



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

Κατασκευή DC μικροδικτύου σε περιβάλλον Matlab/Simulink και μελέτη τεχνικών ελέγχου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πετράκη Αικατερίνη

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2015



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

Κατασκευή DC μικροδικτύου σε περιβάλλον Matlab/Simulink και μελέτη τεχνικών ελέγχου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πετράκη Αικατερίνη

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2015.

.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Παπαθανασίου Σταύρος
Αναπ.Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γεωργιλάκης Παύλος
Επικ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2015

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

Copyright © Αικατερίνη Πετράκη, 2015

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Ευχαριστώ εκ βαθέων το διδάκτωρ κ. Βασίλη Κλεφτάκη για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και για τις πολύτιμες υποδείξεις και συμβουλές του. Ο χρόνος και οι γνώσεις που μου προσέφερε αποτέλεσαν καθοριστικά στοιχεία για την περάτωση αυτής της εργασίας. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω και την υπόλοιπη ομάδα του εργαστηρίου για τη γενικότερη βοήθεια τους και το ευχάριστο κλίμα που μου προσέφεραν. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, η οποία με στήριξε και με ενθάρρυνε καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάλυση ενός μικροδικτύου συνεχούς τάσης και των διεσπαρμένων πηγών που το αποτελούν. Παρουσιάζεται η μοντελοποίηση ενός μικροδικτύου, με φωτοβολταϊκή μονάδα και συσσωρευτή, καθώς και ηλεκτρονικούς μετατροπείς. Η διαδικασία της μοντελοποίησης γίνεται σταδιακά, αφού πρώτα εξετάζεται ο έλεγχος για τη λειτουργία της κάθε πηγής.

Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αναπτύσσεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εκτενής αναφορά στη Διεσπαρμένη παραγωγή, στο λόγο εμφάνισής της, στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της και παρουσιάζονται συνοπτικά οι τεχνολογίες της διεσπαρμένης παραγωγής που υπάρχουν σήμερα διαθέσιμες.

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται η έννοια του μικροδικτύου και δίνεται περισσότερη έμφαση στο μικροδίκτυο συνεχούς τάσης (DC) και στον έλεγχο του DC μικροδικτύου.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια μικρή εισαγωγή στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος και στα διάφορα είδη τους και παρουσιάζεται εκτενέστερα το μοντέλο του μετατροπέα ανύψωσης (boost converter) και του αμφίδρομου (bidirectional). Επίσης, περιγράφεται η τεχνική εύρους παλμών και ο αναλογικός ολοκληρωτικός ελεγκτής που χρειάζεται για τη σωστή λειτουργία και ρύθμιση του διακοπτικού στοιχείου του μετατροπέα. Τέλος, εφαρμόζεται μία προσομοίωση πάνω στη λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αναλυτικές πληροφορίες για τα φωτοβολταϊκά, που είναι μια τεχνολογία διεσπαρμένης παραγωγής, όπως οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την φωτοβολταϊκή ενέργεια και απόδοση, καθώς και τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα τους. Προβάλλεται επιπλέον, το φωτοβολταϊκό μοντέλο της διάταξης της προσομοίωσης, καθώς και γίνονται τέσσερις προσομοιώσεις πάνω σ' αυτό.

Στο Κεφάλαιο 5 αναφέρονται οι συσσωρευτές, που είναι και αυτοί τεχνολογίες αποθήκευσης διεσπαρμένης παραγωγής. Αριθμούνται τα βασικά χαρακτηριστικά και τα είδη των μπαταριών, καθώς και παρατίθενται πληροφορίες για τις μπαταρίες μολύβδου οξέος, τη μπαταρία της διάταξης. Τέλος, γίνονται τρεις προσομοιώσεις στο μοντέλο της μπαταρίας με τον αμφίδρομο μετατροπέα.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται δύο σενάρια πάνω στο DC μικροδίκτυο με το συνδυασμό όλων των παραπάνω.

Στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα από την εργασία.

Λέξεις Κλειδιά: μικροδίκτυο συνεχούς τάσης, διεσπαρμένη παραγωγή, φωτοβολταϊκό, συσσωρευτής, ηλεκτρονικοί μετατροπείς συνεχούς τάσης, μετατροπέας ανύψωσης, αμφίδρομος μετατροπέας, έλεγχος τάσης, έλεγχος ισχύος, καμπύλες στατισμού , Matlab /Simulink

ABSTRACT

The target of this thesis is the analysis of a DC microgrid and the distributed sources that comprise it. Modeling of a microgrid occurs, with photovoltaic module and battery system and DC/DC electronic converters. The process of modeling is done gradually, after first examining the control for the operation of each source.

More specifically, the project develops as follows:

In Chapter 1 takes place an extensive reference to distributed generation, the reason of its appearance, the advantages and disadvantages and summarizes the distributed generation technologies that are currently available.

In Chapter 2 the project analyses the microgrid concept and placed more emphasis on DC micro grid and the control of this DC micro grid.

In Chapter 3 is a small introduction to electronic power converters and their various kinds and presents, at greater length, boost and bidirectional converters. Also is described the technical range of pulses and the proportional integral controller needed for proper operation and adjustment of the converters switches. Finally, a simulation is applied onto the operation of the boost converter.

In Chapter 4 is presented detailed information about photovoltaics, a distributed generation technology, as well as the main factors influencing the photovoltaic energy and efficiency and also their advantages and disadvantages. Moreover is displayed the photovoltaic model of the layout of the simulation and also made four more simulations on it.

In Chapter 5 are indicated the batteries, which are also distributed generation storage technology. Are numbered basic features and species of batteries, as well as information for lead acid batteries, the battery of this layout. Finally, there are three battery model simulations with the bidirectional converter.

In Chapter 6 is presented two scenarios on the DC microgrid with the combination of all the above.

In Chapter 7 is presented the conclusions of the project.

Keywords: DC microgrids, distributed generation, photovoltaic, battery system, DC/DC converter, boost converter, bidirectional converter, voltage control, power control, droop curves, Matlab/Simulink

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1	13
Διесπαρμένη παραγωγή	13
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ	13
1.2 ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙЕСΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	14
1.3 ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΔΙЕСΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	16
1.4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΤΩΝ ΔΙЕСΠΑΡΜΕΝΩΝ ΠΗΓΩΝ	17
1.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ DER.....	23
1.6 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΦΕΡΕΙ Η ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ DER	24
1.7 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗΣ ΔΙЕСΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΗΓΗΣ.....	25
Κεφάλαιο 2	29
Μικροδίκτυα	29
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΟΡΙΣΜΟΣ.....	29
2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ	32
2.3 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ	33
2.4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ AC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ	34
2.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ.....	35
2.6 ΚΥΡΙΟΣ ΛΟΓΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΩΝ DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ	36
2.7 AC ΕΝΑΝΤΙΟΝ DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ	37
2.8 DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ	40
2.8.1 Πλεονεκτήματα Dc Μικροδικτύων	40
2.8.2 Μειονεκτήματα DC μικροδικτύων.....	41
2.9 ΈΛΕΓΧΟΣ ΣΤΑ DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ.....	41
2.9.1 Ιεραρχικός έλεγχος στα DC Μικροδίκτυα.....	42
Κεφάλαιο 3	48
Μετατροπείς συνεχούς τάσης	48
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ	48
3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	49
3.3 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ... ..	49
3.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ DC-DC	51
3.4.1 Μέθοδος Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM)	51
3.5 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ	56
3.5.1 Μοντελοποίηση μετατροπέα ανύψωσης.....	56
3.5.2 Μοντελοποίηση αμφίδρομου μετατροπέα ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης	64
3.6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ..	67
3.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 1 ^Η ΣΤΟ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ.	72
Κεφάλαιο 4	75

Φωτοβολταϊκά Συστήματα	75
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	75
4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	75
4.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ.....	77
4.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ.....	79
4.5.1 Εισαγωγή στο φωτοβολταϊκό μοντέλο	82
4.5.2 Υπολογισμός και καθορισμός τιμών του μοντέλου	85
4.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	88
4.6.1 Εξέταση των δύο κυριότερων παραγόντων που επιδρούν στην καμπύλη I-V και P-V	89
4.6.2 Έλεγχος των θεωρητικών τιμών (<i>V_{min}</i> , <i>V_{nom}</i> , <i>V_{max}</i>) από τον τύπο σχέση τάσης εισόδου εξόδου και <i>D</i> με αυτές της προσομοίωσης.....	96
4.6.3 Έλεγχος με σταθερό <i>P</i> (<i>P_{command}</i>).....	98
4.6.4 Έλεγχος με την καμπύλη <i>d_{roop}</i>	102
Κεφάλαιο 5.....	106
Μπαταρίες-Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές.....	106
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	106
5.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	107
5.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ- ΟΡΟΛΟΓΙΑ	108
5.4 ΤΥΠΟΙ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ	110
5.5 ΕΙΔΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΓΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	112
5.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	114
5.7 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΜΦΙΔΡΟΜΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	115
5.8 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	119
5.8.1 Έλεγχος φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας με σταθερή ισχύ	119
5.8.2 Έλεγχος τάσης στον αμφίδρομο μετατροπέα	125
Κεφάλαιο 6.....	131
Προσομοίωση DC μικροδικτύου	131
6.1 ΓΕΝΙΚΑ	131
6.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο : ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΔΙΚΤΥΟ	132
6.3 ΣΕΝΑΡΙΟ 2 ^ο : ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΠΟΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	135
Κεφάλαιο 7.....	139
Συμπεράσματα	139
7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	139
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	140

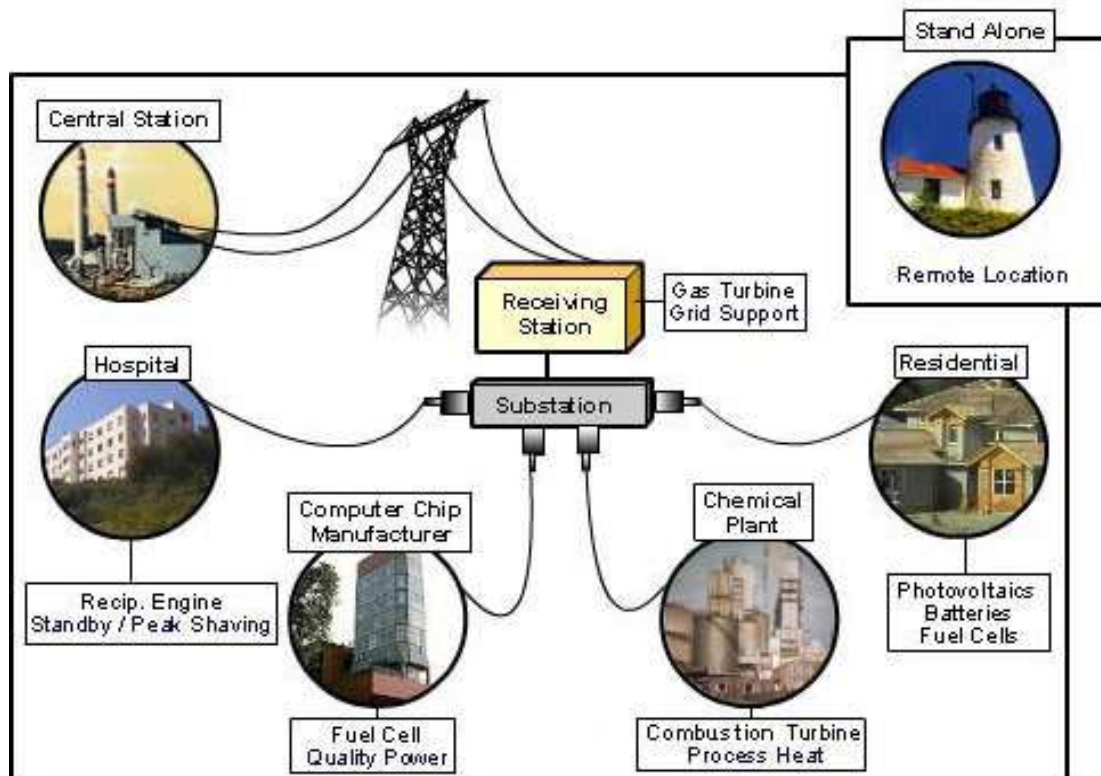
Κεφάλαιο 1

Διесπαρμένη παραγωγή

1.1 Ορισμός

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και οι επιπτώσεις των ελλείψεων αυτής της μορφής ενέργειας, τα ποιοτικά προβλήματα ισχύος και η εκτίναξη των τιμών της, έχουν στρέψει πολλούς πελάτες στην αναζήτηση άλλων πηγών υψηλής ποιότητας και αξιόπιστης ηλεκτρικής ενέργειας. Η διесπαρμένη παραγωγή (στα αγγλικά γνωστή με ως Distributed Energy Resource-DER), δηλαδή μικρής κλίμακας πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται κοντά στο σημείο όπου χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια (πχ ένα σπίτι ή επιχείρηση), παρέχει μια εναλλακτική λύση ή μια ενίσχυση του κεντρικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διесπαρμένη παραγωγή είναι μια γρηγορότερη, λιγότερο ακριβή επιλογή στην κατασκευή των μεγάλων, κεντρικών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας και των υψηλής τάσεων γραμμών μετάδοσης. Προσφέρει στους καταναλωτές τη δυνατότητα για το χαμηλότερο κόστος, την υψηλότερη αξιοπιστία υπηρεσιών, την ποιότητα υψηλής δύναμης, την αυξανόμενη ενεργειακή αποδοτικότητα και την ενεργειακή ανεξαρτησία. Η χρήση των ανανεώσιμων διανεμημένων τεχνολογιών ενεργειακής παραγωγής και της «πράσινης ισχύος», όπως ο αέρας, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία, η βιομάζα, ή η υδροηλεκτρική ενέργεια μπορεί επίσης να παρέχει ένα σημαντικό περιβαλλοντικό όφελος [1].



Σχήμα 1.1 Τύποι Διεσπαρμένης Παραγωγής (DER) και Τεχνολογίες [1]

Η διεσπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1kW μέχρι 100MW και είναι μία σχετικά καινούρια τάση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, όταν αναφερόμαστε στη διεσπαρμένη παραγωγή εννοούμε ότι μονάδες παραγωγής ενέργειας έχουν εγκατασταθεί κοντά στο σημείο κατανάλωσης (φορτίο).

1.2 Εμφάνιση της διεσπαρμένης παραγωγής

Η ιδέα της διεσπαρμένης παραγωγής δεν εμφανίστηκε τώρα. Στις αρχές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η διεσπαρμένη παραγωγή ήταν ο κανόνας και όχι η εξαίρεση. Οι πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος είχαν τη δυνατότητα να παρέχουν ενέργεια μόνο σε καταναλωτές στην γειτονική τους περιοχή. Αρχικά, τα πρώτα δίκτυα ήταν βασισμένα σε DC τάση και έτσι η παροχή της τάσης ήταν περιορισμένη, όπως περιορισμένη ήταν και η

απόσταση ανάμεσα στον παραγωγό και τον καταναλωτή. Η ζήτηση ενέργειας που υπήρχε ορισμένες φορές καλυπτόταν με τη χρήση τοπικών μέσων αποθήκευσης, όπως μπαταρίες, που μπορούσαν να συνδεθούν κατευθείαν στο δίκτυο DC. Μάλιστα αυτή η μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας είναι και κάτι άλλο, εκτός από τη διεσπαρμένη παραγωγή, το οποίο επανέρχεται στο προσκήνιο. Στη συνέχεια, η ανάπτυξη και η εξέλιξη της τεχνολογίας, όπως η εμφάνιση των AC δικτύων, επέτρεψε τη μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις και η εφαρμογή οικονομιών κλίμακας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησαν σε μία μεγάλη αύξηση της ισχύος εξόδου, στις μονάδες παραγωγής.

Όλα αυτά είχαν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερες ανέσεις και μικρότερα κόστη, ενώ κατασκευάστηκαν μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα, αποτελούμενα από τεράστια δίκτυα μεταφοράς και διανομής αλλά και πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις. Η ασφάλεια της παροχής γινόταν όλο και μεγαλύτερη καθώς ενδεχόμενη αποτυχία ενός σταθμού παραγωγής, ισοσταθμιζόταν από τις υπόλοιπες εγκαταστάσεις του δικτύου. Την τελευταία δεκαετία, οι τεχνολογικές καινοτομίες και μαζί και με το μεταβαλλόμενο και ρυθμιστικό οικονομικό περιβάλλον, είχαν σαν αποτέλεσμα να ανανεωθεί το ενδιαφέρον για τη διεσπαρμένη παραγωγή.

Συνοπτικά οι λόγοι Ανάπτυξης Διεσπαρμένης Παραγωγής είναι οι ακόλουθοι:

- Αυξημένη ανάπτυξη στις τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής
- Μεγάλοι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς
- Αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια
- Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ανησυχίες για τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές και
- Μείωση των εκπομπών αερίων στο διάστημα 2008-2012 κατά 5.2% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 (όπως προβλέπεται μέσω του πρωτόκολλου του Κιότο)

Επίσης, όπως αναφέρθηκε, τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί πολύ μεγάλο ενδιαφέρον γύρω από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές, όπως θα δούμε και παρακάτω αποτελούν γενικά και συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής, αν και υπάρχουν εξαιρέσεις, όπως είναι τα υδροηλεκτρικά μεγάλης κλίμακας και τα παράκτια αιολικά πάρκα. Εκτός όμως από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στη διεσπαρμένη παραγωγή εντάσσονται και άλλες τεχνολογίες, που η λειτουργία τους

βασίζεται και στη χρήση ορυκτών καυσίμων [2]. Οι τεχνολογίες αυτές θα αναλυθούν σε άλλο υποκεφάλαιο.

1.3 Σύνδεση τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες αρκετές εφαρμογές διεσπαρμένης παραγωγής συνδέθηκαν στο ελληνικό δίκτυο διανομής, κυρίως στο δίκτυο μέσης τάσης (15 ή 20kV), όπως επίσης και στο δίκτυο χαμηλής τάσης (230/400V). Η πλειοψηφία αυτών των εγκαταστάσεων είναι αιολικά πάρκα ή ανεξάρτητες ανεμογεννήτριες και μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί. Υπάρχουν επίσης μερικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από βιοκαύσιμα, καθώς επίσης και μικρές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στο δίκτυο χαμηλής τάσης.

Η λειτουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου ελέγχεται από συσκευές προστασίας και ρύθμισης της τάσης, που έχουν σκοπό την παροχή, προς τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, αποδεκτής ποιότητας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των σφαλμάτων και προσφέροντας υψηλό επίπεδο ασφάλειας.

Η σύνδεση στο δίκτυο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής πρέπει να συμβαδίζει με αυτές τις γενικές αρχές, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών. Ο στόχος είναι η διασφάλιση της ομαλής συνεργασίας των εγκαταστάσεων με το δίκτυο, η ασφάλεια προσώπων και εγκαταστάσεων και η εξασφάλιση αποδεκτής ποιότητας ισχύος.

Η ποιότητα ισχύος αφορά ένα μεγάλο αριθμό ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων και διαταραχών που εμφανίζονται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αν και αποτελεί καινούριο όρο, η ποιότητα ισχύος καλύπτει φαινόμενα ήδη γνωστά τα οποία όμως αποκτούν διαφορετική και μεγαλύτερη σημασία στα μοντέρνα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση των ευαίσθητων σε διαταραχές φορτίων αλλά και των φορτίων που δημιουργούν διαταραχές (εκπομπές) και οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις για αξιοπιστία, καθιστούν την ποιότητα ισχύος σημαντική παράμετρο της λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος με μεγάλη οικονομική σημασία [2].

Βασικά κριτήρια και προϋποθέσεις που εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση νέων εγκαταστάσεων παραγωγής είναι τα ακόλουθα :

- Επάρκεια του δικτύου

- Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης
- Αργές μεταβολές της τάσης (μόνιμης κατάστασης)
- Ταχείες μεταβολές της τάσης
- Εκπομπές flicker

1.4 Τεχνολογίες των διεσπαρμένων πηγών

Οι τεχνολογίες DER αποτελούνται κυρίως από τα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας που, όπως αναφέρθηκε τοποθετούνται στο ή κοντά στο σημείο χρήσης. Η κατανεμημένη ενέργεια περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών, που περιλαμβάνει κυψέλες καυσίμου, μικροστρόβιλους, εμβολοφόρους κινητήρες, καθώς και άλλες τεχνολογίες διαχείρισης της ενέργειας. Επίσης διαθέτει διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και συσκευές επικοινωνίας και ελέγχου για την αποδοτική λειτουργία των ανεξάρτητων μονάδων παραγωγής και του μικροδικτύου.

Το πρωτογενές καύσιμο για πολλά συστήματα κατανεμημένης παραγωγής είναι το φυσικό αέριο, αλλά και το υδρογόνο μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο μέλλον. Τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια, ενέργεια από βιομάζα, και ανεμογεννήτριες, είναι επίσης δημοφιλής.

Εδώ θα αναλυθούν πληροφορίες σχετικά με τις τεχνολογίες DER που διατίθενται στο εμπόριο, καθώς και εκείνες που ακόμη αναπτύσσονται [1].

- Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικρές τουρμπίνες που παράγουν ισχύ μεταξύ 25 και 500 kW. Αυτές προήλθαν από τεχνολογίες που υπήρχαν σε μεγάλα φορτηγά ή στις τουρμπίνες των αεροσκαφών.



Σχήμα 1.2 Μικροτουρμπίνες 30kW [3]

- Τουρμπίνες εσωτερικής καύσης

Οι παραδοσιακές τουρμπίνες παράγουν ισχύ μεταξύ 500 kW και 25 MW για DER, και μέχρι 250 MW για κεντρική παραγωγή ισχύος. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν είναι φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή ένας συνδυασμός καυσίμων. Οι σύγχρονες τουρμπίνες έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται από 20 έως 45% στο πλήρες φορτίο.

- Μηχανές εσωτερικής καύσης

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη (5kW για εφεδρική γεννήτρια σε κατοικίες) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW). Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν διαθέσιμα καύσιμα όπως βενζίνη, φυσικό αέριο και πετρέλαιο.

- Μηχανές Stirling

Οι μηχανές Stirling έχουν κατηγοριοποιηθεί ως μηχανές εξωτερικής καύσης. Είναι σφραγισμένα συστήματα με ένα αδρανές αέριο που θέτει σε λειτουργία τη μηχανή, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Συνήθως είναι διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη (1-25 kW) και προς το παρόν παράγονται σε μικρές ποσότητες για εξειδικευμένες εφαρμογές στη διαστημική και τη θαλάσσια βιομηχανία.



Σχήμα 1.3 Μηχανή Stirling 25kW [3]

- Κυψέλες καυσίμου

Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά και αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούν μια ηλεκτροχημική διεργασία – όχι καύση – για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό.

Εκτός από την παροχή ενέργειας, μπορούν να προσφέρουν μια πηγή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου και του νερού ή για ψύξη απορρόφησης. Σε κάποιες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου μειώνουν το κόστος για τις υπηρεσίες ηλεκτρισμού 20 με 40%.



Σχήμα 1.4 Κυψέλη καυσίμων [3]

- Αποθήκευση ενέργειας / Συστήματα UPS

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας δεν παράγουν καθαρή ενέργεια, αλλά μπορούν να προμηθεύουν ηλεκτρική ενέργεια για μικρά χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση πτώσεων τάσης, flicker και έντονης κυμάτωσης που συμβαίνουν όταν η εταιρία παροχής ή οι πελάτες αλλάζουν προμηθευτές ή φορτία. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως Συστήματα Αδιάλειπτου Τροφοδοσίας (UPS). Με τέτοια μορφή, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής. Στις τεχνολογίες αποθήκευσης ανήκουν οι μπαταρίες, οι οποίες θα αναλυθούν λεπτομερώς σε άλλο κεφάλαιο.

- Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά κελιά (PV), ή αλλιώς ηλιακά κελιά, μετατρέπουν απευθείας το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεντρώνονται σε επίπεδα πάνελ τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε ταράτσες ή άλλες ηλιόλουστες περιοχές. Παράγουν ηλεκτρισμό χωρίς να έχουν κινούμενα μέρη, λειτουργούν

αθόρυβα και χωρίς εκπομπές. Τα φωτοβολταϊκά θα αναλυθούν λεπτομερώς σε άλλο κεφάλαιο.



Σχήμα 1.5 Τυπική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [3]

- Αιολικά συστήματα

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν τον άνεμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια τουρμπίνα με πτερωτές τοποθετείται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο πύργος είναι ψηλός ούτως ώστε να εκμεταλλευόμαστε τη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, απαλλαγμένη από τις αναταράξεις που προέρχονται από τη μεσολάβηση εμποδίων όπως δέντρα, λόφοι και κτίρια. Όπως περιστρέφεται η τουρμπίνα με τον άνεμο, μια γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να ποικίλλει σε μέγεθος από λίγα kW σε οικιακές εφαρμογές έως και πάνω από 5 MW.



Σχήμα 1.6 Τυπική εγκατάσταση αιολικής παραγωγής ενέργειας [3]

- Υβριδικά συστήματα

Παραγωγοί και κατασκευαστές τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής αναζητούν τρόπους να συνδυάσουν τεχνολογίες για να βελτιώσουν τις επιδόσεις και την απόδοση του εξοπλισμού αυτού του είδους παραγωγής. Κάποια παραδείγματα υβριδικών συστημάτων είναι :

- Μηχανή Stirling συνδυασμένη με ηλιακά κελιά.
- Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου συνδυασμένη με μια τουρμπίνα αερίου ή μικροτουρμπίνα.
- Ανεμογεννήτριες με μπαταρία αποθήκευσης και εφεδρικές γεννήτριες πετρελαίου.

1.5 Πλεονεκτήματα που προσφέρει η εγκατάσταση DER

Όσον αφορά το περιβάλλον της ελεύθερης αγοράς, η προσαρμοστικότητα της Διεσπαρμένης παραγωγής επιτρέπει στους μετέχοντες σε αυτήν, να ανταποκρίνονται στις συνεχώς μεταβλητές καταστάσεις, κυρίως λόγω του μικρού μέγεθός της, συγκριτικά με τις μεγάλες κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής [4].

Αναλυτικά, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η Διεσπαρμένη παραγωγή, είναι:

- Καλύπτει μία ευρεία γκάμα τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων τεχνολογιών που παρέχουν ισχύ μικρής κλίμακας, σε τοποθεσία κοντά στους χρήστες. Όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- Οδηγεί σε ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταφοράς, κοντά στην τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιείται, όπως επίσης και του κόστους μεταφοράς, που αποτελεί ένα σημαντικό μέρος (πάνω από το 30%) του συνολικού κόστους του ηλεκτρισμού.
- Βοηθά επίσης στην αποσυμφόρηση των ήδη υπαρχόντων δικτύων. Επιπλέον, επιτρέπει τη χρήση της θερμικής ενέργειας σε εφαρμογές συμπαραγωγής, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος.
- Παρέχει εναλλακτικές λύσεις για αξιόπιστη και οικονομική παροχή ενέργειας σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις, όσο αυξάνεται η ζήτηση για περισσότερη και καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ. Μπορεί να εξασφαλίσει στους πελάτες ότι η παροχή είναι συνεχόμενη και αξιόπιστη, αποκαθιστώντας την ηλεκτρική ενέργεια σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, σε περιπτώσεις διακοπής της ρευματοδότησης.
- Παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές θερμικών φορτίων, μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής, καθώς επίσης και σε εκείνους που έχουν πρόσβαση σε φτηνά καύσιμα, όπως για παράδειγμα στο φυσικό αέριο. Επιπρόσθετα, προσφέρει πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής που ζούνε και μπορούν να αξιοποιήσουν τις ανανεώσιμες πηγές.
- Βοηθάει στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και σε επιβλαβείς εκπομπές όπως τα οξειδία του θείου και του αζώτου (SO_x , NO_x), με την εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος.
- Μπορούν να βρεθούν πιο εύκολα τοποθεσίες για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες διεσπαρμένες πηγές από ότι για ένα μεγάλο, κεντρικό εργοστάσιο παραγωγής ισχύος και μάλιστα οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και κυρίως πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Η έκθεση και το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνονται, και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.

- Μπορεί να επιφέρει μείωση στις εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών, αλλά και άλλων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

1.6 Μειονεκτήματα που προσφέρει η εγκατάσταση DER

Η εισαγωγή των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής ενέργειας, σε ευρεία κλίμακα, παρόλα αυτά είναι πιθανό να οδηγήσει σε αστάθεια του ενεργειακού προφίλ. Η αμφίδρομη ροή ισχύος και η σύνθετη διαχείριση ενέργειας, που απαιτεί η διεσπαρμένη παραγωγή, μπορούν να εμφανίσουν προβλήματα και να οδηγήσουν σε έντονη διακύμανση της τάσης. Επιπρόσθετα, τα πιθανά βραχυκυκλώματα και υπερφορτίσεις στο δίκτυο προέρχονται, πλέον, από πολλαπλές πηγές, κάθε μία από τις οποίες δεν μπορεί να εντοπίσει, ανεξάρτητα, τα εκάστοτε σφάλματα του δικτύου [4].

Συνοπτικά, τα μειονεκτήματα της Διασπαρμένης παραγωγής, είναι:

- Το υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής. Επιπλέον, διαφορές υπάρχουν και στα κόστη κεφαλαίου για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής που μπορούν να ποικίλλουν από 1000 €/kW έως 20000 €/kW, στις τουρμπίνες καύσης και τις κυψέλες καυσίμου αντίστοιχα.
- Η αυξανόμενη συμμετοχή της διεσπαρμένης παραγωγής στην εγκατεστημένη παραγωγή θα επιφέρει μικρότερη επιλογή μεταξύ των βασικών καυσίμων. Κάτι το οποίο θα μπορούσε να μειώσει τη διαφοροποίηση των πρωταρχικών αποθεμάτων ενέργειας. Δεδομένου ότι οι περισσότερες τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής βασίζονται πρωταρχικά στο αέριο, αναμένεται έντονα αυξημένη ζήτηση και εξάρτηση από αυτό.
- Το κόστος για την πρωταρχική παροχή καυσίμου στη διεσπαρμένη παραγωγή, προβλέπεται να είναι αρκετά μεγαλύτερο από ότι για την κεντρική παραγωγή.
- Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τα αιολικά πάρκα. Πρέπει να γίνεται μετεωρολογική πρόβλεψη, που δεν μπορεί όμως να προβλέψει ακριβώς την ποσότητα ισχύος που θα είναι δυνατό να παραχθεί. Σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών όπως είναι για παράδειγμα ο άνεμος. Έτσι υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, η διείσδυση είναι δηλαδή περιορισμένη και πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

- Καθώς η ισχύς εξόδου των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής εμφανίζει αρκετές δυσκολίες, ως προς την πρόβλεψη της, προκύπτουν επιζήμιες και δυσμενείς συνέπειες στους μετέχοντες σε αυτήν.
- Ο μεγάλος αριθμός μονάδων παραγωγής μπορεί να προκαλέσει, εκτός από τη συνήθη ροή φορτίου από τη μέση τάση στη χαμηλή, επιπλέον ροή φορτίου, από την χαμηλή τάση στο δίκτυο μέσης τάσης. Αυτή η αμφίδρομη ροή φορτίου, απαιτεί διαφορετικά μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης. Επιπλέον, η σημαντική προσαρμοστικότητα που προσφέρουν οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, προϋποθέτει καλύτερη ανάλυση και μεγαλύτερη προσοχή, όσον αφορά τη διαχείριση και λειτουργία του δικτύου.

1.7 Παράγοντες για την επιλογή κατάλληλης διεσπαρμένης πηγής

Για να επιλεγεί μια τεχνολογία για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, θα πρέπει να εξεταστούν κάποιοι σημαντικοί παράγοντες, όπως η εμπορική ετοιμότητα, τα οικονομικά, η διαθεσιμότητα, και οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις. Παρακάτω παρέχονται κάποιες πληροφορίες στην επιλογή αυτών των τεχνολογιών [5].

Εφεδρική ισχύς

Για να αποκτηθεί το πιο οικονομικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας DER όταν το κεντρικό δίκτυο είναι εκτός λειτουργίας, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί πόσο συχνά το DER θα πρέπει να ξεκινήσει και πόσες ώρες το χρόνο θα πρέπει να λειτουργήσει. Για τις εφεδρικές εφαρμογές ισχύος (εφαρμογές ισχύος σε κατάσταση αναμονής), τα καύσιμα και τα κόστη συντήρησης είναι χαμηλά επειδή οι διακοπές λειτουργίας συνήθως συμβαίνουν μόνο λίγες ώρες ανά έτος, και κατά συνέπεια τα κόστη κεφαλαίου θα πρέπει να είναι χαμηλά. Οι κινητήρες πετρελαίου είναι πιθανό να είναι η φθηνότερη επιλογή, αλλά μπορούν να παρουσιάσουν περιβαλλοντικές προκλήσεις. Οι μηχανές φυσικού αερίου και διπλών-καυσίμων μπορεί να είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον από τα πετρελαιοκίνητα οχήματα. Επιπλέον, οι μικροτουρμπίνες μπορεί να είναι μια καλή επιλογή για τις μικρές εφαρμογές (λιγότερο από 100 KW) και οι στρόβιλοι καύσης μπορεί να είναι καλοί για τις μεγαλύτερες εφαρμογές, όπου το φυσικό αέριο είναι διαθέσιμο και οι εκπομπές είναι πρόβλημα. Τα συστήματα UPS είναι καλά ταιριασμένα στις εφαρμογές όπου οι διακοπές λειτουργίας διαρκούν λιγότερο από περίπου 15 λεπτά. Οι μπαταρίες μπορούν να χειριστούν τις εφαρμογές μερικών KW για τις διακοπές λειτουργίας περίπου 1 έως 2 ωρών εκτός αν χρησιμοποιηθεί συστοιχία μπαταριών που παρέχει μεγαλύτερη αυτονομία. Οι υβριδικές τεχνολογίες, που συνδυάζουν τις τεχνολογίες παραγωγής και αποθήκευσης για τις συγκεκριμένες εφαρμογές, έχουν πολλά οφέλη και μπορούν να είναι καλύτερες εάν χρειάζεται πλεονασμός καυσίμων, καθώς παρέχουν ένα ευρύ

φάσμα στη διάρκεια των διακοπών λειτουργίας, ή ακόμα περισσότερο έχουν τις πολλαπλάσιες εφαρμογές.

Χαμηλού Κόστους Ενέργεια

Αν το καύσιμο χαμηλού κόστους είναι διαθέσιμο, ή της ηλεκτρικής ενέργειας τα ποσοστά είναι υψηλά σε κάποια περιοχή, ή και τα δύο, μπορεί κάποιος να μειώσει το λογαριασμό ρεύματος με την παραγωγή ενός μέρους ή του σύνολο της ισχύος του. Οι κινητήρες πετρελαίου, δύο καυσίμων και φυσικού αερίου, είναι λιγότερο δαπανηροί για την αγορά, αλλά οι εκπομπές και το κόστος συντήρησης θα πρέπει να εξετάζεται όταν ο αριθμός των ωρών λειτουργίας είναι υψηλή. Οι τουρμπίνες καύσης προτιμώνται για μεγαλύτερες εφαρμογές καθώς έχουν χαμηλότερο κόστος συντήρησης και πολύ χαμηλότερες εκπομπές από τις παλινδρομικές μηχανές. Οι Μικροστρόβιλοι, οι οποίοι έχουν σχετικά χαμηλότερη αποτελεσματικότητα και υψηλότερο κόστος κεφαλαίου, ίσως δεν είναι τόσο οικονομικά αποδοτικοί. Τα Φωτοβολταϊκά, αν και έχουν υψηλό κόστος, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, ειδικά αν το τοπικό δίκτυο έχει δημιουργήσει τους καθαρούς κανόνες δοσολογίας. Οι ανεμογεννήτριες είναι λιγότερο ακριβές από τις συστοιχίες φωτοβολταϊκών, αλλά δεν μπορούν να είναι επιλέξιμες για το σύστημα με καθαρούς κανόνες δοσολογίας. Ωστόσο, σε περιοχές με υψηλές μέσες ταχύτητες ανέμου, οι ανεμογεννήτριες μπορεί να προσφέρουν μια σημαντική ποσότητα ενέργειας. Τα Υβριδικά συστήματα-όπως τα φωτοβολταϊκά ή αιολικά με μπαταρίες, είναι πιο ακριβά, αλλά λειτουργούν πέρα από μια ευρύτερη σειρά των κοστών καυσίμων και των εφαρμογών από τις ενιαίες τεχνολογίες. Επιπλέον, με τη χρήση της θερμότητας που δημιουργείται από ορισμένες τεχνολογίες DER για την παραγωγή τόσο θερμότητας όσο και ηλεκτρικής ενέργειας στο χώρο μπορεί να μειωθεί το συνολικό κόστος της ενέργειας.

Αυτόνομα συστήματα

Μια πηγή μπορεί να λειτουργεί εικοσιτέσσερις ώρες το εικοσιτετράωρο και συνεχώς να ταιριάζει την παραγωγή με τη ζήτηση. Επομένως, απαιτείται υψηλή απόδοση για την ελαχιστοποίηση του κόστους των καυσίμων και των εκπομπών. Τα κόστη συντήρησης είναι επίσης ένας σοβαρός παράγοντας, και η αξιοπιστία ένας ακόμα ύψιστης σημασίας. Οι μηχανές και οι στρόβιλοι καύσης είναι συχνά οι πρώτες επιλογές από την άποψη του κόστους κεφαλαίου. Οι μηχανές και οι μικροτουρμπίνες προτιμώνται συνήθως για τις μικρότερες εφαρμογές, ενώ οι στρόβιλοι καύσης για τις μεγαλύτερες. Οι κυψέλες καυσίμου είναι ακριβότεροι στο να εγκατασταθούν αλλά και πιο επιθυμητοί από μια περιβαλλοντική άποψη. Το φωτοβολταϊκά, οι ανεμοστρόβιλοι, και τα υβριδικά συστήματα είναι ωφέλιμα σε περιοχές χωρίς επαρκείς προμήθειες ορυκτών καυσίμων ή όπου η περιβαλλοντική αδειοδότηση είναι δύσκολη, καθώς και σε εφαρμογές εκτός δικτύου όπου οι επεκτάσεις του δικτύου είναι πολύ ακριβές. Ιδιαίτερα στις απομακρυσμένες,

εκτός δικτύου, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των καυσίμων του κινητήρα είναι σημαντικό. Το κόστος για τη μεταφορά και αποθήκευση καυσίμων, σε συνδυασμό με το δυναμικό για εκχύσεις καυσίμων και μεταγενέστερη εκκαθάριση, μπορεί να κάνει τα υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πολύ πιο αποδοτικά από ότι τα ορυκτά ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.

Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ)

Μόνο οι τεχνολογίες ισχύος που παράγουν υπερβολικά μεγάλη ποσότητα θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές ΣΗΘ. Τέτοιες είναι οι κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι στρόβιλοι, οι κυψέλες καυσίμου, οι μικροστρόβιλοι, οι τουρμπίνες καύσης και η γεννήτρια καπνού. Πρόσθετος εξοπλισμός πρέπει να εγκατασταθεί για να συλλάβει τη θερμότητα και να χρησιμοποιηθεί στη δευτεροβάθμια διαδικασία. Κινητήρες και στρόβιλοι (συμπεριλαμβανομένων και ορισμένων μικροτουρμπίνων) έχουν χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές συμπαραγωγής. Κάθε τεχνολογία DER που μπορεί να παράγει την απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια εφαρμογή ΣΗΘ με μεγαλύτερη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος (λόγω της υψηλότερης αποδοτικότητας της χρησιμοποίησης των καυσίμων) και ίσως καλύτερη οικονομία.

