοληψίας σε οποιοδήποτε υποσύστημα, χωρίς να επηρεάζεται το υπόλοιπο μοντέλο. Προσφέρουν λοιπόν απλότητα, ευελιξία , ακρίβεια και σταθερότητα. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήσαμε RTB για να διασφαλίσουμε συμβατότητα μεταξύ του ρυθμού δειγματοληψίας του αλγορίθμου ελέγχου MPPT και του ρυθμού δειγματοληψίας του συστήματος. Έτσι με την εφαρμογή όλων των παραπάνω καταφέρνουμε κατά την διάρκεια που πραγματοποιείται το πείραμα μέσω του Code Composer Studio να αλλάζουμε τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος , και να παρατηρούμε τις διάφορες μεταβολές καθώς και να επιβεβαιώνουμε την ορθή λειτουργία του ελέγχου μας. Τέλος στην τελευταία εικόνα , βλέπουμε τα blocks με τα οποία οι παλμοί φορτώνονται ως ψηφιακοί έξοδοι και εισέρχονται μέσω του C2000 στο HIL 402 που χρησιμοποιήσαμε για την παλμοδότηση

του Boost. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται κάνοντας Build του μοντέλου αυτού στον μικροελεγκτή με την χρήση του TI Delfino F28379D LaunchPad.

## 5.5 Ο μικροελεγκτής C2000 Launchpad XL tms320f28379d:

### 5.5.1 Εισαγωγή:

Το C2000 Launchpad XL TMS320F28379D αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο ανάπτυξης για ψηφιακά συστήματα ελέγχου. Βασίζεται στον μικροελεγκτή TMS320F28379D της Texas Instruments, ο οποίος προσφέρει υψηλές επιδόσεις, ευέλικτη διαμόρφωση και πλήθος περιφερειακών.



Εικόνα 55. Ο μικροελεγκτής C2000 LaunchPad

### 5.5.2 Χαρακτηριστικά:

Επεξεργαστής:

- Τύπος: TMS320F28379D
- Αρχιτεκτονική: C28x
- Ταχύτητα: 32-bit, 100 MHz
- Ανάλυση: Ο επεξεργαστής προσφέρει υψηλή ταχύτητα και ισχύ, απαραίτητη για την υλοποίηση αλγορίθμων MPPT και τον έλεγχο του συστήματος φωτοβολταϊκών. Η 32-bit αρχιτεκτονική και η υψηλή συχνότητα λειτουργίας εξασφαλίζουν γρήγορη επεξεργασία δεδομένων και άψογη λειτουργία.

Μνήμη:

- Flash: 256 KB
- RAM: 128 KB

- Ανάλυση: Η διαθέσιμη μνήμη επαρκεί για την αποθήκευση του κώδικα, των δεδομένων και των μετρήσεων του συστήματος. Η μνήμη Flash διατηρεί τον κώδικα ακόμα και μετά την αποσύνδεση του τροφοδοτικού, ενώ η RAM προσφέρει γρήγορη πρόσβαση στα απαραίτητα

Περιφερειακά:

- ADC: 12-bit, 16 κανάλια
- DAC: 12-bit, 2 κανάλια
- PWM: 6 outputs
- SPI: 2 modules
- I2C: 2 modules
- UART: 2 modules
- USB: 2.0
- Ethernet: 10/100 Mbps
- RTC: Real-time clock
- Ανάλυση: Η πληθώρα περιφερειακών επιτρέπει:
  - Σύνδεση με πλήθος αισθητήρων και ενεργοποιητών.
  - Επικοινωνία με υπολογιστές και άλλα συστήματα.
  - Ψηφιακό έλεγχο του boost converter.
  - Αποθήκευση δεδομένων σε μνήμη.
  - Δικτύωση και απομακρυσμένη πρόσβαση.

### 5.5.3 Εφαρμογές:

- Βιομηχανικός έλεγχος:
  - Συστήματα κίνησης: Έλεγχος κινητήρων, servo drives, ρυθμιστές ταχύτητας.
  - Αυτοματισμός: Βιομηχανικές διαδικασίες, ρομποτικές γραμμές παραγωγής, συστήματα συναρμολόγησης.
  - Ρομποτική: Έλεγχος ρομπότ, βραχίονες, manipulators.
- Ενεργειακά συστήματα:
  - Φωτοβολταϊκά: Έλεγχος MPPT, ρύθμιση τάσης, monitoring.
  - Αιολικά: Έλεγχος στροβίλων, ρύθμιση ισχύος, yaw control.
  - Έξυπνα δίκτυα: Διαχείριση ενέργειας, έλεγχος ισχύος, monitoring.
- Επεξεργασία σήματος:
  - Ψηφιακά φίλτρα: Φιλτράρισμα θορύβου, ανάλυση σήματος, βελτίωση ποιότητας σήματος.
  - FFT: Ανάλυση συχνοτήτων, εύρεση αρμονικών, ταυτοποίηση συχνοτήτων.
  - Ανάλυση φάσματος: Μελέτη φάσματος σήματος, εύρεση χαρακτηριστικών, ταυτοποίηση συστατικών.
- Ενσωματωμένα συστήματα:
  - Ιατρικές συσκευές: Απεικονιστικές συσκευές, monitors ασθενών, ιατρικά όργανα.
  - Τηλεπικοινωνίες: Συστήματα δικτύωσης, routers, switches, base stations.
  - Ηλεκτρονικά οχήματα: Έλεγχος κινητήρα, μπαταρίας, συστήματα ασφαλείας.

### **5.5.4 Πλεονεκτήματα:**

- Υψηλές επιδόσεις: Ο TMS320F28379D προσφέρει υψηλή ταχύτητα επεξεργασίας και υποστήριξη για floating-point operations.
- Ευέλικτη διαμόρφωση: Το Launchpad XL περιλαμβάνει πλήθος jumpers και headers για εύκολη σύνδεση με αισθητήρες, ενεργοποιητές και άλλα περιφερειακά.
- Πλήθος περιφερειακών: Το Launchpad XL διαθέτει πλήθος ενσωματωμένων περιφερειακών για ψηφιακά συστήματα ελέγχου.
- Δυνατότητα δικτύωσης: Το Launchpad XL υποστηρίζει Ethernet και USB 2.0 για επικοινωνία με άλλα συστήματα.
- Εκπαιδευτικό περιβάλλον: Το Launchpad XL συνοδεύεται από πλήθος εκπαιδευτικών πόρων, tutorials και βιβλιοθήκες λογισμικού.

### **5.5.5 Λεπτομερής χρήση του C2000 Launchpad XL στο πείραμα φωτοβολταϊκών :**

Στο πλαίσιο του πειράματος, αξιοποιήθηκε ο C2000 Launchpad XL TMS320F28379D για τον έλεγχο και την παρακολούθηση ενός συστήματος φωτοβολταϊκών (PV) συνδεδεμένου στο δίκτυο.

#### **Παλμοδότηση Boost:**

- Ο μικροελεγκτής υλοποίησε αλγορίθμους MPPT (Perturb & Observe ή Particle Swarm Optimization) για μέγιστη εξαγωγή ισχύος από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες.
- Το σήμα PWM, με βάση τον αλγόριθμο, ρύθμιζε τον διακόπτη ισχύος στο boost converter, διασφαλίζοντας σταθερή τάση DC στο DC link.
- Η συχνότητα PWM και η ρύθμιση του βηματισμού (για P&O) ρυθμίστηκαν κατάλληλα για βέλτιστη λειτουργία.

#### **Επικοινωνία:**

- Το Launchpad λειτούργησε ως κόμβος επικοινωνίας, λαμβάνοντας μετρήσεις από αισθητήρες (π.χ. ρεύμα, τάση) και στέλνοντας εντολές στο HIL
- Η θύρα USB χρησίμευε για σύνδεση με υπολογιστή, λήψη δεδομένων, γραφική απεικόνιση και αποθήκευση για μετέπειτα ανάλυση.
- Χρησιμοποιήσαμε τα pins για την σύνδεση μεταξύ του μικροελεγκτή και του HIL, ανάλογα αν το σήμα που θέμα ήταν Digital ή Analog και Input ή Output.

**Επεξεργασία δεδομένων:** Ο μικροελεγκτής πραγματοποίησε υπολογισμούς σε πραγματικό χρόνο για την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος PV.

- Μέτρηση ισχύος, τάσης, ρεύματος και άλλων μεγεθών.
- Εφαρμογή αλγορίθμων MPPT για μέγιστη εξαγωγή ισχύος από τα PV panels.
- Αποθήκευση δεδομένων σε μνήμη για μετέπειτα ανάλυση.

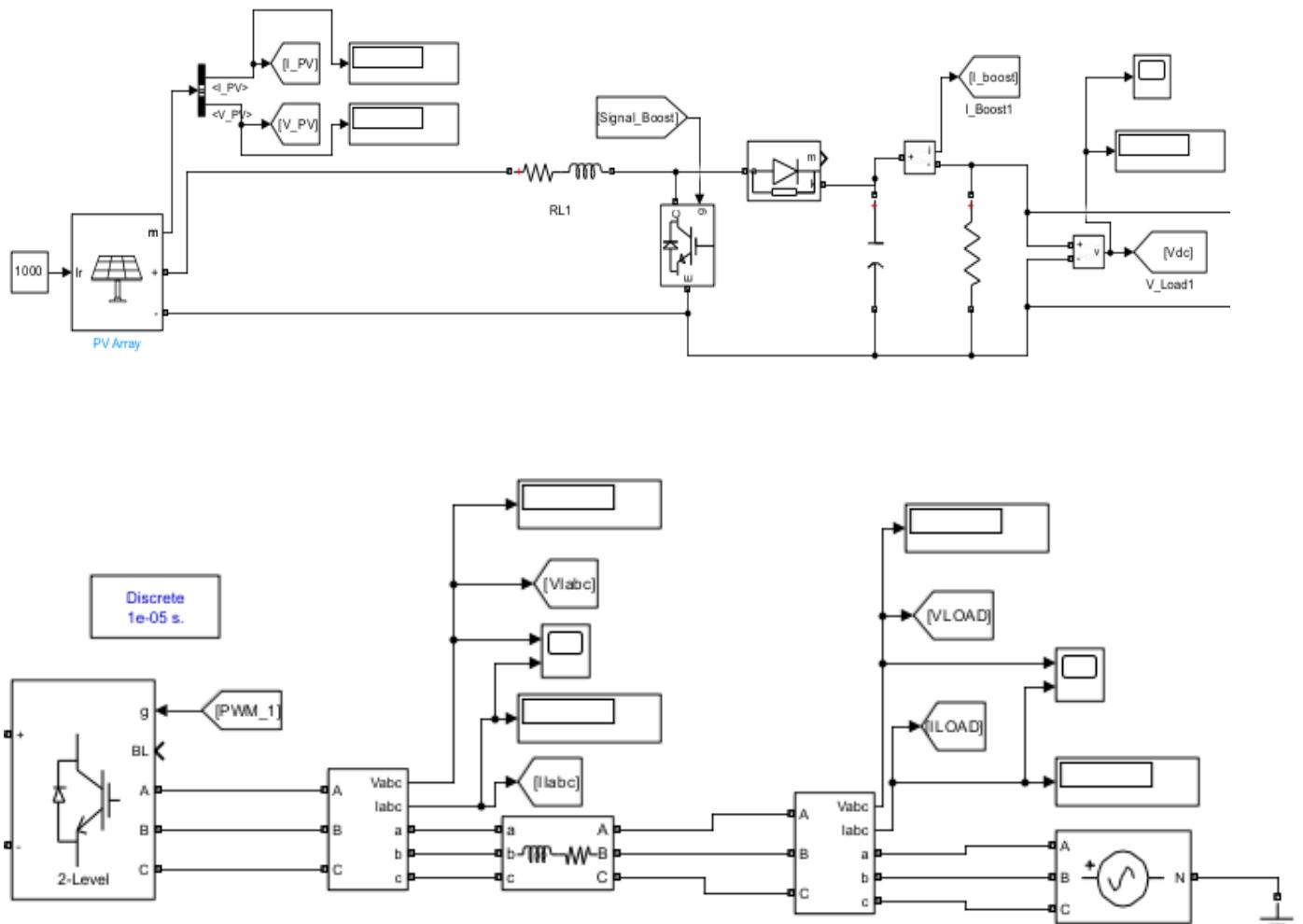
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Προσομοιώσεις

## 6.1 Εισαγωγή:

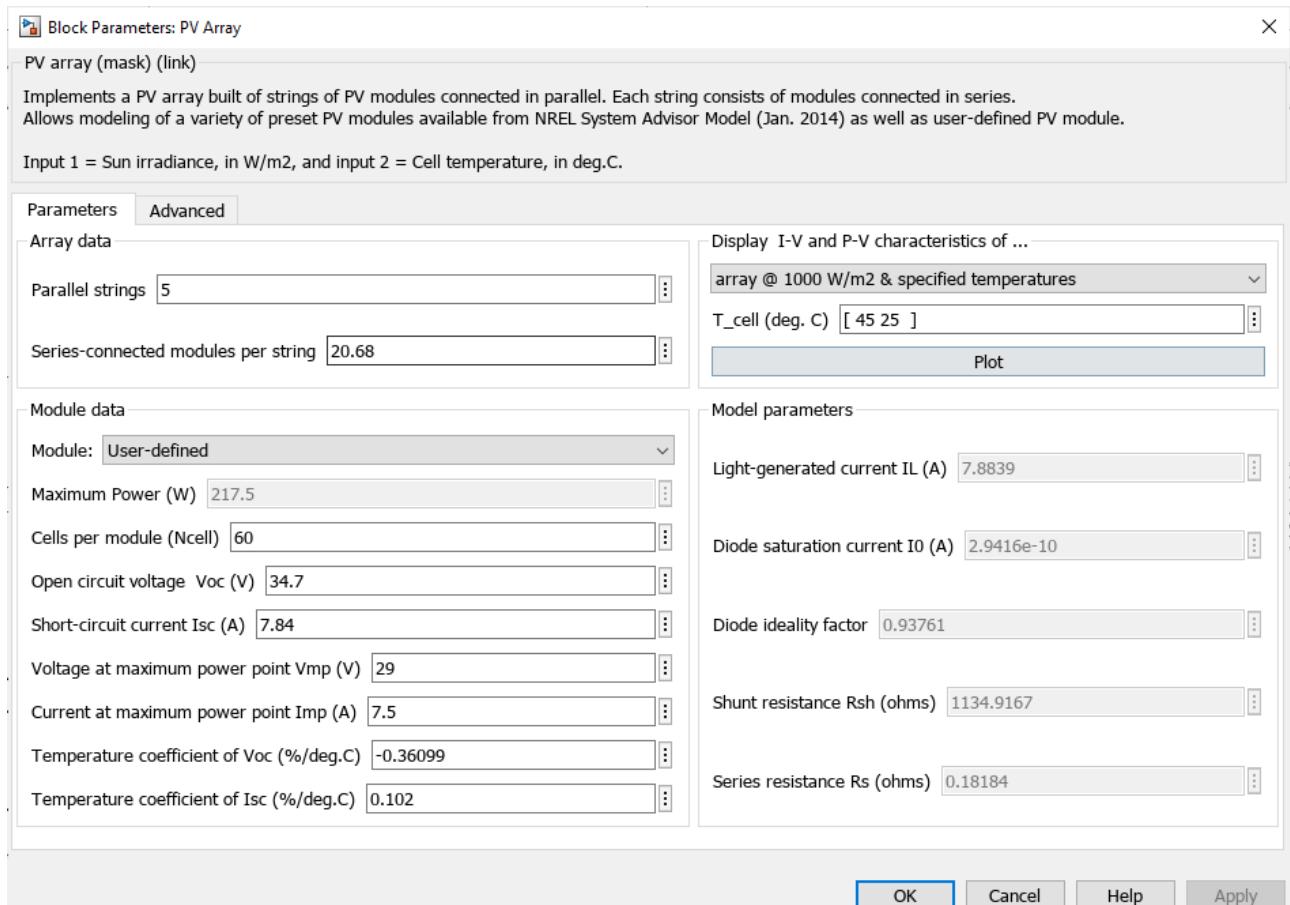
Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε το σύστημα το οποίο δημιουργήσαμε στις προσομοιώσεις με χρήση της βιβλιοθήκης SimPower του MATLAB. Τα συστήματα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες , εκείνο της κανονικής σκίασης και εκείνο της μερικής. Για κάθε μία από αυτές δημιουργήσαμε το μοντέλο στο Simulink και τρέξαμε προσομοιώσεις , ενώ επίσης για να βρούμε το μέγιστο σημείο λειτουργίας τις φωτοβολταϊκής συστοιχίας δημιουργήσαμε το μοντέλα από τα οποία εξαγάγαμε τις χαρακτηριστικές P-V και I-V. Αυτό επιτυγχάνεται με την σε σειρά σύνδεση μίας πηγής ρεύματος με την φωτοβολταϊκή συστοιχία και την λήψη κατάλληλων μετρήσεων.

## 6.2 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία χωρίς Σκίαση:

Το σύστημα που δημιουργήσαμε στο Simulink για το σενάριο όπου μία φωτοβολταϊκή συστοιχία βρίσκεται υπό συνθήκες κανονικής σκίασης είναι το εξής :



Εικόνα 56. Simulink Μοντέλο του Συστήματος

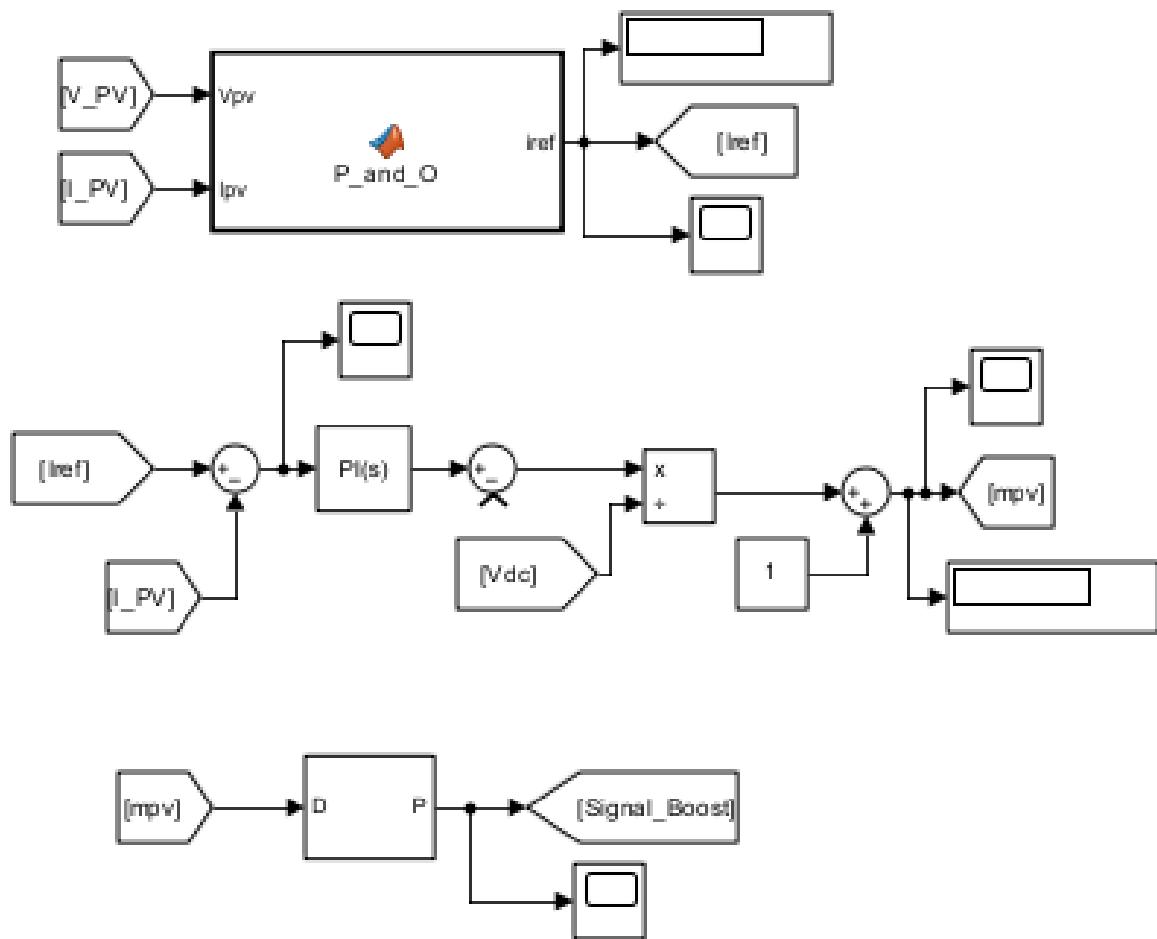


Εικόνα 57. Παράμετροι Φωτοβολταϊκής Συστοιχίας

Στις παραπάνω εικόνες, βλέπουμε πως συνδέουμε μία φωτοβολταϊκή συστοιχία με το δίκτυο. Αμέσως μετά τα φωτοβολταϊκά υπάρχει ένα RL φίλτρο που προηγείται της σύνδεσης με τον Boost μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης. Στην συνέχεια βρίσκεται ο Two Level Converter, Αντιστροφέας Τάσης και ένα RL φίλτρο για την μείωση των αρμονικών πριν την σύνδεση με το δίκτυο. Κατά μήκος του μοντέλου παρατηρούμε μια σειρά από μετρητικά στοιχεία από τα οποία λαμβάνουμε τιμές για το Ρεύμα και την Τάση του φωτοβολταϊκού, την τάση του DC Διαύλου και άλλα μεγέθη τα οποία θα μας χρησιμεύσουν στον έλεγχο αλλά και την γενικότερη εικόνας μας για την ορθή λειτουργία. Αξίζει να σημειώσουμε επίσης πως το σύστημα μας χαρακτηρίζεται από μία προσομοίωση διακριτού χρόνου με βήμα  $1e^{-5}s$ , και τα χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας επιλέχτηκαν έτσι ώστε στην έξοδο να έχουμε μία τάση κοντά στα 1200 Volt που είναι η επιθυμητή τάση για τον DC Δίαυλο. Θέλουμε το σύστημα μας να λειτουργεί με ένα duty cycle κοντά στο 0.5 για βέλτιστη λειτουργία, συνεπώς από τον τύπο  $\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-d}$ , προκύπτει ότι  $V_{in}=600$  Volt, άρα

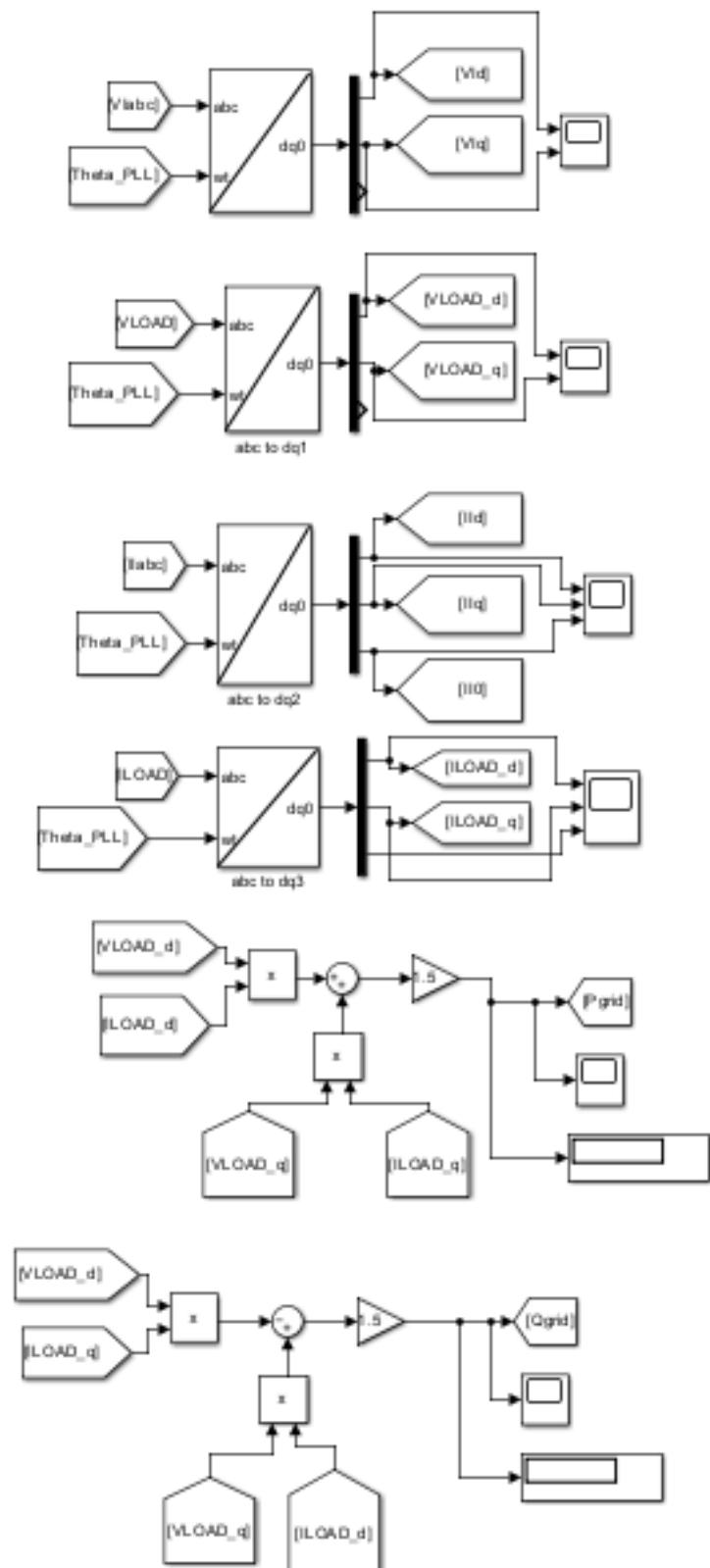
$$\frac{V_{in}}{V_{MPP}} = 20.68 \text{ φωτοβολταϊκά σε σειρά για να πετύχω τα 1200 Volt με 0.5 Duty Cycle.}$$

