



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ, ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ Α.Π.Ε

Ανάπτυξη Ηλεκτρονικού Συστήματος Ρύθμισης
της Παραγωγής Ισχύος Φωτοβολταϊκών
Συστοιχιών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Μικέλ Ρόπη

Εξεταστική Επιτροπή

Ευτύχιος Κουτρούλης, Αναπληρωτής Καθηγητής(Επιβλέπων)

Γεώργιος Σταυρακάκης, Καθηγητής

Απόστολος Δόλλας, Καθηγητής

Χανιά, Φεβρουάριος 2022

Περίληψη

Στις ημέρες μας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα θεωρούνται ευρέως ως εναλλακτική επιλογή έναντι των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε διάφορες συνδεσμολογίες (σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμό των δύο), τα οποία με τη σειρά τους σχηματίζουν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Όταν φωτοβολταϊκές συστοιχίες λειτουργούν υπό συνθήκες μερικής σκίασης είναι πιθανό να εμφανιστούν απώλειες σε ισχύ. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η μείωση ισχύος απαιτούνται τόσο η χρήση υψηλών σε βαθμό απόδοσης ηλεκτρονικών ισχύος όσο και κατάλληλα συστήματα ελέγχου. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος που ρυθμίζει την παραγόμενη ισχύ φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Το σύστημα αποτελείται από δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά, έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης που λειτουργεί σε ασυνεχή αγωγή, ένα σύστημα ελέγχου βασισμένο σε FPGA, καθώς και δύο μπαταρίες μολύβδου, συνδεδεμένες σε σειρά, ως φορτίο. Το σύστημα ελέγχου αναπτύχθηκε με τη χρήση της γλώσσας υλικού VHDL και βασίζεται στην ανάπτυξη μια νέας μεθόδου ανίχνευσης μέγιστου σημείου ισχύος, βάσει του οποίου ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης ελέγχεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να συμπεριφέρεται ως ένα φορτίο το οποίο απορροφά σταθερή και προγραμματιζόμενη ισχύ στην είσοδό του. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε Matlab, Simulink καθώς και στο προσομοιωτή γλώσσας υλικού-Modelsim επιβεβαιώνουν τη σωστή λειτουργία του συστήματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα, έδειξαν ότι εξασφαλίζεται η σύγκλιση στο ολικό μέγιστο σημείο ισχύος.

Λέξεις Κλειδιά

Φωτοβολταϊκά συστήματα, μετατροπέας ανύψωσης τάσης, λειτουργία ασυνεχούς αγωγής, ανίχνευση μέγιστου σημείου ισχύος, FPGA.

Abstract

Nowadays, Photovoltaic(PV) systems are widely regarded as alternatives to conventional power generation systems. A PV system consists of PV modules connected in various configurations (i.e in series, parallel, series-parallel, etc.), which form a PV array. When PV arrays are operating under partial shading conditions, power losses may occur. To counter this power reduction, efficient power electronics technologies and proper control schemes are needed. The subject of this thesis is the development of an electronic system for regulating the power produced from PV arrays. The system consists of two PV modules connected in series, a DC-DC Boost converter that operates in Discontinuous Conduction Mode (DCM), a control system based on FPGA, and two lead-acid batteries (connected in series) as a load. The control system was developed in VHDL and is based on a new method of Maximum Power Point Tracking (MPPT), which controls a Boost converter connected at the PV array output, in such a way, that it behaves as a constant input-power load. The simulation results in Matlab and Simulink as well as in Modelsim HDL simulator verify the proper functionality of the system. The experimental results showed that the system is functioning properly in most partial-shading cases.

Keywords

Photovoltaic (PV) systems, Boost Converter, Discontinuous Conduction Mode (DCM), Maximum Power Point Tracking (MPPT), FPGA.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον αναπλ. καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχιο για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Α.Π.Ε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές Γεώργιο Σταυρακάκη και Δόλλα Απόστολο για το χρόνο που διέθεσαν να μελετήσουν την παρούσα διπλωματική εργασία. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του φίλους μου και ιδιαίτερα τον Γ. Βουγιούκα για την φιλοξενία που μου παρείχε κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου και τον αδελφό μου για την συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες	v
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Σχημάτων	xii
Κατάλογος Πινάκων	xiii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας	3
1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας	3
2 Φωτοβολταϊκά συστήματα	5
2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία-φωτοβολταϊκό φαινόμενο	5
2.2 Φωτοβολταϊκές συστοιχίες	6
2.3 Μαθηματική ανάλυση φωτοβολταϊκών στοιχείων	8
2.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας φωτοβολταϊκών στοιχείων	10
2.4.1 Λειτουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σταθερές συνθήκες	10
2.4.2 Λειτουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μεταβαλλόμενες συνθήκες . .	13
2.4.3 Φαινόμενο μερικής ή ολικής σκίασης	14
2.5 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών συστημάτων	18
2.5.1 Διακοπτικοί μετατροπείς DC-DC	19
2.5.1.1 Έλεγχος μετατροπών DC-DC	20
2.5.1.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost Converter)	22
2.5.1.3 Λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος	22
2.5.1.4 Όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ρεύματος	24
2.5.1.5 Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος	27
2.5.1.6 Κυμάτωση τάσης εξόδου	29

2.5.2	Μονάδα ελέγχου-MPPT	30
2.5.2.1	Μέθοδος Perturb & Observe (P&O)	31
3	Ανάλυση του προτεινόμενου συστήματος	35
3.1	Γενική περιγραφή νέας μεθόδου MPPT	35
3.2	Περιγραφή του συστήματος που αναπτύχθηκε	37
3.2.1	Έλεγχος μετατροπέα με τη μέθοδο σταθερής ισχύος εισόδου	39
3.2.2	Προσομοίωση της μεθόδου σε MATLAB/SIMULINK	44
3.2.2.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης πρώτου μοτίβου προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας	47
3.2.2.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης δεύτερου μοτίβου προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας	51
3.2.2.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης τρίτου μοτίβου προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας	55
4	Υλοποίηση του ηλεκτρονικού συστήματος της μεθόδου MPPT	59
4.1	Υλοποίηση του συστήματος ελέγχου σε FPGA	59
4.1.1	Σχεδίαση του συστήματος ελέγχου στη γλώσσα VHDL	62
4.1.2	Προσομοίωση συστήματος σε Modelsim HDL Simulator	74
4.2	Σχεδίαση ηλεκτρονικού συστήματος	78
5	Πειραματικά αποτελέσματα	81
5.1	Πρώτο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας	82
5.2	Δεύτερο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας	85
5.3	Τρίτο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας	88
6	Συμπεράσματα	91
	Βιβλιογραφία	94

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	(α) Φωτοβολταϊκή Συστοιχία , (β) Χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης για διαφορετικά μοτίβα ακτινοβολίας.	2
2.1	(α) Φωτοβολταϊκό Στοιχείο, (β) Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.	5
2.2	Φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά.	6
2.3	Φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα.	6
2.4	Φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε συνδυασμό.	7
2.5	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου. . . .	9
2.6	Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας.	10
2.7	Σύνδεση φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα μεταβλητό ωμικό φορτίο R_L	10
2.8	Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου υπό την επίδραση ομοιόμορφης ακτινοβολίας.	11
2.9	Γραφική απεικόνιση του συντελεστή πλήρωσης- FF	12
2.10	Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου/πλαισίου.	13
2.11	Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και τα σημεία λειτουργίας του υπό την επίδραση μεταβαλλόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.	14
2.12	Συμπεριφορά δυο συνδεδεμένων σε σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων με τη χρήση διόδων παράκαμψης υπό την επίδραση ομοιόμορφης ακτινοβολίας. . . .	15
2.13	Συμπεριφορά δυο συνδεδεμένων σε σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων με τη χρήση διόδων παράκαμψης υπό την επίδραση μερικής σκίασης.	16
2.14	Φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση μερικής σκίασης.	16
2.15	Χαρακτηριστική P-V, με και χωρίς δίοδο παράκαμψης.	17
2.16	Χαρακτηριστική I-V, με και χωρίς δίοδο παράκαμψης.	17
2.17	Γενικό διάγραμμα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.	18
2.18	(α) Απλός DC-DC διακοπτικός μετατροπέας, (β) Τάση εξόδου σε σχέση με τους χρόνους έναυσης και σβέσης του μετατροπέα, πηγή:[4].	20
2.19	PWM διαμόρφωση: (α) Λειτουργικό διάγραμμα, (β) Σήματα Συγκριτή, πηγή:[4].	21
2.20	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost Converter), πηγή:[4].	22
2.21	Συνεχής λειτουργία:(α) Διακόπτης κλειστός, (β) Διακόπτης ανοιχτός, πηγή:[4].	23

2.22 Οι Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του πηνίου στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς λειτουργίας, πηγή:[4].	24
2.23 Οι κυματομορφές ρεύματος εξόδου και πηνίου στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς λειτουργίας, πηγή:[4].	25
2.24 (α) Όριο Συνεχούς-Ασυνεχούς λειτουργίας , (β) Ασυνεχής λειτουργία, πηγή:[4].	27
2.25 Κυμάτωση τάσης εξόδου, πηγή:[4].	29
2.26 Χαρακτηριστική I-V και ευθεία φορτίου για διαφορετικές τιμές του R.	30
2.27 Χαρακτηριστική P-V και η διαδικασία ανίχνευσης με την μέθοδο P&O	32
2.28 Διαδικασία ανίχνευσης με την μέθοδο P&O , όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της μερικής σκίασης.	34
2.29 Διάγραμμα ροής της μεθόδου P&O	34
3.1 Αρχή λειτουργίας της νέας μεθόδου MPPT.	36
3.2 Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος που υλοποιήθηκε.	37
3.3 Κυματομορφές ελέγχου του συστήματος που αναπτύχθηκε.	38
3.4 Περιοδική συμπεριφορά της χρονικής διάρκειας, στην οποία ο διακόπτης ελέγχεται με ένα PWM σήμα.	41
3.5 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου που αναπτύχθηκε.	43
3.6 Συνδεσμολογία της συστοιχίας του συστήματος (PV Array SIMULINK Block).	44
3.7 Προσομοίωση του φωτοβολταϊκού συστήματος στο SIMULINK.	45
3.8 Μονάδα ελέγχου και ανίχνευσης του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος (GMPPT-Controller).	46
3.9 Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 1.	47
3.10 Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 1.	47
3.11 Μεταβολή στιγμιαίας ισχύος της συστοιχίας-Μοτίβο 1.	48
3.12 Λειτουργία σταθερής ισχύος εισόδου.	48
3.13 Λειτουργία μετάβασης τάσης της συστοιχίας στη τάση για την οποία παρουσιάστηκε το μέγιστο σημείο ισχύος-Μοτίβο 1.	49
3.14 Λειτουργία διαδικασίας P&O-Μοτίβο 1.	49
3.15 Σήμα ελέγχου Vcontrol σε χρονική αντιστοιχία με διακοπτική χρονική διάρκεια.	50
3.16 Σήμα ελέγχου Vcontrol σε χρονική αντιστοιχία με το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα και παραγωγή του σήματος PWM.	50
3.17 Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 2.	51
3.18 Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 2.	51
3.19 Μεταβολή στιγμιαίας ισχύος της συστοιχίας-Μοτίβο 2.	52
3.20 Λειτουργία σταθερής ισχύος εισόδου.	52
3.21 Λειτουργία μετάβασης τάσης της συστοιχίας στη τάση για την οποία παρουσιάστηκε το μέγιστο σημείο ισχύος-Μοτίβο 2.	53
3.22 Λειτουργία διαδικασίας P&O-Μοτίβο 2.	53
3.23 Σήμα ελέγχου Vcontrol σε χρονική αντιστοιχία με διακοπτική χρονική διάρκεια-Μοτίβο 2.	54

3.24	Σήμα ελέγχου Vcontrol σε χρονική αντιστοιχία με το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα και παραγωγή του σήματος PWM-Μοτίβο 2.	54
3.25	Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 3.	55
3.26	Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 3.	55
3.27	Μεταβολή στιγμιαίας ισχύος της συστοιχίας-Μοτίβο 3.	56
3.28	Λειτουργία σταθερής ισχύος εισόδου-Μοτίβο 3.	56
3.29	Λειτουργία μετάβασης τάσης της συστοιχίας στη τάση για την οποία παρουσιάστηκε το μέγιστο σημείο ισχύος-Μοτίβο 3.	57
3.30	Λειτουργία διαδικασίας P&O-Μοτίβο 3.	57
3.31	Σήμα ελέγχου Vcontrol σε χρονική αντιστοιχία με διακοπτική χρονική διάρκεια-Μοτίβο 3.	58
3.32	Σήμα ελέγχου Vcontrol σε χρονική αντιστοιχία με το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα και παραγωγή του σήματος PWM-Μοτίβο 3.	58
4.1	Altera FPGA MAX 10 Development kit, πηγή:[8].	59
4.2	Λειτουργικό διάγραμμα της FPGA MAX 10 Development kit, πηγή:[8].	60
4.3	Χαρακτηριστικά της FPGA MAX 10 Development kit, πηγή:[8].	60
4.4	Μετρήσεις του A/D μετατροπέα της FPGA, με χρήση της εσωτερικής τάσης αναφοράς των 2.5 V, πηγή:[9].	61
4.5	Λειτουργικό διάγραμμα ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου.	63
4.6	Λειτουργικό διάγραμμα δομικής μονάδας “ Adc Interface and Average Filtering ”.	64
4.7	Λειτουργικό διάγραμμα της δομικής μονάδας “ Adc Interface ”.	65
4.8	Χρονικό διάγραμμα μεταβολής των σημάτων της δομικής μονάδας “ Adc ”, Πηγή:[9].	66
4.9	Διάγραμμα καταστάσεων της μονάδας ελέγχου- “ Gmppt Controller ”.	68
4.10	Λειτουργικό διάγραμμα της δομικής μονάδας “ Top Level Vcontrol Unit ”.	69
4.11	Διάγραμμα καταστάσεων της μονάδας ελέγχου “ Vcontrol Gen Unit ”.	70
4.12	Μονάδα αριθμητικών υπολογισμών-“ Numerical Calculations ” για την υλοποίηση της εξίσωσης ελέγχου Vc.	72
4.13	Προσομοίωση λειτουργικότητας του ADC.	74
4.14	Προσομοίωση λειτουργικότητας του ADC και αναπαράσταση αναλογικής μορφής του ρεύματος του πηνίου.	75
4.15	Προσομοίωση λειτουργικότητας συστήματος για συγκεκριμένο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.	76
4.16	Λειτουργία ελέγχου σύγκρισης σήματος ελέγχου με το ρεύμα του πηνίου.	76
4.17	Λειτουργία ελέγχου μεταβολής διάρκειας αγωγής.	77
4.18	Εικόνα 4.14: Η συστοιχία που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία. Αυτή αποτελείται από δύο σε σειρά πάνελ, τα οποία τοποθετούνται σε διαφορετικές κλίσεις προκειμένου να εμφανιστεί το φαινόμενο της σκίασης.	78
4.19	Λειτουργικό διάγραμμα του συνολικού συστήματος που υλοποιήθηκε.	79

4.20	Εικόνα 4.18: Το ηλεκτρονικό σύστημα που υλοποιήθηκε.	80
5.1	Πυρανόμετρο KIMO SL100, πηγή:[16]	81
5.2	Χαρακτηριστική P-V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά την πρόσπτωση ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος.	82
5.3	Χαρακτηριστική I-V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά την πρόσπτωση ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος.	83
5.4	Χαρακτηριστική P-V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά την πρόσπτωση ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος.	84
5.5	Χαρακτηριστική I-V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά την πρόσπτωση ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος.	84
5.6	Χαρακτηριστική P-V Μοτίβου 2 με την φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση της μερικής σκίασης και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος.	85
5.7	Χαρακτηριστική I-V Μοτίβου 2 με την φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση της μερικής σκίασης συστοιχίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος.	86
5.8	Αριστερά: PWM σήμα και ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα, Δεξιά: Τάση Drain-Source του MOSFET και το ρεύμα του πηνίου.	87
5.9	Αριστερά: PWM σήμα και ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα, Δεξιά: PWM σήμα και το σήμα ελέγχου Start που μεταβαίνει σε υψηλή στάθμη όταν ξεκινάει η διαδικασία του MPPT και έπειτα μεταβαίνει σε χαμηλή στάθμη με την ολοκλήρωση της διαδικασίας MPPT.	87
5.10	Χαρακτηριστική P-V Μοτίβου 3 με την φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση της μερικής σκίασης συστοιχίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος.	88
5.11	Χαρακτηριστική I-V Μοτίβου 3 με την φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση της μερικής σκίασης συστοιχίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος.	89
5.12	Αριστερά: PWM σήμα και ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, Δεξιά: Τάση Drain-Source του MOSFET και ρεύμα του πηνίου.	90
5.13	Αριστερά: PWM σήμα και ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα, Δεξιά: PWM σήμα και το σήμα ελέγχου Start που μεταβαίνει σε υψηλή στάθμη, όταν ξεκινάει η διαδικασία του MPPT και έπειτα μεταβαίνει σε χαμηλή στάθμη με την ολοκλήρωση της διαδικασίας MPPT.	90

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής($T = 25^{\circ}\text{C}$, $G = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$).	44
4.1	Ηλεκτρονικά στοιχεία του συστήματος μετρήσεων.	78

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

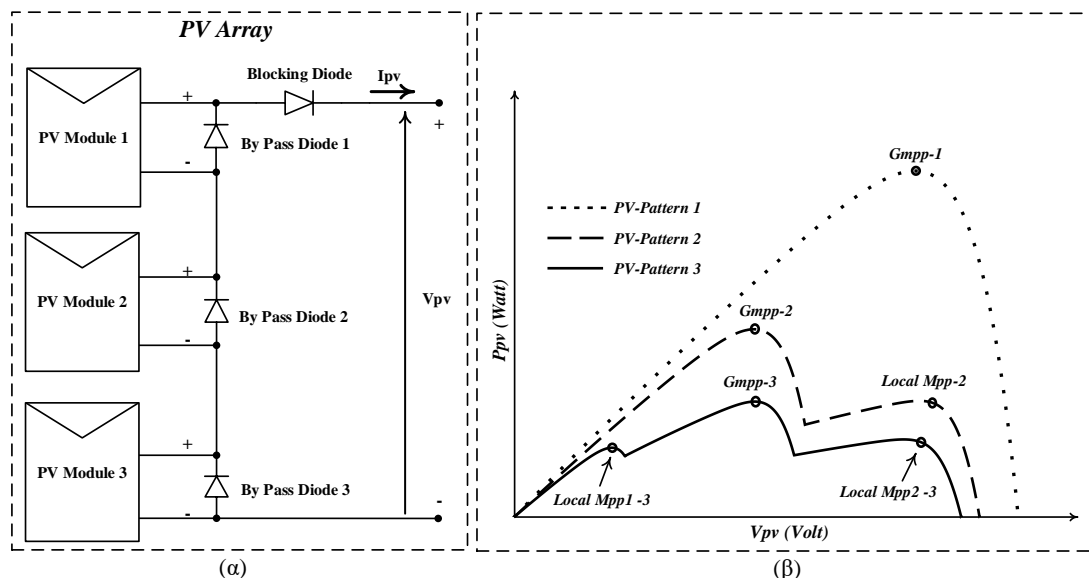
Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού καθώς και η ραγδαία ανάπτυξη της βιομηχανίας έχουν οδηγήσει στη συνεχόμενη αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων. Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο περιβάλλον λόγω των ρύπων που αποδεσμεύουν. Παράλληλα, τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι ανεξάντλητοι πόροι, με μελέτες να δείχνουν ότι θα εξαντληθούν σε μερικές εκατοντάδες χρόνια. Επομένως, είναι αναγκαία η εξεύρεση ενεργειακών λύσεων που θα μπορούν να καλύψουν μέρος της σημερινής ζήτησης μέσω της χρήσης προηγμένων τεχνολογιών καθαρών μορφών ενέργειας με στόχο την αντιμετώπιση των προκλήσεων στους τομείς των ενεργειακών απαιτήσεων, της κλιματικής αλλαγής και της βιώσιμης ανάπτυξης.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε) είναι “καθαρές” μορφές ενέργειας και βασίζονται στην εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση(ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, ενέργεια από τους ωκεανούς, βιομάζα και βιοκαύσιμα). Οι Α.Π.Ε αποτελούν την εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θεωρούνται ανεξάντλητες πηγές ενέργειας καθώς και πολύ φιλικές στο περιβάλλον, λόγω ότι δεν αποδεσμεύουν ρύπους του θερμοκηπίου.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (**PV-Modules**) αποτελούν ίσως την πιο ελκυστική επιλογή Α.Π.Ε. Αυτό προκύπτει κυρίως λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν έναντι των άλλων. Μερικά από αυτά είναι η σχετικά εύκολη εγκατάστασή τους, η ανόρυξη λειτουργία τους και η δυνατότητα εγκατάστασής τους κοντά στον χρήστη. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: τα συστήματα που λειτουργούν αυτόνομα (**Stand-alone**) και τα συστήματα που είναι διασυνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο (**Grid-connected**). Στα αυτόνομα συστήματα η χρήση μπαταριών καθίσταται απαραίτητη για την αποθήκευση ενέργειας, ενώ στα διασυνδεδεμένα, το δίκτυο είναι αυτό που συμπεριφέρεται ως αποθήκη ενέργειας, με τα φωτοβολταϊκά συστήματα να διαχέουν ισχύ στο δίκτυο, όποτε αυτή τους είναι διαθέσιμη.

Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα εμφανίζουν ορισμένες προκλήσεις, οι οποίες αφορούν κυρίως την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της παραγόμενης ισχύος. Το μεγάλο κόστος εγκατάστασης καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη τεχνολογικών λύσεων που θα μπορούν να εξασφαλίζουν την βέλτιστη δυνατή λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος. Ένας παράγοντας που συμβάλλει στη μείωση της αποδοτικής αξιοποίησης της παραγόμενης ισχύος είναι το φαινόμενο της μερικής σκίασης. Σε αυτήν τη περίπτωση, μέρος των φωτοβολταϊκών στοιχείων του πλαισίου μπορεί να σκιάζονται, είτε λόγω των καιρικών συνθηκών (νέφωση) που επικρατούν στην περιοχή, είτε λόγω αντικειμένων στο ευρύτερο περιβάλλον, όπως δέντρα ή κτίρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την εμφάνιση απωλειών σε ισχύ από το πλαίσιο και κατα συνέπεια συνολικά από το σύστημα.

Στο Σχήμα 1.1, δίνονται οι χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης, για διαφορετικά μοτίβα ακτινοβολίας, μιας συστοιχίας που αποτελείται από τρία σε σειρά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της μερικής σκίασης, η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης εμφανίζει περισσότερα από ένα σημεία μέγιστης ισχύος. Διαπιστώνεται ότι, για το μοτίβο 1 (**pattern 1**) δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της σκίασης, καθώς εμφανίζεται ένα ολικό μέγιστο που αντιστοιχεί και στη μέγιστη ισχύ της συστοιχίας. Από την άλλη τα μοτίβα 2 και 3 (**pattern 2-3**) δείχνουν ότι η μερική σκίαση της συστοιχίας οδηγεί στην εμφάνιση περισσότερων από ένα μέγιστο, το οποίο σημαίνει ότι χωρίς τον κατάλληλο έλεγχο της συστοιχίας, το σύστημα μπορεί να βρεθεί σε ένα μη βέλτιστο σημείο λειτουργίας ισχύος-τάσης. Αυτό μεταφράζεται σε απώλειες ισχύος από το σύστημα, καθώς δεν εξασφαλίζεται η βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Το μέγιστο σημείο λειτουργίας ονομάζεται μέγιστο σημείο ισχύος (**Maximum Power Point-MPP**), ενώ η διαδικασία εντοπισμού του μεγίστου σημείου ονομάζεται ανίχνευση μεγίστου σημείου ισχύος (**Maximum Power Point Tracking-MPPT**).



Σχήμα 1.1: (α) Φωτοβολταϊκή Συστοιχία, (β) Χαρακτηριστικές ισχύος-τάσης για διαφορετικά μοτίβα ακτινοβολίας.

1.1 Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας

Ένα βασικό ζήτημα που προκύπτει κατά τη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι πως οι μονάδες ελέγχου θα εξασφαλίζουν τη βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος από την συστοιχία. Κατά την σχεδίαση λοιπόν θα πρέπει να καθοριστεί η τεχνική ανίχνευσης-**MPPT**, η οποία θα εξασφαλίζει την σύγκλιση στο μέγιστο σημείο λειτουργίας-**MPP** ανεξάρτητα από τις συνθήκες που επικρατούν. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές-**MPPT**. Η πιο δημοφιλής μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι αυτή της “Διαταραχής και Παρατήρησης” (**Perturb and Observe-P&O**). Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν εξασφαλίζει την σύγκλιση στο **MPP** σε περιπτώσεις που παρατηρείται το φαινόμενο της μερικής σκίασης. Έτσι, διάφορες τεχνικές-**MPPT** έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, οι οποίες εγγυώνται την σύγκλιση στο **MPP** ακόμη και στη περίπτωση εμφάνισης του φαινομένου της μερικής σκίασης.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και ανάπτυξη ενός ηλεκτρονικού συστήματος ρύθμισης της παραγωγής ισχύος από φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Ο σκοπός είναι η μελέτη μιας νέας τεχνικής-**MPPT** που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Α.Π.Ε, κάνοντας χρήση μιας **FPGA**, που θα εκτελεί τον αλγόριθμο ελέγχου-**MPPT** και θα “όδηγεί”, με ένα σήμα διαμόρφωσης εύρους παλμών (**Pulse Width Modulation-PWM**), κατάλληλα το διακοπτικό στοιχείο ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης (**Boost Converter**). Χαρακτηριστικό του μετατροπέα είναι ότι θα πρέπει να λειτουργεί σε ασυνεχή αγωγή ρεύματος (**Discontinuous Conduction Mode-DCM**), το οποίο αποτελεί και βασικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου ελέγχου που αναπτύχθηκε.

1.2 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει την παρακάτω μορφή:

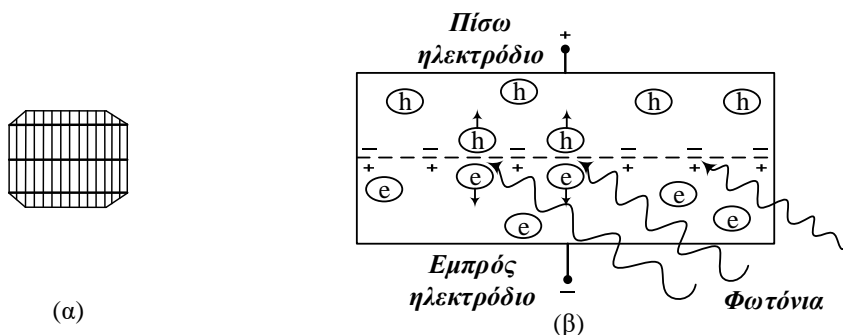
- **Κεφάλαιο 2:** Περιγράφεται η δομή των φωτοβολταϊκών συστημάτων, οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης, το φαινόμενο της σκίασης, η θεωρητική ανάλυση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης καθώς και η περιγραφή της διαδικασίας-**MPPT**.
- **Κεφάλαιο 3:** Θεωρητική απόδειξη της τεχνικής-**MPPT** που αναπτύχθηκε, η γενική σχεδίαση του αλγορίθμου ελέγχου, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προέκυψαν από τη σχεδίαση στο εργαλείο της MATLAB και του Modelsim για την επιβεβαίωση του κώδικα VHDL.
- **Κεφάλαιο 4:** Αναλυτική σχεδίαση του ηλεκτρονικού συστήματος και των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν, αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας των μετρήσεων μέσω διασύνδεσης της FPGA και της MATLAB .
- **Κεφάλαιο 5:** Πειραματικά αποτελέσματα για διαφορετικά μοτίβα ακτινοβολίας.
- **Κεφάλαιο 6:** Συμπεράσματα και πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις στη σχεδίαση του συστήματος.

Κεφάλαιο 2

Φωτοβολταϊκά συστήματα

2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία-φωτοβολταϊκό φαινόμενο

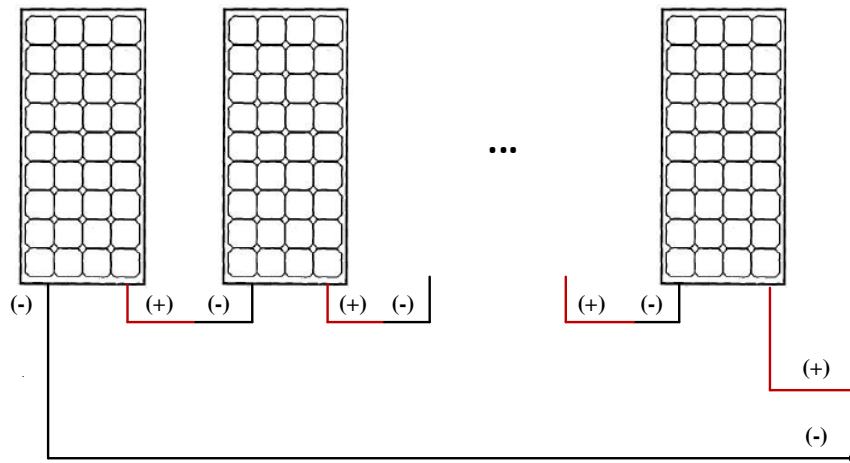
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (photovoltaic or solar cell) είναι δίοδοι ημιαγωγών (συνήθως πυριτίου) με τη μορφή δίσκου (Σχήμα 2.1). Η ένωση P-N εκτείνεται σε όλο τον δίσκο ενώ μια στρώση από κατάλληλο υλικό καθίσταται απαραίτητη έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο εσωτερικό του ημιαγωγού. Όταν ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στον δίσκο, τότε φωτόνια με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, μπορούν να απελευθερώσουν ηλεκτρικά φορτία (ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών). Όσο διαρκεί η ακτινοβολία έχουμε μια περίσσεια φορέων, τα οποία μετακινούνται στο στερεό και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου πρόσημου, θα βρεθούν υπό την επίδραση του ηλεκτροστατικού πεδίου εκατέρωθεν της επαφής P-N. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται στη περιοχή τύπου-n και οι οπές στη περιοχή τύπου-p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Επομένως, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν πηγές ηλεκτρικού ρεύματος εξαρτώμενες από την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνειά τους. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φωτοβολταϊκό φαινόμενο** (photovoltaic effect).



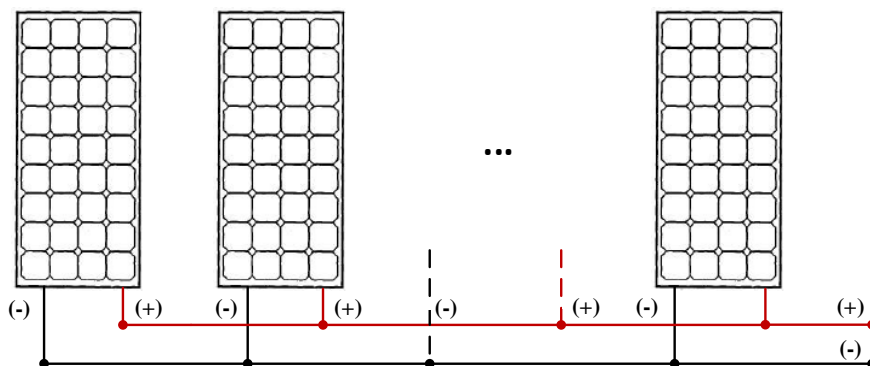
Σχήμα 2.1: (α) Φωτοβολταϊκό Στοιχείο, (β) Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.

2.2 Φωτοβολταϊκές συστοιχίες

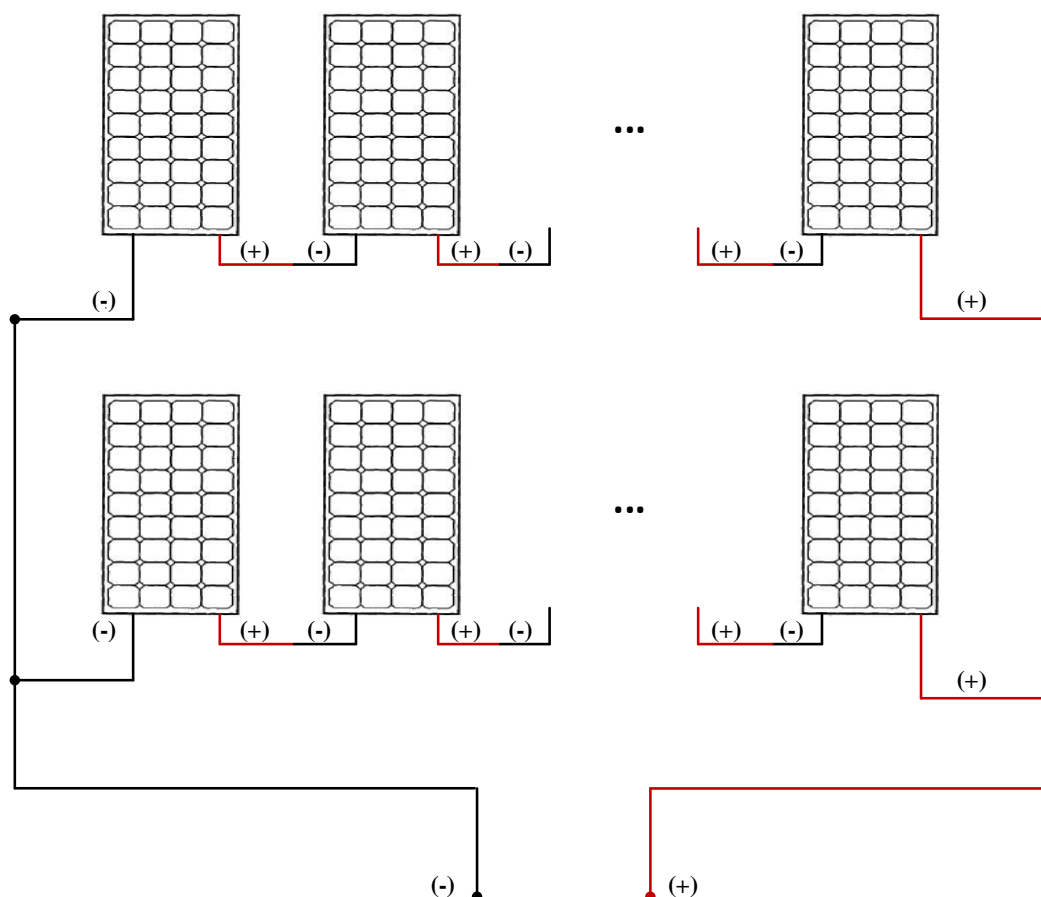
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η κύρια μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ωστόσο, η μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στα άκρα τους (0.5 έως 0.6 Volt) δεν είναι επαρκής να τροφοδοτήσει μεγάλα φορτία. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια από την άλλη μπορούν καθώς αποτελούνται από πολλά σε σειρά συνδεδεμένα στοιχεία (συνήθως 36 ή 72). Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια αποτελούν την δομική μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, όπου με την κατάλληλη συνδεσμολογία τους (σε σειρά, παράλληλα ή με το συνδυασμό των δύο) μπορεί να καλυφθεί η απαίτηση σε ισχύ που τίθεται κατά το σχεδιασμό του συστήματος. Όταν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από συνδυασμό πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων, τότε αυτά αποτελούν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV or Solar Array). Στο Σχήμα 2.2, Σχήμα 2.3 και Σχήμα 2.4 απεικονίζονται οι πιθανές συνδεσμολογίες σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.



Σχήμα 2.2: Φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά.



Σχήμα 2.3: Φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα.



Σχήμα 2.4: Φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε συνδυασμό.

Η συνδεσμολογία των πλασίων σε σειρά δίνει τη δυνατότητα της αύξησης της τάσης που μπορεί να αποδώσει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, με το ρεύμα όμως να παραμένει το ίδιο. Αντίθετα, η παράλληλη συνδεσμολογία δίνει την δυνατότητα στο σύστημα να αποδίδει μεγαλύτερο ρεύμα με την τάση να παραμένει η ίδια. Ενώ, στο συνδυασμό των παραπάνω συνδεσμολογιών αυξάνεται η ικανότητα του συστήματος τόσο στη τάση όσο και στο ρεύμα που μπορεί να αποδώσει.

2.3 Μαθηματική ανάλυση φωτοβολταϊκών στοιχείων

Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου, ενώ στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται το αντίστοιχο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα μίας φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Οι χαρακτηριστικές εξισώσεις τάσης-ρεύματος ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου εκφράζονται ως εξής [1]:

$$I_{ph} = \left[I_{sc} + K_i (T - T_{ref}) \frac{G}{G_{ref}} \right] \quad (2.1)$$

Όπου:

- I_{ph} : Φωτόρευμα πλαισίου (A).
- I_{sc} : Ρεύμα βραχυκύκλωσης πλαισίου (A).
- K_i : Ρεύμα βραχυκύκλωσης στοιχείου υπό τις πρότυπες συνθήκες δοκιμής (Standard Testing Condition-STC), δηλαδή για θερμοκρασία $T = 25^\circ\text{C}$ και πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας $G_{ref} = 1000 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$.
- T : Θερμοκρασία λειτουργίας (K).
- T_{ref} : Θερμοκρασία αναφοράς των φωτοβολταϊκών στοιχείων (298 K).
- G : Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)$.

Το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left(\exp \left(\frac{qV_{oc}}{N_s k n T} \right) - 1 \right)} \quad (2.2)$$

Όπου:

- q : Φορτίο ηλεκτρονίου $(1.6 \times 10^{-19} \text{C})$.
- V_{oc} : Τάση ανοιχτοκύκλωσης (V).
- N_s : Αριθμός φωτοβολταϊκών στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά.
- n : Σταθερά της ιδανικής διόδου.
- k : Σταθερά Boltzmann $(1.3805 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}})$.

Το ρεύμα κορεσμού I_o ενός πλαισίου μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_o = I_{rs} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \times \exp \left(\frac{q \times E_{go}}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right) \quad (2.3)$$

Όπου:

- T_r : θερμοκρασία αναφοράς φωτοβολταϊκών στοιχείων (298 K).
- E_{go} : Ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού (1.1 eV για το πυρίτιο).

Έτσι, το ρεύμα εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου θα είναι ίσο με:

$$I = Np \times I_{ph} - Np \times I_O \times \left[\exp \left(\frac{V/Ns + I \times Rs/Np}{n \times V_t} - 1 \right) \right] - I_{sh}. \quad (2.4)$$

όπου:

$$V_t = \frac{k \times T}{q} \quad (2.5)$$

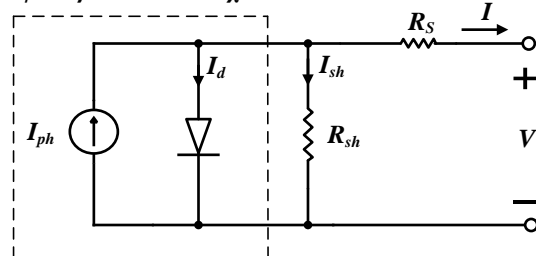
και

$$I_{sh} = \frac{V \times Np/Ns + I \times Rs}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

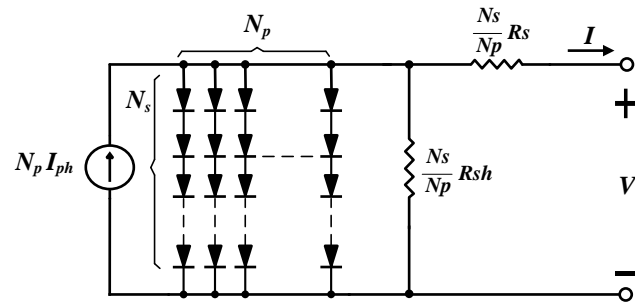
Στις παραπάνω εξισώσεις έχουμε:

- Np : Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων που είναι συνδεδεμένα παράλληλα.
- Rs : Η ισοδύναμη σε σειρά αντίσταση της συστοιχίας (Ω).
- R_{sh} : Η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση της συστοιχίας (Shunt Resistance) (Ω).
- V_t : Θερμική τάση της διόδου (V).

Ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο



Σχήμα 2.5: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου.



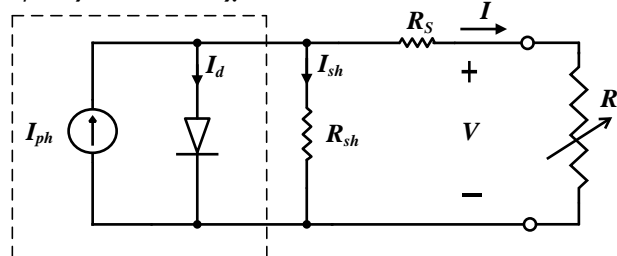
Σχήμα 2.6: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

2.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας φωτοβολταϊκών στοιχείων

2.4.1 Λειτουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σταθερές συνθήκες

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και γενικότερα τα πλαίσια και οι συστοιχίες, εμφανίζουν μια ασυνήθιστη ηλεκτρική συμπεριφορά ακόμα και σε συνθήκες σταθερής ομοιόμορφης ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, η συμπεριφορά αυτή έχει να κάνει με τη τάση λειτουργίας τους, η οποία μεταβάλλεται μη γραμμικά σε συνάρτηση με το ρεύμα που δίνουν σε ένα κύκλωμα.

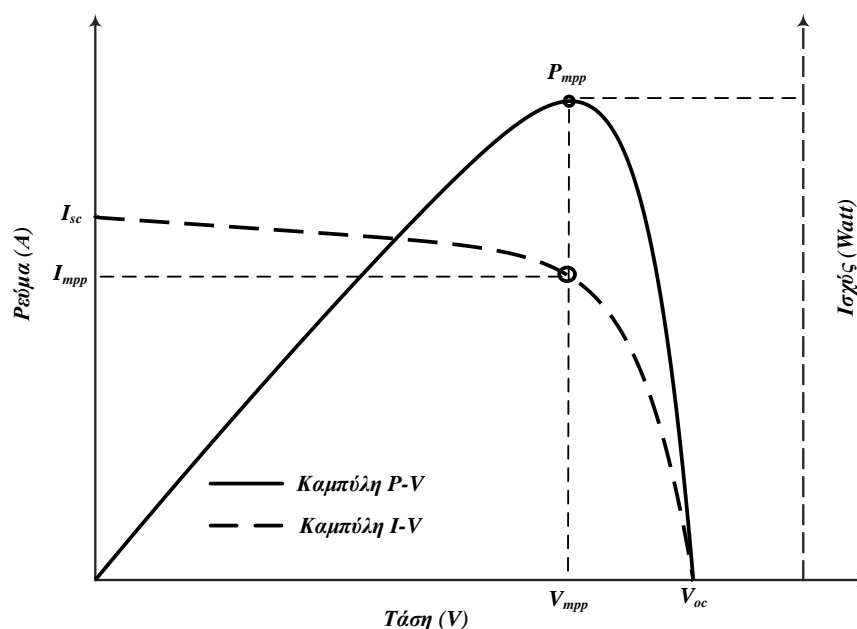
Ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο



Σχήμα 2.7: Σύνδεση φωτοβολταϊκού πλαισίου με ένα μεταβλητό ωμικό φορτίο R_L .

Έστω ότι σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ή πλαίσιο συνδέεται ένα μεταβλητό ωμικό φορτίο R_L τότε το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα θα έχει την μορφή του Σχήματος 2.7. Στη περίπτωση που η τιμή της αντίστασης είναι μηδέν τότε το κύκλωμα βρίσκεται στην βραχυκυκλωμένη λειτουργία. Στην κατάσταση αυτή το ρεύμα που αποδίδεται από το πλαίσιο είναι το μέγιστο δυνατό (ρεύμα βραχυκύκλωσης- I_{sc}), ενώ η τάση είναι μηδέν. Όταν η τιμή της αντίστασης τείνει στο άπειρο τότε το κύκλωμα είναι ανοικτοκυκλωμένο, με αποτέλεσμα η τάση του πλαισίου να είναι η μέγιστη δυνατή (ανοικτοκυκλωμένη τάση- V_{oc}) και το ρεύμα μηδέν. Συνεπώς, στις δύο ακραίες περιπτώσεις το πλαίσιο παράγει μηδενική ισχύ ($P = V \cdot I$).

Με την υπόθεση ότι στο πλαίσιο προσπίπτει ομοιόμορφη ηλιακή ακτινοβολία και το φορτίο μεταβάλλεται σε ενδιάμεσες τιμές από αυτές που προαναφέρθηκαν, τότε οι χαρακτηριστικές καμπύλες Ισχύος-Τάσης (P-V Curve) και Ρεύματος-Τάσης (I-V Curve) θα έχουν την μορφή του Σχήματος 2.8. Καθώς μεταβάλλεται η τιμή του φορτίου, η ισχύς που παράγεται από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο μεγιστοποιείται από ένα ζεύγος τιμών τάσης και ρεύματος (V_{mpp} , I_{mpp}). Επομένως, το μέγιστο σημείο παραγωγής ισχύος από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, πλαίσιο ή γενικότερα από μία συστοιχία εξαρτάται από την τιμή του φορτίου στο κύκλωμα. Έτσι, είναι ιδιαίτερα σημαντικό το φορτίο να έχει μια τιμή αντίστασης που θα οδηγεί στη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος (P_{mpp}). Θα δούμε παρακάτω ότι, για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος, το φορτίο δεν συνδέεται απευθείας με την συστοιχία αλλά παρεμβάλλεται ανάμεσα ένας DC-DC μετατροπέας, που θα εξασφαλίζει την διατήρηση στο μέγιστο σημείο ισχύος ανεξάρτητα από την τιμή του φορτίου.

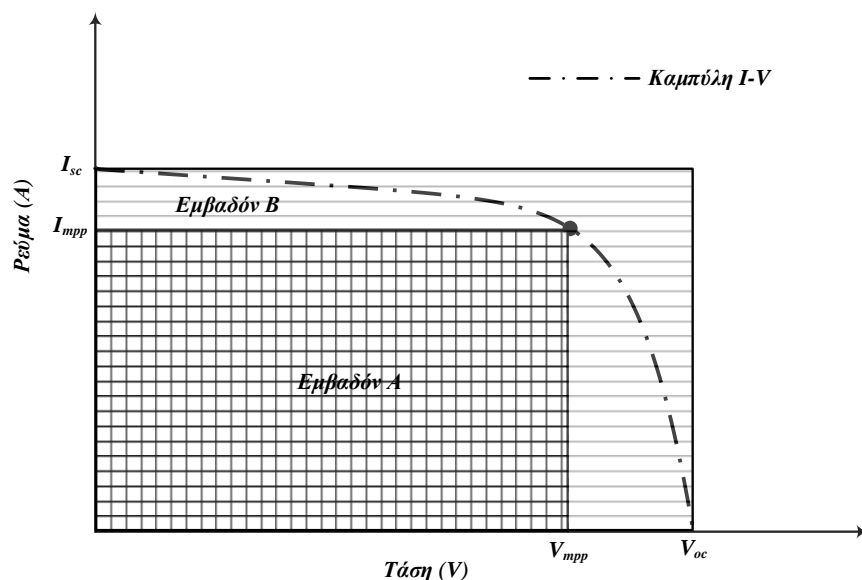


Σχήμα 2.8: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου υπό την επίδραση ομοιόμορφης ακτινοβολίας.

Η συμπεριφορά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου καθορίζεται από τρεις παραμέτρους. Αυτές είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης- I_{sc} , η τάση ανοικτού κύκλου- V_{oc} καθώς και ο συντελεστής πλήρωσης- FF (Fill Factor). Η σχέση που περιγράφει τον συντελεστή- FF είναι [2]:

$$FF = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.7)$$

Ο συντελεστής- FF μπορεί να περιγραφεί γραφικά (βλ. Σχήμα 2.9), ως ο λόγος του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου (Εμβαδόν Α) που μπορεί να παρουσιαστεί στη χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης (I-V), προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές I_{sc} και V_{oc} (Εμβαδόν Β).



Σχήμα 2.9: Γραφική απεικόνιση του συντελεστή πλήρωσης- FF .

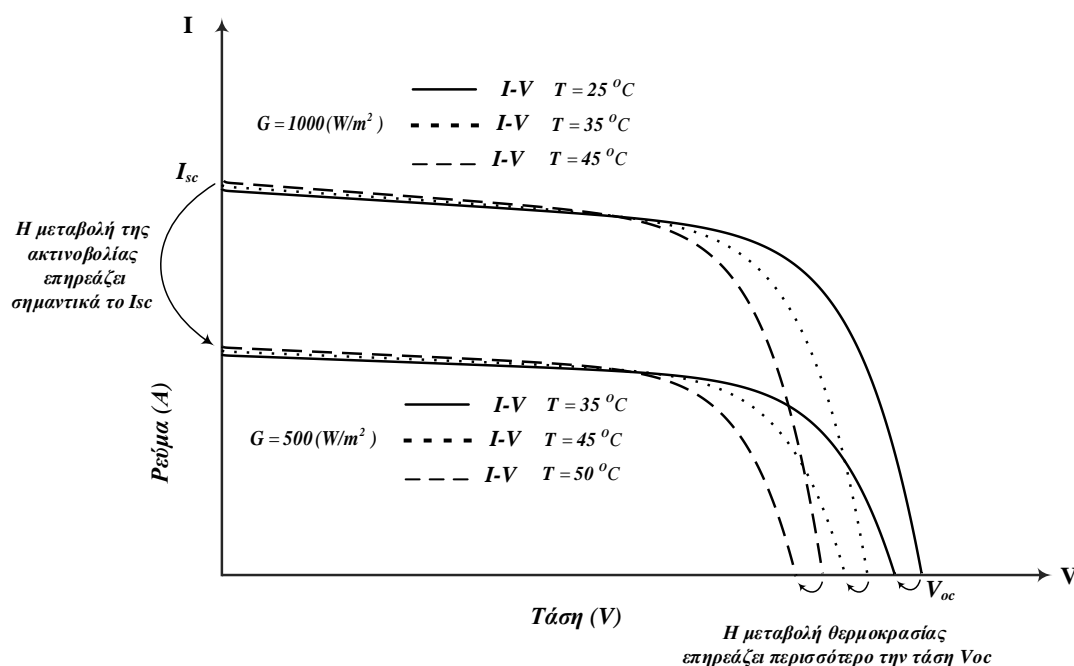
Με βάση τις παραπάνω παραμέτρους μπορεί να οριστεί και ο συντελεστής απόδοσης (η) των φωτοβολταϊκών στοιχείων:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} = \frac{I_{mpp}V_{mpp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc}V_{oc}FF}{P_{in}} \quad (2.8)$$

Όπου $P_{in} = G \times Ar$, με G να είναι η πυκνότητα της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του στοιχείου σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής ($G = 1000 \frac{W}{m^2}$) και Ar να είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του. Παρατηρούμε λοιπόν ότι, η βελτίωση της απόδοσης (η) των φωτοβολταϊκών στοιχείων εξαρτάται από μια αύξηση στη τιμή του FF .

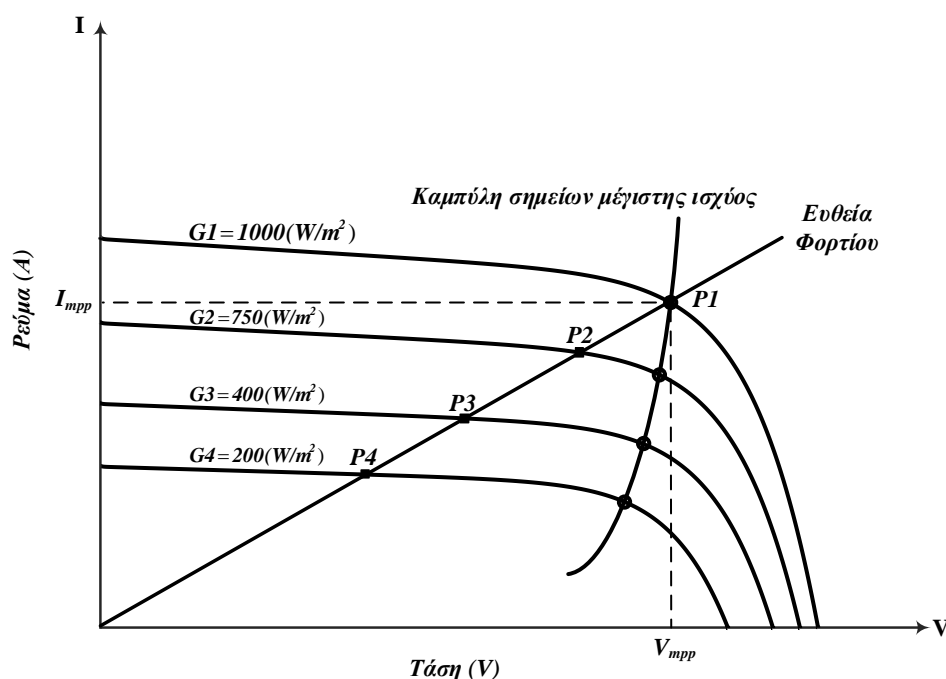
2.4.2 Λειτουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων σε μεταβαλλόμενες συνθήκες

Η προηγούμενη ανάλυση αφορούσε τη λειτουργία των στοιχείων/πλασίων με σταθερή θερμοκρασία και σταθερή πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν όμως, επικρατούν μεταβαλλόμενες συνθήκες, δηλαδή εμφανίζεται μεταβολή της θερμοκρασίας και ακτινοβολίας (με ομοιόμορφο τρόπο), τότε η μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών αλλάζει. Στο Σχήμα 2.10, απεικονίζεται η επίδραση της θερμοκρασίας- T και πυκνότητας ακτινοβολίας- G στην χαρακτηριστική καμπύλη I - V . Διαπιστώνεται ότι, η ένταση του ρεύματος βραχυκύκλωσης- I_{sc} εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας- G , ενώ η τάση ανοικτού κύκλου- V_{oc} επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό. Αντίθετα, μια μεταβολή της θερμοκρασίας επηρεάζει περισσότερο την τιμή της τάσης V_{oc} και λιγότερο αυτή της έντασης του ρεύματος I_{sc} . Όμως, μια μεταβολή στις τιμές των I_{sc} και V_{oc} θα οδηγήσει και σε μία μεταβολή στην απόδοση (η) του φωτοβολταϊκού στοιχείου/πλασίου. Αυτό σημαίνει ότι, θερμοκρασία και πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν καθώς μεταβάλλονται να επηρεάζουν σημαντικά τη παραγωγή ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου/πλασίου.



Σχήμα 2.10: Επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη I - V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου/πλασίου.

Όταν σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο συνδέεται στα άκρα του μια σταθερή ωμική αντίσταση, τότε μια μεταβολή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας- G , θα έχει ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση του σημείου λειτουργίας. Από το Σχήμα 2.11, διαπιστώνεται ότι, αρχικά για μια τιμή ακτινοβολίας $G1 = 1000 \text{ W/m}^2$, το πλαίσιο αξιοποιείται βέλτιστα καθώς παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Στη συνέχεια, καθώς η τιμή της ακτινοβολίας μειώνεται, το πλαίσιο δεν παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ, που θα μπορούσε για την δεδομένη τιμή του G , αλλά μια μικρότερη. Επομένως, ακόμα και αν για δεδομένη ακτινοβολία το πλαίσιο βρίσκεται στο μέγιστο σημείο ισχύος-MPP, μια μείωση της ακτινοβολίας μπορεί να το οδηγήσει να λειτουργεί σε ένα μη μέγιστο σημείο ισχύος.



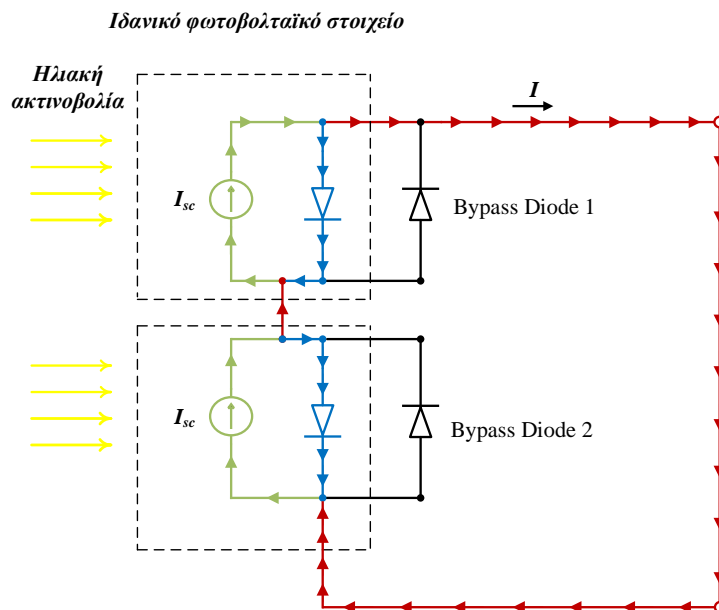
Σχήμα 2.11: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου και τα σημεία λειτουργίας του υπό την επίδραση μεταβαλλόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

2.4.3 Φαινόμενο μερικής ή ολικής σκίασης

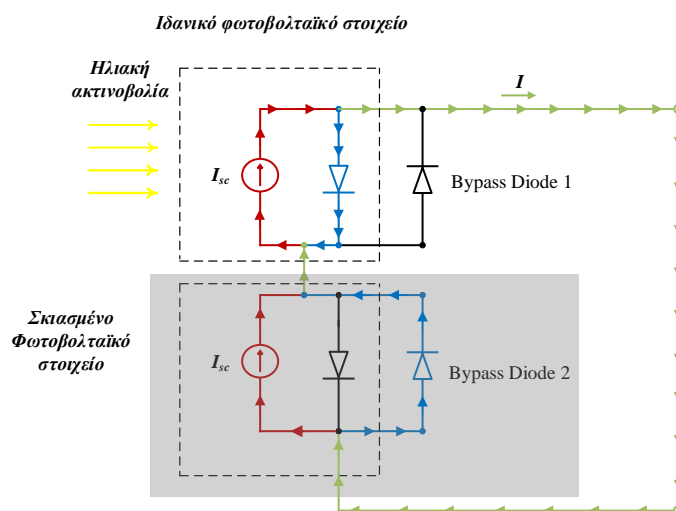
Η ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου δεν είναι πάντοτε ομοιόμορφη [3]. Παράγοντες όπως είναι, δέντρα ή κτίρια, σύννεφα στη περιοχή και γενικότερα η δυναμική αλλαγή της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια της ημέρας, μπορούν να οδηγήσουν στην μερική ή ολική σκίαση του πλαισίου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από πολλά σε σειρά συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Με δεδομένο ότι κανένα από τα στοιχεία δεν σκιάζεται, τότε κάθε ένα από αυτά θα παράγει το ίδιο ρεύμα. Στην περίπτωση, όμως, που σκιαστεί ακόμα και ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο του πλαισίου, τότε το παραγόμενο ρεύμα μειώνεται στα επίπεδα του ρεύματος που παράγεται από το σκιασμένο στοιχείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφα-

νιστούν απώλειες σε ισχύ από το πλαίσιο, καθώς η περίσσεια σε ισχύ από τα μη-σκιασμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία, καταναλώνεται από τα σκιασμένα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την αύξηση της θερμοκρασίας στα σκιασμένα στοιχεία, το οποίο μπορεί να οδηγήσει στη καταστροφή τους.

Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί με την χρήση μιας διόδου παράκαμψης (Bypass Diode). Παρακάτω δίνεται μια περίπτωση δύο ιδανικών φωτοβολταϊκών στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά, όπου σε καθένα από αυτά συνδέεται παράλληλα και με αντίθετη πολικότητα μια διάδος παράκαμψης. Όταν δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της σκίασης από το Σχήμα 2.12, παρατηρούμε ότι, κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο άγει ρεύμα με αποτέλεσμα οι διόδους παράκαμψης να είναι ανάστροφα πολωμένες και συνεπώς να λειτουργούν ως ανοιχτοκυκλώματα. Ωστόσο, στη περίπτωση του Σχήματος 2.13, παρατηρούμε ότι, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο σκιάζεται με αποτέλεσμα να παράγεται ένα μικρό ρεύμα αλλά να βρίσκεται σε μη αγωγή, ενώ το μη-σκιασμένο στοιχείο προσπαθεί να το ωθήσει σε λειτουργία αγωγής. Όμως με την τοποθέτηση της διόδου παράκαμψης (Bypass Diode 2), το ρεύμα μπορεί και ακολουθεί μια νέα κατεύθυνση χωρίς να χρειάζεται να οδηγήσει σε αγωγή το σκιασμένο στοιχείο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζεται μόνο μια μικρή πτώση τάσης, λόγω της διόδου παράκαμψης, και όχι το φαινόμενο του περιορισμού του ρεύματος, των συνδεδεμένων σε σειρά στοιχείων, καθώς και της αύξησης της θερμοκρασίας στο σκιασμένο στοιχείο.

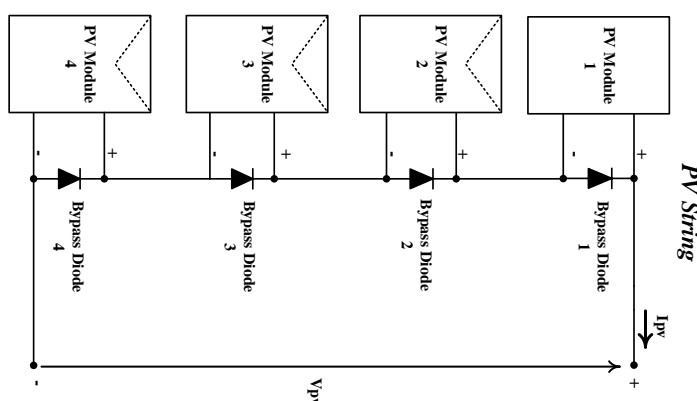


Σχήμα 2.12: Συμπεριφορά δυο συνδεδεμένων σε σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων με τη χρήση διόδων παράκαμψης υπό την επίδραση ομοιόμορφης ακτινοβολίας.



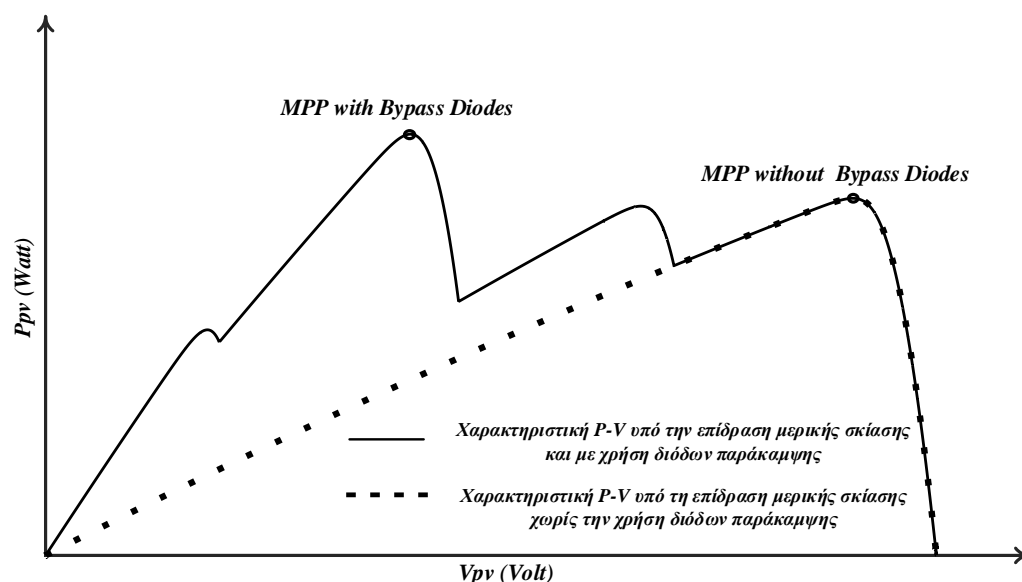
Σχήμα 2.13: Συμπεριφορά δυο συνδεδεμένων σε σειρά φωτοβολταϊκών στοιχείων με τη χρήση διόδων παράκαμψης υπό την επίδραση μερικής σκίασης.

Στην πράξη όμως, οι διάοδοι παράκαμψης δεν τοποθετούνται σε κάθε στοιχείο, αλλά συνήθως σε ομάδες, των σε σειρά συνδεδεμένων στοιχείων του φωτοβολταϊκού πλαισίου, είτε ακόμη και στους ακροδέκτες του πλαισίου. Η συμβολή των διόδων παράκαμψης μπορεί να γίνει πιο εμφανής από τις χαρακτηριστικές P-V και I-V ενός φωτοβολταϊκού συστήματος που επηρεάζεται από το φαινόμενο της μερικής σκίασης. Στο Σχήμα 2.14, απεικονίζεται μια συστοιχία από τέσσερα συνδεδεμένα πλαίσια σε σειρά, στα οποία προσπίπτει διαφορετική πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας.

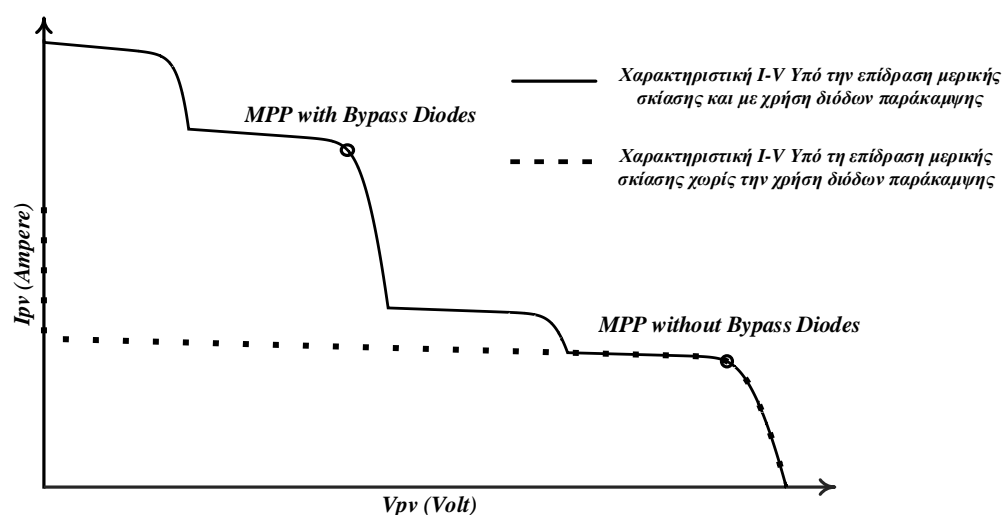


Σχήμα 2.14: Φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση μερικής σκίασης.

Στη περίπτωση αυτή, από τις χαρακτηριστικές P-V και I-V, παρατηρείται η εμφάνιση περισσοτέρων του ενός μέγιστου σημείου ισχύος. Λόγω της τοποθέτησης των διόδων παράκαμψης, η συστοιχία εμφανίζει ένα σημείο ισχύος, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο σημείο ισχύος της περίπτωσης που δεν γίνεται χρήση των διόδων παράκαμψης. Επομένως, η τοποθέτηση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για την ασφάλεια του εξοπλισμού όσο και για την βέλτιστη αξιοποίηση της ισχύος που αποδίδεται από την συστοιχία.



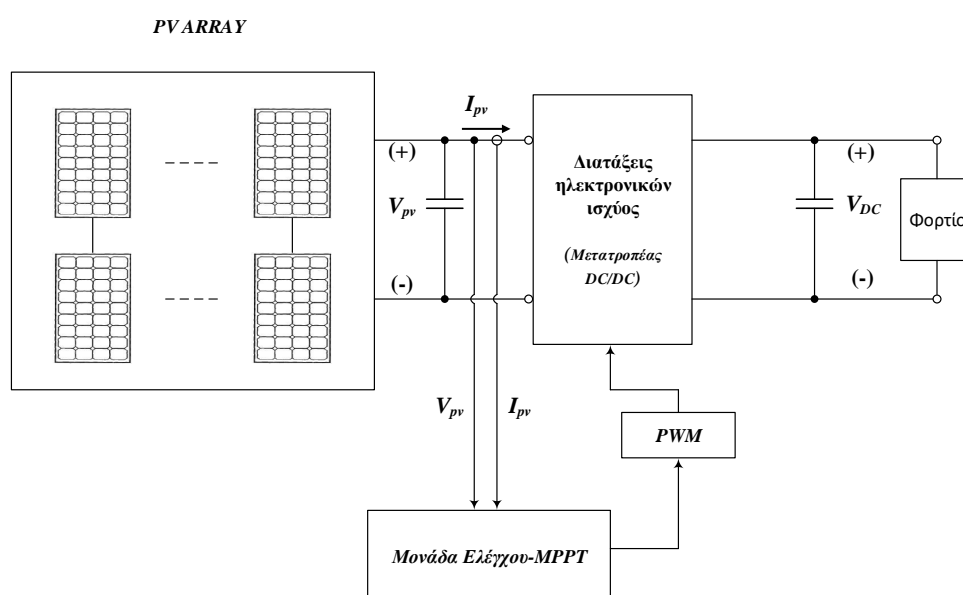
Σχήμα 2.15: Χαρακτηριστική P-V, με και χωρίς δίοδο παράκαμψης.



Σχήμα 2.16: Χαρακτηριστική I-V, με και χωρίς δίοδο παράκαμψης.

2.5 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών συστημάτων

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, δεν αποτελείται μόνο από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και το φορτίο αλλά ανάμεσά τους παρεμβάλλονται διατάξεις ισχύος καθώς και μονάδες ελέγχου που διασφαλίζουν την βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Οι διατάξεις ισχύος αποτελούνται από μετατροπείς DC-DC, οι οποίοι μπορούν και μεταβάλλουν την τάση που εφαρμόζεται στην είσοδό τους, σε ένα χαμηλότερο ή υψηλότερο επίπεδο στην έξοδό τους. Οι μονάδες ελέγχου μπορεί να αποτελούνται από αναλογικά ή ψηφιακά κυκλώματα αλλά και από ενσωματωμένα συστήματα (microcontrollers, FPGAs, ASICs κλπ), που με τους κατάλληλους αλγορίθμους-MPPT καθορίζουν τον έλεγχο των διακοπτικών στοιχείων των μετατροπέων, με στόχο την βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος από την φωτοβολταϊκή συστοιχία.



Σχήμα 2.17: Γενικό διάγραμμα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του παραπάνω φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η μονάδα ελέγχου (MPPT-TRACKING), θα πρέπει πρώτα να γίνει λεπτομερής ανάλυση της λειτουργίας των διακοπτικών μετατροπέων DC-DC. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση αφορά τους διακοπτικούς μετατροπείς ανύψωσης τάσης (DC-DC Boost Converter), οι οποίοι αποτελούν και το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.5.1 Διακοπτικοί μετατροπείς DC-DC

Οι διακοπτικοί μετατροπείς DC-DC είναι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος, όπου με τον κατάλληλο έλεγχο μπορούν να μεταβάλλουν μια DC τάση, που εφαρμόζεται στην είσοδό τους, σε ένα άλλο επίπεδο DC τάσης στην έξοδο. Οι βασικοί τύποι των μετατροπέων DC-DC είναι οι παρακάτω:

1. Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Buck Converter).
2. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost Converter).
3. Μικτός(υποβιβασμού-ανύψωσης) τάσης (Buck-Boost Converter).
4. Μετατροπέας του Ćuk (Ćuk Converter).
5. Μετατροπέας πλήρους γέφυρας (Full-bridge Converter).

Από τις παραπάνω τοπολογίες μόνο οι μετατροπείς υποβιβασμού και ανύψωσης αποτελούν τις δυο βασικές τοπολογίες, με τις υπόλοιπες να προκύπτουν από αυτές.

Στην ιδανική περίπτωση που δεν εμφανίζονται απώλειες, η ισχύς εισόδου του μετατροπέα θα είναι ίση με αυτή της εξόδου. Ωστόσο, στην πράξη ο μετατροπέας θα εμφανίζει πάντα απώλειες, με αποτέλεσμα να αποδίδεται ένα ποσοστό της ισχύς εισόδου στην έξοδο. Όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το ποσοστό τόσο καλύτερος αποδοτικά θεωρείται ο μετατροπέας. Το ποσοστό αυτό ονομάζεται συντελεστής απόδοσης (efficiency) και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta(\%) = \frac{P_o}{P_{in}} \cdot 100\% = \frac{P_o}{P_o + P_{Loss}} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

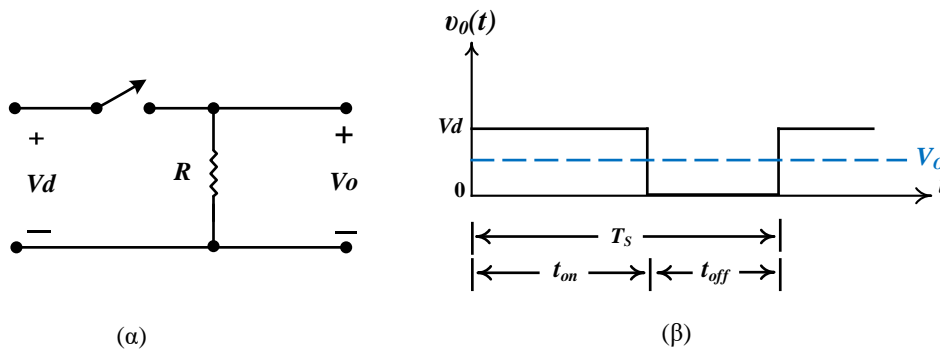
Όπου με P_{in} και P_o συμβολίζουμε την ισχύ εισόδου και εξόδου αντίστοιχα, ενώ με P_{Loss} τις απώλειες που παρουσιάζονται στον μετατροπέα. Η διακοπτική λειτουργία του μετατροπέα είναι μια από τις κυριότερες πηγές απωλειών ισχύος στον μετατροπέα αλλά υπάρχουν επίσης και απώλειες λόγω των παθητικών εξαρτημάτων (πχ πυκνωτές με μη μηδενική σε σειρά ισοδύναμη αντίσταση, πηνία με μη μηδενικές αντιστάσεις και γενικότερα παρασιτικές αντιστάσεις σε όλη την διάταξη).

2.5.1.1 Έλεγχος μετατροπέων DC-DC

Στο Σχήμα 2.18.(α) δίνεται ένας απλός μετατροπέας DC-DC, όπου η μέση τιμή V_o , της μεταβαλλόμενης τάσης εξόδου v_o του Σχήματος 2.18.(β), εξαρτάται από τους χρόνους έναυσης- t_{on} και σβέσης- t_{off} του διακόπτη [4].

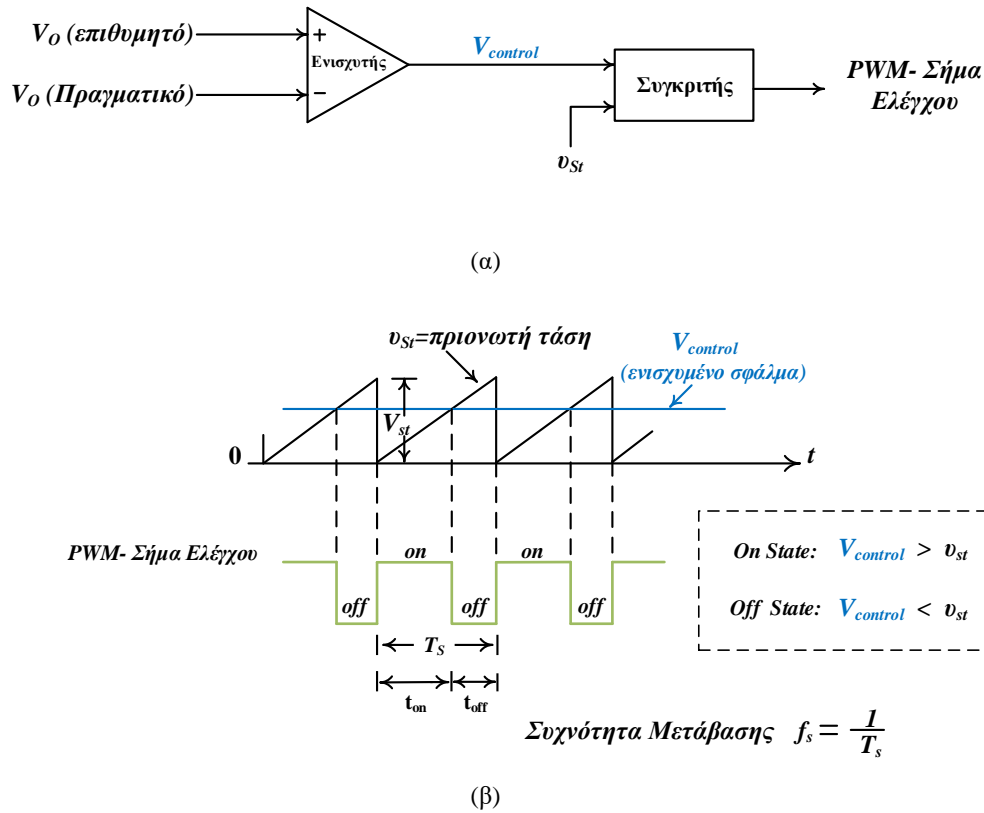
Η τάση εξόδου ελέγχεται από τον διακόπτη με την μέθοδο μετάβασης διαμόρφωσης εύρους παλμών-PWM. Αυτή βασίζεται στη μεταβολή της σχετικής διάρκειας αγωγής (Duty Cycle-D), που ορίζεται ως ο λόγος της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός προς την περίοδο μετάβασης του διακόπτη:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.10)$$



Σχήμα 2.18: (α) Απλός DC-DC διακοπτικός μετατροπέας, (β) Τάση εξόδου σε σχέση με τους χρόνους έναυσης και σβέσης του μετατροπέα, πηγή:[4].

Στη τεχνική PWM με σταθερή διακοπτική συχνότητα [4], το σήμα που καθορίζει το άνοιγμα ή κλείσιμο του διακόπτη μέσα σε μια περίοδο, παράγεται από την σύγκριση του επιπέδου της τάσης του σήματος ελέγχου, $V_{control}$, με μια περιοδική κυματομορφή (πριονωτής μορφής) σταθερού πλάτους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19.



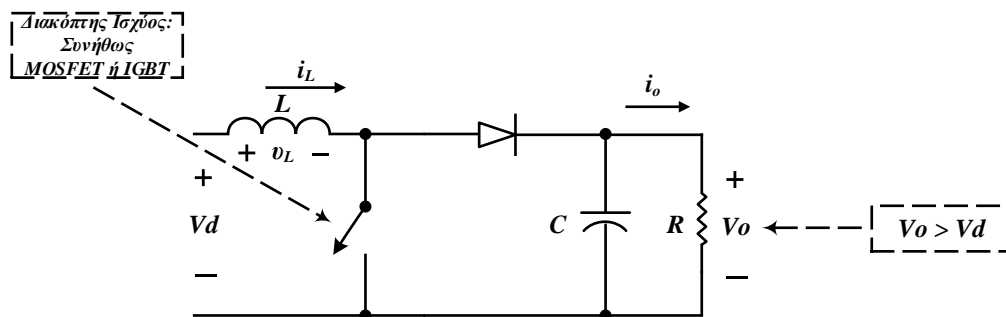
Σχήμα 2.19: PWM διαμόρφωση: (α) Λειτουργικό διάγραμμα, (β) Σήματα Συγκριτή, πηγή:[4].