Αιχμή φορτίου

Τα συστήματα DER μπορεί να παράγουν ενέργεια κατά την περίοδο που η αγορά ενέργειας από δίκτυο θα είναι ακριβή. Αυτά περιλαμβάνουν τις ώρες αιχμής της ζήτησης, όταν ο χρόνος χρήσης επηρεάζεται, και τις ώρες όταν δίκτυο είναι περιορισμένης παραγωγικής ικανότητας. Τα δίκτυα συχνά αξιολογούν τις χρεώσεις και τις επιβαρύνσεις της ζήτησης με βάση την υψηλότερη μέγιστη χρήση, για τους εμπορικούς πελάτες. Με χρήση των DER για όριο αιχμής θα αποφύγουμε τις δαπάνες αυτές. Το σύστημα μπορεί να τρέξει από 200 έως 2000 ώρες ανά έτος, έτσι θα πρέπει να εξετάσει την εξισορρόπηση μεταξύ εξόδων εγκατάστασης και απόδοσης, ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία DER. Οι μηχανές και τα υβριδικά συστήματα είναι πιθανό να είναι προτιμότερο για μικρές εφαρμογές σε μικρότερους χρόνους εκτέλεσης, και οι τουρμπίνες για μεγαλύτερες εφαρμογές σε μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να παρέχουν αιχμή σε εγκαταστάσεις όπου η μεγαλύτερη απαίτηση για ενέργεια συμβαίνει όταν το ηλιακό δυναμικό είναι στο υψηλότερο σημείο της έντασης του, όπως για το κλιματισμό σε εμπορικά κτίρια.

Ποιότητα ρεύματος

Κάθε τεχνολογία DER με κινητήρια μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει ειδική, υψηλής ποιότητας ισχύος σε ευαίσθητα ή κρίσιμα φορτία ώστε να αποβάλει το χρόνο διακοπής. Για μικρές εφαρμογές και σύντομες διακοπές ρεύματος, ένα UPS είναι πιθανό να είναι η πιο οικονομική επιλογή. Για διακυμάνσεις τάσης, θόρυβο, αλλά και άλλες τυχαίες ανωμαλίες P-Q, οι προτιμημένες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τις μπαταρίες και τους σφονδύλους. Μπορούν να βρίσκονται σε μία συνεχή λειτουργία, φιλτράροντας τις ανεπιθύμητες ιδιότητες του σήματος ισχύος. Προσθέτοντας υψηλότερη ποιότητα και ηλεκτρονικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να βελτιωθεί η ποιότητα ισχύος της κάθε τεχνολογίας.

Technology		Application					
		Standby Power	Low-cost Energy	Stand-alone System	Combined Heat & Power	Peak Shaving	Power Quality
Energy Generation	Diesel Engine	✓	✓	✓	✓	✓	
	Natural Gas Engine	✓	✓	✓	✓	✓	
	Dual Fuel Engine	✓	✓	✓	✓	✓	
	Microturbine	✓		✓	✓	✓	
	Combustion Turbine	✓	✓	✓	✓	✓	
	Fuel Cell		(1)	✓	✓		
	Photovoltaics		(1)	✓		✓	
	Wind Turbine		(1)	✓			
Energy Storage	Uninterruptible Power Supply (UPS)	✓					✓
	Battery System	✓					✓
	Flywheel	✓					✓
	Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)						✓
	Hybrid Systems (2)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

(1) Although fuel cells, photovoltaics, and wind turbines may not offer the lowest cost power option, their low environmental impacts greatly enhance the value of the power they provide.
(2) Hybrid systems are any combination of the technologies listed above.

Σχήμα 1.7 Πίνακας επιλογής τεχνολογίας DER για τις διάφορες εφαρμογές [5]

Κεφάλαιο 2

Μικροδίκτυα

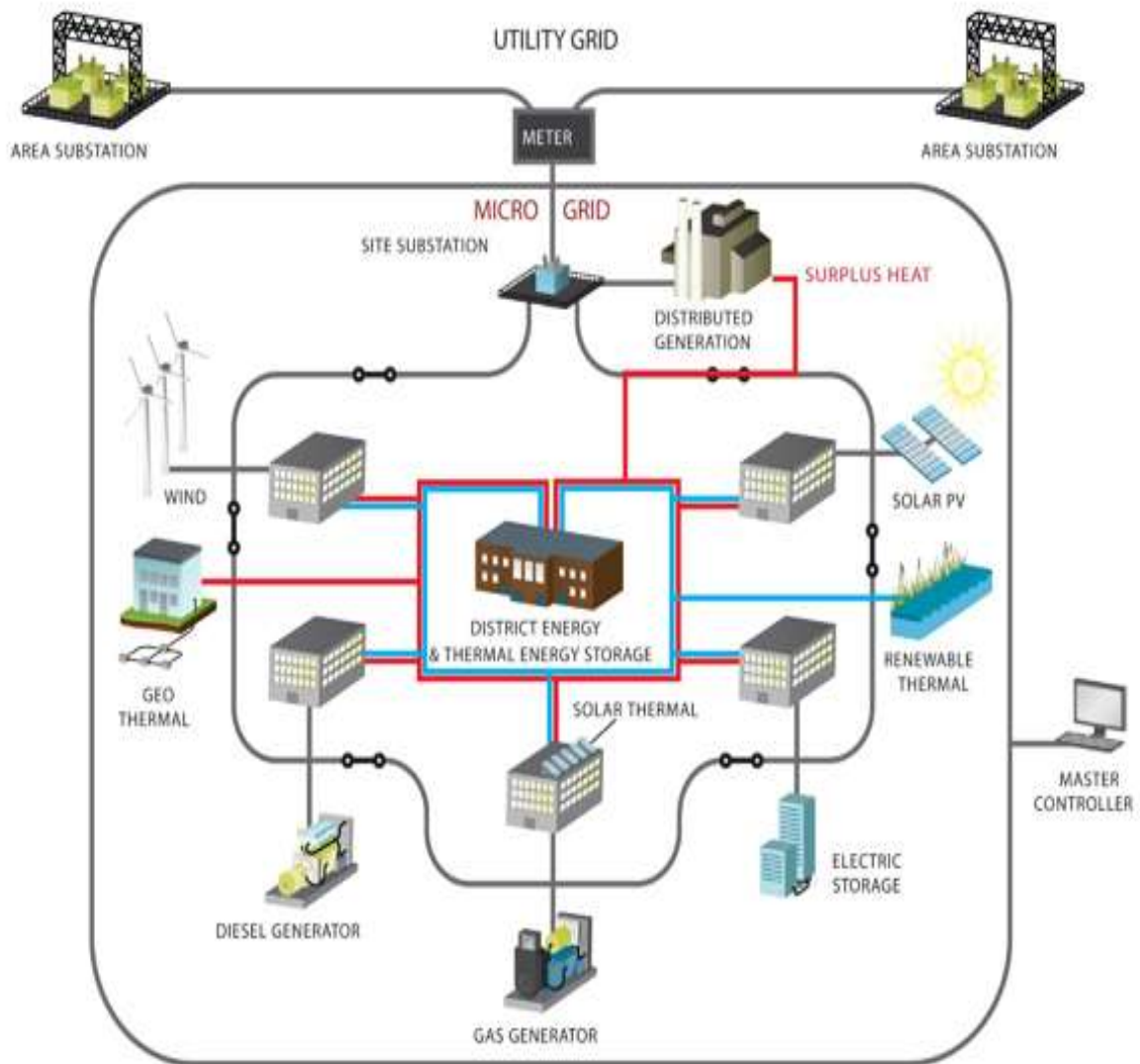
2.1 Εισαγωγή-ορισμός

Στον ορισμό του μικροδικτύου δεν υπάρχει καθολικά αποδεκτό ελάχιστο ή μέγιστο μέγεθος. Τα μικροδίκτυα ορίζονται από τη λειτουργία τους, όχι από το μέγεθός τους. Αν και η αρχιτεκτονική και το μέγεθος ενός μικροδικτύου μπορεί να ποικίλει ευρέως, συνήθως θεωρείται ότι είναι ένα μικρό μέρος ενός μέσου δικτύου διανομής χαμηλής τάσης ή ένα μέρος που τροφοδοτείται από τοπικές πηγές.

Μπορεί να λειτουργήσει είτε σε λειτουργία συνδεδεμένος στο δίκτυο ή σε islanded λειτουργία, δηλαδή να μην έχει κανένα σημείο σύνδεσης με το κυρίως δίκτυο είτε επειδή έχει επιλεγεί να λειτουργεί αυτόνομα για να παρέχει στις καταναλώσεις του αξιόπιστη και υψηλής ποιότητας ισχύ είτε γιατί έχει οδηγηθεί σε αυτόνομη λειτουργία από κάποια διαταραχή του δικτύου (αποσύνδεση), διακοπή από το κεντρικό πλέγμα ή οικονομικοί λόγοι.

Το μέγεθος ενός μικροδικτύου εξαρτάται βασικά από την μέγιστη ισχύ που απαιτείται από τα φορτία, τα οποία θα καθορίζουν την ελάχιστη ισχύ αιχμής που πρέπει να παρέχονται από τα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης, καθώς και το ποσό της διαθέσιμης παραγωγής ή και αποθηκευμένης ενέργειας που θα παρέχει την απαιτούμενη αυτονομία στο μικροδίκτυο [6].

Μικροδίκτυο, ένα τοπικό δίκτυο ενέργειας, που προσφέρει η ενοποίηση των κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DER) με τοπικά ελαστικά φορτία, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα με το δίκτυο ή σε islanded λειτουργία παρέχοντας υψηλή αξιοπιστία και αντοχή ακόμα και σε διαταραχές του δικτύου. Αυτό το προηγμένο, ολοκληρωμένο σύστημα διανομής καλύπτει την ανάγκη για εφαρμογή σε απομακρυσμένες περιοχές με περιορισμούς ηλεκτρικής παροχής.



Σχήμα 2.1 Δομή ενός μικροδικτύου [7]

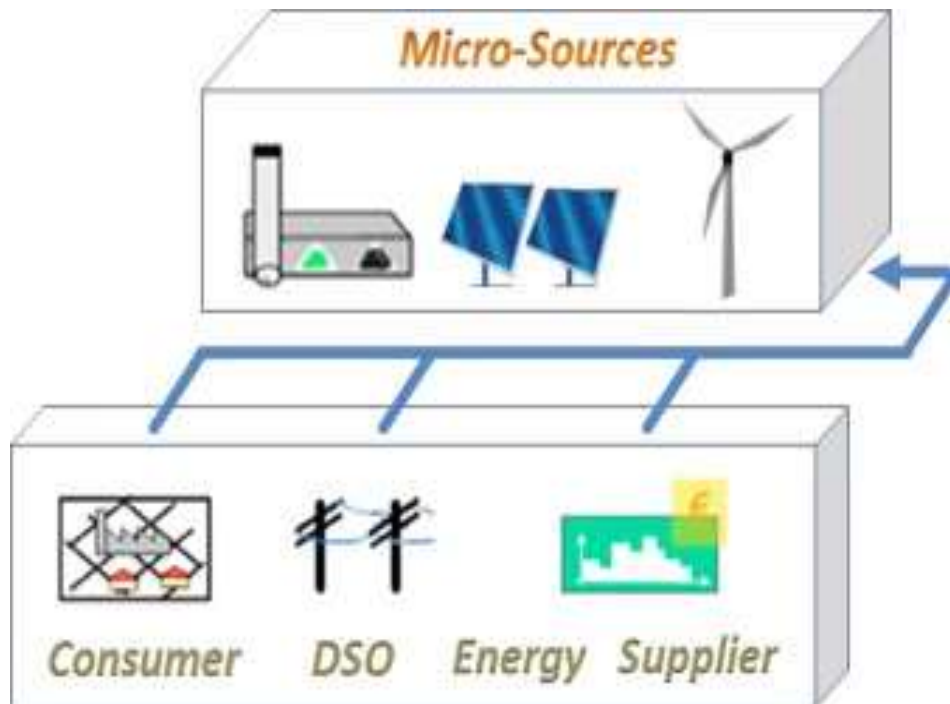
Τα Μικροδίκτυα περιλαμβάνουν διεσπαρμένες μικροπηγές (DERS) αποτελούμενες από συστήματα φωτοβολταϊκών, ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμων, μικροτουρμπίνες, γεννήτριες πετρελαίου και μπαταρίες για να σχηματίσουν ένα ολόκληρο σύστημα που είναι μεγαλύτερο από τα μέρη τους. Έτσι ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει μία από τις παραπάνω φυσικές πηγές ενέργειας και μπορεί να καλύπτει τις καταναλώσεις της περιοχής όπου εγκαθίσταται.

Ωστόσο, ανεξάρτητα από το μέγεθός τους, πλήρως διασυνδεδεμένα συστήματα με κατανομημένη παραγωγή ενέργειας που δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε islanded λειτουργία δεν είναι μικροδίκτυα, αλλά αντι 'αυτού μπορεί να οριστούν ως ενεργά δίκτυα διανομής. Ένα ενεργό δίκτυο διανομής μπορεί να οριστεί ως ένα ηλεκτρικό δίκτυο διανομής με τα συστήματα για τον έλεγχο ενός συνδυασμού DERS, που αποτελούνται από γεννήτριες και μονάδες αποθήκευσης. Ωστόσο, τα ενεργά δίκτυα διανομής δεν έχουν την

ικανότητα νησιδοποίησης και μπορεί ως εκ τούτου να είναι πολύ μεγαλύτερα σε μέγεθος από μια αντίστοιχη ονομαστική ισχύ μικροδικτύου.

Η ποικιλία των ορισμών αποδεικνύει ότι τα μικροδίκτυα έχουν διαφορετικές λειτουργίες και με τη σειρά τους ένα πλήθος χαρακτηριστικών. Ωστόσο, η βασική ιδέα είναι να συγκεντρώσει και να ενσωματώσει τις διεσπαρμένες μικροπηγές (γνωστές επίσης ως πηγές καταναμημένης παραγωγής ενέργειας και καταναμημένης αποθήκευση) και τα φορτία, ιδανικά κοντά στον τελικό χρήστη, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ισχύς του στην κατανάλωση και να του παρέχει την ακόλουθη λειτουργικότητα και τις συνθήκες λειτουργίας:

- παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής κατανάλωσης του καταναλωτή,
- διαχείριση της ενέργειας από την πλευρά της προσφοράς και της ζήτησης, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι βασικές απαιτήσεις της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η ισορροπία ισχύος, η ποιότητα της τάσης, η ευελιξία και η ηλεκτρική ασφάλεια,
- "Peer to peer" ομότιμη συμμετοχή και διάθεση των πόρων. Δεν υπάρχουν μονάδες, όπως ένας κεντρικός ελεγκτής ή μια κεντρική μονάδα αποθήκευσης που να έχουν κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία του μικροδικτύου. Δηλαδή το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργεί και ανεξάρτητα από τις μονάδες που είναι συνδεδεμένο.
- "Plug and play" λειτουργικότητα σε δύο επίπεδα:
 1. ευέλικτο σύστημα, όπου οι συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν ομαλά και
 2. να είναι σε θέση να εισέλθουν σε islanded λειτουργία μετά την αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο σε ένα κεντρικό σημείο, όπου πλέον αρκετή ισχύς παράγεται για τη μείωση των διακοπών και μετέπειτα να είναι σε θέση να επανασυνδεθούν και να συγχρονιστούν με το κύριο δίκτυο.



Σχήμα 2.2 Δείγμα μικροπηγής-δυνατότητα κυριότητας σε δίκτυο [6]

2.2 Πλεονεκτήματα μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα, συνοπτικά αυτά είναι [8] :

- Η συνολική απόδοση της ενέργειας αυξάνεται με τις εφαρμογές συμπαραγωγής, (ΣΗΘ) που αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων. Έτσι, ενώ πριν είχαμε μεγάλη κεντρική παραγωγή ισχύος και τοπική παραγωγή θερμότητας, με την δημιουργία των μικροδικτύων τόσο η παραγωγή ισχύος όσο και θερμότητας γίνεται τοπικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κατανάλωση της ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα να μειώνεται κατά το 1/3.
- Ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας
- Αυξημένη αξιοπιστία και προσαρμοστικότητα του συστήματος ενέργειας
- Υψηλή μείωση των απωλειών από μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, αφού η παραγωγή γίνεται τοπικά
- Οφέλη για το δίκτυο, όπως δυνατότητα τοπικής παραγωγής, ελέγχου τάσης και συχνότητας
- Σε περιόδους αιχμής φορτίου αποτρέπει την κατάρρευση μειώνοντας

το φορτίο του δικτύου

- Το μικροδίκτυο μπορεί να ενεργήσει για να μετριάσει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για τους χρήστες της, δημιουργώντας το σύνολο ή μέρος του ζητούμενου φορτίου
- Το μικροδίκτυο συντελεί σε σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα
- Τα μικροδίκτυα ενισχύουν την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ)
- Οι επιπτώσεις από την χρήση μεγάλων γεωγραφικών εκτάσεων (για εγκαταστάσεις κτλ) αποφεύγονται

2.3 Μειονεκτήματα μικροδικτύων

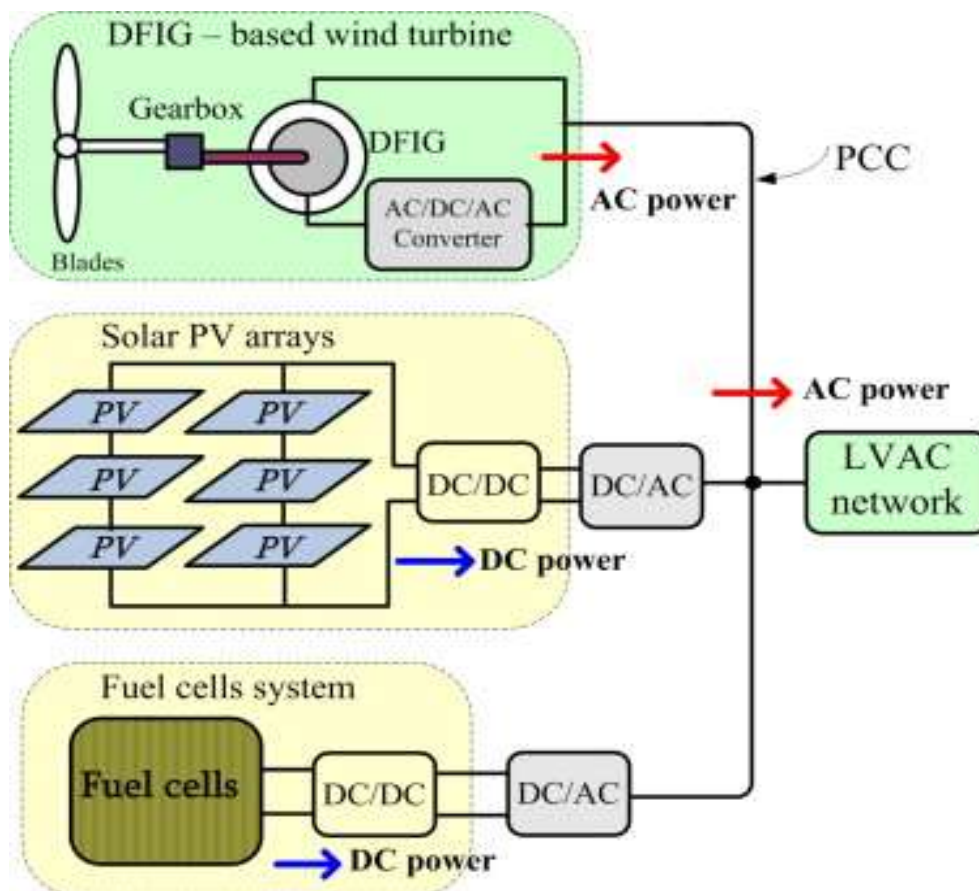
Τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν και αυτά με τη σειρά τους ένα σύνολο μειονεκτημάτων τα οποία σε καμία περίπτωση δεν επισκιάζουν τα πλεονεκτήματά τους. Συγκεκριμένα αυτά είναι [8]:

- Η τάση, η συχνότητα και η ισχύς της ποιότητας είναι τρεις κύριες παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν και να ελέγχονται σε αποδεκτά επίπεδα, ενώ παράλληλα διατηρείται το ισοζύγιο ενέργειας και ισχύος
- Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να αποθηκεύεται σε συστοιχίες μπαταριών, με αποτέλεσμα να απαιτείται αρκετός χώρος αλλά και συντήρηση
- Ο επανασυγχρονισμός με το κεντρικό δίκτυο παρουσιάζει ορισμένες φορές δυσκολία
- Η τοποθέτηση αξιόπιστων διατάξεων προστασίας αποτελεί μια εκ των σημαντικότερων προκλήσεων σε ότι αφορά την λειτουργία ενός μικροδικτύου
- Θέματα όπως η αναμονή φορτίου και η ακριβής μέτρηση της ενέργειας (παραγόμενης και λαμβανόμενης από το δίκτυο) ίσως σταθούν εμπόδια στην ανάπτυξη των μικροδικτύων αρχικά
- Πρότυπα διασύνδεσης πρέπει να αναπτυχθούν για να εξασφαλιστεί η συνοχή. (Ωστόσο το IEEE P1547, ένα πρότυπο που προτείνεται από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών καταλήγει στην πλήρωση αυτού του κενού)

2.4 Προσδιορισμός AC μικροδικτύου

Όλες οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εναλλασσόμενη AC ισχύ είναι άμεσα συνδεδεμένες με το ζυγό εναλλασσόμενης τάσης (AC bus link) και με το κύριο σύστημα μετατροπής ισχύος για τη σταθερή σύζευξη τους. Παραδείγματα τέτοιων μονάδων που παράγουν στην έξοδο τους AC ισχύ είναι οι ανεμογεννήτριες, το βιοαέριο και οι στρόβιλοι. Αυτά συνήθως συνδέονται άμεσα ή μπορεί να χρειαστούν AC/DC/AC μετατροπείς ισχύος για να επιτρέπουν τη σταθερή σύζευξη τους με τα δίκτυα χαμηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο χαμηλής τάσης AC μπορεί να διασυνδεθεί με το κεντρικό σύστημα μέσω ενός μετασχηματιστή.

Επιπλέον, τα φορτία AC συνδέονται απευθείας, ενώ τα φορτία DC έχουν ανάγκη τους μετατροπείς ρεύματος AC/DC για να συνδεθούν με τα δίκτυα AC. Από την άλλη πλευρά, οι μονάδες παραγωγής που παράγουν έξοδο συνεχούς ρεύματος (π.χ. οι ηλιακές φωτοβολταϊκές συστοιχίες, οι κυψέλες καυσίμου και οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες)) μπορούν να συνδεθούν με τη γραμμή των δικτύων AC χρησιμοποιώντας DC/AC μετατροπείς. Το σχήμα δείχνει την τυπική διαμόρφωση των μονάδων παραγωγής με την έξοδο AC ισχύος (π.χ. ανεμογεννήτριες) και αυτά με την DC έξοδο ισχύος (π.χ. συστήματα ΦΒ και κυψέλες καυσίμου) συνδεδεμένο με το δίκτυο χαμηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος [9].



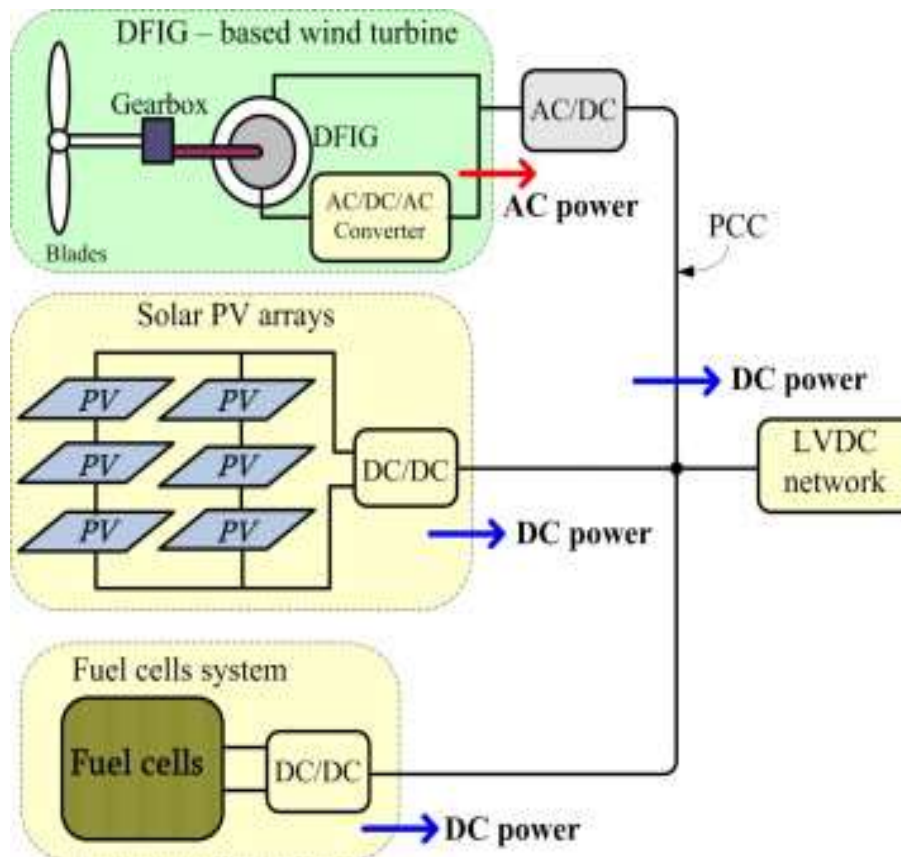
Σχήμα 2.3 Τυπική διαμόρφωση μονάδων παραγωγής με δίκτυο χαμηλής εναλλασσόμενης τάσης

2.5 Προσδιορισμός DC μικροδικτύου

Η λειτουργία των σημερινών καταναλωτικών εξοπλισμών και της μελλοντικής διανεμημένης ανανεώσιμης ενέργειας χρειάζονται για να μελετηθούν διάφορα εναλλακτικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Με την έννοια του έξυπνου δικτύου, τα DC δίκτυα χαμηλής τάσης, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για τη βιομηχανική τροφοδοσία και τα εμπορικά κτίρια αυξάνονται καθημερινά.

Στο μέλλον, το σύστημα διανομής DC θα γίνει ένας εναλλακτικός τρόπος για να τροφοδοτεί όλες τις ηλεκτρικές συσκευές που συνδέονται με ένα σύστημα ζυγών συνεχούς τάσης και βέλτιστα να ελέγχεται από ένα σύστημα ενεργειακής διαχείρισης. Ως παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν μια εξαιρετικά αρθρωτική δομή με πολλές πιθανές διαθέσιμες διαμορφώσεις στις οποίες μπορεί να συνδεθεί ο μετατροπέας του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Οι διαμορφώσεις που προκύπτουν ορίζονται ως κεντρικός μετατροπέας ή αντιστροφείας σειράς. Με αυτόν τον τρόπο, οι μονάδες παραγωγής DC και οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας παράγουν το συνεχές ρεύμα που εύκολα μπορεί να συνδεθεί με το DC ζυγό (DC bus link).

Μια συσκευή μπορεί επίσης να φορτιστεί και να εκφορτιστεί από το δίκτυο και τα φορτία που είναι συνδεδεμένα. Στην περίπτωση αυτή, οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος χρειάζονται ένα μετατροπέα ρεύματος AC/DC για τη σύνδεση τους με το δίκτυο χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος. Το σχήμα απεικονίζει το δίκτυο DC με τις μονάδες παραγωγής συνδεδεμένες με αυτό μέσω της κοινής γραμμής DC. Για το σκοπό αυτό, οι μονάδες παραγωγής AC (πχ ανεμογεννήτριες) για τη σύνδεση τους με το δίκτυο DC χρειάζονται μετατροπείς, ενώ οι μονάδες παραγωγής DC συνδέονται άμεσα όπως φαίνεται στην εικόνα [9].



Σχήμα 2.4 Τυπική διαμόρφωση μονάδων παραγωγής για σύνδεση με δίκτυο συνεχής τάσης

2.6 Κύριος λόγος εμφάνισης των Dc Μικροδικτύων

Τα Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάστηκαν για να μετακινούν από τον κεντρικό σταθμό εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), μέσω των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης και των γραμμών διανομής τάσεως, προς τα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν στην πλειοψηφία στα φώτα πυρακτώσεως, εναλλασσόμενου ρεύματος και σε άλλο εξοπλισμό AC. Όμως ο σημερινός καταναλωτικός εξοπλισμός και η μελλοντική διανομή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας απαιτεί την επανεξέταση αυτού του μοντέλου. Ηλεκτρονικές συσκευές (όπως υπολογιστές, λαμπτήρες φθορισμού, συστήματα μετάδοσης μεταβλητής ταχύτητας και πολλά άλλα οικιακά και επιχειρηματικά συστήματα, συσκευές και εξοπλισμός) χρειάζονται συνεχές ρεύμα (DC). Ωστόσο, όλες αυτές οι συσκευές συνεχούς ρεύματος όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω απαιτούν τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος του κτιρίου σε συνεχές, μια μετατροπή δηλαδή που χρησιμοποιεί αναποτελεσματικούς ανορθωτές.

Επιπλέον, η κατανεμημένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (όπως το φωτοβολταϊκό πάνελ) παράγει συνεχές ρεύμα, αλλά θα πρέπει να μετατραπεί σε AC ώστε να συνδεθεί με το ηλεκτρικό σύστημα του κτιρίου και αργότερα να μετατραπεί σε DC για τελικές χρήσεις. Αυτές οι μετατροπές AC-DC (ή DC-

AC-DC στην περίπτωση του φωτοβολταϊκού) οδηγεί σε σημαντικές απώλειες ενέργειας.

Γι' αυτό και μια πιθανή λύση είναι ένα μικροδίκτυο DC, το οποίο είναι ένα δίκτυο συνεχούς ρεύματος στο εσωτερικό ενός κτιρίου που ελαχιστοποιεί ή εξαλείφει εντελώς αυτές τις απώλειες μετατροπών.

Στο σύστημα του μικροδικτύου DC, το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) μετατρέπεται σε συνεχές κατά την είσοδό του στο DC δίκτυο χρησιμοποιώντας ένα ανορθωτή υψηλής απόδοσης, το οποίο στη συνέχεια διανέμεται στο DC εξοπλισμό που εξυπηρετείται από το δίκτυο συνεχούς ρεύματος. Κατά μέσο όρο, το σύστημα αυτό μειώνει τις AC σε DC απώλειες μετατροπής από μια μέση απώλεια περίπου 32% στο 10%. Επιπλέον, μια στέγη με φωτοβολταϊκά (PV) και άλλες κατακεκομμένες πηγές ενέργειας DC μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα σε DC εξοπλισμούς, μέσω του μικροδικτύου DC, χωρίς την απώλεια ενέργειας της διπλής μετατροπής (DC-AC-DC ή AC-DC), η οποία θα χρειαζόταν εάν η DC παραγωγή τροφοδοτούνταν από ένα AC σύστημα [10]. Αυτή η εργασία περιγράφει τη λειτουργία του DC μικροδικτύου γι' αυτό και θα γίνει εκτενέστερη παρουσίαση του DC μικροδικτύου.

2.7 AC εναντίον DC μικροδίκτυα

Κοιτάζοντας πίσω από έναν αιώνα στο αγώνα για την κυριαρχία στο χώρο της ηλεκτρικής ενέργειας, έγινε μεγάλη μάχη μεταξύ AC και DC για το ποια μορφή ρεύματος από τις δύο θα επικρατήσει στην πρώτη θέση. Τέσσερα μόνο είναι τα σημαντικά σημεία που πρέπει να επισημανθούν :

- Η παραγωγή ενέργειας για πελάτες χονδρικής σε μεγάλες εγκαταστάσεις ήταν φθηνότερη από ότι σε πολλούς μικρούς κατακεκομμένους σταθμούς
- το εναλλασσόμενο ρεύμα θα μπορούσε να διανύσει μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες, σε αντίθεση με το συνεχές
- Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως που αποτελούσαν την πλειοψηφία του φορτίου λειτουργούσαν με AC ρεύμα
- Οι ημιαγωγοί δεν είχαν ακόμη εφευρεθεί

Αυτά τα γεγονότα, όπως αναφέρεται στο [10], οδήγησαν στο θρίαμβο της Westinghouse (εταιρεία πυρηνικής ενέργειας των ΗΠΑ) πάνω στον Edison με πολλούς τρόπους. Ωστόσο, είναι επίσης ένας από τους λόγους για τον οποίο πρέπει να ξαναμελετηθούν ορισμένα από τα επιχειρήματα του Edison για την καλύτερη εξυπηρέτηση του φορτίου σήμερα.

Οι κατευθυντήριες αρχές των Smart Grid υπενθυμίζουν, ότι η εξίσωση ισχύος πρέπει να αναλαμβάνει την προστασία του περιβάλλοντος περισσότερο, και να έχει μια αυξανόμενη ανάγκη για κατακεκομμένη

παραγωγή DC, όπως είναι η φωτοβολταϊκή και η DC αποθήκευση. Εν τω μεταξύ, οι ηλεκτρονικές συσκευές αποτελούν το ταχύτερα αναπτυσσόμενο τμήμα του φορτίου.

Η δυναμική των LED ως πηγή φωτός για τις κοινές εφαρμογές φωτισμού που χρειάζεται DC ρεύμα θα κυριαρχήσει στην αγορά φωτισμού. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ επίσης έχουν καθοριστεί για τη διανομή σε DC φωτισμό. Αυτή η ενέργεια, όπως στο παράδειγμα φωτισμού, φέρνει στους χρήστες και στους παραγωγούς βασικά οφέλη που το μοντέλο AC δεν προσφέρει, αποφεύγοντας απώλειες μεταφοράς και διανομής και απώλειες μετατροπής στο κτίριο. Όλα αυτά οδηγούν σε μια καλή αξιολόγηση για την εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρουν τα DC μικροδίκτυα.

Σε περίπτωση που η εξοικονόμηση προέρχεται από τη βελτιωμένη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος μόνο 70% ή 75% απόδοση θεωρείται ως μέσο εύρος για τροφοδοτικά εναλλασσόμενου ρεύματος και 90% χρησιμοποιείται για το μετατροπέα υψηλής απόδοσης που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα μικροδίκτυο DC. Οι μετατροπείς αυτοί διατίθενται σήμερα στην αγορά. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τους τομείς αυτούς, τα σχετικά φορτία, καθώς και τις δυνατότητες εξοικονόμησης:

Device	MWh used	Potential DC microgrid savings	MWh saved
Refrigerators	160,158,600	40% ¹⁹	64,063,440
Indoor/Outdoor Lighting	103,113,000	15%	15,466,950
Furnace Fan	39,193,200	25%	9,798,300
Microwave	19,801,800	15%	2,970,270
Color TV	33,960,600	15%	5,094,090
VCR / DVD	11,593,800	15%	1,739,070
Cable Boxes	2,975,400	15%	446,310
Satellite Dish	1,846,800	15%	277,020
Desktops	17,647,200	15%	2,647,080
Laptops	1,333,800	15%	200,070
Printers	4,617,000	15%	692,550
Pool Filter Pump	10,054,800	25%	2,513,700
Ceiling Fan	9,849,600	30%	2,954,880
Water Pump	5,643,000	25%	1,410,750
Stereo Systems	5,130,000	15%	769,500
Evaporative Cooling	3,283,200	25%	820,800
Portable Stereos	718,200	15%	107,730
Cordless telephones/answer	4,514,400	15%	677,160
Rechargeable tools	2,154,600	15%	323,190
Residual ²⁰	82,285,200	10%	8,228,520
Total	519,874,200		121,201,380

Σχήμα 2.5 Πίνακας φορτίων και εξοικονόμησης ενέργειας [10]

Όλα αυτά οδηγούν στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ικανότητα εξοικονόμησης παραγωγής (MW)

Αυτά τα μεγάλα δυνητικά οφέλη από την αποδοτικότητα θα έχουν άμεσο θετικό αντίκτυπο στην παραγωγή και την ικανότητα σχεδιασμού προς όφελος όλων των ενδιαφερόμενων φορέων στο δίκτυο. Χρησιμοποιώντας σύγχρονα δεδομένα από το 2006 για την ανάλυση του φορτίου, φαίνεται πώς ένα μικρότερο φορτίο θα αποφέρει μεγάλα οφέλη. Για παράδειγμα, εξοικονομώντας 337 TWh της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι διαχειριστές των δικτύων θα μπορούσαν να έχουν τη δυνατότητα να κλείσουν ή να μην κατασκευάσουν περίπου 75 GW σταθμούς παραγωγής.

- Μεταφορά και διανομή

Το κύριο πλεονέκτημα του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η αποτελεσματικότητα του ως προς τη διαχείριση και μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Η μείωση των φορτίων κατά την τελική χρήση και η διευκόλυνση της τοπικής παραγωγής οδηγεί σε μείωση των φορτίων για τα συστήματα μεταφοράς και διανομής. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να χρησιμοποιείται στο μέγιστο το εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου για να υπάρχει μέγιστο όφελος, όπως γίνεται και με τα DC μικροδίκτυα που μειώνουν τα φορτία κατά την τελική χρήση και να διευκολύνουν την επί τόπου παραγωγή. Άλλα συστήματα συνεχούς μεταφοράς υψηλής τάσης είναι έξω από το πεδίο εφαρμογής της παρούσας ανάλυσης.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί, ωστόσο, ότι οι βραχυπρόθεσμες γραμμές υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος λειτουργούν μεταξύ των μεγάλων εδαφικών υπηρεσιών του δικτύου, έτσι ώστε τα μεγάλα δίκτυα του εναλλασσόμενου ρεύματος να είναι συγχρονισμένα και να μπορούν να παραμένουν συνδεδεμένα μεταξύ τους, χωρίς απαραίτητα την ανάγκη να ταιριάζουν με τη φάση των γειτονικών τους. Αυτή η απομονωμένη περιοχή είναι σημαντική όταν ένα μεγάλο τμήμα του δικτύου βγαίνει εκτός λειτουργίας. Με τις DC συνδέσεις στις γειτονικές περιοχές του δικτύου, η on-line επιστροφή είναι ευκολότερη όταν η επανερχόμενη γεννήτρια δεν πρέπει να συγχρονιστεί με μια ακριβή φάση ενός συνδεδεμένου συστήματος.

- Πρόσθετα οφέλη για την επί τόπου παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις πηγές συνεχούς ρεύματος (π.χ. ηλιακή φωτοβολταϊκή, μικρές ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου και γεννήτριες συνεχούς ρεύματος)

Τα DC μικροδίκτυα είναι πιο αποτελεσματικά, καθώς παράγουν λιγότερη θερμότητα στο εσωτερικό του κτιρίου και αυτό το ηλεκτρικό όφελος απόδοσης μπορεί να εξηγηθεί λόγω του ότι αποφεύγεται ένα σημαντικό φορτίο ψύξης.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι πολλαπλές πηγές ρεύματος στα DC μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν πιο ομαλά. Δεν χρειάζεται να ταιριάζει η φάση όπως απαιτείται στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος

και η αποτελεσματικότητα που παρατηρείται οφείλεται σε μπαταρίες, μικρές ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου και γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Αυτό έχει μεγάλες δυνατότητες με την έννοια ότι θα μπορούσε να ανταποκριθεί κοντά σε πραγματικό χρόνο για την αυξημένη ζήτηση φορτίου, παρέχοντας μεγαλύτερη χωρητικότητα της μπαταρίας. Επιπλέον συνδυάζοντας πολλαπλές μικροπηγές ρεύματος υπάρχει η πιθανότητα πολλά διαφορετικά καύσιμα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο εργοτάξιο, πράγμα που αυξάνει την εγγενή ασφάλεια του συστήματος.

2.8 DC Μικροδίκτυα

Το μικροδίκτυο το οποίο θα μελετηθεί και θα προσομοιωθεί είναι ένα DC μικροδίκτυο, γι' αυτό και θα γίνει περισσότερη ανάλυση αυτού του είδους δικτύου.

2.8.1 Πλεονεκτήματα Dc Μικροδικτύων

Το κύριο πλεονέκτημα ενός DC μικροδικτύου είναι ότι παρέχει μια καλύτερη συμμόρφωση της διεσπαρμένης παραγωγής (DER) και των φορτίων. Για παράδειγμα, η ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια και η αποθήκευση των μπαταριών θα χρησιμοποιήσουν μόνο μια μετατροπή DC-DC στα DC μικροδίκτυα γεγονός που παρέχει μια απλούστερη και οικονομικά αποδοτικότερη δομή με ένα πολύ πιο εύκολο έλεγχο στρατηγικής.

Το DC μικροδίκτυο διευκολύνει επίσης τη συμμετοχή των περιστρεφόμενων μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος με μεταβλητή συχνότητα. Η εφαρμογή της μεταβλητής συχνότητας σε συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος θα απαιτούσε μετατροπή AC-DC-AC για να δεσμεύσει τέτοιες παραγωγικές μονάδες με συχνότητα στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Επιπλέον, αυτές οι λιγότερες AC-DC-AC μετατροπές οδηγούν στη μείωση των απωλειών μετατροπής της ενέργειας και στη μείωση των απαιτούμενων συστημάτων ψύξης και αερισμού σε εφαρμογή με έντονη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, όπως τα κέντρα δεδομένων.