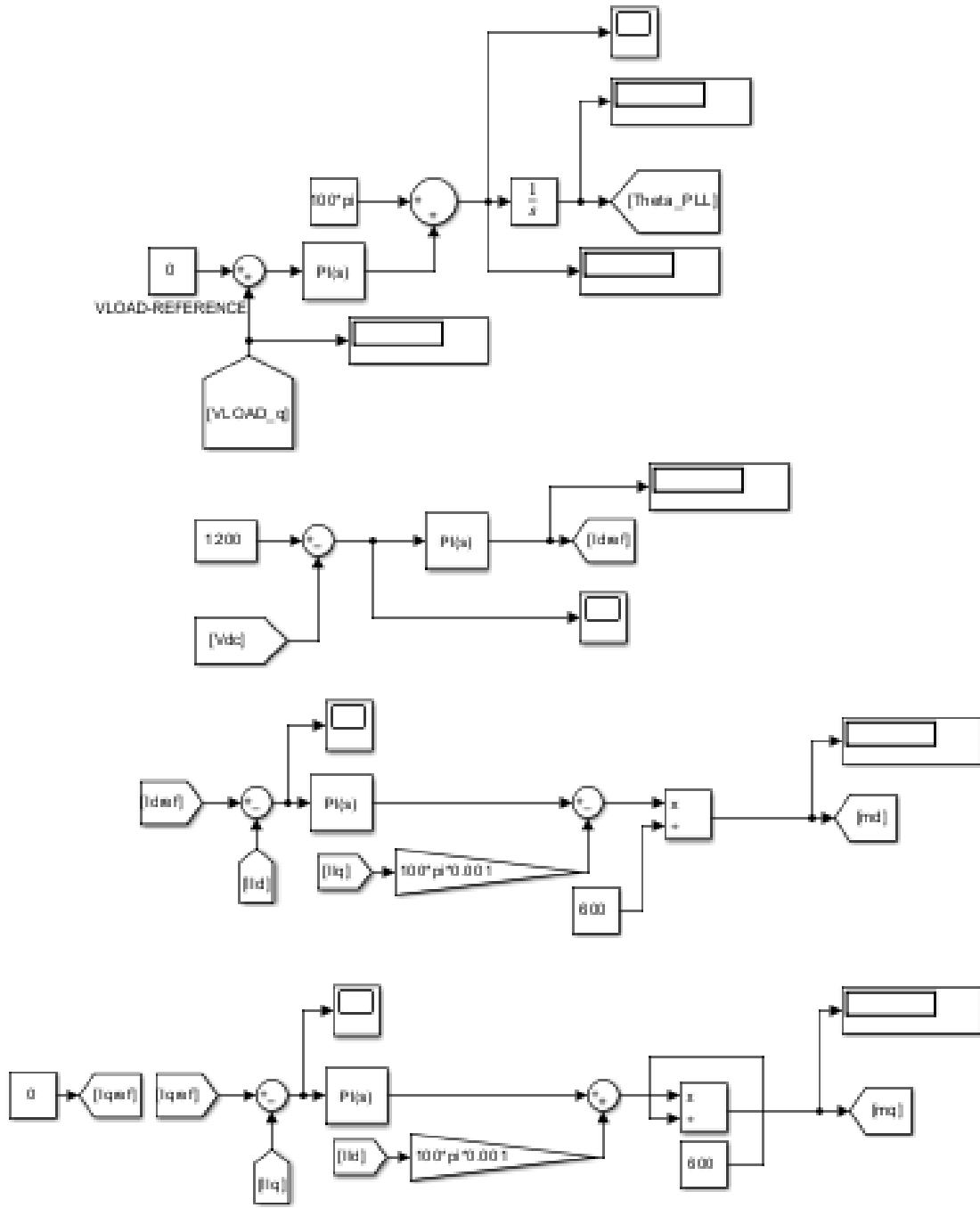
Τον έλεγχο για το σύστημα αυτό τον αναλύσαμε στο κεφάλαιο 4 και παρουσιάζεται ως εξής :



Εικόνα 58.Έλεγχος Boost Conventer στο Simulink

Εδώ βλέπουμε το MATLAB Function Block που περιέχει τον επιθυμητό αλγόριθμο , στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο των Perturb and Observe , και τον εσωτερικό βρόγχο ελέγχου ρεύματος από όπου εν τέλει λαμβάνουμε την παλμοδότηση του Boost.



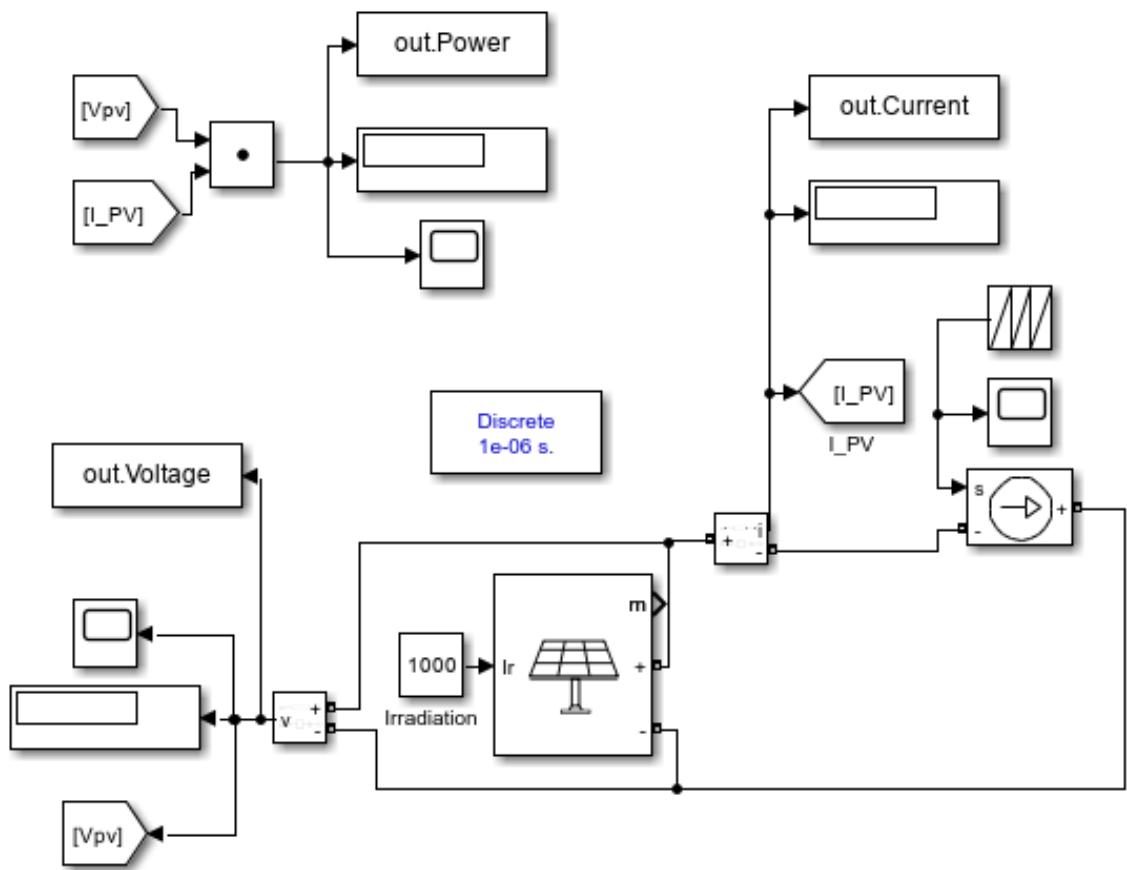


Εικόνα 59. Έλεγχος Inverter και Συγχρονισμός με το Δίκτυο στο Simulink

Στις 2 παραπάνω εικόνες παρουσιάζεται ο έλεγχος στην πλευρά του φορτίου , ο εσωτερικός βρόγχος ελέγχου ρεύματος και ο εξωτερικός βρόγχος ελέγχου τάσης καθώς και το PLL , οι μετασχηματισμοί Park και οι υπολογισμοί που απαιτούνται για την εξαγωγή των αναγκαίων μεγεθών για τον έλεγχο, που οδηγούν τελικά στην παλμοδότηση του αντιστροφέα και την εύρεση της τιμής Ενεργού και Αέργου Ισχύος που χαρακτηρίζει την πλευρά του δικτύου.

Προκειμένου να είμαστε βέβαιοι για την ορθή λειτουργία του συστήματος μας και των αλγορίθμων εύρεσης μέγιστου σημείου παραγωγής ισχύος θα εξάγουμε τις χαρακτηριστικές

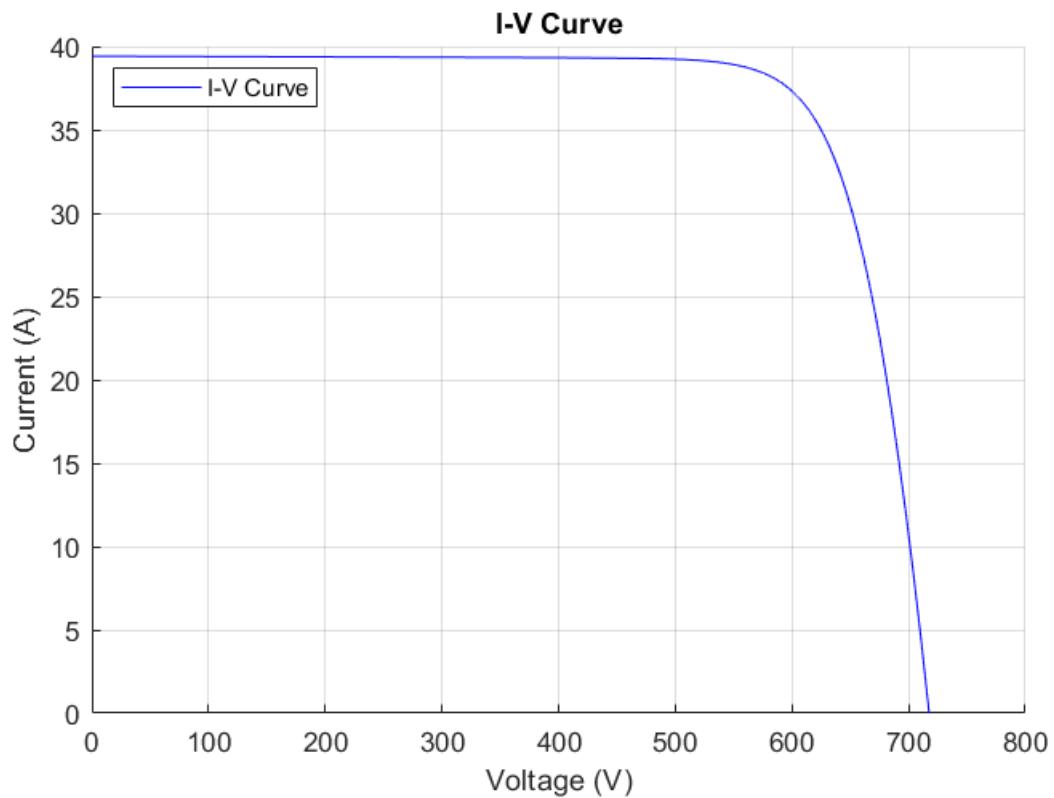
εξισώσεις της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Για να το επιτύχουμε αυτό θα συνδέσουμε σε σειρά μία πηγή ρεύματος όπως στην παρακάτω εικόνα :



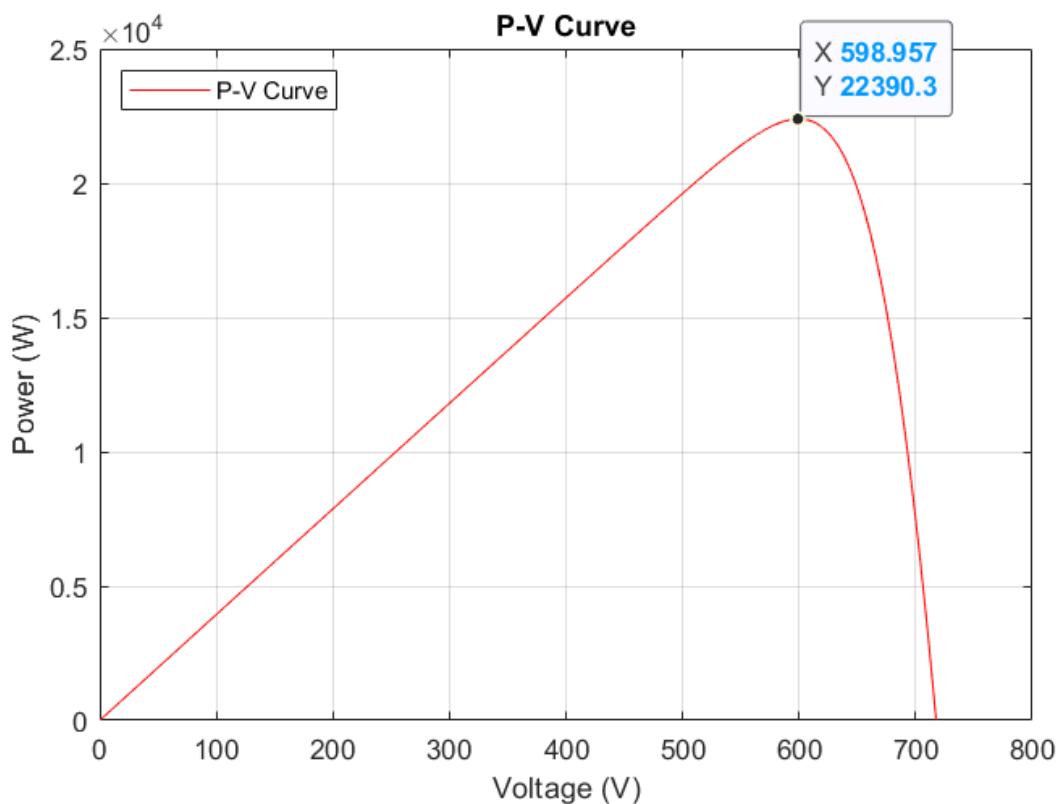
*Εικόνα 60. Μοντέλο Εξαγωγής Χαρακτηριστικών Φωτοβολταϊκού Συστήματος υπό συνθήκες κανονικής σκίασης στο Simulink*

Από την παραπάνω προσομοίωση λαμβάνουμε τις εξής γραφικές για τις χαρακτηριστικές :

### System Characteristics



### System Characteristics

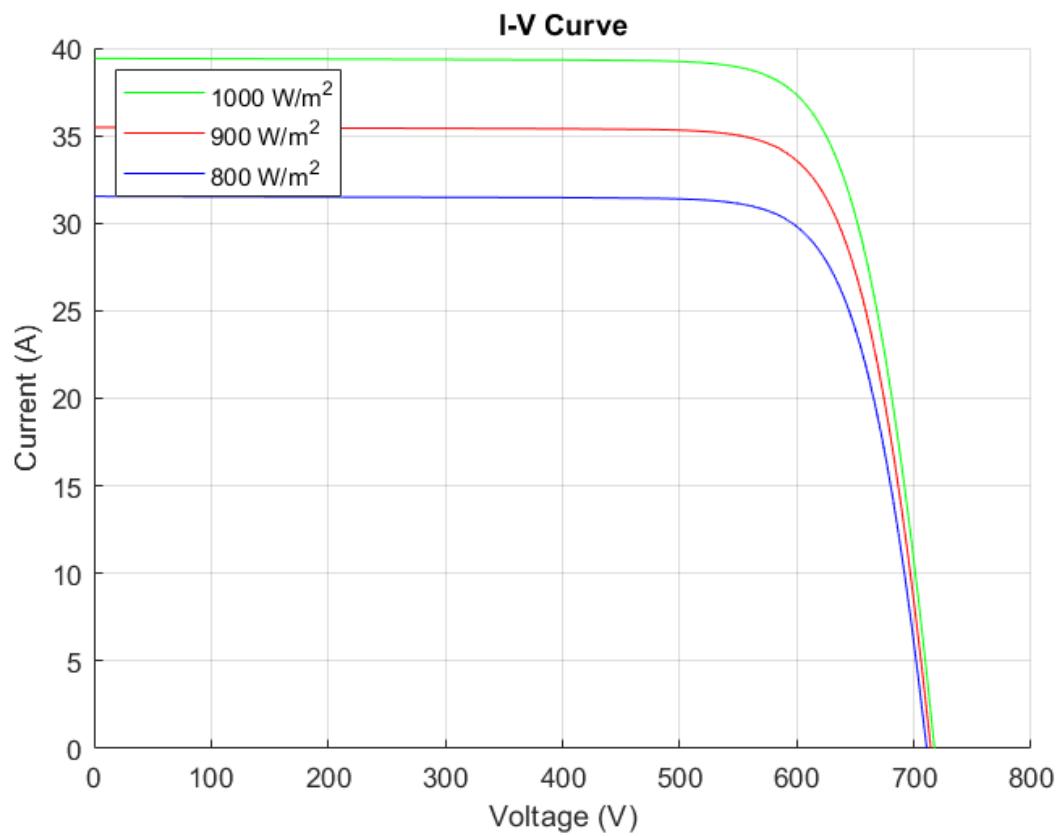


Από αυτές μπορούμε να διακρίνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος, δηλαδή την τάση ανοιχτού κυκλώματος , το ρεύμα βραχυκύκλωσης και το σημαντικότερο το σημείο λειτουργίας μέγιστης παραγωγής ισχύος το οποίο όπως βλέπουμε βρίσκεται στα 22.39kW με τάση 598.95 Volt.

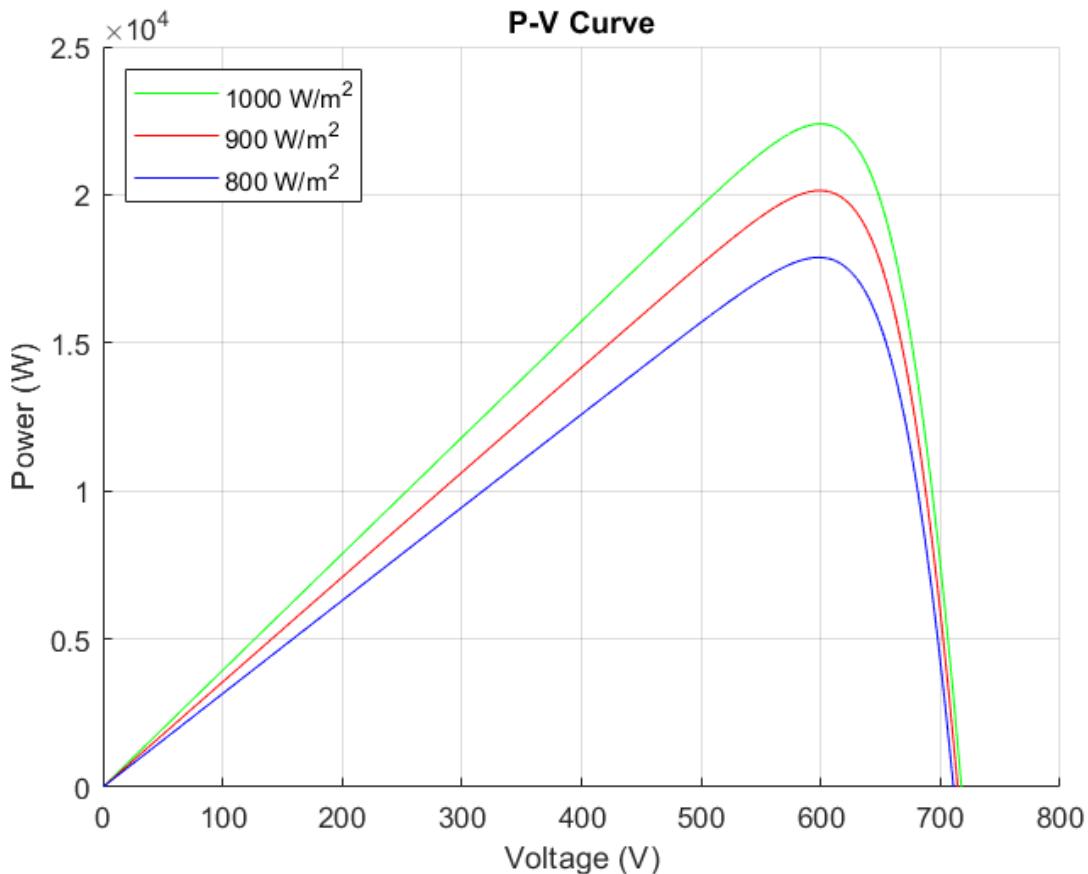
### **6.2.1 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία χωρίς Σκίαση , σενάριο μεταβολής ακτινοβολίας :**

Στο σενάριο αυτό θα συγκρίνουμε τις διαφορετικές αποκρίσεις που προκύπτουν από το σύστημα όταν σε αυτό εφαρμόζουμε ακτινοβολίες 800 , 900 και 1000 W/m<sup>2</sup>.