Το σήμα $V_{control}$ προκύπτει ενισχύοντας τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τάσης εξόδου και της τιμής αναφοράς (επιθυμητή τιμή). Η συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής είναι αυτή που καθορίζει και τη συχνότητα μετάβασης (switching frequency) του διακόπτη. Στον έλεγχο με PWM η συχνότητα αυτή διατηρείται συνήθως σταθερή. Παρατηρούμε ότι, όσο το σήμα ελέγχου $V_{control}$ είναι μεγαλύτερο από την πριονωτή κυματομορφή, ο διακόπτης του μετατροπέα "όδηγείται" σε κλειστή λειτουργία. Διαφορετικά, ο διακόπτης "όδηγείται" σε ανοιχτή λειτουργία. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.19, η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί, ως συνάρτηση του σήματος ελέγχου $V_{control}$ και του πλάτους της πριονωτής κυματομορφής με την εξής σχέση:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{V_{control}}{V_{st}} \quad (2.11)$$

2.5.1.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost Converter)

Στο Σχήμα 2.20 απεικονίζεται το κύκλωμα ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης [4]. Ο μετατροπέας έχει το χαρακτηριστικό ότι μπορεί και μετατρέπει την DC-τάση εισόδου V_d , σε μια μεγαλύτερη DC-τάση εξόδου V_o . Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η είσοδος παρέχει ενέργεια μόνο στο πηνίο, με την διόδο να οδηγείται σε ανάστροφη πόλωση. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, η βαθμίδα εξόδου απορροφά ενέργεια από το πηνίο και από την είσοδο το οποίο συνεπάγεται στην ανύψωση της τάσης στην έξοδο.

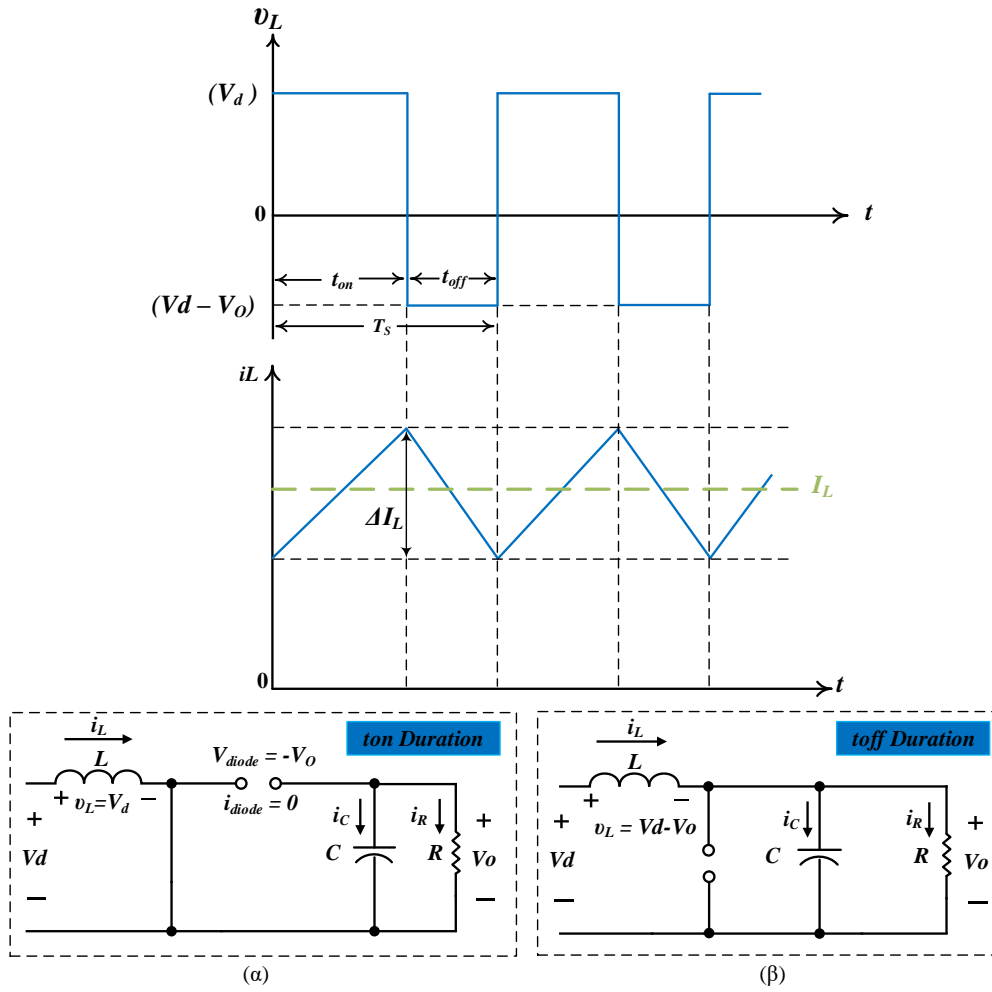


Σχήμα 2.20: Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Boost Converter), πηγή:[4].

Εάν υποθέσουμε ότι ο πυκνωτής εξομάλυνσης C έχει μεγάλη τιμή τότε θα ισχύει $u_o(t) \cong V_o$. Με βάση αυτή την υπόθεση, παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του μετατροπέα.

2.5.1.3 Λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος

Ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης έχει το χαρακτηριστικό ότι μπορεί να βρίσκεται σε τρεις διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας. Ένας από αυτούς, είναι η λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή ρεύματος [4]. Στην λειτουργία αυτή και εάν υποθέσουμε ότι ο μετατροπέας βρίσκεται στην μόνιμη κατάσταση ισοροπίας, το ρεύμα στο πηνίο του μετατροπέα ρέει συνεχώς ($i_L(t) > 0$). Στη περίπτωση αυτή, η συμπεριφορά των κυματομορφών τάσης και ρεύματος του πηνίου, για κάθε κατάσταση του διακόπτη (κλειστός ή ανοιχτός), απεικονίζονται στο Σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.21: Συνεχής λειτουργία:(α) Διακόπτης κλειστός, (β) Διακόπτης ανοιχτός, πηγή:[4].

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η μέση τιμή της τάσης του πηνίου στο διάστημα μίας περιόδου είναι ίση με το μηδέν. Έτσι, θα ισχύει ότι:

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_L = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} u_L(t) dt &= \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{on}} u_L(t) dt + \int_{t_{on}}^{T_s} u_L(t) dt \right) = 0 \\
 &= \frac{1}{T_s} \left(V_d \cdot t_{on} + [(V_d - V_o) \cdot t]_{t_{on}}^{T_s} \right) = 0 \\
 &= V_d - V_o + V_o \cdot \frac{t_{on}}{T_s} = 0
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow V_d \cdot T_s = V_o \cdot (T_s - t_{on})$$

$$\Rightarrow V_d \cdot T_s = V_o \cdot t_{off}$$

Διαιρώντας και τα δύο μέρη με T_s προκύπτει ότι:

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} \Rightarrow V_o = \frac{V_d}{1-D}, \quad 0 < D < 1 \quad (2.12)$$

Όπου: $T_s = t_{on} + t_{off}$ και $D = \frac{t_{on}}{T_s}$.

Με την υπόθεση ότι δεν παρουσιάζονται απώλειες ισχύος, θα ισχύει ότι:

$$P_d = P_o \Rightarrow V_d \cdot I_d = V_o \cdot I_o$$

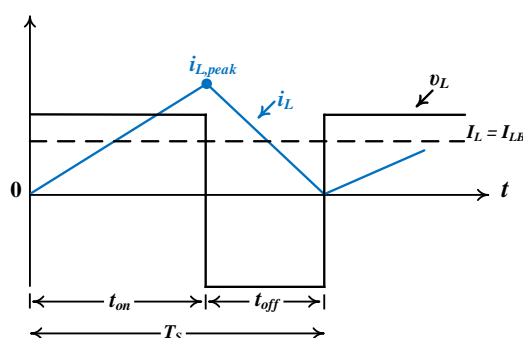
Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.12) προκύπτει ότι:

$$I_o = I_d \cdot (1-D), \quad 0 < D < 1 \quad (2.13)$$

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης ισοδυναμεί με ένα “DC Μετασχηματιστή”, όπου ο λόγος μετασχηματισμού του ισοδύναμου αυτού μετασχηματιστή μπορεί να ρυθμίζεται συνεχώς, με ηλεκτρονικό τρόπο, ελέγχοντας τη σχετική διάρκεια αγωγής (Duty Cycle-D).

2.5.1.4 Όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ρεύματος

Το ρεύμα του πηνίου i_L σε αυτή τη λειτουργία μηδενίζεται στο τέλος της περιόδου T_s , κατά την οποία ο διακόπτης είναι ανοιχτός [4]. Οι κυματομορφές της τάσης και ρεύματος σε αυτή την λειτουργία απεικονίζονται παρακάτω.



Σχήμα 2.22: Οι Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του πηνίου στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς λειτουργίας, πηγή:[4].

Η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου στο όριο αυτό είναι ίσο με:

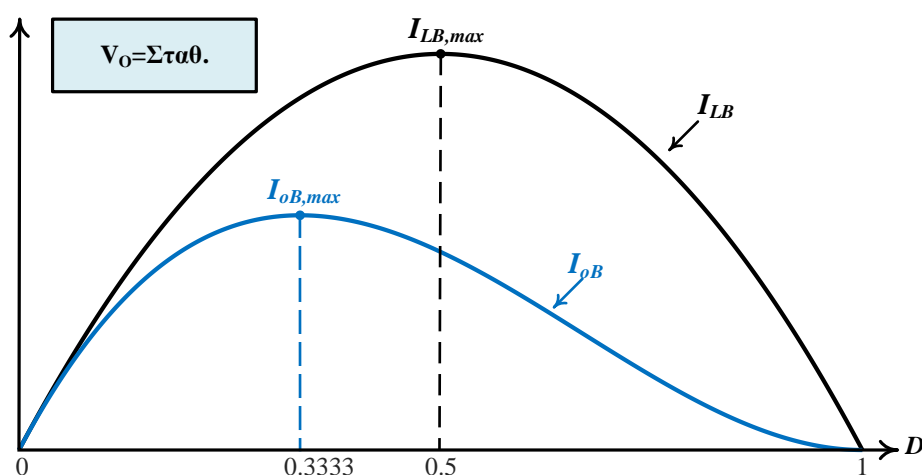
$$I_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,peak} = \frac{1}{2} \frac{V_d}{L} t_{on} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1-D) \quad (2.14)$$

Η σχέση (2.14) προκύπτει χρησιμοποιώντας την σχέση (2.13) και ότι $t_{on} = D \cdot T_s$.

Στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης το ρεύμα εισόδου και το ρεύμα του πηνίου είναι ίσα ($i_d = i_L$), κάνοντας χρήση της εξίσωσης (2.13) και (2.14) προκύπτει ότι η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς λειτουργίας είναι:

$$I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1-D)^2 \quad (2.15)$$

Στο Σχήμα 2.23, απεικονίζεται η συμπεριφορά της μέσης τιμής του ρεύματος της εξόδου και του πηνίου σε σχέση με την σχετική διάρκεια αγωγής, D . Στη περίπτωση αυτή, η τάση εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, V_o , θεωρείται ότι παραμένει σταθερή.



Σχήμα 2.23: Οι κυματομορφές ρεύματος εξόδου και πηνίου στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς λειτουργίας, πηγή:[4].

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος στο όριο ασυνέχειας I_{LB} βρίσκεται για την τιμή $D=0.5$.

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{8L} \quad (2.16)$$

Επίσης, το ρεύμα εξόδου στο όριο ανέχειας I_{oB} μεγιστοποιείται για $D = \frac{1}{3} = 0.3333$.

$$I_{oB,max} = \frac{2}{27} \frac{T_s V_o}{L} = 0.074 \frac{T_s V_o}{L} \quad (2.17)$$

Για σταθερή λοιπόν, τάση εξόδου V_o και για δεδομένο (Duty Cycle-D) στο Σχήμα 2.23 φαίνεται ότι, αν το ρεύμα του φορτίου πέσει κάτω από το I_{oB} (και έτσι το ρεύμα του πηνίου πέσει κάτω από το I_{LB}), το ρεύμα θα γίνει ασυνεχές.

Εάν στην έξοδο του μετατροπέα συνδεθεί ένα ωμικό φορτίο με αντίσταση R και ελέγχεται με σταθερή διακοπτική περίοδο T_s , ώστε να διατηρείται η τάση V_o σταθερή, τότε θα ισχύει ότι $I_o = \frac{V_o}{R}$. Εφόσον ο μετατροπέας βρίσκεται στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς λειτουργίας θα ισχύει επίσης:

$$I_o = I_{oB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1 - D)^2$$

$$\frac{V_o}{R} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1 - D)^2$$

Επομένως,

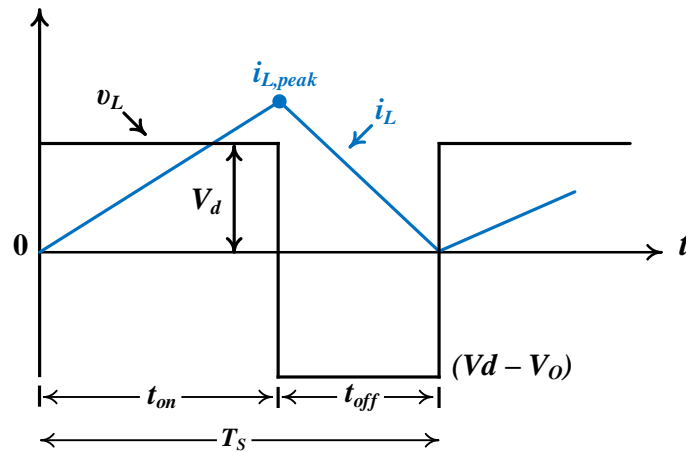
$$L_{crit} = \frac{T_s R}{2} D(1 - D)^2 \quad (2.18)$$

Προκύπτει, λοιπόν ότι, για να λειτουργήσει ο μετατροπέας στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς λειτουργίας θα πρέπει η τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου L να είναι ίση με L_{crit} . Στη περίπτωση που η τιμή της αυτεπαγωγής είναι μεγαλύτερη από L_{crit} , τότε μετατροπέας θα βρίσκεται στη συνεχή λειτουργία αγωγής, αλλιώς αν είναι μικρότερη θα βρίσκεται στην ασυνεχή λειτουργία αγωγής. Επομένως, μια κατάλληλη επιλογή στη τιμή της αυτεπαγωγής L μπορεί να οδηγήσει τον μετατροπέα σε ένα διαφορετικό τρόπο λειτουργίας. Έτσι, προκύπτουν οι εξής περιπτώσεις:

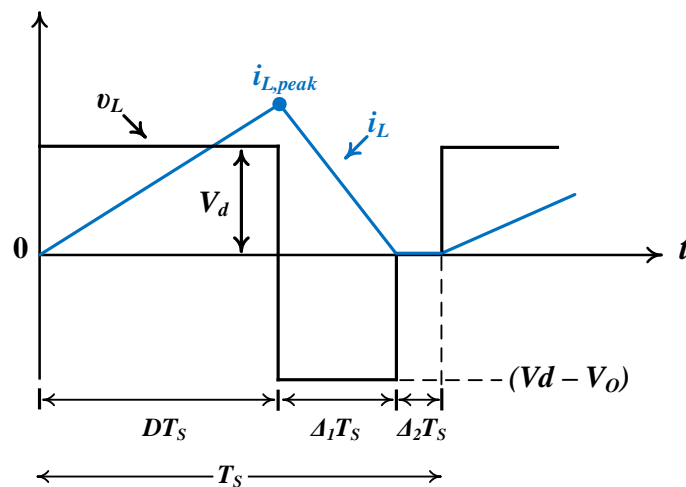
- $L > L_{crit}$, Συνεχής Λειτουργία Αγωγής (Continuous Conduction Mode-CCM).
- $L = L_{crit}$, Όριο Συνεχούς-Ασυνεχούς Λειτουργίας Αγωγής (Boundary Conduction Mode-BCM).
- $L < L_{crit}$, Ασυνεχής Λειτουργία Αγωγής (Discontinuous Conduction Mode-DCM).

2.5.1.5 Λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος

Στην λειτουργία ασυνεχούς αγωγής, το ρεύμα του πηνίου (i_L) μηδενίζεται πριν το τέλος της διακοπτικής περιόδου T_s [4]. Στο Σχήμα 2.24, απεικονίζονται οι κυματομορφές στο όριο μεταξύ συνεχούς-ασυνεχούς αγωγής λειτουργίας και ασυνεχούς αγωγής λειτουργίας, με την υπόθεση ότι η V_d και D είναι σταθερά.



(α)



(β)

Σχήμα 2.24: (α) Όριο Συνεχούς-Ασυνεχούς λειτουργίας , (β) Ασυνεχής λειτουργία, πηγή:[4].

Το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου ισούται με:

$$V_d D T_s + (V_d - V_o) \delta_1 T_s = 0$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{\Delta_1 + D}{\Delta_1} \quad (2.19)$$

Και λόγω ότι ο μετατροπέας δεν παρουσιάζει απώλειες, θα ισχύει $P_o = P_d$ και επομένως μπορεί να προκύψει ότι:

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta_1}{\Delta_1 + D} \quad (2.20)$$

Από το Σχήμα 2.24.(β) η μέση τιμή του ρεύματος εισόδου, το οποίο είναι επίσης ίσο με το ρεύμα του πηνίου, θα είναι ίσο με:

$$I_d = \frac{V_d}{2L} D T_s (D + \Delta_1) \quad (2.21)$$

Κάνοντας χρήση της εξίσωσης (2.20) στην παραπάνω εξίσωση, προκύπτει ότι :

$$I_o = \left(\frac{T_s V_d}{2L} \right) D \Delta_1 \quad (2.22)$$

Εάν ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης μεταβάλει την σχετική διάρκεια αγωγής, D , προκειμένου να διατηρήσει την τάση εξόδου V_o σε μια επιθυμητή σταθερή τιμή τάσης, τότε η διάρκεια αγωγής σε συνάρτηση με το ρεύμα του φορτίου, μπορεί να προκύψει από τον συνδυασμό των σχέσεων (2.17), (2.19) και (2.22), ως εξής:

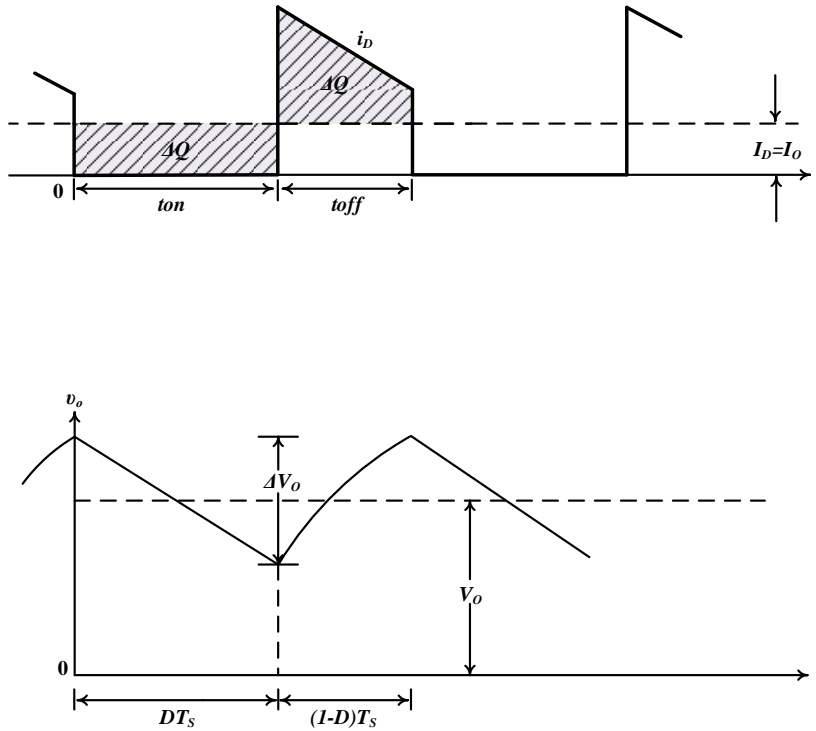
$$D = \left[\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oB,max}} \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

2.5.1.6 Κυμάτωση τάσης εξόδου

Η κυμάτωση της τάσης εξόδου σε έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης, δηλαδή η από κορυφή σε κορυφή κυμάτωση (peak-to-peak ripple), μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την συμπεριφορά των κυματομορφών που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.26 [4]. Ο μετατροπέας στην περίπτωση αυτή, βρίσκεται σε λειτουργία συνεχούς αγωγής ρεύματος (Continuous Conduction Mode-CCM).

Με την υπόθεση ότι ο πυκνωτής έχει μηδενική-σε σειρά ισοδύναμη αντίσταση (Equivalent Series Resistance-ESR) και επίσης ότι, η εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος της διόδου ρέει μέσω του πυκνωτή εξόδου, δηλαδή ισχύει $\Delta i_{diode} \cong \Delta i_C$, ενώ η μέση τιμή του ρέει στο φορτίο (στην περίπτωση αυτή καθαρά ωμικό φορτίο R), τότε προκύπτει ότι, η από κορυφή-σε-κορυφή κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι ίση με:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o D T_s}{C} = \frac{V_o}{R} \frac{D T_s}{C} \quad (2.24)$$

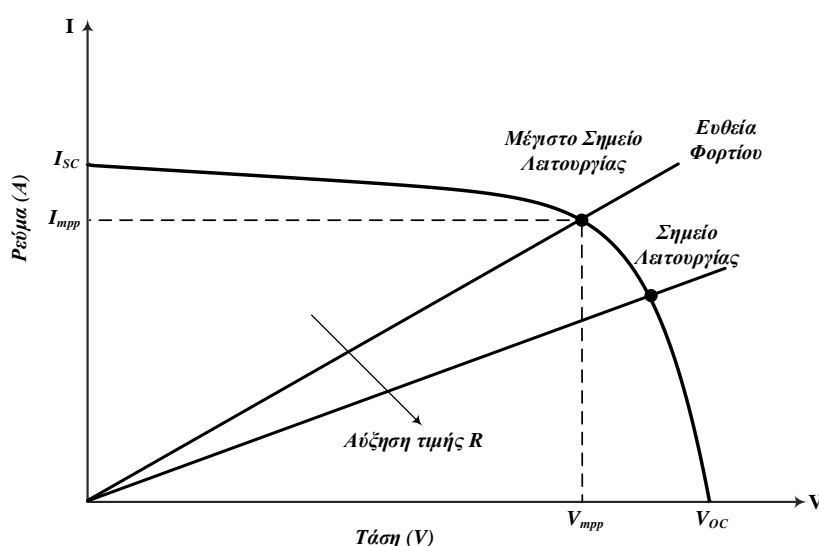


Σχήμα 2.25: Κυμάτωση τάσης εξόδου, πηγή:[4].

2.5.2 Μονάδα ελέγχου-MPPT

Εάν θεωρήσουμε ότι το φορτίο του φωτοβολταϊκού συστήματος, στο **Σχήμα 2.17**, είναι καθαρά ωμικό και δεν παρεμβάλλεται ανάμεσα καμία διάταξη, τότε το ρεύμα στο φορτίο θα είναι ίσο με:

$$I_o = \left(\frac{1}{R} \right) V_o. \quad (2.25)$$



Σχήμα 2.26: Χαρακτηριστική I-V και ευθεία φορτίου για διαφορετικές τιμές του R.

Επομένως, όπως παρατηρήθηκε και από το **Σχήμα 2.27**, μια αλλαγή στην τιμή του φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε μια μεταβολή του σημείου λειτουργίας της συστοιχίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την μη βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος, καθώς το σύστημα μπορεί να μην βρεθεί στο μέγιστο σημείο ισχύος (**Maximum Power Point-MPP**). Για τον λόγο αυτό, η συστοιχία δεν συνδέεται απευθείας με το φορτίο αλλά ανάμεσα παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας DC-DC. Εάν υποθέσουμε ότι γίνεται χρήση ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης, τότε μια αλλαγή στη τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής D, οδηγεί στη μεταβολή της αντίστασης που εμφανίζεται στα άκρα της συστοιχίας. Οπότε με τον κατάλληλο έλεγχο της σχετικής διάρκειας αγωγής-D, μπορεί να μεταβληθεί κατάλληλα το σημείο λειτουργίας και τελικώς να γίνει σύγκλιση στο μέγιστο σημείο ισχύος (**Maximum Power Point-MPP**). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται, ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος (**Maximum Power Point Tracking-MPPT**) και αποτελεί τη κύρια λειτουργία της μονάδας ελέγχου του φωτοβολταϊκού συστήματος.

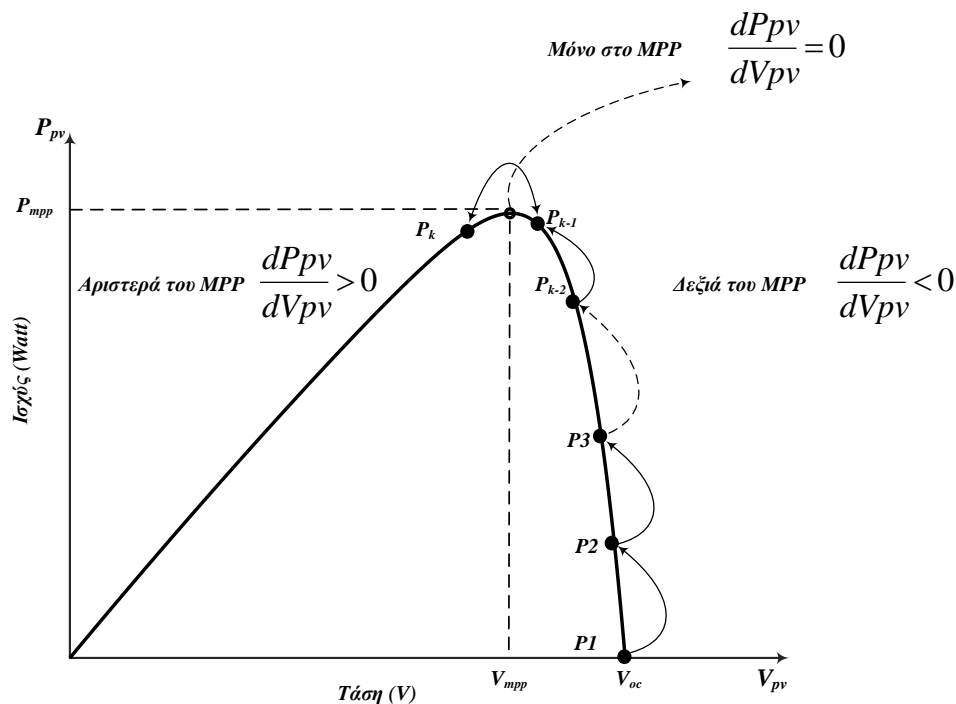
Η μονάδα ελέγχου ενός φωτοβολταϊκού συστήματος αποτελείται συνήθως από ένα σύστημα μετρήσεων του ρεύματος-τάσης της συστοιχίας και του φορτίου, οι οποίες μπορεί να τροφοδοτούνται τόσο σε αναλογικά ή ψηφιακά κυκλώματα ελέγχου όσο και σε ενσωματωμένα συστήματα (π.χ microcontrollers, FPGAs, ASICs κλπ). Έπειτα, γίνεται επεξεργασία των μετρήσεων από τους κατάλληλους αλγορίθμους ελέγχου.

Ωστόσο, το σημείο λειτουργίας δεν επηρεάζεται μόνο από το φορτίο, αλλά όπως είδαμε και προηγουμένως, η θερμοκρασία, οι δυναμικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και γενικότερα το φαινόμενο της μερικής σκίασης αποτελούν, επίσης, παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν το φωτοβολταϊκό σύστημα σε ένα μη βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της μερικής σκίασης, από το **Σχήμα 2.15** παρατηρείται ότι, η χαρακτηριστική P-V εμφανίζει περισσότερα από ένα μέγιστα. Αυτό λοιπόν, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, αποτελεί το κύριο αντικείμενο ανάπτυξης νέων αλγορίθμων ελέγχου, καθώς οι συμβατικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται δεν εξασφαλίζουν τη σύγκλιση στο σημείο μέγιστης ισχύος σε όλες τις περιπτώσεις.

2.5.2.1 Μέθοδος Perturb & Observe (P&O)

Η μέθοδος “Διαταραχής και Παρατήρησης” (**Perturb & Observe- P&O**) αποτελεί την δημοφιλέστερη τεχνική ανίχνευσης-μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT). Η απλοποιημένη μορφή της βασίζεται στη διαταραχή της σχετικής διάρκειας αγωγής (Duty Cycle -D) ενός PWM σήματος, το οποίο “οδηγεί” τον διακόπτη ενός μετατροπέα DC-DC [5]. Η διαταραχή αυτή οδηγεί στη μεταβολή του ρεύματος και τάσης της συστοιχίας, το οποίο συνεπάγεται και μεταβολή στο σημείο λειτουργίας της συστοιχίας.

Στο σχήμα 2.28 απεικονίζεται η διαδοχική διαδικασία ανίχνευσής για μια πρακτική εφαρμογή της μεθόδου **P&O**. Η διαδικασία αρχίζει με την συστοιχία να βρίσκεται στο σημείο- P_1 . Ο διακόπτης του μετατροπέα σε αυτήν την περίπτωση είναι ανοικτός και η σχετική διάρκεια αγωγής (Duty Cycle) είναι $D = 0$. Αυτό σημαίνει ότι, η συστοιχία βρίσκεται σε λειτουργία ανοικτοκυκλώματος ($V_{pv} = V_{oc}$, $I_{pv} = 0$). Αυξάνοντας την τιμή του D με μια τιμή, α ($0 \leq \alpha < 1$), η τάση αρχίζει να μειώνεται ενώ η ισχύς αυξάνεται. Μετά από βήματα $k - 1$ και επαναλαμβανόμενη αύξηση της τιμής του D ($0 < D < 1$) κατά, α , η συστοιχία θα φτάσει στο σημείο ισχύος P_{k-1} . Έπειτα, μια επόμενη αύξηση του D κατά, α , θα οδηγήσει την συστοιχία σε ένα σημείο ισχύος P_k , στο οποίο η ισχύς θα είναι μικρότερη από ότι ήταν στο σημείο P_{k-1} . Στο βήμα αυτό της διαδικασίας διαπιστώνεται ότι, η τιμή του D θα πρέπει να μειωθεί κατά, α , για να βρεθεί στο σημείο λειτουργίας P_{k-1} , το οποίο αποδίδει μεγαλύτερη ισχύ. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα το σημείο λειτουργίας να κινείται κοντά στο MPP και να εναλλάσσεται μεταξύ των σημείων P_k και P_{k-1} , αυξομειώνοντας την τιμή του D κατά μια σταθερή τιμή α . Το πόσο κοντά θα βρεθεί αυτή η εναλλαγή των σημείων στο MPP, εξαρτάται από την τιμή του α , που μεταβάλλει την τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής D.



Σχήμα 2.27: Χαρακτηριστική P-V και η διαδικασία ανίχνευσης με την μέθοδο **P&O**.

Μια μαθηματική ανάλυση της παραπάνω διαδικασίας είναι η εξής:

$$\frac{dP_{pv}}{dD} = \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \cdot \frac{dV_{pv}}{dD} \quad (2.26)$$

Στη περίπτωση που γίνεται χρήση ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης και στην έξοδό του θεωρήσουμε ότι V_o =σταθερό, θα ισχύει ότι:

$$V_{pv} = V_o \cdot (1 - D) \Rightarrow \frac{dV_{pv}}{dD} = \frac{dV_o}{dD} - V_o = -V_o \neq 0, \quad 0 < D < 1$$

Η συνθήκη σύγκλισης στο MPP θα είναι:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \Leftrightarrow \frac{dP_{pv}}{dD} = 0 \quad (2.27)$$

Έτσι, η συνθήκη διαταραχής της σχετικής διάρκειας αγωγής σε κάθε βήμα ανίχνευσης θα ισούται με:

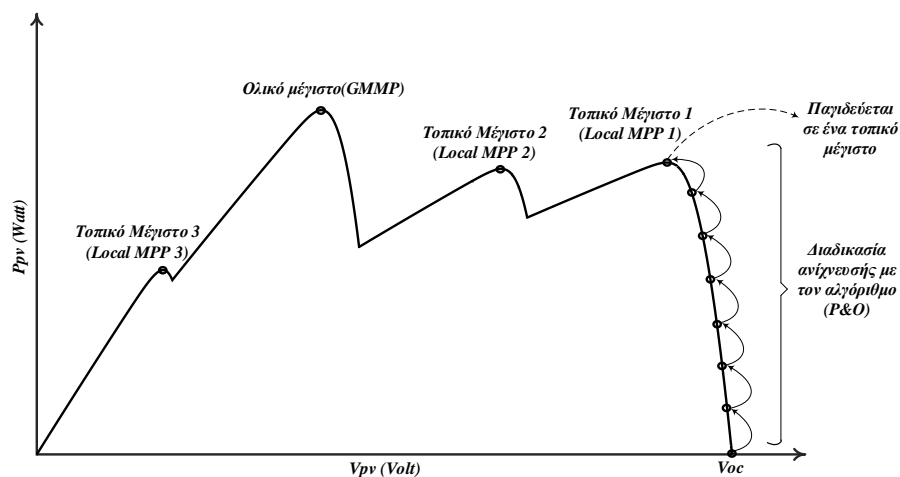
$$D_k = D_{k-1} + a \cdot \text{sign} \left(\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta D} \right) \quad (2.28)$$

(Όπου D_k : είναι η τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής στο βήμα k).

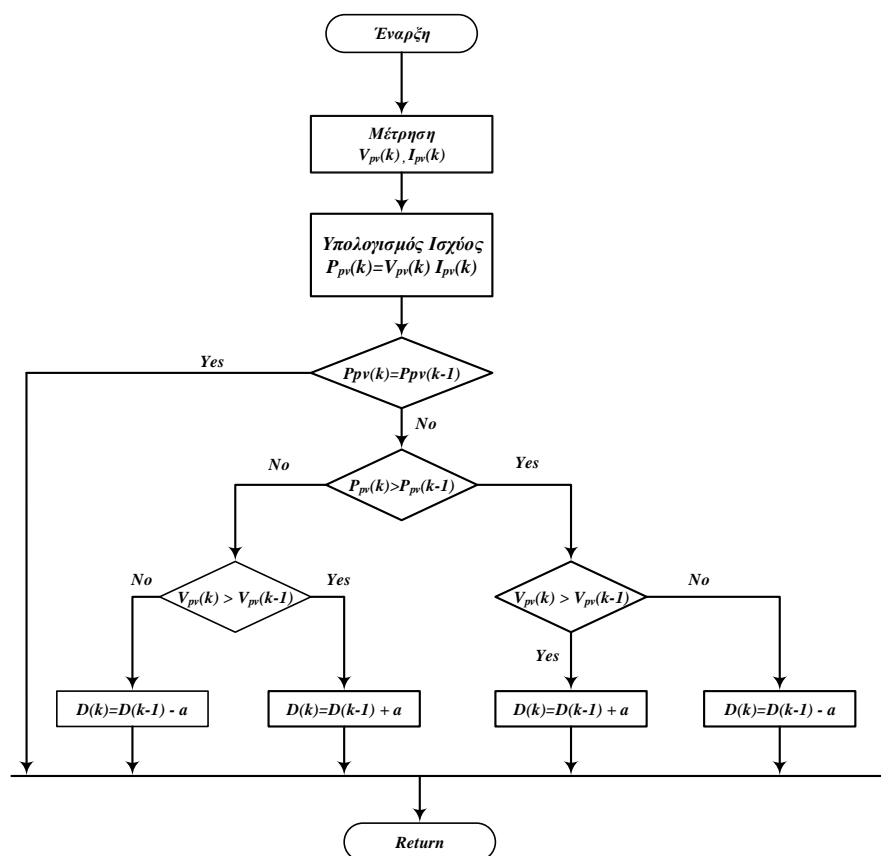
Η μέθοδος **P&O** είναι αρκετά δημοφιλής λόγω της απλότητας τόσο στη σχεδίαση όσο και στη πραγματική λειτουργία του συστήματος. Συνήθως απαιτούνται δύο αισθητήρες που μετρούν το ρεύμα και την τάση της συστοιχίας, ενώ για τον έλεγχο η συνήθης επιλογή είναι η χρήση ενός μικροελεγκτή (microcontroller). Ωστόσο, η εκτέλεση της μεθόδου μπορεί να γίνει και με την χρήση αναλογικών ή ψηφιακών κυκλωμάτων. Επίσης, πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το σύστημα ελέγχου δεν απαιτεί την γνώση των χαρακτηριστικών της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (όπως-τάση ανοικτοκυκλώματος ή ρεύματος βραχυκύκλωσης).

Παραπάνω αναφέρθηκε ότι το βήμα διαταραχής, α , που μεταβάλλει την σχετική διάρκεια αγωγής, αποτελεί σημαντική παράμετρο για την σύγκλιση στο μέγιστο σημείο ισχύος της συστοιχίας. Ωστόσο, αν το βήμα, α , γίνει πολύ μικρό, ο αλγόριθμος **P&O** θα καθυστερήσει σημαντικά να συγκλίνει στο MPP. Από την άλλη ένα μεγάλο βήμα διαταραχής θα οδηγήσει σε μια γρήγορη σύγκλιση αλλά σε μια μεγαλύτερη ταλάντωση γύρω από το MPP, όπως αυτή του **Σχήματος 2.27**. Παρόλα αυτά, ανεξαρτήτως του βήματος διαταραχής, η μέθοδος αυτή δεν εγγυάται σύγκλιση στο μέγιστο σημείο για όλες τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και αυτό γιατί μια δυναμική αλλαγή της ακτινοβολίας μπορεί να οδηγήσει το σημείο λειτουργίας να αποκλίνει συνεχώς από το μέγιστο σημείο ισχύος-MPP [6]. Επίσης, όταν παρατηρείται το φαινόμενο της μερικής σκίασης η χαρακτηριστική P-V της συστοιχίας μπορεί να εμφανίζει περισσότερα από ένα μέγιστα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η μέθοδος αυτή να παγιδεύεται σε ένα τοπικό μέγιστο, το οποίο να μην αποτελεί το ολικό (GMPP) της χαρακτηριστικής P-V, με αποτέλεσμα να μην αξιοποιείται βέλτιστα η παραγόμενη ισχύς της συστοιχίας.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, η μέθοδος **P&O** χρησιμοποιείται ως βοηθητική ρουτίνα ενός νέου αλγορίθμου MPPT που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Α.Π.Ε. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η εξολοκλήρου χρήση του για MPPT δεν ενδείκνυται σε περιπτώσεις που εμφανίζεται το φαινόμενο της μερικής σκίασης. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται πλήρης περιγραφή της νέας τεχνικής ελέγχου, η οποία εξασφαλίζει σύγκλιση στο ολικό μέγιστο (GMPP) ακόμα και σε συνθήκες μερικής σκίασης.



Σχήμα 2.28: Διαδικασία ανίχνευσης με την μέθοδο **P&O**, όταν εμφανίζεται το φαινόμενο της μερικής σκίασης.



Σχήμα 2.29: Διάγραμμα ροής της μεθόδου **P&O**.