Μικρότερες απώλειες καλωδίων έχουμε στα DC μικροδίκτυα, οι οποίες οφείλονται στην απουσία των επιπτώσεων στο δέρμα καθώς και στην απουσία άεργου ισχύος σε αγωγούς, που προσφέρουν μια πιο οικονομική παροχή ισχύος από εκείνο στα AC μικροδίκτυα.

Οι στρατηγικές ελέγχου που εφαρμόζονται σε DC μικροδίκτυα είναι λιγότερο πολύπλοκες από εκείνες στα AC μικροδίκτυα. Τα AC μικροδίκτυα χρησιμοποιούν ενεργό (P-f) και άεργο (Q-V) καμπύλες ελέγχου, ενώ τα DC μικροδίκτυα έχουν μόνο P-V καμπύλες ελέγχου και αμβλύνουν την ανάγκη για την αντιστάθμιση άεργου ισχύος και τη μείωση κυκλοφορούντων άεργων ρευμάτων.

Οι απλουστευμένες στρατηγικές ελέγχου συμβάλουν στην αύξηση της ανθεκτικότητας του DC μικροδικτύου. Επιπλέον, η εξάλειψη της γωνίας φάσης της συχνότητας και της τάσης διευκολύνει τον επανασυγχρονισμό του DC μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η προσαρμογή της συχνότητας του μικροδικτύου με την αντίστοιχη γωνία φάσης δεν είναι πλέον ένα κρίσιμο ζήτημα επανασυγχρονισμού για τα μικροδίκτυα.

Τέλος, υψηλότερη ποιότητα ισχύος προσφέρεται από τα DC μικροδίκτυα καθώς η άεργος ισχύς και οι αρμονικές δεν παίζουν ρόλο στα συστήματα συνεχούς ρεύματος [10].

2.8.2 Μειονεκτήματα DC μικροδικτύων

Τα DC μικροδίκτυα παρουσιάζουν επίσης μια σειρά από περιορισμούς και προκλήσεις. Από την πλευρά της λειτουργίας τους, η χρήση της διαφοράς τάσης ως κινητήρια δύναμη για τη ροή ισχύος μπορεί να επηρεάσει το προφίλ της τάσης στα DC μικροδίκτυα, ειδικά όταν τα μικροδίκτυα ελέγχονται με την Bus sigling μέθοδο (DBS). Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο προγραμματισμός της παραγωγής και κατανομής του φορτίου των DERS καθορίζεται με βάση μόνο των τελικών συνεχών τάσεων.

Από άποψη προστασίας οι DC διακόπτες είναι πιο ογκώδης και πιο ακριβοί από αυτούς στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Τέλος πολλές στρατηγικές προστασίας πρέπει να εφαρμοστούν στο DC μικροδίκτυο καθώς ο περιορισμός του ρεύματος σφάλματος του μετατροπέα σε συνδυασμό με τα DERS αμφισβητούν την παραδοσιακή μέθοδος προστασίας έναντι του ρεύματος [10].

2.9 Έλεγχος στα DC μικροδίκτυα

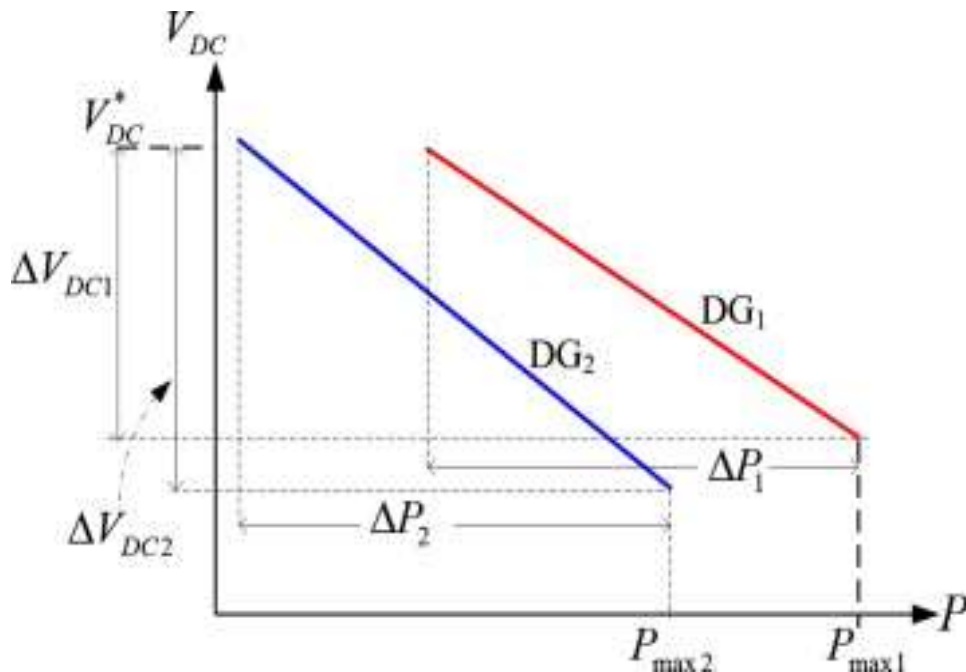
Στο υποκεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η στρατηγική ελέγχου του μικροδικτύου συνεχούς ρεύματος.

Η στρατηγική ελέγχου των DC μικροδικτύων γίνεται συνήθως για :

- (i) Την προσέγγιση ελέγχου ομαλής εκκίνησης των πηγών
- (ii) Τον εξωτερικό κοινό ελεγκτή για να αποκαταστήσει την απόκλιση τάσης στο εσωτερικό του συστήματος DC
- (iii) Τη ρύθμιση της ροής του ρεύματος ισχύος από και προς μια εξωτερική συνεχή πηγή που μπορεί να είναι ένα μέσο συνεχές σύστημα τάσης ή ένας μετατροπέας ισχύος DC/AC, που συνδέεται με το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι αλγόριθμοι για το συνεχές ρεύμα του μικροδικτύου είναι επίσης απαραίτητοι για να εξασφαλίσουν μια ομαλή μετάβαση μεταξύ των διασυνδεδεμένων και islanding τρόπων λειτουργίας. Εν τω μεταξύ, η κατανομή ισχύος μεταξύ των μονάδων της διεσπαρμένης παραγωγής και του islanded συστήματος μπορεί να διαφέρει από κεντρικό σε αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου.

Σε αντίθεση με τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, τα συστήματα DC είναι πολύ απλούστερα κατά την έννοια ότι δεν έχουν άεργο ισχύ, και η μόνη ποσότητα τάσης που είναι διαθέσιμη για τον έλεγχο είναι το πλάτος του (V). Σε αυτήν την περίπτωση, η ενεργός ισχύς δεν εξαρτάται πλέον από τη συχνότητα του συστήματος, αλλά μόνο από τη διαφορά τάσεως. Η ενεργός κατανομή της ισχύος μεταξύ των μονάδων Γενικής Διεύθυνσης μέσα στο μικροδίκτυο συνεχούς ρεύματος μπορεί να ληφθεί μέσω των χαρακτηριστικών καμπυλών, όπως φαίνεται παρακάτω [9].

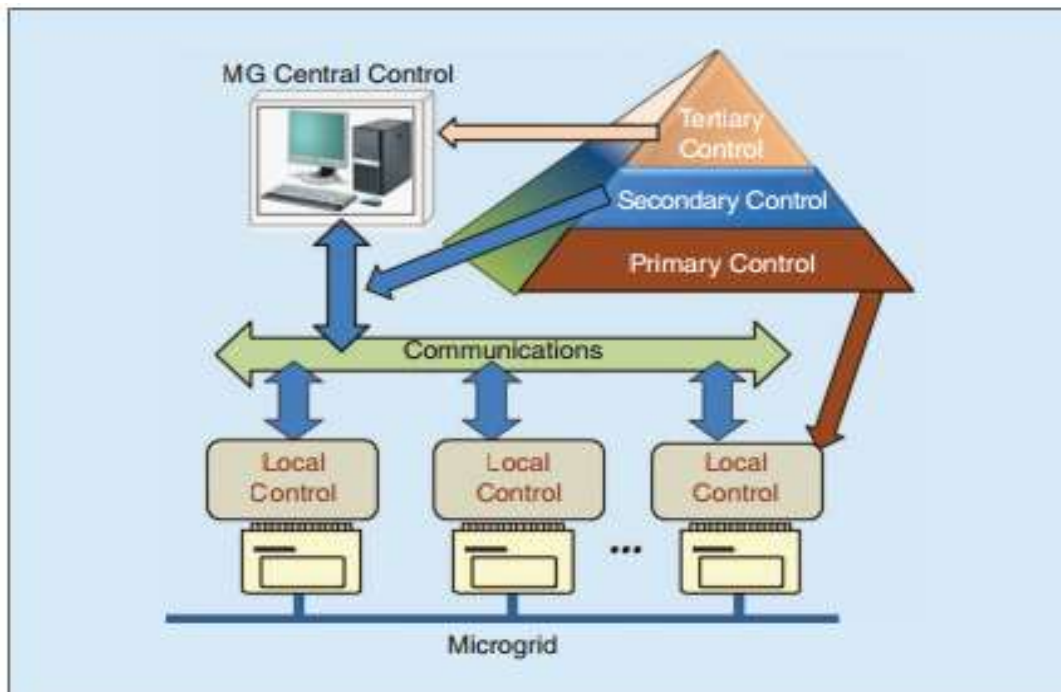


Σχήμα 2.6 Droop καμπύλη για τον έλεγχο του DC Μικροδικτύου

2.9.1 Ιεραρχικός έλεγχος στα DC Μικροδίκτυα

Στην ιεραρχική αρχιτεκτονική ελέγχου, οι λειτουργίες ελέγχου διαμοιράζονται στα διάφορα επίπεδα της ιεραρχίας. Γενικά, υπάρχουν τρία επίπεδα ιεραρχίας ελέγχου. Ο πρωτογενής έλεγχος είναι μια τοπική στρατηγική έλεγχου που επιτρέπει σε κάθε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής να λειτουργεί αυτόνομα. Ο δευτερογενής και ο τριτογενής έλεγχος, από την άλλη, υποστηρίζουν τη λειτουργία του μικροδικτύου, ώστε να αντιμετωπίζονται πολλαπλοί στόχοι. Συγκεκριμένα, ο δευτερογενής έλεγχος είναι υπεύθυνος για την εξασφάλιση της ισορροπίας μέσα στο μικροδίκτυο, ενώ ο τριτογενής ασχολείται με την οικονομική βελτιστοποίηση του συστήματος, βασισμένος στην ενέργεια των τιμών και των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, μια κατάλληλη ιεραρχική αρχιτεκτονική ελέγχου κάνει το σύστημα πιο ευέλικτο και

επεκτάσιμο, ώστε περισσότερη κατανεμημένη πηγή ενέργειας να μπορεί να ενσωματωθεί, χωρίς να αλλάζει ο τοπικός ιεραρχικός έλεγχος του συστήματος.

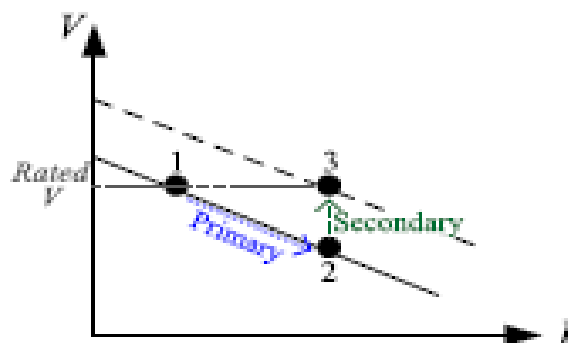


Σχήμα 2.7 Διάγραμμα αρχιτεκτονικής ελέγχου μικροδκτύου το οποίο αποτελείται το από τοπικούς και κεντρικούς ελεγκτές και συστήματα επικοινωνιών[11]

Πιο αναλυτικά για κάθε επίπεδο:

Πρωτογενής έλεγχος

Στα μικροδίκτυα, ο πρωτογενής έλεγχος προσφέρει ένα τοπικό έλεγχο σε πραγματικό χρόνο το οποίο έχει σχεδιαστεί κυρίως για την κατανομή του φορτίου μεταξύ των παράλληλα συνδεδεμένων πηγών χωρίς να χρειάζεται μεταξύ τους κάποια επικοινωνία. Τα DC μικροδίκτυα ασχολούνται μόνο με την καμπύλη V-I. Η καμπύλη V-I φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 2.8 Καμπύλη V-I και βήματα ελέγχων [12].

Και η σχέση που την εκφράζει είναι :

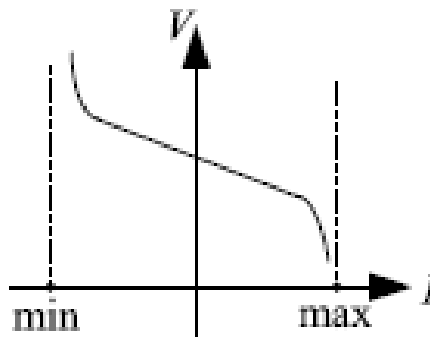
$$V^{\text{rated}} - V = R(I - I^{\text{ref}})$$

όπου το R (μια εικονική αντίσταση)

Η τιμή του R στις παράλληλα συνδεδεμένες πηγές (DERS) καθορίζει την αναλογία της κατανομής του φορτίου κατά την κανονική λειτουργία του μικροδικτύου. Σε περίπτωση μιας διαταραχής, π.χ. αλλαγές μεγάλων φορτίων ο πρωταρχικός έλεγχος θα προσαρμόσει το ρεύμα εξόδου των πηγών, ώστε να ανταποκριθεί γρήγορα σ' αυτές τις απότομες αλλαγές.

Υπάρχουν δύο ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την εφαρμογή αυτού του επιπέδου ελέγχου.

Το πρώτο ζήτημα αφορά τις καμπύλες στατισμού. Ο απλούστερος έλεγχος με τις καμπύλες στατισμού υλοποιείται μέσω μιας σταθερής τιμής R με την οποία οι πηγές θα μοιραστούν αναλογικά τις μεταβολές του φορτίου. Όμως, οι μη γραμμικές καμπύλες droop προσφέρουν πιο προηγμένο έλεγχο των πηγών. Στο παρακάτω σχήμα, για παράδειγμα, θα αυξηθεί η κλίση στα δύο άκρα της καμπύλης droop και αυτό θα επιβάλει περιορισμό ισχύος στις μικρότερες πηγές.

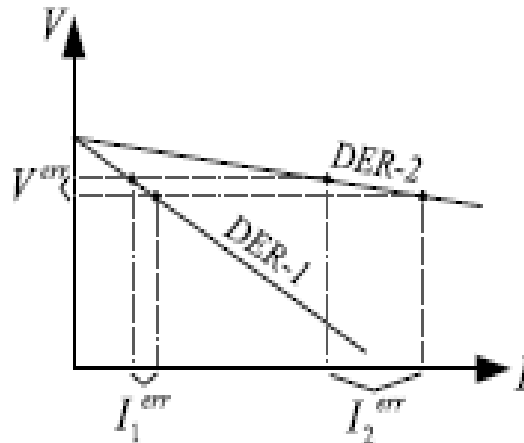


Σχήμα 2.9 Μη γραμμική καμπύλη

Επιπλέον, οι μη γραμμικές καμπύλες προσφέρουν σήματα ελέγχου που βασίζονται στην κατάσταση της σταθερής φόρτισης (SOC) των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας για την εξισορρόπηση του ρεύματος και της ενέργειας τους. Για παράδειγμα, εάν το R διαιρείται με SOC, όπως δείχνει ο τύπος παρακάτω, η μπαταρία (που είναι συσκευή αποθήκευσης ενέργειας) θα ανταποκριθεί γρηγορότερα σε υψηλό SOC (δηλαδή, πλήρης φόρτιση) και πιο αργά σε χαμηλό SOC, και το ρεύμα εξόδου του θα περιοριστεί όταν το SOC πλησιάζει το μηδέν:

$$V^{\text{rated}} - V = \frac{R}{\text{SoC}} (I - I^{\text{ref}})$$

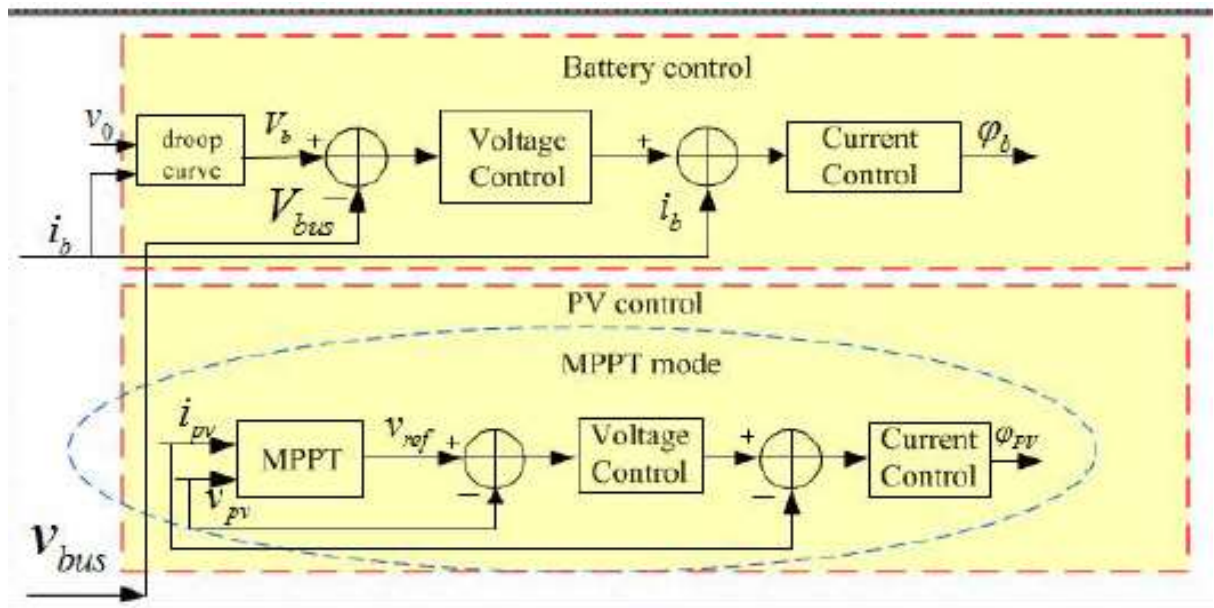
Το δεύτερο θέμα με τον πρωτογενή έλεγχο είναι ότι η καμπύλη V-I στα DC μικροδίκτυα μπορεί να έχει λάθη διαμοιρασμού της ισχύος που είναι ανάλογες με εκείνες του εναλλασσόμενου μικροδικτύου. Σε ένα DC μικροδίκτυο, τα μεγέθη κομβικών τάσεων ποικίλουν ως συνάρτηση των τοπικών χαρακτηριστικών του δικτύου. Αυτή η διαφορά τάσης θα επηρεάσει την ακρίβεια της κατανομής ισχύος, όπως απεικονίζεται σχήμα.



Σχήμα 2.10 Σφάλματα ρεύματος

Εδώ, τα σφάλματα ρεύματος (δηλαδή, $I_{\text{err}1}$ και $I_{\text{err}2}$) εισάγονται ως ένα σφάλμα τάσης V_{err} στους ακροδέκτες των DER. Το σφάλμα ισχύος μπορεί να είναι αμελητέο σε μικροδίκτυα με καλώδιο χαμηλής αντίστασης ή όταν οι πηγές συγκεντρώνονται σε μια μικρή περιοχή εντός του μικροδικτύου. Ωστόσο, τα μεγαλύτερα μικροδίκτυα με ευρέως διανεμημένες πηγές μπορούν να εισάγουν μεγαλύτερα σφάλματα. Οι περισσότερες από τις μεθόδους διόρθωσης σε αυτές τις περιπτώσεις βασίζονται στο χαμηλό εύρος ζώνης επικοινωνίας των καναλιών στα οποία τα ρεύματα εξόδου και οι τάσεις στην πλευρά DC των μετατροπέων μεταφέρονται σε άλλους μετατροπείς ώστε οι πηγές να ρυθμίσουν τα ρεύματα εξόδου τους για έναν πιο ακριβή καταμερισμό ισχύος [12].

Στις προσομοιώσεις που θα παρουσιαστούν θα εφαρμοστεί πρωτογενής έλεγχος στο φωτοβολταϊκό σύστημα και στις μπαταρίες. Μια ενδεικτική εικόνα του τρόπου του ελέγχου φαίνεται εδώ :



Σχήμα 2.11 Διάγραμμα πρωτογενούς ελέγχου σε μπαταρία και φωτοβολταϊκό [13]

Δευτερογενή επίπεδο ελέγχου

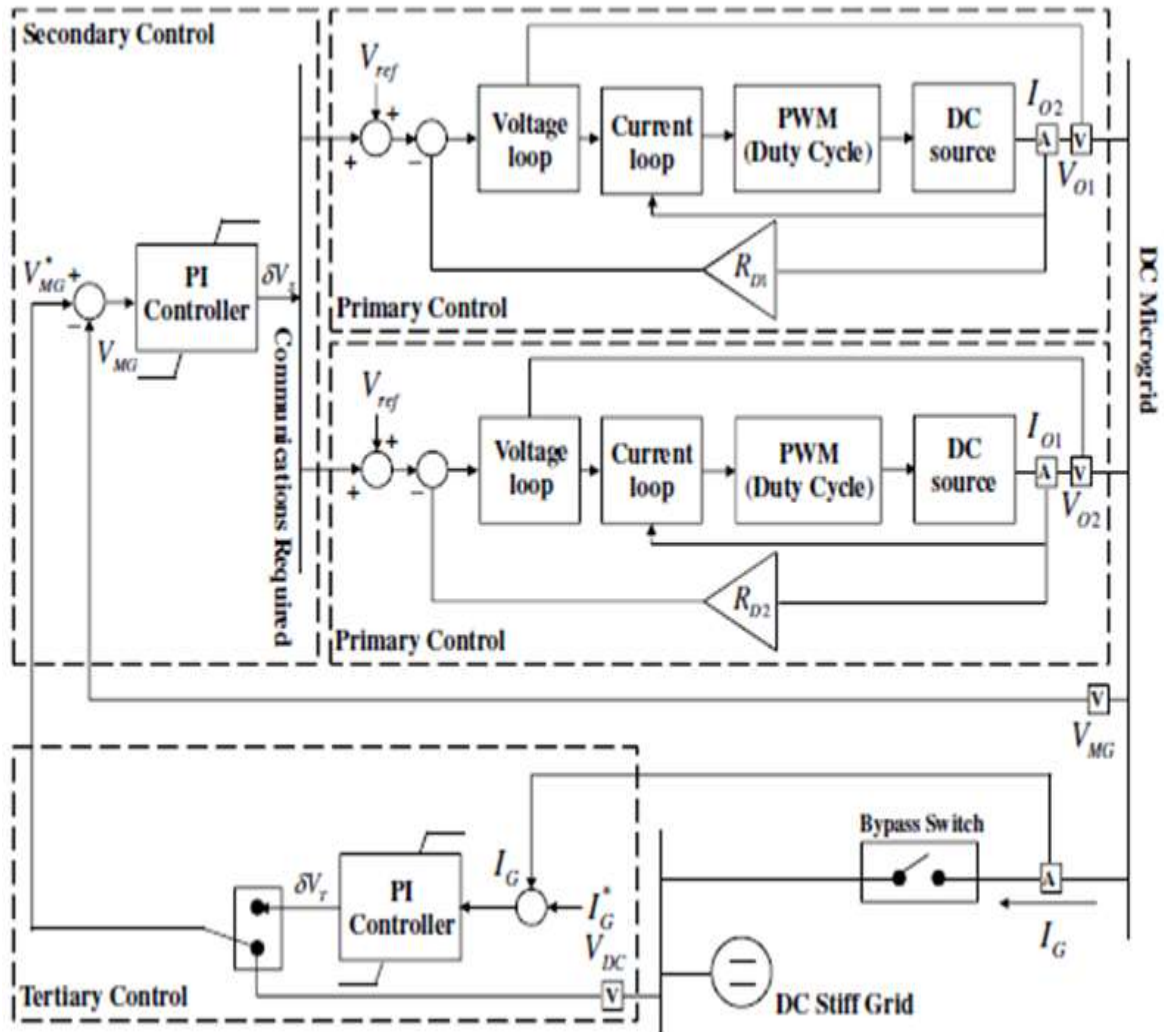
Ο δευτερογενής έλεγχος είναι υπεύθυνος να εξαλείψει τις αποκλίσεις της τάσης που δημιουργούνται από τον προηγούμενο έλεγχο όταν υπάρχουν πολλές πηγές, ώστε να υπάρχει ισορροπία στο σύστημα. Συγκεκριμένα μόλις εντοπιστεί μία απόκλιση της τάσης, ο δευτερεύον έλεγχος δημιουργεί ένα σήμα αντιστάθμισης τάσης στην άνοδο της καμπύλης droop για να αποκαταστήσει την ονομαστική τάση (βλέπε σχήμα 2.8). Ο έλεγχος μπορεί να είναι κεντρικός, όπου ρόλος του είναι η ανίχνευση τάσης και η μετάδοση μέσω επικοινωνίας των δεδομένων στο μικροδίκτυο, ή αποκεντρωμένος, όπου κάθε πηγή έχει το δικό της τοπικό δευτερεύοντα ελεγκτή, ο οποίος μπορεί να παράγει ένα κατάλληλο σήμα ελέγχου για τον πρωτογενή επίπεδο ελέγχου με τη χρησιμοποίηση των μετρήσεων από τις άλλες μονάδες της διεσπαρμένης παραγωγής, ώστε να ρυθμίσει την απόκλιση τάσης [11].

Τριτογενή επίπεδο ελέγχου

Ο τριτογενής έλεγχος προσφέρει ένα κεντρικό επίπεδο ελέγχου καθώς είναι υπεύθυνος για τη βέλτιστη και την οικονομική λειτουργία ολόκληρου του μικροδικτύου. Ο κεντρικός ελεγκτής είναι το πιο σημαντικό στοιχείο στο μικροδίκτυο το οποίο είναι υπεύθυνο για αυτόν τον έλεγχο. Αυτός λαμβάνει δεδομένα από την παραγωγή και το φορτίο μέσω του εποπτικού ελέγχου.

Ο κύριος ελεγκτής καθορίζει, επίσης την ωριαία βέλτιστη λύση σε διάφορες καταστάσεις και απρόβλεπτα γεγονότα και στέλνει σήματα ελέγχου για τις επί τούπου παραγωγές, την αποθήκευση, την υπεράσπιση των ανθρωπίνων

δικαιωμάτων και τους ελεγκτές του κτιρίου. Στη διασυνδεδεμένη λειτουργία ο κύριος ελεγκτής μπορεί να στείλει εντολές φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας, καθώς και να ελέγχει την ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου για τη μείωση του κόστους λειτουργίας [12].



Σχήμα 2.12 Διάγραμμα των τριών επιπέδων ελέγχου ενός μικροδικτύου [14]

Επίσης στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ότι ο τριτογενής έλεγχος παρέχει ακόμα και τον έλεγχο της ροής ισχύος με την αλλαγή της τάσης αναφοράς στο εσωτερικό του μικροδικτύου. Ο αντισταθμιστής ανιχνεύει το σφάλμα μεταξύ της αναφοράς και το ρεύμα ρέει προς το DC μικροδίκτυο για τον έλεγχο της ροής ισχύος μέσα από το διακόπτη.

Κεφάλαιο 3

Μετατροπείς συνεχούς τάσης

3.1 Γενικά για τους μετατροπείς ισχύος

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC-DC converter) είναι ηλεκτρικά κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για να μετατρέπουν μια τάση συνεχούς μορφής σε συνεχή τάση άλλης τιμής και ορισμένες φορές και άλλης πολικότητας.

Οι μετατροπείς αυτοί λειτουργούν χρησιμοποιώντας διάφορα ημιαγωγικά στοιχεία όπως είναι τα τρανζίστορ IGBT και MOSFET, τα θυρίστορ ή κάποιο άλλο ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο και αποτελούνται επίσης και από πηνία, πυκνωτές και διόδους. Από αυτούς οι ελεγχόμενοι από την πύλη τους ημιαγωγοί λειτουργούν ως διακόπτες και επομένως μπορούν να βρεθούν σε μόνο δύο καταστάσεις λειτουργίας, δηλαδή είτε σε κατάσταση αποκοπής είτε σε αγωγή. Πιο συγκεκριμένα, εάν σε ένα IGBT ή MOSFET δοθεί ένας παλμός οδήγησης στην πύλη του τότε αυτό θα μεταβεί σε κατάσταση αγωγής και θα παραμείνει σ' αυτή την κατάσταση μέχρι ο παλμός να πάει στο μηδέν όπου και μεταβαίνει σε κατάσταση αποκοπής [15].

Οι τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί, μέχρι σήμερα, για την κατασκευή και τον έλεγχο των μετατροπέων ισχύος, χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- 1) Στην τεχνική των γραμμικών μετατροπέων.

Η τεχνική αυτή συνίσταται στο ότι το ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα λειτουργεί στην ενεργό (δηλαδή, στη γραμμική) περιοχή, επομένως, συμπεριφέρεται σαν ρυθμιζόμενη αντίσταση και η πτώση τάσεως που εμφανίζει στα άκρα του καθορίζει την τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.

- 2) Στην τεχνική των διακοπτικών μετατροπέων.

Η τεχνική των διακοπτικών τροφοδοτικών συνίσταται στο ότι το ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα λειτουργεί ως διακόπτης, δηλαδή λειτουργεί είτε σε κατάσταση αγωγής είτε σε κατάσταση αποκοπής και το ποσοστό του χρόνου αγωγής του στη διάρκεια μίας περιόδου λειτουργίας καθορίζει την τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα.

Να σημειωθεί ότι όλα αυτά τα στοιχεία, ιδανικά, δεν καταναλώνουν ενέργεια, στην πραγματικότητα όμως καταναλώνουν ένα πολύ μικρό ποσοστό, γεγονός που συμβάλει στην υψηλή τους απόδοση.

3.2 Εφαρμογές μετατροπών ισχύος

Οι μετατροπείς ισχύος συνεχούς τάσης βρίσκουν διάφορες εφαρμογές με βασικότερες στις παρακάτω περιοχές :

- Στα συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας τηλεπικοινωνιών και διαστημικών συστημάτων
- Στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Στα φωτοβολταϊκά συστήματα
- Στα παλμοτροφοδοτικά ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών κυκλωμάτων τα οποία είναι τροφοδοτικά υψηλής συχνότητας και υψηλής απόδοσης
- Στη διόρθωση του συντελεστή ισχύος ανορθωτικών διατάξεων με διόδους
- Στα συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικούς σιδηρόδρομους, σε υπόγειους σιδηρόδρομους, ηλεκτρικά αυτοκίνητα και σε βιομηχανικές εφαρμογές που χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος
- Στα συστήματα τροφοδοσίας όπου το βάρος και μέγεθος είναι κρίσιμα.
- Στις οικιακές συσκευές και στις διατάξεις φωτισμού
- Στα αμυντικά συστήματα
- Στις ηλεκτρονικές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές που τροφοδοτούνται κυρίως από συσσωρευτές
- Στα συστήματα ελέγχου τυλιγμάτων διέγερσης ηλεκτρικών κινητήρων

3.3 Τοπολογίες ηλεκτρονικών μετατροπών συνεχούς τάσης σε συνεχή

Οι DC μετατροπείς πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις όταν σχεδιάζονται σε ένα σύστημα γι' αυτό και κατηγοριοποιούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές χωρίζονται ανάλογα με το αν η τάση εξόδου τους είναι γαλβανικά απομονωμένη από την τάση εισόδου και ανάλογα με την σχέση (μεγαλύτερη-μικρότερη) της τάσης εξόδου και της τάσης εισόδου.

Στη πρώτη κατηγορία χωρίζονται σε γαλβανικά απομονωμένες και μη-γαλβανικά απομονωμένες.

1. Στις γαλβανικά απομονωμένες τοπολογίες χρησιμοποιείται μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας. Εκτός της γαλβανικής απομόνωσης εισόδου-εξόδου, με κατάλληλη επιλογή λόγου πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κάθε φορά, καθορίζεται η ανύψωση ή μη της τάσης εξόδου.

2. Στις μη γαλβανικά απομονωμένες τοπολογίες λείπει ο μετασχηματιστής γαλβανικής απομόνωσης, γεγονός που τις καθιστά λιγότερο ογκώδεις. Αυτές χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις αυτόνομες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις

στις οποίες συνδέονται με DC κινητήρα άντλησης νερού ή και φορτιστή συσσωρευτών.

Στη δεύτερη κατηγορία οι DC μετατροπείς χωρίζονται στα παρακάτω :

1.Μετατροπείς υποβιβασμού τάσης (Buck Converter):

Οι μετατροπείς αυτοί παράγουν στην έξοδό τους τάση με μέση τιμή μικρότερη από την συνεχή τάση που εφαρμόζεται στην είσοδό του.

2.Μετατροπείς ανύψωσης τάσης (Boost Converter)

Οι μετατροπείς αυτοί παράγουν στην έξοδό τους τάση με μέση τιμή μεγαλύτερη από την συνεχή τάση που εφαρμόζεται στην είσοδό του.

3.Μετατροπείς υποβιβασμού - ανύψωσης τάσης(Boost-Buck Converter)-Μικτός Μετατροπέας

Οι συγκεκριμένοι μετατροπείς μοιάζουν πολύ και με τους δύο παραπάνω μετατροπείς και κυκλωματικά και στα χαρακτηριστικά τους. Δηλαδή αυτός μπορεί να έχουν τιμή τάσης εξόδου μικρότερη από την τάση εισόδου και να έχει όμως και τιμή τάσης εξόδου μεγαλύτερη από την τιμή της τάσης εισόδου, κάτι το οποίο μπορεί να επιτύχει με την μεταβολή του βαθμού χρησιμοποίησης του μετατροπέα.

4.Μετατροπείς Cuk

Αυτοί οι μετατροπείς έχουν ακριβώς την ίδια λειτουργία με τον ακριβώς παραπάνω μετατροπέα ακόμα και οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της τάσης εξόδου είναι ίδιες με τον μετατροπέα υποβιβασμού - ανύψωσης τάσης. Απλά αυτοί διαθέτουν ένα πηνίο ακόμα και έναν πυκνωτή που βοηθούν να αποκοπούν οποιεσδήποτε παρασιτικές τάσεις δημιουργούνται και πλεονεκτούν στο ότι παρέχουν συνεχή ένταση ρεύματος στην έξοδο τους χωρίς να εμφανίζονται αυξομειώσεις (ρυθμιζόμενη πηγή έντασης).

5.Μετατροπείς με πλήρη γέφυρα

Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται συχνά, όταν απαιτούνται υψηλές DC τάσεις ή όταν πρέπει να παρέχουν απομόνωση στο μέσο, στις εφαρμογές υψηλής ισχύος, όπως στις παροχές ηλεκτρικού ρεύματος κεντρικών υπολογιστών, τηλεπικοινωνίες, στα συστήματα φόρτισης μπαταριών και στα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας.

Από τους παραπάνω πέντε μετατροπείς μόνο οι δύο πρώτοι, υποβιβασμού και ανύψωσης, αποτελούν τις βασικές τοπολογίες και χρησιμοποιούνται ευρύτερα. Εξάλλου όπως αναφέρθηκε τόσο ο μικτός όσο και ο Cuk είναι συνδυασμοί των βασικών τοπολογιών και ακόμα και ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα προκύπτει από τον μετατροπέα υποβιβασμού.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί και ότι ανάλογα με την επιθυμητή κατεύθυνση της ισχύος, οι μετατροπείς χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- ❖ Μονοκατευθυντήριοι, στους οποίους η μεταφορά ισχύος γίνεται από την είσοδο προς την έξοδο.
- ❖ Αμφίδρομοι, στους οποίους η μεταφορά ισχύος γίνεται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση

3.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ DC-DC

Στους DC-DC μετατροπείς ανεξάρτητα από τις αυξομειώσεις της τάσης εισόδου η μέση τάση εξόδου πρέπει να βρίσκεται πάντα σε μια επιθυμητή τιμή (επιθυμητό επίπεδο τάσης) γι' αυτό και πρέπει να ελέγχεται. Οι μετατροπείς διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους διακόπτες για το μετασχηματισμό της DC τάσης από ένα επίπεδο σε ένα άλλο.

Η μέση τάση εξόδου, με δεδομένη τάση εισόδου, ρυθμίζεται ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης και σβέσης (t_{on} και t_{off}) των διακοπών. Η μέση τιμή V_o της τάσης εξόδου εξαρτάται από τους χρόνους t_{on} και t_{off} . Υπάρχουν δύο μέθοδοι ελέγχου της τάσης εξόδου:

1. Με σταθερή συχνότητα μετάβασης (και συνεπώς σταθερή περίοδο μετάβασης $T_s = t_{on} + t_{off}$) και ρύθμιση της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse-Width Modulation, PWM) και αυτή θα χρησιμοποιηθεί και στους δύο μετατροπείς που θα συνδεθούν οι τεχνολογίες DER της διάταξης που θα παρουσιαστεί.

2. Με μεταβαλλόμενη συχνότητα και περίοδο, κατά τη διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε μετατροπείς DC-DC που χρησιμοποιούν thyristors με εξαναγκασμένη μετάβαση. Αυτή η μέθοδος είναι πιο γενική και γι' αυτό δε θα αναλυθεί περισσότερο.

3.4.1 Μέθοδος Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM)

Η διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος παροχής ενδιάμεσων ποσών ηλεκτρικής ισχύος μεταξύ πλήρους τάσης και μηδενικής τάσης. Ένας απλός διακόπτης ισχύος με μία τυπική πηγή παρέχει πλήρη ισχύ μόνο όταν ο διακόπτης είναι κλειστός.

Είναι μία σχετικά πρόσφατη τεχνική που υλοποιείται από σύγχρονους ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος.

Βασικά, ένα μεταβλητό PWM σύστημα ισχύος διακόπτει την ισχύ γρήγορα μεταξύ πλήρως on και πλήρως off. Σε κάθε περίπτωση το ποσοστό

εναλλαγών είναι πολύ πιο μεγάλο σε σχέση με το ποσοστό που θα μπορούσε να επηρεάσει το φορτίο, δηλαδή τη συσκευή που καταναλώνει την ισχύ. Στην πράξη, εφαρμόζοντας πλήρως την ισχύ, αυτό δεν θα προκαλέσει κανένα πρόβλημα για ένα μέρος χρόνου. Γενικά, η PWM είναι πολύ πρακτική.

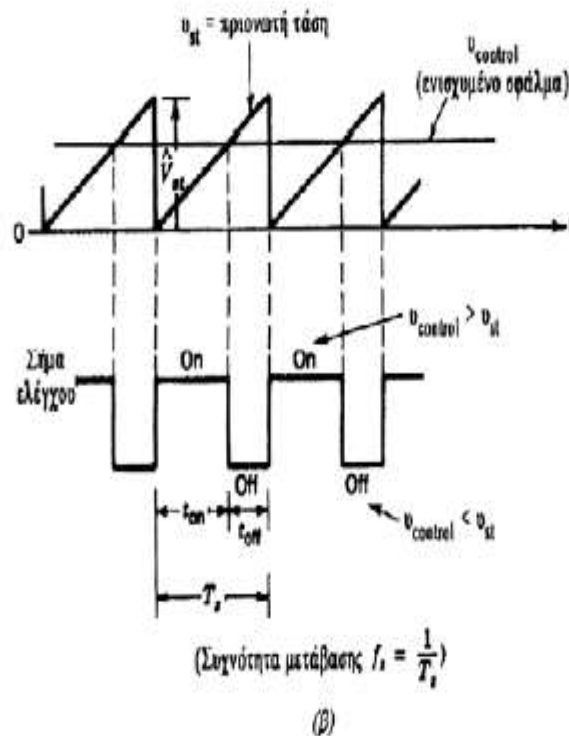
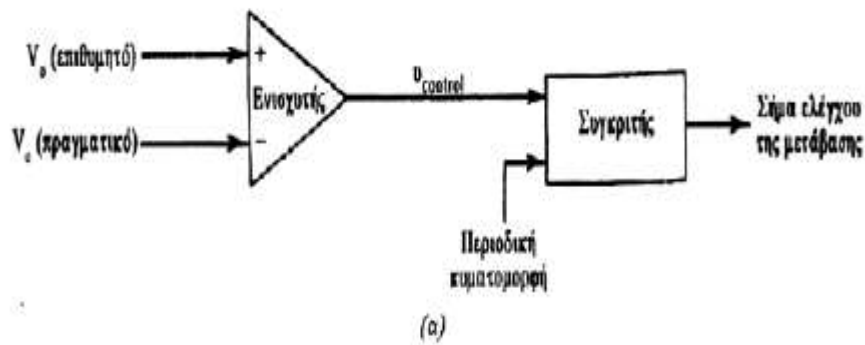
Ο όρος «κύκλος λειτουργίας» περιγράφει την αναλογία του χρόνου on ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ένας χαμηλός κύκλος λειτουργίας αντιστοιχεί σε χαμηλή ισχύ, διότι η ισχύς είναι off για μεγαλύτερο διάστημα. Ο κύκλος λειτουργίας περιγράφεται με ποσοστό επί της 100 που η ισχύς είναι on. Η τεχνική PWM λειτουργεί καλά με ψηφιακούς ελεγκτές, διότι, λόγω της λογικής on /off, μπορούν εύκολα να ενεργοποιήσουν τον κύκλο λειτουργίας. Η τεχνική PWM ενός σήματος ή πηγής ισχύος εμπεριέχει τη διαμόρφωση του κύκλου λειτουργίας της για να μεταφέρει πληροφορίες σε ένα κανάλι επικοινωνίας ή να ελέγξει το ποσό της ισχύος που αποστέλλεται στο φορτίο [16].