## System Characteristics

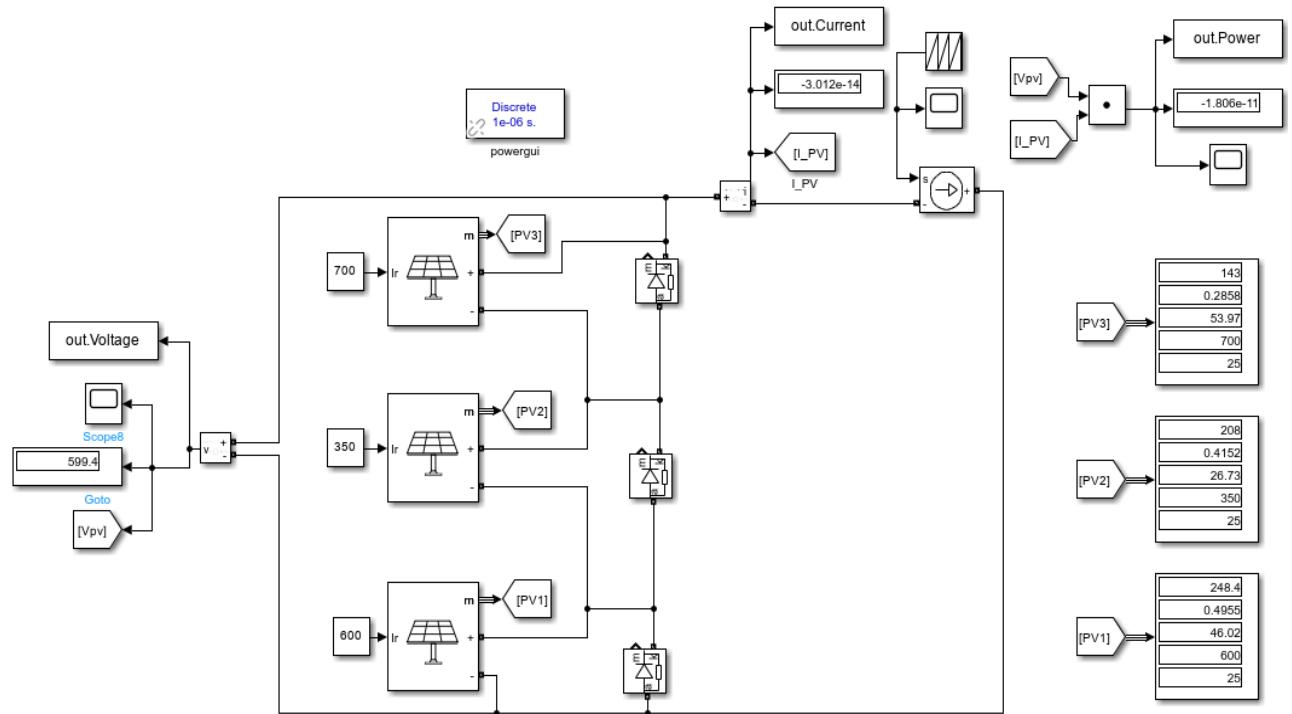


## System Characteristics



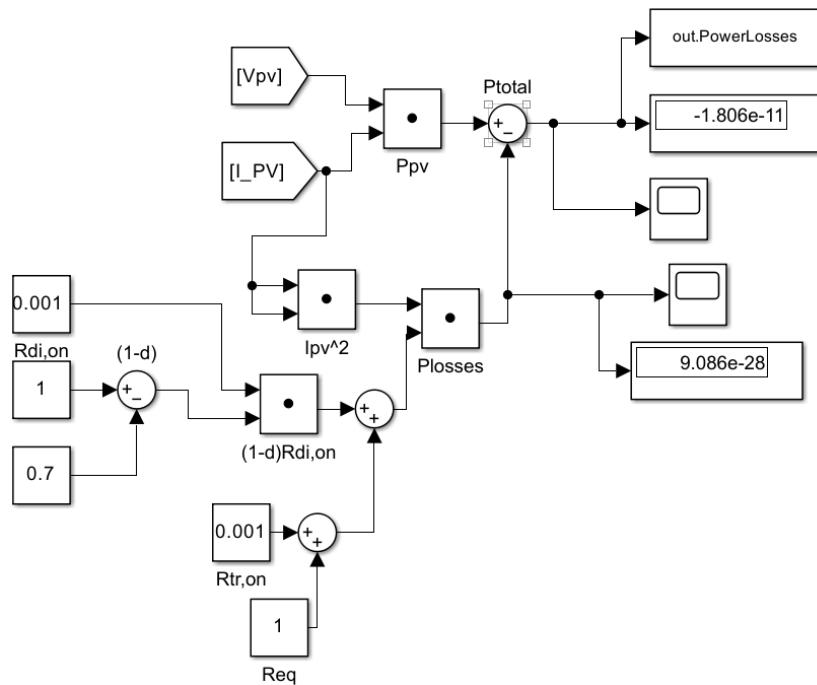
Παρατηρούμε στις παραπάνω χαρακτηριστικές , όπως ήταν αναμενόμενο , πως με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά πάνελ , η παραγωγή ισχύος αυξάνεται στο μέγιστο σημείο παραγωγής. Ωστόσο αξίζει να σημειώσουμε ότι αυτό βρίσκεται σχεδόν στην ίδια τάση λειτουργίας με διαφορές στο ρεύμα. Διακρίνουμε επίσης τις διαφορές στο ρεύμα βραχυκύλωσης , για 1000 W/m<sup>2</sup> βρίσκεται στα 39.41 Amper , για 900W/m<sup>2</sup> βρίσκεται στα 35.47 Amper και τέλος 800W/m<sup>2</sup> βρίσκεται στα 31.53 Amper . Αντίθετα η τάση ανοικτού κυκλώματος βρίσκεται σε όλες τις περιπτώσεις σχεδόν στην ίδια τιμή , κοντά στα 715 Volt.

### 6.3 Φωτοβολταϊκή Συστοιχία υπό συνθήκες μερικής Σκίασης:



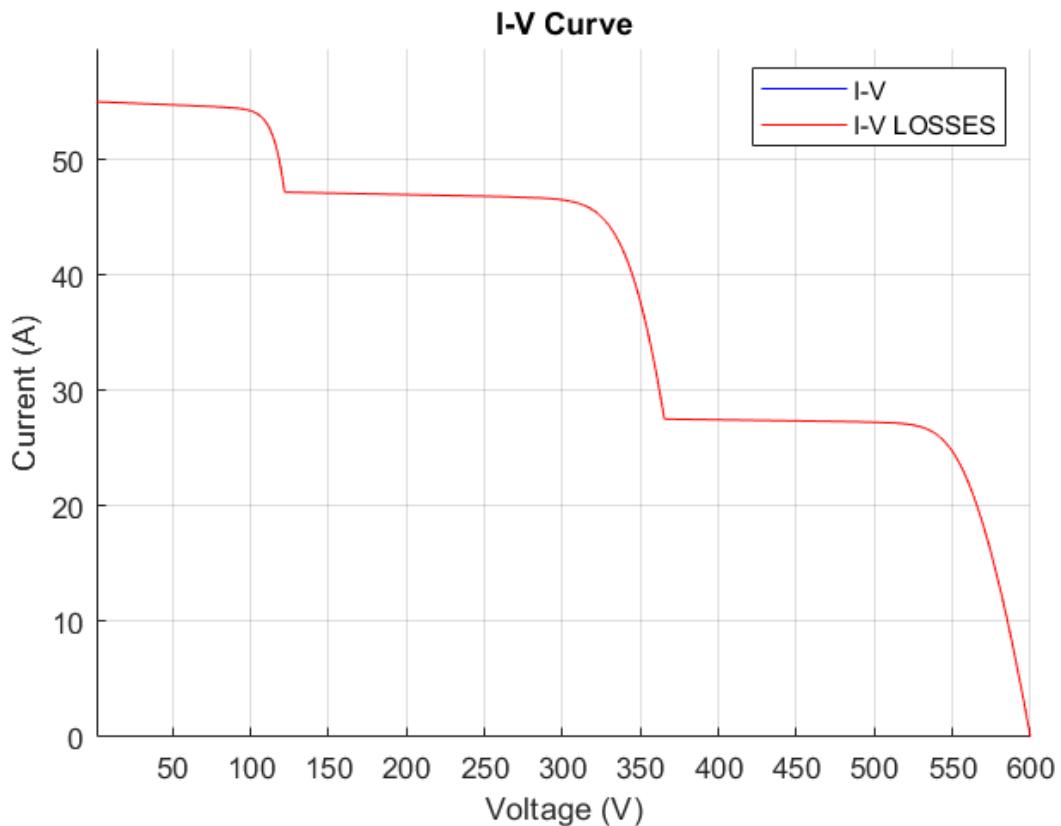
Εικόνα 61. Μοντέλο Εξαγωγής Χαρακτηριστικών Φωτοβολταϊκού Συστήματος υπό συνθήκες μερικής σκίασης στο Simulink

Στο σύστημα που βλέπουμε παραπάνω παρατηρούμε την σύνδεση τριών φωτοβολταϊκών συστοιχιών σε σειρά, οι οποίες δέχονται διαφορετική ακτινοβολία η κάθε μία. Παράλληλα σε κάθε μία από αυτές βρίσκεται μία Bypass δίοδος, και σε σειρά με το σύστημα αυτό μία ελεγχόμενη πηγή ρεύματος και τα αντίστοιχα μετρητικά. Συμπεριλαμβάνοντας τις απώλειες που παρουσιάζονται στο σύστημα όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 2 συγκρίνουμε για τις δύο αυτές περιπτώσεις τις χαρακτηριστικές P-V, I-V.

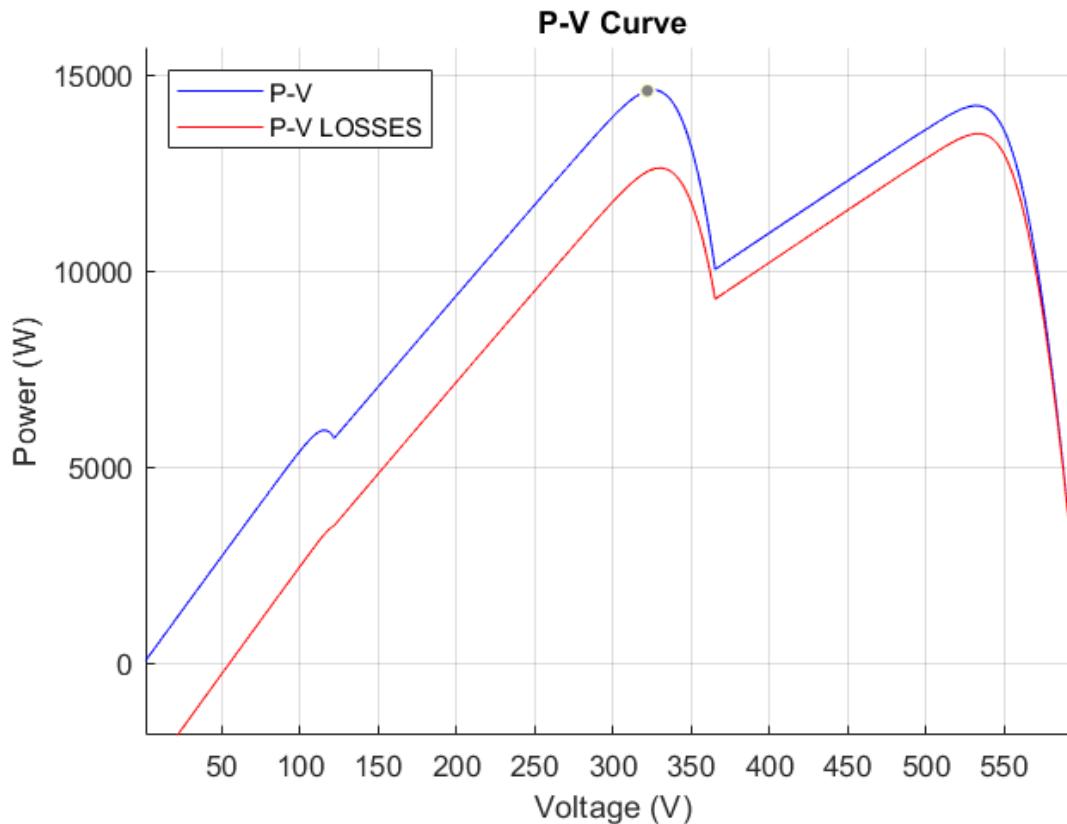


Εικόνα 62. Υπολογισμός Απωλειών Φωτοβολταϊκού στο Simulink

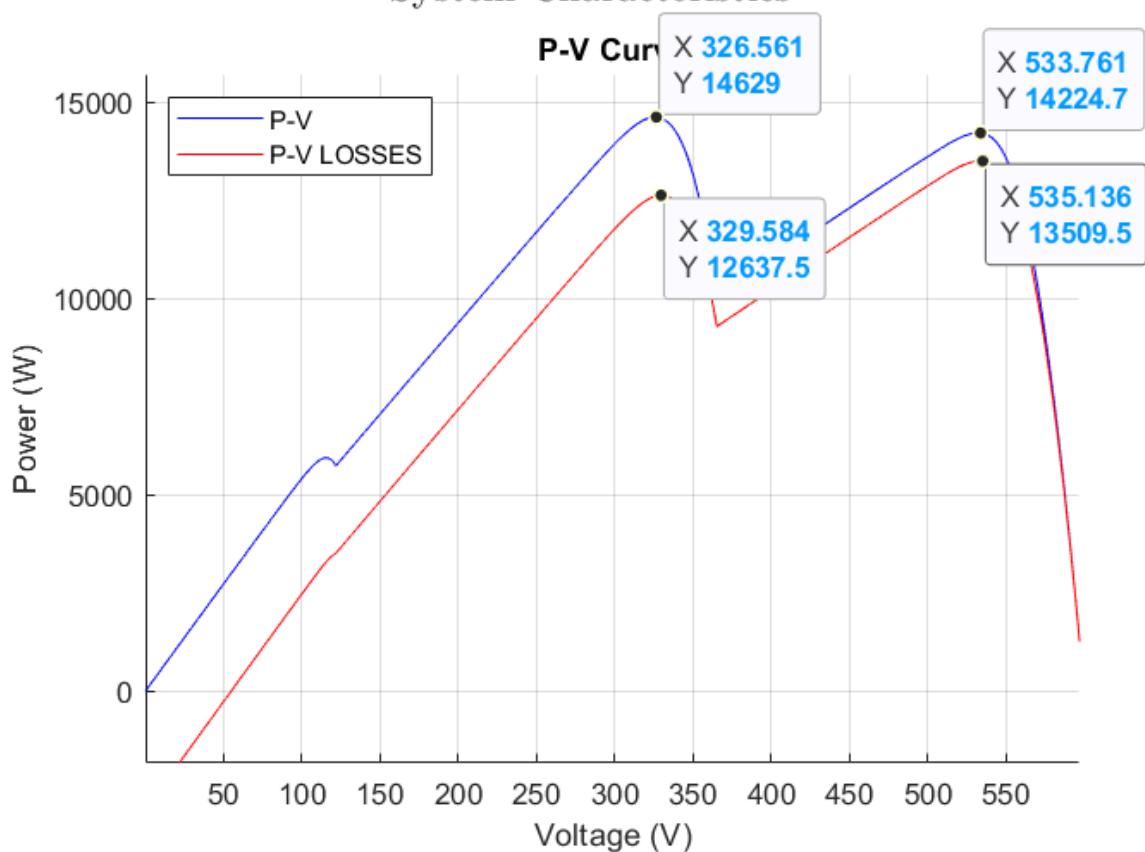
### System Characteristics



## System Characteristics



## System Characteristics



Παρατηρούμε από τις παραπάνω χαρακτηριστικές πως το σενάριο μερικής σκίασης , μεταφράζεται στις γραφικές με την παρουσία τοπικών μεγίστων. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε πως η γραφική της Ισχύος-Τάσης παρουσιάζει δύο μέγιστα πολύ κοντά μεταξύ τους τόσο στην περίπτωση χωρίς τον υπολογισμό των απωλειών , όσο και σε εκείνη όπου υπολογίζονται. Το βασικό σημείο που πρέπει να σχολιάσουμε είναι η μεταβολή του σημείου Μέγιστης Παραγωγής Ισχύος όταν συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες . Αναλυτικότερα στην περίπτωση χωρίς απώλειες τα 2 μέγιστα που μας απασχολούν λαμβάνουν τις τιμές 14.6kW και 14.2kW για τις αντίστοιχες τάσεις 327 Volt και 534 Volt με το πρώτο να χαρακτηρίζεται και ως το ολικό μέγιστο παραγωγής ισχύος για το σύστημα. Μετά τον υπολογισμό των απωλειών , βλέπουμε πως για 330 Volt παράγονται 12.6kW και για 535 Volt παράγονται 13.5kW , δηλαδή πλέον το MPP έχει αλλάξει. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς η βελτιστοποίηση αυτή στους αλγόριθμους MPPT μπορεί να μας προσφέρει έως και 5% αύξηση στην παραγωγή ισχύος. Ο λόγος που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο αυτό είναι πως στον τύπο υπολογισμού συνολικής ισχύος.

$$P_{MPP} = P_{PV} - [R_{tr,on} + R_{eq} + R_{di,on}(1 - d)]I_{PV}^2$$

Οι απώλειες εμπεριέχουν το ρεύμα υψηλότερο στο τετράγωνο , έτσι για μεγαλύτερα ρεύματα και χαμηλότερες τάσεις λειτουργίας οι απώλειες αυξάνονται εκθετικά. Σχετικά με τις γραφικές Ρεύματος-Τάσης παρατηρούμε πως όπως ήταν αναμενόμενο καμία διαφορά δεν παρατηρείται στις 2 αυτές περιπτώσεις μιας και η λειτουργία του συστήματος δεν επηρεάζεται από τις απώλειες στην ισχύ.

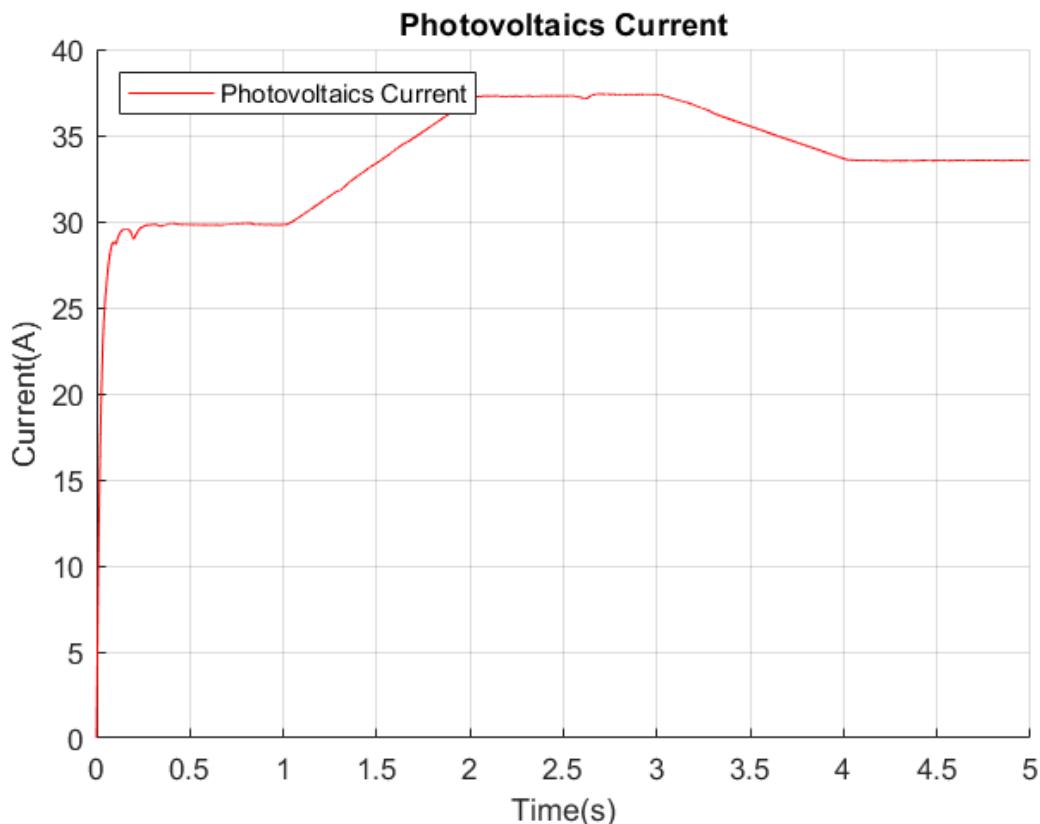
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αποτελέσματα

## 7.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων υπό συνθήκες κανονικής σκίασης:

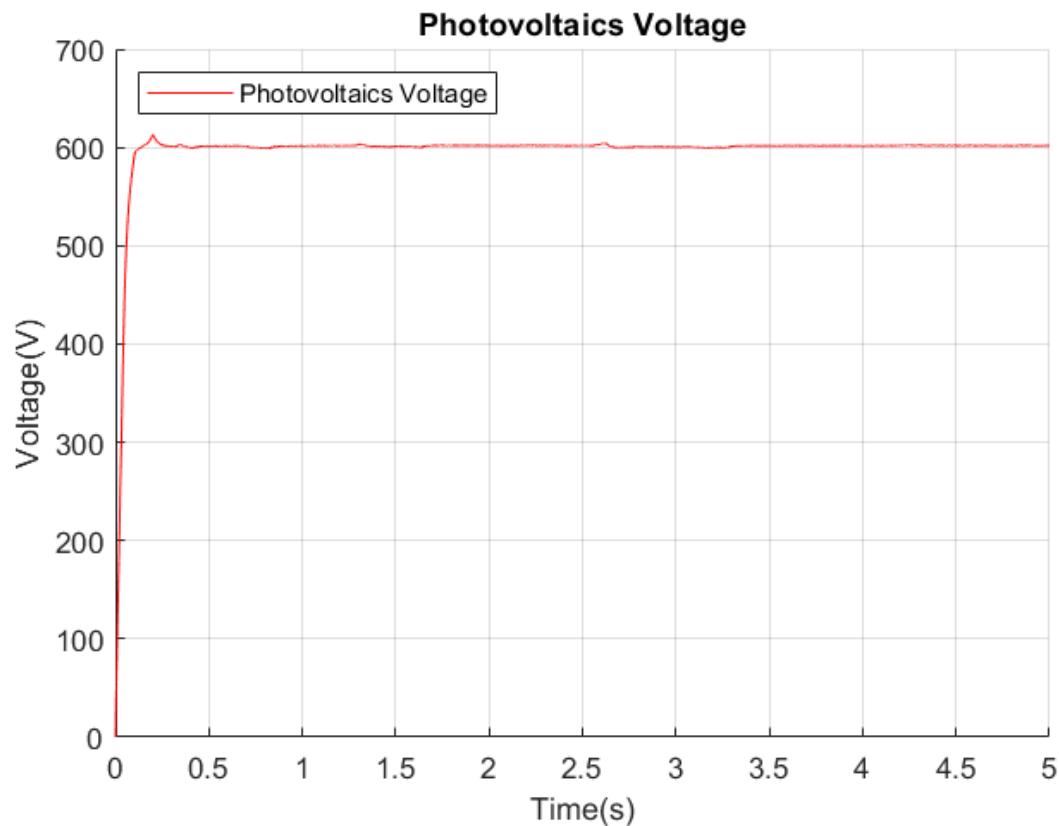
Στο σενάριο αυτό πραγματοποιούνται παρά την υπό κανονικές συνθήκες πρόσπτωση της ακτινοβολίας , μεταβολές στην ένταση της από  $800W/m^2$  , στα  $1000W/m^2$  και τέλος στα  $900W/m^2$ . Οι αλλαγές αυτές γίνονται σταδιακά , προσομοιώνοντας την αυξομείωση της ηλιοφάνειας σε ένα τοπίο όπως γίνεται υπό πραγματικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα η ακτινοβολία αυξάνεται από  $800W/m^2$  στα  $1000W/m^2$  , μεταξύ των χρονικών στιγμών 1-2second , διατηρείται σταθερή στα  $1000W/m^2$  από 2-3 second , μειώνεται στα  $900 W/m^2$  μεταξύ 3-4 second και τέλος διατηρείται στα  $900 W/m^2$  από 4-5 second όπου και ολοκληρώνεται η προσομοίωση. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε γραφικές παραστάσεις από τα σημαντικότερα μεγέθη, που θα μας υποδείξουν την απόκριση του συστήματος και θα μας οδηγήσουν στο να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα αναφορικά με το σύστημα και την λειτουργία του με την χρήση διαφορετικών αλγορίθμων εύρεσης Μέγιστου Σημείου Παραγωγή Ισχύος.