Κεφάλαιο 3

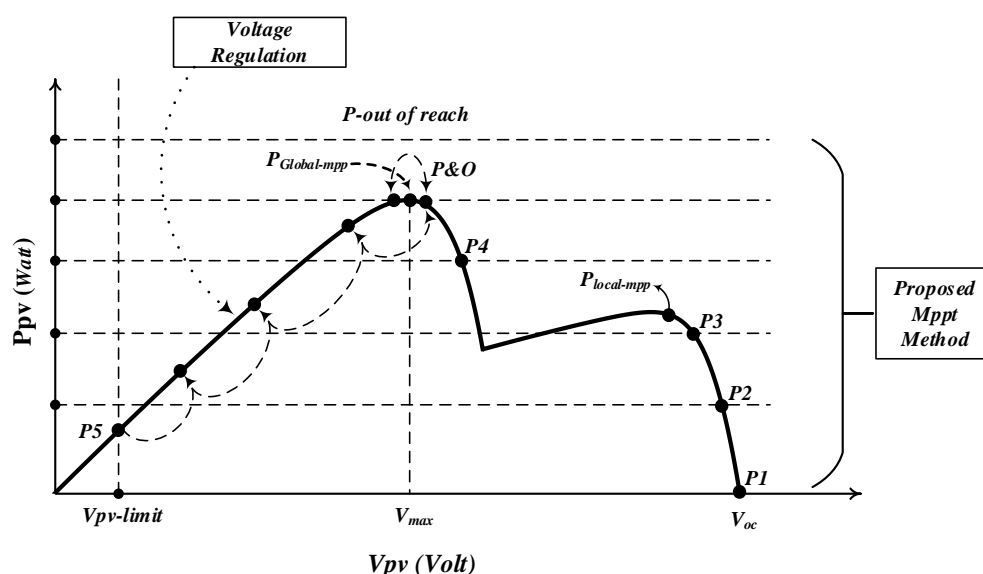
Ανάλυση του προτεινόμενου συστήματος

3.1 Γενική περιγραφή νέας μεθόδου MPPT

Στη παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε μια νέα μέθοδος MPPT, η οποία βασίζεται σε χαρακτηριστικά λειτουργίας της μεθόδου [7], που είχε αναπτυχθεί παλαιότερα στο Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Α.Π.Ε. Η νέα μέθοδος εξετάζει την περίπτωση ελέγχου του μετατροπέα DC-DC ανύψωσης τάσης και πιο συγκεκριμένα όταν αυτός λειτουργεί σε ασυνεχή αγωγή ρεύματος. Η ανίχνευση του GMPP σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να λειτουργήσει, είτε για αυτόνομα συστήματα είτε και για διασυνδεδεμένα συστήματα. Αυτή εξασφαλίζει τη σύγκλιση στο μέγιστο σημείο ισχύος ακόμη και σε περιπτώσεις που εμφανίζεται το φαινόμενο της μερικής σκίασης. Η μονάδα ελέγχου του φωτοβολταϊκού συστήματος βασίζεται στη χρήση διάταξης FPGA, με την οποία δίνεται η δυνατότητα κατασκευής επαναπρογραμματιζόμενων μονάδων ελέγχου, με ψηφιακό τρόπο, μέσω της γλώσσας περιγραφής υλικού (VHDL).

Στη περίπτωση αυτή, ο μετατροπέας λειτουργεί ως ένα ρυθμιζόμενο φορτίο που έχει την δυνατότητα να απορροφά σταθερή ισχύ στην είσοδό του. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1, η διαδικασία ανίχνευσης εκκινεί από το σημείο-**P1**, στο οποίο η συστοιχία βρίσκεται σε λειτουργία ανοικτοκύκλωσης. Ο έλεγχος του μετατροπέα πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να απορροφά σταδιακά μεγαλύτερη ισχύ στην είσοδό του. Έτσι, προκύπτει η διαδικασία ανίχνευσης, η οποία μεταβαίνει διαδοχικά από τα σημεία (**P1**, **P2**, **P3**, **P_{local-Mpp}**, **P4**, **P_{Global-Mpp}** και **P5**). Από το σχήμα παρατηρούμε ότι, η διαδοχική μετάβαση της μεθόδου αυτή, εξασφαλίζει ότι η συστοιχία δεν θα παγιδευτεί σε ένα τοπικό μέγιστο (**P_{local-Mpp}**), αλλά θα ανιχνεύει τα σημεία λειτουργίας (**P4** και **P_{Global-Mpp}**), τα οποία αποδίδουν μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με το (**P_{local-Mpp}**). Παράλληλα, η μέθοδος αυτή μπορεί και παραλείπει ένα μεγάλο εύρος ανίχνευσης σημείων λειτουργίας της συστοιχίας, το οποίο μεταφράζεται και στη γρηγορότερη σύγκλιση στο μέγιστο σημείο ισχύος.

Η μέθοδος έχοντας φτάσει στο σημείο ($P_{Global-Mpp}$), αυξάνει την απαίτηση σε ισχύ από τον μετατροπέα, την οποία όμως η συστοιχία δεν μπορεί να τροφοδοτήσει. Έτσι, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει στο σημείο ($P5$) και η διαδικασία ανίχνευσης σταματάει. Επομένως, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει η συστοιχία παρουσιάζεται στο σημείο ($P_{Global-Mpp}$). Έπειτα, για να μπορέσει να γίνει η μετάβαση από το σημείο ($P5$) στο ($P_{Global-Mpp}$), ο μετατροπέας ελέγχεται με τέτοιο τρόπο ώστε η τάση της συστοιχίας να γίνει ίση με αυτή, για την οποία παρουσιάζεται το μέγιστο σημείο ισχύος. Στη συνέχεια, γίνεται εφαρμογή της διαδικασίας **P&O**, η οποία σχεδιάζεται να λειτουργεί με ένα μικρό βήμα διαταραχής, έτσι ώστε η συστοιχία να βρεθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στο μέγιστο σημείο ισχύος ($P_{Global-Mpp}$).

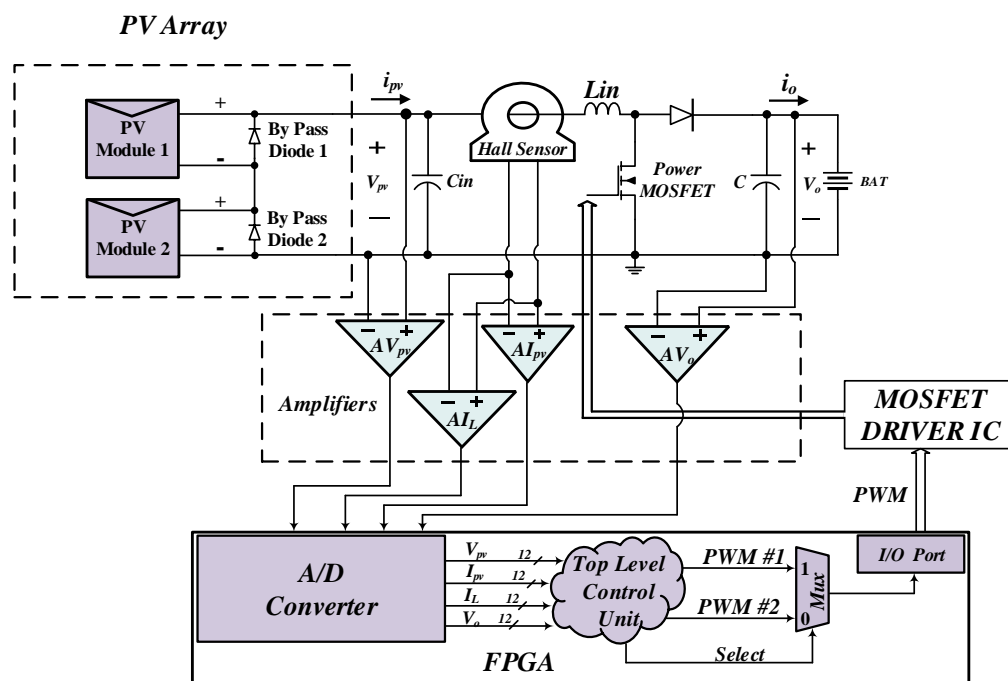


Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας της νέας μεθόδου MPPT.

Η νέα μέθοδος έχει το χαρακτηριστικό ότι, δεν απαιτεί την γνώση των χαρακτηριστικών της συστοιχίας καθώς επίσης δεν χρειάζεται να γνωρίζει το τρόπο συνδεσμολογίας της συστοιχίας. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει το πλεονέκτημα του επαναπρογραμματισμού μονάδων ελέγχου μέσω της FPGA, οι οποίες σε άλλη περίπτωση θα έπρεπε να γίνει η πλήρης αλλαγή του υλικού (αναλογικά ή ψηφιακά κυκλώματα) που τα απαρτίζουν. Στη συνέχεια, δίνεται το γενικό λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε καθώς και πλήρης ανάλυση της μονάδας ελέγχου και της διαδικασίας MPPT.

3.2 Περιγραφή του συστήματος που αναπτύχθηκε

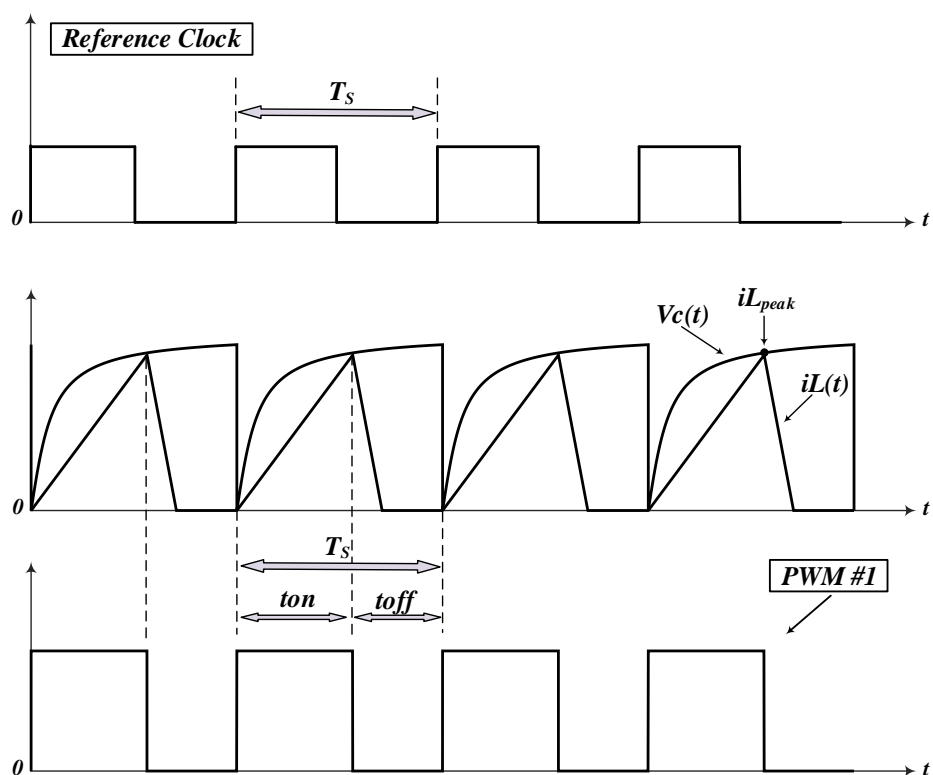
Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται, το γενικό λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος που αναπτύχθηκε. Το σύστημα αποτελείται από δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά ενώ παράλληλα με αυτά συνδέεται μια δίοδος παράκαμψης. Επιπλέον, ως διεπαφή ισχύος χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας DC-DC ανύψωσης τάσης, ο οποίος θα πρέπει να λειτουργεί διαρκώς σε ασυνεχή αγωγή. Ακόμη, γίνεται χρήση ενός συστήματος μετρήσεων, το οποίο τροφοδοτεί τις μετρήσεις για επεξεργασία στη μονάδα ελέγχου. Η επεξεργασία των μετρήσεων και γενικότερα ο έλεγχος πραγματοποιείται με τη χρήση μιας FPGA. Τέλος, το φορτίο αποτελείται από δύο σε σειρά συνδεδεμένες μπαταρίες μολύβδου ονομαστικής τάσης 12 Volt η καθεμία, ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης περισσότερων μπαταριών σε διάφορες συνδεσμολογίες (σε σειρά, παράλληλα ή σε συνδυασμό των δύο).



Σχήμα 3.2: Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος που υλοποιήθηκε.

Η επιλογή της αυτεπαγωγής L_{in} , του πυκνωτή εξομάλυνσης C_{in} καθώς και του πυκνωτή C , υπολογίζονται όπως περιγράφεται στο [4]. Ο υπολογισμός των τιμών γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο μετατροπέας DC-DC ανύψωσης τάσης να βρίσκεται διαρκώς λειτουργία ασυνεχούς αγωγής και η κυμάτωση της τάσης τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του μετατροπέα να παραμένει σε ένα επιθυμητό επίπεδο. Οι μετρήσεις των τάσεων της συστοιχίας και του φορτίου πραγματοποιείται με δυο διαφορικούς ενισχυτές, ενώ οι μετρήσεις των ρευμάτων της συστοιχίας και του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο λαμβάνονται από έναν αισθητήρα *Hall*, όπου στην συνέχεια τροφοδοτούνται σε δυο διαφορετικούς διαφορικούς ενισχυτές.

Η μέθοδος MPPT που υλοποιήθηκε, αποτελείται από τρία στάδια λειτουργίας. Στη πρώτη φάση, ο μετατροπέας ελέγχεται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριφέρεται ως ένα ρυθμιζόμενο φορτίο που απορροφά σταθερή και προγραμματιζόμενη ισχύ στην είσοδό του. Στη δεύτερη φάση, η διαδικασία έχοντας ανιχνεύσει το μέγιστο σημείο ισχύος της συστοιχίας, ελέγχει τον μετατροπέα με τέτοιο τρόπο ώστε η τάση λειτουργίας να φτάσει την τιμή της τάσης που παρουσιάστηκε στο μέγιστο σημείο ισχύος. Τέλος, γίνεται χρήση της διαδικασίας- **P&O**, με σκοπό την παραμονή του σημείου λειτουργίας γύρω από το μέγιστο σημείο ισχύος. Για να μπορέσει να λειτουργήσει ο μετατροπέας DC-DC, κατά αυτόν τον τρόπο, αρχικά ελέγχεται με ένα σήμα (**PWM #1**), ενώ έπειτα ο έλεγχος αλλάζει και ο μετατροπέας “όδηγείται” με ένα άλλο σήμα (**PWM #2**). Παρακάτω, γίνεται πλήρης ανάλυση της παραγωγής του σήματος ελέγχου V_c καθώς και ο τρόπος ελέγχου σε κάθε φάση λειτουργίας.



Σχήμα 3.3: Κυματομορφές ελέγχου του συστήματος που αναπτύχθηκε.

3.2.1 Έλεγχος μετατροπέα με τη μέθοδο σταθερής ισχύος εισόδου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στη πρώτη φάση λειτουργίας της νέας μεθόδου MPPT, ο μετατροπέας συμπεριφέρεται ως ένα ρυθμιζόμενο φορτίο, που τροφοδοτείται από την συστοιχία, με σταθερή ισχύ στην είσοδό του. Ο τρόπος λειτουργίας του μετατροπέα DC-DC καθορίζει και τον τρόπο ανίχνευσης του ολικού μεγίστου ισχύος-GMPP της συστοιχίας.

Στο κεφάλαιο 2, έγινε λεπτομερής ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα DC-DC ανύψωσης τάσης. Στη περίπτωση που ο μετατροπέας βρίσκεται σε ασυνεχή αγωγή λειτουργίας, η διάρκεια αγωγής (Duty Cycle)-D, αποδείχθηκε ότι εκφράζεται ως εξής:

$$D = \left[\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_{pv}} \left(\frac{V_o}{V_{pv}} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oB,max}} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

όπου, με V_o και V_{pv} συμβολίζουμε τα επίπεδα της τάσης εξόδου και εισόδου του μετατροπέα, αντίστοιχα. Επίσης, με D συμβολίζουμε την διάρκεια αγωγής ($0 \leq D < 1$) του μετατροπέα, με I_o το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα, ενώ το $I_{oB,max}$ είναι το μέγιστο ρεύμα εξόδου του μετατροπέα στο όριο ασυνέχειας. Εάν υψωθεί στο τετράγωνο η παραπάνω σχέση θα προκύψει ότι:

$$D^2 = \frac{4}{27} \frac{V_o}{V_{pv}} \left(\frac{V_o}{V_{pv}} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oB,max}} \quad (3.2)$$

Εάν υποθέσουμε ότι, ο μετατροπέας δεν παρουσιάζει απώλειες ισχύος τότε θα ισχύει ότι:

$$P_o = P_{pv} \Rightarrow V_o \cdot I_o = V_{pv} \cdot I_{pv} \quad (3.3)$$

Από την σχέση (3.2) μπορεί να προκύψει ότι :

$$V_o \cdot I_o = \frac{27}{4} \cdot D^2 \cdot V_{pv}^2 \cdot \frac{I_{oB,max}}{(V_o - V_{pv})}$$

και επομένως:

$$P_{pv} = \frac{27}{4} \cdot D^2 \cdot V_{pv}^2 \cdot \frac{I_{oB,max}}{(V_o - V_{pv})} \quad (3.4)$$

Από το κεφάλαιο 2, αποδείχθηκε ότι:

$$I_{oB,max} = \frac{2}{27} \frac{T_s V_o}{L} \quad (3.5)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.4) και (3.5) προκύπτει ότι:

$$P_{pv} = \frac{D^2 \cdot V_{pv}^2 \cdot V_o \cdot T_s}{2 \cdot L \cdot (V_o - V_{pv})} \quad (3.6)$$

Γνωρίζουμε όμως ότι:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s}$$

Έτσι, κάνοντας χρήση της παραπάνω σχέσης στη σχέση (3.6) προκύπτει ότι:

$$P_{pv} = \frac{t_{on}^2}{2 \cdot L \cdot T_s} \cdot \frac{V_{pv}^2 \cdot V_o}{(V_o - V_{pv})} \quad (3.7)$$

Στο κεφάλαιο 2, από την ανάλυση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, παρατηρήσαμε ότι το στιγμιαίο ρεύμα του πηνίου έχει τριγωνοειδή μορφή και εξαρτάται από την τάση εισόδου του μετατροπέα, την τιμή της αυτεπαγωγής L του πηνίου καθώς και από την τιμή της χρονική στιγμή t ($0 \leq t \leq T_s$), η οποία εκφράζει την διακοπτική διάρκεια του διακοπτικού στοιχείου του μετατροπέα (MOSFET ισχύος στη περίπτωση αυτή). Έτσι, όπως παρατηρείται και από το (Σχήμα 3.3), το ρεύμα το πηνίου μεγιστοποιείται όταν:

$$I_{L,peak} = \frac{V_{pv}}{L} \cdot t_{on} \quad (3.8)$$

Στη περίπτωση αυτή, το ρεύμα του πηνίου γίνεται ίσο με το σήμα ελέγχου $V_c(t_{on})$, Αυτό αποδεικνύεται ως εξής:

Αρχικά έχουμε ότι όταν τα δυο σήματα γίνουν ίσα θα ισχύει ότι:

$$I_{L,peak} = \frac{V_{pv}}{L} \cdot t_{on} = V_c(t_{on}) \Rightarrow V_{pv} = \frac{V_c(t_{on})}{t_{on}} \cdot L \quad (3.9)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.7) και (3.9) προκύπτει ότι:

$$P_{pv} = \frac{V_c^2(t_{on}) \cdot L \cdot V_o}{2 \cdot T_s \cdot \left(V_o - \frac{V_c(t_{on}) \cdot L}{t_{on}} \right)} \quad (3.10)$$

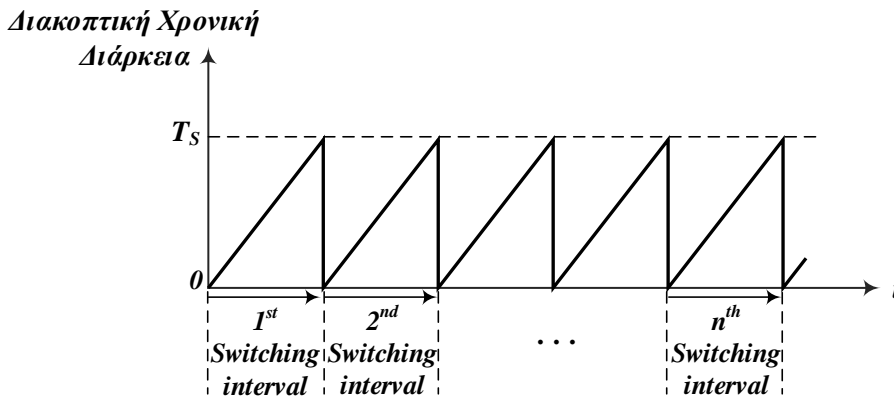
Οπότε προκύπτει η εξής εξίσωση δευτέρου βαθμού:

$$V_c^2(t_{on}) \cdot (L \cdot V_o) + \left(\frac{2 \cdot T_s \cdot L \cdot P_{pv}}{t_{on}} \right) \cdot V_c(t_{on}) - 2 \cdot T_s \cdot V_o \cdot P_{pv} = 0 \quad (3.11)$$

Από αυτήν προκύπτουν δύο πιθανές λύσεις με την μια να απορρίπτεται, καθώς το σήμα ελέγχου $V_c(t_{on})$ θα πρέπει να είναι θετικό. Έτσι, προκύπτει η εξής λύση που περιγράφει το σήμα ελέγχου.

$$V_c(t_{on}) = -\frac{T_s \cdot P_{pv}}{t_{on} \cdot V_o} + \sqrt{\left(\frac{T_s \cdot P_{pv}}{t_{on} \cdot V_o} \right)^2 + \frac{2 \cdot T_s \cdot P_{pv}}{L}} \quad (3.12)$$

Ωστόσο, η παραπάνω έκφραση περιγράφει την τιμή του σήματος ελέγχου V_c για την χρονική στιγμή ($t = t_{on}$). Όμως, ο μετατροπέας λειτουργεί με μια συγκεκριμένη διακοπτική συχνότητα και επομένως μια σταθερή διακοπτική περίοδο. Η διακοπτική χρονική διάρκεια λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί μια περιοδική κυματομορφή με κλίση ένα.



Σχήμα 3.4: Περιοδική συμπεριφορά της χρονικής διάρκειας, στην οποία ο διακόπτης ελέγχεται με ένα PWM σήμα.

Επομένως, για σταθερή διακοπτική περίοδο T_s έχουμε ότι η διακοπτική χρονική διάρκεια t κυμαίνεται στο διάστημα $(0 \leq t \leq T_s)$. Έτσι, με μια κατάλληλη δειγματοληψία της χρονικής διάρκειας μπορεί να αναπαρασταθεί με αρκετά καλή ακρίβεια η σχέση (3.13). Παράλληλα, η τιμή της αυτεπαγωγής L είναι σταθερή, ενώ η τάση εξόδου V_o δειγματοληπτείται από έναν διαφορικό ενισχυτή και τροφοδοτείται στη σχέση για να δώσει μια πραγματική αναπαράσταση της λειτουργίας του κυκλώματος. Η παράμετρος που εκφράζει την ισχύ εισόδου του μετατροπέα, μετασχηματίζεται από P_{pv} σε P'_{pv} για να γίνει εμφανές ότι το σήμα ελέγχου εξαρτάται από δύο παραμετρους, t και P'_{pv} , που μεταβάλλονται από την FPGA μέσω προγραμματισμού στη γλώσσα περιγραφής υλικού (VHDL) και εξασφαλίζουν την σωστή παραγωγή του σήματος ελέγχου V_c .

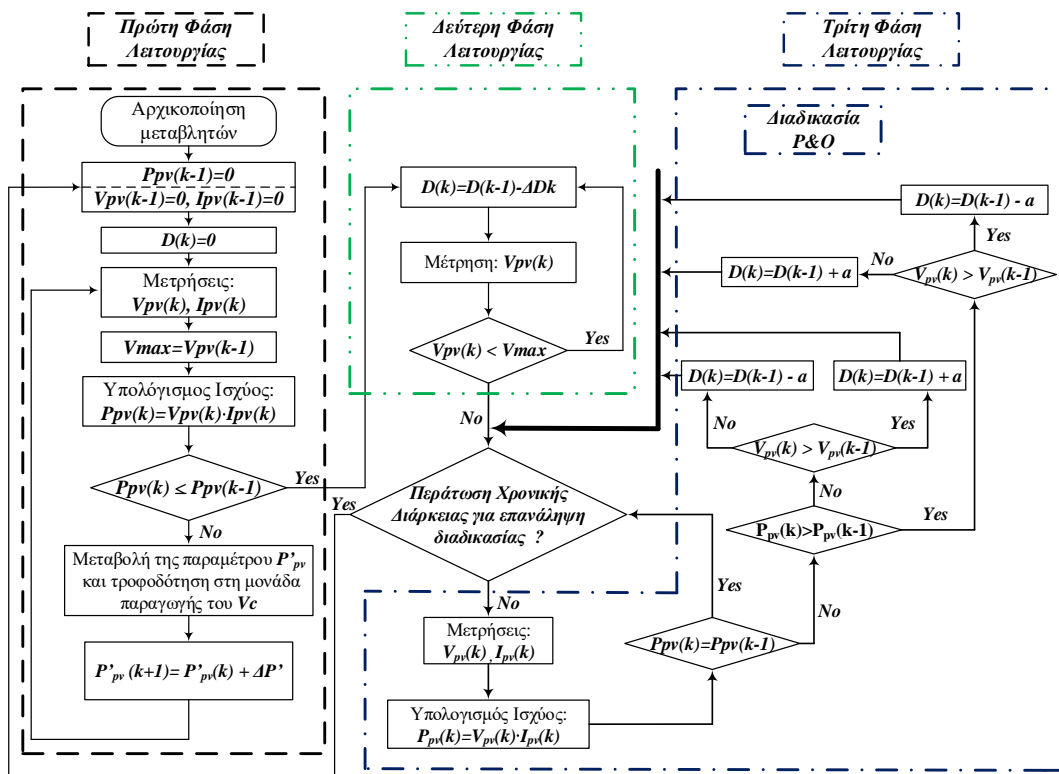
$$V_c(t, P'_{pv}) = -\frac{T_s \cdot P'_{pv}}{t \cdot V_o} + \sqrt{\left(\frac{T_s \cdot P'_{pv}}{t \cdot V_o}\right)^2 + \frac{2 \cdot T_s \cdot P'_{pv}}{L}} \quad (3.13)$$

Από το σχήμα (Σχήμα 3.3) παρατηρούμε τον τρόπο παραγωγής του σήματος (**PWM #1**). Ο μετατροπέας σε αυτήν την φάση, λειτουργεί με τη μέθοδο σταθερής ισχύος εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι, με συνεχόμενη δειγματοληψία του ρεύματος του πηνίου καθώς και τη παραγωγή του σήματος ελέγχου $V_c(t)$, μέσω της FPGA, ο διακόπτης τίθεται σε υψηλή στάθμη, όταν το σήμα ελέγχου είναι μεγαλύτερο από αυτό του ρεύματος του πηνίου, ενώ τη στιγμή που το σήμα ελέγχου γίνει ίσο με το ρεύμα στο πηνίο τότε ο διακόπτης τίθεται σε χαμηλή στάθμη. Η σύγκριση των σημάτων γίνεται σε κάθε διακοπτική περίοδο και με αυτόν τον τρόπο το σήμα (**PWM #1**) μπορεί και "οδηγεί" κατάλληλα το MOSFET ισχύος του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

Θεωρώντας, ότι στην έξοδο του μετατροπέα έχουμε ως φορτίο μια μπαταρία με σχετικά σταθερή τάση, τότε η V_o θεωρείται και αυτή περίπου σταθερή. Επίσης σταθερές ποσότητες είναι η διακοπτική περίοδος T_s και η τιμή της αυτεπαγωγής L του πηνίου, η οποία επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο μετατροπέας να παραμένει διαρκώς σε ασυνεχή λειτουργία. Η παράμετρος λοιπόν, που καθορίζει την μεταβαλλόμενη απορρόφηση ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα είναι η τιμή της P'_{pv} . Η μονάδα ελέγχου όταν βρίσκεται στη λειτουργία σταθερής ισχύος εισόδου, αυξάνει σε διακεκριμένα διαστήματα την παράμετρο P'_{pv} , έτσι ώστε ο μετατροπέας να τροφοδοτείται σταδιακά με μεγαλύτερη σταθερή ισχύ από την συστοιχία. Με αυτόν τον τρόπο, το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας μεταβάλλεται, με κάθε αύξηση της τιμής της παραμέτρου P'_{pv} από την μονάδα ελέγχου. Η αύξηση αυτή, οδηγεί σε κάθε βήμα στην απορρόφηση μεγαλύτερης ισχύος σε σχέση με το προηγούμενο βήμα, μέχρι η συστοιχία να μην μπορεί να τροφοδοτήσει την απαιτούμενη ισχύ. Έτσι, με την δειγματοληψία της τάσης και του ρεύματος της συστοιχίας, σε διακεκριμένες χρονικές στιγμές, μπορεί και ανιχνεύεται η μέγιστη τιμή ισχύος που μπορεί να τροφοδοτήσει η συστοιχία, ανιχνεύοντας έτσι το ολικό μέγιστο σημείο ισχύος-GMPP. Ωστόσο, η συστοιχία λόγω της απαίτησης να τροφοδοτήσει ισχύ, την οποία δεν μπορεί να καλύψει, οδηγείται σε ένα σημείο λειτουργίας μικρότερο από αυτό του ολικού μεγίστου. Στο σημείο αυτό ο αλγόριθμος ελέγχου-MPPT αλλάζει τρόπο λειτουργίας και ο διακόπτης του μετατροπέα ελέγχεται με το σήμα (**PWM #2**).

Στη δεύτερη φάση λειτουργίας, ο μετατροπέας ελέγχεται με το **(PWM #2)** σήμα, το οποίο παράγεται μειώνοντας σε κάθε βήμα του αλγορίθμου ελέγχου, τη διάρκεια αγωγής D κατά μια ποσότητα ΔD_k . Μια μεταβολή στην τιμή της σχετικής διάρκειας αγωγής οδηγεί και σε μια μεταβολή του σημείου ισχύος και συνεπώς της τάσης λειτουργίας της συστοιχίας. Έτσι, σε κάθε βήμα του αλγορίθμου δειγματοληπτείται η τάση της συστοιχίας και συγκρίνεται με την τιμή της τάσης που παρουσιάστηκε στο ολικό μέγιστο. Με αυτόν τον τρόπο, ο αλγόριθμος ελέγχει σε κάθε βήμα, εάν η τάση λειτουργίας είναι μικρότερη από την τάση του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος. Στην περίπτωση που συνεχίζει να είναι μικρότερη, η σχετική διάρκεια αγωγής μειώνεται κατά ΔD_k , μέχρι η τάση λειτουργίας της συστοιχίας να γίνει μεγαλύτερη ή ίση από την τάση που παρουσιάστηκε στο ολικό μέγιστο (Σχήμα 3.1).

Στην τρίτη και τελευταία φάση λειτουργίας, ο αλγόριθμος ελέγχου εξασφαλίζει ότι η συστοιχία θα παραμείνει στο ολικό μέγιστο, κάνοντας χρήση της διαδικασίας- **P&O**. Η διαδικασία αυτή επιλέγεται λόγω της απλότητας στην σχεδίαση καθώς και στη γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Επιπλέον, η μέθοδος επιλέγεται να χρησιμοποιεί ένα μικρό βήμα διαταραχής, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μικρότερη ταλάντωση γύρω από το ολικό μέγιστο σημείο ισχύος και κατα συνέπεια καλύτερη σύγκλιση. Η διαδικασία ανίχνευσης -MPPT επαναλαμβάνεται περιοδικά για ένα χρονικό διάστημα που θεωρείται βέλτιστο για τις συνθήκες μεταβολής της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας που επικρατούν στην περιοχή εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος (συνήθως 10-15 λεπτά).



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου που αναπτύχθηκε.

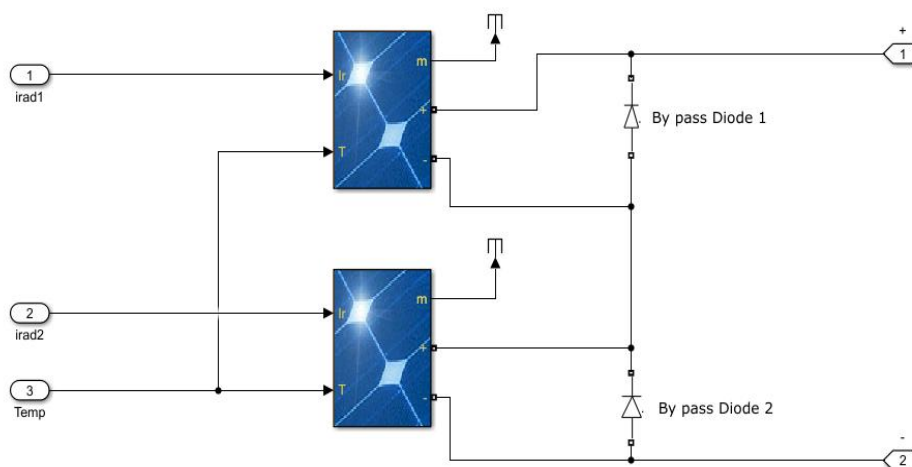
3.2.2 Προσομοίωση της μεθόδου σε MATLAB/SIMULINK

Στην ενότητα αυτή, εξετάζεται η λειτουργία της μεθόδου MPPT σε επίπεδο προσομοίωσης μέσω των προγραμματιστικών εργαλείων της MATLAB και του SIMULINK. Το σύστημα αποτελείται από δυο φωτοβολταϊκά σε σειρά, των οποίων τα χαρακτηριστικά λειτουργίας δίνονται στον Πίνακα 3.1, ενώ παράλληλα με αυτά συνδέονται δίοδοι παράκαμψης. Τα συγκεκριμένα τύπου φωτοβολταϊκών πλαίσια χρησιμοποιήθηκαν επίσης και στην πειραματική ανάπτυξη και λειτουργία του συστήματος.

MODULE TYPE PS-20W
Peak Power(Pmax) (W): 20
Production Tolerance (%): ± 3
Maximum Power Current(Imp) (A): 3.33
Maximum Power Voltage(Vmpp) (V): 6.00
Short Circuit Current(Isc) (A): 6.13
Open Circuit Voltage(Voc) (V): 9.00

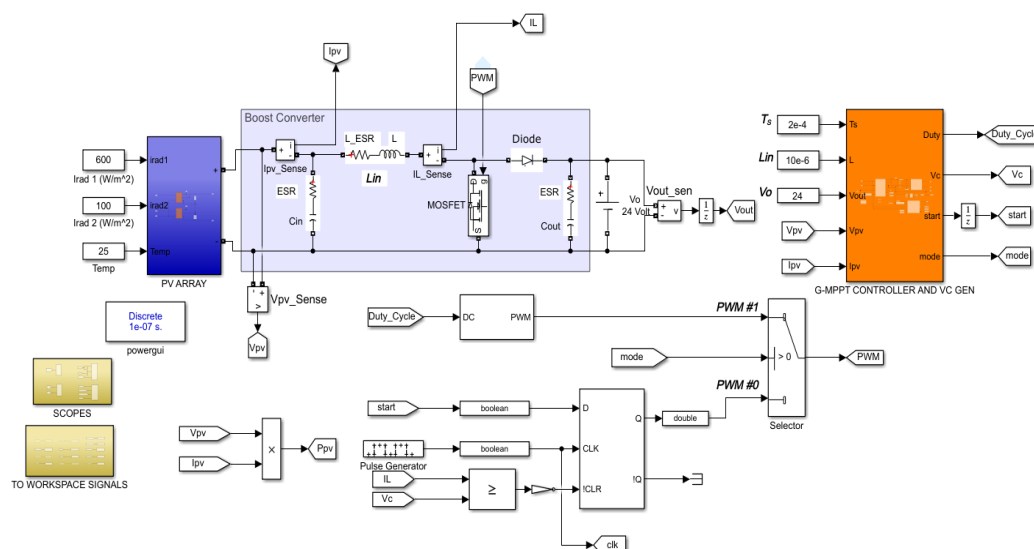
Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής($T = 25^{\circ}\text{C}$, $G = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$).

Τα δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται σε σειρά, οπότε το σύστημα θα έχει μέγιστη απόδοση ισχύος, σε ιδανικές συνθήκες, τα $P_{pvmax} = 40\text{W}$. Η συνδεσμολογία αυτών στο SIMULINK είναι η εξής:



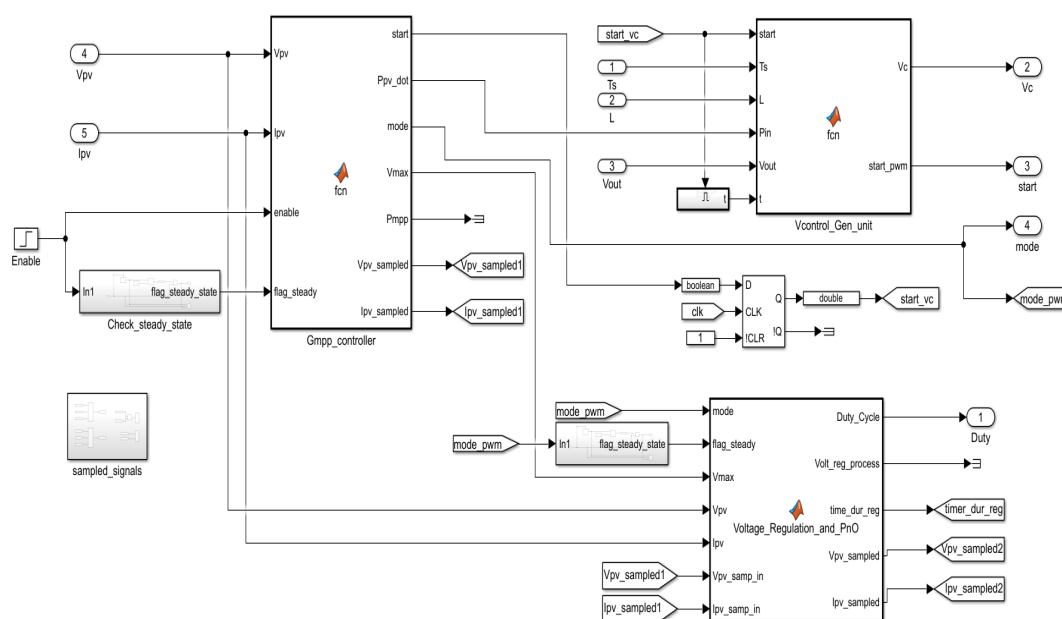
Σχήμα 3.6: Συνδεσμολογία της συστοιχίας του συστήματος (PV Array SIMULINK Block).

Η προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε σε διακριτό χρόνο, με το βήμα να διαμορφώνεται στα $Dt = 1 \cdot 10^{-7} \text{ sec}$, το οποίο επιλέχθηκε για λόγους εξοικονόμησης σε χρόνο και σε αποθηκευτικό χώρο. Ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης επιλέγεται να λειτουργεί με μια διακοπτική συχνότητα $f_s = 5 \text{ kHz}$. Μεγαλύτερες διακοπτικές συχνότητες απαιτούν και μεγαλύτερη απόδοση του υπολογιστή καθώς απαιτείται μικρότερο βήμα προσομοίωσης. Η μελέτη και τα συμπεράσματα για την λειτουργία του συστήματος θα είναι τα ίδια σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια, επιλέχθηκε μια μικρή τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου $L_{in} = 10 \mu\text{H}$ για να εξασφαλιστεί η λειτουργία ασυνεχούς αγωγής του μετατροπέα ισχύος και για μεγαλύτερες τιμές της διάρκειας αγωγής- D . Ως διακοπτικό στοιχείο επιλέχθηκε να γίνει χρήση ενός τρανζίστορ MOSFET. Επίσης, τοποθετήθηκε ένας πυκνωτής εξομάλυνσης στην είσοδο και ένας πυκνωτής που διαμορφώνει το φιλτράρισμα του μετατροπέα και μειώνει την διακύμανση της τάσης εξόδου σε επιθυμητά επίπεδα. Τέλος, το φορτίο επιλέχθηκε να είναι μια ισοδύναμη σταθερή πηγή τάσης των 24 V , ως εναλλακτική του φορτίου που αποτελείται από μπαταρίες.



Σχήμα 3.7: Προσομοίωση του φωτοβολταϊκού συστήματος στο SIMULINK.

Παραπάνω παρατηρούμε και ένα τμήμα του ελέγχου που με βάση την κατάλληλη λειτουργία του συστήματος επιλέγεται το κατάλληλο σήμα διαμόρφωσης εύρους παλμών το οποίο οδηγεί και το διακοπτικό στοιχείο του μετατροπέα. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το τμήμα της μονάδας που εκτελεί την λειτουργία ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος, της δημιουργίας του σήματος ελέγχου **Vcontrol**, καθώς και τη μεταβολή και παραμονή στο μέγιστο σημείο με τη διαδικασία **P&O**.