Στη διαμόρφωση με σταθερή συχνότητα μετάβασης, το σήμα ελέγχου του διακόπτη, το οποίο ελέγχει την κατάσταση του, παράγεται με η σύγκριση του επιπέδου τάσης του σήματος ελέγχου με μια περιοδική κυματομορφή σταθερού πλάτους (σχήμα 3.1). Το σήμα της τάσης ελέγχου λαμβάνεται ενισχύοντας το σφάλμα ή τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τάσης εξόδου και της επιθυμητής τιμής. Συγκεκριμένα η συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής είναι αυτή που καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης.

Χρησιμοποιώντας αυτά τα δύο σήματα ως είσοδος σε ένα συγκριτή, το ενισχυμένο σήμα σφάλματος, που μεταβάλλεται πολύ αργά με τον χρόνο σε σχέση με τη συχνότητα μετάβασης, θα είναι μεγαλύτερο από την πριονωτή κυματομορφή και το σήμα ελέγχου του διακόπτη θα γίνεται υψηλό (high), προκαλώντας το κλείσιμο του διακόπτη. Διαφορετικά, ο διακόπτης θα είναι ανοιχτός[17]. Η σχετική διάρκεια αγωγής μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (3.1)$$

Αυτό το σήμα PWM μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των διακοπών που συνδέονται με μία σταθερή υψηλή γραμμή τάσης Dc, το οποίο θα επαναφέρει το σήμα στην κατάλληλη τάση.

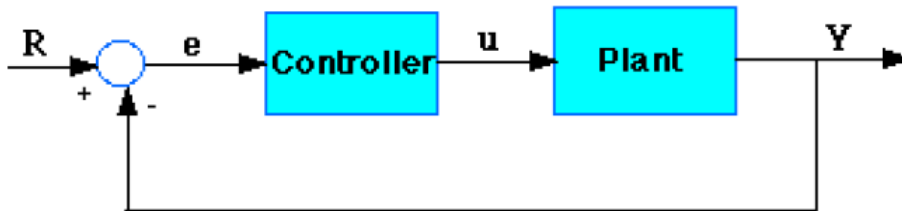


Σχήμα 3.1 Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού α) λειτουργικό διάγραμμα β) σήματα συγκριτή[18]

3.4.2 Σύστημα ελέγχου (PID)

Ένα σύστημα ελέγχου είναι μια συσκευή ή το σύνολο διατάξεων που ρυθμίζουν τη συμπεριφορά των άλλων συσκευών ή συστημάτων. Ένας μηχανισμός ελέγχου είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται από ένα σύστημα ελέγχου. Υπάρχουν πολλοί χρήστες των συστημάτων ελέγχου στον ηλεκτή του μετατροπέα όπως ο ελεγκτής PI (αναλογικός-ολοκληρωτικός), ο οποίο και χρησιμοποιείται πιο συχνά και ο PID (αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός) ο οποίος χρησιμοποιείται λιγότερο στην πράξη. Στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στον κάθε όρο και τι αντιπροσωπεύει:

P : αναλογικός όρος
I : ολοκληρωτικός όρος
D: διαφορικός όρος



Σχήμα 3.2 Κλειστός βρόχος ελέγχου, όπου Plant: Το σύστημα που θα ελεγχθεί, Controller (Ελεγκτής): Παρέχει τη διέγερση στο σύστημα προς έλεγχο. Είναι σχεδιασμένος για να ελέγχει την συνολική συμπεριφορά του συστήματος [18].

Η μεταβλητή (e) του παραπάνω σχήματος αντιπροσωπεύει το σφάλμα παρακολούθησης, δηλαδή την διαφορά ανάμεσα στην τιμή της επιθυμητής εισόδου (R) και σε εκείνη της πραγματικής εξόδου (Y). Αυτό το σήμα σφάλματος (e) θα σταλεί στον ελεγκτή και αυτός θα υπολογίσει ανάλογα με το αν είναι PI ή PID τόσο την παράγωγο όσο και το ολοκλήρωμα αυτού του σήματος. Το σήμα (u) αμέσως μετά τον ελεγκτή είναι αντίστοιχα πλέον ίσο με το αναλογικό κέρδος (K_p) επί την τιμή του σφάλματος, συν το ολοκληρωτικό κέρδος (K_i) επί το ολοκλήρωμα του σφάλματος, συν το διαφορικό κέρδος (K_d) επί την παράγωγο του σφάλματος (αν έχω PID). Το σήμα αυτό θα σταλεί στο σύστημα προς έλεγχο και στη συνέχεια θα ληφθεί ένα νέο σήμα εξόδου (Y). Η νέα έξοδος (Y) θα σταλεί ξανά πίσω στο αισθητήριο για να ανιχνεύσει και αυτό με τη σειρά του το νέο σήμα σφάλματος (e). Ο ελεγκτής θα πάρει αυτό το νέο σήμα σφάλματος και θα υπολογίσει ξανά την παράγωγο και το ολοκλήρωμα και η ίδια διαδικασία θα επαναλαμβάνεται συνέχεια έως ότου καταφέρουμε το μηδενισμό του σφάλματος.

3.4.2.1 Τα χαρακτηριστικά των ελεγκτών P, I και D

Η χρησιμοποίηση ενός αναλογικού ελεγκτή (K_p), θα έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης και την μείωση, αλλά ποτέ την εξάλειψη, του μόνιμου σφάλματος. Ο ολοκληρωτικός έλεγχος (K_i) θα εξαλείψει το μόνιμο σφάλμα, αλλά θα χειροτερέψει την μεταβατική απόκριση (αριθμός των ταλαντώσεων μέχρι την τελική ισορροπία του συστήματος). Ο διαφορικός έλεγχος (K_d) θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σταθερότητας του

συστήματος, μειώνοντας την υπερύψωση και βελτιώνοντας την μεταβατική απόκριση. Τα αποτελέσματα της επίδρασης καθενός από τους ελεγκτές K_p, K_d και K_i σε ένα σύστημα κλειστού βρόγχου, συνοψίζονται στο παρακάτω πίνακα.

Αντίδραση Ελεγκτή	Χρόνος Ανύψωσης	Υπερύψωση	Χρόνος Αποκατάστασης	Μόνιμο Σφάλμα
K _p	Μείωση	Αύξηση	Μικρή Αλλαγή	Μείωση
K _i	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
K _d	Μικρή Αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή Αλλαγή

Σχήμα 3.3 Χαρακτηριστικά K_p,K_i και K_d [18]

Βέβαια αυτοί οι συσχετισμοί μπορεί να μην είναι πολύ ακριβείς, επειδή οι ελεγκτές K_p, K_d και K_i αλληλοεξαρτώνται. Στην πραγματικότητα, η αλλαγή μίας από αυτές τις μεταβλητές, μπορεί να αλλάξει την επίδραση και των άλλων δύο μεταβλητών. Για τον λόγο αυτό, ο παραπάνω πίνακας θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνον ως σημείο αναφοράς όταν προσδιορίζονται οι τιμές για τους ελεγκτές K_p, K_d και K_i [18].

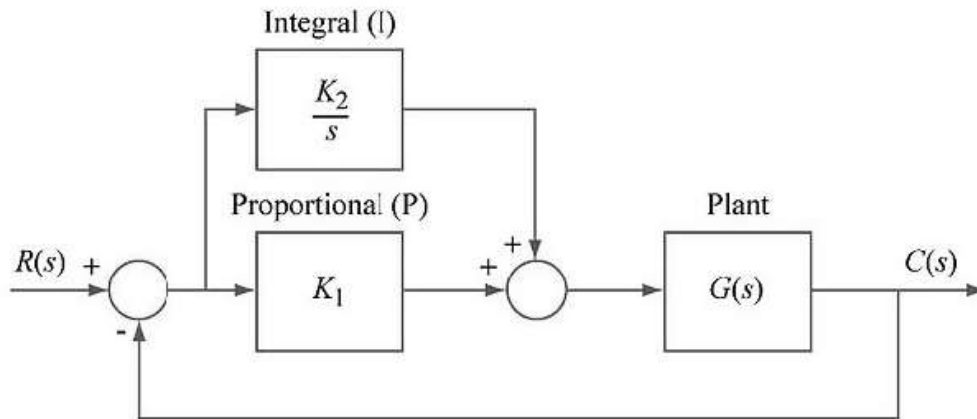
3.4.2.2 Ο αναλογικός – ολοκληρωτικός ελεγκτής

Ο Ελεγκτής PI προτείνεται για να βελτιώσει την απόδοση του διακόπτη του μετατροπέα. Το duty cycle του μετατροπέα ελέγχεται από τον PI ελεγκτή και αυτό συμβαίνει για να παρέχεται η βέλτιστη απόδοση σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός έλεγχος είναι μια παραδοσιακή μέθοδος γραμμικού ελέγχου που χρησιμοποιείται στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές. Οι ελεγκτές PI συνήθως σχεδιάζονται για DC-AC μετατροπείς καθώς και DC-DC μετατροπείς και χρησιμοποιούν τις πρότυπες τεχνικές απόκρισης συχνότητας και λειτουργούν με βάση το μικρό πρότυπο σήματος του μετατροπέα.

Μια γραφική παράσταση Bode χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό ώστε να αποκτηθεί το επιθυμητό κέρδος βρόχου, ο διαχωρισμός συχνοτήτων και το περιθώριο φάσης. Η σταθερότητα του συστήματος είναι εγγυημένη από ένα επαρκές περιθώριο φάσης. Ωστόσο, οι γραμμικό PID και PI ελεγκτές μπορούν να σχεδιαστούν μόνο για ένα σημείο ονομαστικής λειτουργίας. Στο μετατροπέα ανύψωσης ένα μικρό σήμα αλλάζει το μοντέλο όταν το σημείο λειτουργίας ποικίλλει. Οι πόλοι και ένα δεξιό ήμισυ επίπεδο μηδέν, καθώς και το μέγεθος της απόκρισης της συχνότητας είναι όλα εξαρτώμενα από τον λόγο κατάτμησης (duty cycle). Γι' αυτό το λόγο κιόλας, είναι δύσκολο για τον

ελεγκτή PID να ανταποκρίνεται καλά στις αλλαγές του σημείου λειτουργίας. Ο ελεγκτής PI έχει σχεδιαστεί για το μετατροπέα ανύψωσης για τη λειτουργία κατά τη διάρκεια μιας παροδικής εκκίνησης και σταθερής κατάσταση, αντίστοιχα [19].



Σχήμα 3.4 Μπλοκ διάγραμμα του PI ελεγκτή

3.5 Μετατροπέας ανύψωσης

Όπως αναφέρει και το όνομα του ο μετατροπέας αυτός ανυψώνει την τάση εισόδου παρέχοντας μια συνεχή τάση εξόδου σε υψηλότερη τιμή.

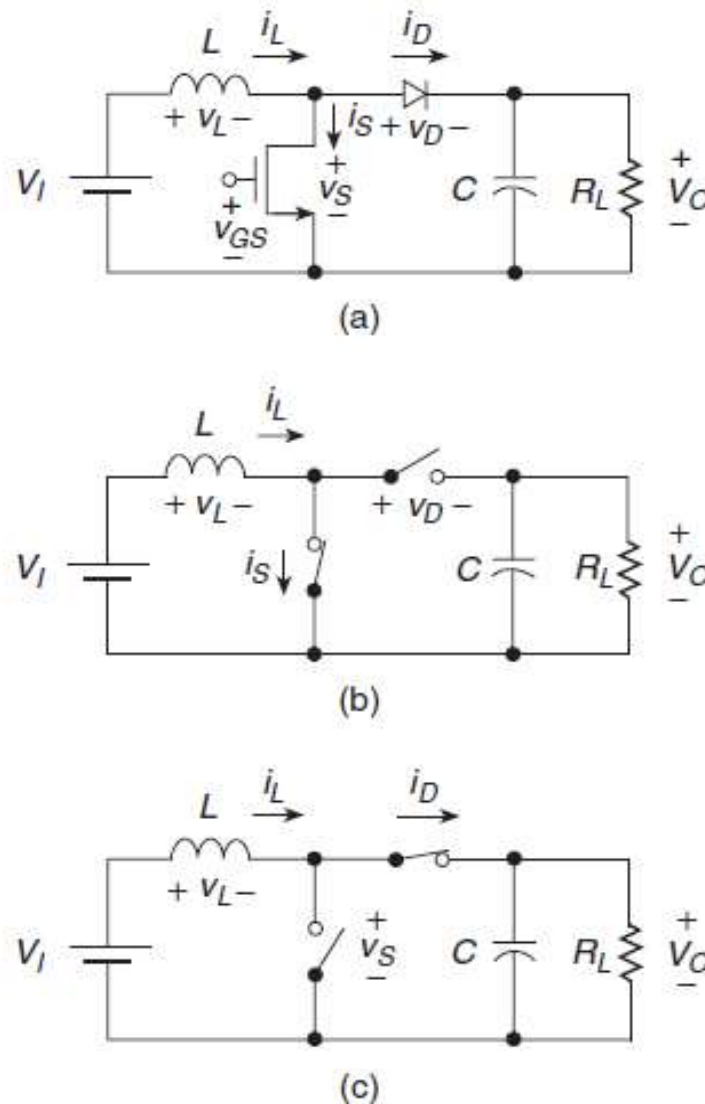
3.5.1 Μοντελοποίηση μετατροπέα ανύψωσης

3.5.1.1 Περιγραφή Κυκλώματος

Ο μετατροπέας (όπως αναλύεται στο βιβλίο “ Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters” πηγή [20]) αποτελείται από ένα πηνίο L, ένα τρανζίστορ (MOSFET), μία δίοδος D, ένα πυκνωτή φίλτρου C και μια αντίσταση R_L φορτίων (Σχήμα 3.5α). Ο διακόπτης S ενεργοποιείται (on) και απενεργοποιείται (off) στη συχνότητα μεταγωγής $f_s = 1 / T$ με την αναλογία $D = t_{on} / T$, όπου το t_{on} είναι το χρονικό διάστημα, όταν ο διακόπτης S είναι σε κατάσταση on, T η περίοδος παλμοδότησης και D η σχετική διάρκεια αγωγής ή αλλιώς λόγος κατάτμησης.

Ο μετατροπέας ανάλογα με την κυματομορφή του ρεύματος του πηνίου μπορεί να λειτουργεί με δύο τρόπους, είτε σε συνεχή λειτουργία (CCM) (η οποία και θα αναλυθεί καθώς ο μετατροπέας της προσομοίωσης έχει γίνει για συνεχή λειτουργία) είτε σε ασυνεχή (DCM).

Στο παρακάτω Σχήμα 3.5 (b-c) παρουσιάζεται ένας μετατροπέας ανύψωσης σε CCM λειτουργία όταν ο διακόπτης S είναι ON και η διόδος είναι OFF και όταν ο διακόπτης είναι στη θέση OFF και η διόδος είναι ON, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.5 α) Κύκλωμα β) Ισοδύναμο κύκλωμα όταν ο διακόπτης είναι στη θέση ON και η διόδος είναι OFF(c) Ισοδύναμο κύκλωμα όταν ο διακόπτης είναι στη θέση OFF και η διόδος είναι ON

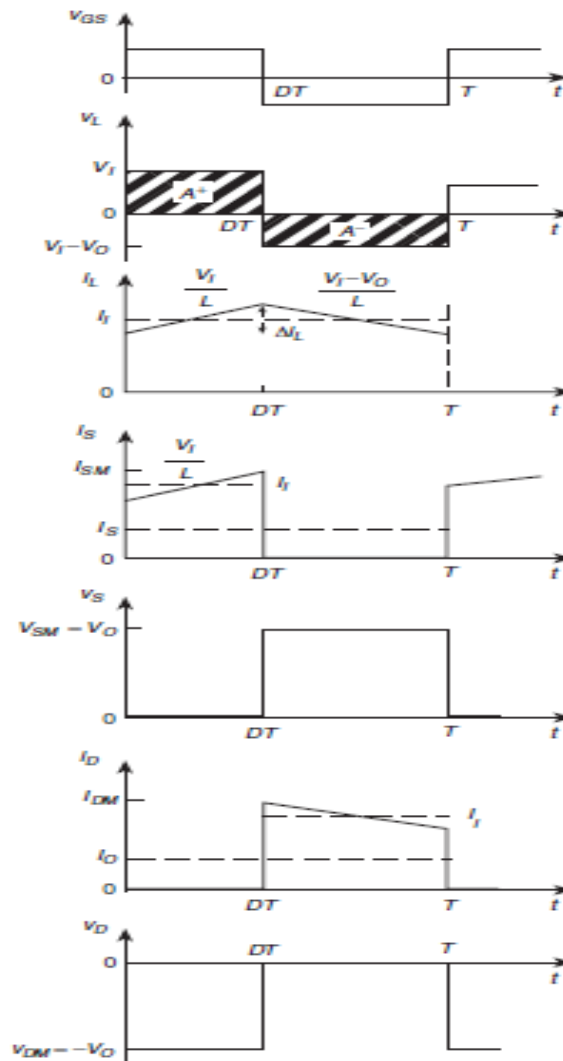
Για το χρονικό διάστημα $0 < t \leq DT$, ο διακόπτης είναι στη θέση ON. Επομένως, η τάση κατά μήκος της διόδου είναι $V_d = -V_o$, όπου η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη. Η τάση στα άκρα του επαγωγέα είναι $V_L = V_I$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το ρεύμα του πηνίου να αυξάνεται γραμμικά με κλίση V_I / L , όπως παράλληλα αυξάνεται και η μαγνητική ενέργεια. Επίσης, το ρεύμα που περνά από το διακόπτη είναι ίσο με το ρεύμα του πηνίου.

Έπειτα σε χρόνο $t = DT$, ο διακόπτης απενεργοποιείται. Το πηνίο λειτουργεί ως πηγή ρεύματος και διόδος τίθεται σε κατάσταση αγωγής. Τώρα, η τάση στα άκρα του επαγωγέα είναι $V_L = V_I - V_o < 0$. Έτσι το ρεύμα του πηνίου μειώνεται με κλίση $(V_I - V_o) / L$. Το ρεύμα της διόδου ισούται με το ρεύμα του

πηνίου. Κατά την διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, η ενέργεια μεταφέρεται από το πηνίο L στον πυκνωτή φίλτρου C και στην αντίσταση φορτίου R_L .

Σε χρόνο $t = T$, ο διακόπτης ξαναενεργοποιείται και έτσι τερματίζεται ένας κύκλος.

Οι εξιδανικευμένες κυματομορφές των ρευμάτων και τάσεων που εξηγούν την αρχή της λειτουργίας του μετατροπέα απεικονίζονται παρακάτω.



Σχήμα 3.6 Κυματομορφές ρεύματος και τάσης στη κατάσταση συνεχής λειτουργίας

3.5.1.2 Παραδοχές για τη σχεδίαση του μετατροπέα

Η ανάλυση του μετατροπέα ανύψωσης του σχήματος ξεκινά κάνοντας κάποιες παραδοχές

1. Το MOSFET ισχύος και η διόδος είναι ιδανικοί διακόπτες.

2. Η χωρητικότητα τρανζίστορ εξόδου, η χωρητικότητα της διόδου, και οι αντιστάσεις είναι (και ως εκ τούτου απώλειες μεταγωγής) είναι μηδέν.
3. Τα παθητικά στοιχεία είναι γραμμικά, χρονικά αναλλοίωτα και ανεξάρτητα από τη συχνότητα.
4. Η σύνθετη αντίσταση εξόδου της πηγής τάσεως V_I εισόδου είναι μηδέν για τα DC συστατικά.

3.5.1.3 Συνάρτηση μεταφοράς στη κατάσταση συνεχούς λειτουργίας

Η μέση τιμή της τάσης στα άκρα της επαγωγής σε σταθερή κατάσταση είναι :

$$V_{L(AV)} = \frac{1}{T} \int_0^T v_L dt = 0 \quad (3.2)$$

Όπου σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 3.6) έχουμε :

$$V_I D T = (V_0 - V_I)(1 - D)T \quad (3.3)$$

Από όπου προκύπτει η σχέση εισόδου-εξόδου με το λόγο κατάμησης D :

$$V_0 = \frac{V_I}{1-D} \quad (3.4)$$

Καθώς και συνάρτηση μεταφοράς της τάσης και του ρεύματος

$$M_{VDC} = \frac{V_0}{V_I} = \frac{I_I}{I_0} = \frac{1}{1-D} \quad (3.5)$$

$$M_{IDC} = \frac{I_{I0}}{I_I} = 1 - D \quad (3.6)$$

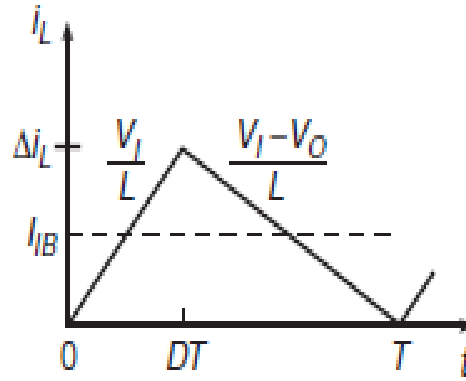
Το φάσμα της συνάρτηση μεταφοράς της τάσης M_{VDC} του DC του μετατροπέα χωρίς απώλειες είναι $0 < M_{VDC} < \infty$.

Συνεπώς, από τις σχέσεις (3.5) και (3.6) μπορούμε να βρούμε ότι

$$D = 1 - \frac{1}{M_{VDC}} \quad (3.7) \quad \text{και} \quad D = 1 - M_{IDC} \quad (3.8)$$

3.5.1.4 Όριο μεταξύ συνεχής και ασυνεχής λειτουργίας

Στο σημείο αυτό θα καθορισθεί το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχής κατάστασης λειτουργίας. Συγκεκριμένα στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος στο όριο μεταξύ λειτουργίας CCM και DCM.



Σχήμα 3.7 Κυματομορφή ρεύματος στο όριο των δύο λειτουργιών

Η κυματομορφή δίνεται από την εξίσωση

$$i_L = \frac{V_I}{L} t \quad (3.9)$$

όπου $0 < t < DT$ και

$$\Delta i_L = i_L(DT) = \frac{V_I}{L} DT = \frac{V_O D}{f_s L M_{VDC}} = \frac{V_O D(1-D)}{f_s L} \quad (3.10)$$

για $t = DT$

Το ρεύμα εισόδου στο όριο μεταξύ CCM-DCM είναι :

$$I_{IB} = \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_O D(1-D)}{2f_s L} \quad (3.11)$$

το οποίο λαμβάνει μέγιστη τιμή για $D=1/2$.

Από την παραπάνω σχέση μεταξύ ρεύματος εισόδου-εξόδου και λόγου κατάτμησης μπορεί να υπολογιστεί και το ρεύμα εξόδου στο όριο CCM-DCM, καθώς επίσης και η αντίσταση φορτίου.

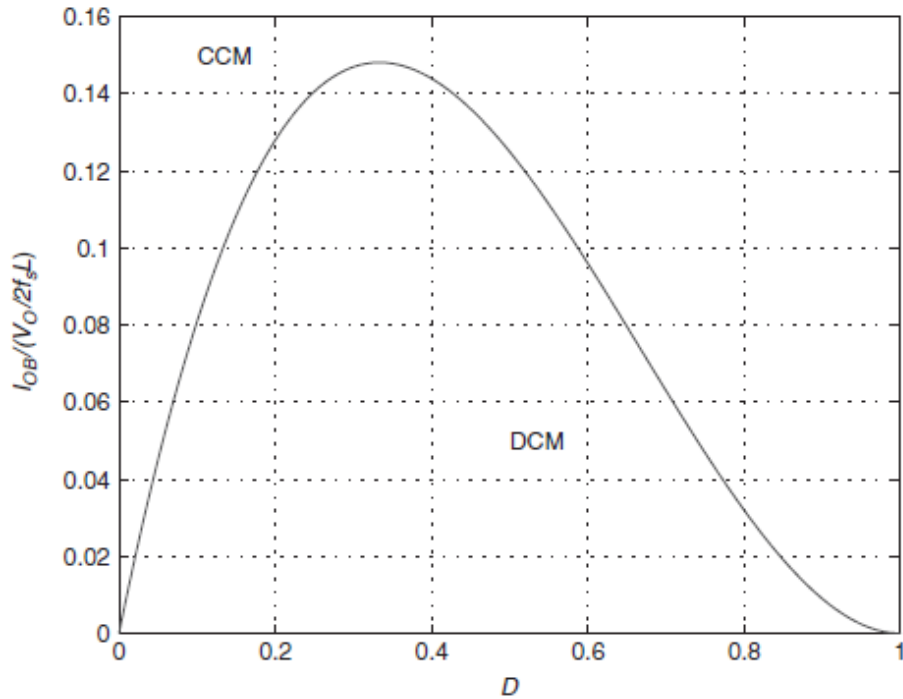
Το ρεύμα εξόδου είναι :

$$I_{OB} = I_{IB} (1 - D) = \frac{V_O D(1-D)^2}{2f_s L} \quad (3.12)$$

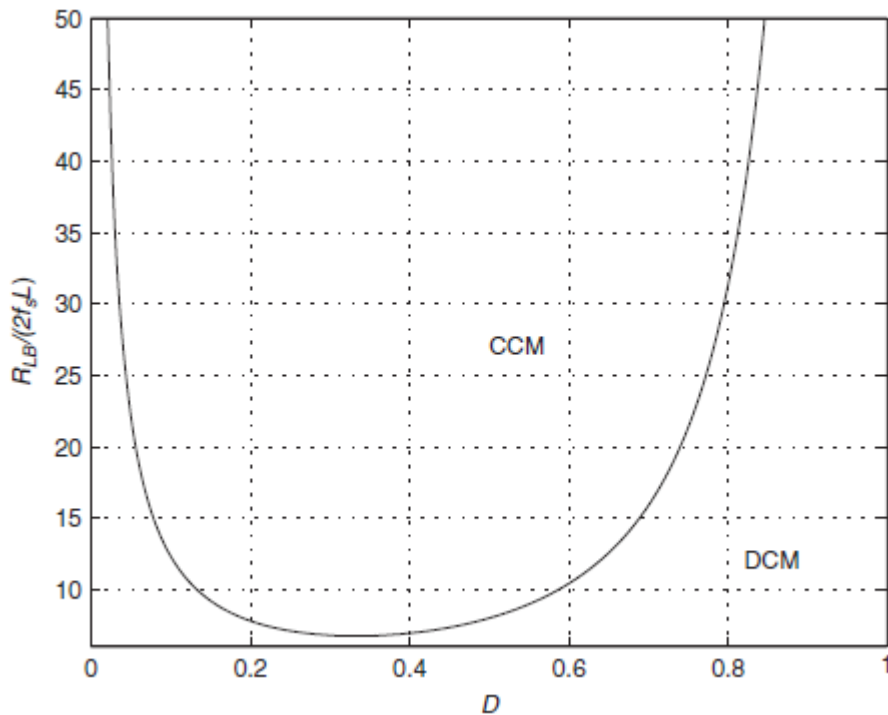
Και η αντίσταση φορτίου είναι :

$$R_{LB} = \frac{V_O}{I_{OB}} = \frac{2f_s L}{D(1-D)^2} = \frac{2f_s M_{VDC}^3}{M_{VDC} - 1} \quad (3.13)$$

Στο σημείο αυτό φαίνονται στα παρακάτω σχήματα η κανονικοποιημένη καμπύλη ρεύματος εξόδου στο όριο CCM / DCM συνάρτηση του D για τον μετατροπέα ανύψωσης (Σχήμα 3.8) καθώς και η κανονικοποιημένη αντίσταση φορτίου στο όριο CCM / DCM συνάρτηση πάλι του D(Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8 Καμπύλη κανονικοποιημένου ρεύματος εξόδου στο όριο



Σχήμα 3.9 Κανονικοποιημένη αντίστασης φορτίου στο όριο

Για να υπολογίσουμε τη μέγιστη τιμή του ρεύματος εξόδου, εξισώνουμε την παραγωγό του με το 0 και βρίσκουμε ότι :

$$\frac{dI_{0B}}{dD} = \frac{V_0}{2f_s L} (1 - 4D + 3D^2) \quad (3.14)$$

Όπου προκύπτει πως η μέγιστη τιμή λαμβάνεται για $D=1/3$, η οποία αντιστοιχεί σε τιμή συνάρτησης μεταφοράς τάσης $M_{VDC} = 1.5$.

Έτσι με αντικατάσταση του D στον τύπο του ρεύματος εξόδου βρίσκουμε ότι το μέγιστο ρεύμα εξόδου δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$I_{0Bmax} = \frac{2}{27} \frac{V_0}{f_s L_{min}} \quad (3.15)$$

Και υπολογίζεται η ελάχιστη αντίσταση του φορτίου εξόδου στο όριο η οποία ισούται με :

$$R_{LBmin} = \frac{V_0}{I_{0Bmax}} = 13.5f_s L_{min} \quad (3.16)$$

Επομένως, χρησιμοποιώντας τη σχέση ότι $I_{0Bmax} = I_{0Bmin} = \frac{V_0}{R_{Lmax}}$, υπολογίζεται η ελάχιστη τιμή της αυτεπαγωγής L , για την οποία εξασφαλίζεται ότι ο μετατροπέας ανύψωσης βρίσκεται σε CCM λειτουργία για οποιαδήποτε τιμή του D .

Η τιμή αυτή ,λοιπόν , δίνεται από τη σχέση :

$$L_{min} = \frac{2}{27} \frac{V_0}{f_s I_{0Bmax}} = \frac{2}{27} \frac{R_{Lmax}}{f_s} \quad (3.17)$$

Όμως ανάλογα με την τιμή του D_{max} και του D_{min} σε σχέση με την τιμή $1/3$, διακρίνονται δύο περιπτώσεις.

Συγκεκριμένα:

➤ αν $D_{max} < 1/3$ τότε :

$$I_{0Bmax} = \frac{V_0 D_{max} (1 - D_{max})^2}{2f_s L_{min}} \quad (3.18 \alpha)$$

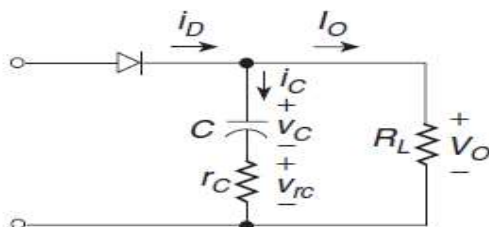
$$L_{min} = \frac{R_{Lmax} D_{max} (1 - D_{max})^2}{2f_s} \quad (3.18b)$$

➤ αν $D_{min} > 1/3$ τότε :

$$I_{0Bmax} = \frac{V_0 D_{min} (1 - D_{min})^2}{2f_s L_{min}} \quad (3.19a)$$

$$L_{min} = \frac{R_{Lmax} D_{min} (1 - D_{min})^2}{2f_s} \quad (3.19b)$$

Χρειάζεται ,επιπλέον να βρεθεί και η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή ώστε ο μετατροπέας να λειτουργεί σε CCM κατάσταση. Στη παρακάτω εικόνα



Σχήμα 3.10 Ισοδύναμο κύκλωμα του τμήματος εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης

παρατηρούμε πως η DC συνιστώσα του ρεύματος διόδου ρέει μέσω της αντίστασης φορτίου R_L . Η AC συνιστώσα του ρεύματος της διόδου χωρίζεται μεταξύ του κλάδου του πυκνωτή και της αντίστασης του φορτίου. Στην πράξη, ο πυκνωτής είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε η αντίσταση σε σειρά με το πυκνωτή να είναι πολύ μικρότερη από ό, τι είναι η αντίσταση φορτίου. Κατά συνέπεια, το ρεύμα μέσω του πυκνωτή είναι περίπου ίσο με την AC συνιστώσα του ρεύματος διόδου. Η μέγιστη κορυφή σε κορυφή τιμή του ρεύματος πυκνωτή είναι λοιπόν :

$$I_{C_{pp}} = I_{DM_{max}} \approx I_{max} = \frac{I_{O_{max}}}{1-D_{max}} \quad (3.20)$$

Με αποτέλεσμα η τιμή από κορυφή σε κορυφή της τάσης είναι:

$$V_{rc_{pp}} = r_C I_{C_{pp}} = r_C I_{DM_{max}} \approx \frac{r_C I_{O_{max}}}{1-D_{max}} \quad (3.21)$$

Η τιμή από κορυφή σε κορυφή της τάσης κυμάτωσης εξόδου V_r συνήθως διευκρινίζεται ($V_r = 1\% V_o$, όπου V_o γνωστό).

Επομένως, η μέγιστη κορυφή σε κορυφή τιμή της AC συνιστώσας της τάσης κατά μήκος της χωρητικότητας C είναι

$$V_{C_{pp}} \approx V_r - V_{rc_{pp}} \quad (3.22)$$

Ή αλλιώς δίνεται από τη σχέση :

$$V_{C_{pp}} = \frac{Q_{max}}{C_{min}} = \frac{I_{O_{max}} D_{max} T}{C_{min}} = \frac{V_o D_{max}}{f_s R_{Lmin} C_{min}} \quad (3.23)$$

Όπου Q_{max} είναι η μείωση φορτίου κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος από το μηδέν έως το DT. Αναδιατάσσοντας τον τύπο παίρνουμε την ελάχιστη τιμή του πυκνωτή στο όριο, ώστε να βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία. Η εξίσωση που δίνει αυτή την τιμή είναι :

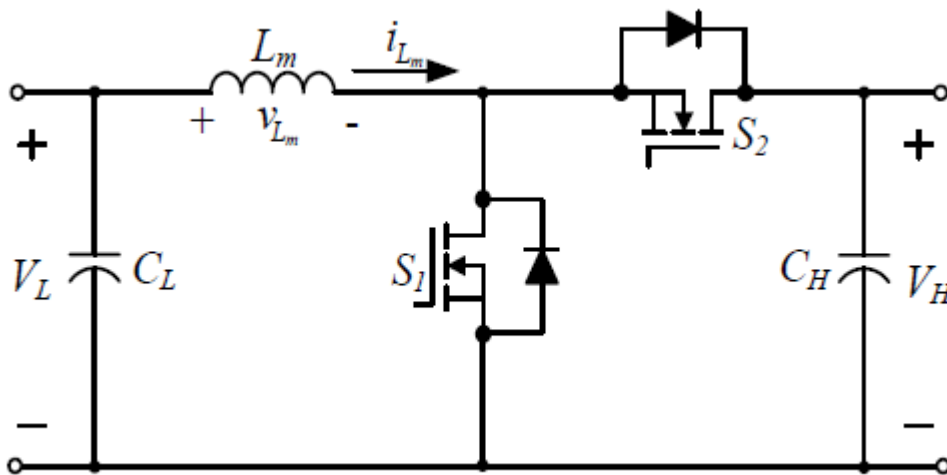
$$C_{\min} = \frac{I_{0\max} D_{\max}}{f_s V_{C\text{pp}}} = \frac{V_o D_{\max}}{f_s R_{L\min} V_{C\text{pp}}} \quad (3.24)$$

Και η ελάχιστη συχνότητα του φίλτρου εξόδου είναι

$$f_{0\min} = \frac{1}{2\pi C R_{L\max}} \quad (3.25)$$

3.5.2 Μοντελοποίηση αμφίδρομου μετατροπέα ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης

Ο αμφίδρομος μετατροπέας που αναλύεται σε αυτό το κεφάλαιο απεικονίζεται στο (Σχήμα 3.11). Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από τη σύνδεση ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης έχοντας κοινό στοιχείο το πηνίο. Δηλαδή, πρόκειται για έναν συμμετρικό μετατροπέα ο οποίος μπορεί άγει και προς τις δύο κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.11 Αμφίδρομος μετατροπέας [21]

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μετατροπέα είναι ότι με κατάλληλη παλμοδότηση μπορεί να λειτουργήσει σαν μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (buck), σαν μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost) και σαν μετατροπέας υποβιβασμού/ανύψωσης τάσης (buck /boost), χωρίς καμία τροποποίηση της τοπολογίας του.

Ο μετατροπέας ανύψωσης αναλύθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο οπότε στο σημείο αυτό θα περιγραφεί συνοπτικά η λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού και θα παρουσιαστούν οι σχέσεις για τη λειτουργία σε συνεχή αγωγή.

3.5.2.1 Μετατροπέας υποβιβασμού

Η περιγραφή της λειτουργίας του συγκεκριμένου μετατροπέα ισχύει για τη λειτουργία με συνεχή αγωγή ρεύματος, δηλαδή για μη διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου. Ο DC - DC μετατροπέας υποβιβασμού τάσης παράγει μέση τάση εξόδου V_0 μικρότερη από την DC τάση εισόδου του V_{in} . Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στον ημιαγωγίμο διακόπτη και στη σχετική διάρκεια αγωγής του D . Η τάση εισόδου V_{in} και η τάση εξόδου V_0 συνδέονται με τη σχετική διάρκεια αγωγής D σύμφωνα με τη σχέση

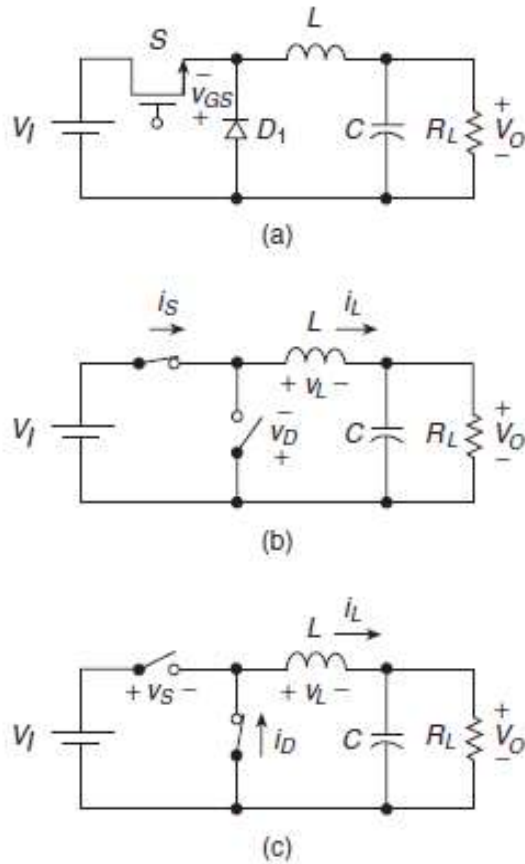
$$\frac{V_0}{V_{in}} = D \quad (3.26)$$

Η σχετική διάρκεια αγωγής δίνεται επίσης και από τη σχέση:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.27)$$

Όπου T είναι η περίοδος παλμοδότησης και t_{on} είναι ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής.

Στο επόμενο Σχήμα (Σχήμα 3.12) παρουσιάζεται το κύκλωμα του DC - DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις του ημιαγωγίμου διακόπτη. Στα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζεται και η φορά ροής των ρευμάτων των στοιχείων.