### 7.1.1 *Perturb and Observe* χωρίς απώλειες:

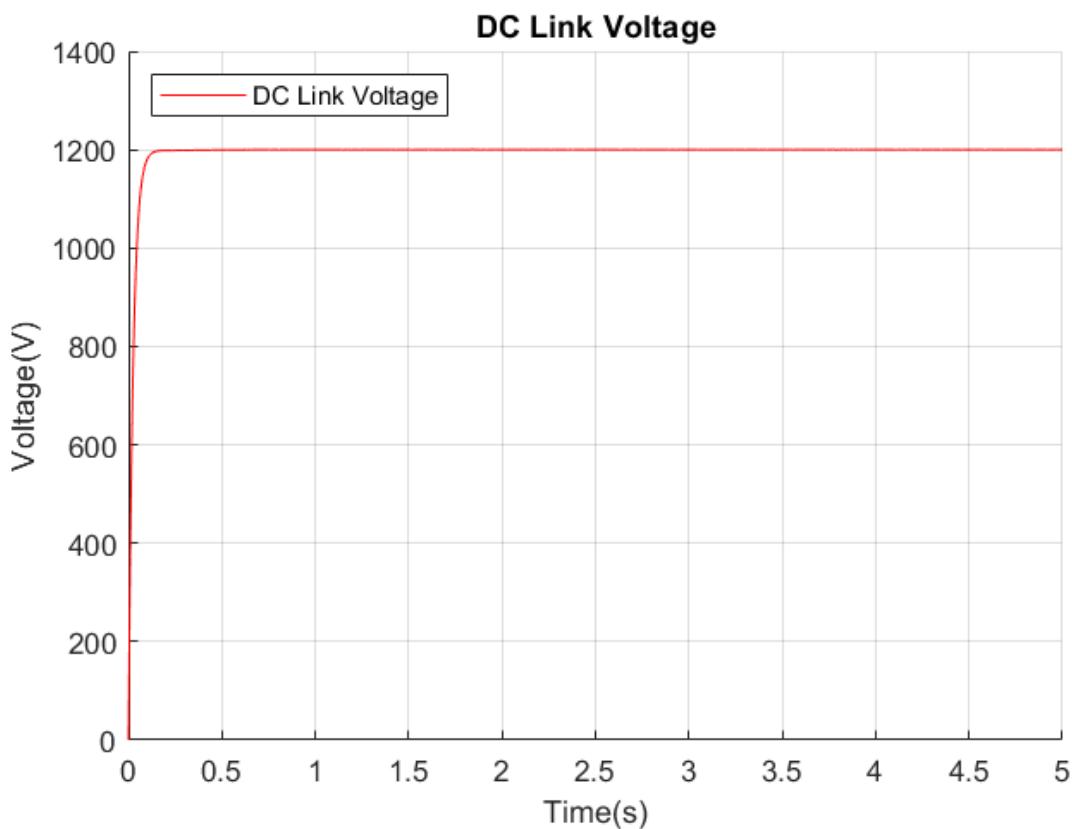
Petrurb and Observe-No Losses



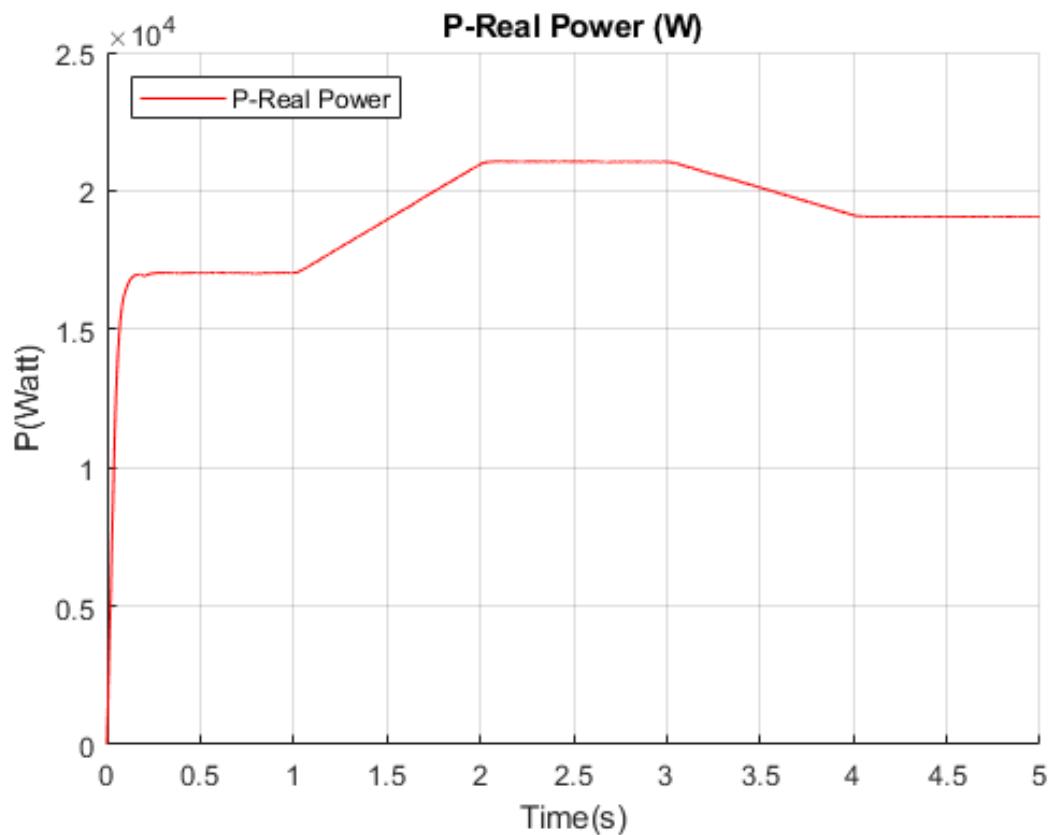
### Petrurb and Observe-No Losses



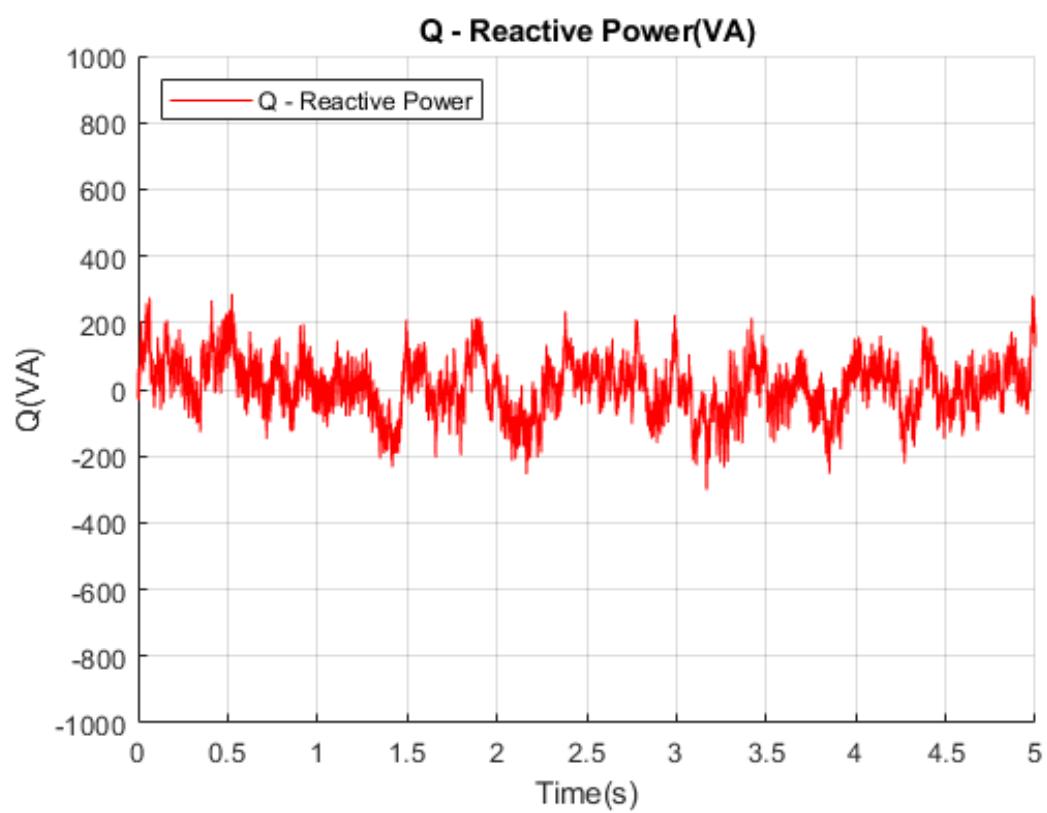
### Petrurb and Observe-No Losses



Petrurb and Observe-No Losses



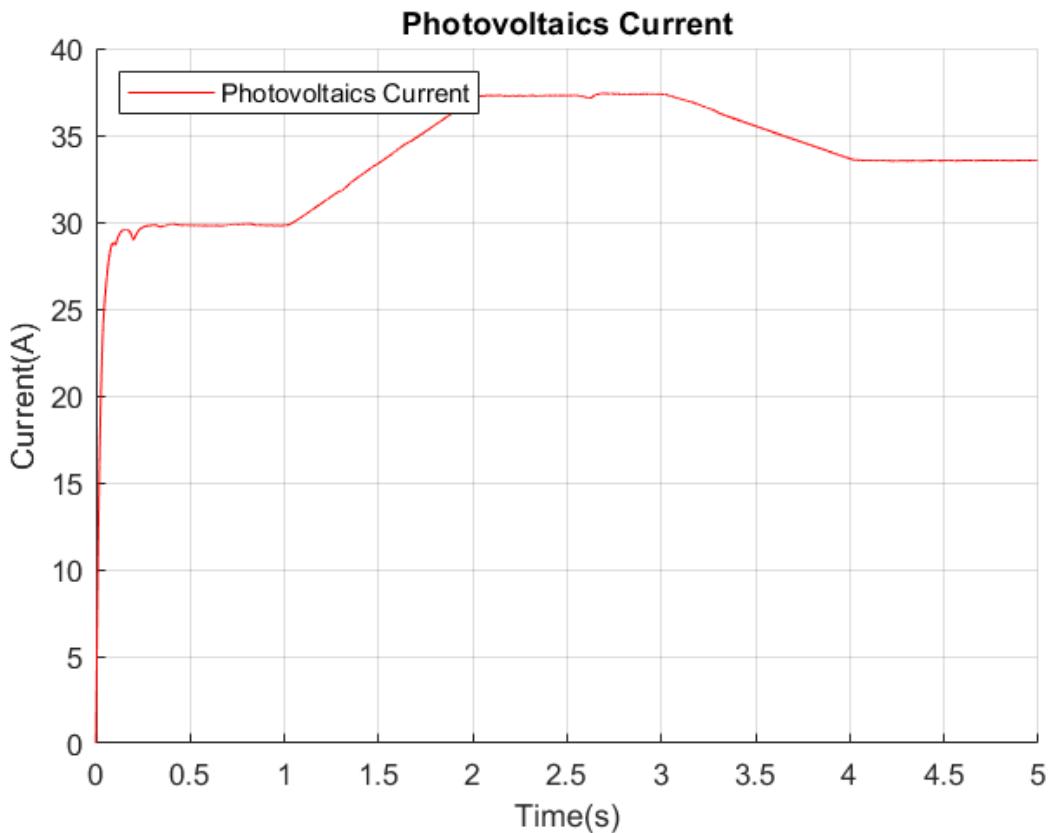
Petrurb and Observe-No Losses



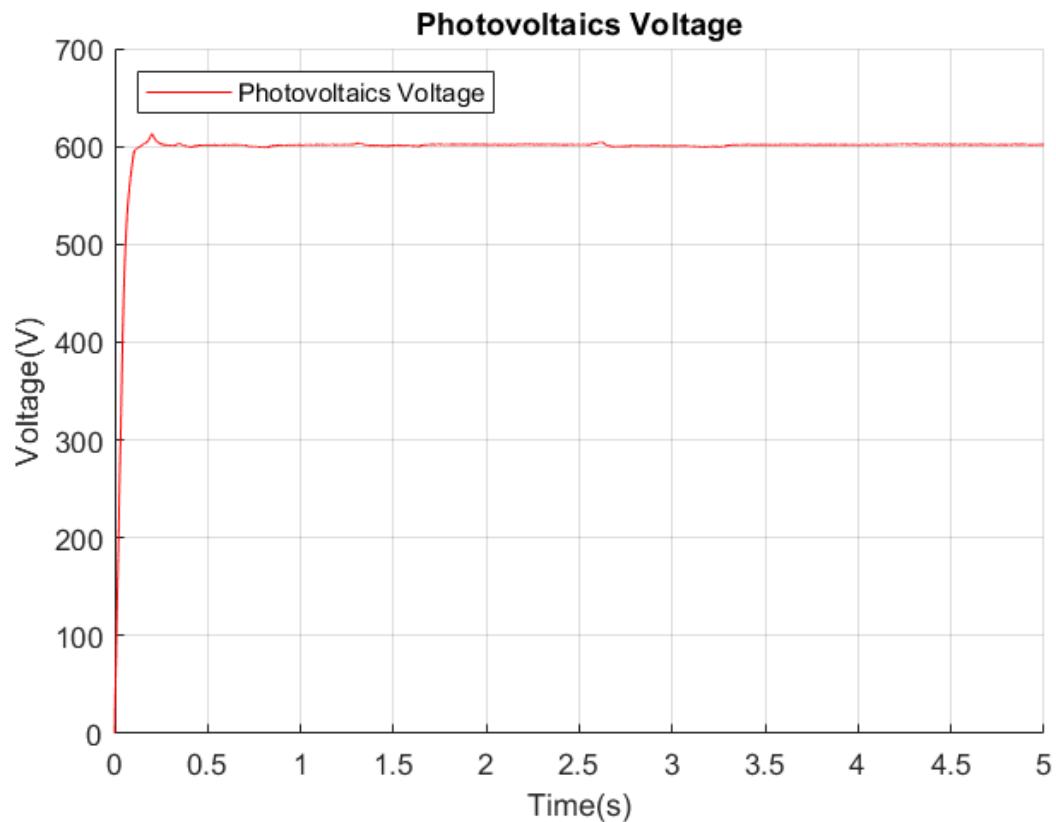
Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε αρχικά πως οι τιμές ρεύματος του φωτοβολταϊκού ακολουθούν την ένταση της ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα , όταν η ακτινοβολία βρίσκεται στα  $800\text{W/m}^2$  το ρεύμα που διαρρέει την φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι κοντά στα 30 Amper , με την αύξηση της στα  $1000 \text{ W/m}^2$  μεταβάλλεται στα 38 Amper και τέλος με την μείωση στα  $900\text{W/m}^2$  κατολήγει στα 34Amper. Αντίθετα η τάση στα άκρα του παραμένει σταθερή για όλο το χρονικό διάστημα . Οι δύο αυτές γραφικές μας προϊδεάζουν για την γραφική της παραγωγής ισχύος, που όπως επιβεβαιώνεται ακολουθούν την ένταση της ακτινοβολίας. Τέλος αξίζει να σχολιάσουμε την γρήγορη λειτουργία του ελέγχου τάσης στην πλευρά του φορτίου καθώς ταχύτατα η Τάση στον Δίαυλο οδηγείται στην επιθυμητή τιμή των 1200 Volt και οι τιμές της Άεργου Ισχύος κυμαίνονται γύρω από το μηδέν.