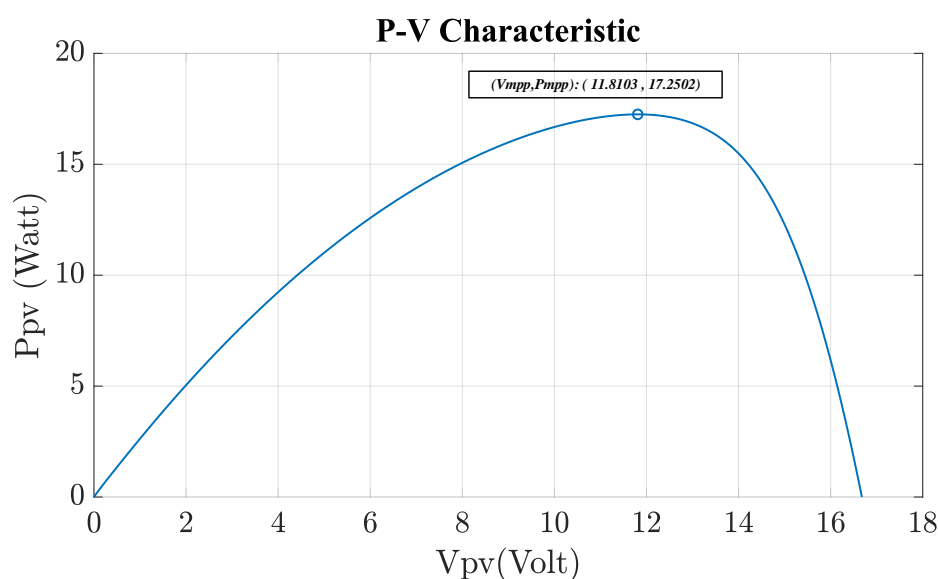


Σχήμα 3.8: Μονάδα ελέγχου και ανίχνευσης του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος (GMPPT-Controller).

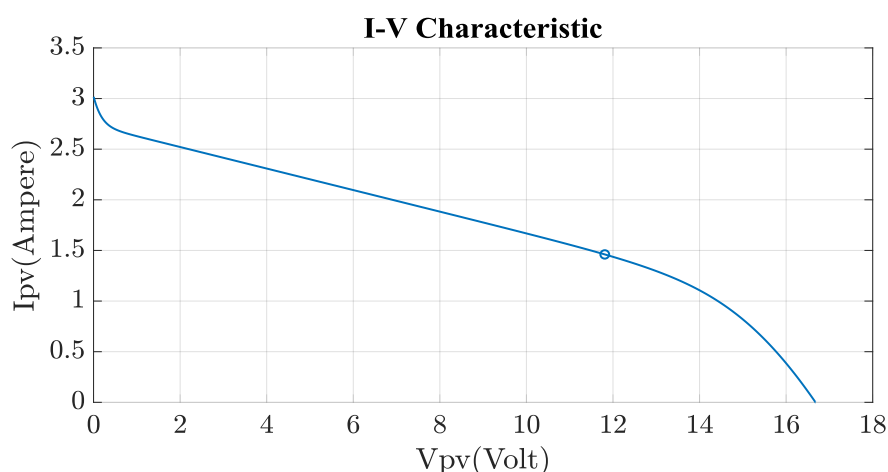
Η μονάδα αυτή εκτελεί τον αλγόριθμο ελέγχου που αναφέρθηκε και παραπάνω (βλέπε Σχήμα 3.5). Όλες οι λειτουργίες υλοποιήθηκαν με συναρτήσεις γραμμένες με κώδικα Matlab, όπου με τα κατάλληλα σήματα ελέγχου και με τους κατάλληλους μετρητές, εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία σε κάθε φάση λειτουργίας της μονάδας ελέγχου και η μετάβαση στη μόνιμη κατάσταση μετά από κάθε διαταραχή της σχετικής διάρκειας αγωγής. Για το συγκεκριμένο σύστημα ο χρόνος μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση είναι $80ms$, ο οποίος είναι και αυτός που παρατηρήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται ένα κομμάτι ελέγχου, όπου με ένα Flip-Flop εξασφαλίζεται σε κάθε έναυση της διακοπτικής περιόδου ο έλεγχος μεταξύ του ρεύματος του πηνίου και του σήματος ελέγχου $V_{control}$. Στη περίπτωση που το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα γίνει ίσο με το σήμα ελέγχου, τότε ένα μη ακολουθιακό (ασύγχρονο) σήμα **CLR** μπορεί και εξασφαλίζει, μέσα στη διακοπτική περίοδο, την μεταβολή της στάθμης του διακόπτη από υψηλή σε χαμηλή.

3.2.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης πρώτου μοτίβου προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε αυτή τη φάση πραγματοποιήθηκαν για ένα ομοιόμορφο μοτίβο ακτινοβολίας, όπου και στα δύο πλαίσια προσπίπτει η ίδια πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας ($G = 400 \frac{W}{m^2}$). Αυτό συνεπάγεται ότι η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης της συστοιχίας θα παρουσιάσει ένα μέγιστο, το οποίο θα είναι και το ολικό μέγιστο σημείο ισχύος που μπορεί να αποδώσει η συστοιχία. Τέλος, η θερμοκρασία επιλέχθηκε να είναι ίση με αυτή της πρότυπης δοκιμής $T = 25^\circ C$.

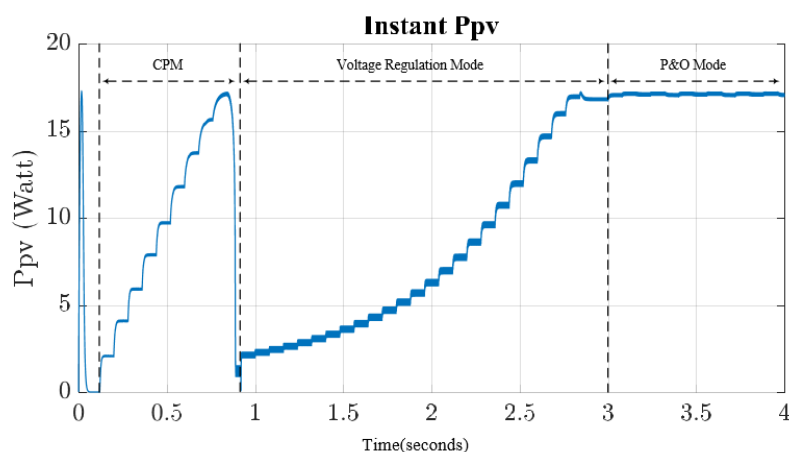


Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 1.

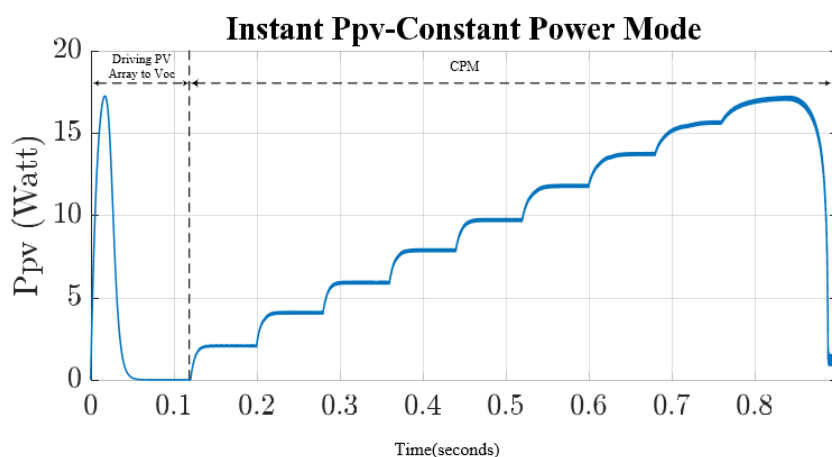


Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 1.

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η συμπεριφορά της στιγμιαίας ισχύος της συστοιχίας, όπου παρατηρούμε και τις μεταβατικές μεταβάσεις μετά από κάθε μεταβολή της διάρκειας αγωγής τόσο με τον τρόπο σταθερής ισχύος εισόδου (CPM-Constant Power Mode), όσο και με τους τρόπους μεταβολής τάσεως και διαδικασίας “Διαταραχής και Παρατήρησης” (VRM-Voltage Regulation Mode και P&O Mode).

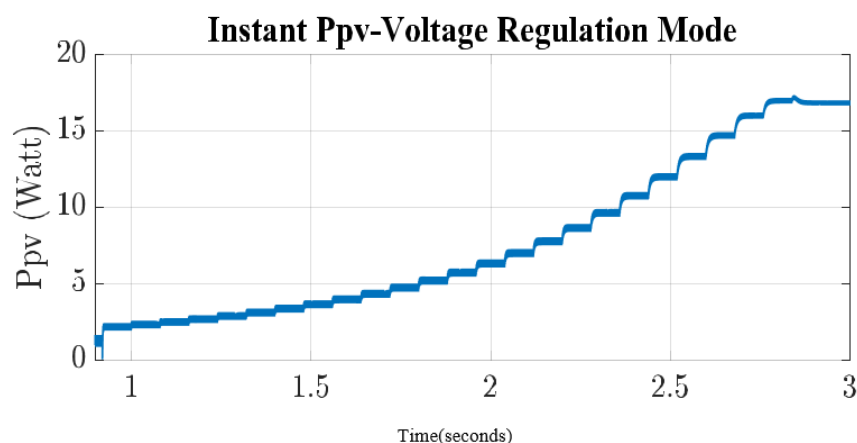


Σχήμα 3.11: Μεταβολή στιγμιαίας ισχύος της συστοιχίας-Μοτίβο 1.



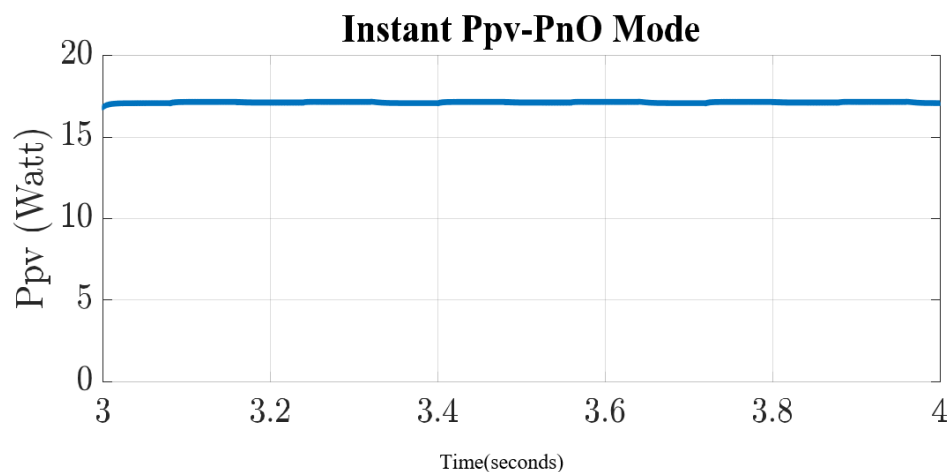
Σχήμα 3.12: Λειτουργία σταθερής ισχύος εισόδου.

Στη πρώτη φάση λειτουργίας (CPM-Constant Control Mode), ο μετατροπέας λειτουργεί με σταθερή ισχύ εισόδου μεταβάλλοντας κατάλληλα την παράμετρο P'_{pv} του σήματος ελέγχου V_c . Πιο συγκεκριμένα, η μεταβολή της παραμέτρου τέθηκε στα $\Delta P' = 2W$. Η παράμετρος αυτή αλλάζει τιμή μετά από κάθε $80ms$, ο οποίος είναι ο χρόνος μετάβασης στη μόνιμη κατάσταση του μετατροπέα. Παρατηρούμε ότι, σταδιακά αποδίδεται απο την συστοιχία σταθερή ισχύ σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, μέχρι στο βήμα για το οποίο δεν μπορεί να αποδώσει τιμή ισχύος που δεν τέμνεται με την χαρακτηριστική ισχύος-τάσης. Λόγω αυτού, η συστοιχία μεταβαίνει σε ένα σημείο λειτουργίας που βρίσκεται στα αριστερά του μέγιστου σημείου ισχύος.



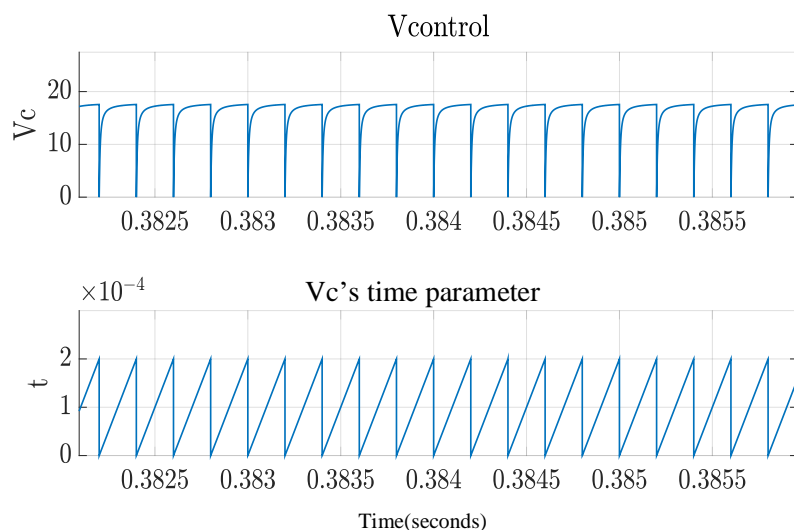
Σχήμα 3.13: Λειτουργία μετάβασης τάσης της συστοιχίας στη τάση για την οποία παρουσιάστηκε το μέγιστο σημείο ισχύος-Μοτίβο 1.

Στη δεύτερη φάση λειτουργίας, παρατηρούμε τις μεταβολές που παρουσιάζονται στην στιγμιαία ισχύ μέχρι αυτή να φτάσει στο μέγιστο σημείο ισχύος. Η μετάβαση στο σημείο αυτό γίνεται με την σταδιακή μεταβολή της διάρκειας αγωγής- D , κατά $\Delta Dk = 5\%$. Η τιμή της μεταβολής στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί μικρή, με μια μεγαλύτερη τιμή να βελτιώνει το χρόνο σύγκλισης στο μέγιστο σημείο ισχύος. Ωστόσο, μια πολύ μεγάλη τιμή της παραμέτρου μπορεί να οδηγήσει το σημείο λειτουργίας στα αριστερά του μέγιστου σημείου με αποτέλεσμα να πρέπει να το επιστρέψει η διαδικασία P&O, η οποία κατά το σχεδιασμό έχει μικρό βήμα διαταραχής, έτσι ώστε να μην εμφανίζεται μεγάλη ταλάντωση γύρω από το MPP.

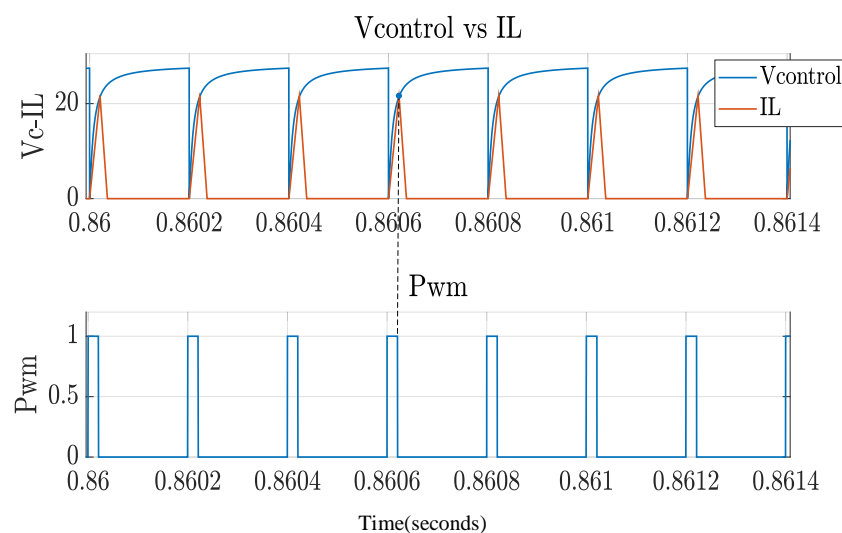


Σχήμα 3.14: Λειτουργία διαδικασίας P&O-Μοτίβο 1.

Στο Σχήμα 3.15, απεικονίζεται το περιοδικό σήμα ελέγχου V_c με περίοδο $T_s = 2 \cdot 10^{-4} \text{ sec}$. Επίσης, σε αντιστοιχία με το σήμα ελέγχου, απεικονίζεται η διακοπτική διάρκεια, η οποία είναι και αυτή περιοδική με περίοδο T_s και κλίση ένα. Στο Σχήμα 3.16, γίνεται απεικόνιση και της παραγωγής του σήματος PWM, όταν το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία σταθερής ισχύος εισόδου.



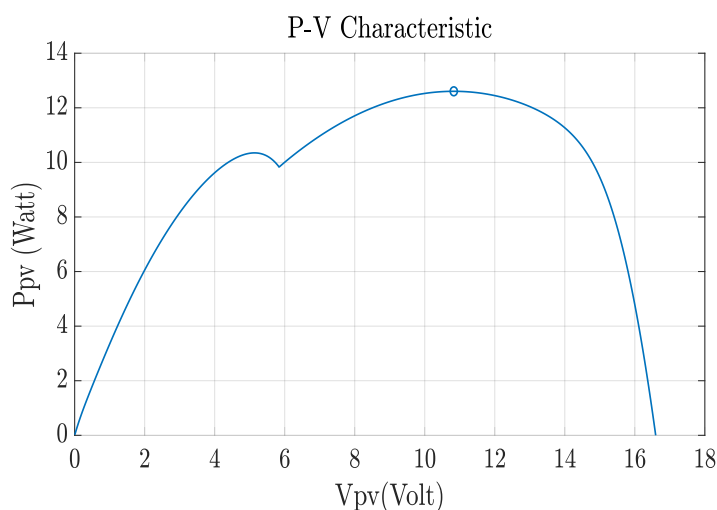
Σχήμα 3.15: Σήμα ελέγχου V_{control} σε χρονική αντιστοιχία με διακοπτική χρονική διάρκεια.



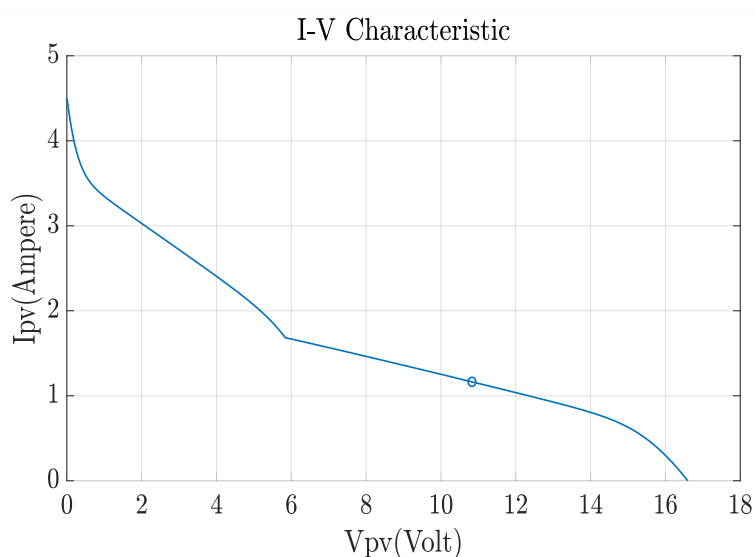
Σχήμα 3.16: Σήμα ελέγχου V_{control} σε χρονική αντιστοιχία με το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα και παραγωγή του σήματος PWM.

3.2.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης δεύτερου μοτίβου προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Στο δεύτερο μοτίβο προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του συστήματος (Σχήμα 3.6) δέχονται ανομοιόμορφα επίπεδα ακτινοβολίας. Αυτό σημαίνει ότι θα έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου της μερικής σκίασης. Οι τιμές ακτινοβολίας για το πάνω και κάτω πλαίσιο του συστήματος είναι $G1 = 220 \frac{W}{m^2}$ και $G2 = 600 \frac{W}{m^2}$ αντίστοιχα. Στη περίπτωση αυτή, η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης παρουσιάζει δύο τοπικά μέγιστα, με αυτό που βρίσκεται στα δεξιά να αποτελεί το ολικό μέγιστο σημείο ισχύος της συστοιχίας.

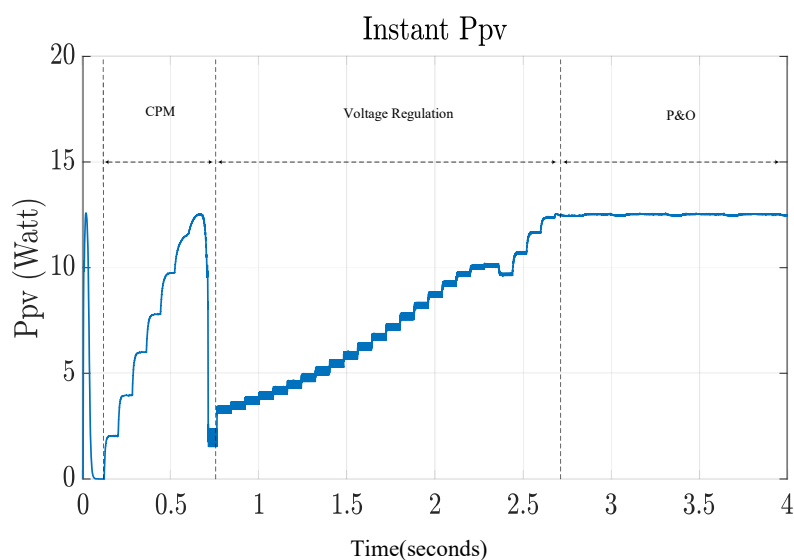


Σχήμα 3.17: Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 2.

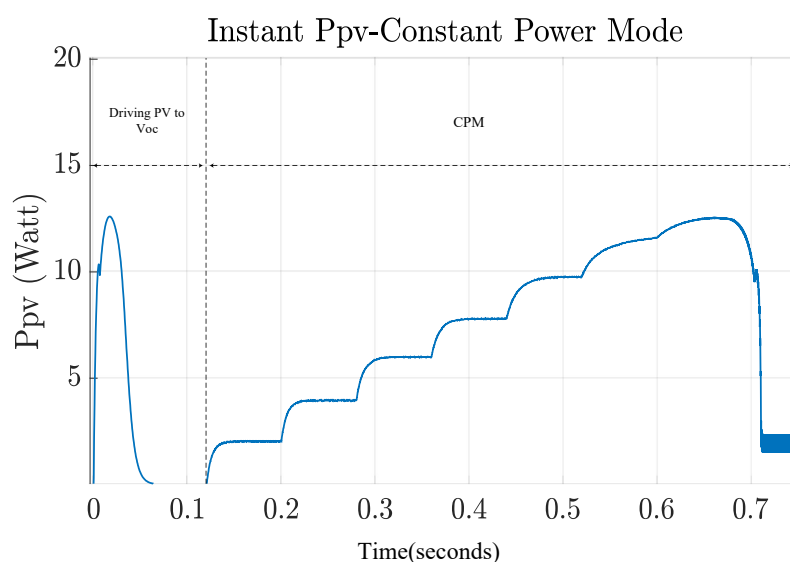


Σχήμα 3.18: Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 2.

Παρακάτω απεικονίζεται η συμπεριφορά της στιγμιαίας ισχύος για όλη την διάρκεια της ανίχνευσης καθώς και το στιγμιότυπο για το οποίο το σύστημα ελέγχου λειτουργεί με τη μέθοδο σταθερής ισχύος εισόδου. Επίσης, σημειώνεται ότι έγινε χρήση όμοιων παραμέτρων με αυτών που αναφέρθηκαν και στη περίπτωση του μοτίβου-1.

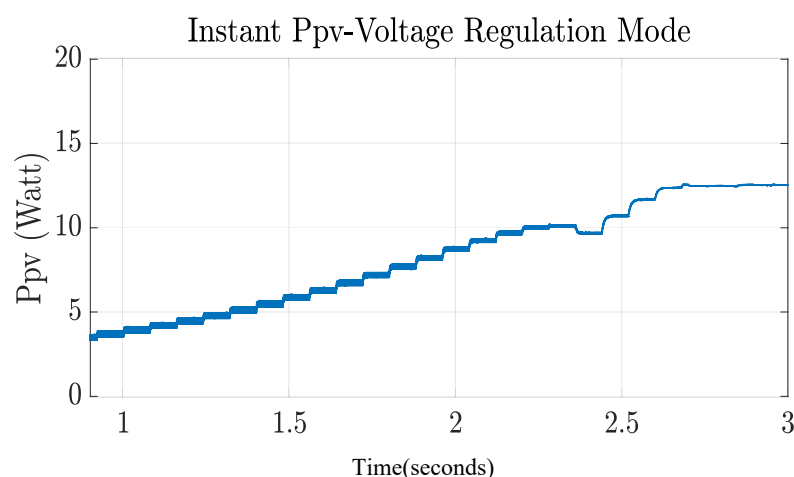


Σχήμα 3.19: Μεταβολή στιγμιαίας ισχύος της συστοιχίας-Μοτίβο 2.

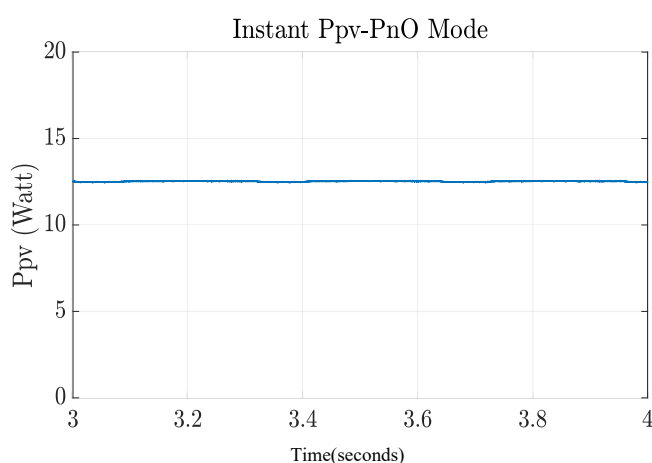


Σχήμα 3.20: Λειτουργία σταθερής ισχύος εισόδου.

Στη συνέχεια, απεικονίζονται οι κυματομορφές της στιγμιαίας ισχύος για την φάση ελέγχου όπου μεταβάλλεται κατάλληλα η διάρκεια αγωγής, έτσι ώστε το επίπεδο τάσης της συστοιχίας να φτάσει αυτό της τάσης, για το οποίο εμφανίστηκε το μέγιστο σημείο ισχύος. Έπειτα, ο έλεγχος μεταβαίνει στη διαδικασία P&O, η οποία εξασφαλίζει την διατήρηση της ισχύος στο μέγιστο σημείο λειτουργίας.

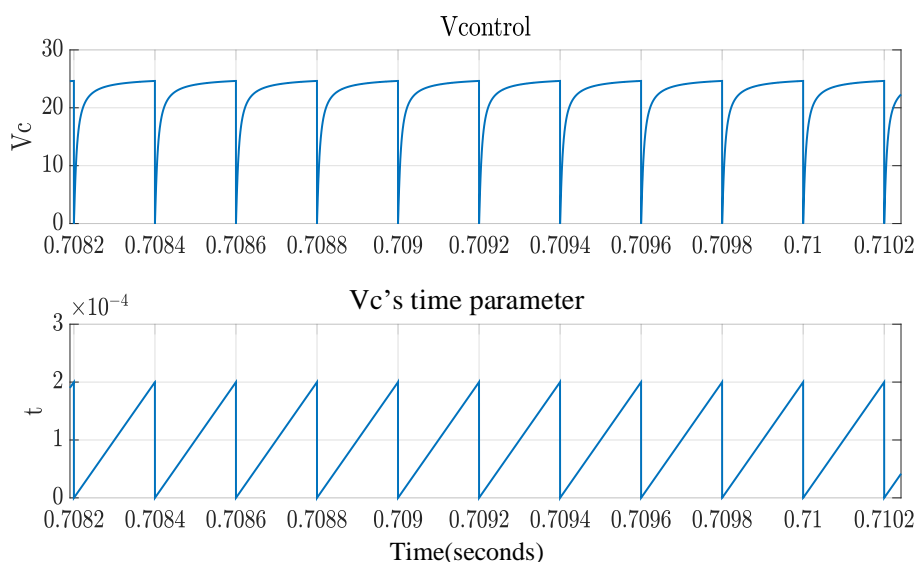


Σχήμα 3.21: Λειτουργία μετάβασης τάσης της συστοιχίας στη τάση για την οποία παρουσιάστηκε το μέγιστο σημείο ισχύος-Μοτίβο 2.

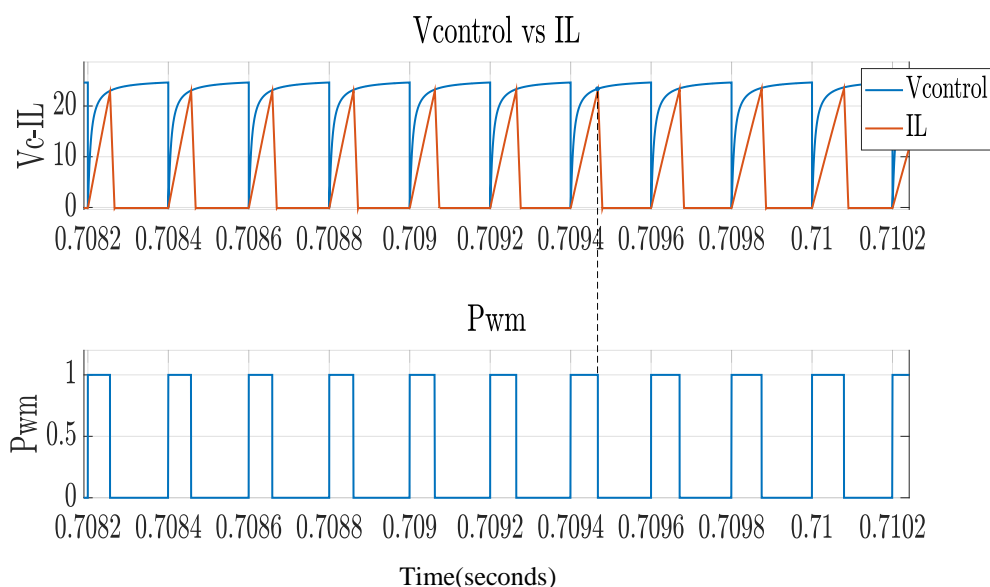


Σχήμα 3.22: Λειτουργία διαδικασίας P&O-Μοτίβο 2.

Τέλος, όπως και για το πρώτο μοτίβο προσπίπτουσας ακτινοβολίας, δίνονται οι κυματομορφές παραγωγής του σήματος ελέγχου, της διακοπτικής διάρκειας καθώς και της παραγωγής του σήματος PWM, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αλγορίθμου ελέγχου με τον τρόπο σταθερής ισχύ εισόδου.



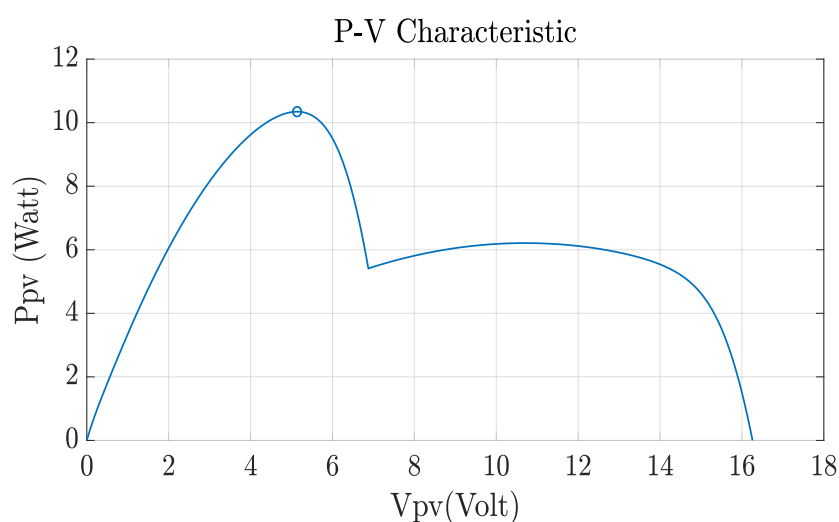
Σχήμα 3.23: Σήμα ελέγχου $V_{control}$ σε χρονική αντιστοιχία με διακοπτική χρονική διάρκεια-Μοτίβο 2.



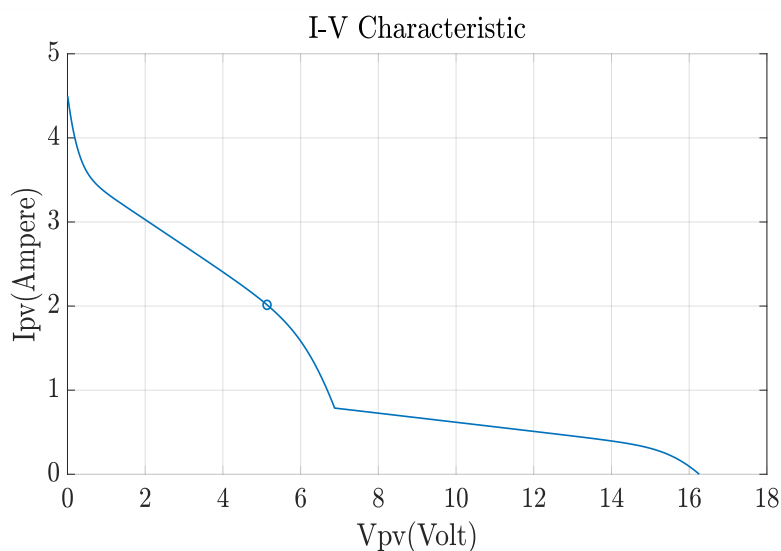
Σχήμα 3.24: Σήμα ελέγχου $V_{control}$ σε χρονική αντιστοιχία με το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα και παραγωγή του σήματος PWM-Μοτίβο 2.

3.2.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης τρίτου μοτίβου προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Στο τρίτο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λαμβάνουν επίπεδα ακτινοβολίας $G1 = 600 \frac{W}{m^2}$ και $G2 = 100 \frac{W}{m^2}$. Στη περίπτωση αυτή, το ολικό μέγιστο σημείο ισχύος θα βρίσκεται στα αριστερά της χαρακτηριστικής ισχύος-τάσης. Παρακάτω απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές της συστοιχίας για τα παραπάνω επίπεδα ακτινοβολίας.

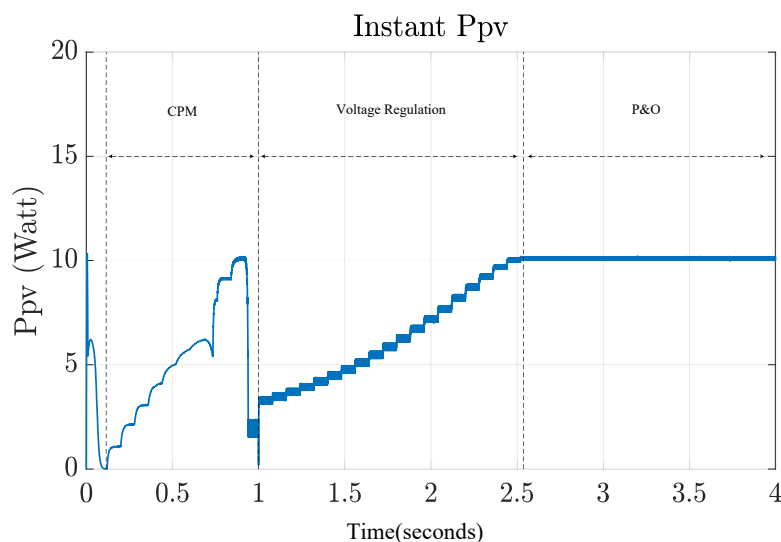


Σχήμα 3.25: Χαρακτηριστική ισχύος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 3.

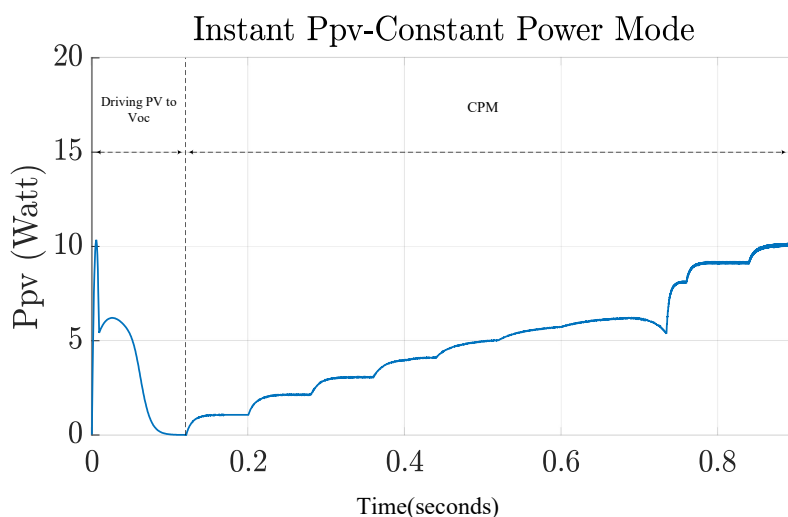


Σχήμα 3.26: Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης συστοιχίας- Μοτίβο 3.

Στο Σχήμα 3.27 και Σχήμα 3.28, δίνονται οι κυματομορφές της στιγμιαίας ισχύος για όλη τη διάρκεια ανίχνευσής καθώς και το στιγμιότυπο λειτουργίας του συστήματος με τον τρόπο σταθερής ισχύος εισόδου.

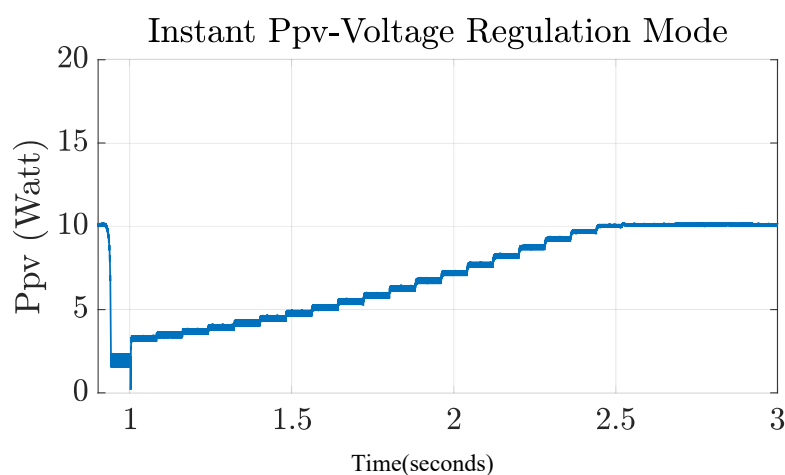


Σχήμα 3.27: Μεταβολή στιγμιαίας ισχύος της συστοιχίας-Μοτίβο 3.

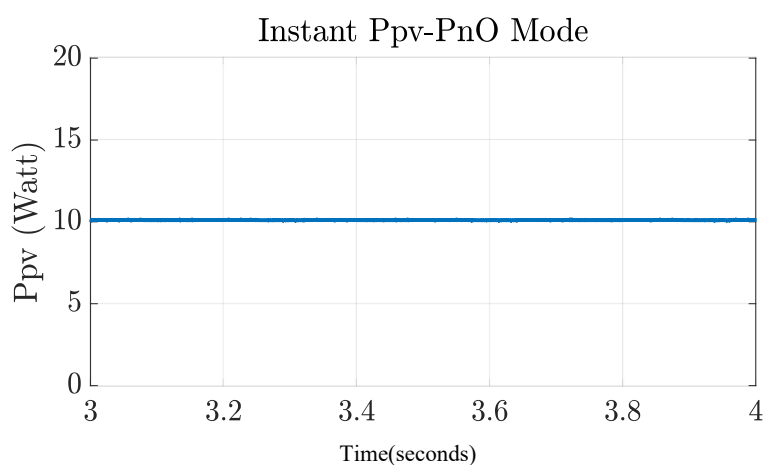


Σχήμα 3.28: Λειτουργία σταθερής ισχύος εισόδου-Μοτίβο 3.