Σχήμα 3.12 α) Κύκλωμα β) Ισοδύναμο κύκλωμα όταν ο διακόπτης είναι στη θέση ON και η δίοδος είναι OFF (c) Ισοδύναμο κύκλωμα όταν ο διακόπτης είναι στη θέση OFF και η δίοδος είναι ON

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.12 β) κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης S είναι κλειστός το ρεύμα του πηνίου περνάει από αυτό, ενώ η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται τάση $V_L = V_{in} - V_o$, η οποία προκαλεί αύξηση του ρεύματος του. Επομένως, κατά το χρόνο 0 - ton το πηνίο αποταμιεύει ενέργεια.

Όταν ο διακόπτης S ανοίξει, λόγω της αποθηκευμένης στο πηνίο ενέργειας, το τελευταίο συνεχίζει να διαρρέεται από ρεύμα, το οποίο όμως διέρχεται από τη δίοδο. Λόγω αγωγής της διόδου, το πηνίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή εξόδου, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.12c), και η τάση του γίνεται $V_L = -V_o$.

Από το βιβλίο (πηγή [20]) παίρνουμε τους τύπους L_{min} και C_{min} για συνεχή λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού. Όπου αυτοί είναι

$$L_{min} = \frac{R_{Lmax}(1-D)}{2f_s} \quad (3.28)$$

Και

$$C_{\min} = \frac{D}{2f_s r_{\text{cm}}} \quad (3.29)$$

Όπου $r_{\text{cm}} = \frac{V_r}{\Delta I_{\max}}$ (3.30)

Και όπου $V_r = 0.01V_o$ (3.31) (κυμάτωση τάσης 1%) και η μέγιστη κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου

$$\Delta I_{\max} = \frac{V_o(1-D)}{f_s L_{\min}} \quad (3.31)$$

3.5.2.2 Υπολογισμοί παραμέτρων αμφίδρομου μετατροπέα

Γνωρίζοντας την ελάχιστη τιμή του πηνίου και του πυκνωτή του μετατροπέα ανύψωσης και υποβιβασμού επιλέγονται οι αντίστοιχες τιμές του αμφίδρομου μετατροπέα από την παρακάτω σχέση :

$$L_{\min} = \max(L_{\min_Boost}, L_{\min_Buck}) \quad (3.32)$$

Και αντίστοιχα

$$C_{\min} = \max(C_{\min_Boost}, C_{\min_Buck}) \quad (3.33)$$

3.6 Σχεδιασμός μετατροπέα ανύψωσης για τη διάταξη της προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η διαδικασία κατασκευής του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και θα παρουσιαστεί ο τρόπος επιλογής όλων των στοιχείων της κατασκευής, καθώς και ο υπολογισμός των τιμών τους, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργία, σύμφωνα με δεδομένο τους τύπους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ο μετατροπέας έχει ως είσοδο συνεχή τάση και ως έξοδο έχει επίσης συνεχή τάση με υψηλότερη τιμή.

Στην είσοδο έχουμε ένα DC τροφοδοτικό, το οποίο ρυθμίζουμε να δίνει τάση εισόδου $V_{norm}=153.5V$ (έχει $V_{min}=125V$ και μέγιστη τιμή $V_{max}=198V$) (λίγο παραπάνω από τα 188.5 όταν έχουμε $I=0A$ δηλαδή η τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του φωτοβολταϊκό (αναφέρεται το φωτοβολταϊκό γιατί ο μετατροπέας που θα γίνει η προσομοίωση στο κεφάλαιο αυτό είναι ο μετατροπέας που θα χρησιμοποιηθεί σε παρακάτω κεφάλαιο για τη σύνδεση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας). Ο μετατροπέας θα πρέπει να λειτουργεί σε κατάσταση συνεχούς αγωγής και να δίνει στην έξοδο $V_{out}=350V$.

Επίσης θεωρούνται ως δεδομένα για τους υπολογισμούς ότι $I_{O_{min}}=5\%$ $I_{O_{max}}$, $V_r/V_{out} < 1\%$ και $f_s=20kHz$.

Η διακοπτική συχνότητα στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά ο μετατροπέας μπορεί να επιλεγεί στο πεδίο τιμών από 10kHz έως 500kHz, γι' αυτό και επιλέχτηκε $f_s=20kHz$ η οποία είναι μέσα στα αποδεκτά όρια.

Ο μετατροπέας θεωρώ πως παρουσιάζει μέγιστη ισχύ εισόδου $P_{I_{max}}=1,2kW$. Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας δεν παρουσιάζει απώλειες στη μέγιστη ισχύ έχουμε $P_{O_{max}}=1,2 \cdot 1=1,2kW$.

Άρα το μέγιστο ρεύμα εξόδου είναι $I_{O_{max}} = \frac{P_{O_{max}}}{V_{out}} = 3.428A$

Και το ελάχιστο $I_{O_{min}} = \frac{I_{O_{max}}}{20} = 0.1714A$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση αντίστοιχα είναι:

$$R_{L_{max}} = \frac{V_{out}}{I_{O_{min}}} = 2042 \Omega \quad \text{και} \quad R_{L_{min}} = \frac{V_{out}}{I_{O_{max}}} = 102.1 \Omega$$

Γνωρίζοντας την τάση εισόδου και εξόδου μπορεί να βρεθεί ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα ανύψωσης .

Άρα υπολογίζεται και το εύρος τιμών του D που είναι :

$$D_{min} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{I_{max}}}} = 0.43$$

$$D_{nom} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{I_{nom}}}} = 0.56$$

$$D_{max} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{I_{max}}}} = 0.64$$

Οι τιμές είναι αποδεκτές καθώς ο λόγος κατατμήσεις δέχεται τιμές $0 < D < 1$

Επιλογή τιμής πηνίου

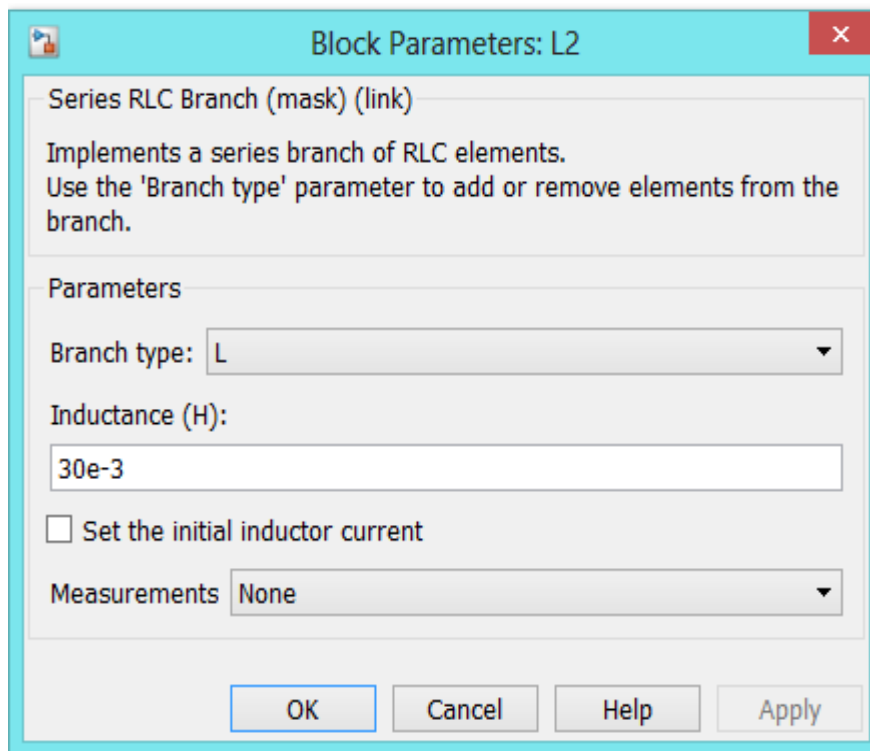
Το όριο για να έχουμε συνεχή λειτουργία είναι $D=1/3$. Άρα για οποιαδήποτε τιμή του D το L_{\min} είναι

$$L_{\min} = \frac{2}{27} \frac{V_0}{I_{0B\max}} = \frac{2}{27} \frac{R_{L\max}}{f_s} = 7.56 \text{ mH}$$

Από τη στιγμή όμως που $D_{\min} = 0.43 > 1/3$ η ελάχιστη τιμή του πηνίου για να έχουμε συνεχή λειτουργία δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$L_{\min} = \frac{R_{L\max} D_{\min} (1 - D_{\min})^2}{2f_s} = 7.13 \text{ mH}$$

Οπότε για τη διάταξη μου επιλέγω τιμή $L_{\min} > 7.13 \text{ mH}$. Στο Matlab /Simulink οι προσομοιώσεις γίνονται για $L_{\min} = 30 \text{ mH}$



Σχήμα 3.13 Παραμετροποίηση πηνίου μετατροπέα

Επιλογή τιμής πυκνωτή

Για να βρούμε το πυκνωτή εξόδου έχουμε με δεδομένο ότι η κυμάτωση τάσης είναι 1%.

$$V_{C_{pp}} = V_r - V_{r_{cpp}}$$

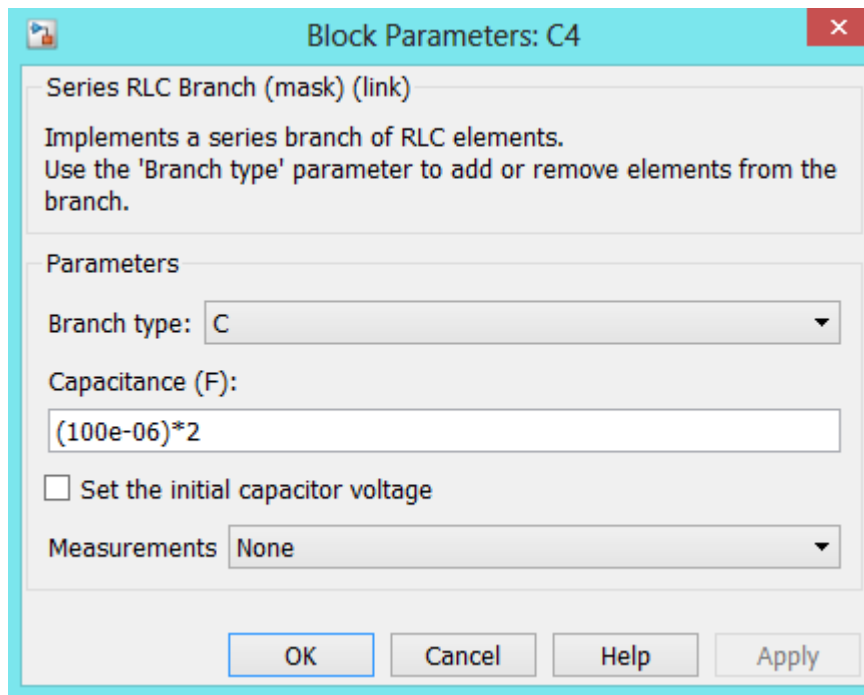
$$V_r = 0.01V_{out} = 3.5 \text{ V}$$

$$V_{r_{c_{pp}}} = V_r / 2 = 1.75 \text{ V}$$

Άρα η τιμή του πυκνωτή είναι

$$C_{min} = \frac{I_{o_{max}} D_{max}}{f_s V_{c_{pp}}} = \frac{V_{out} D_{max}}{V_{c_{pp}} R_{L_{min}} f_s} = 62.68 \text{ } \mu\text{F}$$

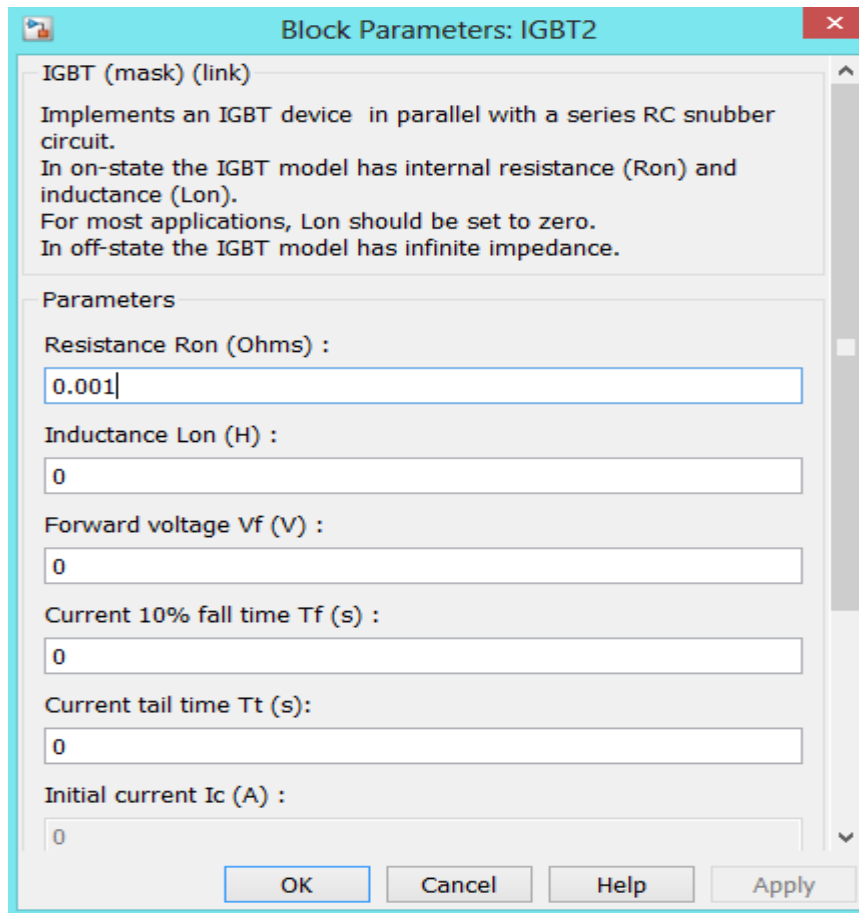
Οπότε για τη διάταξη μου επιλέγω τιμή $C_{min} > 62.68 \text{ } \mu\text{F}$. Στο Matlab /Simulink η προσομοίωση γίνεται για $C_{min} = 100 \text{ } \mu\text{F}$. Βάζουμε δύο πυκνωτές σε σειρά άρα ο καθένας έχει διπλάσια τιμή. (Βλέπε Block τιμών Matlab παρακάτω)



Σχήμα 3.14 Παραμετροποίηση πυκνωτή μετατροπέα

Επιλογή τιμής τρανζίστορ IGBT

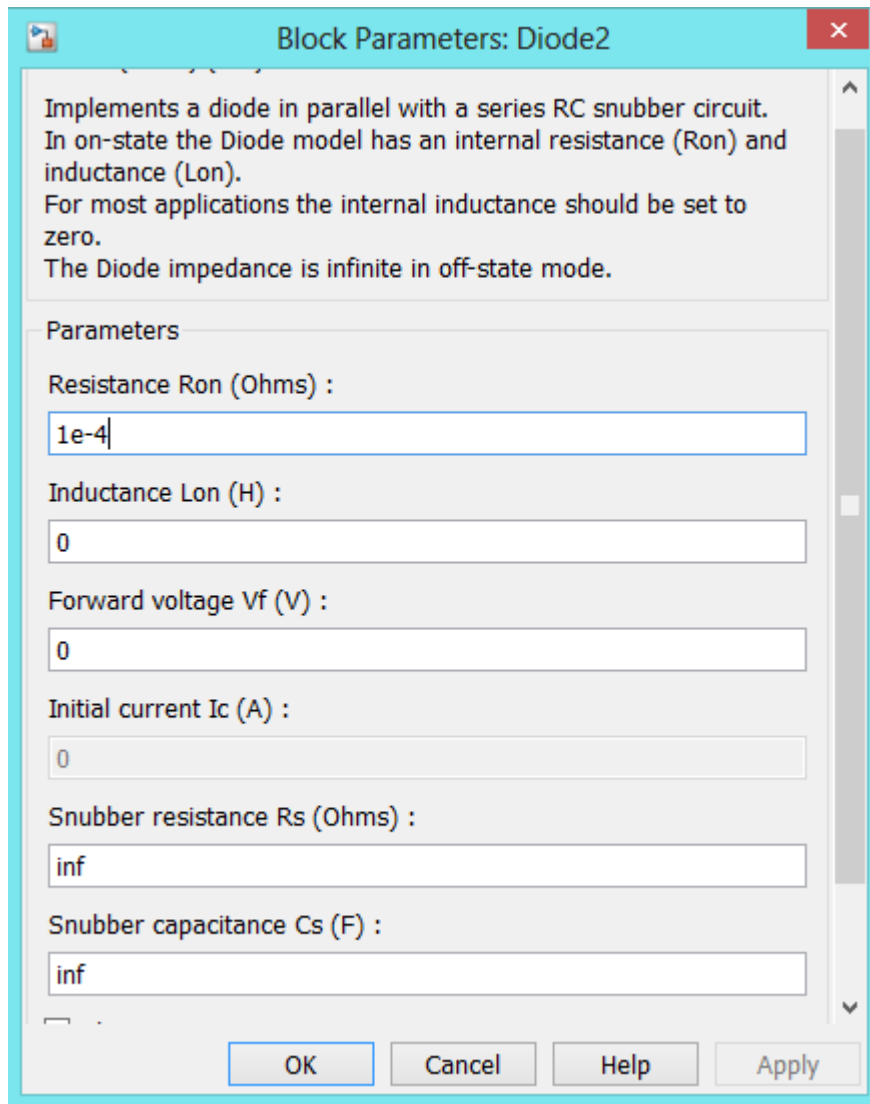
Το IGBT επιλέχθηκε από τη βιβλιοθήκη του Simulink και χρησιμοποιήθηκε με τις τιμές που δίνονται εξαρχής στο μοντέλο.



Σχήμα 3.15 Παραμετροποίηση IGBT μετατροπέα

Επιλογή τιμής διόδου

Ομοίως η τιμή της διόδου επιλέχτηκε από τη βιβλιοθήκη του Simulink και χρησιμοποιήθηκε με τις τιμές που δίνονται εξαρχής στο μοντέλο .



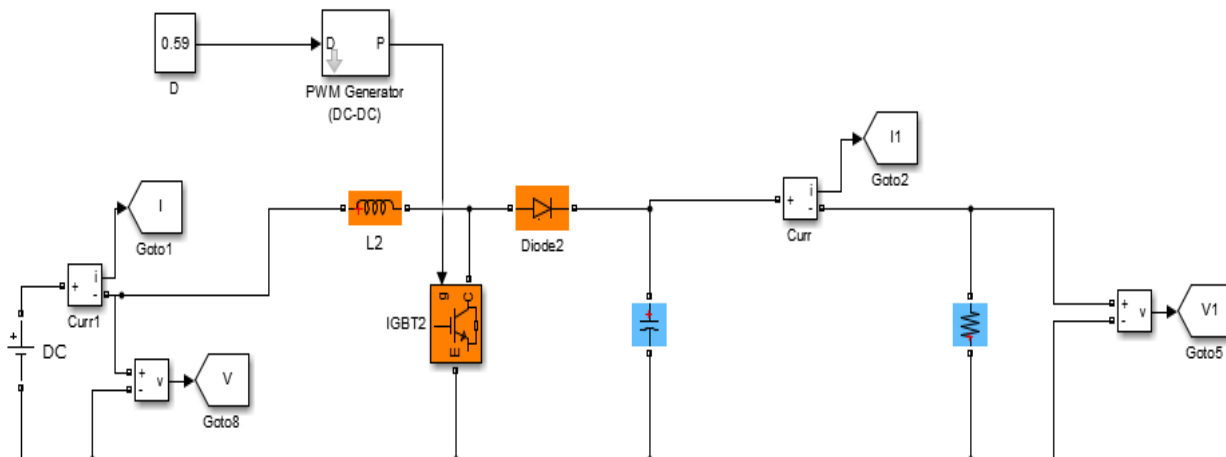
Σχήμα 3.16 Παραμετροποίηση διόδου μετατροπέα

Το εύρος τιμών του D θα κινηθεί από $0.43 < D < 0.64$

3.7 Προσομοίωση 1^η στο μετατροπέα ανύψωσης.

Στη προσομοίωση αυτή θα παρουσιαστεί πως επηρεάζει το D (Duty cycle) την τάση εξόδου. Συγκεκριμένα, κάθε φορά θα δίνεται μια διαφορετική τιμή του D ως είσοδο στο PWM και γι' αυτή την τιμή θα υπολογίζεται η τάση εξόδου. Σκοπός είναι να φανεί πως η τάση εξόδου προσεγγίζει τη θεωρητική τιμή βάση τον τύπο (3.4)

Σύμφωνα με τις τιμές που υπολογίστηκαν παραπάνω ο μετατροπέας ανύψωσης (Σχήμα 3.17) έχει τάση εισόδου $V_{in}=154V$ και εύρος τιμών του D : $0.43 < D < 0.64$



Σχήμα 3.17 Μετατροπέας ανύψωσης

Αλλάζοντας την τιμή του D μέσα στο εύρος που αναφέρθηκε υπολογίστηκαν στο Matlab /Simulink οι αντίστοιχες τάσεις εξόδου (πίνακας 3.1) η οποίες όπως φαίνεται (πίνακας 3.2) συμπίπτουν με την θεωρητική τιμή.

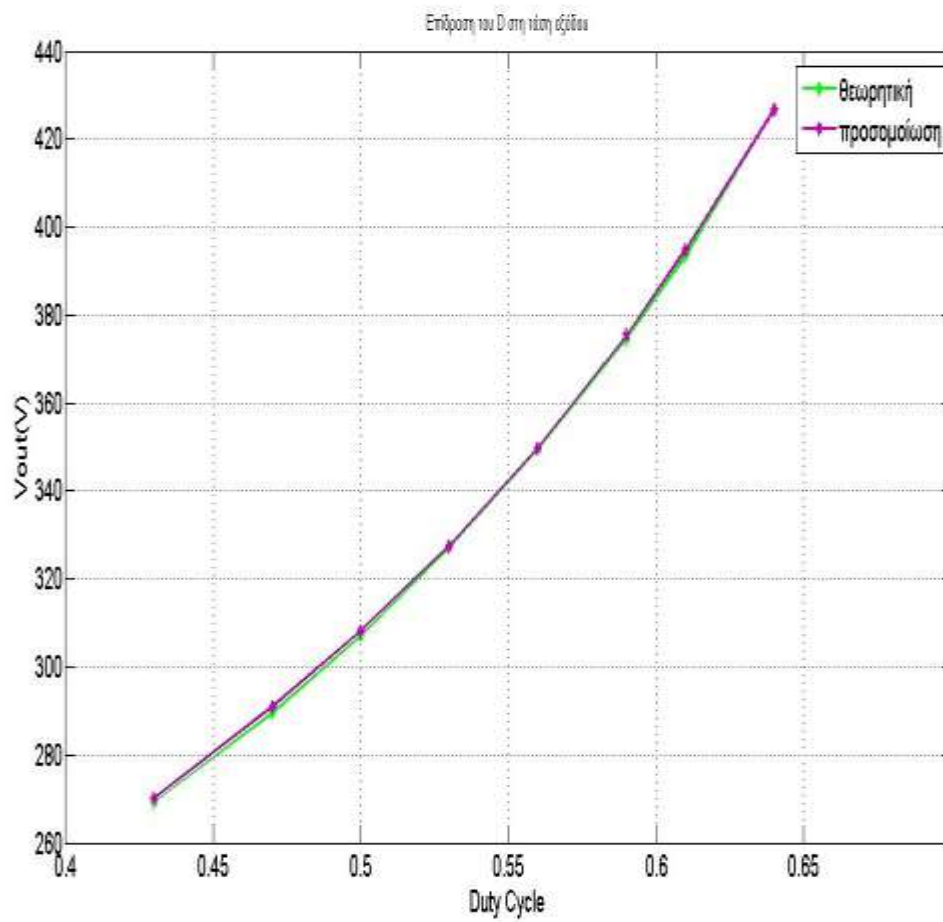
Πίνακας 3.7. 1 Τιμές προσομοίωσης τάσης εξόδου από το Simulink

Duty cycle(D)	Vout(V)
0.43	270.2
0.47	290.9
0.50	308.1
0.53	327.5
0.56	349.8
0.59	375.4
0.61	394.8
0.64	427.6

Πίνακας 3.7.2 Θεωρητικές τιμές τάσης εξόδου

Duty cycle(D)	Vout(V)
0.43	270.1754
0.47	290.566
0.50	308
0.53	327.65957
0.56	350
0.59	375.6097
0.61	394.87
0.64	427.7

Αυτό παρουσιάζεται καλύτερα στο παρακάτω διάγραμμα, που προέκυψε από τις τιμές των δύο πινάκων, στο οποίο οι δύο καμπύλες οριακά ταυτίζονται.



Σχήμα 3.18 Καμπύλη $V_{out}(D)$

Κεφάλαιο 4

Φωτοβολταϊκά Συστήματα

4.1 Εισαγωγή

Τα φωτοβολταϊκό σύστημα, επίσης φωτοβολταϊκό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και ηλιακή φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι ένα σύστημα ισχύος που έχει σχεδιαστεί για να παρέχει τη χρησιμοποιήσιμη ηλιακή ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών. Αποτελείται από μια διάταξη από διάφορα στοιχεία, όπως οι ηλιακοί συλλέκτες που απορροφούν άμεσα και μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια, τον ηλιακό μετατροπέα που μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα από εναλλασσόμενο σε συνεχή, καθώς τα καλώδια και τα άλλα ηλεκτρικά εξαρτήματα που δημιουργούν ένα εργασιακό σύστημα. Επιπλέον, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν το φως απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια και δεν θα πρέπει να συγχέονται με άλλες τεχνολογίες ηλιακής, όπως είναι η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια και η ηλιακή θερμική ενέργεια, που χρησιμοποιούνται τόσο για θέρμανση και ψύξη [22].

Τα Φωτοβολταϊκά συστήματα κυμαίνονται από πολύ μικρά, τοποθετημένα σε κτίρια με χωρητικότητα από μερικά έως δεκάδες κιλοβάτ, σε πολύ μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας με κλίμακα πολλών εκατοντάδων μεγαβάτ. Σήμερα, τα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ τα αυτόνομα ή εκτός δικτύου συστήματα αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό μέρος της αγοράς.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν εξελιχθεί σε μια ώριμη τεχνολογία που έχει χρησιμοποιηθεί εδώ και πενήντα χρόνια σε εξειδικευμένες εφαρμογές και τα διασυνδεδεμένα συστήματα λειτουργούν εδώ και πάνω από είκοσι χρόνια.

Καθώς οι νέες εγκαταστάσεις αυξάνονται ραγδαία, οι τιμές για τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν μειωθεί ταχύτατα τα τελευταία χρόνια, καθώς πια τα ηλιακά πλαίσια αποτελούν λιγότερο από το μισό από το γενικό κόστος του συστήματος.

4.2 Κατηγορίες χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους:

1. αυτόνομα
2. υβριδικά
3. διασυνδεδεμένα.

Αυτόνομα συστήματα

Ιστορικά η πρώτη αποδοτική εφαρμογή των φωτοβολταϊκών ήταν stand-alone συστήματα ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν ήταν εφικτό ή σκόπιμο να υπάρξει σύνδεση με το κύριο δίκτυο.

Αυτά είναι εντελώς ανεξάρτητα από τις άλλες πηγές ενέργειας. Χρησιμοποιούνται συνήθως για να τροφοδοτήσουν απομακρυσμένα σπίτια, εξοχικές κατοικίες ή ξενώνες καθώς και σε εφαρμογές όπως η εξ' αποστάσεως παρακολούθηση και άντληση νερού. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα αυτόνομο σύστημα θα χρειαστεί και συσσωρευτές όπως είναι οι μπαταρίες για την αποθήκευση. Τέτοια συστήματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα και αποδοτικά για το καλοκαίρι για διάφορες εφαρμογές, όταν η πρόσβαση σε μια τοποθεσία είναι δύσκολη ή δαπανηρή, ή όταν συντήρηση πρέπει να ελαχιστοποιηθεί.

Διασυνδεδεμένα συστήματα

Ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας που συνδέεται με το δίκτυο της ΔΕΗ. Αποτελείται από ηλιακούς συλλέκτες, έναν ή περισσότερους μετατροπείς, έναν εξοπλισμό της μονάδας κλιματισμού δύναμη και σύνδεση με το δίκτυο. Όταν οι συνθήκες είναι κατάλληλες, το διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα τροφοδοτεί την περίσσεια δύναμη, πέρα από την κατανάλωση από το συνδεδεμένο φορτίο, με το δίκτυο.

Επομένως αυτά επιτρέπουν την μείωση της κατανάλωσης από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και σε ορισμένες περιπτώσεις, προσφέρουν το πλεόνασμα ενέργειας πίσω στο δίκτυο. Αφού η ενέργεια συνήθως αποθηκεύονται στο το ίδιο δίκτυο, οι μπαταρίες δεν είναι απαραίτητες, εκτός εάν υπάρχει κάποια μορφή αυτόνομης εξουσίας κατά τη διάρκεια διακοπών. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται σε κτήρια, σπίτια ή εξοχικά σπίτια έχουν ήδη συνδεθεί με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Υβριδικά συστήματα

Σε περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτό οικονομικά ή πρακτικά να παραχθεί η απαιτούμενη ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές μονάδες χρησιμοποιούνται και άλλα μέσα. Πρακτικά, τα φωτοβολταϊκά συχνά συνδυάζονται με μια ανεμογεννήτρια ή μια γεννήτρια καύσιμων πετρελαίου. Ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα εξασφαλίζει ότι πληρούνται όλες οι ενεργειακές απαιτήσεις, ενώ αξιοποιείται πλήρως η προμήθεια φωτοβολταϊκών. Αυτά τα συστήματα απαιτούν συνήθως μπαταρίες για την αποθήκευση. Είναι πιο κατάλληλα όταν η ζήτηση ενέργειας είναι υψηλή (το χειμώνα ή όλο το χρόνο) και όταν η ισχύς πρέπει να είναι διαθέσιμη σε πρώτη ζήτηση, ή αν ο προϋπολογισμός είναι περιορισμένος [23].

4.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε ο ήλιος λάμπει όσο και υπάρχει διαθέσιμος χώρος. Αρκετό φως του ήλιου πέφτει στη Γη σε μία ώρα, για να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση του κόσμου για ένα χρόνο, αν θα μπορούσε να συλλεχθεί. Είναι εξαιρετικά επεκτάσιμη με τις εγκαταστάσεις που κυμαίνονται από λίγα κιλοβάτ έως 48.

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα παράγουν συνεχές ρεύμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τις συνεχές ρεύματος ηλεκτρικές συσκευές ή να μετατραπεί στο εναλλασσόμενο ρεύμα με τη βοήθεια ενός αναστροφέα. Όλο και περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές σήμερα λειτουργούν με συνεχές ρεύμα, τα οποία απαιτούν εκείνα τα τροφοδοτικά που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα στο συνεχές ρεύμα. Αυτό θα μπορούσε να είναι μια ευκαιρία να τροφοδοτηθούν στο μέλλον αυτές οι συσκευές άμεσα από τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα, αποβάλλοντας τις απώλειες αποδοτικότητας που εμφανίζονται κατά τη μετατροπή από το συνεχές ρεύμα στο εναλλασσόμενο ρεύμα.

Εντούτοις, με την τεχνολογία των συστημάτων ηλιακής ενέργειας, είμαστε ακόμα πίσω στη σύλληψη αυτού του φυσικά ελεύθερου απέραντου ποσού ενέργειας που παρέχεται από τη φύση [24].

Παρακάτω [25] μπορούμε να παρουσιάσουμε μερικά βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των συστημάτων ηλιακής ενέργειας (PV) :

Πλεονεκτήματα

- Τα φωτοβολταϊκά πάνελ παρέχουν καθαρή - πράσινη ενέργεια. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά πάνελ δεν υπάρχουν βλαβερές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου έτσι τα φωτοβολταϊκά είναι φιλικό προς το περιβάλλον.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι η ενέργεια που παρέχεται από τη φύση - είναι έτσι ελεύθερη και άφθονη
- Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να διατίθεται σχεδόν οπουδήποτε υπάρχει φως του ήλιου
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για έξυπνα δίκτυα ενέργειας με κατανεμημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Το κόστος των φωτοβολταϊκών βρίσκεται σε μια γρήγορη μειωμένη τροχιά και αναμένεται να συνεχιστεί η μείωση τους για τα επόμενα χρόνια - κατά συνέπεια τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν πράγματι ένα εξαιρετικά ελπιδοφόρο μέλλον τόσο για την οικονομική βιωσιμότητα και την περιβαλλοντική αειφορία.

- Τα Φωτοβολταϊκά πάνελ, μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με ένα πιο άμεσο τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης για φωτοβολταϊκά πάνελ θεωρείται ότι είναι χαμηλή, σχεδόν αμελητέα, σε σχέση με το κόστος των άλλων συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Τα Φωτοβολταϊκά πάνελ δεν έχουν μηχανικά κινούμενα μέρη, εκτός από τις περιπτώσεις του -sun εντοπισμού μηχανικών βάσεων και κατά συνέπεια, έχουν πολύ λιγότερες θραύσεις ή απαιτούν λιγότερη συντήρηση από άλλα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. ανεμογεννήτριες)
- Τα Φωτοβολταϊκά πάνελ είναι εντελώς αθόρυβα, ως εκ τούτου, είναι μια τέλεια λύση για τις αστικές περιοχές και για οικιακές εφαρμογές (πχ ηλιακούς συλλέκτες για το σπίτι)
- Επειδή η ηλιακή ενέργεια συμπίπτει με τις ενεργειακές ανάγκες για ψύξη φωτοβολταϊκών πάνελ μπορεί να προσφέρει μια αποτελεσματική λύση για την αύξηση της ζήτησης ενέργειας - ειδικά σε ζεστούς καλοκαιρινούς μήνες, όπου η ζήτηση ενέργειας είναι υψηλή.
- Αν και οι τιμές ηλιακής ενέργειας έχουν δει μια δραστική μείωση τα τελευταία χρόνια, και συνεχίζουν να μειώνονται, ωστόσο, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ένα από τα σημαντικότερα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που προωθούνται μέσω κρατικής χρηματοδότησης των επιδοτήσεων (κρίσεις, φορολογικές ελαφρύνσεις κλπ) έτσι οικονομικά κίνητρα για φωτοβολταϊκά πάνελ κάνουν την ηλιακή ενέργεια μια ελκυστική εναλλακτική επένδυση.
- Στις κατοικίες τα ηλιακά πάνελ είναι εύκολο να εγκατασταθούν σε στέγες ή στο έδαφος χωρίς οποιαδήποτε παρέμβαση στο τρόπο ζωής των κατοίκων.

Μειονεκτήματα

- Η ηλιακή ενέργεια παρουσιάζει προβλήματα καθώς δεν υπάρχει τη νύχτα, αλλά και κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να υπάρχει συννεφιά ή ένας βροχερός καιρός. Κατά συνέπεια, η διαλείπουσα και η μη προβλεψιμότητα της ηλιακής ενέργειας κάνει τους ηλιακούς συλλέκτες ενέργειας λιγότερο αξιόπιστη λύση.
- Τα φωτοβολταϊκά πάνελ απαιτούν πρόσθετο εξοπλισμό (μετατροπείς) για τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας απευθείας (DC) ηλεκτρικού ρεύματος σε εναλλασσόμενο (AC) για να χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο ρεύματος. Για συνεχή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, ειδικά για τις

συνδέσεις με το δίκτυο, τα φωτοβολταϊκά πάνελ απαιτούν όχι μόνο μετατροπείς, αλλά και μπαταρίες αποθήκευσης, αυξάνοντας έτσι σημαντικά το κόστος της επένδυσης για φωτοβολταϊκά πάνελ.

- Σε περίπτωση εδαφικών-τοποθετημένων εγκαταστάσεων επιτροπής φωτοβολταϊκών, απαιτούνται σχετικά μεγάλες περιοχές για την επέκτασή τους και συνήθως το έδαφος δεσμεύεται για το σκοπό αυτό για μια περίοδο 15-20 ετών – ή ακόμα και περισσότερο.
- Στους ηλιακούς συλλέκτες τα επίπεδα απόδοσης είναι σχετικά χαμηλά (μεταξύ 14% -25%) σε σύγκριση με τα επίπεδα απόδοσης των άλλων συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Αν και τα φωτοβολταϊκά πάνελ δεν έχουν καμία ιδιαίτερη συντήρηση ή λειτουργική δαπάνη, είναι ιδιαίτερα εύθραυστα και μπορούν να ζημιωθούν σχετικά εύκολα και οι συμπληρωματικές ασφαλιστικές δαπάνες είναι επομένως τελευταίας σπουδαιότητας για να προστατεύσουν μια επένδυση φωτοβολταϊκών.

4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, δεν λαμβάνει υπόψη μία σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων που πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζεται κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος. Η ετήσια ενεργειακή απόδοση, αποτελεί την πιο κατάλληλη παράμετρο στο σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς επίσης και το καλύτερο μέτρο για την παρακολούθηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους. Οι παράγοντες επίδρασης αυτοί, μπορεί να σχετίζονται με το ίδιο το πλαίσιο ή από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης.

Πριν όμως αναφερθούν οι κυριότεροι παράγοντες μείωσης της απόδοσης των ηλιακών πλαισίων, να σημειωθεί πως για λόγους σύγκρισης των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions,STC), κάτω από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι τους. Αυτές είναι οι εξής:

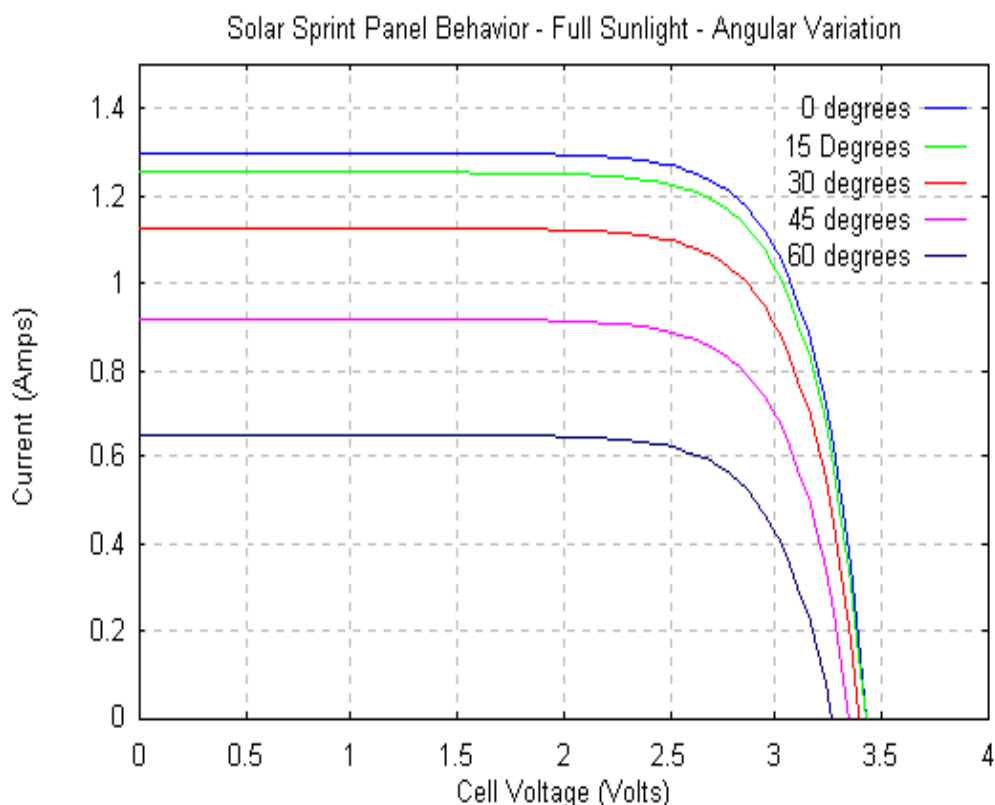
- 1.Θερμοκρασία Στοιχείου : 25°C
- 2.Ηλιακή Ακτινοβολία : 1000 W/m²
- 3.A.M (Air Mass) : 1.5

Οι κυριότεροι παράγοντες μείωσης της ενεργειακής απόδοσης που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, είναι η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία κυττάρου, η ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου, η ρύπανση, η σκίαση, η γήρανση των

φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και οι απώλειες, όπως οι οπτικές απώλειες. Παρακάτω αναλύονται οι δύο πρώτοι οι οποίοι και θα μελετηθούν.