### **7.1.2 Perturb and Observe με απώλειες:**

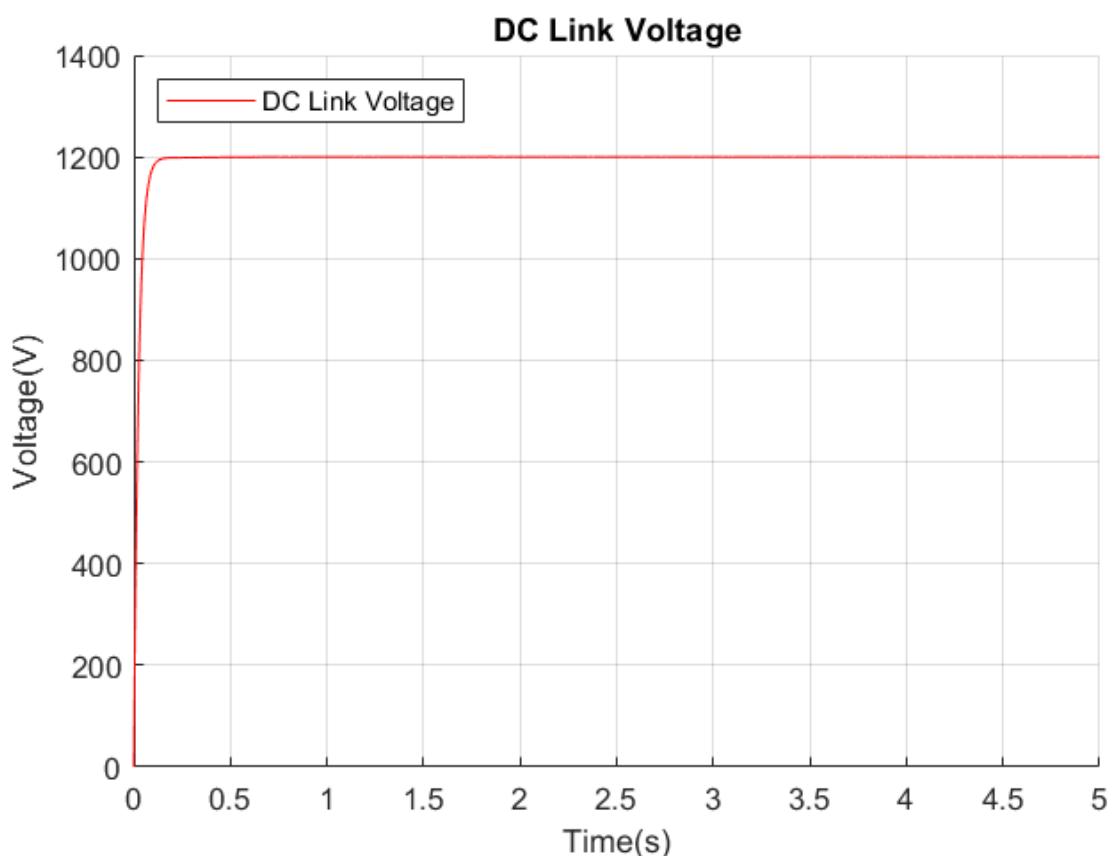
Petrurb and Observe-Losses Included



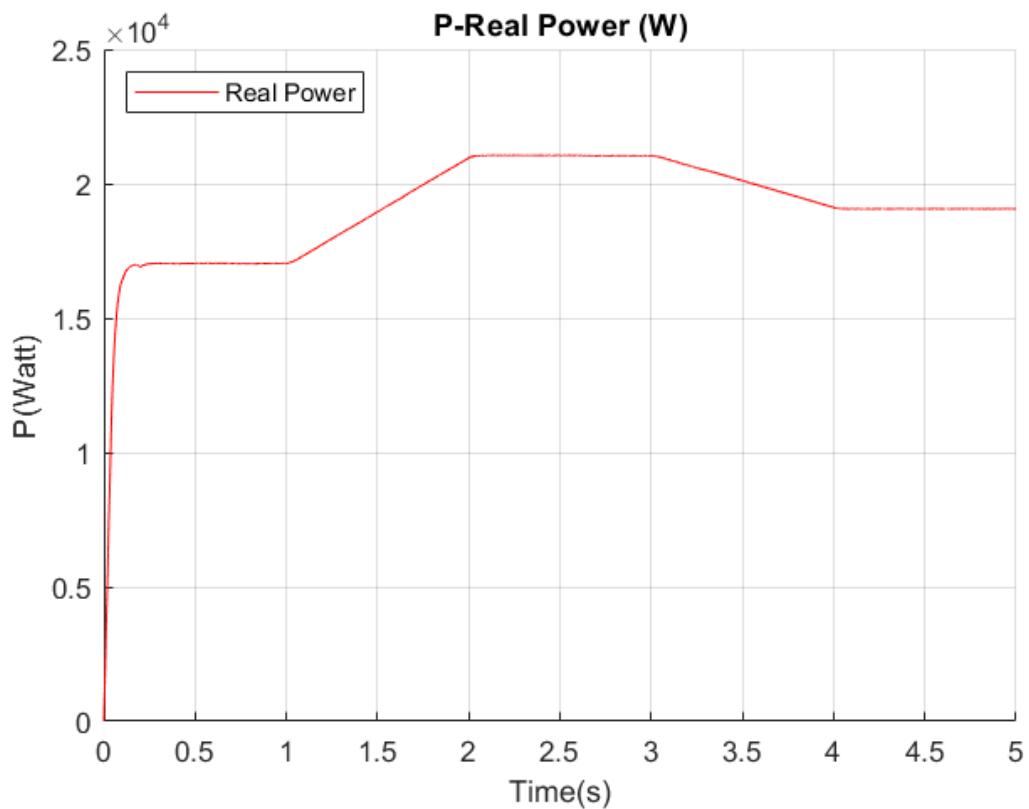
Petrurb and Observe-Losses Included



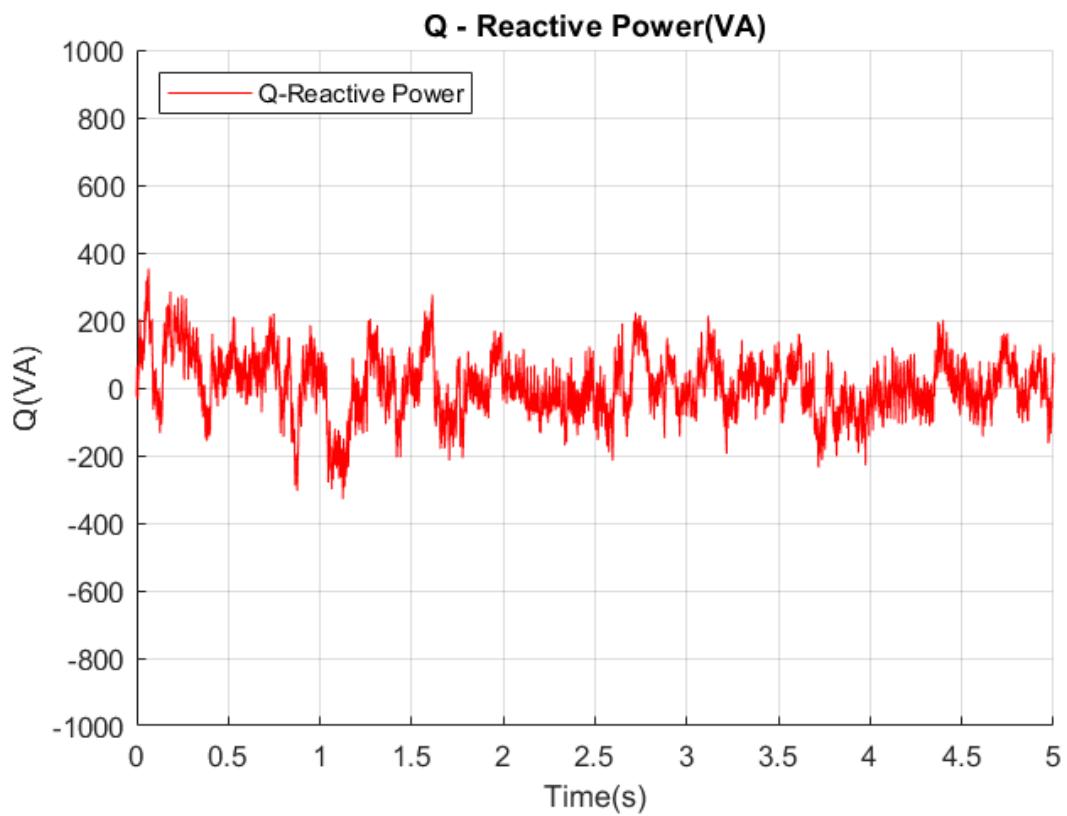
Petrurb and Observe-Losses Included



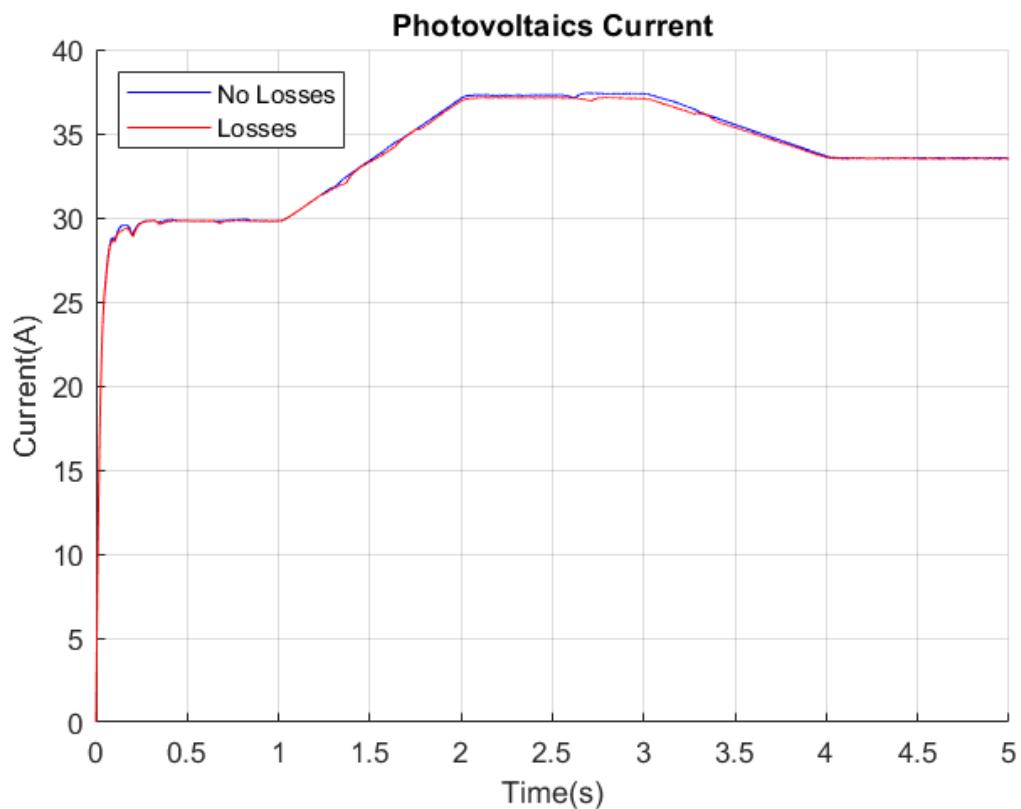
Petrurb and Observe-Losses Included



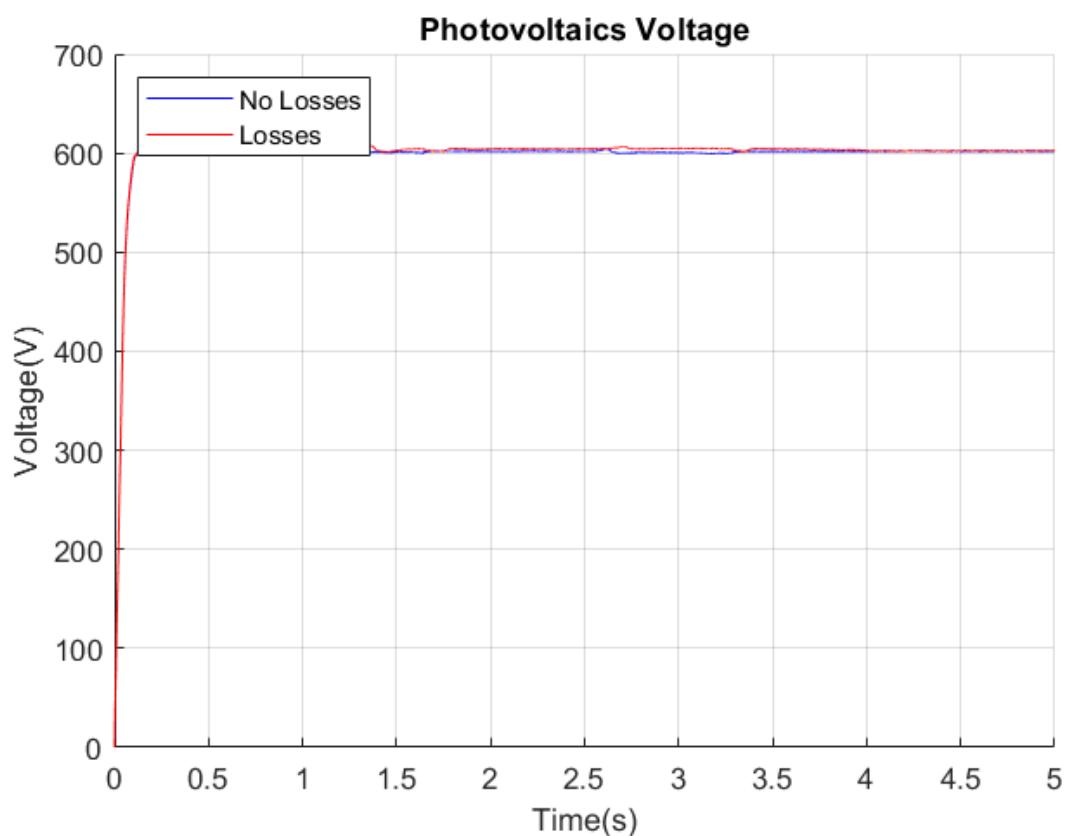
Petrurb and Observe-Losses Included



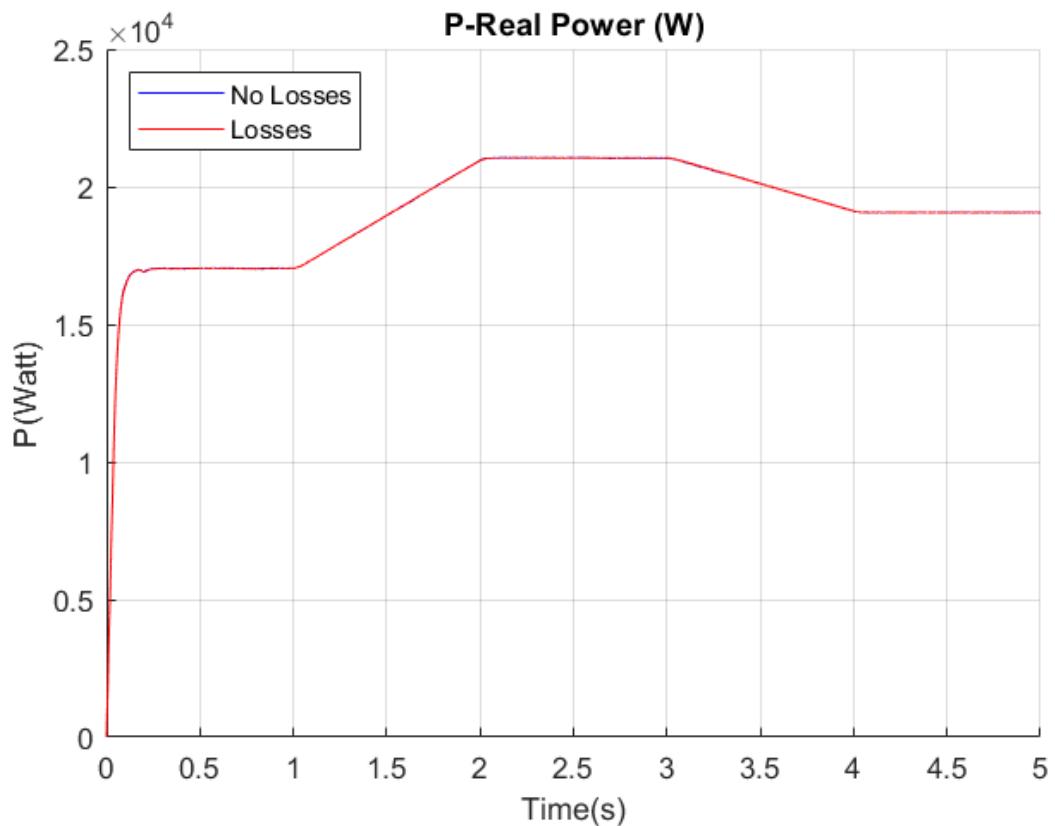
Petrurb and Observe-Losses/No Losses



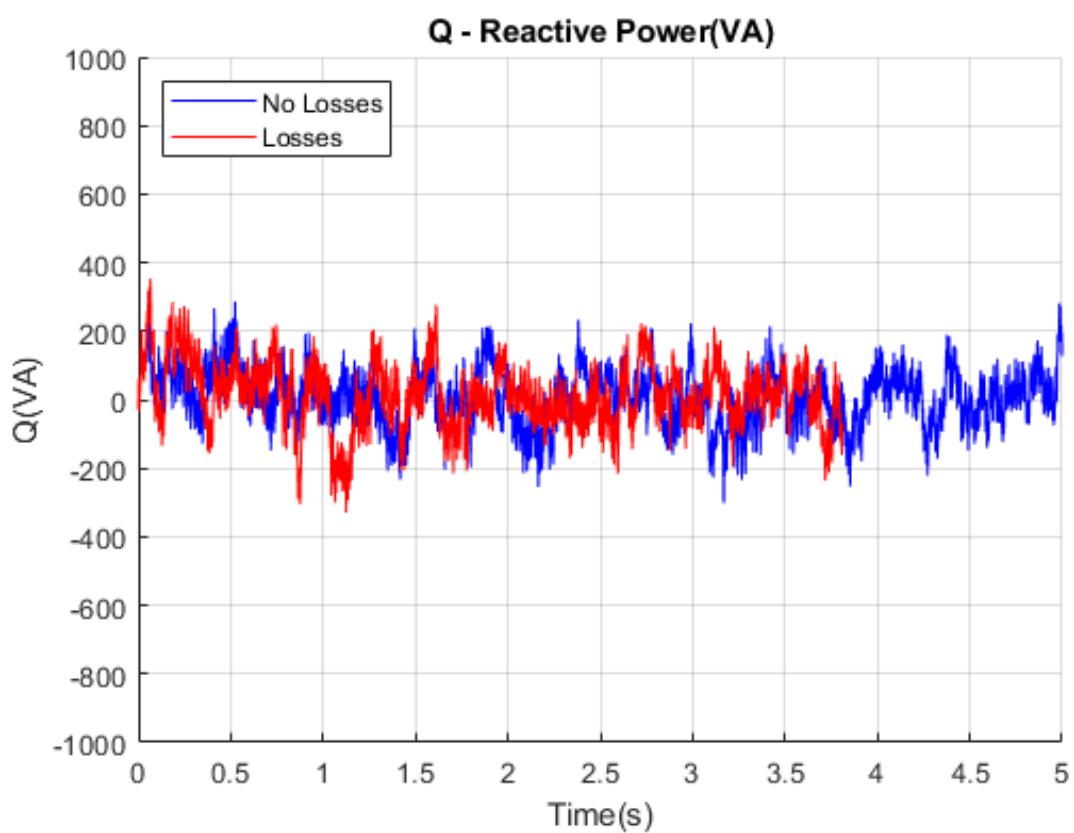
Petrurb and Observe-Losses/No Losses



Petrurb and Observe-Losses/No Losses



Petrurb and Observe-Losses/No Losses



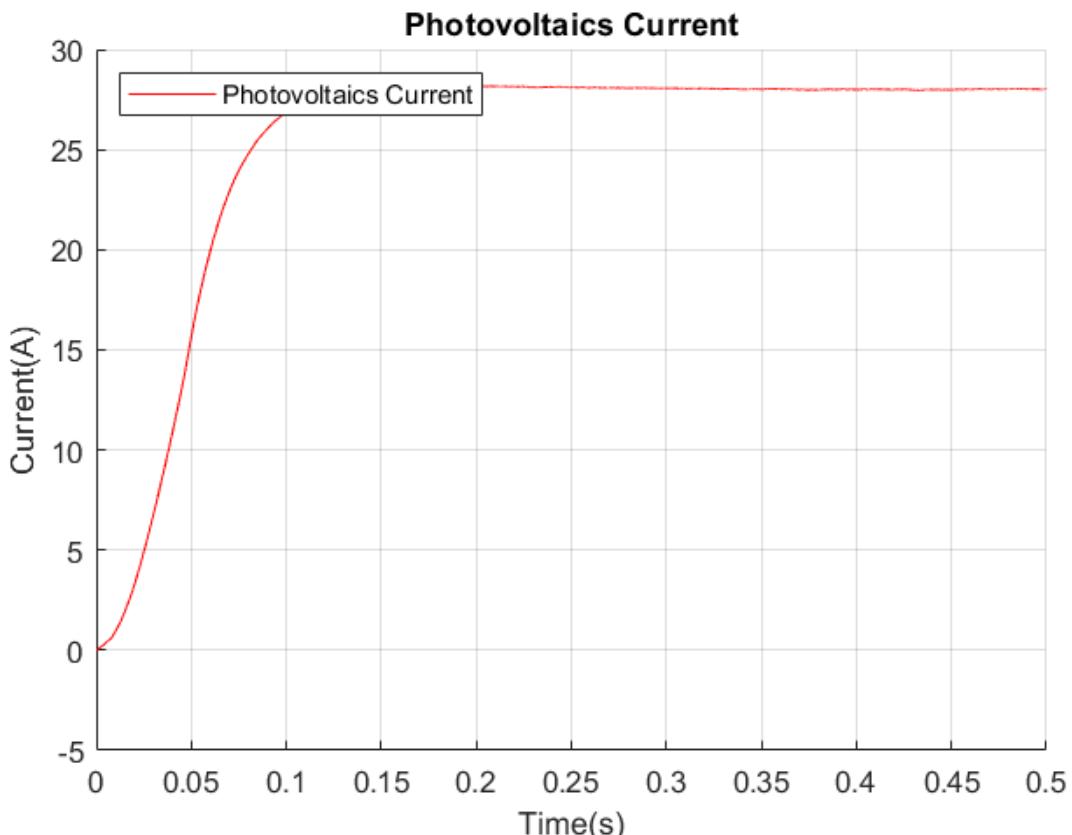
Από τις παραπάνω γραφικές μπορούμε εύκολα να συνάγουμε το συμπέρασμα πως για τον Αλγόριθμο Perturb and Observe , η χρήση του βελτιωμένου τύπου ισχύος , όπου οι απώλειες συμπεριλαμβάνονται, δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική διαφορά στο σημείο Μέγιστης Παραγωγής Ισχύος. Οι γραφικές παραμένουν ίδιες , το ρεύμα φωτοβολταϊκού και η παραγόμενη ισχύς ακολουθούν την ακτινοβολία, η τάση του παραμένει σταθερή , η τάση στον Δίαυλο φτάνει ταχύτατα τα 1200 Volt και η άρεγος ισχύος έχει μηδενική μέση τιμή. Ωστόσο αξίζει να σημειώσουμε ακόμη και αυτή την μικρή βελτίωση στην απόδοση του συστήματος μας , καθώς το ρεύμα μειώνεται ελάχιστα και συνεπώς οι απώλειες με αποτέλεσμα την ελαφριά αύξηση της απόδοσης όπως αναμέναμε από τα παραπάνω αποτελέσματα.

## **7.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων υπό συνθήκες μερικής σκίασης:**

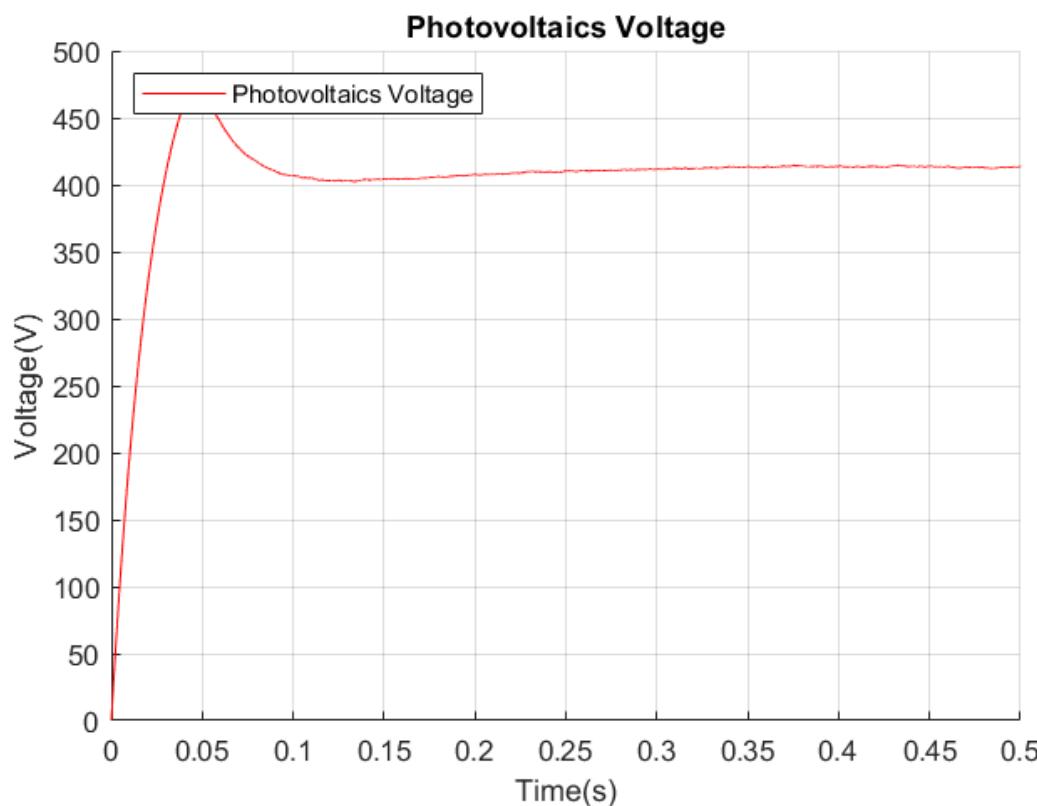
Στο σενάριο αυτό εφαρμόζουμε στην προσομοίωση μερικής σκίασης τους διαφορετικούς αλγόριθμους εύρεσης Μέγιστου Σημείου Παραγωγής Ισχύος και παρατηρούμε τις διάφορες αποκρίσεις και γραφικές που χαρακτηρίζουν το σύστημα. Έτσι καταλήγουμε σε συμπεράσματα και μπορούμε να αποφανθούμε για την ικανότητα τους να λειτουργούν υπό αυτές τις συνθήκες και να μας οδηγούν στην βέλτιστη λειτουργία η οποία ασφαλώς είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών και η παραγωγή όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ισχύος.