Στη συνέχεια, δίνονται τα αντίστοιχα στιγμιότυπα λειτουργίας που συμβάλουν στην ανίχνευση του ολικού σημείου ισχύος.

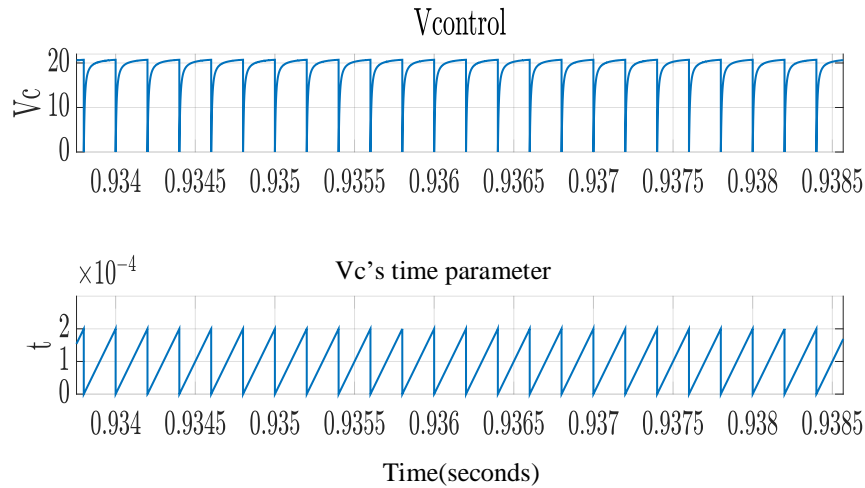


Σχήμα 3.29: Λειτουργία μετάβασης τάσης της συστοιχίας στη τάση για την οποία παρουσιάστηκε το μέγιστο σημείο ισχύος-Μοτίβο 3.

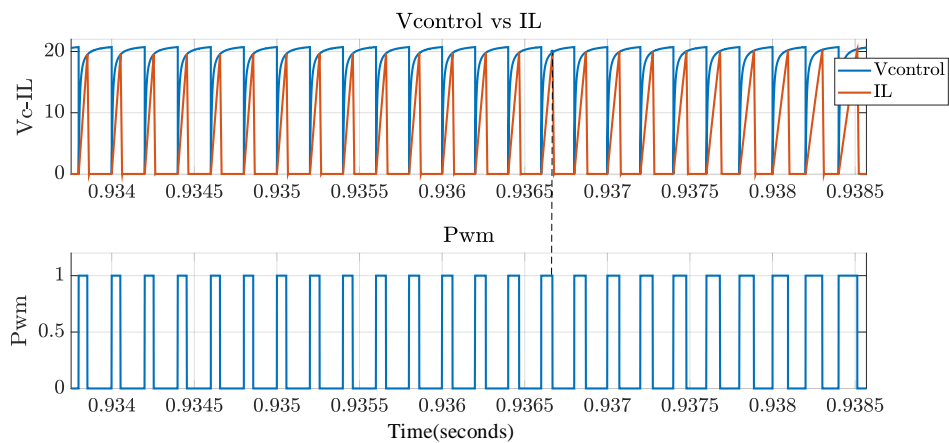


Σχήμα 3.30: Λειτουργία διαδικασίας P&O-Μοτίβο 3.

Τέλος, όπως και προηγουμένως, δίνονται οι κυματομορφές των σημάτων που συμβάλουν στην παραγωγή τόσο του σήματος ελέγχου V_c όσο και αυτών που οδηγούν στη δημιουργία του PWM σήματος, για τη φάση λειτουργίας με σταθερή ισχύ εισόδου.



Σχήμα 3.31: Σήμα ελέγχου $V_{control}$ σε χρονική αντιστοιχία με διακοπτική χρονική διάρκεια-Μοτίβο 3.



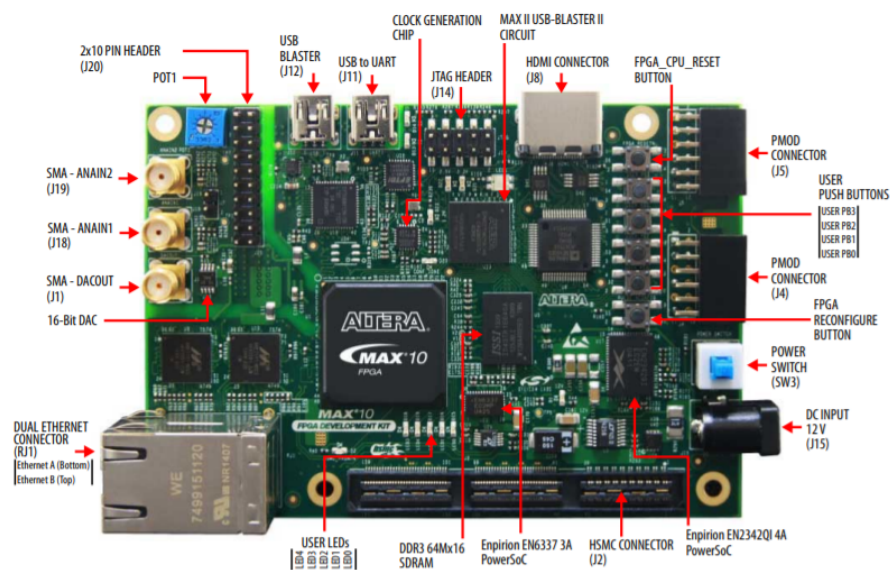
Σχήμα 3.32: Σήμα ελέγχου $V_{control}$ σε χρονική αντιστοιχία με το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα και παραγωγή του σήματος PWM-Μοτίβο 3.

Κεφάλαιο 4

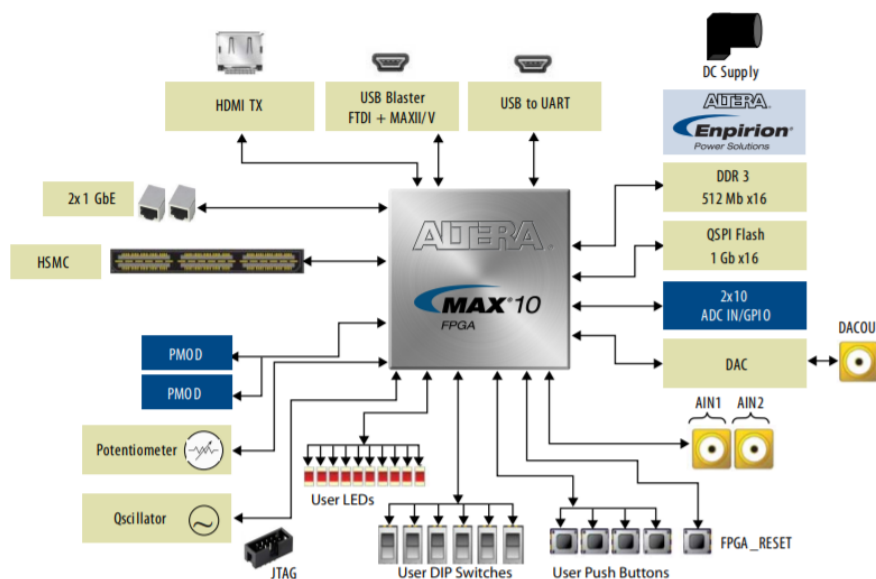
Υλοποίηση του ηλεκτρονικού συστήματος της μεθόδου MPPT

4.1 Υλοποίηση του συστήματος ελέγχου σε FPGA

Η επεξεργασία των μετρήσεων καθώς και ο έλεγχος του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της FPGA MAX 10 της Altera [8]. Τα χαρακτηριστικά της οποίας απεικονίζονται από τα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 4.1: Altera FPGA MAX 10 Development kit, πηγή:[8].

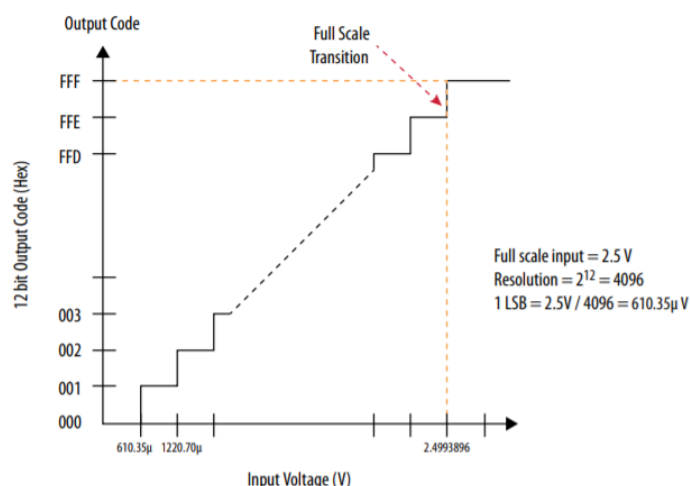


Σχήμα 4.2: Λειτουργικό διάγραμμα της FPGA MAX 10 Development kit, πηγή:[8].

ALMs	Equivalent LEs	M9K Memory (Kb)	Total RAM (Kb)	18-bit x 18-bit Multipliers	PLLs	Transceivers	Package Type
50,000	50	1,638	736	144	4	—	FineLine BGA 484 pins

Σχήμα 4.3: Χαρακτηριστικά της FPGA MAX 10 Development kit, πηγή:[8].

Για τις μετρήσεις ρεύματος-τάσης της συστοιχίας, τάσης εξόδου του μετατροπέα, καθώς και του ρεύματος του πηνίου του μετατροπέα χρησιμοποιήθηκαν οι δυο μετατροπείς A/D 12-bit τύπου SAR-Successive Approximation Register της FPGA [9]. Αυτή περιλαμβάνει 18 κανάλια δειγματοληψίας για αναλογικές μετρήσεις, εσωτερικό σύστημα τάσεως αναφοράς και δυνατότητα για χρήση εξωτερικού, καθώς και δυνατότητα ελέγχου του A/D μέσω λογικών μονάδων που εξασφαλίζουν την ακολουθιακή δειγματοληψία των αναλογικών σημάτων. Η συχνότητα δειγματοληψίας φτάνει στα 1 MSPS και λόγω της ακολουθιακής χρήσης, για μετρήσεις πάνω των δύο σημάτων, αυτή διαιρείται με τον αριθμό των καναλιών που χρησιμοποιούνται για δειγματοληψία. Η διαδικασία μετατροπής των μετρήσεων των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Μετρήσεις του A/D μετατροπέα της FPGA, με χρήση της εσωτερικής τάσης αναφοράς των 2.5 V, πηγή:[9]

Σημειώνεται ότι η αναπαράσταση του αναλογικού σήματος σε ψηφιακή λέξη, στη περίπτωση της πλήρους κλίμακας (Full Scale) που αναπαριστάται με την ψηφιακή τιμή FFF, δεν αντιστοιχεί στη πλήρη κλίμακα των 2.5 V αλλά στην πλήρη κλίμακα - 1 LSB. Η μετατροπή από αναλογική τιμή σε ψηφιακή και αντίστροφα δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

- $Digital\ Code = \left(\frac{V_{in}}{V_{ref}} \right) \cdot 2^{12}$

- $Analog\ Value = Digital\ Code \cdot \left(\frac{V_{ref}}{2^{12}} \right)$

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, οι εξισώσεις που περιγράφουν την μετατροπή των μετρήσεων του συστήματος σε 12-bit αναπαράσταση είναι οι εξής:

- $V_{pv12-bit} = \left(\frac{V_{pv}}{GV_{pv} \cdot V_{ref}} \right) \cdot 2^{12}$, $I_{pv12-bit} = \left(\frac{I_{pv}}{GI_{pv} \cdot V_{ref}} \right) \cdot 2^{12}$

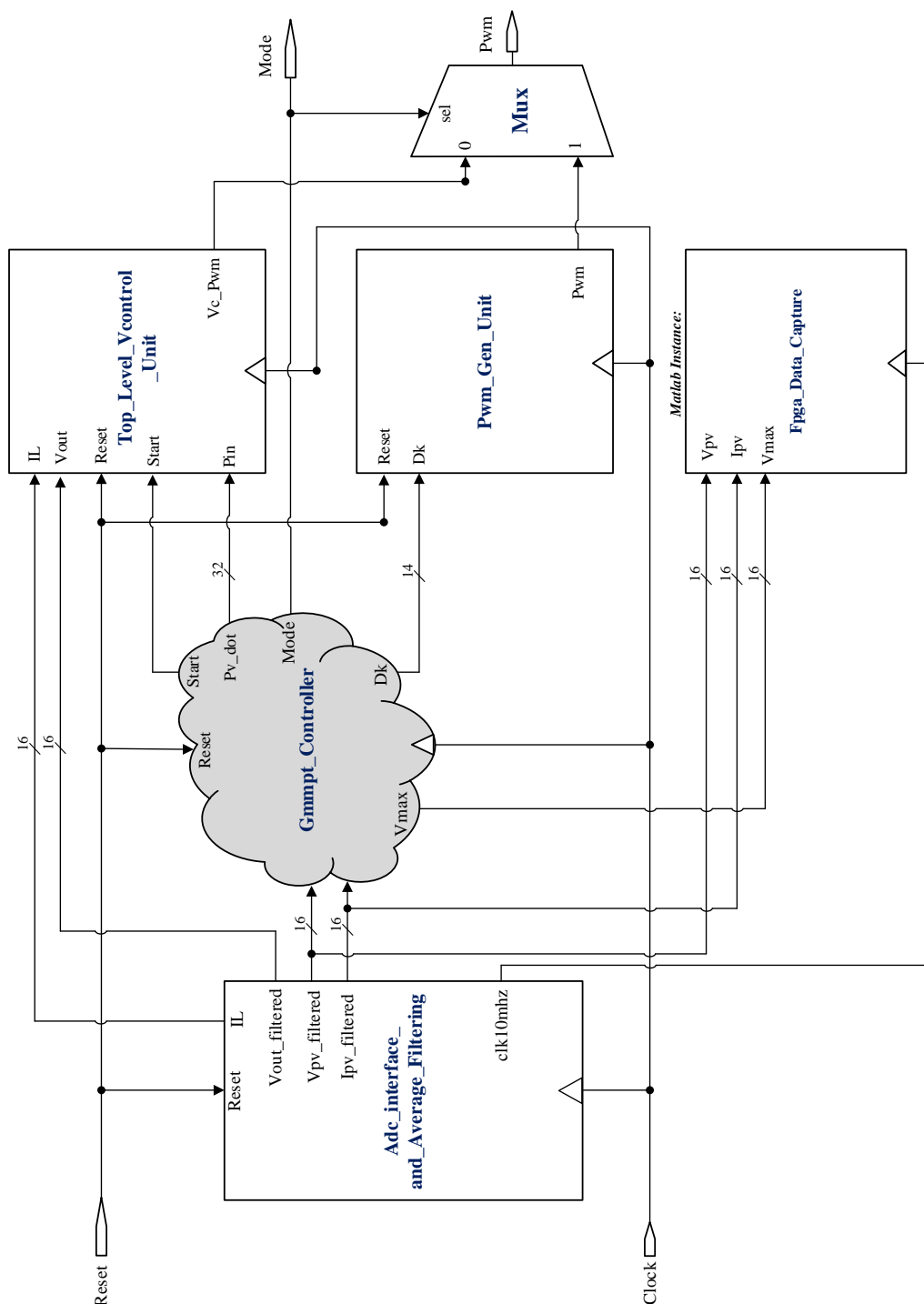
- $V_{o12-bit} = \left(\frac{V_o}{GV_o \cdot V_{ref}} \right) \cdot 2^{12}$, $I_{L12-bit} = \left(\frac{I_L}{GIL \cdot V_{ref}} \right) \cdot 2^{12}$

Όπου: V_{pv} και GV_{pv} είναι η τάση της συστοιχίας, μετρούμενη από τον ανάλογο ενισχυτή, και το κέρδος του ενισχυτή αντίστοιχα. Αντίστοιχα το ίδιο ισχύει και για το ρεύμα της συστοιχίας, την τάση εξόδου του μετατροπέα και το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα. Στο επόμενο κεφάλαιο, θα γίνει πλήρης περιγραφή για το σύστημα μετρήσεων που τροφοδοτούν τις κατάλληλες μετρήσεις του φωτοβολταϊκού συστήματος στην FPGA.

4.1.1 Σχεδίαση του συστήματος ελέγχου στη γλώσσα VHDL

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η πλήρης σχεδίαση του συστήματος καθώς και η λειτουργικότητα κάθε λογικής μονάδας που απαρτίζει το σύστημα ελέγχου. Η σχεδίαση του συστήματος πραγματοποιείται με την γλώσσα περιγραφής υλικού VHDL, μέσω του περιβάλλοντος Quartus Prime της Intel, στο οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση και σύνθεση, καθώς επίσης, ο διαμοιρασμός και η φόρτωση της σχεδίασης στη MAX 10 FPGA της Altera-Intel. Επιπλέον, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιείται το περιβάλλον προσομοίωσης ModelSim HDL Simulator. Με τη χρήση του περιβάλλοντος αυτού, μπορούμε να επιβεβαιώσουμε τη σωστή λειτουργία κάθε δομικής μονάδας με την δημιουργία κατάλληλων αλγορίθμων ελέγχου (Test benches). Για μια καλύτερη διαπίστωση της σωστής λειτουργικότητας του συστήματος, μετρήσεις με τη μορφή αρχείων(.txt) από τις προσομοιώσεις στη MATLAB, μπορούν να προσομοιώσουν την λειτουργία της συστοιχίας και του μετατροπέα, έτσι ώστε να προκύψει μια αντιστοίχιση μεταξύ της σχεδίασης σε υψηλό επίπεδο (SIMULINK) και σε επίπεδο προγραμματιζόμενων δομικών μονάδων, μέσω της γλώσσας περιγραφής υλικού VHDL.

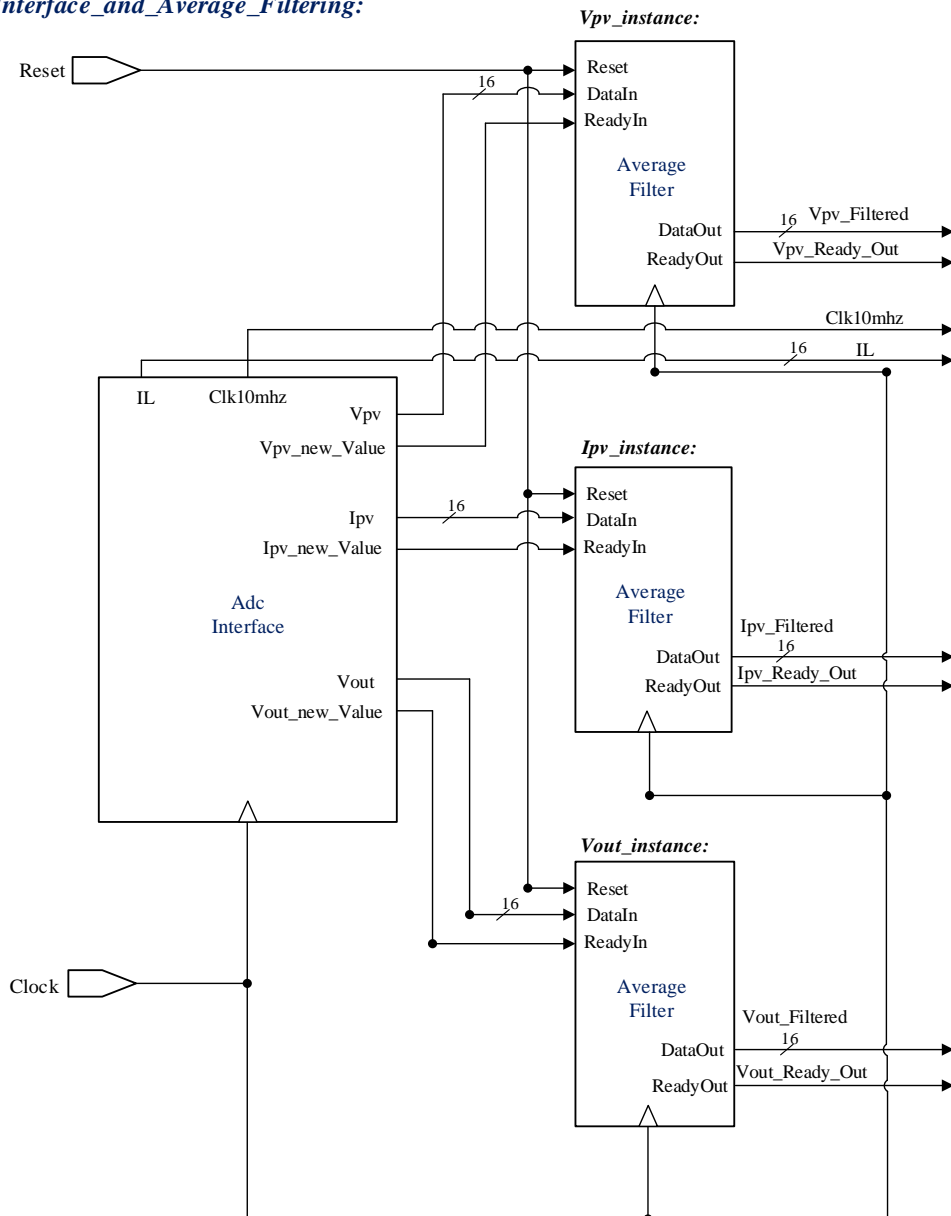
Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του μετατροπέα ανύψωσης τάσης παραμένουν τα ίδια με αυτά που τέθηκαν και κατά τη προσομοίωση του συστήματος με MATLAB/SIMULINK ($F_s=5\text{kHz}$, $L=10\mu\text{H}$, $V_o=24\text{ V}$). Το ρολόι λειτουργίας της FPGA τέθηκε στα $F_{clk}=50\text{Mhz}$, ενώ το ρολόι που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία των μετατροπέων A/D(Analog-to-Digital-Converter) είναι $F_{adc}=10\text{Mhz}$. Στον πρώτο μετατροπέα A/D συνδέονται τα σήματα τάσης και ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και η τάση εξόδου του μετατροπέα DC-DC. Η συχνότητα δειγματοληψίας τίθεται στα 1 MSPS, αλλά λόγω ότι βρίσκονται στον ίδιο μετατροπέα με τρία κανάλια ενεργά για δειγματοληψία του κάθε σήματος, η δειγματοληψία σε κάθε περίπτωση θα ισούται με: $T_{sampling} = (1/3) \text{ MSPS}$. Η δειγματοληψία του ρεύματος του πηνίου πραγματοποιείται με τον δεύτερο μετατροπέα A/D, με τη συχνότητα δειγματοληψίας να ρυθμίζεται στα 1 MSPS. Επίσης, το σύστημα αρχικοποιείται με ένα κουμπί εισόδου/εξόδου της FPGA, το οποίο είναι Active Low Reset. Στη συνέχεια, απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα του ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου.



Σχήμα 4.5: Λειτουργικό διάγραμμα ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου.

Το σύστημα αποτελείται από τέσσερις δομικές μονάδες, μια μονάδα ελέγχου όπου με τα κατάλληλα σήματα ελέγχου εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργικότητα και έναν πολυπλέκτη με τον οποίο επιλέγεται το κατάλληλο σήμα PWM για κάθε φάση λειτουργίας. Παρακάτω, απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα της δομικής μονάδας “**Adc Interface and Average Filtering**”.

Adc_Interface_and_Average_Filtering:



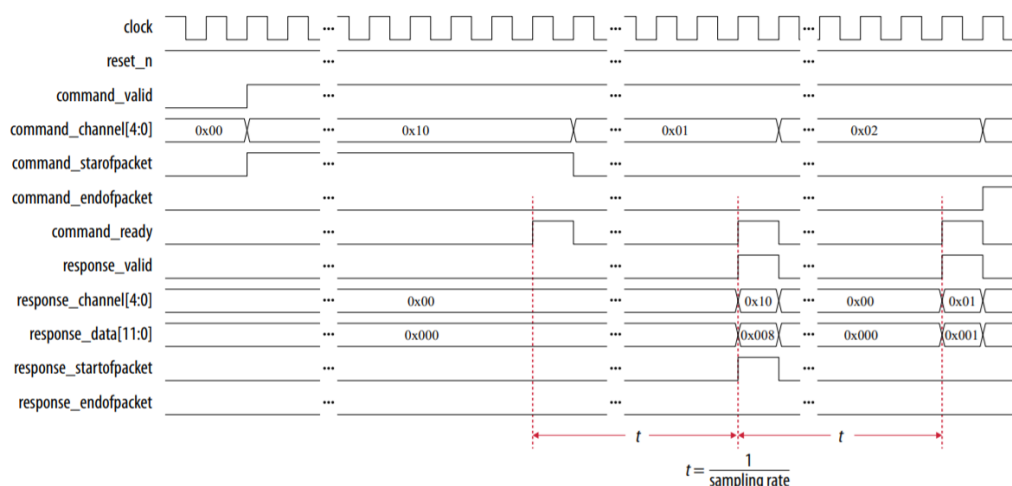
Σχήμα 4.6: Λειτουργικό διάγραμμα δομικής μονάδας “**Adc Interface and Average Filtering**”.

Αυτή αποτελείται από τέσσερις δομικές μονάδες και ένα Flip-Flop. Η μονάδα, “**Issp-Internal Signal Source Probe**”, αποτελεί ένα **IP Core** της MAX 10 FPGA και η λειτουργία του είναι να παράξει ένα εσωτερικό σήμα Reset. Αυτό θα εξασφαλίσει την αρχικοποίηση τόσο των μετατροπέων A/D όσο και των υπόλοιπων μονάδων που ελέγχουν την λειτουργικότητά και επεξεργασία των μετρήσεων τους. Το σήμα αυτό συνδέεται με τις μονάδες “**Sequencer**” και “**Storage**”, ενώ αφού αναστραφεί η τιμή του σε μηδέν από ένα Flip-Flop, στη συνέχεια συνδέεται με την μονάδα των μετατροπέων A/D. Αυτό συμβαίνει, διότι αυτοί λειτουργούν με Active Low Reset.

Το ρολόι του συστήματος, που τέθηκε στα $F_{clk}=50\text{MHz}$, συνδέεται με το “**IP Core-Adc PLL**”. Ο σκοπός της μονάδας αυτής είναι να παράξει το κατάλληλο ρολόι των $F_{adc}=10\text{MHz}$ για την λειτουργία της μονάδας ADC.

Η μονάδα “**Sequencer**” εκτελεί τον κατάλληλο έλεγχο της μονάδας ADC, έτσι ώστε να υπάρξει η κατάλληλη δειγματοληψία των καναλιών, στα οποία έχουν συνδεθεί οι έξοδοι από τους ενισχυτές μετρήσεων τάσης και ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, της τάσης εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο του μετατροπέα DC-DC.

Η ανάκτηση των μετρήσεων πραγματοποιείται από την μονάδα “**Adc**”. Αυτή με την κατάλληλη λογική που έχει δημιουργηθεί από το **IP Core** της MAX 10 FPGA, μπορεί και λαμβάνει τα δείγματα αποθηκεύοντάς τα στους κατάλληλους καταχωρητές καθενός μετατροπέα A/D. Ο χρόνος ανάκτησης, μεταξύ έγκυρων συνεχόμενων μετρήσεων, εξαρτάται από τη συχνότητα δειγματοληψίας και ισούται με $t = 1/\text{sampling rate}$. Παρακάτω δίνεται το χρονικό διάγραμμα μεταβολής των σημάτων που συμβάλουν στην έγκυρη ανάκτηση των μετρήσεων των μετατροπέων A/D.

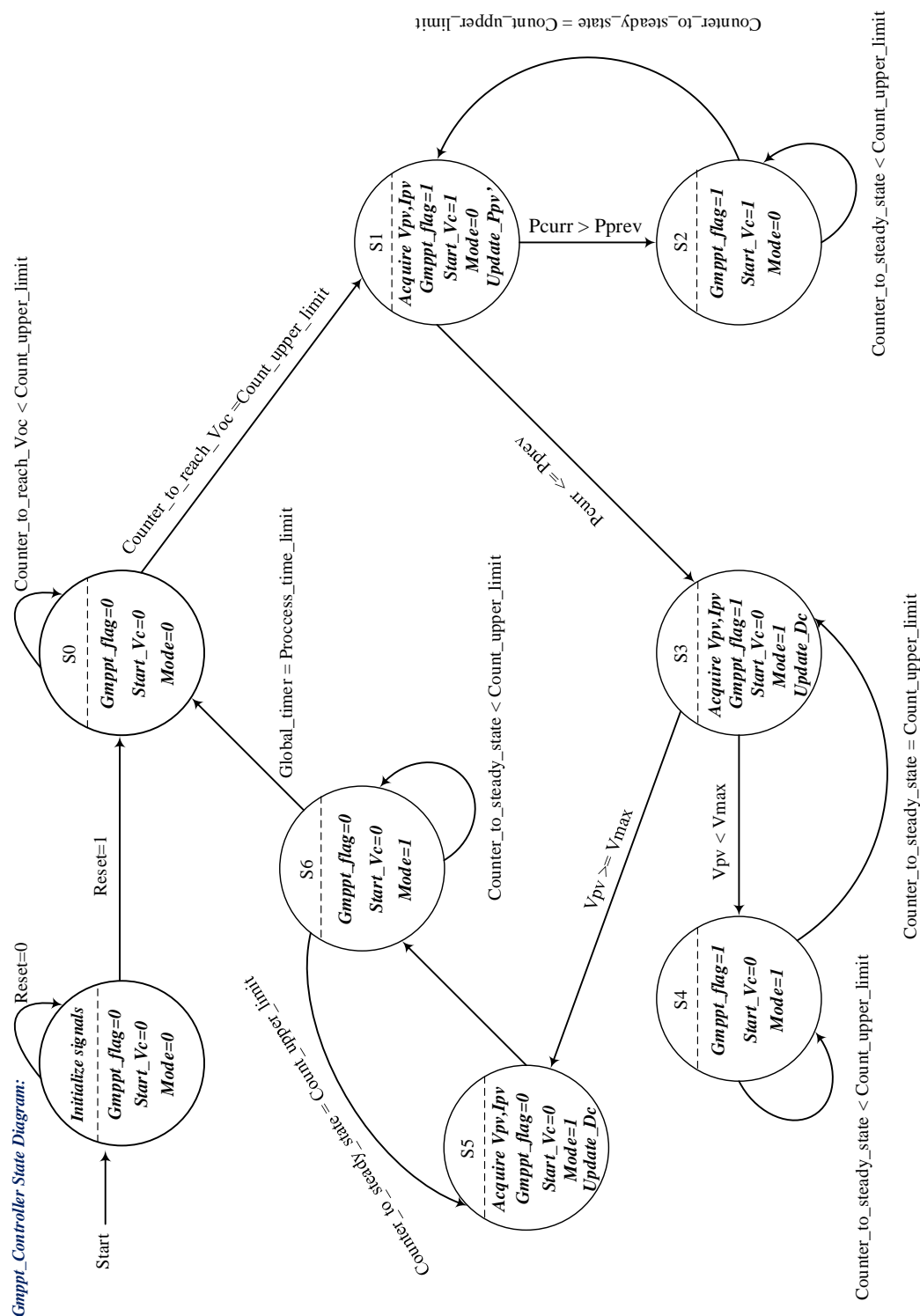


Σχήμα 4.8: Χρονικό διάγραμμα μεταβολής των σημάτων της δομικής μονάδας “**Adc**”, Πηγή:[9]

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι μετατροπείς A/D είναι τύπου SAR-12bit. Τα δεδομένα απο κάθε κανάλι, μετά με κατάλληλο έλεγχο του σήματος-**Valid**, αποθηκεύονται στη δομική μονάδα **“Storage”**. Επιπλέον, η μονάδα αυτή εκτός από το να αποθηκεύει τις 12-bit τιμές των μετρήσεων, πολλαπλασιάζει κάθε μέτρηση με μια 4-bit ποσότητα. Αυτή εκφράζει το κέρδος των ενισχυτών και με το πολλαπλασιασμό τους, η κάθε μέτρηση μετατρέπεται σε μια 16-bit ποσότητα, έτσι ώστε να γίνει πλήρης αντιστοίχιση με την πραγματική τιμή της. Τέλος, κατάλληλα σήματα ελέγχου μεταβαίνουν σε υψηλή στάθμη κάθε φορά που γίνεται η ανανέωση των τιμών του κάθε καταχωρητή.

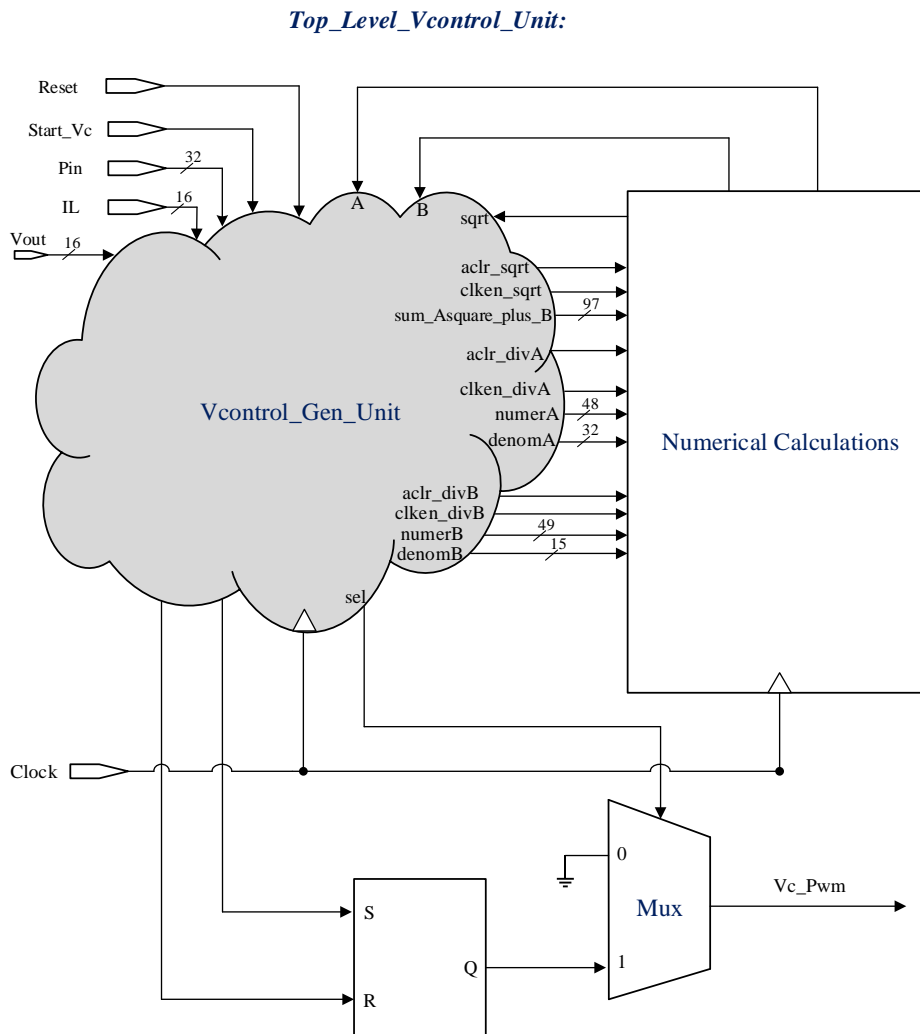
Έπειτα, από το Σχήμα 4.6, παρατηρούμε ότι οι τιμές των μετρήσεων που αποθηκεύονται σε 16-bit καταχωρητές διοχετεύονται στην επόμενη ψηφιακή μονάδα για φιλτράρισμα. Το φιλτράρισμα γίνεται με ένα απλό φίλτρο μέσης τιμής, όπου αναχτώνται 4096 έγκυρες μετρήσεις και στην συνέχεια γίνεται ολίσθηση 12 θέσεων προς τα δεξιά προκειμένου να παραχθεί η μέση τιμή τους. Κάθε φορά που εκτελείται το φιλτράρισμα, η τιμή αποθηκεύεται σε έναν καταχωρητή των 16-bit και μαζί του παράγεται ένα σήμα ελέγχου που μεταβαίνει σε υψηλή στάθμη κάθε φορά που ανανεώνεται η τιμή του καταχωρητή φιλτραρίσματος.

Μετά την αποθήκευση των φιλτραρισμένων τιμών του ρεύματος-τάσης της συστοιχίας και της τάσης εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, αυτές περνούν για έλεγχο στην μονάδα ελέγχου που πραγματοποιεί και την ανίχνευση του ολικού μέγιστου ισχύος (**“Gmppt Controller”**). Η μονάδα αυτή υλοποιεί την λειτουργικότητα της ανίχνευσης του ολικού μεγίστου, όπως περιγράφηκε και στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.5. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων. Αρχικά, με το σήμα Reset, αρχικοποιούνται όλα τα σήματα και οι καταχωρητές της μονάδας. Έπειτα, ο έλεγχος περιμένει για μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου στην αρχικοποιημένη κατάσταση και μόλις παρέλθει ο χρόνος αυτός μεταβαίνει στον έλεγχο με την μέθοδο σταθερής ισχύος εισόδου. Στην κατάσταση αυτή ελέγχεται εάν η προηγούμενη τιμή ισχύος είναι μεγαλύτερη από την τωρινή. Εάν ισχύει, τότε μεταβαίνει στην κατάσταση ελέγχου μεταβολής της τάσεως λειτουργίας, μέχρι αυτή να γίνει ίση με την τάση που παρουσιάστηκε στο μέγιστο σημείο ισχύος. Εάν όμως αυτό δεν ισχύει, ο καταχωρητής που αποθηκεύει την τιμή της επιθυμητής ισχύος, της εξίσωσης ελέγχου $V_{control}$, αυξάνεται προκειμένου να πραγματοποιηθεί η επόμενη ανίχνευση. Μετά την μεταβολή της τιμής αυτής, ο έλεγχος μεταβαίνει σε μια μεταβατική κατάσταση όπου περιμένει για 80 ms μέχρι ο μετατροπέας να μεταβεί στην μόνιμη κατάσταση. Μόλις ολοκληρωθεί το χρονικό διάστημα αυτό, ο έλεγχος επιστρέφει πάλι στην προηγούμενη κατάσταση, με την οποία ελέγχεται η συνθήκη σύγκλισης στο ολικό μέγιστο σημείο ισχύος. Στις επόμενες καταστάσεις, αλλάζει η μέθοδος ελέγχου και ανάλογα σε ποιά φάση βρίσκεται (**Voltage Regulation ή P&O**), η διάρκεια αγωγής μεταβάλλεται κατάλληλα, ενώ μετά από κάθε μεταβολή ο έλεγχος περνάει σε μια μεταβατική κατάσταση για 80ms, ώστε να περιμένει τον μετατροπέα να μεταβεί στην μόνιμη κατάστασή του. Στο Σχήμα 3.41, απεικονίζεται η κάθε μετάβαση με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.