Θερμοκρασία

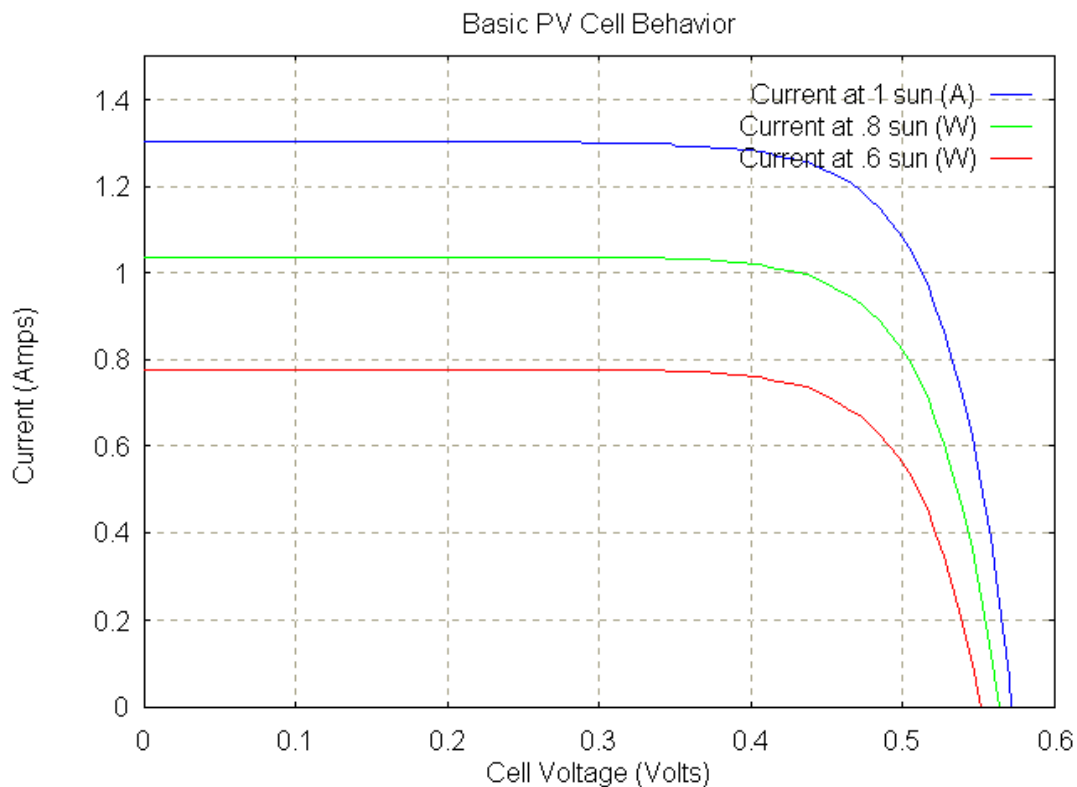
Η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν ιδανικά συνήθως σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C. Τις περισσότερες φορές όμως, η θερμοκρασία του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας διαφέρει σημαντικά κυρίως κατά την διάρκεια των θερινών μηνών. Οι υψηλές θερμοκρασίες της κυψέλης έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού της ηλιακής κυψέλης με αποτέλεσμα, όταν ένα φορτίο συνδεθεί στα άκρα του, η διαφορά δυναμικού να είναι αισθητά μειωμένη. Σε περίπτωση που τα φωτοβολταϊκά συστήματα λειτουργούν σε θερμοκρασίες πάνω από την ενδεικτική τιμή, τότε η δυναμική παραγωγική ενέργεια τους μπορεί να μειώνεται περισσότερο από το 14%. Η αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά στην αποτελεσματικότητα των ηλιακών κυψελών και μάλιστα η σχέση των δυο αυτών μεγεθών είναι αντιστρόφως ανάλογη. Να επισημανθεί ότι η παράμετρος που επηρεάζεται περισσότερο από την αύξηση της θερμοκρασίας είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος [26]. Η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός ηλιακού στοιχείου [27]

Ηλιακή ακτινοβολία

Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σε ετήσια βάση, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, όταν αναφέρεται ο όρος ηλιακή ακτινοβολία εννοείται η σύσταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Δηλαδή, δυο δέσμες ακτινοβολίας ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικού μήκους κύματος μπορούν να προκαλέσουν σε μια κυψέλη διαφορετική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επομένως να διαμορφώσουν διαφορετικό βαθμό απόδοσης. Η επιρροή της ηλιακής ακτινοβολίας διαφέρει για τις διάφορες παραμέτρους εξόδου. Η επίδραση μπορεί να εξηγηθεί καλύτερα λαμβάνοντας υπόψη την διαφορά του ρεύματος και της ηλεκτρικής τάσης που δημιουργείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος που οφείλεται στην αυξανόμενη παραγωγή ηλεκτρονίων (λόγω της αυξανόμενης ροής των φωτονίων) και ως εκ τούτου, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ [27].



Σχήμα 4.2 Η επίδραση της ακτινοβολίας στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου [27]

Η επιρροή της θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας θα φανεί λεπτομερώς στη προσομοίωση που θα παρουσιαστεί.

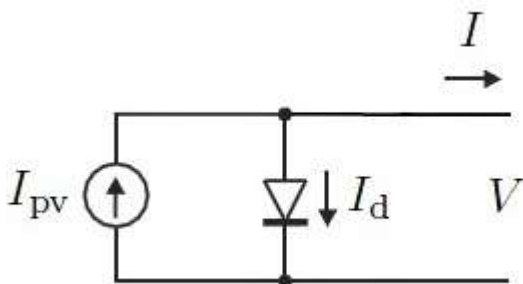
4.5 Ανάλυση και παρουσίαση του φωτοβολταϊκού μοντέλου της εργασίας

4.5.1 Εισαγωγή στο φωτοβολταϊκό μοντέλο

Ένα απλό φωτοβολταϊκό στοιχείο, (σύμφωνα με το μοντέλο που παρουσιάζεται στην εργασία πηγή [28] το οποίο και θα αναλυθεί στο κεφάλαιο αυτό καθώς και αποτελεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο της διάταξης) όσο αφορά τη μοντελοποίηση του, αποτελείται από μια ιδανική πηγή ρεύματος παράλληλα με μια ιδανική δίοδο, όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω. Οι δύο παράμετροι που είναι βασικοί για τη μοντελοποίηση του και το χαρακτηρίζουν είναι:

- ο Η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc})
- ο και το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι η μέγιστη τάση του φωτοβολταϊκού στοιχείου για μηδενικό ρεύμα, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το μέγιστο ρεύμα του όταν η τάση του είναι μηδενική.



Σχήμα 4.3 Ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο

Το ρεύμα εξόδου από το φωτοβολταϊκό μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση:

$$I = I_{pv} - I_d \quad (4.1)$$

Όπου το I_{pv} είναι το ρεύμα του φωτονίου, η ένταση του οποίου εξαρτάται από την απορροφημένη ηλιακή ισχύ, ενώ I_d είναι το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο και το οποίο ισούται με :

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (4.2)$$

Όπου το I_o είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

$q = 1.602 \cdot 10^{-23} \text{ C}$ είναι το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου
 V_d η τάση της διόδου
 $k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ η σταθερά Boltzmann και
 T η θερμοκρασία επαφής σε Kelvin

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις παίρνουμε:

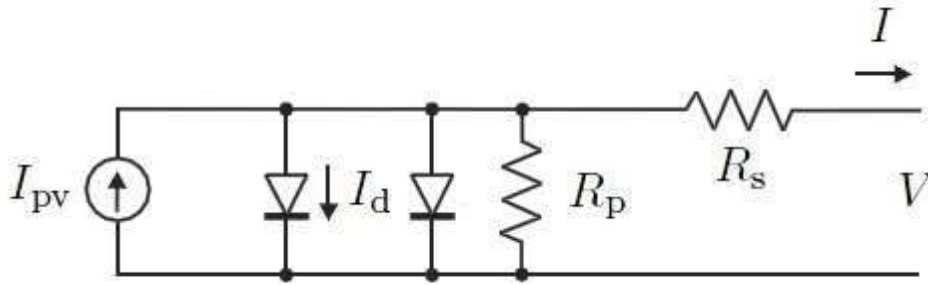
$$I = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (4.3)$$

Στην περίπτωση αυτή, το V_d είναι η τάση που υπάρχει σε όλο το φωτοβολταϊκό και το I είναι το ρεύμα εξόδου του ιδανικού μοντέλου του κυκλώματος.

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο συνήθως παράγει τάση περίπου 0.5V γι' αυτό πρέπει να συνδεθούν αρκετά σε σειρά ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση και να διαμορφωθεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Ένα πάνελ φωτοβολταϊκών είναι μια συλλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων και μια φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι μια συλλογή των φωτοβολταϊκών πάνελ. Και οι τρεις διαμορφώσεις ακολουθούν τις ίδιες βασικές εξισώσεις μοντελοποίησης. Συγκεκριμένα το παραπάνω ιδανικό ισοδύναμο κύκλωμα αποτυγχάνει να περιγράψει με ακρίβεια την έξοδο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος γιατί αγνοεί τα παρακάτω στοιχεία:

1. Την αντίσταση σειράς (R_s): η οποία αντιπροσωπεύει το σύνολο των ωμικών αντιστάσεων που συναντά τα ρεύμα καθώς διαρρέει τον ημιαγωγό, τους αγωγούς, τις επαφές καθώς και το σύστημα αντιστροφής. Εδώ λαμβάνονται επίσης υπόψη οι απώλειες λόγω της σύνδεσης των Φ/Β στοιχείων σε σειρά.
2. Την παράλληλη αντίσταση (R_p) : η τιμή της οποίας επηρεάζεται από τον ρυθμό επανασύνδεσης των οπών-ηλεκτρονίων στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος και στην επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία.
3. Τον παράγοντα ανασυνδυασμού που σχετίζεται άμεσα με την περιοχή εξάντλησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και το ποσό των στοιχείων που συνδέονται σε σειρά. Συνήθως αντιπροσωπεύεται από μια δεύτερη δίοδο στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Με βάση τα παραπάνω παίρνουμε το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του πραγματικού φωτοβολταϊκού στοιχείου όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα :



Σχήμα 4.4 Ακριβέστερο φωτοβολταϊκό μοντέλο

Το ρεύμα διόδου εδώ υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση στην οποία προστέθηκε και ο συντελεστής ιδανικότητας α (ideality factor), που παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2 (1 για την ιδανική δίοδο, 2 για έντονο ρυθμό επανασύνδεσης φορέων)

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{q(V_d + I R_s)}{akT}} - 1 \right) \quad (4.4)$$

Επομένως η εξίσωση που περιγράφει τώρα το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού φαίνεται ακολούθως:

$$I = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{q(V_d + I R_s)}{akT}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (4.5)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το φωτόρρευμα I_{pv} μεταβάλλεται για διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{pv} = \left[I_{sc} \frac{R_s + R_p}{R_p} + K_I (T - T_n) \right] \frac{G}{G_n} \quad (4.6)$$

Όπου:

I_{sc} το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη θερμοκρασία και ακτινοβολία αναφοράς, η αντίσταση σειράς

R_p η παράλληλη αντίσταση

K_I ο θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης

T η θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου

T_n η θερμοκρασία αναφοράς (κατά κανόνα 25 °C)

G η ηλιακή ακτινοβολία

G_n η ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς (κατά κανόνα 1000 W/m²)

4.5.2 Υπολογισμός και καθορισμός τιμών του μοντέλου

Κάθε φωτοβολταϊκό μοντέλο έχει κάποια συγκεκριμένα datasheet στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας (Standard Operating Conditions): $T_n=25^{\circ}\text{C}$ καθώς και $G_n=1000 \text{ W/m}^2$ πάνω στο οποίο στηρίζονται οποιεσδήποτε αλλαγές συνδέονται με αυτό. Συγκεκριμένα το μοντέλο της εργασίας [28m] που αναλύθηκε παραπάνω και το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας, έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

$I_{sc} = 8.25\text{A}$ ρεύμα βραχυκύκλωσης
 $V_{oc} = 37.7\text{V}$ τάση ανοιχτοκύκλωσης
 $I_{mp} = 7.96\text{A}$ ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος, στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
 $V_{mp} = 30.8\text{V}$ τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος, στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
 $K_v = -0.33$ θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης ανοιχτοκύκλωσης
 $K_i = 0.042$ θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης
 $P_{max.e} = I_{mp} * V_{mp} = 245.68\text{W}$ η μετρούμενη μέγιστη τιμή της ισχύος στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
 $R_s = 0,11\Omega$
 $R_p = 105,341\Omega$
 $N_s = 60$ (αριθμός των Φ/Β στοιχείων σε σειρά)
 $N_{ser} = 1$ (αριθμός των Φ/Β πλαισίων σε σειρά)
 $N_{par} = 1$ (αριθμός των Φ/Β πλαισίων σε σειρά)

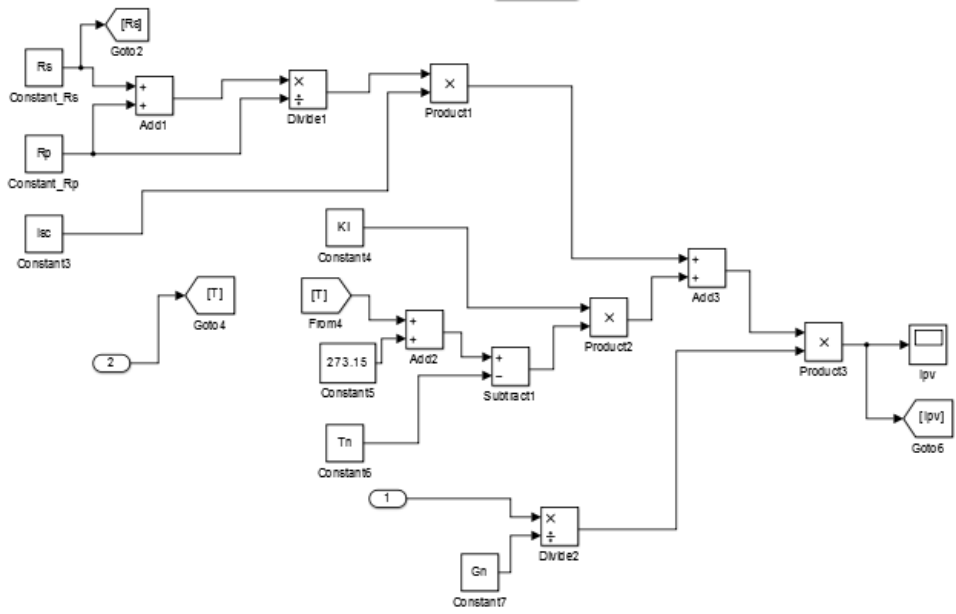
Στις προσομοιώσεις που θα γίνουν, το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα έχει εγκατεστημένη ισχύ περίπου 1.2kW και τάση γύρω στα 150V . Γι' αυτό με βάση τα δεδομένα του μοντέλου [28] απαιτείται να συνδεθούν 5 συστοιχίες φωτοβολταϊκών σε σειρά, ώστε να επιτευχθεί αυτή η τάση. Στο datasheet, αυτά που αλλάζουν επομένως είναι μόνο οι παράμετροι που σχετίζονται με την τάση, καθώς συνδέονται συστοιχίες σε σειρά. Δηλαδή :

$V_{mp} = 30.8 * 5 = 154\text{V}$
 $V_{oc} = 37.7 * 5 = 188.5 \text{ V}$
 $P_{max.e} = 245.168 * 5 = 1225.84\text{W}$ και
 $N_s = 5 * 60 = 300$ (καθώς $300 * 0,5\text{V} = 150\text{V}$)
 $K_v = -0.33 * 5 = 1.65$
Επίσης, αλλάζει και η τιμή της αντίστασης $R_p = 105,341 * 5 = 526.705\Omega$, ενώ η τιμή της R_s παραμένει ίδια.

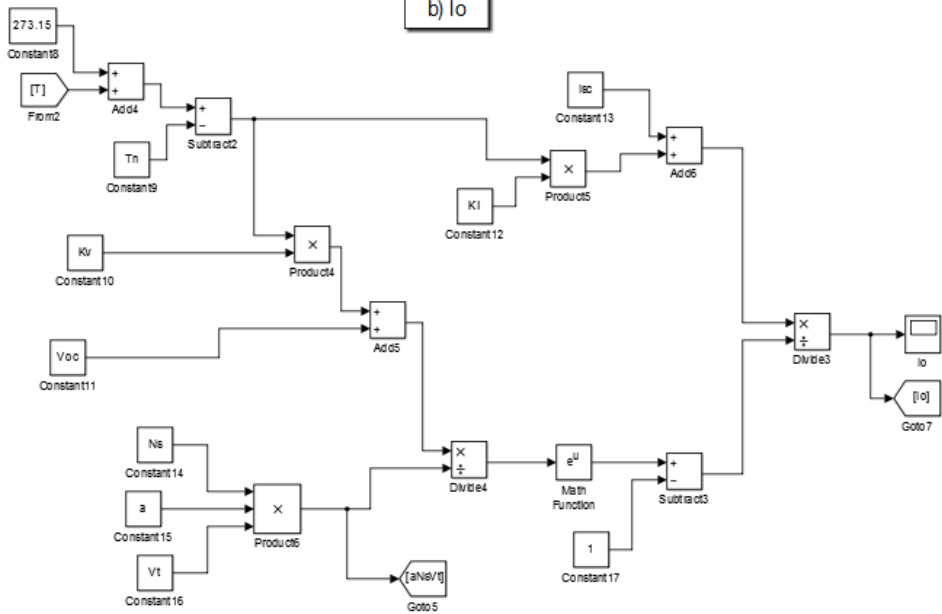
4.5.3 Σχεδιασμός του μοντέλου του φωτοβολταϊκού στο Matlab

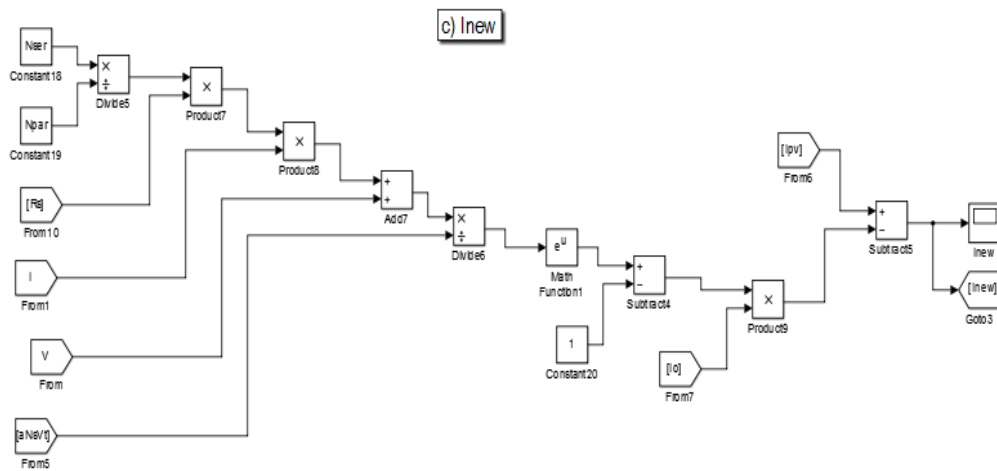
Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το Matlab, το πακέτο του Simulink και το SimPowerSystems. Στο command window του Matlab ορίστηκαν οι τιμές του φωτοβολταϊκού που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι εξισώσεις που έχουν ήδη αναφερθεί πιο πάνω και σχεδιάστηκαν τμηματικά στο μοντέλο της εργασία πηγή [28] χρησιμοποιήθηκαν και στην προσομοίωση της παρούσας εργασίας. Το μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω:

a) Ipv

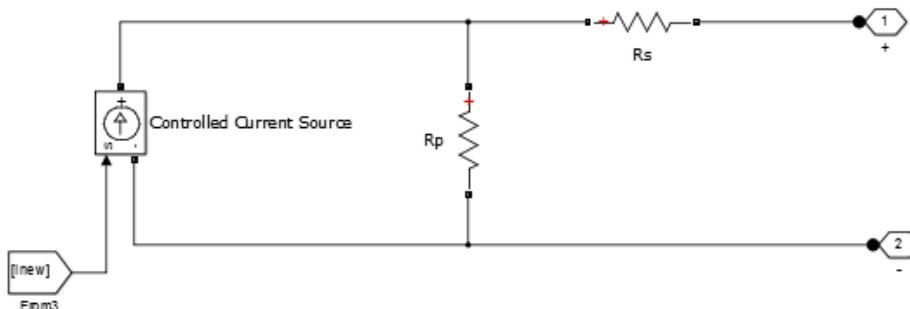


b) I0



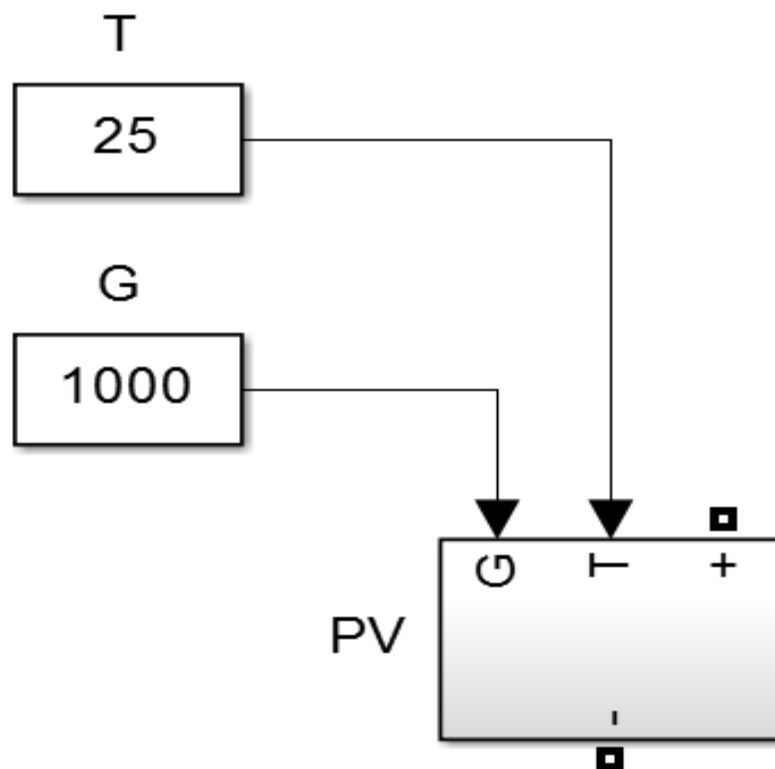


d) I-V



Σχήμα 4.5 α) Υπολογισμός I_{rn} β) Υπολογισμός I_o γ) Υπολογισμός I_{new} δ) SimPowerSystem φωτοβολταϊκό μοντέλο

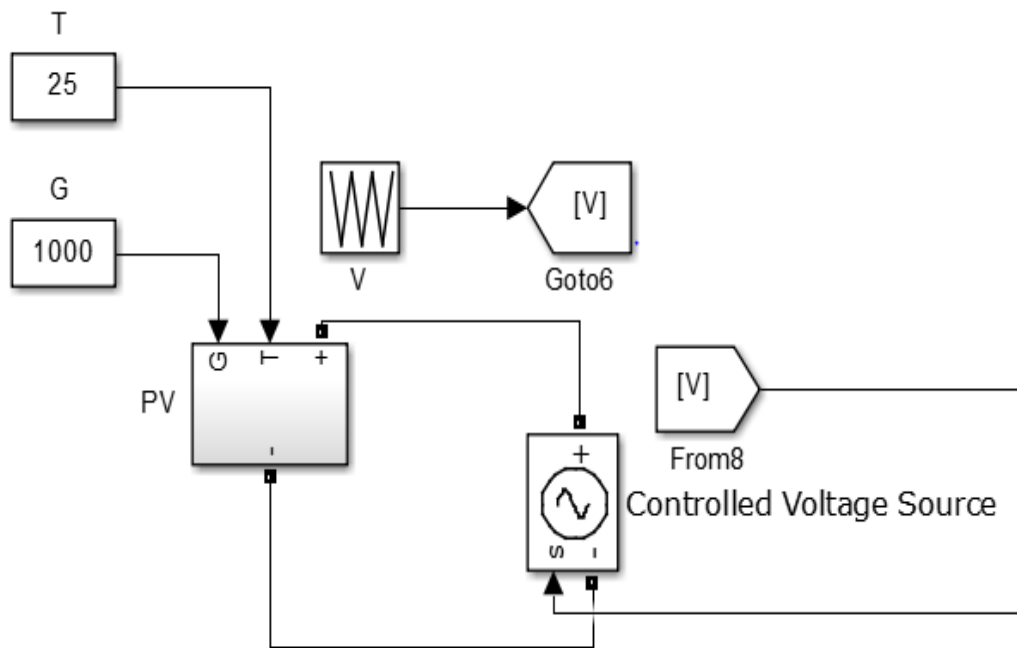
Το μοντέλο στο σχήμα 4.5 δ) διαφοροποιείται λίγο από αυτό της εργασίας [28] όπως φαίνεται, καθώς σκοπός είναι να συνδέεται με έναν μετατροπέα ανύψωσης. Γι' αυτό και δημιουργείται και ένα υποσύστημα με όλα τα παραπάνω με έξοδο την τάση του φωτοβολταϊκού και εισόδους την θερμοκρασία και την ακτινοβολία που δέχεται κάθε στιγμή το μοντέλο.



Σχήμα 4.6 Υποσύστημα φωτοβολταϊκού μοντέλου στις πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας

4.6 Προσομοιώσεις στο Φωτοβολταϊκό μοντέλο

Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα γίνουν τέσσερις προσομοιώσεις με χρήση του παραπάνω μοντέλου, με σκοπό να κατανοηθεί η λειτουργία του, καθώς και να μελετηθεί η τεχνική ελέγχου που μπορεί να εφαρμοστεί σ' αυτήν την διεσπαρμένη πηγή.



Σχήμα 4.7 Υποσύστημα φωτοβολταϊκού μοντέλο στις πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, με ελεγχόμενη πηγή τάσης

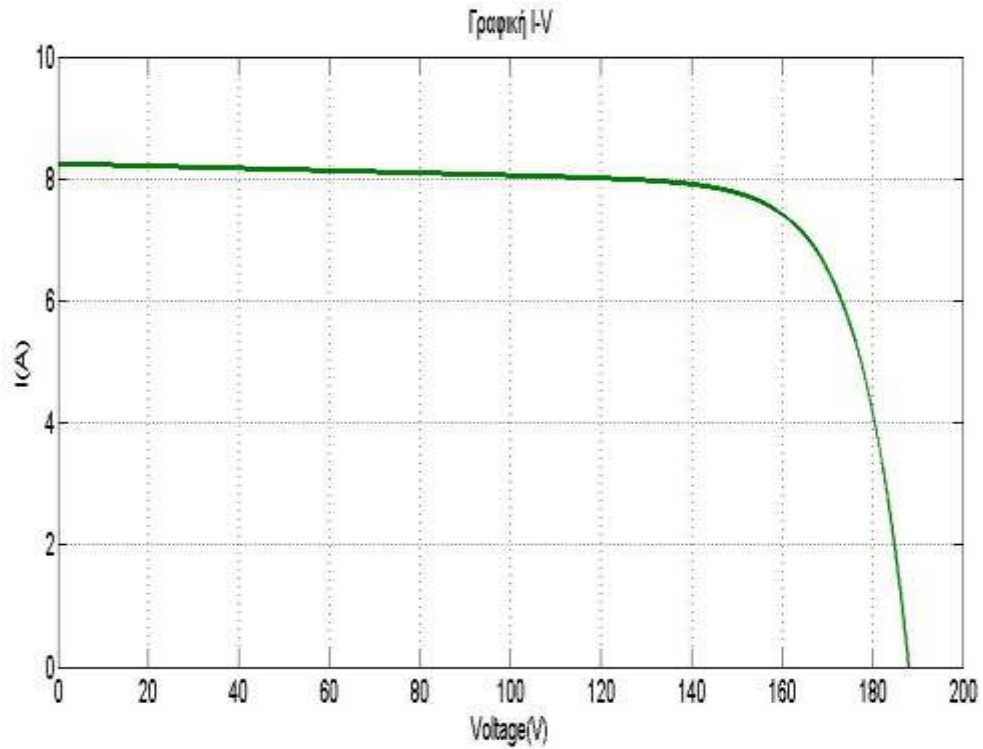
4.6.1 Εξέταση των δύο κυριότερων παραγόντων που επιδρούν στην καμπύλη I-V και P-V .

Η προσομοίωση αυτή αφορά το μοντέλο του σχήματος 4.5, καθώς γίνεται εξέταση μόνο πάνω στο φωτοβολταϊκό, γι' αυτό και στο σχήμα 4.5d) μετράμε το ρεύμα και έχουμε και μία ελεγχόμενη πηγή τάσης στην έξοδο για να μπορούμε να ανακτήσουμε τις ζητούμενες γραφικές παραστάσεις. Σκοπός είναι να παρουσιαστεί πως επηρεάζει η ακτινοβολία και η θερμοκρασία τις χαρακτηριστικές καμπύλες P-V και I-V.

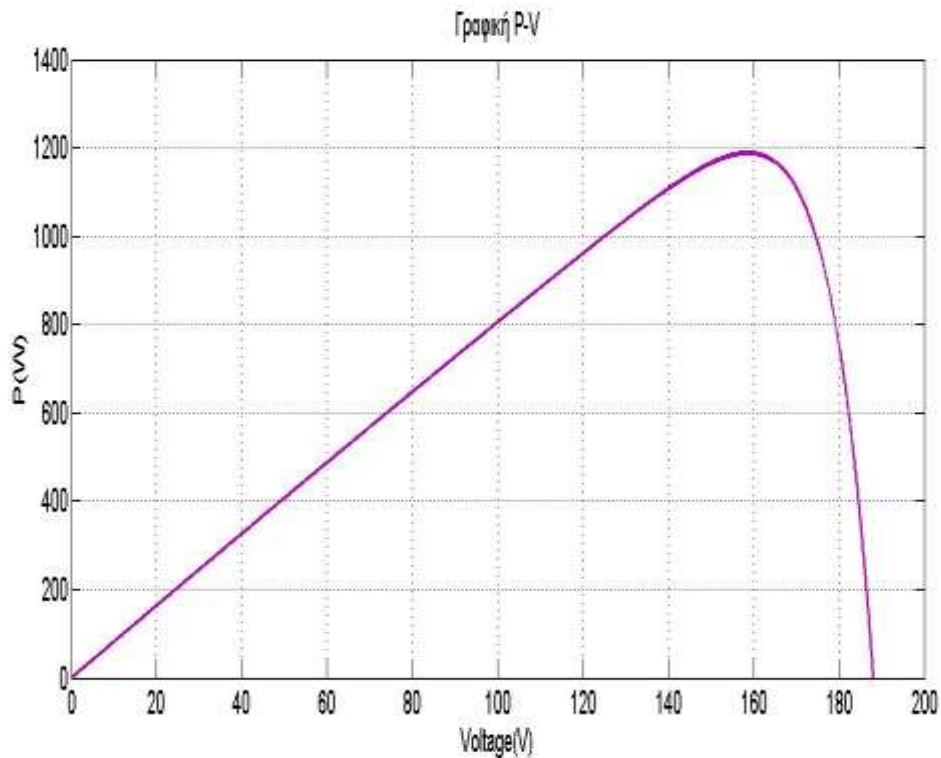
4.6.1.1 Αλλαγή μόνο της ακτινοβολίας

Εδώ θα παρουσιαστούν οι γραφικές που προέκυψαν κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία στους 25°C και μεταβάλλοντας την ακτινοβολία. Για διάφορες τιμές ηλιοφάνειας έχουμε

- $G=1000 \text{ W/m}^2$



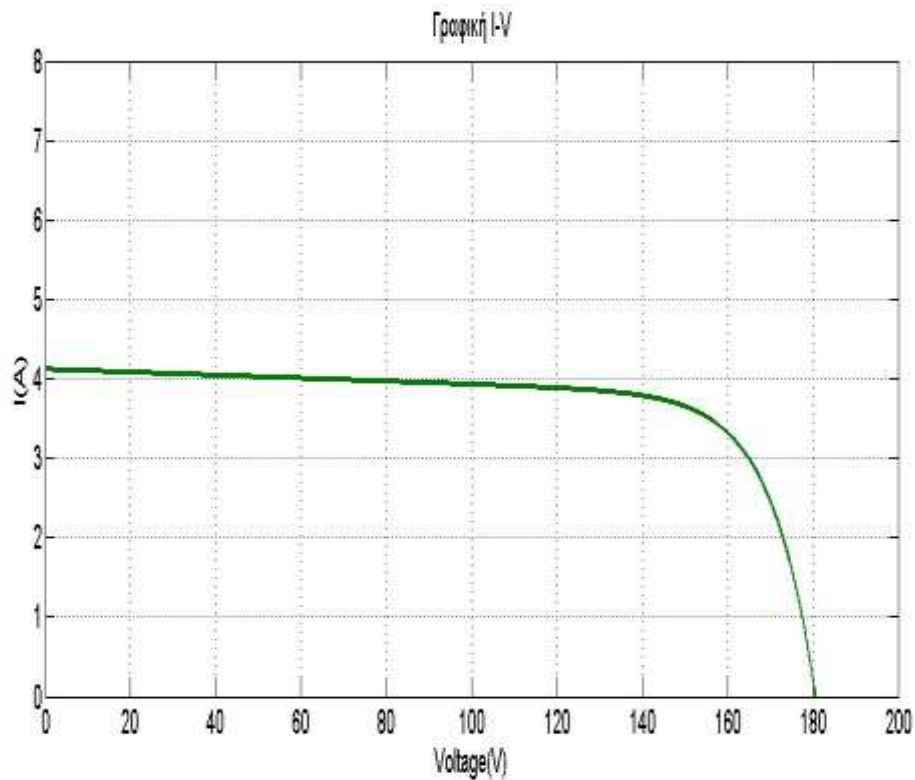
Σχήμα 4.8 Γραφική παράσταση I-V με τις πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας



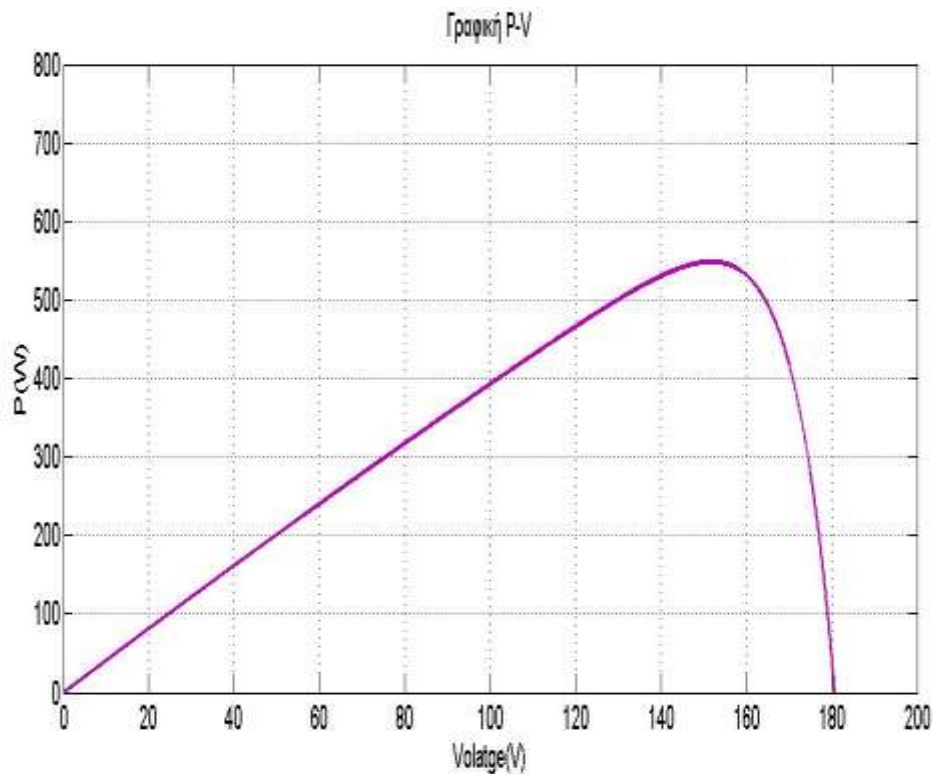
Σχήμα 4.9 Γραφική παράσταση P-V με τις πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας

Η μέγιστη ισχύς παρατηρούμε πως προσεγγίζει τα 1160W και η τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{osc} \approx 187V$

- $G=500 \text{ W/m}^2$



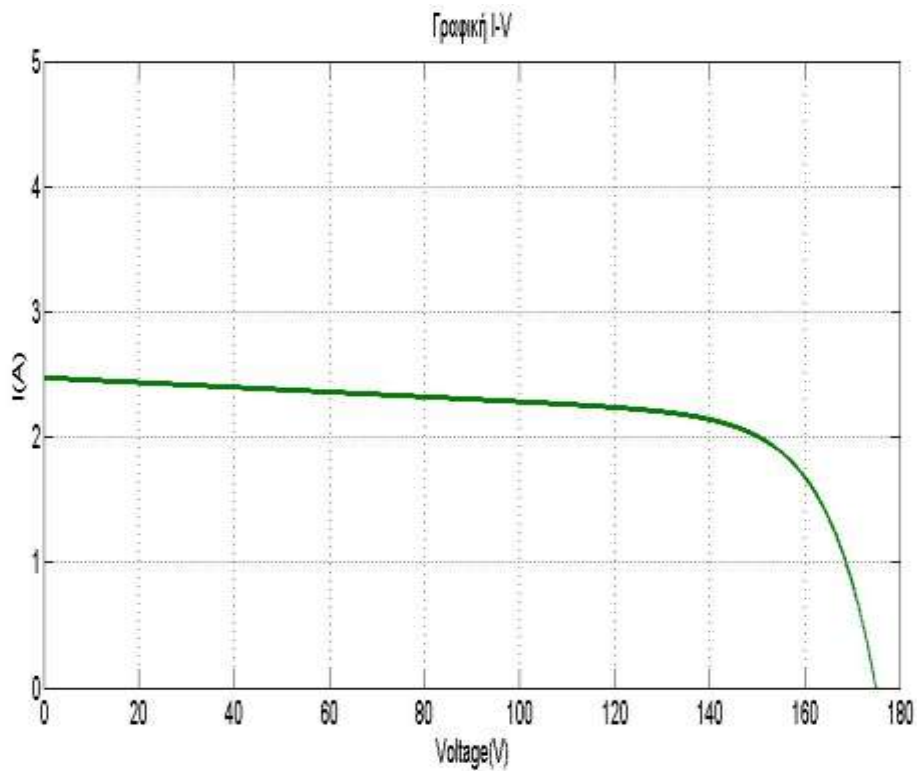
Σχήμα 4.10 Γραφική παράσταση I-V με $G=500 \text{ W/m}^2$ και $T=25^\circ\text{C}$



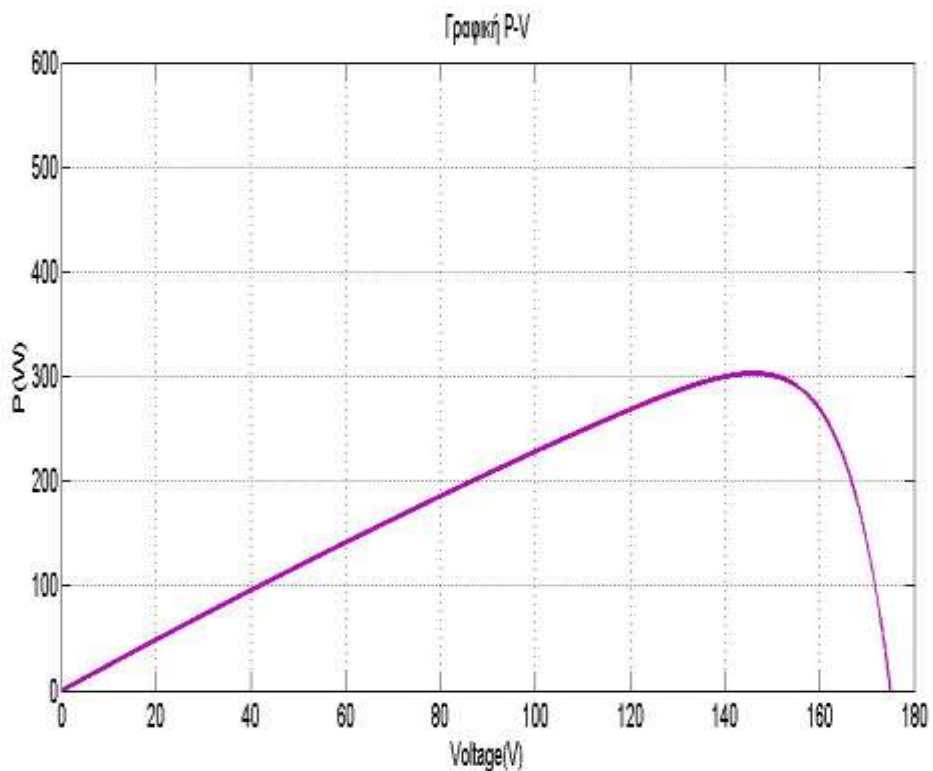
Σχήμα 4.11 Γραφική παράσταση P-V με $G=500 \text{ W/m}^2$ και $T=25^\circ\text{C}$

Η μέγιστη ισχύς παρατηρούμε πως προσεγγίζει τα 560W και η τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{osc} \approx 182\text{V}$

- $G=300 \text{ W/m}^2$



Σχήμα 4.12 Γραφική παράσταση I-V με $G=300 \text{ W/m}^2$ και $T=25^\circ\text{C}$



Σχήμα 4.13 Γραφική παράσταση P-V με $G=300 \text{ W/m}^2$ και $T=25^\circ\text{C}$

Η μέγιστη ισχύς παρατηρούμε πως προσεγγίζει τα 1160W και η τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{osc} \approx 177\text{V}$

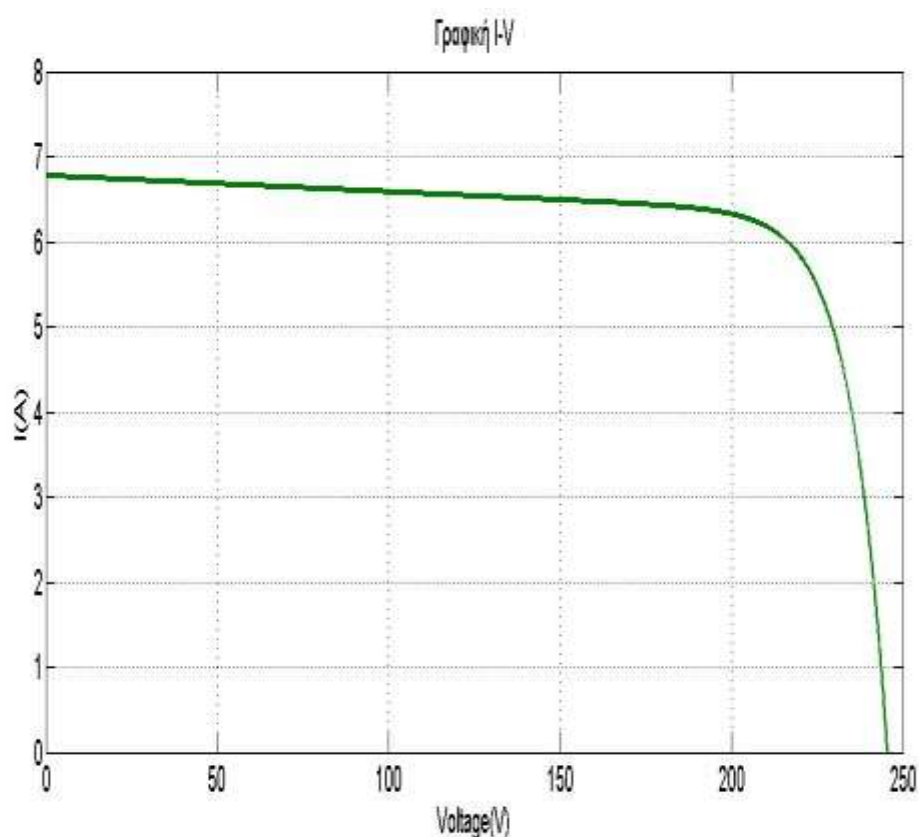
Από τις παραπάνω γραφικές φαίνεται ότι με την αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, το μέγεθος που μεταβάλλεται περισσότερο είναι η ένταση του ρεύματος, ενώ η τάση αντίθετα έχει μικρότερη εξάρτηση (πολύ μικρότερες μεταβολές). Φυσικά, και η ισχύς ακολουθεί ανάλογα την μεταβολή αυτή.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, ανεξάρτητα από την τιμή έντασης ακτινοβολίας, η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταϊκού εμφανίζεται για την ίδια περίπου τιμή της τάσης.