### **7.2.1 Perturb and Observe χωρίς απώλειες:**

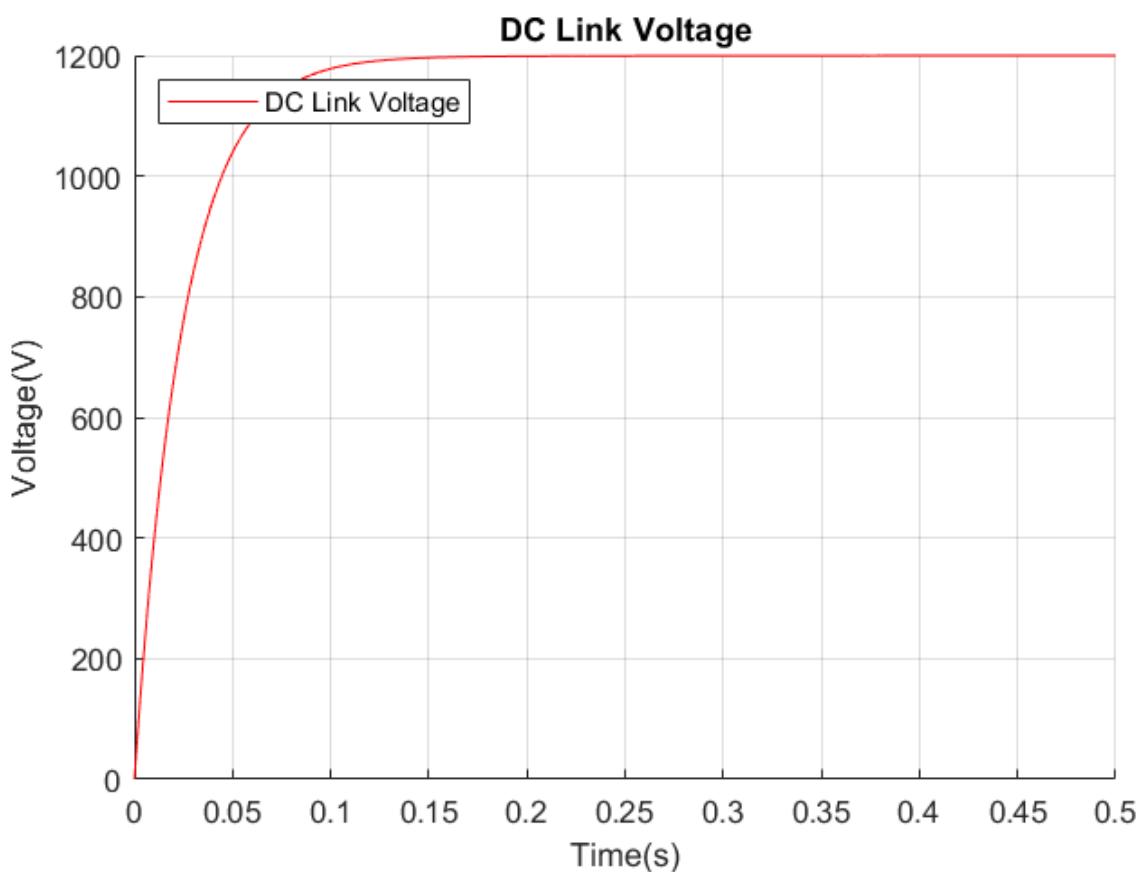
Petrurb and Observe-No Losses



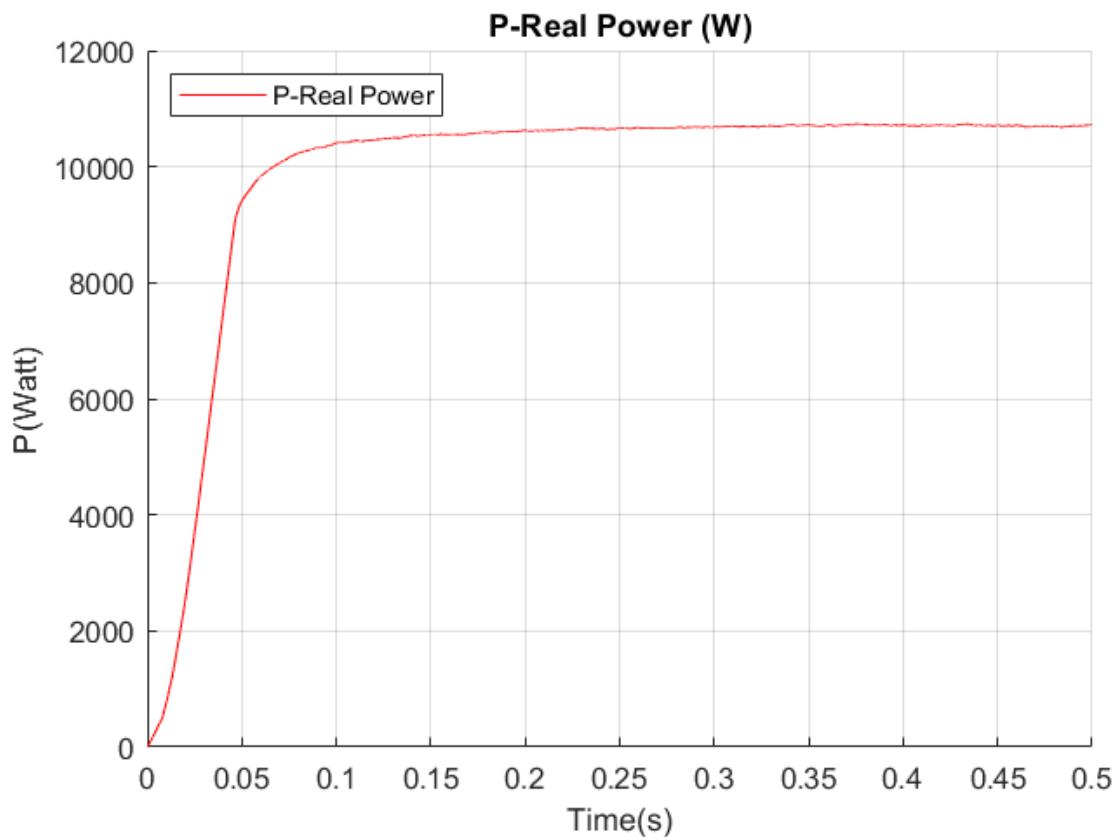
Petrurb and Observe-No Losses



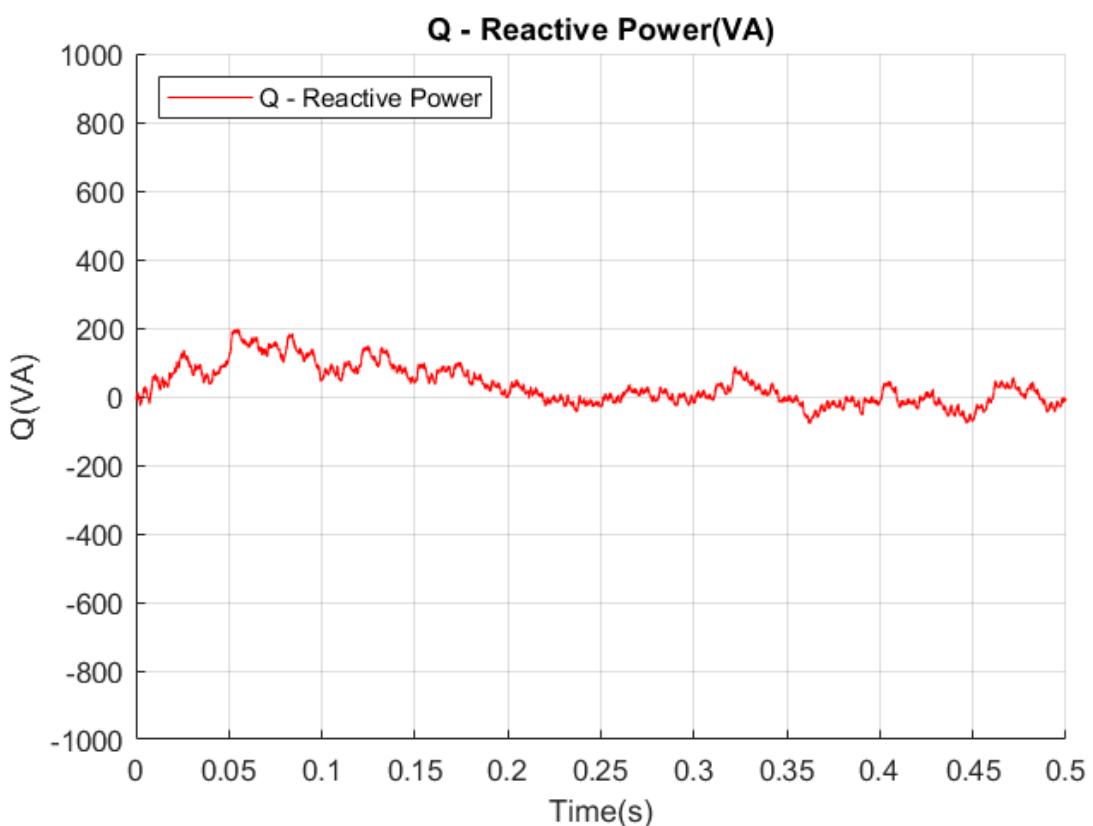
Petrurb and Observe-No Losses



### Petrurb and Observe-No Losses



### Petrurb and Observe-No Losses

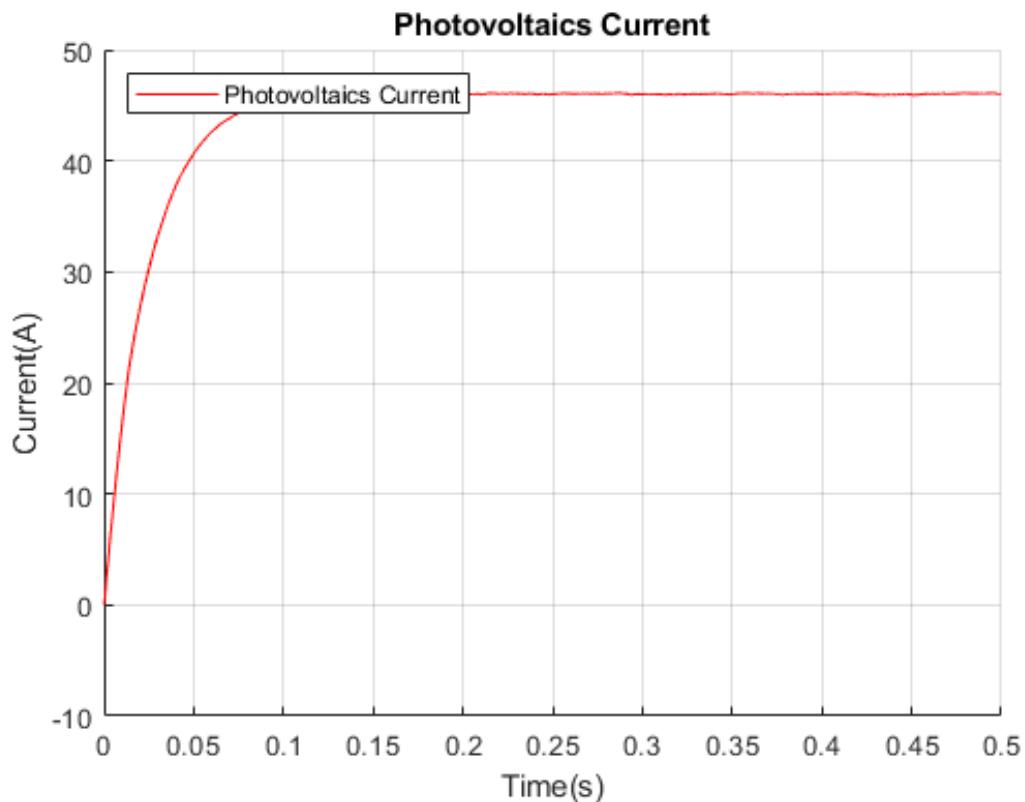


Από τις παραπάνω γραφικές παρατηρούμε πως ο αλγόριθμος Perturb and Observe οδηγεί πολύ γρήγορα το σύστημα που προσομοιώνεται στα 28 Amper, τιμή την οποία αναγνωρίζει ως την μέγιστη τιμή παραγωγής ισχύος από το φωτοβολταϊκό. Παρατηρούμε επίσης ότι η τάση του φωτοβολταϊκού, όπως και το ρεύμα του, παραμένουν σταθερά, με αποτέλεσμα το ίδιο να κάνει και η ισχύς που παράγεται από αυτό στην τιμή των 10.2kW. Αξίζει επίσης να αναφέρουμε την γρήγορη σταθεροποίηση της τάσης στον δίαυλο στα 1200 Volt, όπου είναι η επιθυμητή τιμή καθώς και τον μηδενισμό της μέσης τιμής άεργου ισχύος.

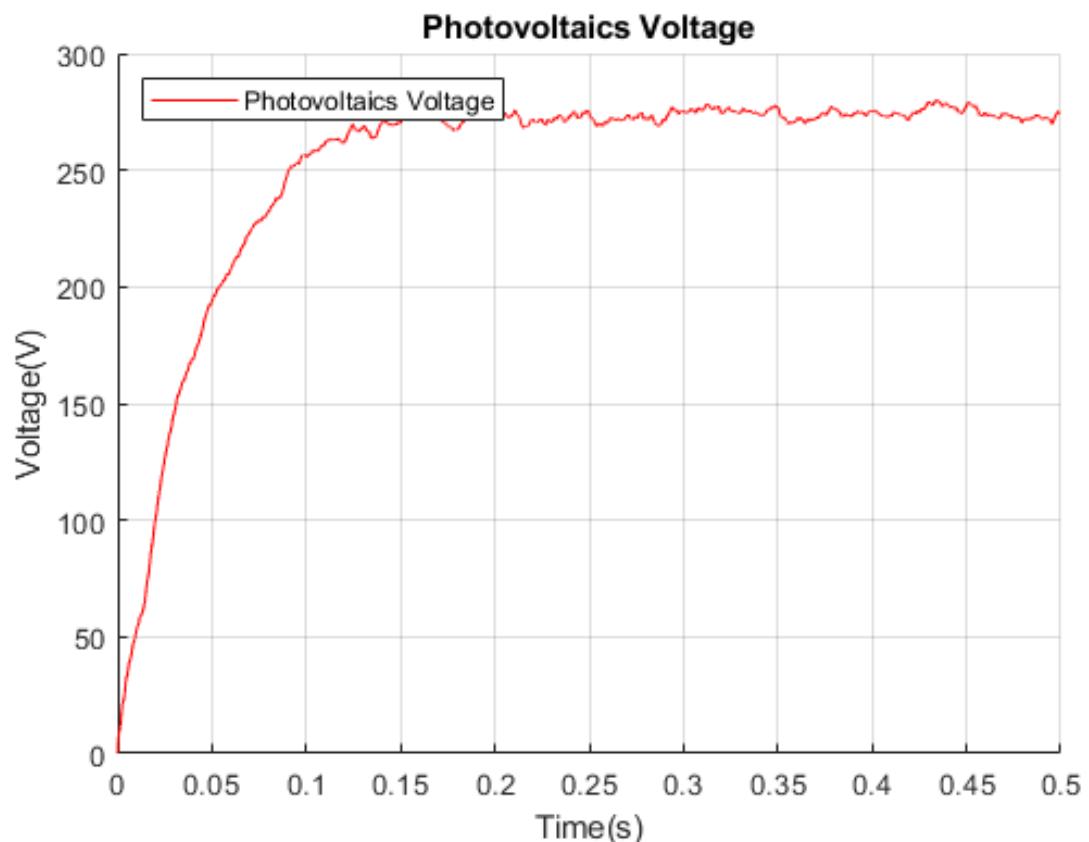
Από τις γραφικές που συγκλίνει ο P&O αλγόριθμος μπορούμε να αποφανθούμε με σιγουριά, από τις χαρακτηριστικές του συστήματος που εξήγαμε προηγουμένως πως οδηγείται στο GMPP, ωστόσο αυτό αποτελεί τυχαία σύμπτωση μιας και το πρώτο μέγιστο που συναντάει κατά την λειτουργία του, είναι και το ολικό μέγιστο. Σε διαφορετική περίπτωση η λειτουργία του δεν θα ήταν βέλτιστη και έτσι αποδεικνύεται η αδυναμία του σε περιπτώσεις μερικής σκίασης.

### 7.2.2 Particle Swarm Optimization χωρίς απώλειες:

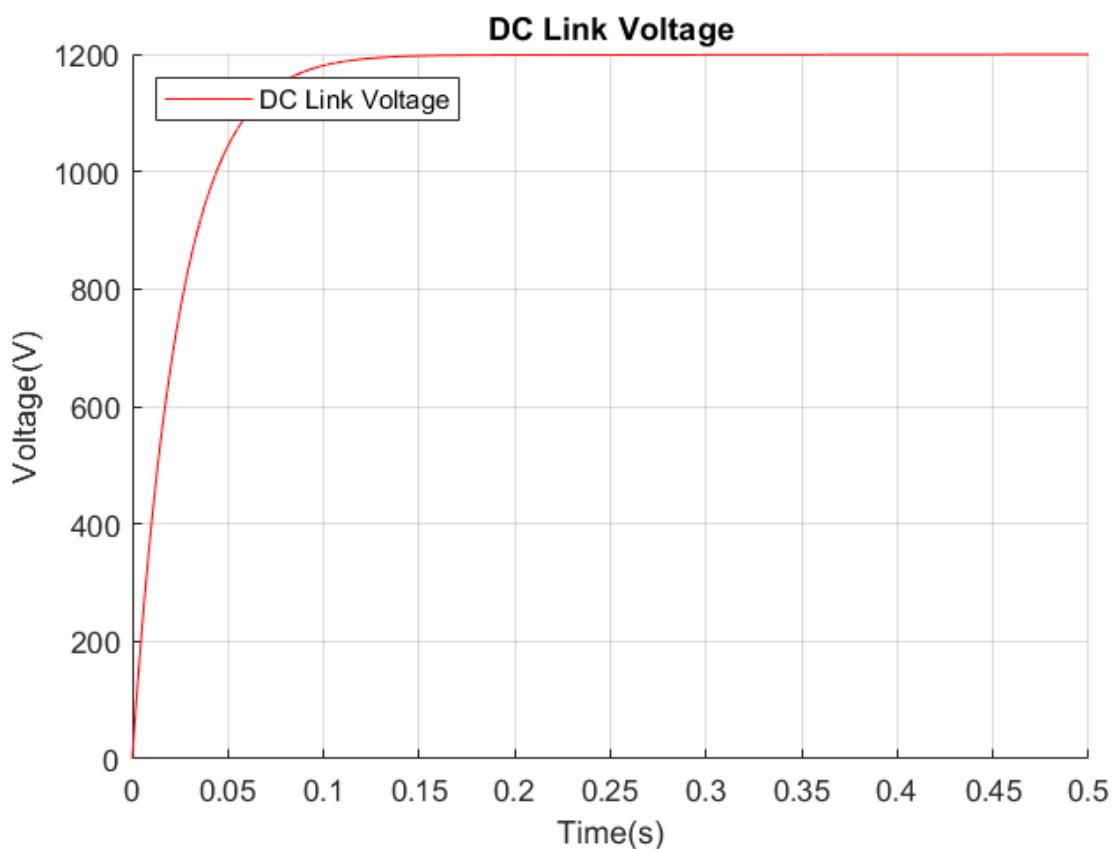
Particle Swarm Optimization-No Losses



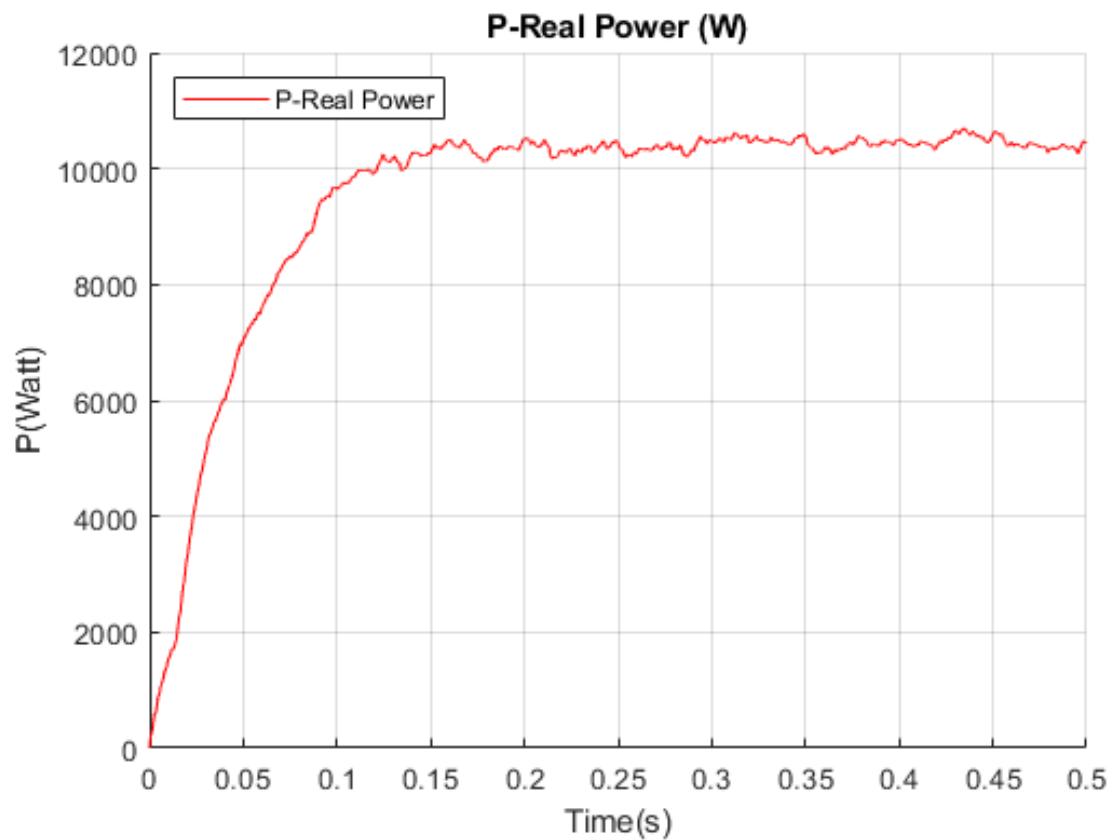
Particle Swarm Optimization-No Losses



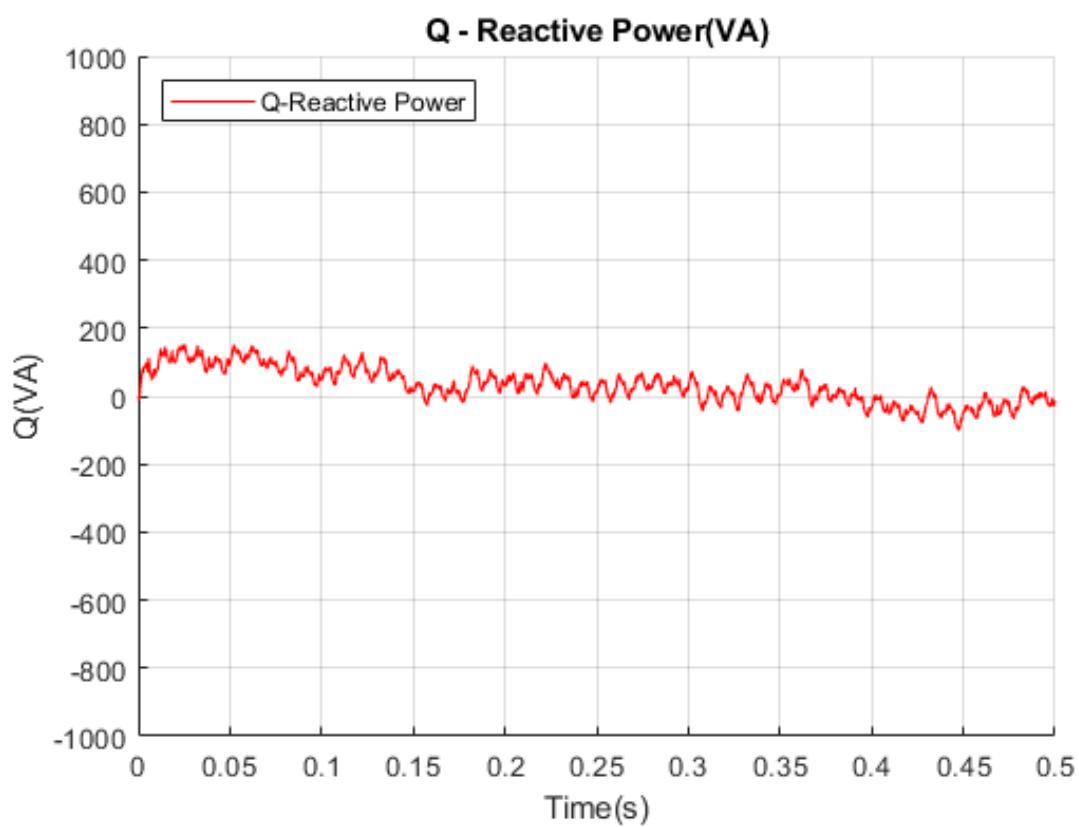
Particle Swarm Optimization-No Losses



Particle Swarm Optimization-No Losses

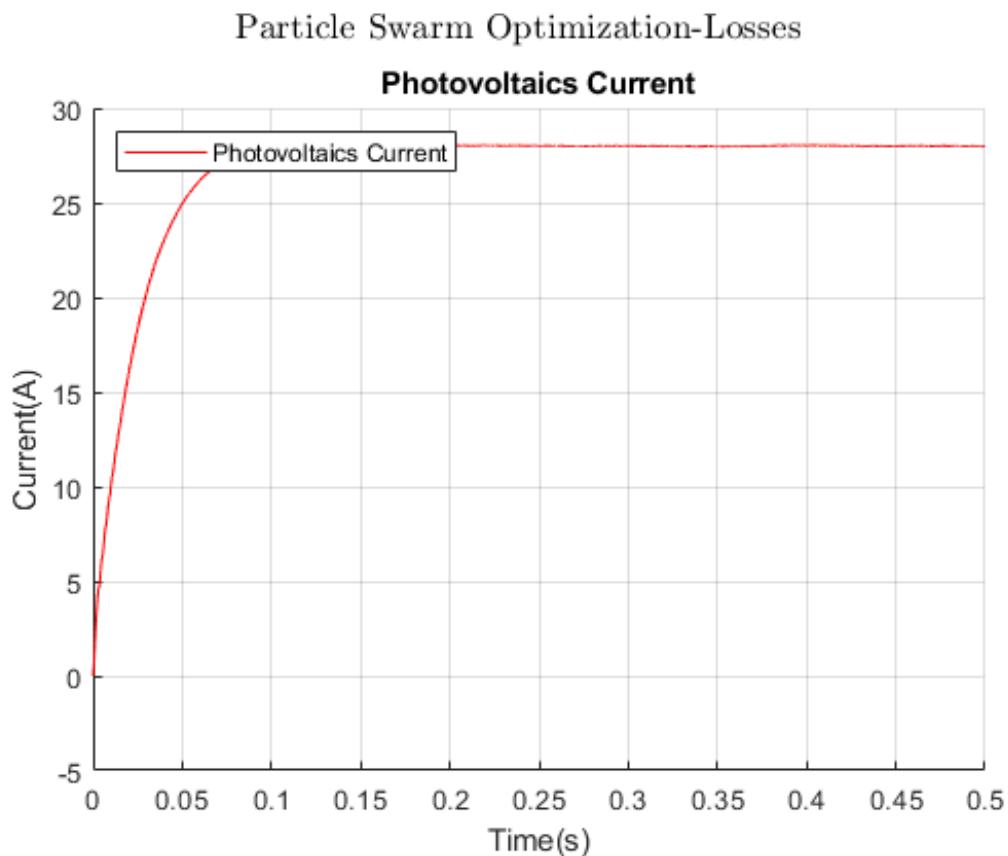


Particle Swarm Optimization-No Losses

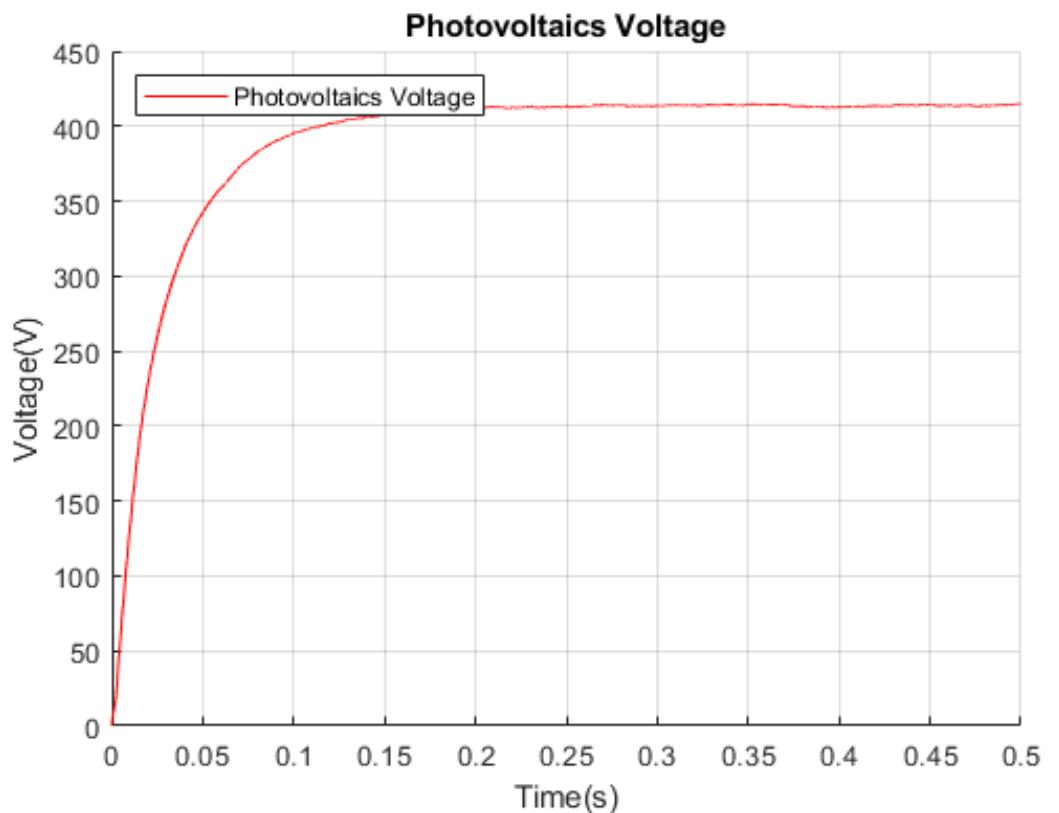


Παρατηρούμε μία απόκριση διαφορετική με εκείνη του αλγορίθμου Perturb and Observe. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε το σύστημά μας να οδηγείται στην τιμή ρεύματος 45Amper για τα φωτοβολταϊκά, αλλά μειωμένη τιμή τάσης, γεγονός που συνεπάγεται και την μειωμένη παραγωγή ενέργειας από το σύστημα μας και πιο συγκεκριμένα σχεδόν 10kW. Όσο αναφορά την άεργο ισχύ , η μέση τιμή της βρίσκεται στο μηδέν ενώ η τάση στον δίαυλο για άλλη μια φορά οδηγείται ταχύτατα στην επιθυμητή τιμή των 1200 Volt. Από την τελική τιμή που οδηγεί ο PSO χωρίς απώλειες το ρεύμα μπορούμε να επιβεβαιώσουμε την υπόθεση μας για την σημαντικότητα συνυπολογισμού των απωλειών στον τύπο. Βλέπουμε λοιπόν βάσει των χαρακτηριστικών , πως ο αλγόριθμος οδηγείται σε ένα σημείο που είναι το φαινομενικά ολικό μέγιστο αν δεν συνυπολογίσουμε τις απώλειες , όμως στην πραγματικότητα αποτελεί σημείο τοπικού μεγίστου!