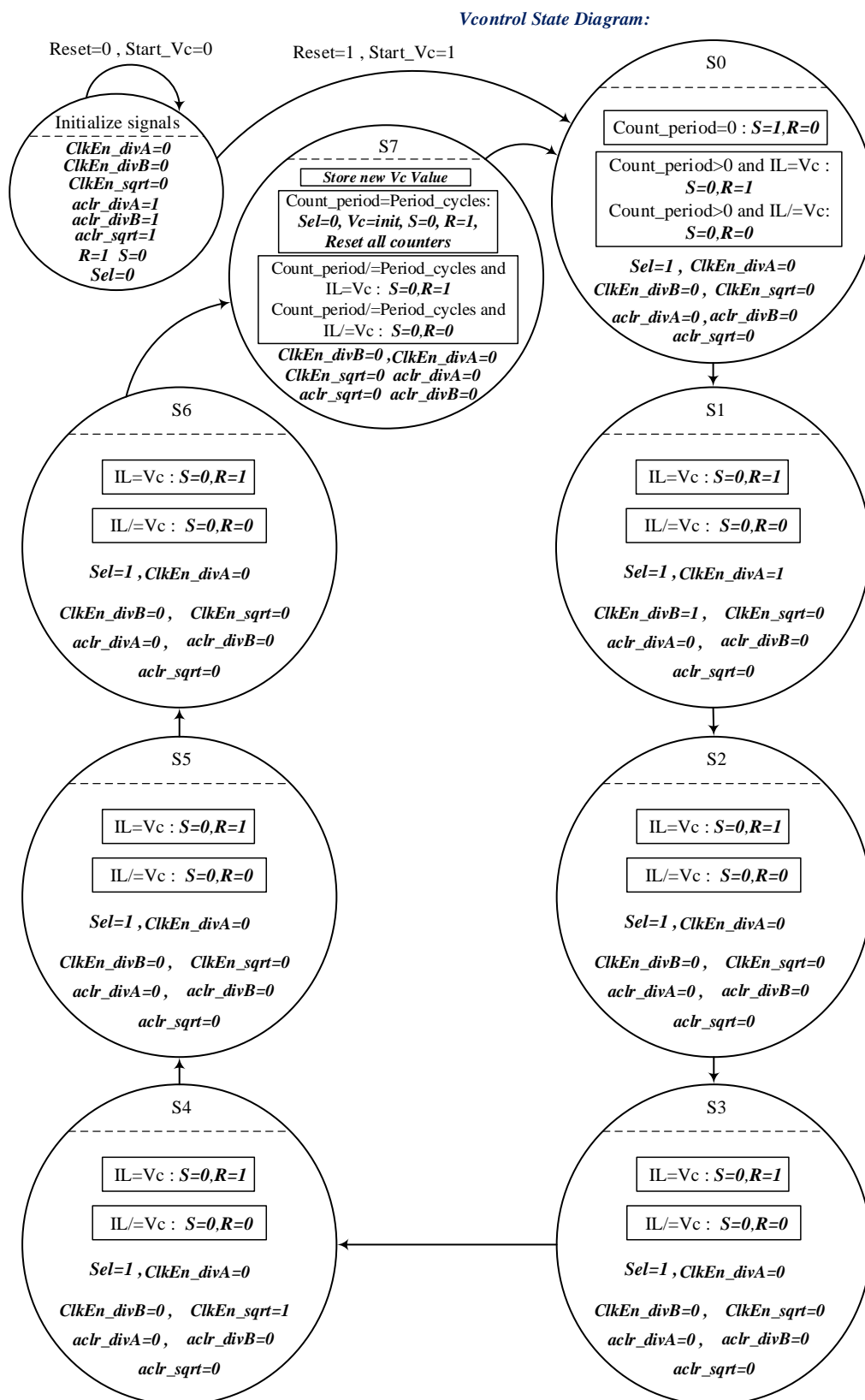
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα καταστάσεων της μονάδας ελέγχου- “Gmppt Controller”.

Η μονάδα ελέγχου, προκειμένου να παράξει το PWM σήμα με τη μέθοδο σταθερής ισχύος εισόδου, χρησιμοποιεί την μονάδα “**Top Level Vcontrol Unit**”. Αυτή δέχεται στην είσοδό της, τη μέτρηση του ρεύματος του πηνίου, τη τάση εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, τη τιμή της επιθυμητής ισχύος για τον υπολογισμό της εξίσωσης-Vcontrol και ένα σήμα ελέγχου, start, το οποίο μέσω της μονάδας ελέγχου εκκινεί τη διαδικασία υπολογισμού της εξίσωσης-Vcontrol. Στο Σχήμα 3.42 απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα της δομικής μονάδας: “**Top Level Vcontrol Unit**”.



Σχήμα 4.10: Λειτουργικό διάγραμμα της δομικής μονάδας “**Top Level Vcontrol Unit**”.

Η παραγωγή του PWM σήματος, σε αυτή την περίπτωση, εξαρτάται από την μονάδα ελέγχου- “**Vcontrol Gen Unit**”, την μονάδα όπου πραγματοποιούνται οι κατάλληλοι αριθμητικοί υπολογισμοί- “**Numerical Calculations**”, ένα **SR Latch** καθώς και ένα πολυπλέκτη. Στο Σχήμα 3.43, απεικονίζεται το διάγραμμα καταστάσεων για την μονάδα ελέγχου της υλοποίησης της εξίσωσης του σήματος Vcontrol.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα καταστάσεων της μονάδας ελέγχου “Vcontrol Gen Unit”.

Αρχικά, όταν το Reset ενεργοποιείται ή το σήμα Start δεν έχει ενεργοποιηθεί από την μονάδα ελέγχου- “**Gmppt Controller**”, τότε όλα τα σήματα βρίσκονται στην αρχικοποιημένη τους κατάσταση. Στη συνέχεια, όταν το σήμα Reset δεν είναι ενεργοποιημένο και εφόσον έχει ενεργοποιηθεί το σήμα Start, η κατάσταση αλλάζει και μεταβαίνει στην S0.

Στην κατάσταση S0, ο μετρητής είναι ακόμα μηδέν, το οποίο σημαίνει ότι βρισκόμαστε στην αρχή της περιόδου υπολογισμού του σήματος Vc. Επιπλέον, τα σήματα του SR Latch γίνονται S=1 και R=0 αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα PWM, τίθεται σε υψηλή στάθμη. Όλα τα υπόλοιπα σήματα ελέγχου είναι ακόμα αρχικοποιημένα στο μηδέν, διότι πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί των αριθμητών και παρανομαστών των όρων της εξίσωσης του Vc. Το σήμα, sel=1, δηλώνει ότι το σήμα PWM, παίρνει τιμή από την σύγκριση του ρεύματος του πηνίου με το Vc και όχι την τιμή μηδέν που παίρνει στην αρχική του κατάσταση, όταν sel=0. Έπειτα, η λειτουργία μεταβαίνει στη κατάσταση S1.

Στην κατάσταση S1, ελέγχεται εάν το ρεύμα του πηνίου γίνεται ίσο με την τιμή του Vc (στην αρχή της περιόδου το Vc θα είναι μηδέν). Στην περίπτωση που είναι ίσα, τότε τα S=0 και R=1, μεταβάλλουν την στάθμη του PWM σήματος από υψηλή σε χαμηλή. Σε αντίθετη περίπτωση, τα S=0 και R=0, δηλώνουν ότι δεν χρειάζεται καμιά μεταβολή του PWM σήματος, δηλαδή αν είναι σε υψηλή στάθμη παραμένει εκεί, ενώ αν είναι σε χαμηλή παραμένει σε χαμηλή. Στη συνέχεια, τα σήματα ελέγχου για τον υπολογισμό των διαιρέσεων των όρων της εξίσωσης Vc, ενεργοποιούνται δίνοντας εντολή στη μονάδα “**Numerical Calculations**”, να αρχίσει τους υπολογισμούς των διαιρέσεων. Στη συνέχεια, η λειτουργία μεταβαίνει στη κατάσταση S2.

Στην κατάσταση S2, γίνεται ο ίδιος έλεγχος, για την περίπτωση σύγκρισης του ρεύματος του πηνίου με την τιμή του Vc. Από την άλλη πλευρά, τα σήματα ελέγχου μεταβαίνουν και πάλι στο μηδέν, το οποίο σημαίνει ότι στον επόμενο κύκλο θα έχουν υπολογιστεί οι αντίστοιχες διαιρέσεις. Η κατάσταση ελέγχου μεταβαίνει στην S3.

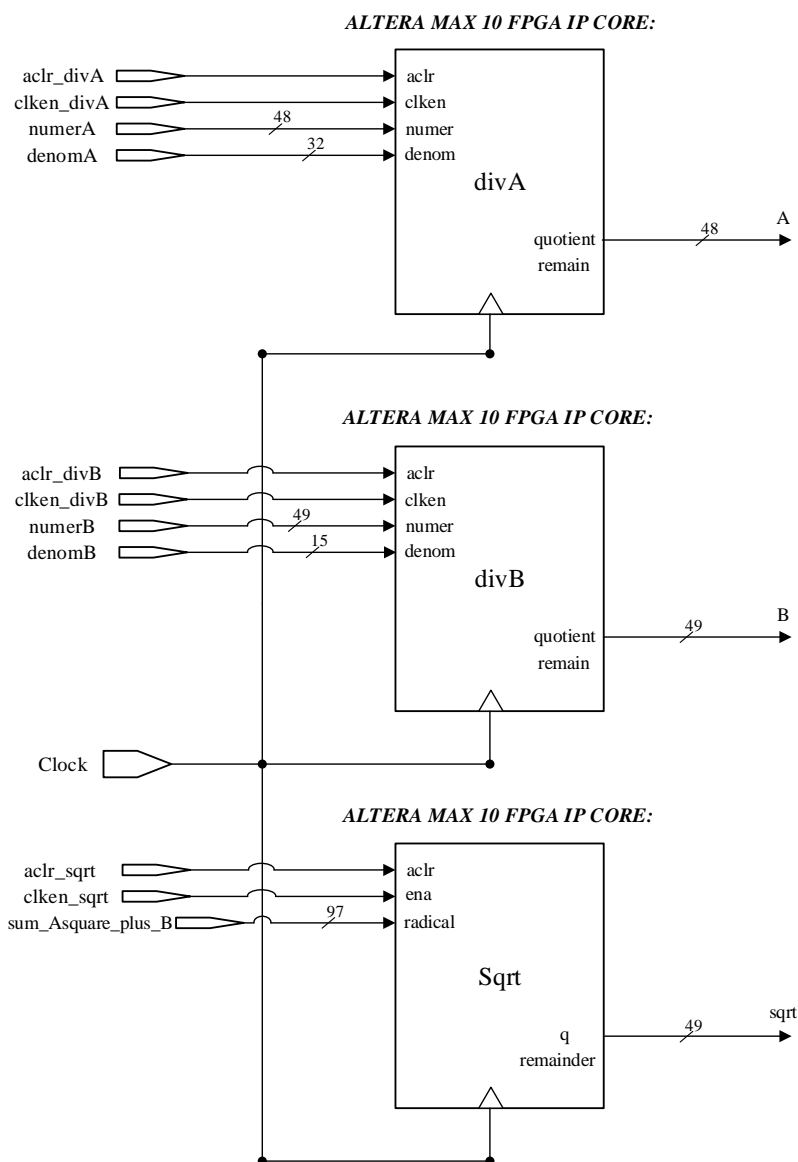
Στην κατάσταση S3, αρχικά έχουμε την σύγκριση ρεύματος πηνίου και Vc, με την αντίστοιχη μεταβολή των σημάτων S και R. Τα υπόλοιπα σήματα ελέγχου παραμένουν στην μηδενική τους κατάσταση, ενώ στη φάση αυτή έχουν αποθηκευτεί στους κατάλληλους καταχωρητές οι τιμές των διαιρέσεων. Η κατάσταση ελέγχου μεταβαίνει στην S4.

Στη κατάσταση S4, αυτό που αλλάζει είναι ότι ενεργοποιείται το σήμα ελέγχου για τον υπολογισμό της τετραγωνικής ρίζας, δίνοντας εντολή στη μονάδα- “**Numerical Calculations**”, να αρχίσει στον επόμενο κύκλο τον υπολογισμό της. Η λειτουργία ελέγχου μεταβαίνει στις επόμενες καταστάσεις, S5 και S6, εκτελώντας τις ίδιες συνθήκες ελέγχου. Τέλος, η λειτουργία μεταβαίνει στην κατάσταση S7.

Στη κατάσταση S7, αποθηκεύεται η νέα τιμή του Vc. Έπειτα, ελέγχεται εάν η τιμή του μετρητή έχει γίνει ίσος με τον αριθμό των κύκλων που χρειάζονται για να ολοκληρωθεί μια περίοδος. Εάν αυτό συμβαίνει, όλα τα σήματα παίρνουν τις αρχικοποιημένες τους τιμές. Στην περίπτωση, όπου η διαδικασία δεν έχει φτάσει στο τέλος της περιόδου, η νέα τιμή του Vc

συγκρίνεται με το ρεύμα του πηνίου και γίνονται οι ανάλογες μεταβολές των σημάτων S και R. Η τιμή αυτή του V_c παραμένει η ίδια, μέχρι να περάσουν οι επόμενοι 8 κύκλοι για τον υπολογισμό της νέας του τιμής. Εφόσον το ρολόι λειτουργίας της FPGA είναι ίσο με, $Fclk=50$ MHz, οπότε και $Tclk=20ns$, τότε το βήμα δειγματοληψίας του σήματος V_c είναι ίσο με: $DTs = 8 \cdot Tclk = 160ns$. Έπειτα, η διαδικασία αρχίζει από την αρχή με την μετάβασή της στη κατάσταση S0.

Numerical Calculations:



Σχήμα 4.12: Μονάδα αριθμητικών υπολογισμών-“Numerical Calculations” για την υλοποίηση της εξίσωσης ελέγχου V_c .

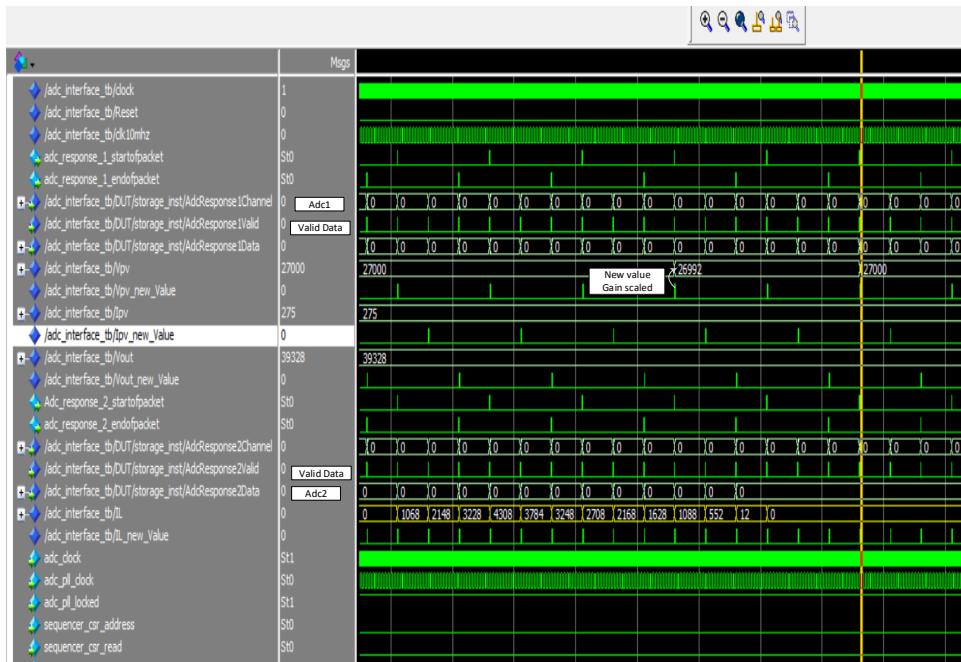
Για τον υπολογισμό τόσο των διαιρέσεων όσο και της τετραγωνικής ρίζας, χρησιμοποιήθηκαν **IP Cores** που είναι συμβατά με την MAX 10 FPGA.

Στο Σχήμα 4.5, παρατηρούνται επίσης και δύο επιπλέον μονάδες. Η μία μονάδα- **“PWM Gen Unit”**, αφορά την παραγωγή του σήματος PWM, όταν ο έλεγχος βρίσκεται στη μεταβολή της διάρκειας αγωγής με μία τιμή διαταραχής. Η μονάδα αυτή, βασίζεται στη λογική της σύγκρισης ενός μετρητή με μια τιμή ενός καταχωρητή, που τίθεται από την μονάδα ελέγχου- **“Gmppt Controller”**. Η τιμή του καταχωρητή εκφράζει τον αριθμό των κύκλων για το οποίο το σήμα PWM, θα είναι σε υψηλή στάθμη. Η τιμή αυτού, δεν μπορεί να είναι μικρότερη του μηδενός και μεγαλύτερη ενός πάνω ορίου, που εκφράζει τον αριθμό των κύκλων που απαιτούνται, σε σχέση με το ρολόι του συστήματος, έτσι ώστε να ολοκληρωθεί μια περίοδος του PWM σήματος. Η τιμή του καταχωρητή, λοιπόν, εκφράζει τη διάρκεια αγωγής, δηλαδή το ποσοστό στο οποίο ο διακόπτης θα είναι κλειστός σε μία διακοπτική περίοδο. Η μεταβολή της τιμής γίνεται από την μονάδα ελέγχου- **“Gmppt Controller”** και στη συνέχεια η τιμή του συγκρίνεται στην μονάδα- **“PWM Gen Unit”** και παράγεται το αντίστοιχο PWM σήμα.

Τέλος, η δομική μονάδα- **“Fpga Data Capture”**, παράγεται από το περιβάλλον της MATLAB και τοποθετείται στην κορυφή της σχεδίασης, με στόχο να αποκτήσει τις τιμές των μετρήσεων του ρεύματος και της τάσης της συστοιχίας. Αυτές, αποθηκεύονται στην μνήμη της FPGA και μεταφέρονται στο υπολογιστή μέσω του JTAG της FPGA.

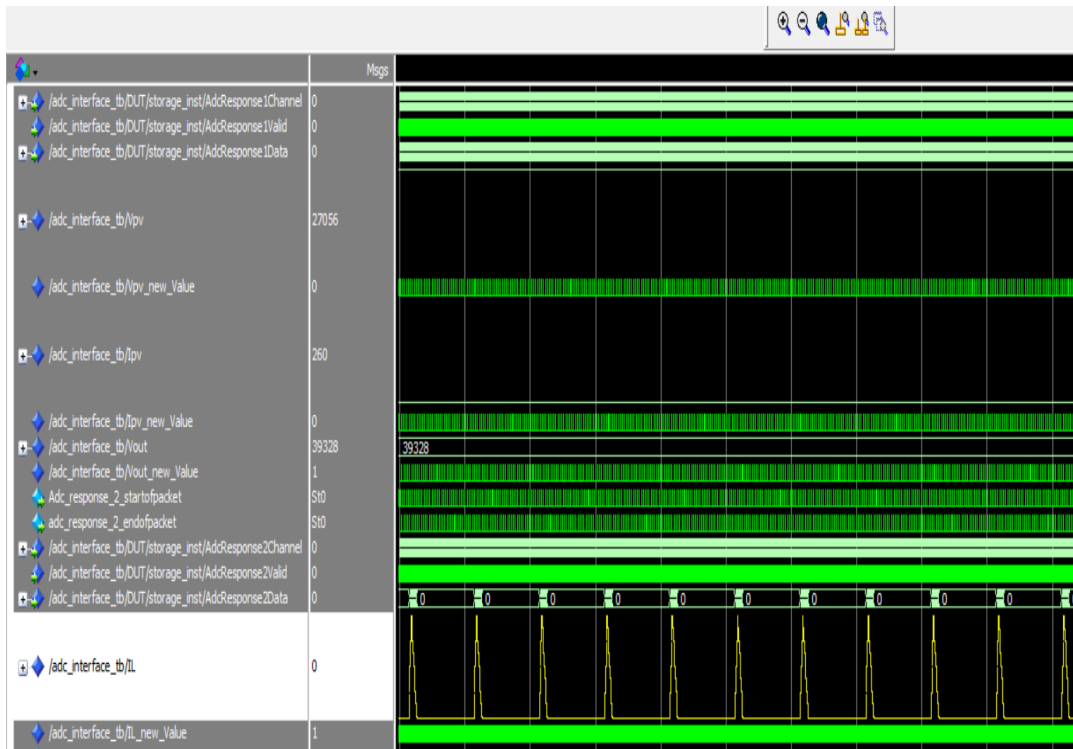
4.1.2 Προσομοίωση συστήματος σε Modelsim HDL Simulator

Για την επιβεβαίωση της λειτουργικότητας του συστήματος στη γλώσσα περιγραφής υλικού-VHDL χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής Modelsim. Αρχικά πραγματοποιήθηκε επαλήθευση της λειτουργίας του ADC, καθώς και των τμημάτων του συστήματος που πραγματοποιούν την αποθήκευση και κλιμάκωση των μετρήσεων με τα αντίστοιχα κέρδη των αισθητήρων.



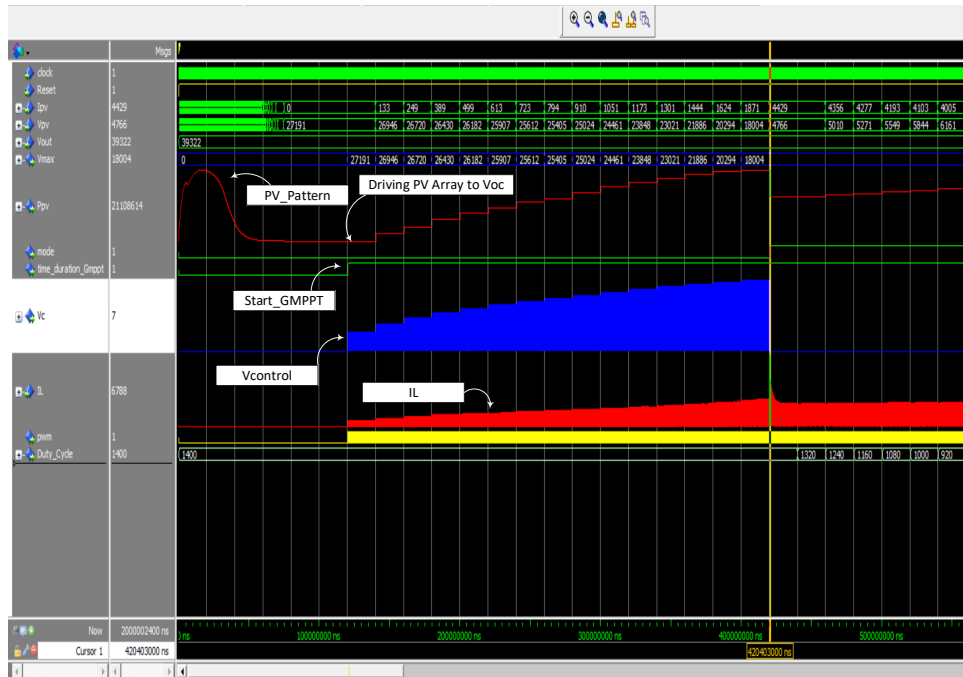
Σχήμα 4.13: Προσομοίωση λειτουργικότητας του ADC.

Παρατηρούμε ότι, οι μετρήσεις αποθηκεύονται στους κατάλληλους καταχωρητές όταν τα σήματα StartofPacket και AdcValid μεταβαίνουν σε υψηλή στάθμη. Επίσης, παρατηρείται και η κατάλληλη κλιμάκωση των μετρήσεων με τα αντίστοιχα κέρδη των αισθητήρων. Ο πρώτος μετατροπέας της FPGA, ακολουθιακά μετράει τις τιμές της τάσης και ρεύματος της συστοιχίας, καθώς και την τάση εξόδου του μετατροπέα DC-DC. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η συχνότητα δειγματοληψίας του πρώτου μετατροπέα ρυθμίζεται στα $F_s=1\text{MSPS}$ και λόγω της ακολουθιακής δειγματοληψίας κάθε καναλιού, η κάθε μετρήσιμη ποσότητα δειγματοληπτείται τελικώς με $F_s=1/3\text{MSPS}$. Στον δεύτερο μετατροπέα, πραγματοποιείται η δειγματοληψία του ρεύματος του πηνίου με τη μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας $F_s=1\text{MSPS}$. Στη συνέχεια, παρατηρούμε την μορφή του ρεύματος του πηνίου μετά την προσομοίωση της λειτουργικότητας του μετατροπέα ADC.

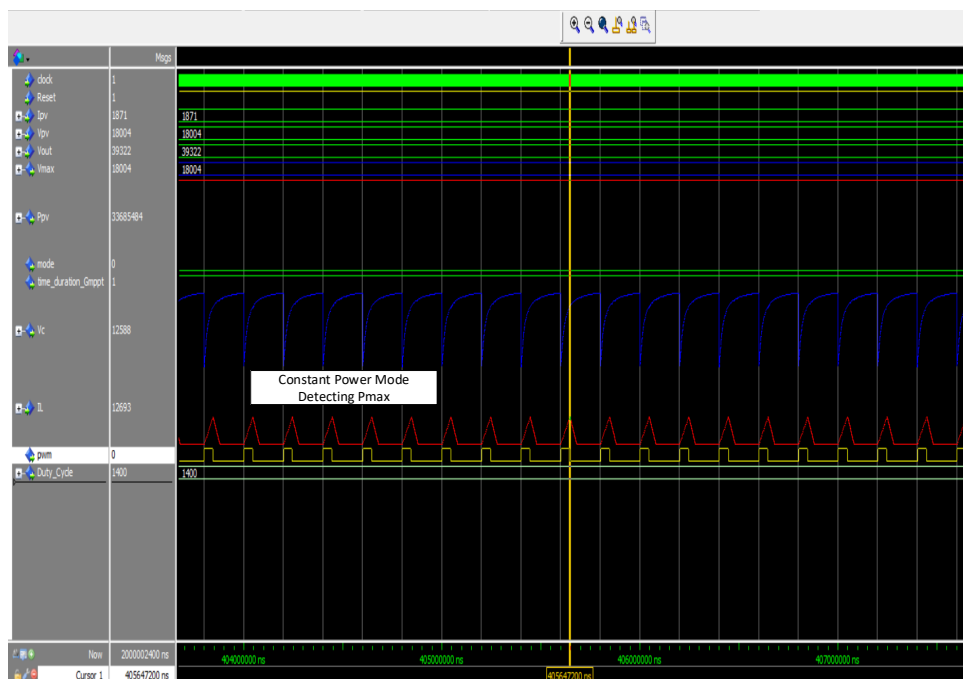


Σχήμα 4.14: Προσομοίωση λειτουργικότητας του ADC και αναπαράσταση αναλογικής μορφής του ρεύματος του πηνίου.

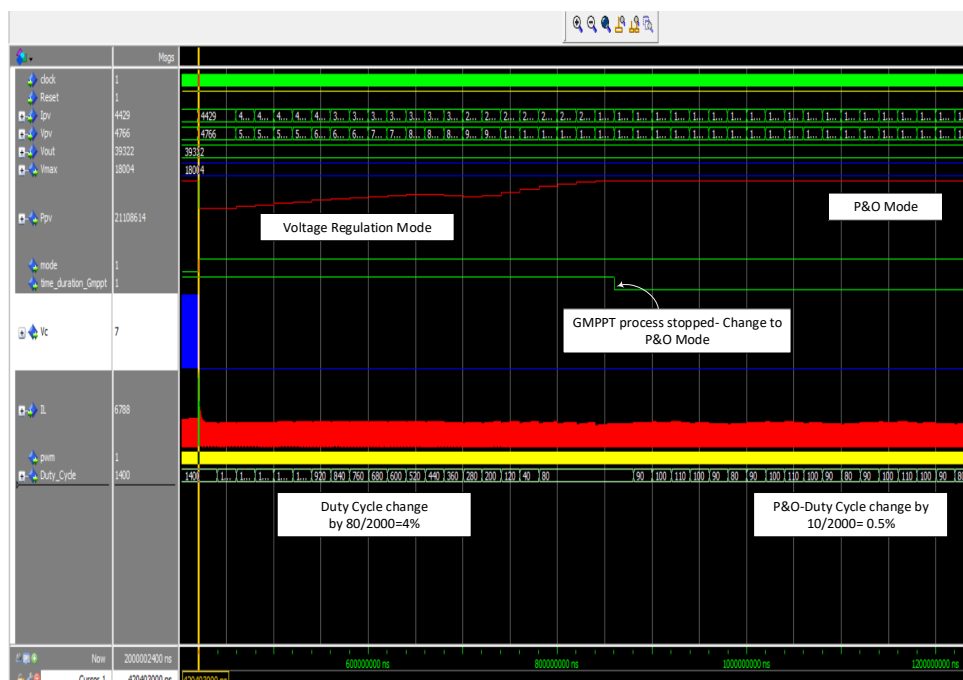
Στη συνέχεια, δίνονται οι κυματομορφές προσομοίωσης στο περιβάλλον του ModelSim για τη συνολική λειτουργία του συστήματος επιλέγοντας συγκεκριμένο μοτίβο ακτινοβολίας. Αρχικά, οδηγούμε την φωτοβολταϊκή συστοιχία στη τάση ανοιχτού κύκλου όπως αυτή πραγματοποιείται στο SIMULINK. Έπειτα, αρχίζει η λειτουργία ανίχνευσης με τη μέθοδο της σύγκρισης του σήματος ελέγχου V_c με το ρεύμα του πηνίου. Μετά την ανίχνευση του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος, ο αλγόριθμος ελέγχου ελέγχει την συστοιχία με την μεταβολή της σχετικής διάρκειας αγωγής. Αυτή μεταβάλλεται μέχρι η τάση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας να μεταβεί στη τάση για την οποία παρατηρείται η μέγιστη ισχύς, ενώ στη συνέχεια με ένα μικρότερο βήμα διαταραχής παραμένει στο μέγιστο σημείο ισχύος με την χρήση του αλγορίθμου **P&O**.



Σχήμα 4.15: Προσομοίωση λειτουργικότητας συστήματος για συγκεκριμένο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 4.16: Λειτουργία ελέγχου σύγκρισης σήματος ελέγχου με το ρεύμα του πηνίου.



Σχήμα 4.17: Λειτουργία ελέγχου μεταβολής διάρκειας αγωγής.

4.2 Σχεδίαση ηλεκτρονικού συστήματος

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η σχεδίαση του ηλεκτρονικού συστήματος ρύθμισης της παραγωγής ισχύος φωτοβολταϊκής συστοιχίας, η οποία αποτελείται από δυο φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους είναι όμοια με αυτά του **Πίνακα 3.1**. Επιπλέον, στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα δίνονται τα ηλεκτρονικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του συστήματος.

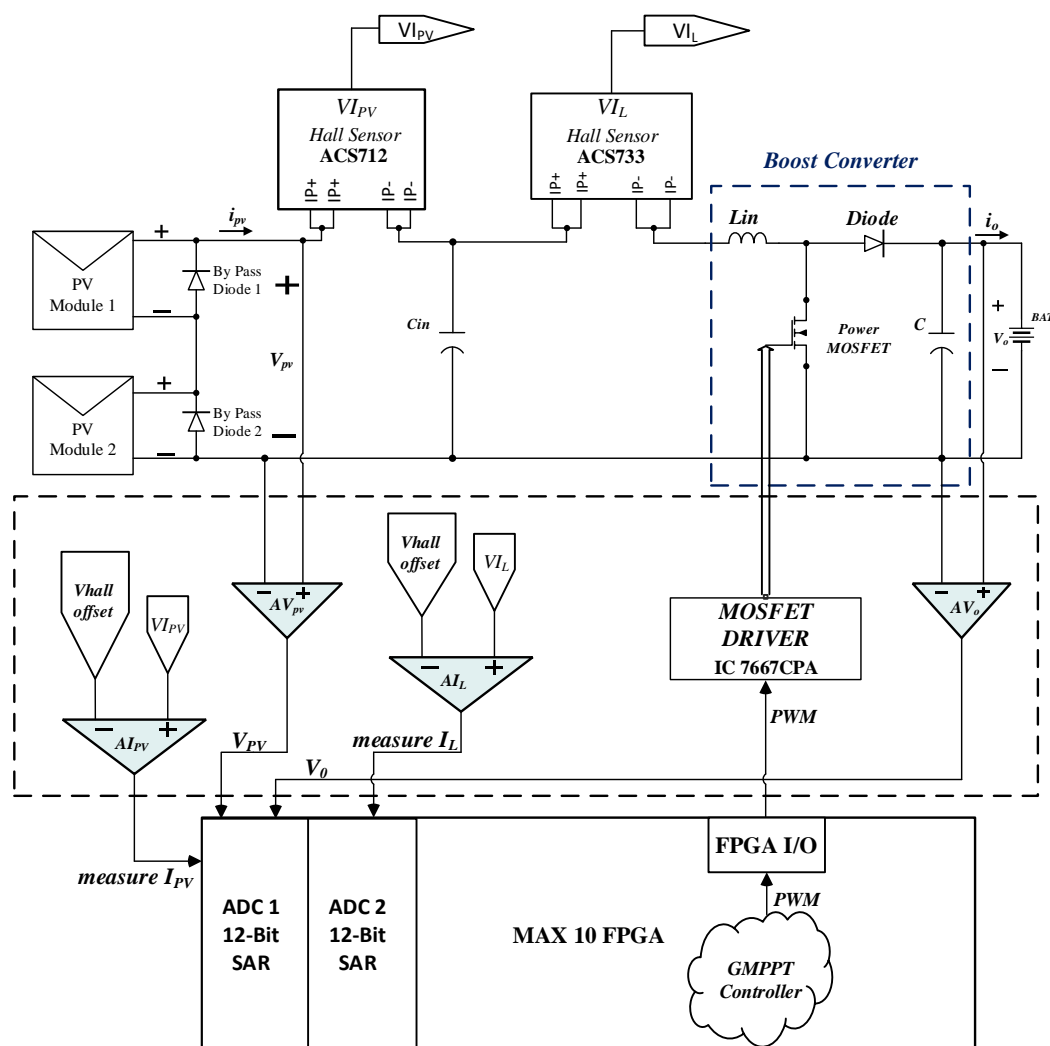
Ηλεκτρονικά Στοιχεία Μετρήσεων		
Μετρήσεις	Αισθητήρας	Διαφορικός Ενισχυτής
Τάση- V_{pv}	-	LM358 [10]
Ρεύμα- I_{pv}	ACS712ELCTR-20A-T [11]	OPA2340 [12]
Ρεύμα-IL	ACS733KLATR-40AU-T [13]	OPA2340
Τάση- V_0	-	LM358

Πίνακας 4.1: Ηλεκτρονικά στοιχεία του συστήματος μετρήσεων.

Σαν φορτίο χρησιμοποιήθηκαν δύο συνδεδεμένες σε σειρά μπαταρίες μολύβδου των 12V-7.5Ah. Η μία από τις δύο χρησιμοποιήθηκε και για την τροφοδότηση των ολοκληρωμένων του Πίνακα 4.1, μέσω του ρυθμιστή τάσης των 5V-LM7805. Επίσης, τροφοδότησε και το ολοκληρωμένο του Driver-CPA7667, που οδηγεί το MOSFET ισχύος του μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μονάδα ελέγχου αποτελείται από την MAX 10 FPGA της Altera-Intel. Η συχνότητα του PWM σήματος, προσαρμόστηκε στα $f_s=10\text{kHz}$, ενώ έγινε χρήση ενός πηνίου με αυτεπαγωγή $L = 50\mu\text{H}$. Στο Σχήμα 4.19 απεικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα του συνολικού συστήματος που υλοποιήθηκε.



Εικόνα 4.14: Η συστοιχία που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία. Αυτή αποτελείται από δύο σε σειρά πάνελ, τα οποία τοποθετούνται σε διαφορετικές κλίσεις προκειμένου να εμφανιστεί το φαινόμενο της σκίασης.



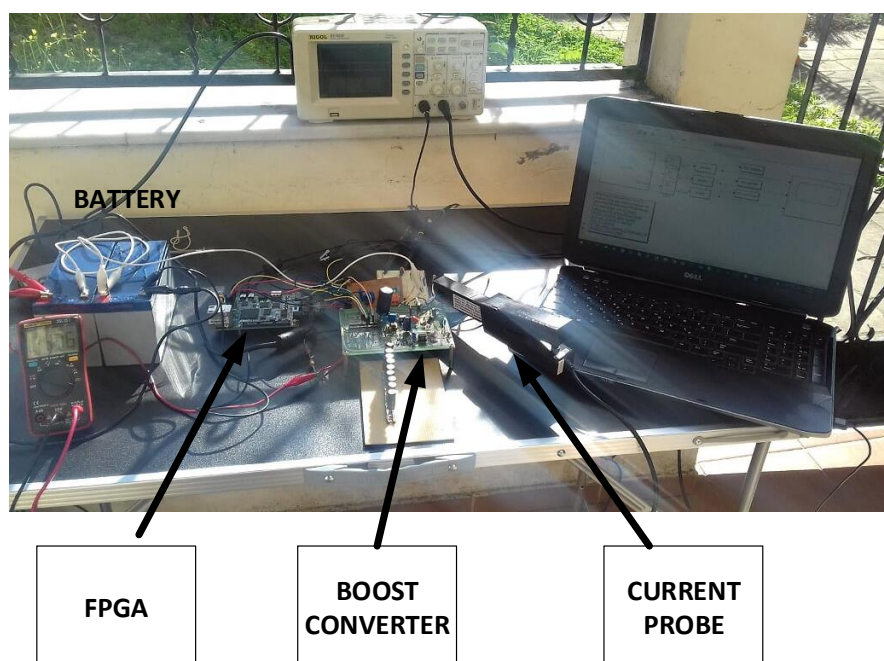
Σχήμα 4.19: Λειτουργικό διάγραμμα του συνολικού συστήματος που υλοποιήθηκε.

Οι μετρήσεις των ρευμάτων της συστοιχίας και του πηνίου, διαφέρουν κατά μια βαθμίδα όπου γίνεται η αφαίρεση της τάσης των αισθητήρων Hall, όταν από αυτούς δεν διαρρέεται ρεύμα-κατάσταση ηρεμίας. Για την μέτρηση του ρεύματος της συστοιχίας- I_{pv} , έγινε χρήση του αισθητήρα, ACS712ELCTR-20A-T. Αυτός μπορεί να ανιχνεύει τη ροή του ρεύματος και στις δυο κατευθύνσεις. Η τιμή της τάσης ηρεμίας του αισθητήρα κυμαίνεται στα επίπεδα $0.5 \cdot V_{CC}$, όπου $V_{CC} = 5V$, η τάση τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου-αισθητήρα. Η ευαισθησία του αισθητήρα είναι ίση με $Hall_SenseI = 100 (mV/A)$.

Για την μέτρηση του ρεύματος του πηνίου χρησιμοποιήθηκε ο Hall αισθητήρας-ACS733KLATR-40AU-T. Αυτός είναι μονής κατεύθυνσης, με τη τάση ηρεμίας να ορίζεται στα $0.1 \cdot V_{cc}$, όπου $V_{cc} = 3.3V$. Η ευαισθησία του αισθητήρα είναι: $SenseI = 66 (mV/A)$.

Ένα επιπλέον στοιχείο που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι ο MOSFET driver-CPA7667, βγάζει στην έξοδό του την ανεστραμμένη μορφή του σήματος εισόδου. Για να γίνει αντιστοιχία με τη σωστή μορφή του σήματος PWM, που παράγεται μέσω του κώδικα-VHDL στην FPGA, αυτό αναστρέφεται με μια πύλη-NOT μέσα στον κώδικα-VHDL του συστήματος ελέγχου.

Τέλος, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με δύο τρόπους. Ένας τρόπος ήταν με την δημιουργία των κατάλληλων IP Cores της FPGA που υλοποιούν την λειτουργία του πρωτοκόλλου UART. Στη συνέχεια, οι κώδικες που παράγονται ενσωματώνονται στη συνολική σχεδίαση του συστήματος, με στόχο την μεταφορά των μετρήσεων στον υπολογιστή μέσω USB καλωδίου. Η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων είναι 9600bps. Στην συνέχεια, οι μετρήσεις της τάσης και ρεύματος της συστοιχίας αποθηκεύονται σε αρχείο-.csv. Ο δεύτερος τρόπος, είναι με την ενσωμάτωση κώδικα-VHDL που παράγεται από τη MATLAB, με την μετάδοση των δεδομένων να γίνεται μέσω του JTAG της MAX 10 FPGA [14].



Εικόνα 4.18: Το ηλεκτρονικό σύστημα που υλοποιήθηκε.

Κεφάλαιο 5

Πειραματικά αποτελέσματα

Η πειραματική διαδικασία είχε ως στόχο τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος υπό την επίδραση του φαινομένου της μερικής σκίασης. Προκειμένου, να προκύψουν τα μοτίβα ακτινοβολίας μερικής σκίασης, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της συστοιχίας που απεικονίζονται στην Εικόνα 4.14, έπρεπε να τοποθετηθούν σε διαφορετικές κλίσεις. Για τη μέτρηση της ισχύος προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε κάθε πλαίσιο χρησιμοποιήθηκε το πυρανόμετρο του εργαστηρίου KIMO SL 100 [15].