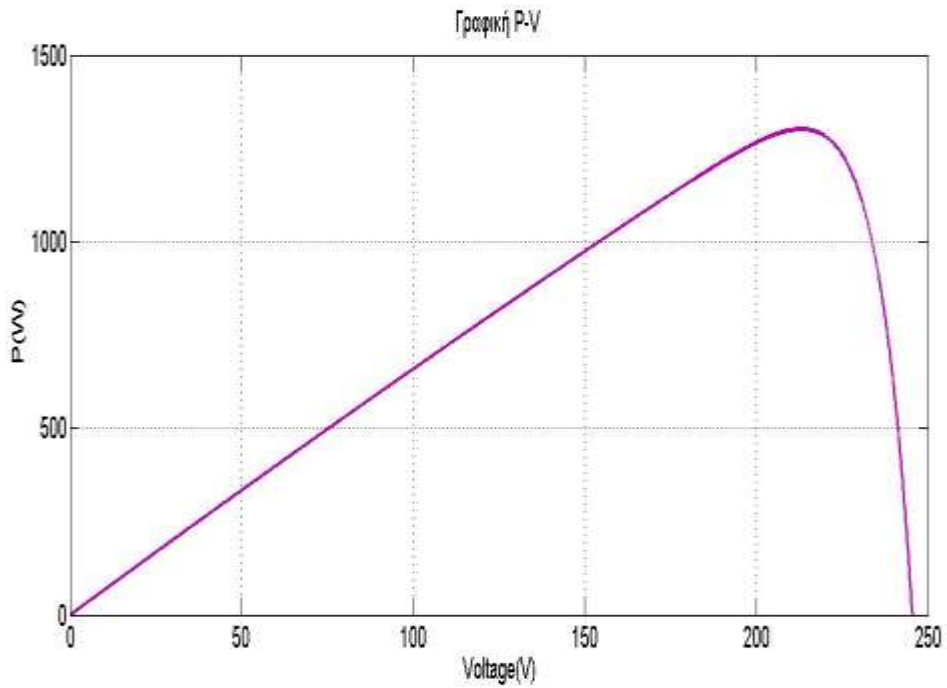
4.6.1.2 Αλλαγή μόνο της Θερμοκρασίας

Εδώ θα παρουσιαστούν οι γραφικές που προέκυψαν κρατώντας σταθερή την ακτινοβολία $G=1000 \text{ W/m}^2$ και μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία. Για διάφορες τιμές θερμοκρασίας έχουμε

- -10°C



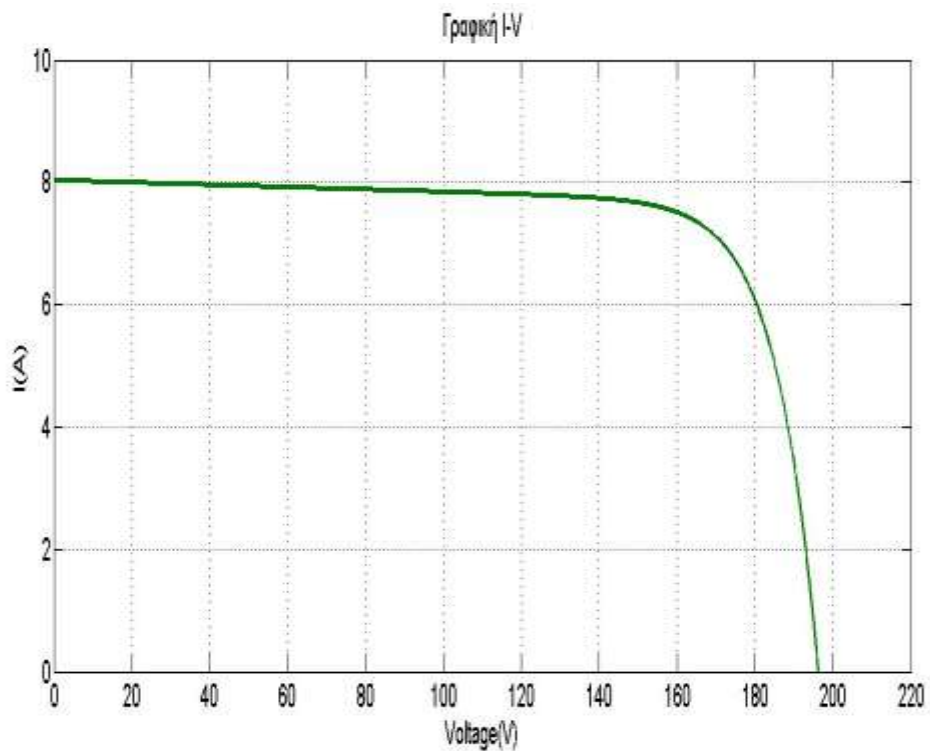
Σχήμα 4.14 Γραφική παράσταση I-V με $G=1000 \text{ W/m}^2$ και $T=-10^\circ\text{C}$



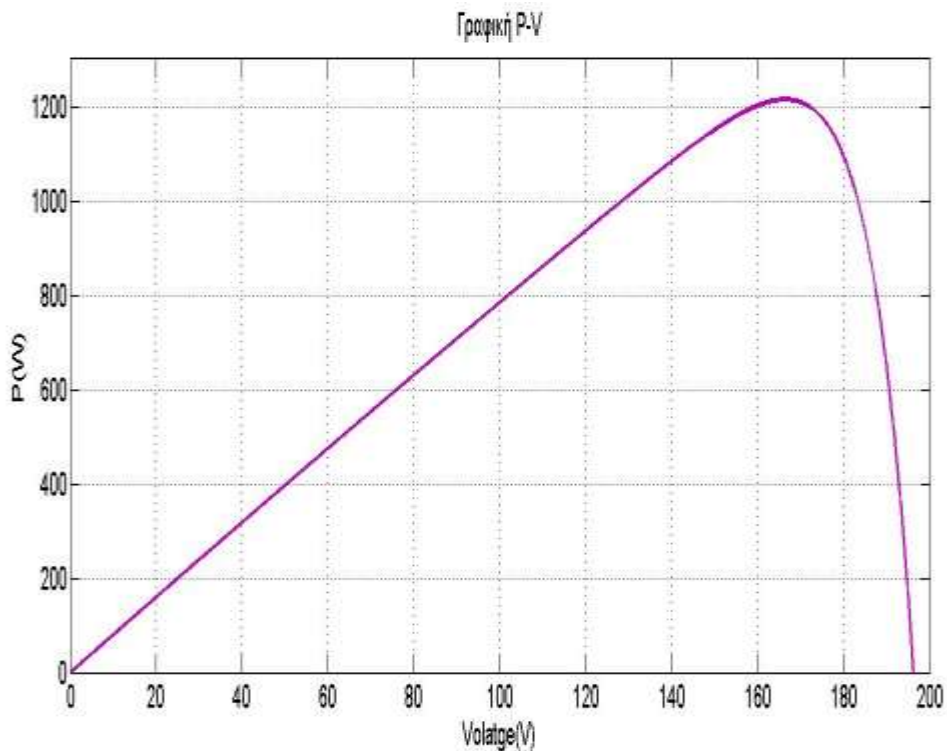
Σχήμα 4.15 Γραφική παράσταση P-V με $G=1000 \text{ W/m}^2$ και $T=-10^\circ\text{C}$

Η μέγιστη ισχύς παρατηρούμε πως προσεγγίζει τα 1390W και η τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{osc} \approx 242\text{V}$

- 20°C



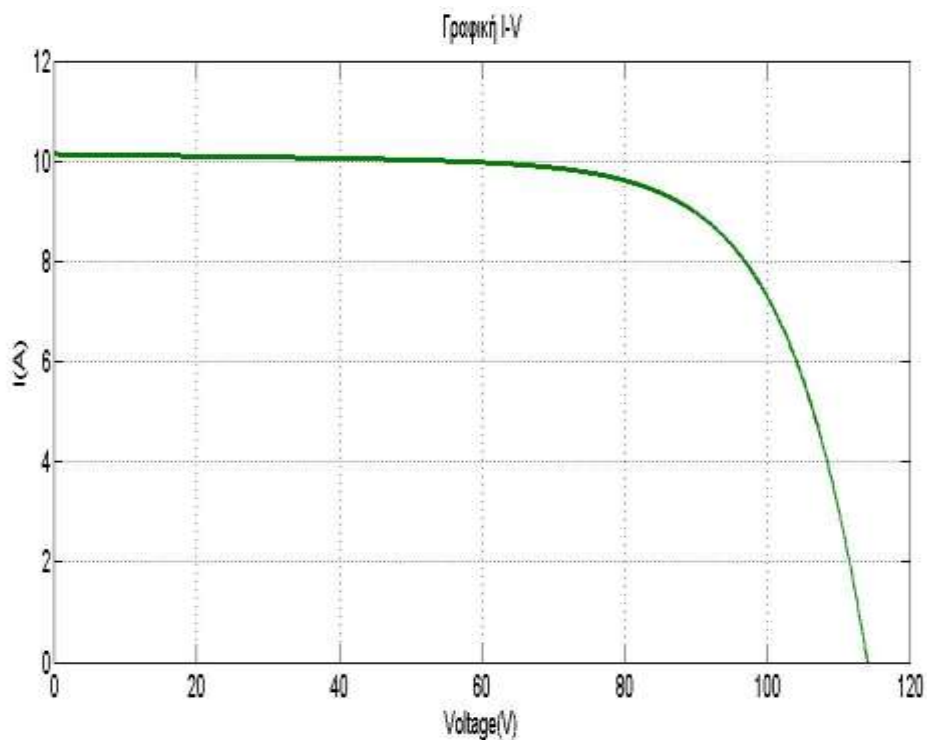
Σχήμα 4.16 Γραφική παράσταση I-V με $G=300 \text{ W/m}^2$ και $T=20^\circ\text{C}$



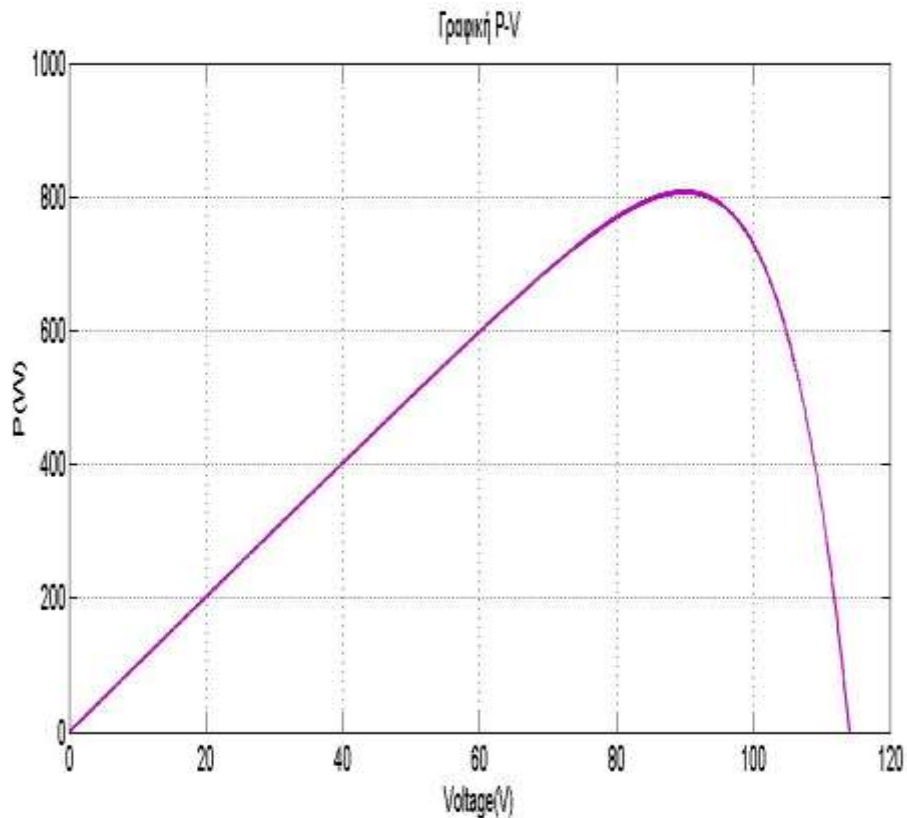
Σχήμα 4.17 Γραφική παράσταση P-V με $G=1000 \text{ W/m}^2$ και $T=20^\circ\text{C}$

Η μέγιστη ισχύς παρατηρούμε πως προσεγγίζει τα 1210W και η τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{osc} \approx 195\text{V}$

- 70°C



Σχήμα 4.18 Γραφική παράσταση I-V με $G=300 \text{ W/m}^2$ και $T=70^\circ$



Σχήμα 4.19 Γραφική παράσταση P-V με $G=1000 \text{ W/m}^2$ και $T=70^\circ\text{C}$

Η μέγιστη ισχύς παρατηρούμε πως προσεγγίζει τα 805W και η τάση ανοιχτοκύκλωσης $V_{osc} \approx 117\text{V}$

Η θερμοκρασία λειτουργίας έχει άμεση επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Όπως φαίνεται στις παραπάνω γραφικές η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα ηλιακό πλαίσιο, επιδρά αρνητικά. Δηλαδή, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως επακόλουθο τη μείωση παραγωγής ισχύος του πλαισίου. Επιπλέον, στις χαμηλές θερμοκρασίες η τάση αυξάνεται και η μέγιστη τάση που μπορεί να λάβει στις χαμηλές θερμοκρασίες είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος.

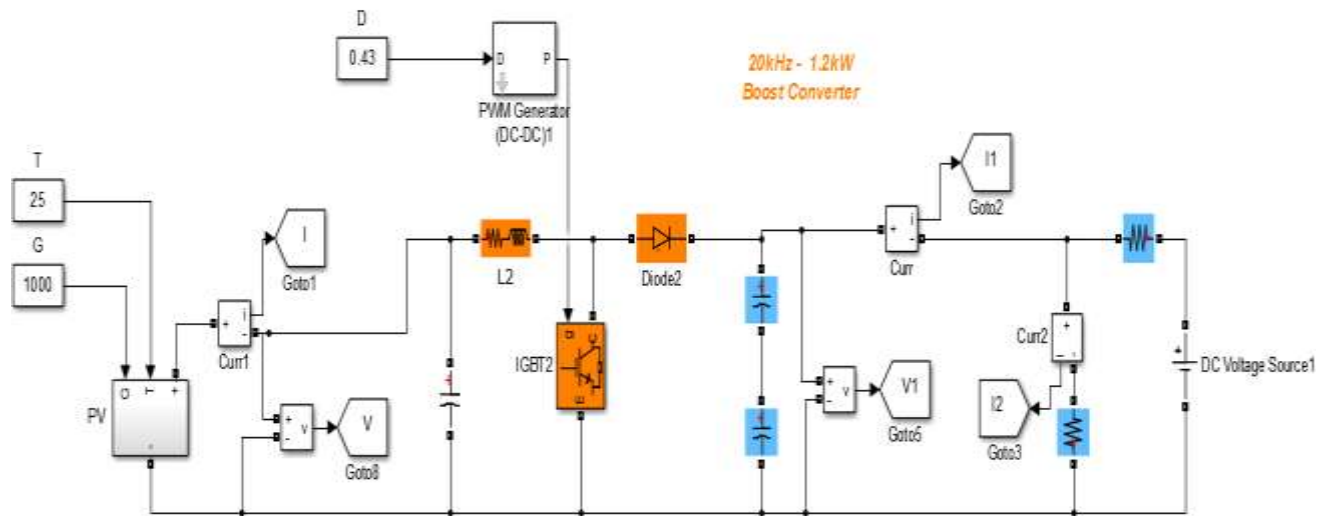
4.6.2 Έλεγχος των θεωρητικών τιμών (V_{min} , V_{nom} , V_{max}) από τον τύπο σχέση τάσης εισόδου εξόδου και D με αυτές της προσομοίωσης

Στη προσομοίωση αυτή παρουσιάζεται πως μεταβάλλεται η τάση εισόδου ανάλογα με την τιμή του D.

Ο μετατροπέας ανύψωσης που παρουσιάζεται σ' αυτό το κεφάλαιο και που θα χρησιμοποιηθεί και στις άλλες προσομοιώσεις έχει ήδη υπολογισμένες τις

παραμέτρους του από το κεφάλαιο 3.6, οπότε δεν θα ξαναπαρουσιαστούν στο σημείο αυτό.

Το κύκλωμα του μετατροπέα ανύψωσης με το φωτοβολταϊκό στοιχείο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.20



Σχήμα 4.20 Φωτοβολταϊκό συνδεδεμένο με μετατροπέα ανύψωσης και σταθερή πηγή τάσης εξόδου

Συγκεκριμένα από τη σχέση εισόδου-εξόδου με το λόγο κατάτμησης:

$$V_0 = \frac{V_I}{1-D} \quad (\text{έχει εξηγηθεί στο κεφάλαιο 3)}$$

υπολογίζεται για τάση εξόδου $V_0 = 350V$

$$D=0.56 \text{ για } V_{Inorm} = 153.5V$$

$$D=0.64 \text{ για } V_{Imin} = 125V$$

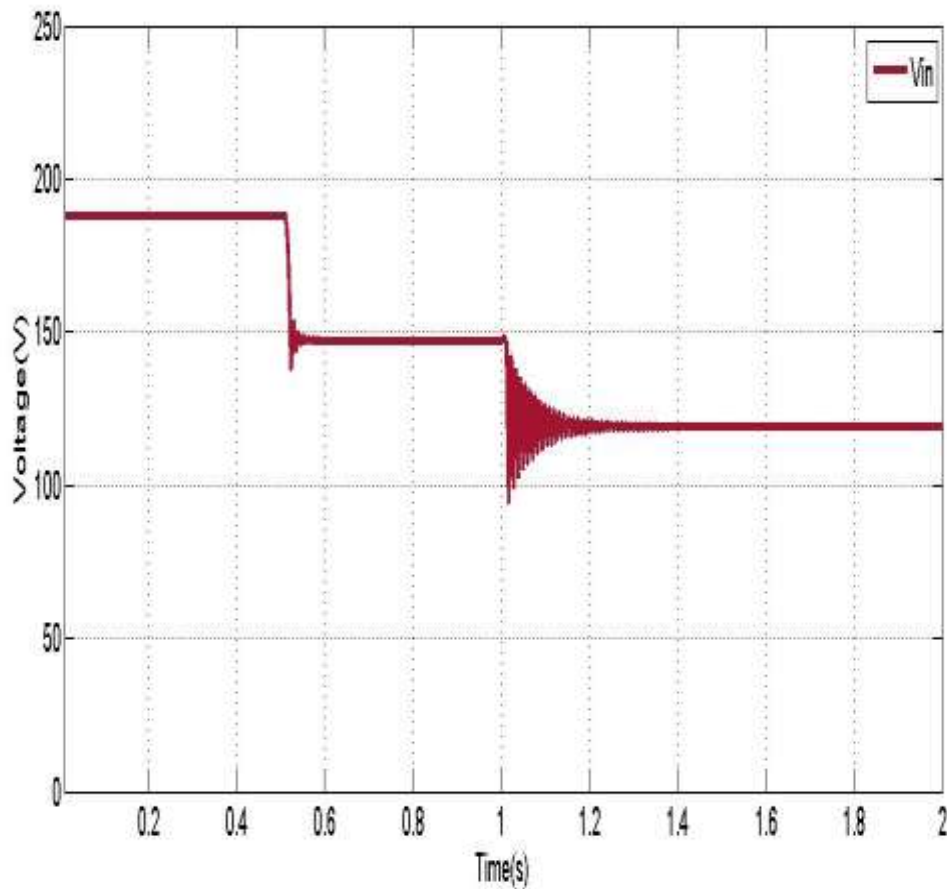
$$D=0.43 \text{ για } V_{Imax} = 198V$$

Η μέγιστη τάση που αποδίδει το φωτοβολταϊκό είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος. Για να μην καταστραφεί όμως ο μετατροπέας επιλέγεται ως μέγιστη τάση, μια τάση της τάξεως 5% μεγαλύτερη από αυτή που δίνει ο κατασκευαστής. Δηλαδή όχι $V=188.5V$ αλλά $V_{max}=198V$, όπως βρέθηκε.

Η ελάχιστη τάση που αποδίδει υπολογίζεται περίπου 10% λιγότερη από την ονομαστική τιμή, αλλά επιλέγεται μία χαμηλότερη για να εξασφαλισθεί η καλή λειτουργία του μετατροπέα. Δηλαδή όχι $137.5V$ αλλά $V_{min} = 125V$, όπως και υπολογίστηκε.

Σκοπός λοιπόν είναι να δειχτεί ότι η τάση εισόδου του μετατροπέα για κάθε ένα από τα D προσεγγίζει τη θεωρητική τιμή που υπολογίστηκε παραπάνω.

Το διάγραμμα τάσης εισόδου που προέκυψε από την προσομοίωση είναι:



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα τάσης συνάρτηση του χρόνου για διαφορετικές τιμές του D

Όπως φαίνεται από τον πίνακα η θεωρητική τιμή και αυτή της προσομοίωσης είναι πολύ κοντά, όπως αναμενότανε.

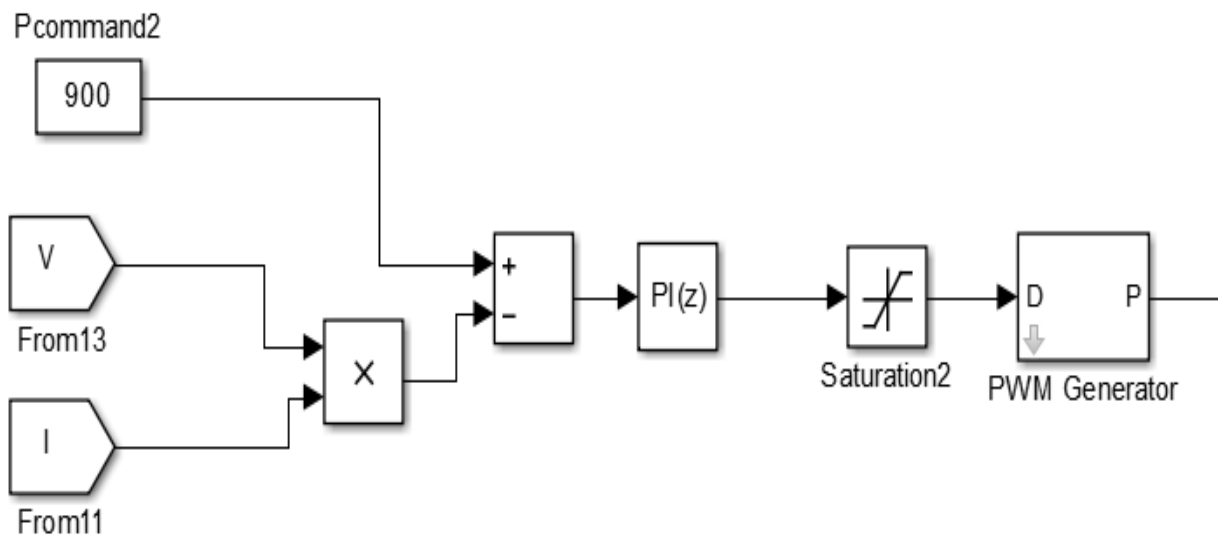
Πίνακας 4.1 Λόγος κατάμησης και τάση εισόδου θεωρητική και πειραματική

Duty Cycle	Vin(V) θεωρητική	Vin(V) προσομοίωσης
0.43	198	187.97
0.56	153.5	149.8
0.64	125	119

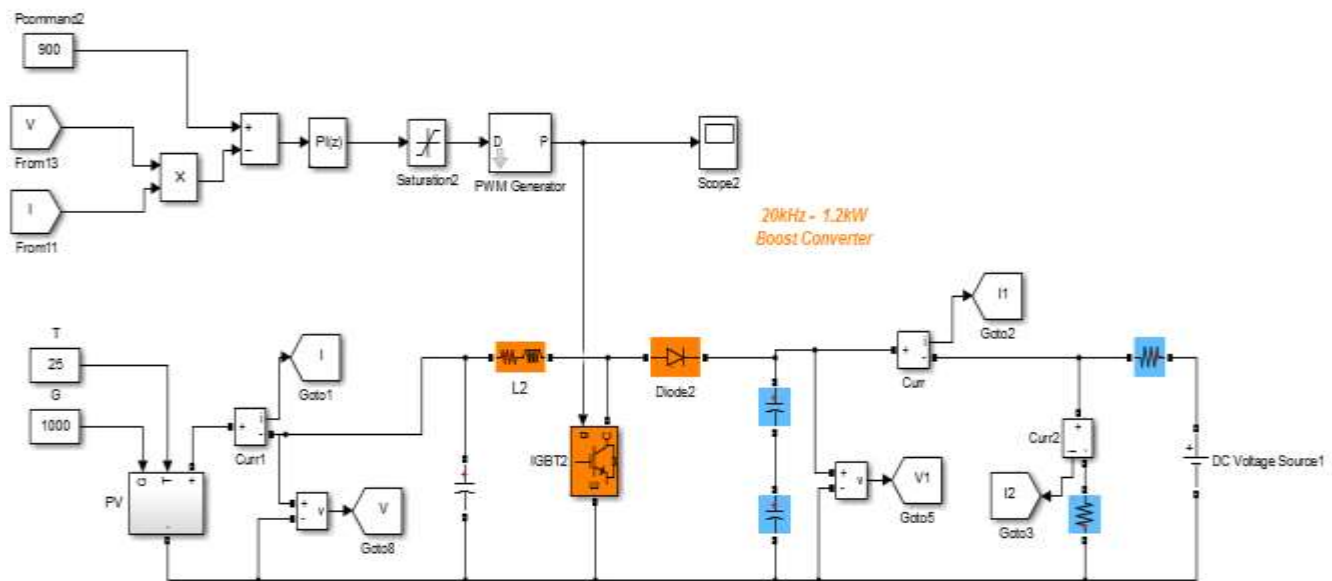
4.6.3 Έλεγχος με σταθερό P (Pcommand)

Στη περίπτωση αυτή ο PWM δέχεται από τον PI το σήμα που δημιουργείται από τη διαφορά της ισχύος που δίνεται στο μετατροπέα (Pcommand) και της ισχύος εισόδου.

Συγκεκριμένα ο έλεγχος και το κύκλωμα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 4.22 Έλεγχος μετατροπέα με σταθερό D



Σχήμα 4.23 Κύκλωμα φωτοβολταϊκού με μετατροπέα ανύψωσης

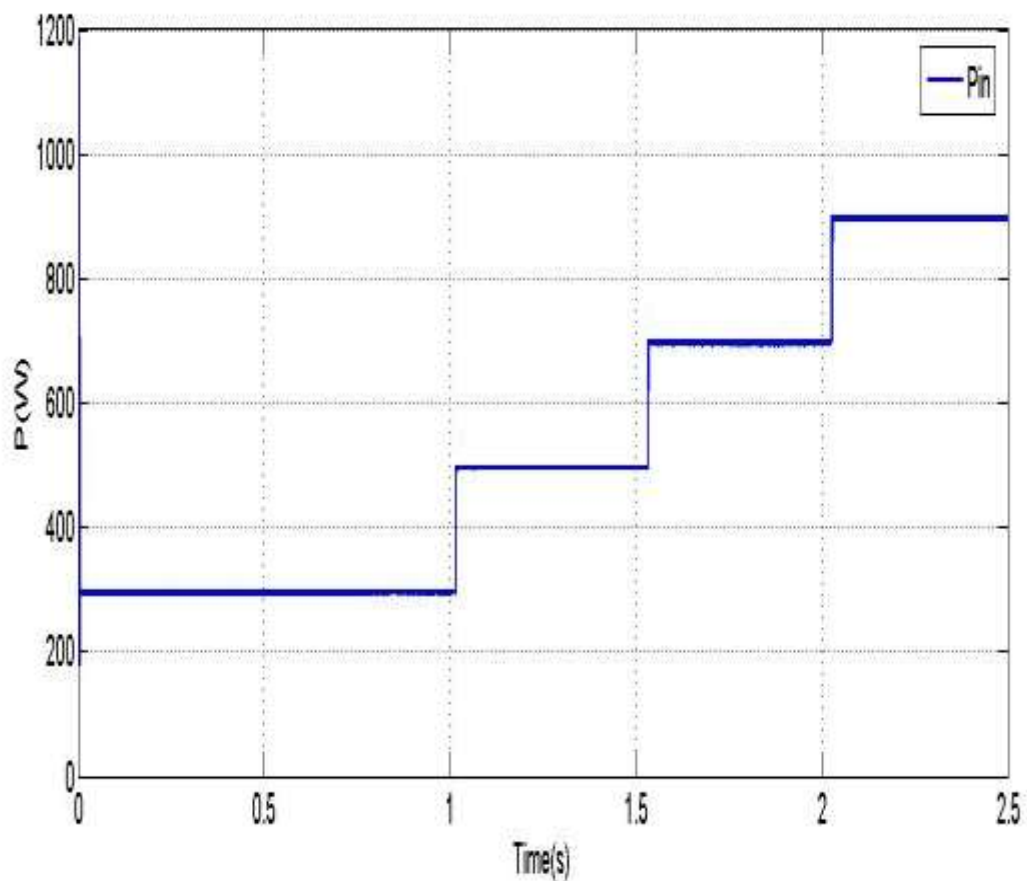
Η ισχύς που δίνεται στο μετατροπέα μεταβάλλεται σύμφωνα με το παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.3 Χρόνος και αντίστοιχη ισχύς

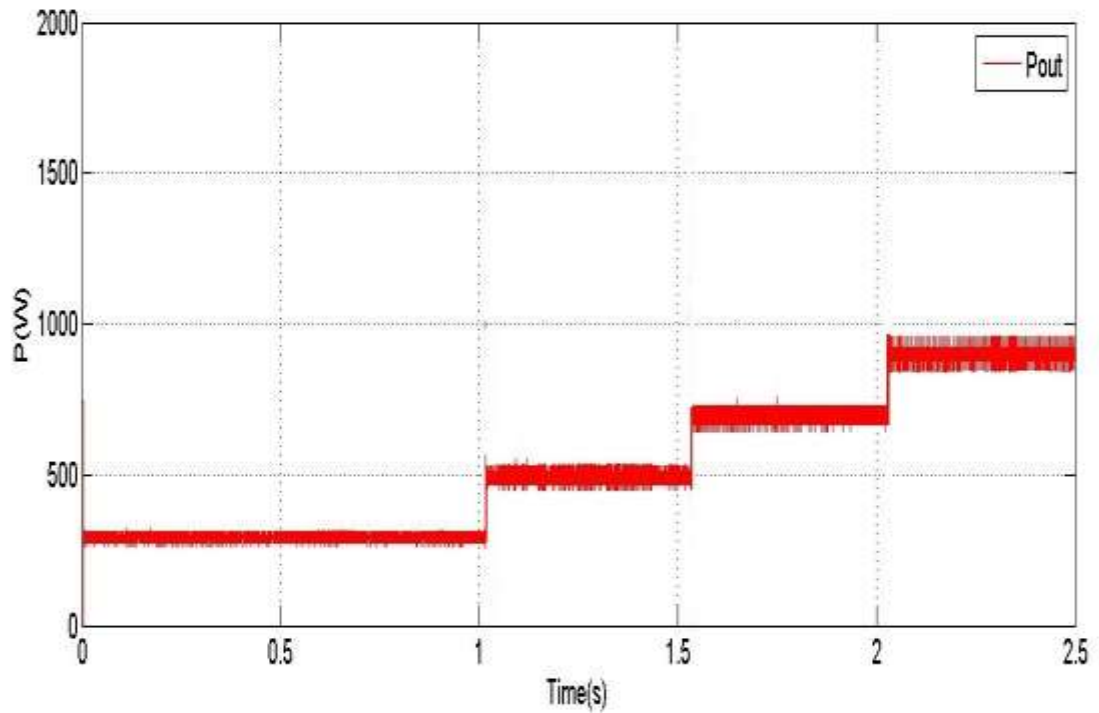
Χρόνος-Ts(μs)	Ισχύς-Pcommand(W)
0-1	300
1-1.5	500
1.5-2	700
2-2.5	900

Σκοπός είναι να εφαρμόζεται κάθε στιγμή έλεγχος ισχύος, ώστε ο μετατροπέας να δημιουργεί την ίδια ισχύ στην έξοδο, όπως και στην είσοδο (οι απώλειες θεωρούνται αμελητέες) με αυτή που Pcommand.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγιναν σύμφωνα με τον πίνακα 4.3



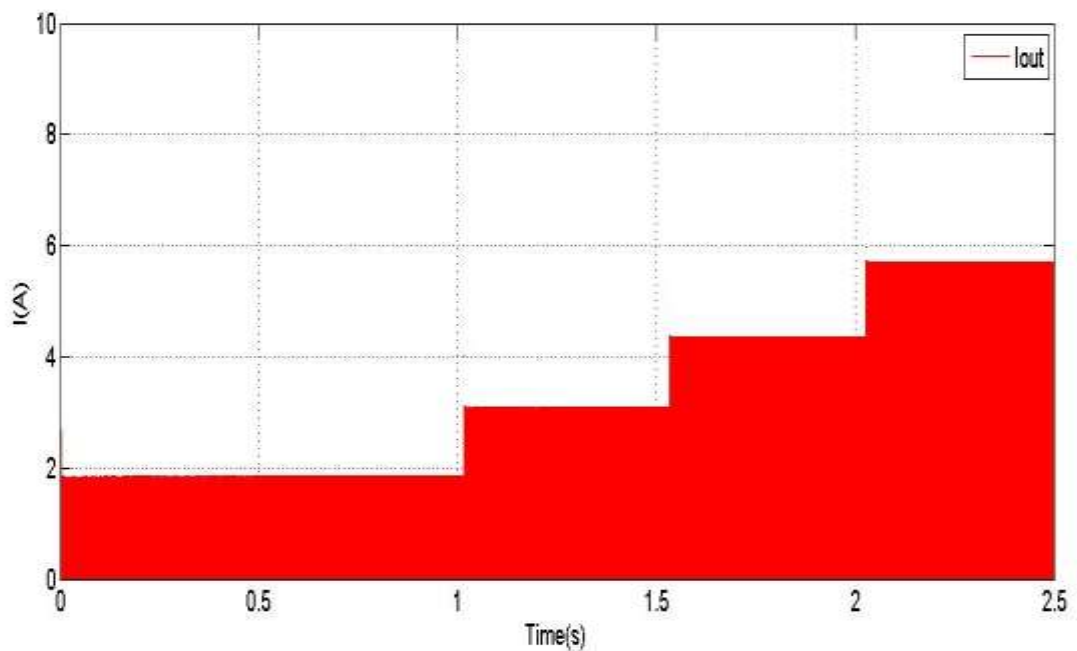
Σχήμα 4.24 Ισχύς εισόδου



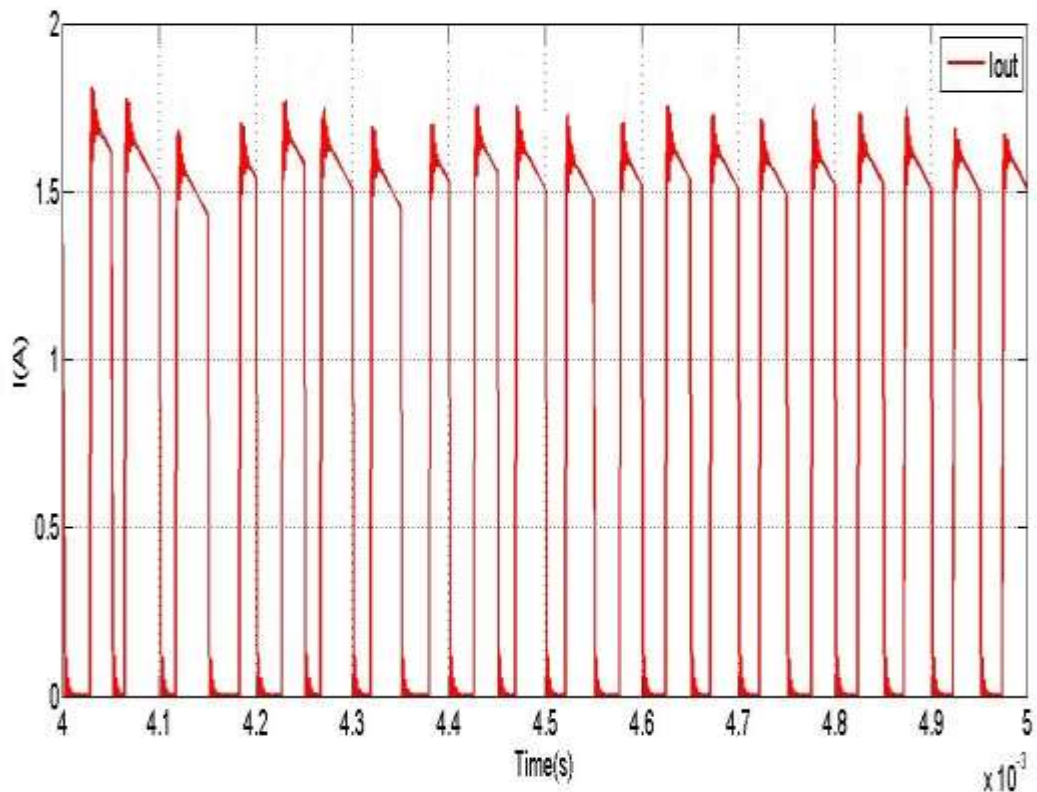
Σχήμα 4.25 Ισχύς εξόδου

Από τις παραπάνω γραφικές παρατηρούμε πως και η ισχύς εισόδου και η εξόδου προσεγγίζουν κάθε χρονική στιγμή την $P_{command}$.