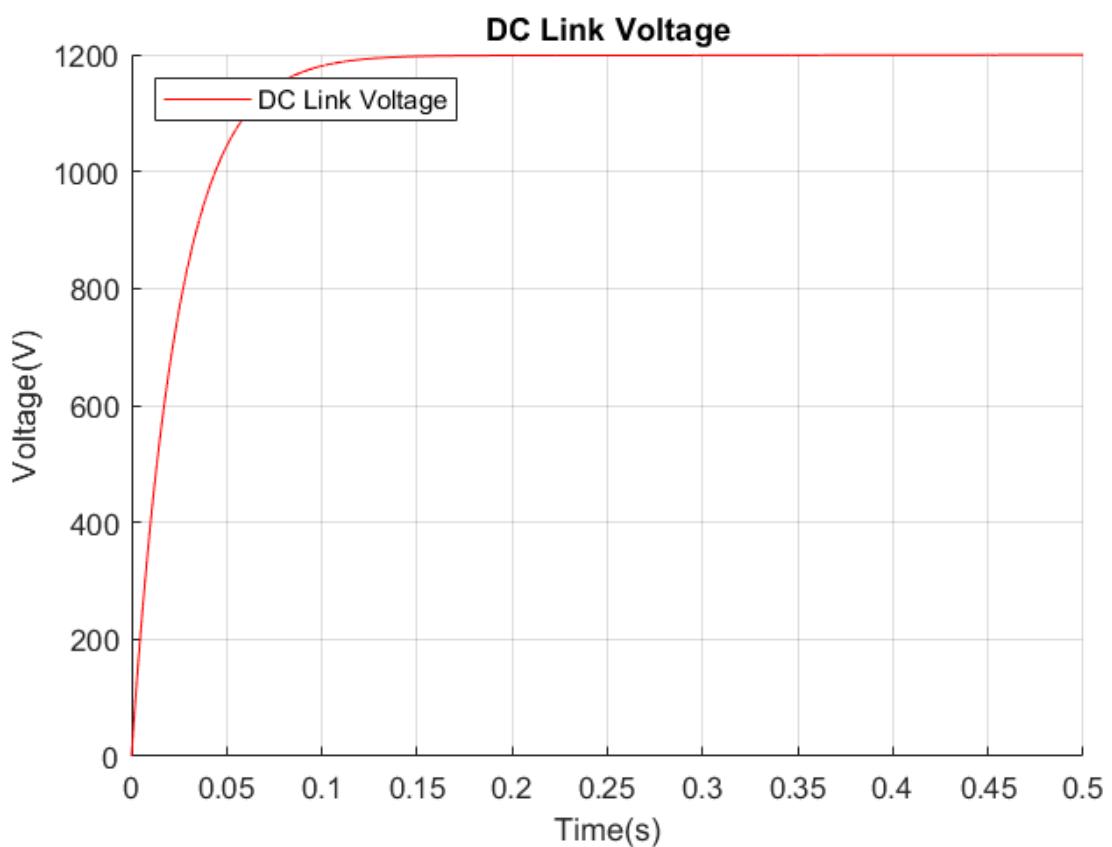
### 7.2.3 Particle Swarm Optimization με απώλειες:



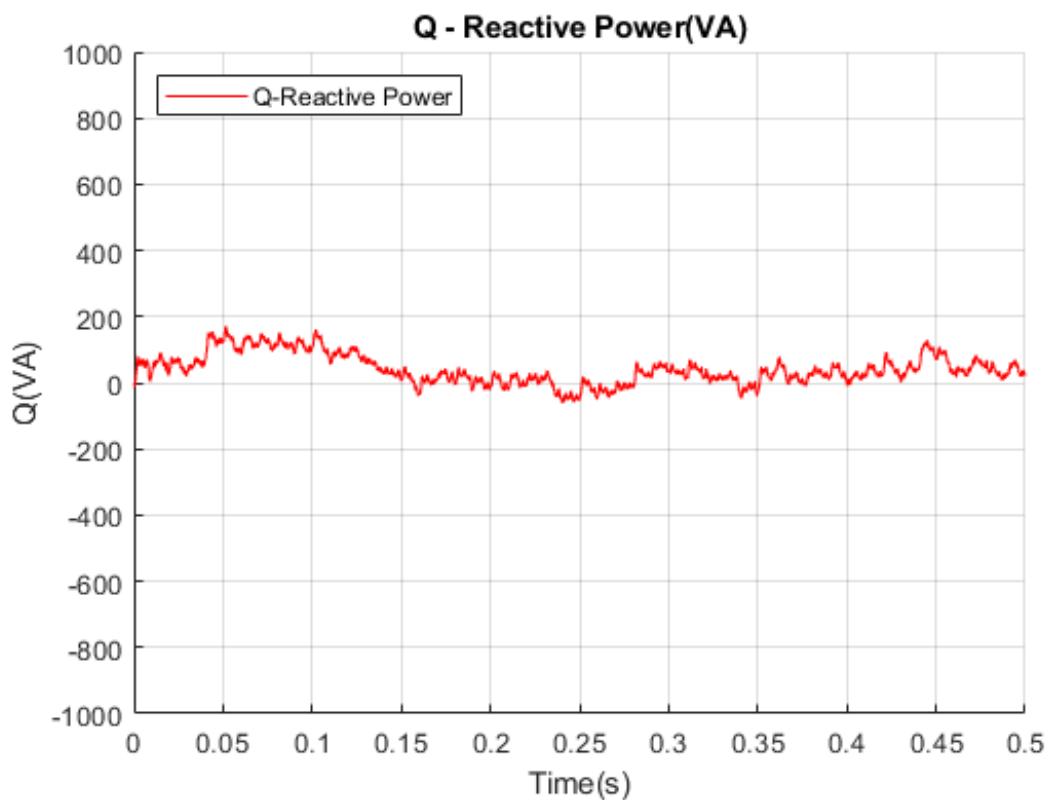
### Particle Swarm Optimization-Losses



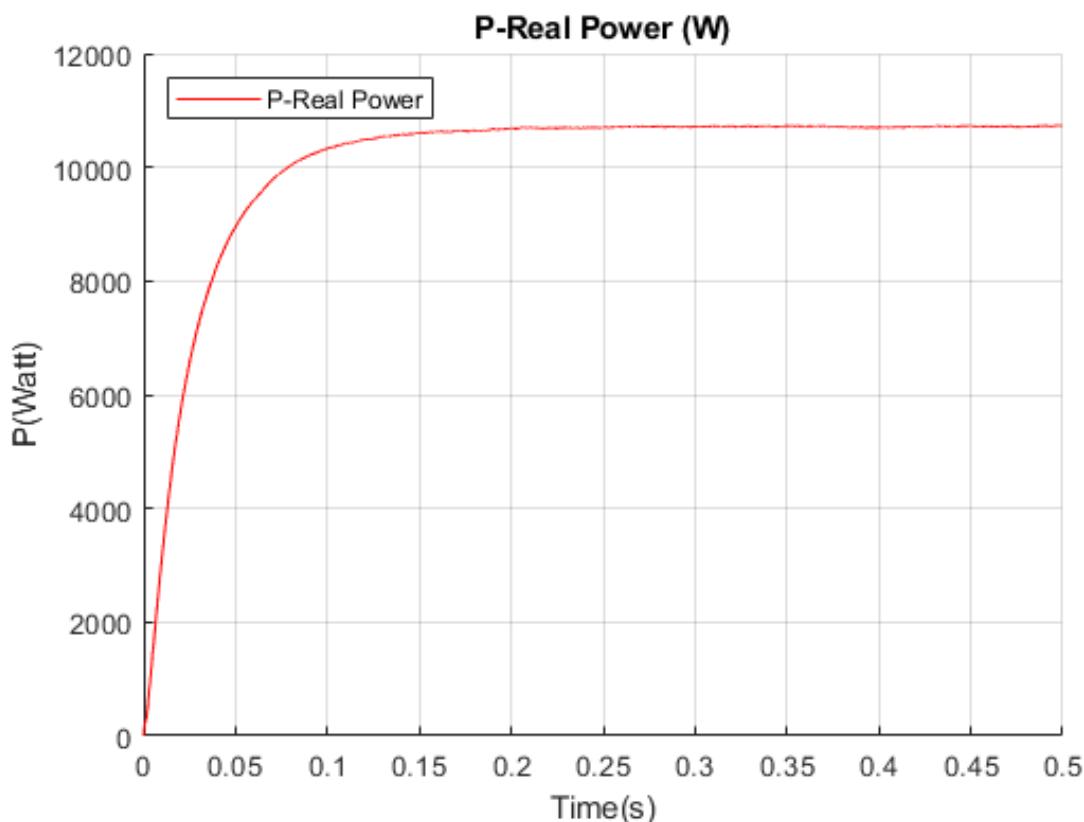
### Particle Swarm Optimization-No Losses



### Particle Swarm Optimization-Losses



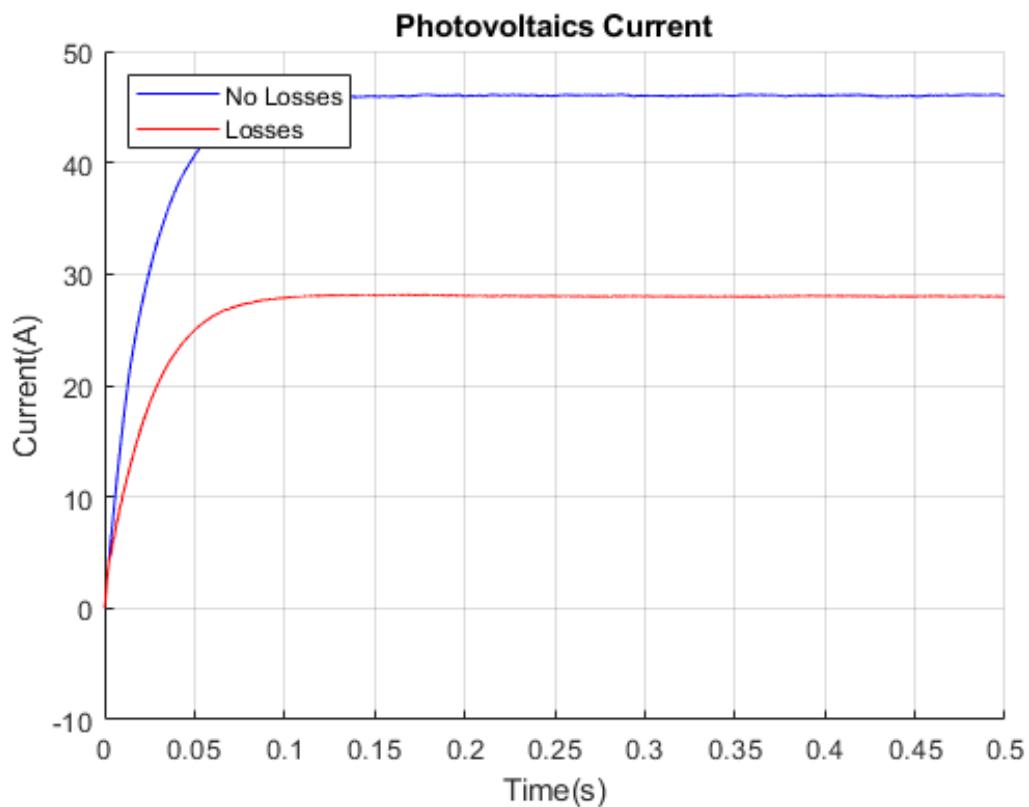
### Particle Swarm Optimization-Losses



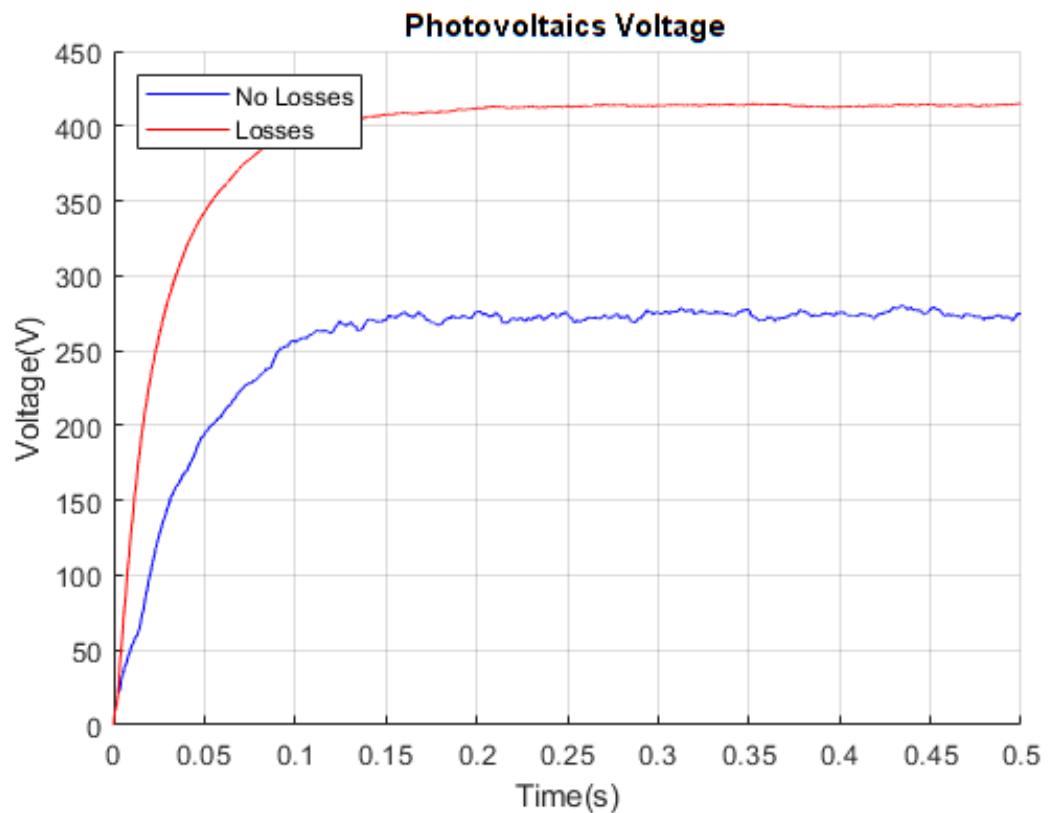
Στις παραπάνω γραφικές διακρίνουμε πως το ρεύμα του φωτοβολταϊκού οδηγείται περίπου στην τιμή των 28 Amper και η τάση του στα 420 Volt. Ακόμη η Ισχύς που παράγεται είναι

της τάξης των 10.5kW και η τάση στον DC Δίαυλο οδηγείται γρήγορα στα 1200 Volt. Τέλος για ακόμη μία φορά η Άεργος Ισχύς έχει μέση τιμή μηδέν , ολοκληρώνοντας έτσι την επιθυμητή λειτουργία του ελέγχου μας. Στην συνέχεια θα συγκρίνουμε τις δύο λειτουργίες του συστήματος με τους Αλγόριθμους PSO με και χωρίς απώλειες.

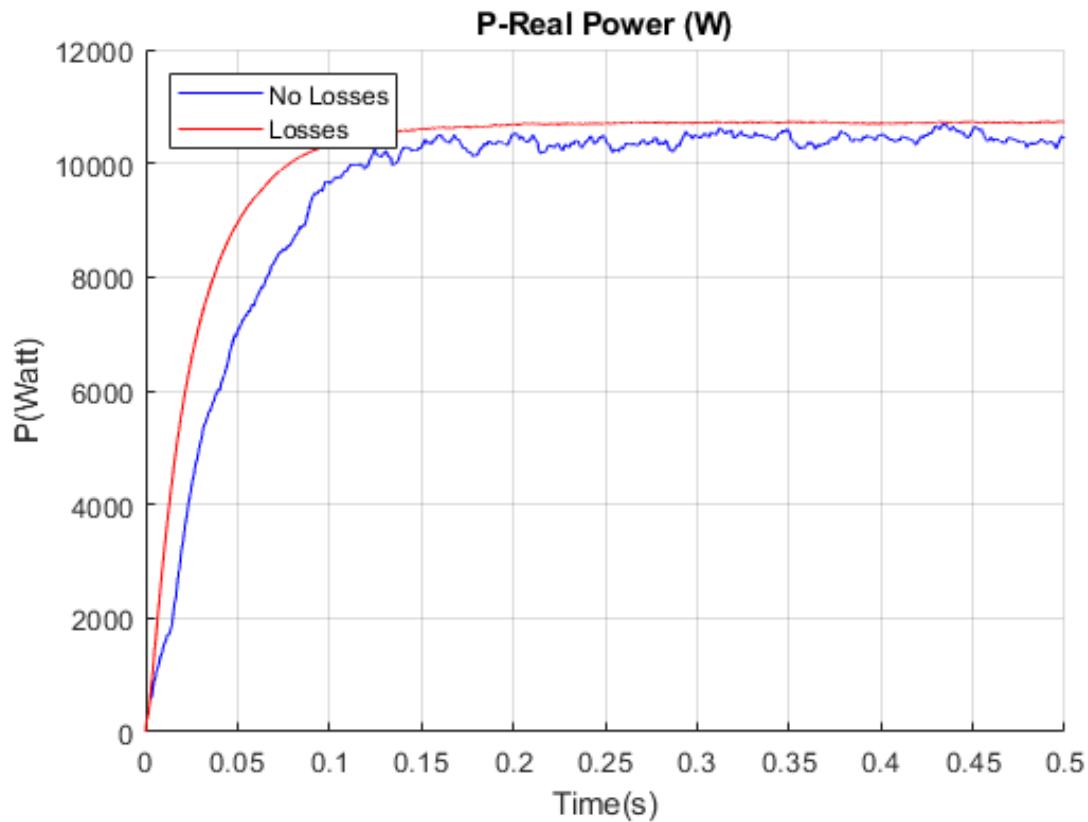
Particle Swarm Optimization-Losses/No Losses



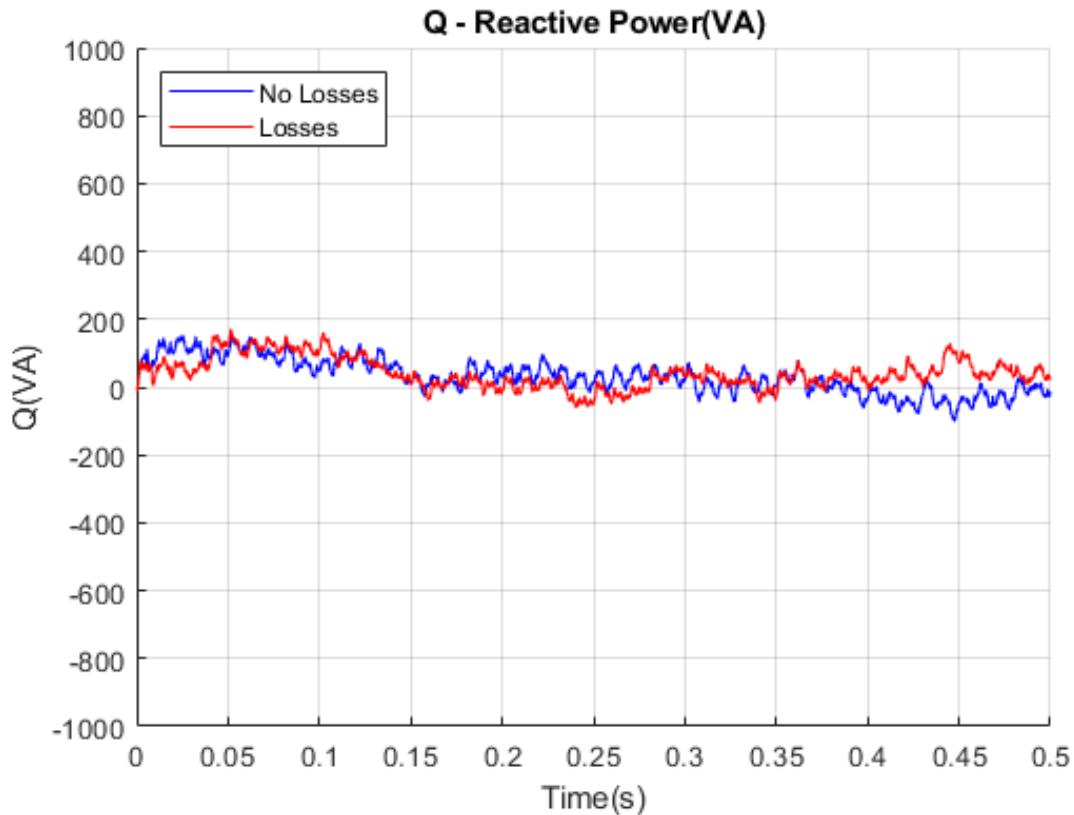
Particle Swarm Optimization-Losses/No Losses



Particle Swarm Optimization-Losses/No Losses



## Particle Swarm Optimization-Losses/No Losses

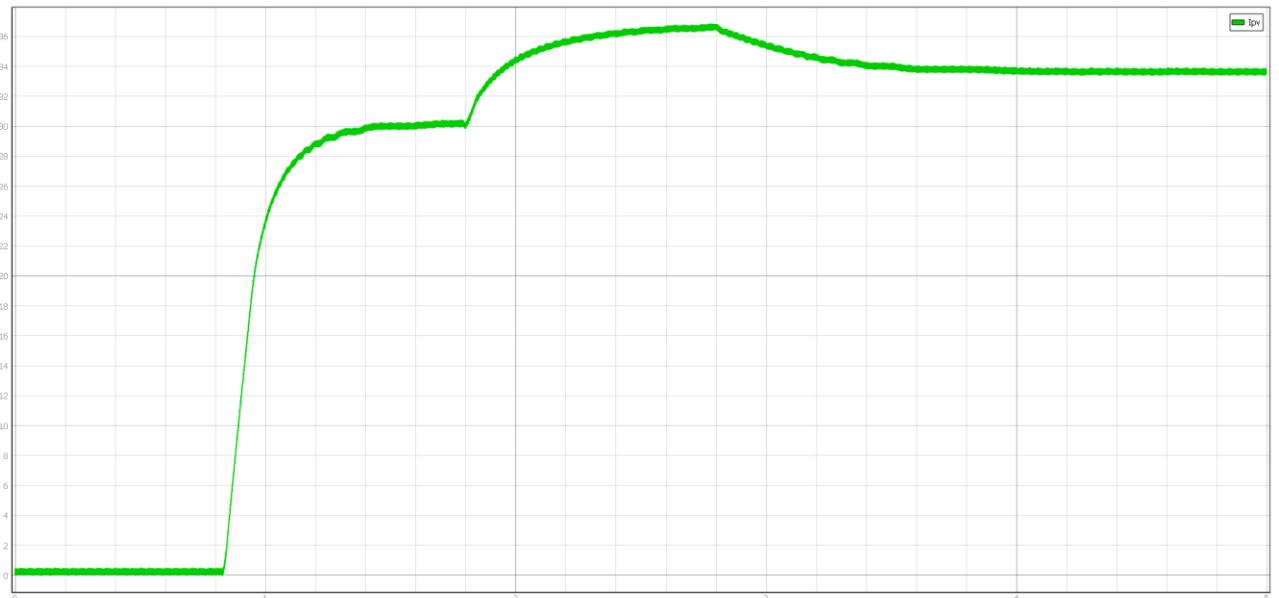


Στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις είναι εύκολο να διακρίνουμε τις διαφορετικές λειτουργίες του συστήματος , ακόμη και αν η μοναδική διαφορά των δύο αλγορίθμων είναι να συμπεριλάβουμε τις απώλειες. Πιο συγκεκριμένα για το ρεύμα του φωτοβολταϊκού , παρατηρούμε πως στην περίπτωση χωρίς υπολογισμό απωλειών οδηγείται στα 45 Amper περίπου , ενώ συνυπολογίζοντας τις οδηγείται στα 28 Amper , μια εμφανώς χαμηλότερη τιμή. Σχετικά με την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της φωτοβολταϊκής συστοιχίας , στην περίπτωση χωρίς απώλειες η τιμή της είναι στα 275 Volt περίπου , ενώ με απώλειες στα 410 Volt. Η άεργος ισχύς έχει την ίδια συμπεριφορά και στις δύο περιπτώσεις , δηλαδή όπως και προηγουμένως ταλαντεύεται γύρω από το μηδέν , ενώ την πραγματική ισχύ την αφήσαμε για το τέλος . Η πραγματική ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό μας είναι το πιο σημαντικό στοιχείο στην ανάλυση αυτή. Εξετάζοντας λοιπόν την γραφική της πραγματικής παραγωγής ισχύος από τα φωτοβολταϊκά , βλέπουμε πως στην περίπτωση που συνυπολογίζουμε τις απώλειες , η ισχύς που παράγεται τελικά από τα φωτοβολταϊκά μας , είναι μεγαλύτερη από εκείνη που παράγεται στην περίπτωση που δεν τις συνυπολογίζουμε. Αν θυμηθούμε τις χαρακτηριστικές του συστήματος αυτού από το κεφάλαιο 6 , θα καταλάβουμε τον λόγο που συμβαίνει αυτό . Δηλαδή , ο PSO χωρίς απώλειες , αναγνωρίζει το πρώτο μέγιστο ως το GMPP ενώ ο PSO με απώλειες το δεύτερο, εξού και η μεγάλη διαφορά στο ρεύμα λειτουργίας και την τάση του φωτοβολταϊκού. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα πως ο συνυπολογισμός των απωλειών , οδηγεί το σύστημα μας σε μία βέλτιστη κατάσταση , και μας προσφέρει την δυνατότητα να παράγουμε μεγαλύτερη ισχύ υπό συνθήκες μερικής σκίασης του φωτοβολταϊκού μας συστήματος.