**Solarimeter
SL 100**

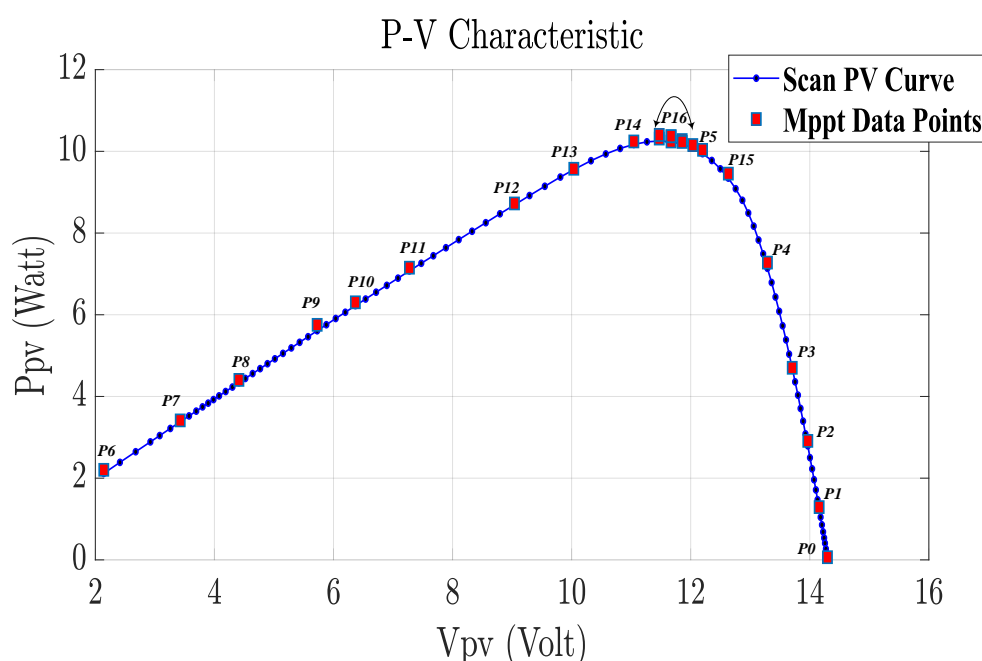


Σχήμα 5.1: Πυρανόμετρο KIMO SL100, πηγή:[16]

5.1 Πρώτο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Η λειτουργία του συστήματος στο πρώτο μοτίβο ακτινοβολίας αφορά την περίπτωση στην οποία η συστοιχία δεν βρίσκεται υπό την επίδραση του φαινομένου της μερικής σκίασης. Στη περίπτωση αυτή τα πλαίσια της συστοιχίας τοποθετούνται με την ίδια γωνία κλίσης, έτσι ώστε να προσπίπτει ομοιόμορφη ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνειά τους. Οι χαρακτηριστικές της συστοιχίας μετρήθηκαν με τη συνεχόμενη μεταβολή της διάρκειας αγωγής κατά 1.5% μέχρι αυτή να φτάσει στο 90%.

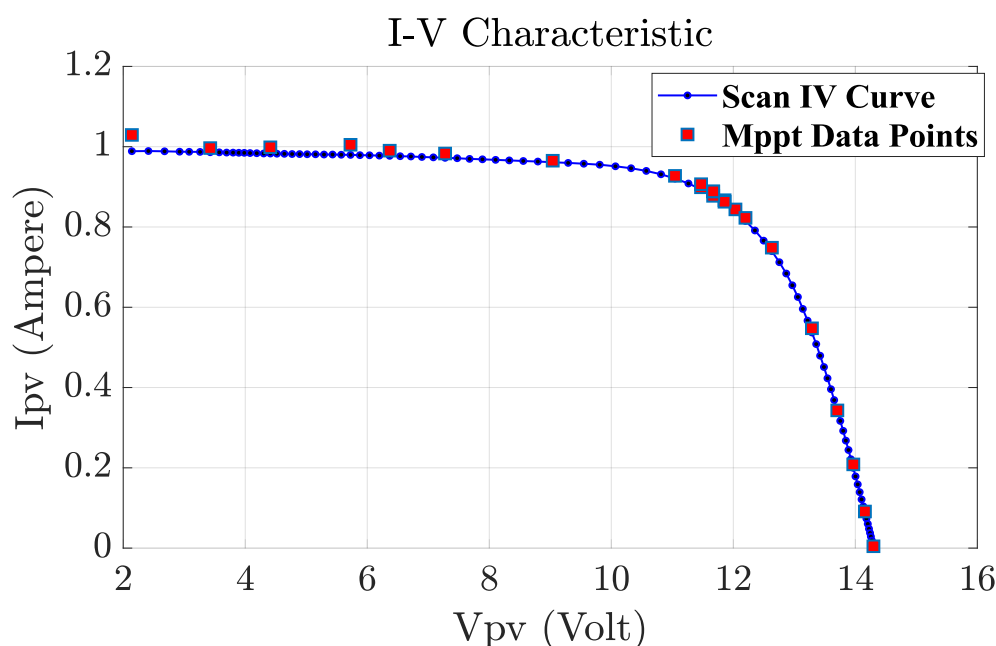
- Επίπεδα ακτινοβολίας $G1=430 \text{ W/m}^2$, $G2=470 \text{ W/m}^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $T = 20^\circ\text{C}$.



Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστική P-V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά την πρόσπτωση ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος.

Η μέθοδος ανίχνευσης αρχίζει από το σημείο λειτουργίας P0 και μεταβαίνει μέχρι το σημείο P5, με τη μέθοδο σταθερής ισχύος εισόδου. Η συστοιχία μεταβαίνει στα σημεία αυτά με τη διαδοχική αύξηση της παραμέτρου- P_{pv} του σήματος ελέγχου $V_{control}$. Σταδιακά ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης οδηγείται στο να απορροφά διαδοχικά μεγαλύτερη σταθερή ισχύ στην είσοδό του σε κάθε βήμα της πρώτης φάσης λειτουργίας. Έχοντας φτάσει στο σημείο

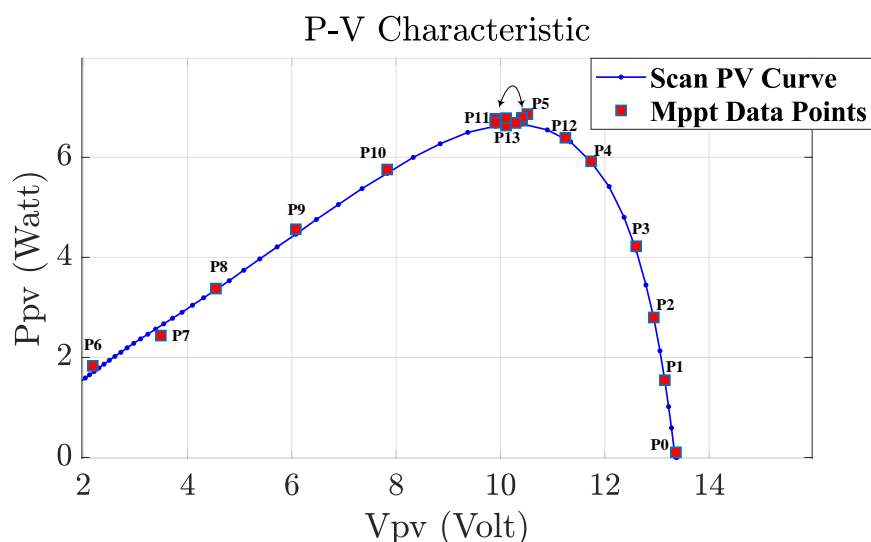
ίο P5 ο αλγόριθμος ελέγχου μεταβάλλει ξανά την τιμή της παραμέτρου P_{rn} προκειμένου ο μετατροπέας DC-DC να απορροφήσει στην είσοδο του μια επόμενη μεγαλύτερη σταθερή ισχύ από την συστοιχία, η οποία όμως δεν μπορεί να αποδοθεί. Αυτό έχει ως συνέπεια, το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας να μεταβεί στο σημείο P6. Στο σημείο αυτό, ο αλγόριθμος έχει ανιχνεύσει ότι η συστοιχία αποδίδει την μέγιστη ισχύ στο σημείο P5. Ο αλγόριθμος αλλάζει την λειτουργία του και μεταβαίνει στην κατάσταση μεταβολής της διάρκειας αγωγής, έτσι ώστε η τάση της συστοιχίας να μεταβεί σε αυτή που είχε όταν βρισκόταν στο σημείο P5. Μεταβάλλοντας την διάρκεια αγωγής, η συστοιχία μεταβαίνει στο σημείο P15, το οποίο όμως έχει τάση μεγαλύτερη από το σημείο P5. Στο σημείο αυτό, ο έλεγχος γίνεται με την μέθοδο P&O, η οποία με διαδοχικές αλλαγές της διάρκειας αγωγής και για ένα μικρό βήμα διαταραχής μεταβαίνει στο σημείο P16. Στη συνέχεια, το σημείο λειτουργίας πραγματοποιεί μια ταλάντωση γύρω από αυτό το σημείο έχοντας συγκλίνει αρκετά κοντά στο πραγματικό μέγιστο της συστοιχίας. Η διάρκεια αγωγής στη δεύτερη φάση επιλέγεται να μεταβάλλεται κατά 5%, ενώ στη φάση λειτουργίας του P&O κατά 2%.



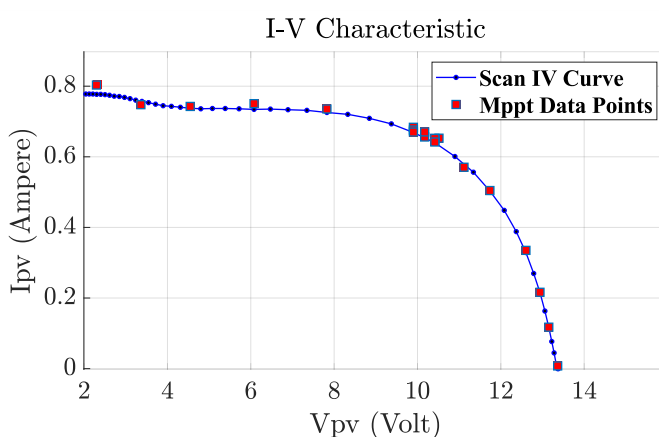
Σχήμα 5.3: Χαρακτηριστική I-V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά την πρόσπτωση ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος.

- Επίπεδα ακτινοβολίας $G1=410 \text{ W/m}^2$, $G2=390 \text{ W/m}^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $T = 22^\circ\text{C}$.

Σε επόμενο πείραμα, με παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες και για σχετικά ομοιόμορφα επίπεδα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, παρατηρούμε ότι το σύστημα συγκλίνει πολύ κοντά στο μέγιστο σημείο ισχύος. Οι τιμές της διαταραχής της διάρκειας αγωγής για την δεύτερη και τρίτη φάση λειτουργίας του αλγορίθμου ελέγχου παρέμειναν στα ίδια επίπεδα με αυτά του προηγούμενου πειράματος.



Σχήμα 5.4: Χαρακτηριστική P-V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά την πρόσπτωση ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος.

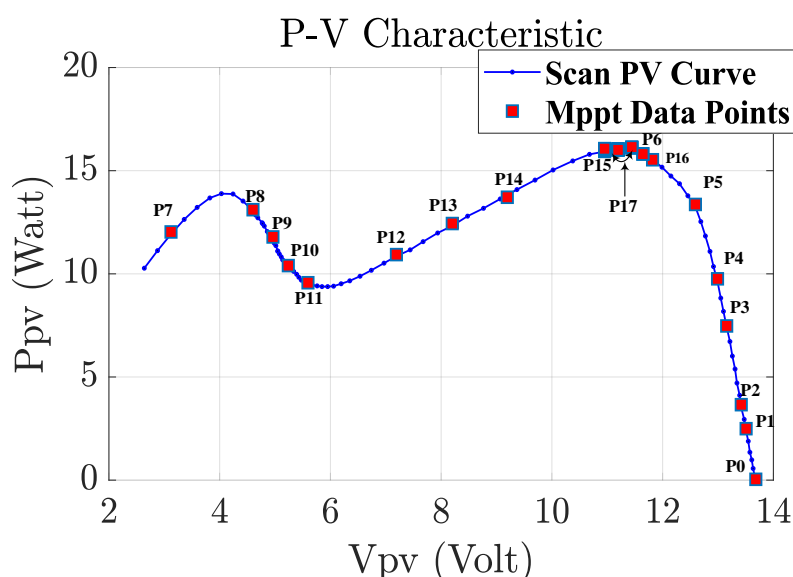


Σχήμα 5.5: Χαρακτηριστική I-V της φωτοβολταϊκής συστοιχίας κατά την πρόσπτωση ομοιόμορφης ηλιακής ακτινοβολίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του μέγιστου σημείου ισχύος.

5.2 Δεύτερο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της συστοιχίας τοποθετήθηκαν σε διαφορετική γωνία κλίσης με στόχο να παρουσιαστούν δύο κορυφές στην χαρακτηριστική τάσης-ισχύος. Το δεύτερο μοτίβο ακτινοβολίας αφορά την περίπτωση που το ολικό μέγιστο σημείο ισχύος βρίσκεται στα αριστερά της χαρακτηριστικής. Οι χαρακτηριστικές της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετρήθηκαν και σε αυτήν την περίπτωση με τη συνεχόμενη μεταβολή της διάρκειας αγωγής κατά 1.5% μέχρι αυτή να φτάσει στο 90%.

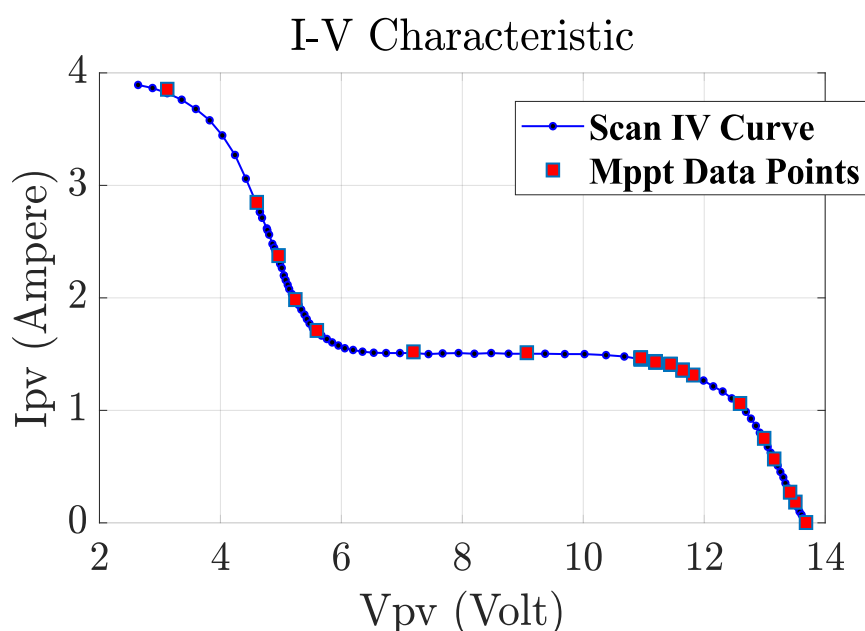
- Επίπεδα ακτινοβολίας $G1=470 \text{ W/m}^2$, $G2=924 \text{ W/m}^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $T = 18^\circ\text{C}$.



Σχήμα 5.6: Χαρακτηριστική P-V Μοτίβου 2 με την φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση της μερικής σκίασης και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος.

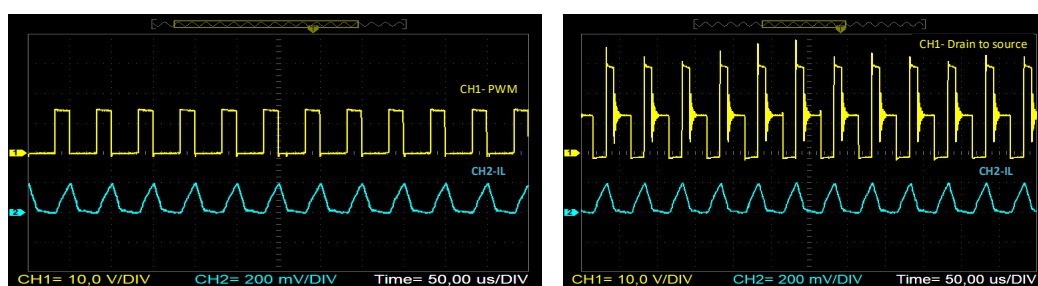
Η φωτοβολταϊκή συστοιχία στην συγκεκριμένη περίπτωση βρίσκεται υπό την επίδραση του φαινομένου της μερικής σκίασης, καθώς η χαρακτηριστική εμφανίζει δυο τοπικά μέγιστα με αυτό στα δεξιά της καμπύλης να αποτελεί το ολικό μέγιστο της συστοιχίας. Η διαδικασία ανίχνευσης ξεκινά από το σημείο P0 και μετά από συνεχόμενη σταθερή απορρόφηση ισχύος από τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει στο σημείο P6. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος ελέγχου επιδρά όπως και προηγουμένως, δηλαδή οδηγεί τον μετατροπέα να απορροφήσει μια μεγαλύτερη ισχύ από αυτό του σημείου λειτουργίας P6. Όμως, η συστοιχία δεν μπορεί να την τροφοδοτήσει με αποτέλεσμα το σημείο λειτουργίας της συ-

στοιχίας να μεταβαίνει στο σημείο P7. Ο αλγόριθμος ελέγχου μεταβαίνει στη δεύτερη φάση λειτουργίας, στην οποία μεταβάλλει την διάρκεια αγωγής μέχρι η τάση λειτουργίας της συστοιχίας να μεταβεί σε αυτό του σημείου P6. Με την συνεχόμενη μεταβολή της διάρκειας αγωγής κατά ένα ποσοστό του 5%, το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας μεταβαίνει τελικώς στο σημείο P16. Η τάση σε αυτό το σημείο είναι μεγαλύτερη από το σημείο P6, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να αλλάζει λειτουργία και να περνάει στην τρίτη φάση λειτουργίας. Στη φάση αυτή η συστοιχία έχει καταλήξει στο σημείο λειτουργίας P16, το οποίο όμως δεν αποτελεί το ολικό μέγιστο. Επομένως, κάνοντας χρήση του αλγορίθμου P&O, το οποίο μεταβάλλει την διάρκεια αγωγής με ένα μικρό βήμα διαταραχής, καταλήγει στο σημείο P17. Το σημείο αυτό, αποτελεί μια καλύτερη σύγκλιση στο ολικό μέγιστο της συστοιχίας και λόγω του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου P&O, υπάρχει η εμφάνιση μιας ταλάντωσης των σημείων λειτουργίας της συστοιχίας γύρω από το σημείο P17.



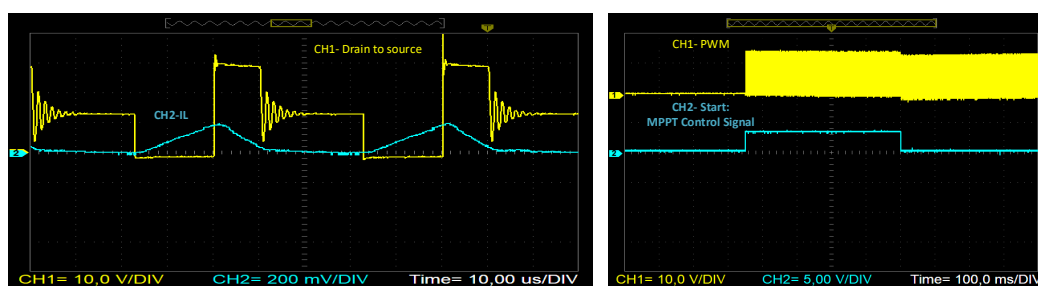
Σχήμα 5.7: Χαρακτηριστική I-V Μοτίβου 2 με την φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση της μερικής σκίασης συστοιχίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος.

Στη συνέχεια, απεικονίζονται οι κυματομορφές που λήφθηκαν από τον παλμογράφο κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Στο Σχήμα 5.8, αριστερά απεικονίζονται σε χρονική αντιστοιχία το σήμα PWM που οδηγεί το MOSFET του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα. Στα δεξιά απεικονίζονται, σε χρονική αντιστοιχία, η τάση μεταξύ Drain-Source του MOSFET του μετατροπέα ανύψωσης τάσης με το ρεύμα του πηνίου. Από τις δύο κυματομορφές παρατηρούμε ότι ο μετατροπέας βρίσκεται σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής, καθώς το ρεύμα του πηνίου μηδενίζεται πριν την περίοδο μετάβασης του μετατροπέα.



Σχήμα 5.8: Αριστερά: PWM σήμα και ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα, Δεξιά: Τάση Drain-Source του MOSFET και το ρεύμα του πηνίου.

Στις παρακάτω κυματομορφές, απεικονίζεται μια μεγέθυνση της χρονικής αντιστοιχίας τάσης Drain-Source και ρεύματος του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ενώ στα δεξιά του Σχήματος 5.9 απεικονίζεται σε χρονική αντιστοιχία το PWM σήμα με το σήμα ελέγχου Start που δείχνει την εκκίνηση και ολοκλήρωση της διαδικασίας ανίχνευσης του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος.

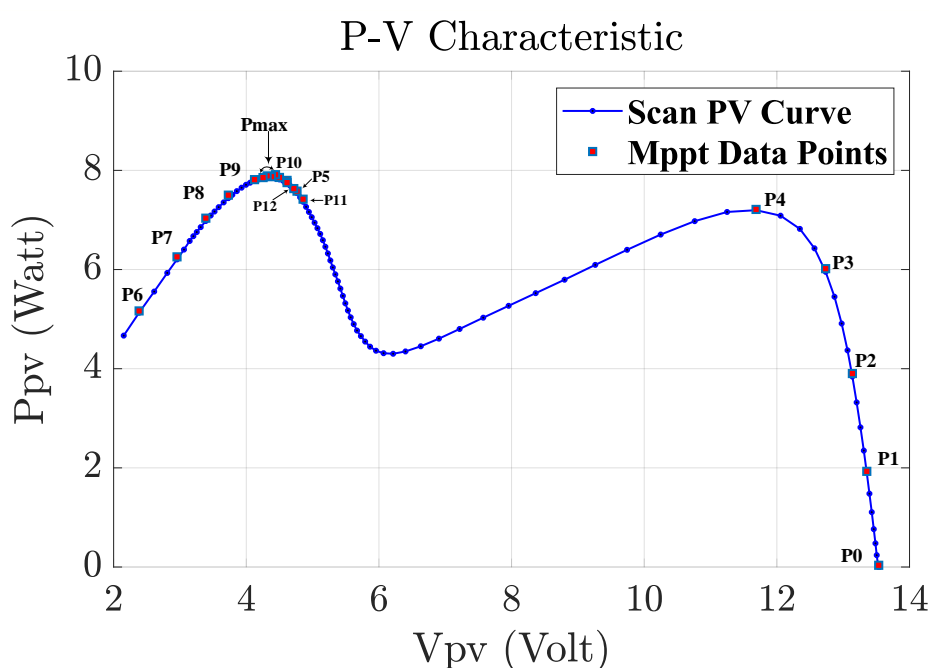


Σχήμα 5.9: Αριστερά: PWM σήμα και ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα, Δεξιά: PWM σήμα και το σήμα ελέγχου Start που μεταβαίνει σε υψηλή στάθμη όταν ξεκινάει η διαδικασία του MPPT και έπειτα μεταβαίνει σε χαμηλή στάθμη με την ολοκλήρωση της διαδικασίας MPPT.

5.3 Τρίτο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Στη τρίτη σειρά πειραμάτων, η επίδραση της μερικής σκίασης στην φωτοβολταϊκή συστοιχία είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση του ολικού μεγίστου στα αριστερά της χαρακτηριστικής ισχύος-τάσης. Όπως και προηγουμένως, οι χαρακτηριστικές της φωτοβολταϊκής συστοιχίας μετρήθηκαν με τη συνεχόμενη μεταβολή της διάρκειας αγωγής κατά 1.5% μέχρι αυτή να φτάσει στο 90%.

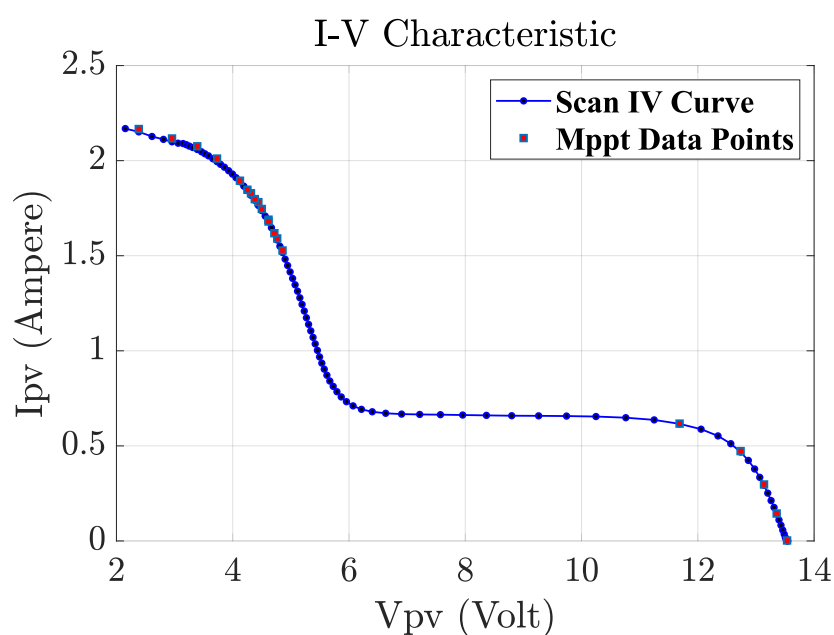
- Επίπεδα ακτινοβολίας $G1=600 \text{ W/m}^2$, $G2=225 \text{ W/m}^2$ και θερμοκρασία περιβάλλοντος $T = 18^\circ\text{C}$.



Σχήμα 5.10: Χαρακτηριστική P-V Μοτίβου 3 με την φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση της μερικής σκίασης συστοιχίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του ολικού μεγίστου σημείου ισχύος.

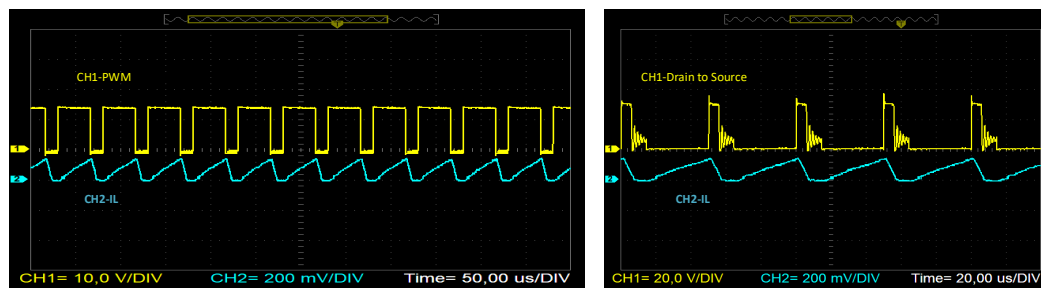
Η φωτοβολταϊκή συστοιχία βρίσκεται και σε αυτήν την περίπτωση υπό την επίδραση του φαινομένου της μερικής σκίασης, καθώς η χαρακτηριστική εμφανίζει δυο τοπικά μέγιστα με αυτό στα αριστερά της καμπύλης να αποτελεί το ολικό μέγιστο της συστοιχίας. Η διαδικασία ανίχνευσης ξεκινά από το σημείο P0 και μετά από μεταβολή της παραμέτρου του σήματος ελέγχου V_c , ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης απορροφά σε κάθε βήμα του αλγορίθμου ελέγχου μια μεγαλύτερη σταθερή τιμή ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας να μεταβαίνει σταδιακά από το σημείο P0 στο σημείο ισχύος P5.

Έπειτα, με μια επόμενη μεταβολή της παραμέτρου του σήματος V_c , ο αλγόριθμος “όδηγεί” τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης να απορροφήσει στην είσοδό του μια μεγαλύτερη τιμή ισχύος, την οποία όμως η φωτοβολταϊκή συστοιχία δεν μπορεί να την τροφοδοτήσει. Έτσι, το σημείο λειτουργίας μεταβαίνει στο σημείο ισχύος P6. Στο βήμα αυτό, ο αλγόριθμος ελέγχου μεταβαίνει στη δεύτερη φάση λειτουργίας με αποτέλεσμα να μεταβάλει την διάρκεια αγωγής μέχρι η τάση λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας να μεταβεί σε αυτό του σημείου P5. Ωστόσο, το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας καταλήγει σε ένα σημείο ισχύος P11, στο οποίο η τάση της συστοιχίας είναι μεγαλύτερη από αυτή του P5. Στο σημείο αυτό ο αλγόριθμος ελέγχου περνά στην τρίτη φάση λειτουργίας εκτελώντας την μέθοδο P&O, όπου με σταδιακές μεταβολές της διάρκειας αγωγής ο αλγόριθμος καταλήγει να συγκλίνει κοντά στο ολικό μέγιστο σημείο ισχύος. Από το Σχήμα 5.10, παρατηρούμε ότι με την μετάβαση από το σημείο P4 στο P5, ο αλγόριθμος ελέγχου επιτυγχάνει να παραλείψει μεγάλο τμήμα της χαρακτηριστικής ισχύος-τάσης. Έτσι, ο αλγόριθμος εξασφαλίζει σύγκλιση στο ολικό μέγιστο σημείο ισχύος σε λιγότερα βήματα σε σχέση με την διαδικασία ανίχνευσης του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος μέσω διαδοχικών μεταβολών της διάρκειας αγωγής.

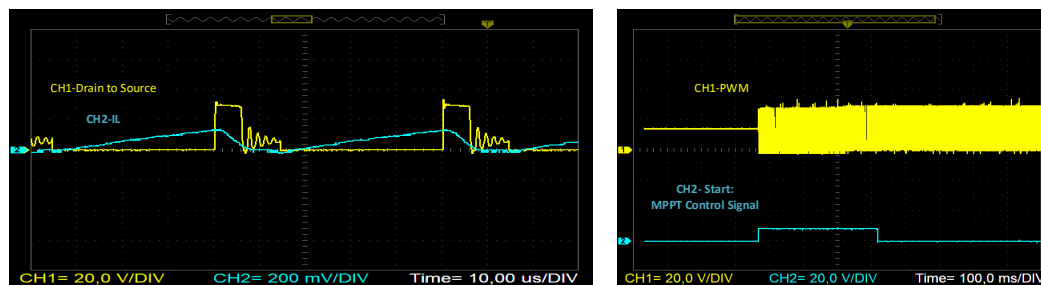


Σχήμα 5.11: Χαρακτηριστική I-V Μοτίβου 3 με την φωτοβολταϊκή συστοιχία υπό την επίδραση της μερικής σκίασης συστοιχίας και τα σημεία λειτουργίας κατά την ανίχνευση του ολικού μέγιστου σημείου ισχύος.

Στο Σχήμα 5.12, απεικονίζονται σε χρονική αντιστοιχία οι κυματομορφές του PWM σήματος, που οδηγεί το MOSFET του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, με το ρεύμα του πηνίου. Στα δεξιά του σχήματος, απεικονίζονται σε χρονική αντιστοιχία, η τάση μεταξύ Drain-Source του MOSFET με το ρεύμα του πηνίου. Στη περίπτωση αυτή, παρατηρούμε μεγαλύτερη διάρκεια αγωγής σε σχέση με τη περίπτωση του δεύτερου μοτίβου ακτινοβολίας. Αυτή η διαφορά ωφελείται στη σύγκλιση του φωτοβολταϊκού συστήματος στο ολικό μέγιστο ισχύος, το οποίο για το τρίτο μοτίβο προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας βρίσκεται στα αριστερά της χαρακτηριστικής ισχύος-τάσης. Τέλος, παρατηρούμε και σε αυτήν την περίπτωση, ότι ο μετατροπέας λειτουργεί σε ασυνεχή αγωγή και αυτό διότι το ρεύμα του πηνίου μηδενίζεται πριν την περίοδο μετάβασης.



Σχήμα 5.12: Αριστερά: PWM σήμα και ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, Δεξιά: Τάση Drain-Source του MOSFET και ρεύμα του πηνίου.



Σχήμα 5.13: Αριστερά: PWM σήμα και ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα, Δεξιά: PWM σήμα και το σήμα ελέγχου Start που μεταβαίνει σε υψηλή στάθμη, όταν ξεκινάει η διαδικασία του MPPT και έπειτα μεταβαίνει σε χαμηλή στάθμη με την ολοκλήρωση της διαδικασίας MPPT.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία συνδέεται απευθείας με το φορτίο, δεν εξασφαλίζεται η βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι, το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας του συστήματος, μπορεί να μεταβληθεί τόσο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες όσο και από την μεταβολή του φορτίου. Έτσι, μεταξύ της συστοιχίας και του φορτίου παρεμβάλλεται ένας μετατροπέας DC-DC, όπου μεταβάλλοντας κατάλληλα τη διάρκεια αγωγής του διακοπτικού του στοιχείου (MOSFETs, IGBTs κλπ), μπορεί και μεταβάλλεται το σημείο λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Για τον λόγο αυτό, στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι απαραίτητη και η ύπαρξη μίας μονάδας ελέγχου, που θα μπορεί να μεταβάλλει κατάλληλα την διάρκεια αγωγής, μετατοπίζοντας το σημείο λειτουργίας της συστοιχίας στο μέγιστο σημείο ισχύος (MPP). Ο έλεγχος αυτός εξασφαλίζει την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος ανεξάρτητα από την μεταβολή του φορτίου και των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στο ευρύτερο περιβάλλον.

Η μονάδα ελέγχου σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα σύστημα μετρήσεων καθώς και από ενσωματωμένα συστήματα (microcontrollers, FPGAs, ASICs κλπ) ή και από συνδυασμό αναλογικών και ψηφιακών κυκλωμάτων. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ένα κλειστό κύκλωμα αυτομάτου ελέγχου, όπου με τους κατάλληλους αλγορίθμους ανίχνευσης μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT), μπορεί και εξασφαλίζεται η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος.

Το φαινόμενο της μερικής σκίασης φωτοβολταϊκών συστοιχιών οδηγεί σε απώλειες ισχύος. Ένα κατάλληλα σχεδιασμένο ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου μπορεί να εξασφαλίσει την μείωση των απωλειών και κατ'επέκταση την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου που στόχο έχει να εξασφαλίσει την βέλτιστη ρύθμιση παραγωγής ισχύος από φωτοβολταϊκές συστοιχίες. Το σύστημα αποτελείται από ένα μετατροπέα ανύψωσης τάσης, ένα σύστημα μετρήσεων, την μονάδα ελέγχου που βασίζεται στην χρήση μίας FPGA, καθώς και δύο μπαταρίες μολύβδου, σε σειρά συνδεδεμένες, που αποτελούν το φορτίο του συστήματος.

Τμήμα της σχεδίασης του συστήματος αποτελούσε και η ανάπτυξη της διαδικασίας ανίχνευσης του μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT). Αυτή βασίστηκε στη λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, όπου μετά από μαθηματική ανάλυση, αποδείχθηκε ότι ο μετατροπέας θα πρέπει να λειτουργεί συνεχώς σε ασυνεχή αγωγή ρεύματος (DCM). Από την ανάλυση, προέκυψε ένα σήμα ελέγχου- V_c , το οποίο μπορεί να συγκριθεί σε κάθε διακοπτική περίοδο με το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και να παράξει ένα σήμα PWM. Με τον τρόπο αυτό, ο μετατροπέας οδηγείται στο να συμπεριφέρεται ως ένα ρυθμιζόμενο φορτίο που απορροφά σταθερή και προγραμματιζόμενη ισχύ στην είσοδό του. Η μεταβολή της διάρκειας αγωγής του PWM σήματος εξαρτάται από την μεταβολή της παραμέτρου του σήματος ελέγχου- V_c , όπου μία αύξησή της συνεπάγεται και μια μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος από την φωτοβολταϊκής συστοιχία στην είσοδο του μετατροπέα.

Ο αλγόριθμος ελέγχου αρχικά προσομοιώθηκε σε MATLAB και SIMULINK, όπου επιβεβαιώθηκε η σωστή λειτουργία της μεθόδου, εξασφαλίζοντας σύγκλιση στο ολικό μέγιστο σημείο ισχύος σε συνθήκες μερικής σκίασης. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος ελέγχου αναπτύχθηκε σε γλώσσα περιγραφής υλικού VHDL, όπου σε συνεργασία με το μοντέλο σε SIMULINK και του προσομοιωτή γλώσσας υλικού Modelsim HDL Simulator, επιβεβαιώθηκε η σωστή λειτουργία της διαδικασίας ανίχνευσης. Η επιβεβαίωση αφορούσε την εξασφάλιση σύγκλισης στο ολικό μέγιστο σημείο ισχύος ανεξάρτητα από τα μοτίβα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και μερικής σκίασης.

Μετά την επιβεβαίωση της λειτουργικότητας του αλγορίθμου ελέγχου σε επίπεδο προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση και η υλοποίηση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, καθώς και του συστήματος μετρήσεων που τροφοδοτούσε σε κάθε βήμα ανίχνευσης τις μετρήσεις στην FPGA.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων τοποθετώντας το σύστημα που υλοποιήθηκε σε εξωτερικό χώρο και υπό την επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, το σύστημα εξασφαλίζει σύγκλιση στο ολικό μέγιστο σημείο ισχύος.

Βιβλιογραφία

- [1] Xuan Hieu Nguyen and Minh Phuong Nguyen, ‘Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink,’ *Environmental Systems Research*, vol. 4, no. 24, 2015 .
- [2] D.K.Sharma and G. Purohit, ‘Analysis of the effect of fill factor on the efficiency of solar PV system. for Improved Design of MPPT,’ *6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto, Japan*, 2014.
- [3] Djalab, A., Bessous, N., Rezaoui, M. M., and Merzouk, ‘Study of the Effects of Partial Shading on PV Array,’ *International Conference on Communications and Electrical Engineering (ICCEE)*, pp. 1-5, 2018.
- [4] Ned Mohan and Tore M. Undeland and William P. Robbins, *Power Electronics. Converters, Applications and Design, 3rd edition.* John Wiley and Sons, Inc, 2003.
- [5] Kahla, Sami and Bechouat, Mohcene and Amieur, Toufik and Feraga, Chams-Eddine and Sedraoui, Moussa, ‘A Comparison Study: Direct and Indirect Mode Control of Perturb and Observe-MPPT Algorithms for Photovoltaic System,’ *In 2019 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications (ICSRESA)*, pp. 1-6, 2019.
- [6] Trishan Eswam and Patrick L. Chapman, ‘Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,’ *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, June 2007.
- [7] Eftichios Koutroulis and Frede Blaabjerg, ‘A New Technique for Tracking the Global Maximum Power Point of PV Arrays Operating Under Partial-Shading Conditions,’ *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 2, no. 2, pp. 184-190, April 2012.
- [8] Altera-now part of Intel, ‘MAX 10 FPGA Development Kit User Guide,’ <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/ug/ug-max10m50-fpga-dev-kit.pdf>, [Online; Version 2015.06.26].
- [9] ‘Analog to Digital Converter User Guide,’ https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/max-10/ug_m10_adc.pdf, [Online; Version 20.1].

- [10] ‘LM358 Datasheet,’ <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>.
- [11] ‘ACS712 Datasheet,’ <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/168326/ALLEGRO/ACS712.html>.
- [12] ‘OPA2340 Datasheet,’ <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/56770/BURR-BROWN/OPA2340.html>.
- [13] ‘ACS733 Datasheet,’ <http://www.datasheet-pdf.com/PDF/ACS733-Datasheet-Allegro-1370824>.
- [14] ‘FPGA Data Capture,’ <https://nl.mathworks.com/help/supportpkg/xilinxfpgaboard/fpga-data-capture.html>.
- [15] ‘KIMO SL 100,’ <http://www.kimo.it/wp-content/uploads/2016/11/m17113.pdf>.