### 7.3 Αποτελέσματα Πειραμάτων:

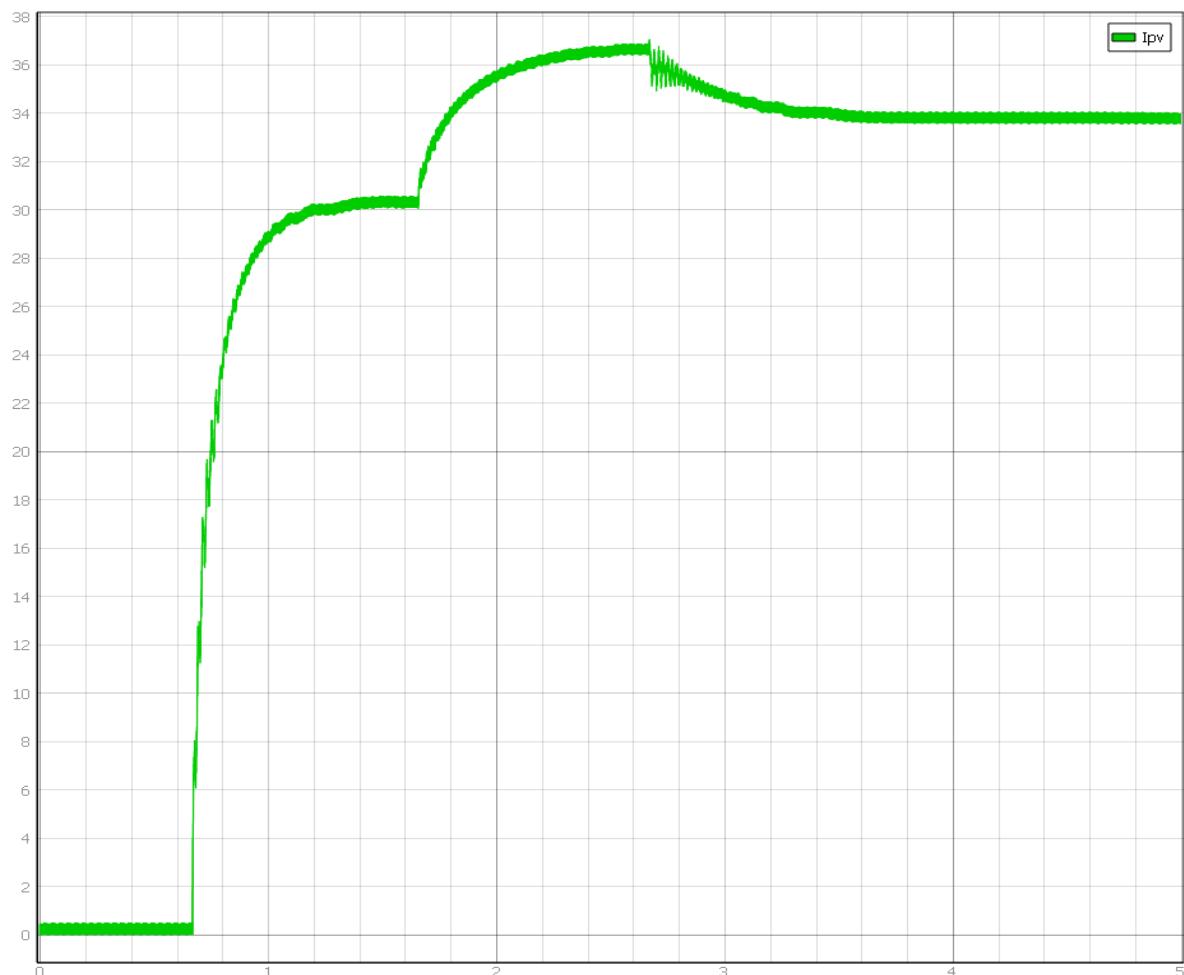
Στην συνέχεια , και προκειμένου να επιβεβαιώσουμε στην πράξη τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε μέσω των προσομοιώσεων , θα παρουσιάσουμε τις τιμές του ρεύματος που έλαβε το φωτοβολταϊκό με την χρήση των διαφορετικών αλγορίθμων και υπό τα 2 σενάρια , χωρίς και με μερική σκίαση. Έτσι μπορούμε να καταλήξουμε στην συμπεριφορά που χαρακτηρίζει το σύστημα και την διαδικασία που πρέπει να ακολουθήσουμε για την βέλτιστη λειτουργία του.

#### 7.3.1 Perturb and Observe χωρίς Σκίαση:



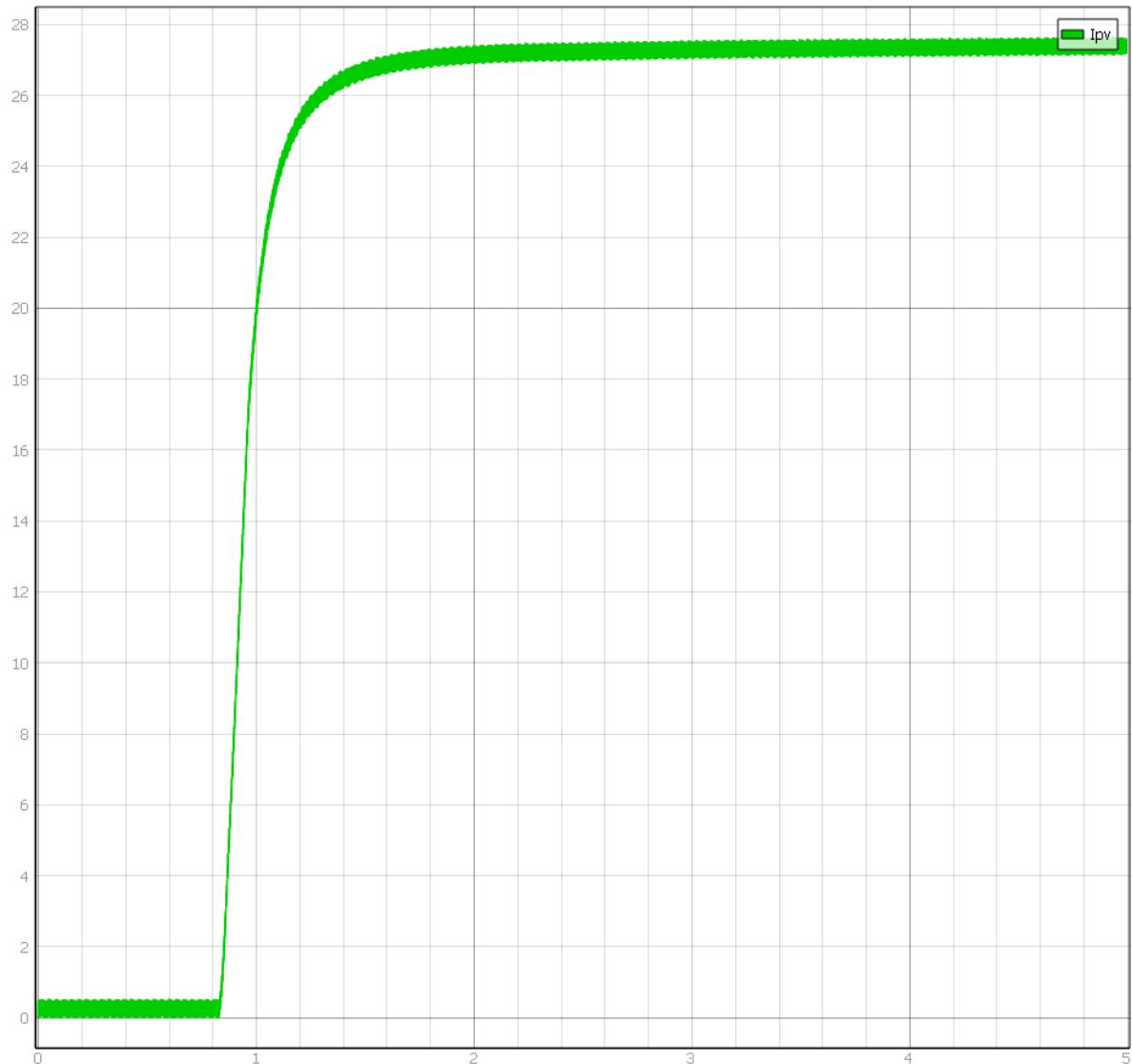
Στην παραπάνω γραφική παρουσιάζεται το ρεύμα του φωτοβολταϊκού κατά την περίπτωση χωρίς σκίαση με την μεταβολή της ακτινοβολίας από  $800\text{W/m}^2$  σε  $1000\text{W/m}^2$  και τέλος στα  $900\text{W/m}^2$ , και με την χρήση του MPPT Αλγορίθμου Perturb and Observe. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε πως το ρεύμα ακολουθεί την πορεία μεταβολής της ακτινοβολίας , με την αύξηση της παρατηρούμε αύξηση και του ρεύματος και αντίστοιχα με την μείωση. Η απόκριση του συστήματος στις μεταβολές είναι καλή και αυτό μπορούμε να το συμπεράνουμε από την απουσία ταλαντώσεων στην γραφική.

### 7.3.2 Particle Swarm Optimization χωρίς Σκίαση:



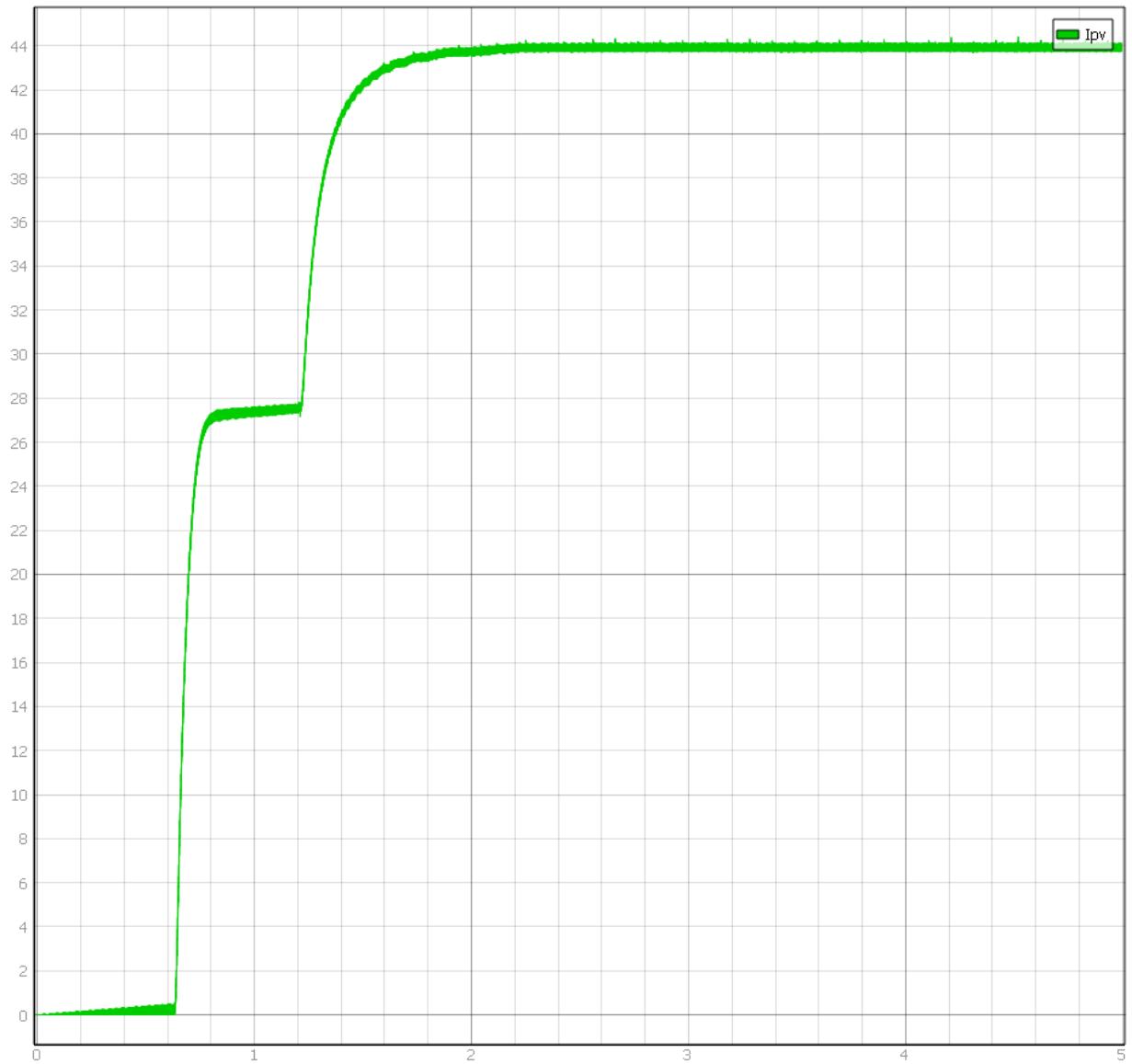
Στην περίπτωση αυτή επαναλαμβάνουμε το σενάριο με την χρήση του Αλγορίθμου PSO. Παρατηρούμε πως και ο Αλγόριθμος αυτός ακολουθεί την πορεία μεταβολής της ακτινοβολίας, ωστόσο αξίζει να σημειώσουμε πως η λειτουργία του δεν είναι βέλτιστη. Αν δούμε τις γραφικές προσεκτικά θα προσέξουμε την ταλάντωση που εμφανίζεται κατά την μείωση της ακτινοβολίας από  $1000\text{W/m}^2$  σε  $900\text{ W/m}^2$ . Αυτό μας δείχνει ότι έχει χειρότερη μεταβατική απόκριση.

### 7.3.3 Perturb and Observe μερική Σκίαση:



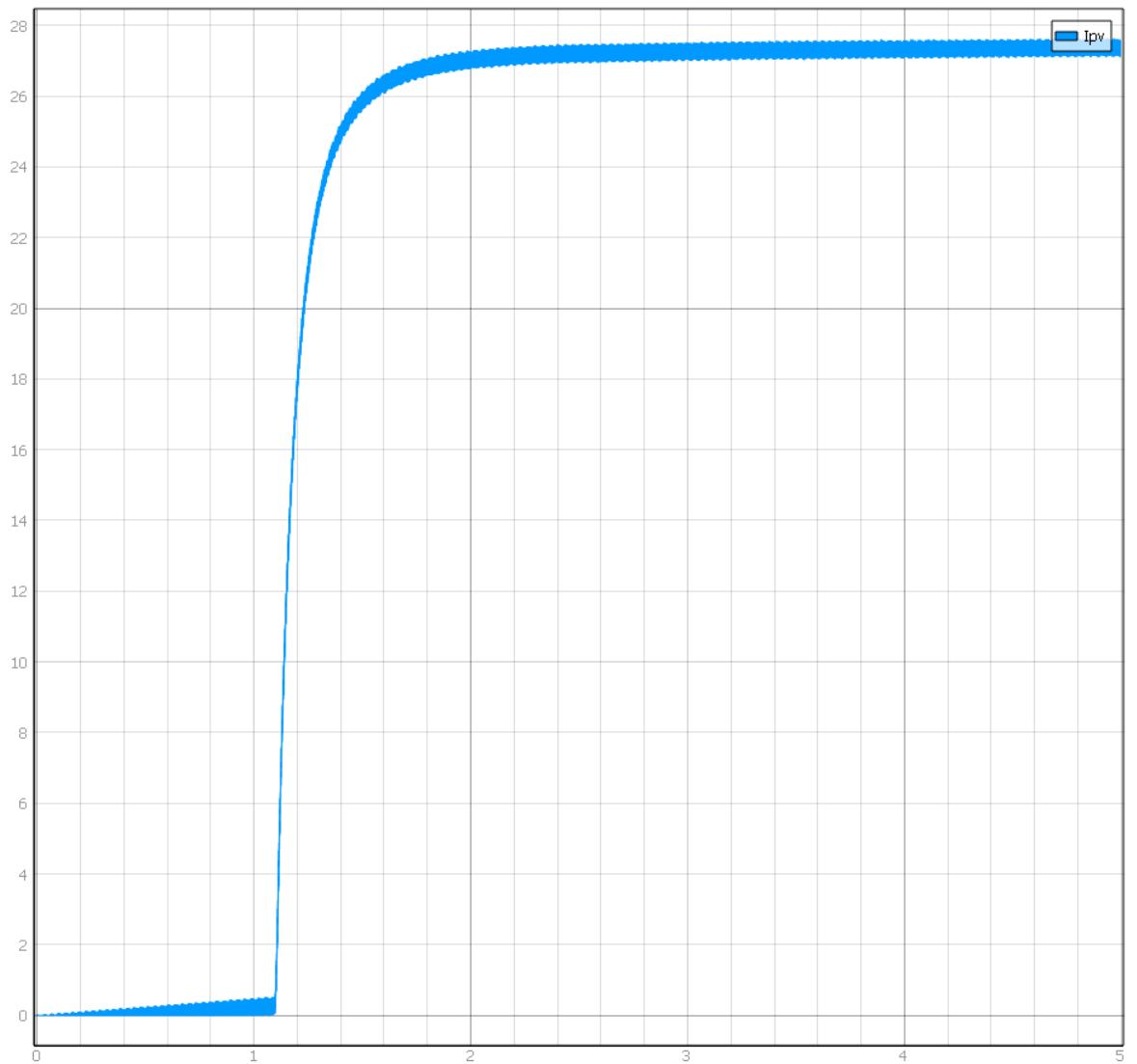
Από την παραπάνω γραφική επιβεβαιώνουμε τα όσα είπαμε στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την λειτουργία του P&O υπό συνθήκες μερικής σκίασης των φωτοβολταϊκών. Δηλαδή το ρεύμα του φωτοβολταϊκού και συνεπώς ο έλεγχος που εφαρμόζει ο αλγόριθμος σταματάει στο πρώτο μέγιστο που συναντάει.

#### 7.3.4 Particle Swarm Optimization μερική Σκίαση χωρίς απώλειες:



Εδώ ακριβώς φαίνεται η διαφορά μεταξύ του P&O και του Particle Swarm Optimization. Αναλυτικότερα βλέπουμε πως ο PSO αναγνωρίζει και τα δύο μέγιστα που παρουσιάζει το φωτοβολταϊκό μας σύστημα, ωστόσο επειδή στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχουμε συνυπολογίσει τις απώλειες καταλήγει στο σημείο των 45 Ampere, όπου δηλαδή θα έπρεπε να σταματάει και ο P&O στην συνθήκη μερικής σκίασης αφού δεν συνυπολογίσαμε τις απώλειες.

### 7.3.5 Particle Swarm Optimization μερική Σκίαση με απώλειες:



Παρατηρώντας την παραπάνω γραφική επιβεβαιώνουμε το σύνολο των όσων αναμέναμε να δούμε και μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα επαληθεύουν τα αποτελέσματα των προσδομοιώσεων. Το ρεύμα του φωτοβολταϊκού συγκλίνει στα 28 Ampere, ρεύμα το οποίο χαρακτηρίζει το πραγματικό GMPP. Αυτό επιτυγχάνεται με τον συνυπολογισμό των απωλειών στον PSO Αλγόριθμο.

Καταλήγουμε λοιπόν στα παρακάτω τελικά συμπεράσματα, όσο αφορούν την βελτίωση της απόδοσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας στο δίκτυο. Η χρήση των κατάλληλων MPPT Αλγορίθμων, ανάλογα με την περίπτωση σκίασης του φωτοβολταϊκού είναι καίριας σημασίας για την λειτουργία στο GMPP, μίας και οι συμβατικοί αλγόριθμοι φαίνεται να υπολειτουργούν υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Επίσης κομβικό ρόλο στα συστήματα μας έχουν οι απώλειες που παρουσιάζονται στους μετατροπείς ισχύος, την καλωδίωση και άλλα βασικά μέρη του, καθώς

μπορούν να οδηγήσουν σε μεταβολή του GMPP. Ο συνδυασμός των δύο αυτών χαρακτηριστικών , μαζί με ταυτόχρονο σωστό σχεδιασμό ελέγχου λειτουργούν το σύστημα μας στην βέλτιστη κατάσταση και οδηγούν σε βελτίωση της απόδοσης του έως και 5%.

# **Βιβλιογραφία.**

- [ 1 ] Bastidas, J., Ramos, C. y Franco, E. (2012). Modeling and parameter calculation of photovoltaic fields in irregular weather conditions. En: Ingeniería, Vol. 17, No. 1, pág. 37 - 48.
- [ 2 ] Kadeval, H. N. and Patel, V. K.. (2021). Mathematical modelling for solar cell, panel and array for photovoltaic system. Journal of Applied and Natural Science, 13(3), 937 – 943.
- [ 3 ] Vibhu Jately, Brian Azzopardi, Jyoti Joshi, Balaji Venkateswaran V, Abhinav Sharma, Sudha Arora. (2021). Experimental Analysis of hill-climbing MPPT algorithms under low irradiance levels. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [ 4 ] I.William Christopher, Dr.R.Ramesh. (2013). Comparative Study of P&O and InC MPPT Algorithms. American Journal of Engineering Research (AJER).
- [ 5 ] Sumedha Sengar. (2014). Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic System: A Review. International Review of Applied Engineering Research.
- [ 6 ] Omid Palizban, Kimmo Kauhaniemi. (2015). Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 797-813.
- [ 7 ] Γιαννακόπουλος, Γ. Β., & Βοβός, Ν. Α. (2008). Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας . Εκδόσεις ZHTH.
- [ 8 ] Ζαχαρίας Θωμάς. (2003). Ήπιες Μορφές Ενέργειας II. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
- [ 9 ] Πολυζάκης Απόστολος. (2019). Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη. Εκδόσεις P.H.C (Power Heat Cool).
- [ 10 ] Δέρβος Θ. Κωνσταντίνος. (2013). Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [ 11 ] A. Al-Diab, C. Sourkounis. (2010). Variable step size P&O MPPT algorithm for PV systems. 12th Intern.
- [ 12 ] Mohd Rizwan Sirajuddin Shaikh , Santosh B. Waghmare , Suvarna Shankar Labade , Pooja Vittal Fuke , Anil Tekale. (2017). A Review Paper on Electricity Generation from Solar Energy. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET).
- [ 13 ] Robert Lasseter, Abbas Akhil, Chris Marnay, John Stephens, Jeff Dagle, Ross Guttromson, A. Sakis Meliopoulos, Robert Yinger, and Joe Eto. (2002). Integration of Distributed Energy Resources.

[ 14 ] Κιοσκερίδης, I. N. (2019). Ηλεκτρονικά Ισχύος 2η Έκδοση. Εκδόσεις Τζιόλα.

[15 ]Optimization of MPP tracking algorithms for PVs with the impact of losses  
minimized Zaint A. Alexakis and Antonio T. Alexandridis, Member, IEEE