Παρακάτω φαίνεται το ρεύμα εξόδου.



Σχήμα 4.26 Ρεύμα εξόδου σε όλο τ χρονικό διάστημα της προσομοίωσης

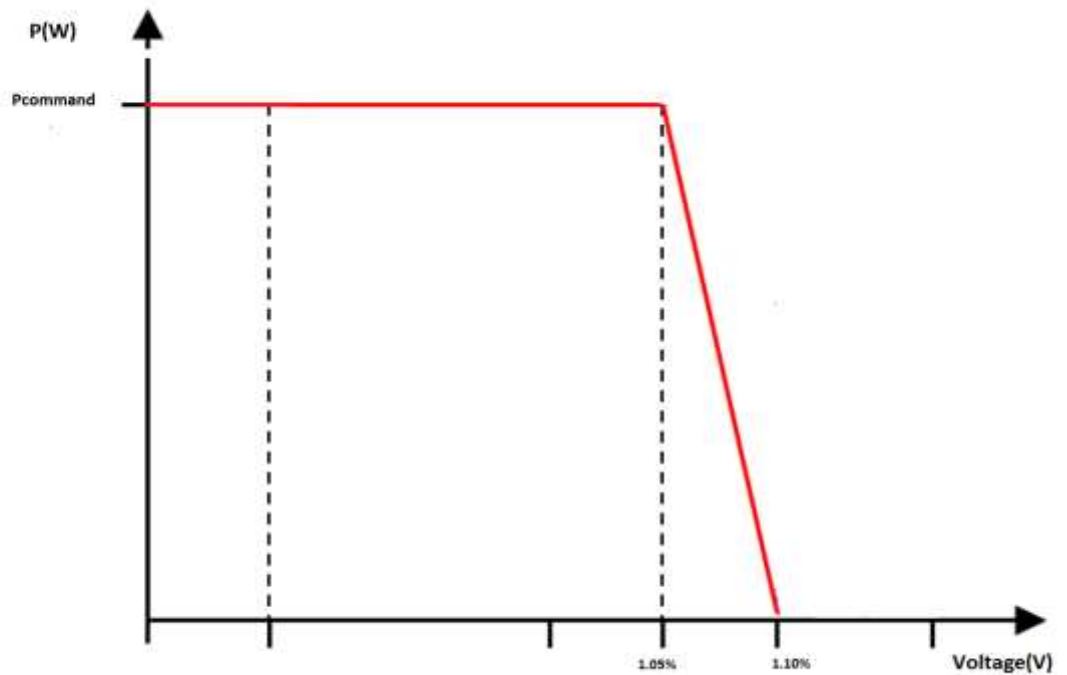


Σχήμα 4.27 Μεγέθυνση ρεύματος εξόδου

Το γεγονός ότι η κυματογράφο έχει τέτοια μορφή οφείλεται στο ότι ο μετατροπέας ανύψωσης έχει μια σταθερή πηγή τάσης εξόδου με αποτέλεσμα και οι πυκνωτές στα άκρα τους, που είναι παράλληλα με την πηγή να έχουν και αυτοί σταθερή τάση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι πυκνωτές να μην φορτίζονται και να μην εκφορτίζονται. (Είτε υπάρχουν είτε όχι στο κύκλωμα δεν υπάρχει καμία διαφορά). Έτσι όταν ο διακόπτης είναι κλειστός το ρεύμα εξόδου είναι μηδέν και όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός το ρεύμα είναι διάφορο του μηδενός. Στην ουσία το ρεύμα εξόδου έχει την ίδια συμπεριφορά με τον παλμό που δίνεται στο διακοπτικό στοιχείο.

4.6.4 Έλεγχος με την καμπύλη droop

Στην περίπτωση αυτή ανάλογα με την τιμή της τάσης εξόδου αλλάζει και η ισχύς που πρέπει να δίνει το κύκλωμα. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή στον έλεγχο της droop καμπύλης. Η καμπύλη έχει την ακόλουθη μορφή :



Σχήμα 4.28 Καμπύλη droop

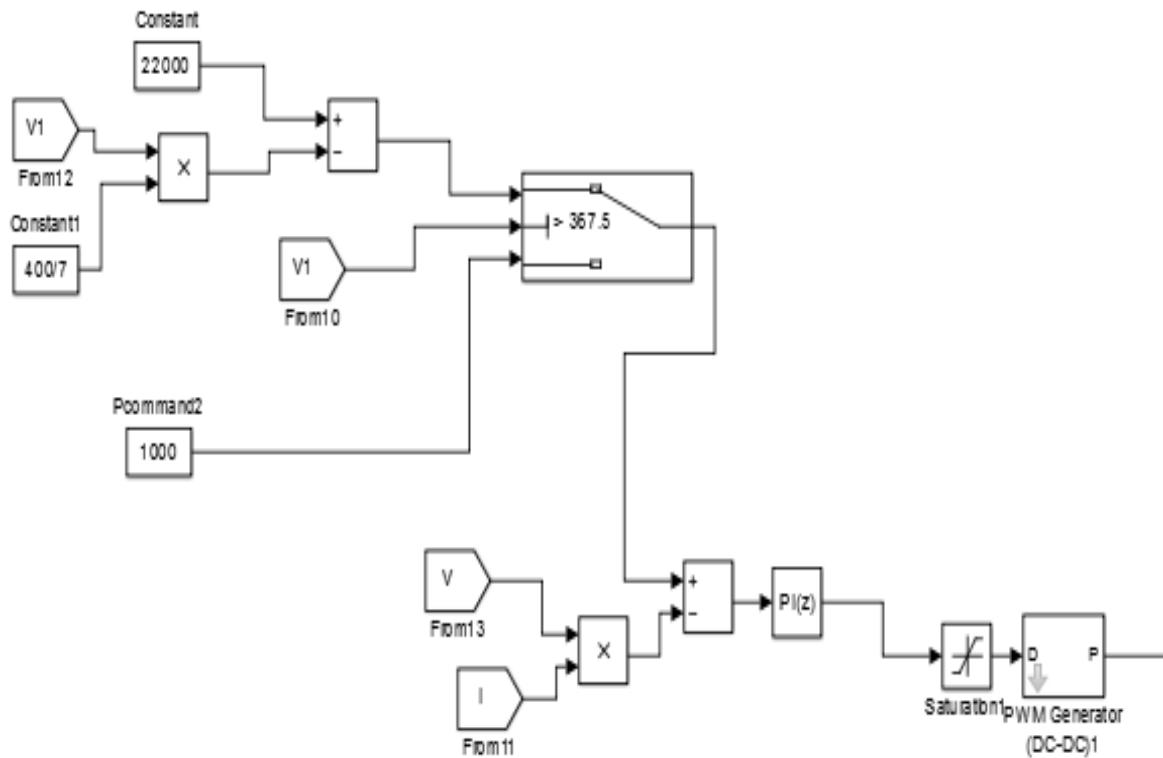
Εισάγεται μία σταθερή τιμή ισχύος $P_{command}=1000W$. Όπως φαίνεται στο σχήμα η τιμή της ισχύος είναι σταθερή μέχρι το 1.05% της τάσης εξόδου, δηλαδή $350 \cdot 1.05=367.5V$ και μετά μειώνεται μέχρι το 1.10%, δηλαδή μέχρι τα $350 \cdot 1.1=385V$. Η συνάρτηση που αναπαριστά την παραπάνω καμπύλη είναι δίκλαδη και ισούται με :

$$P=1000W \quad \text{για} \quad V_{out} \leq 367.5V \quad (4.7\alpha)$$

Και

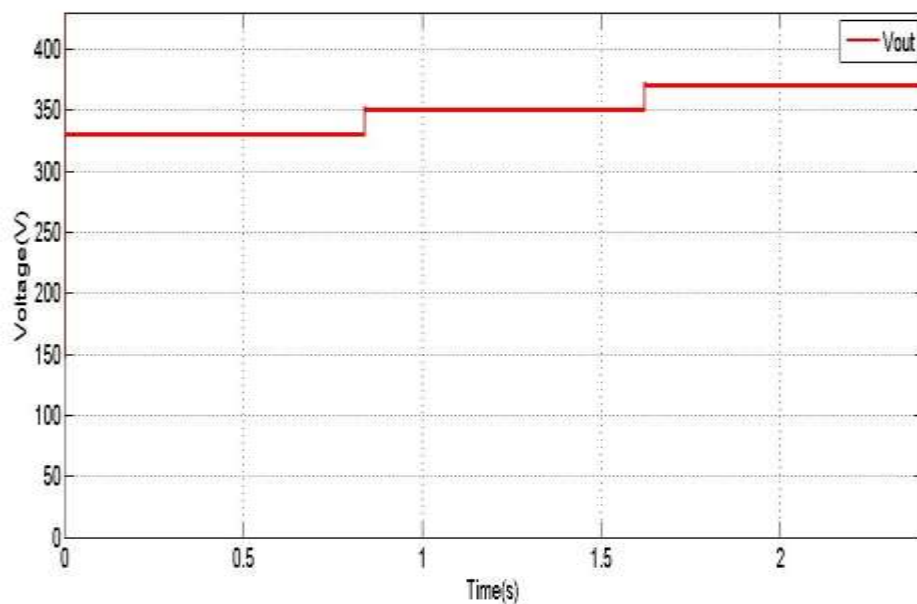
$$P = 22000 - \frac{400V_{out}}{7} \quad \text{για} \quad V_{out} > 367.5V \quad (4.7b)$$

Αυτή η συνάρτηση υλοποιήθηκε στο περιβάλλον του Simulink και συγκεκριμένα, το PWM δέχεται τώρα ως είσοδο τη διαφορά του αποτελέσματος της συνάρτησης με την ισχύ εισόδου. Παρακάτω φαίνεται το σχήμα :

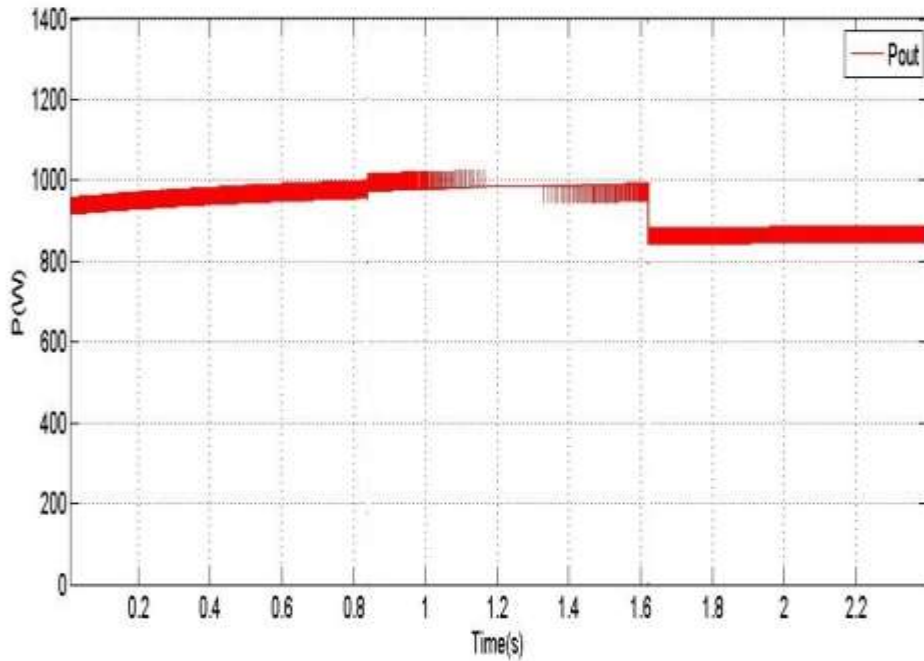


Σχήμα 4.29 Έλεγχος με droop καμπύλη

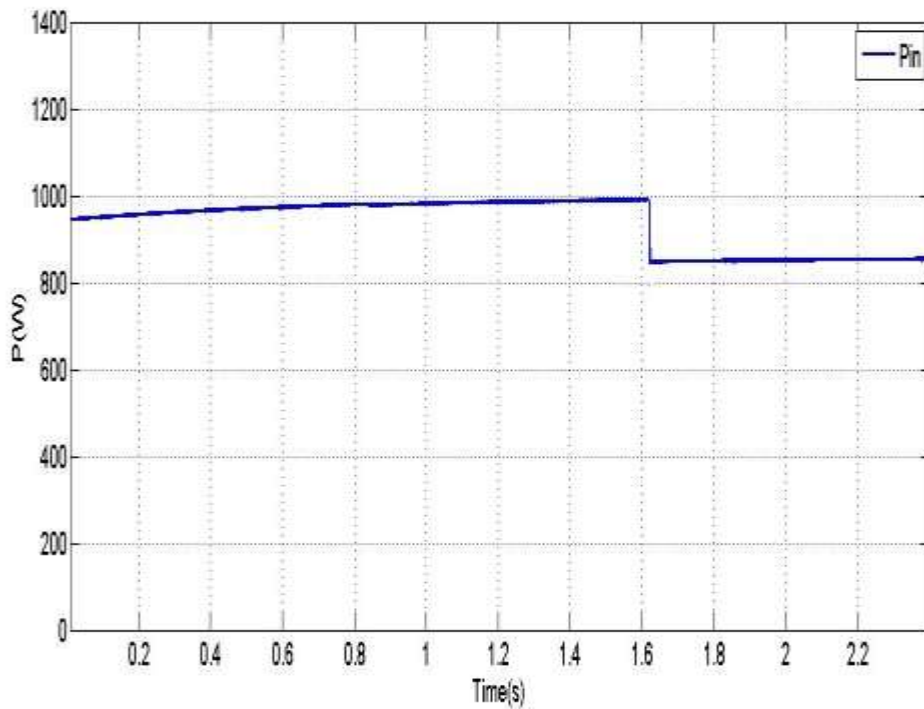
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τη λειτουργία ελέγχου της droop καμπύλης για τιμή τάσης εξόδου 330V, 350V και 370V φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται η αλλαγή της τάσης εξόδου σε κάθε χρονικό διάστημα και ακολουθούν τα διαγράμματα ισχύος εξόδου και εισόδου.



Σχήμα 4.30 Τάση εξόδου



Σχήμα 4.31 Ισχύς εξόδου με εφαρμογή της droop καμπύλης



Σχήμα 4.32 Ισχύς εισόδου

Η ισχύς εξόδου-εισόδου για τάση 330V και 350V προσεγγίζει τα 1000W , ενώ για τάση μεγαλύτερη 367.5 η ισχύς μειώνεται όπως ήταν αναμενόμενο καθώς επιδρά η droop καμπύλη.

Κεφάλαιο 5

Μπαταρίες-Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές

5.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική μπαταρία είναι μια συσκευή που αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία που μετατρέπουν την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδωσης – μείωσης [29].

Στην περίπτωση που το σύστημα έχει τη δυνατότητα να ξαναφορτίζει την μπαταρία, η μπαταρία επαναφορτίζεται με την αντιστροφή της παραπάνω διαδικασία. Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά των ηλεκτρονίων από ένα υλικό σε άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Σε μία μη ηλεκτροχημική αντίδραση οξειδοαναγωγής, όπως σκουριά ή καύση, η μεταφορά ηλεκτρονίων πραγματοποιείται απευθείας και σ' αυτό εμπλέκεται μόνο θερμότητα. Καθώς η μπαταρία ηλεκτροχημικά μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια, δεν υπόκειται, όπως και η καύση ή μηχανές θερμότητας, με τους περιορισμούς του κύκλου Carnot που υπαγορεύεται από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Γι' αυτό το λόγο και οι μπαταρίες έχουν υψηλότερη απόδοση στη μετατροπή ενέργειας.

Ενώ συχνά χρησιμοποιείται ο όρος της μπαταρία, η βασική ηλεκτροχημική μονάδα στην οποία αναφέρεται είναι το στοιχείο (cell). Η μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα από αυτά τα στοιχεία, που συνδέονται είτε σε σειρά ή παράλληλα, ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή τάση εξόδου και χωρητικότητα που θέλουμε να πετύχουμε.

Το στοιχείο (Cell) της μπαταρίας αποτελείται από τα τρία παρακάτω σημαντικά συστατικά:

1. Το ηλεκτρόδιο ανόδου ή αρνητικό ηλεκτρόδιο (το ηλεκτρόδιο μείωσης ή καυσίμου), το οποίο παραχωρεί ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης.
2. Το ηλεκτρόδιο καθόδου ή θετικό ηλεκτρόδιο (το ηλεκτρόδιο οξειδωσης), το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και μειώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής διαδικασίας.
3. Τον ηλεκτρολύτη (ιοντικό αγωγό), ο οποίος παρέχει το μέσο για τη μεταφορά του φορτίου, με τη μορφή ιόντων, μέσα στο στοιχείο ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο. Ο ηλεκτρολύτης είναι τυπικά ένα υγρό, όπως το νερό ή άλλοι διαλύτες, με διαλυμένα άλατα, οξέα ή αλκάλια να μεταδίδουν την ιοντική αγωγιμότητα. Μερικές μπαταρίες χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες, οι οποίοι είναι ιοντικοί αγωγοί στη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου

5.2 Ταξινόμηση στοιχείων μπαταρίας

Τα ηλεκτροχημικά στοιχεία και οι μπαταρίες χαρακτηρίζονται ως πρωτεύουσες (μη επαναφορτιζόμενες) ή δευτερεύουσες (επαναφορτιζόμενες) ανάλογα με το αν μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά. Αυτές οι 2 μεγάλες κατηγορίες περιέχουν υποκατηγορίες που έχουν να κάνουν με συγκεκριμένες δομές ή σχεδιασμούς.

Πρωτεύουσες μπαταρίες (primary batteries)

Αυτές οι μπαταρίες εκφορτίζονται μια φορά και στη συνέχεια απορρίπτονται, καθώς δεν έχουν τη δυνατότητα να επαναφορτιστούν αποτελεσματικά. Πολλά πρωτεύοντα στοιχεία στα οποία ο ηλεκτρολύτης περιέχεται σε ένα απορροφητικό ή διαχωριστικό υλικό ονομάζονται ξηρά στοιχεία. Η πρωτεύουσα μπαταρία είναι συνήθως οικονομική, ελαφριά πηγή συσκευασμένης ενέργειας για φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμό, φωτογραφικό εξοπλισμό, παιχνίδια, εφεδρικές μνήμες και μια σειρά από άλλες εφαρμογές.

Τα πλεονεκτήματα τους στηρίζονται στη μεγάλη διάρκεια ζωής τους, στην υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, στους χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς εκφόρτισης, στην ευκολία χρήσης τους και στο γεγονός ότι δεν χρειάζονται συντήρηση.

Παρ' όλο που μεγάλες πρωτεύουσες μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές, σηματοδότηση, ενέργεια αναμονής και αλλού, η συντριπτική πλειοψηφία των πρωτεύουσών μπαταριών είναι οι γνωστές σε όλους μπαταρίες ενός κυλινδρικού στοιχείου και flat button ή πολυκυτταρικές μπαταρίες που χρησιμοποιούν αυτά τα στοιχεία σαν συστατικά.

Δευτερεύουσες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (secondary or rechargeable)

Αυτές οι μπαταρίες μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά, μετά την απόρριψη όλης της ενέργειας τους, στην αρχική τους κατάσταση με διερχόμενο ρεύμα μέσω αυτών, αντίθετης κατεύθυνσης από αυτό του ρεύματος εκφόρτισης. Αυτές είναι συσκευές αποθήκευσης για ηλεκτρική ενέργεια και είναι επίσης γνωστές ως μπαταρίες αποθήκευσης ή συσσωρευτές.

Οι εφαρμογές επαναφορτιζόμενων μπαταριών εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Σ' αυτές στις οποίες η δευτερεύουσα μπαταρία χρησιμοποιείται ως συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, όπου είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη και φορτίζεται από μια πρωταρχική πηγή ενέργειας αποτέλεσμα να αποδίδει την ενέργειά της στο φορτίο όταν αυτή της ζητηθεί. Τέτοιες μπαταρίες χρησιμοποιούν τα συστήματα των αυτοκινήτων και αεροσκαφών, οι πηγές ενέργειας αναμονής (UPS) για να μην υπάρξει

αποτυχία σε περίπτωση ανάγκης, τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα καθώς και τα συστήματα στάσιμης ενεργειακής αποθήκευσης (stationary energy storage – SES) για ηλεκτρική χρήση ανύψωσης φορτίου.

- Και σ' αυτές στις οποίες η δευτερεύουσα μπαταρία χρησιμοποιείται ή εκφορτίζεται ουσιαστικά ως πρωτεύουσα μπαταρία, που όμως μετά τη χρήση επαναφορτίζεται, αντί να απορρίπτεται. Τέτοιου είδους μπαταρίες συναντάμε στις φορητές ηλεκτρονικές καταναλώσεις, στα ηλεκτρικά εργαλεία, στα ηλεκτρικά οχήματα, αφού προσφέρουν μείωση του κόστους (καθώς έχουν την δυνατότητα να επαναφορτιστούν αντί να αντικατασταθούν) αλλά και σε εφαρμογές που απαιτούν άντληση ενέργειας πέρα από τα όρια μιας πρωτεύουσας μπαταρίας.

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που χαρακτηρίζονται, εκτός από την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται, έχουν επιπλέον υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και καλές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η ενεργειακή πυκνότητα τους είναι γενικά χαμηλότερη από εκείνη των πρωτογενών μπαταριών, όπως και η κατακράτηση φορτίου είναι επίσης μικρότερη από εκείνη των περισσοτέρων πρωτευόντων μπαταριών, αν και αυτό δεν είναι τόσο πρόβλημα καθώς η χωρητικότητα που χάνεται σε μια δευτερεύουσα μπαταρία μπορεί να ανακτηθεί με την επαναφόρτιση [30].

5.3 Χαρακτηριστικά των μπαταριών- Ορολογία

Στο υποκεφάλαιο αυτό αναλύονται κάποιες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των συνθηκών λειτουργίας της μπαταρίας και των προδιαγραφών που δίνονται από το κατασκευαστή σχετικά με τη χωρητικότητα, την ονομαστική τάση και άλλων μεγεθών που πρέπει να είναι γνωστά.

Πιο συγκεκριμένα προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε πολλές φορές ο όρο στοιχείο όπως και μπαταρία. Στο σημείο αυτό θα εξηγηθεί τι ακριβώς είναι το καθένα.

Στοιχείο (Cell) : είναι η βασική ηλεκτροχημική μονάδα που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αποθηκευμένη χημική ενέργεια ή για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στη μορφή χημικής ενέργειας. Αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια σε ένα δοχείο γεμάτο με ηλεκτρολύτη.

Μπαταρία : είναι δύο ή περισσότερα στοιχεία που συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα ώστε να αποκτηθεί η επιθυμητή τάση για ένα ορισμένο φορτίο.

Τα υπόλοιπα βασικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας είναι :

Χωρητικότητα : Η χωρητικότητα μίας μπαταρίας (C) είναι το συνολικό ποσό του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να παραδώσει στην ονομαστική τάση.

Όσο περισσότερο υλικό ηλεκτροδίου περιέχεται στο στοιχείο τόσο μεγαλύτερη είναι και χωρητικότητα του. Ένα μικρό στοιχείο έχει μικρότερη χωρητικότητα από ένα μεγαλύτερο στοιχείο με την ίδια χημεία, παρόλο που αναπτύσσουν την ίδια τάση ανοικτού κυκλώματος. Η χωρητικότητα ενός στοιχείου/μπαταρίας μετριέται συνήθως σε αμπέρ – hour (Ah) και καθορίζεται από ένα σταθερό ρεύμα εκφόρτισης που εκφορτίζει τη μπαταρία μέχρι μια ορισμένη τελική τάση εκφόρτισης. Η χωρητικότητα εξαρτάται σημαντικά από το ρεύμα εκφόρτισης και τη θερμοκρασία. Ο υπολογισμός της χωρητικότητας γίνεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή του ρεύματος εκφόρτισης με το χρόνο που χρειάζεται για να φτάσει η μπαταρία στην τελική τάση. Οι κατασκευαστές μπαταριών μπορούν να ορίσουν οι ίδιοι το ρεύμα και την τελική τάση εκφόρτισης. Για παράδειγμα, μια μπαταρία ενέργειας 100 A·h μπορεί να παραδώσει 5A σε διάστημα 20 ωρών σε θερμοκρασία δωματίου. Εναλλακτικά, ένας ρυθμός εκφόρτισης μπορεί να καθορίζεται από το ρυθμό φόρτισης, C–rate, ο οποίος εκφράζεται σαν ένα πολλαπλάσιο της ονομαστικής χωρητικότητας του στοιχείου ή της μπαταρίας. Συγκεκριμένα ο ρυθμός φόρτισης ορίζεται ως το ρεύμα εκφόρτισης που διαιρείται με το θεωρητικό ρεύμα σύμφωνα με το οποίο η μπαταρία θα παραδώσει την ονομαστική χωρητικότητα σε μια ώρα. Ένα ποσοστό 1C σημαίνει ότι το ρεύμα εκφόρτισης θα εκφορτίσει το σύνολο της μπαταρία σε 1 ώρα. Για μια μπαταρία με χωρητικότητα 100 Amp·h, αυτό ισοδυναμεί με ρεύμα εκφόρτισης των 100 Amps. Ένα ποσοστό 5C για αυτή τη μπαταρία θα είναι 500 Amps σε 12 λεπτά , και ένα C / 2 ποσοστό θα είναι 50 αμπέρ σε 2 ώρες.

Στάθμη φόρτισης(State of charge-SOC) : Η στάθμη φόρτισης δίνει τη χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή. Εκατό τις εκατό στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ 0% στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η ονομαστική χωρητικότητα έχει εκφορτιστεί.

Βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge -DOD) : Το Βάθος εκφόρτισης είναι μια εναλλακτική μέθοδος που δείχνει την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC). Συγκεκριμένα δείχνει το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Το DOD είναι το συμπλήρωμα του SOC: όταν αυξάνεται το ένα το άλλο μειώνεται. Ενώ οι μονάδες SOC είναι σημεία επί τις εκατό (0% = άδειο και 100% = γεμάτο), οι μονάδες για το DOD είναι σε Ah (0 = γεμάτο και 50 Ah = άδειο) και σε σημεία επί τις εκατό (100% = άδειο και 0% = γεμάτο).

Κύκλος ζωής : Ο κύκλος ζωής μπαταρίας ορίζεται ως ο αριθμός της πλήρους φόρτισης και αποφόρτισης που μια μπαταρία μπορεί να εκτελέσει για ένα συγκεκριμένο DOD πριν η ονομαστική χωρητικότητά της πέσει κάτω από το 80% της αρχικής ονομαστικής χωρητικότητάς της. Πιο συγκεκριμένα είναι ένα μέτρο που δείχνει πόσους κύκλους μια μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει κατά τη διάρκεια της χρήσιμης ζωής της. Όπως αναφέρθηκε εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το βάθος του κάθε κύκλου. Εάν ο κύκλος ζωής μετριέται πειραματικά για ένα υψηλό DOD, τότε σε χαμηλότερα DOD το αποτέλεσμα του γινομένου του αριθμού των κύκλων επί το DOD είναι

περίπου σταθερό, δηλαδή ο κύκλος εργασιών της χωρητικότητας (capacity turnover) είναι περίπου ο ίδιος για χαμηλότερα DODS.

Αυτοεκφόρτιση: Η αυτοεκφόρτιση είναι η ηλεκτρική ισχύς που χάνεται όταν το στοιχείο δεν είναι συνδεδεμένο σε κάποια κατανάλωση. Προκαλείται από ηλεκτροχημικές διαδικασίες εντός του στοιχείου και είναι ισοδύναμη με την εφαρμογή ενός μικρού εξωτερικού φορτίου. Προκειμένου να μειωθεί η αυτοεκφόρτιση, συνιστάται η αποθήκευση των στοιχείων και των μπαταριών να γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Τάση αποκοπής: Η τάση αποκοπής είναι η τάση της μπαταρίας στην οποία η εκφόρτιση τερματίζεται. Επίσης, αναφέρεται συχνά και ως τάση τέλους εκφόρτισης.

Αποδοτικότητα μπαταρίας: Λόγω της εσωτερικής αντίστασης και του γεγονότος ότι η τάση φόρτισης είναι μεγαλύτερη από την τάση εκφόρτισης η ενέργεια που επιστρέφεται από την μπαταρία κατά την εκφόρτιση, θα είναι μικρότερη από την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την επαναφόρτιση [31].

$$\text{Ampere hour-efficiency} = \frac{\text{discharged Ah} \times 100\%}{\text{charging Ah}}$$

5.4 Τύποι μπαταριών

Υπάρχουν και αναπτύσσονται συνεχώς πάρα πολύ τύποι μπαταριών, από τους οποίους άλλοι χρησιμοποιούνται ευρύτερα και άλλοι βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Αυτοί κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το εάν είναι πρωτογενής ή δευτερογενής όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Αν και διάφοροι συνδυασμοί ανόδου-καθόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστήματα πρωταρχικών μπαταριών, μόνο λίγοι από αυτούς έχουν επιτύχει στην πράξη. Ο ψευδάργυρος είναι μακράν το δημοφιλέστερο υλικό ανόδου για τις πρωτογενείς μπαταρίες λόγω της καλής ηλεκτροχημικής συμπεριφοράς του, την υψηλή ηλεκτροχημική ισοδυναμία, τη συμβατότητα με τους υδάτινους ηλεκτρολύτες, τη μεγάλη διάρκεια ζωής του, το χαμηλό κόστος, και την άμεση διαθεσιμότητα. Το αλουμίνιο είναι επίσης ελκυστικό λόγω του υψηλού του ηλεκτροχημικού δυναμικού του και της ηλεκτροχημικής ισοδυναμίας και διαθεσιμότητας του, αλλά λόγω της παθητικοποίησης και της περιορισμένης ηλεκτροχημικής απόδοσης, δεν έχει αναπτυχθεί επιτυχώς σε πρακτικό επίπεδο ως πρωτογενή μπαταρία. Αυτό εξετάζεται τώρα στις μηχανικά επαναφορτιζόμενες ή ανεφοδιασμού αλουμινίου/αέρα μπαταρίες και στα αποθεματικά συστήματα μπαταρίας. Το μαγνήσιο έχει και αυτό ελκυστικές ηλεκτρικές ιδιότητες καθώς και το χαμηλότερο κόστος και γι' αυτό χρησιμοποιείται επιτυχώς στις πρωτογενείς μπαταρίες, ιδιαίτερα για στρατιωτικές εφαρμογές, λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς του και της μεγάλης διάρκειας ζωής του. Παρόλα αυτά το εμπορικό του ενδιαφέρον έχει πια περιοριστεί. Τώρα υπάρχει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς το λίθιο, το οποίο έχει την υψηλότερη βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα και το πρότυπο δυναμικό όλων των μετάλλων. Η άνοδος στα συστήματα μπαταριών λιθίου, που χρησιμοποιούν ένα αριθμό

διαφορετικών μη υδατικών ηλεκτρολυτών στα οποία το λίθιο είναι σταθερό, όπως και τα διαφορετικά υλικά καθόδου, προσφέρουν την ευκαιρία για υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και επιπλέον και άλλες προόδους ως προς τα χαρακτηριστικά των επιδόσεων των πρωτογενών συστημάτων. Οι κυριότεροι τύποι πρωτογενών μπαταριών περιληπτικά είναι οι παρακάτω [30]:

- ❖ Ψευδαργύρου/Άνθρακα (Zn/C): οι γνωστές απλές μπαταρίες. Για τις απλούστερες χρήσεις και με τη μικρότερη διάρκεια ζωής.
- ❖ Ψευδαργύρου / Χλωριδίου (Zn/Cl): με λίγο μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Χρησιμοποιούνται εκεί που υπάρχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ενέργεια.
- ❖ Αλκαλικές Μαγγανίου: με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τα δύο προηγούμενα είδη. Είναι μάλιστα και φιλικότερες προς το περιβάλλον.
- ❖ Αργύρου: συνήθως κομβιόσχημες, περιέχουν οξειδίο του αργύρου, και χρησιμοποιούνται κυρίως σε ρολόγια.
- ❖ Λιθίου: μεγάλης διάρκειας ζωής, περιέχουν μεταλλικό λίθιο και χρησιμοποιούνται ευρέως στον φωτογραφικό εξοπλισμό και στα κινητά τηλέφωνα.
- ❖ Ψευδαργύρου - αέρα: επίσης κομβιόσχημες, έχουν την καινοτομία ότι αντί θετικού πόλου, χρησιμοποιείται το ατμοσφαιρικό οξυγόνο.
- ❖ Υδραργύρου: με οξειδίο του υδραργύρου, χρησιμοποιείται κυρίως σε ιατρικές συσκευές, όπως ακουστικά βαρηκοΐας. Δυστυχώς, ο υδράργυρος που περιέχουν είναι επικίνδυνος για το περιβάλλον.

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες έχουν το χαρακτηριστικό της φόρτισης και της εκφόρτισης, δηλαδή η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική ενέργεια και πάλι πίσω σε ηλεκτρική ενέργεια και γι' αυτό θα πρέπει να είναι υψηλής ενεργειακής απόδοσης, και θα πρέπει να έχουν ελάχιστες φυσικές αλλαγές που μπορούν να περιορίσουν τον κύκλο ζωής τους. Η χημική ενέργεια, η οποία μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση των συστατικών του στοιχείου, απώλεια ζωής ή απώλεια ενέργειας, θα πρέπει να απουσιάζει και το στοιχείο θα πρέπει να διαθέτει ακόμα τα συνήθη επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός συσσωρευτή όπως υψηλή ειδική ενέργεια, χαμηλή αντίσταση και καλή απόδοση και αυτά σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Οι απαιτήσεις αυτές περιορίζουν τον αριθμό των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Από τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, οι πιο διαδεδομένες συνοπτικά είναι :

- ❖ Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος(Lead Acid)
- ❖ Συσσωρευτές με ηλεκτρόδια σιδήρου
- ❖ Συσσωρευτές νικελίου-σιδήρου (iron-nickel oxide)
- ❖ Συσσωρευτές σιδήρου-αέρα (iron-air)
- ❖ Συσσωρευτές σιδήρου-αργύρου (iron-silver oxide)
- ❖ Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium, NiCd)
- ❖ Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου pocket plate
- ❖ Συσσωρευτής νικελίου-καδμίου sintered plate
- ❖ Συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου υδριδίου (nickel-metal hydride, NiMH)
- ❖ Φορητοί συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου κλειστού τύπου
- ❖ Συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου βιομηχανικού τύπου και πρόωσης,

- ❖ Συσσωρευτές νικελίου-ψευδαργύρου (zinc-nickel oxide)
- ❖ Συσσωρευτές οξειδίου αργύρου (silver-oxide)
- ❖ Συσσωρευτές ψευδαργύρου-μαγγανίου (rechargeable alkaline)
- ❖ Συσσωρευτές λιθίου (lithium)
- ❖ Συσσωρευτές ιόντων λιθίου (lithium-ion, li-ion)

5.5 Είδος μπαταρίας για αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

Οι μπαταρίες κατασκευάζονται με μια ποικιλία δομών και υλικών, ανάλογα με την εφαρμογή. Εάν επιλεγεί λανθασμένο είδος έχουμε κακή μακροζωία. Οι εφαρμογές ηλιακής αποθήκευσης απαιτούν μπαταρίες που θα έχουν την δυνατότητα να εκφορτιστούν κάτω από το 50% της αποθηκευτικής τους ικανότητας (deep cycling). Σε ένα σπίτι εκτός δικτύου απαιτούνται συνήθως από 50 έως 100 κύκλοι ανά έτος σε 30% έως 80% βάθος εκφόρτισης. Γι' αυτό πάντα πρέπει να χρησιμοποιούνται υψηλής ποιότητας, βαθύ κύκλου μπαταρίες σ' αυτές τις εφαρμογές.

Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται σε συστήματα έκτακτης ανάγκης (backup systems) υφίστανται βαθύς κύκλους μόνο όταν υπάρχει διακοπή. Σε τακτά χρονικά διαστήματα, οι μπαταρίες αυτού του τύπου πρέπει να φορτίζονται πλήρως για την ανάμιξη του ηλεκτρολύτη. Αυτό αποτρέπει την στρωματοποίηση του διαλύματος. Επειδή λοιπόν σε αυτές τις εγκαταστάσεις ο αριθμός των κύκλων φόρτισης εκφόρτισης δεν είναι συχνός πρέπει να τοποθετούνται ειδικές μπαταρίες για αυτό το σκοπό. Μπορεί να μην είναι καλές για εκατοντάδες κύκλους, αλλά θα παραμείνουν σε καλή κατάσταση λειτουργίας μετά από χρόνια με ελαφριά χρήση.

Γενικά υπάρχουν στην αγορά δύο τεχνολογίες κατάλληλες για τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα:

- α. με βάση το μόλυβδο (μολύβδου-οξέος) και
- β. ιόντων λιθίου.

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος δοκιμάζονται σήμερα πιο έντονα, αφού έχουν οικονομικό πλεονέκτημα, αλλά η αποτελεσματικότητά τους είναι ακόμη αισθητά μικρότερη από αυτή των ιόντων λιθίου. Παρόλα αυτά αυτές συνεχίζουν να έχουν πρωτεύοντα χαρακτήρα στα ηλιακά συστήματα γι' αυτό και στη διάταξη θα χρησιμοποιηθεί αυτού του είδους μπαταρία. Στο σημείο αυτό θα γίνει μια μικρή αναφορά των μπαταριών μολύβδου οξέος.

Μπαταρίες Μολύβδου Οξέως

Κάθε στοιχείο της μπαταρίας μολύβδου-οξέος αποτελείται από ένα θετικό ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο του μολύβδου, που χωρίζονται από ένα πορώδες υλικό και βυθίζεται σε ένα υδατικό ηλεκτρολύτη θειικού οξέος (που περιέχεται σε μια πλαστική θήκη). Η

μπαταρία μολύβδου-οξέος είναι σχεδιασμένη σε πολλές διαμορφώσεις, από το μικρό σφραγισμένο στοιχείο με χωρητικότητα 1 Ah έως πολύ μεγάλα, της τάξης των 12.000 Ah. Σ' αυτούς, η διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης είναι ουσιαστικά αναστρέψιμη, το σύστημα δεν πάσχει από επιβλαβείς χημικές ουσίες, και ενώ η ενεργειακή πυκνότητα του και η ειδική ενέργεια είναι χαμηλές, η μπαταρία μολύβδου-οξέος εκτελείται αξιόπιστα σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Ένας βασικός παράγοντας για τη δημοτικότητά του και την ευνοϊκή θέση που κατέχει σε σχέση με άλλες δευτερογενής μπαταρίες είναι το χαμηλό κόστος, η καλή απόδοση και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που σχετίζονται με την αποθήκευση ενέργειας (πχ ηλιακής), την παροχή ενέργειας σε έκτακτη ανάγκη και με τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε συμβατικά οχήματα όπου παρέχουν την ενέργεια για να ξεκινήσουν τα ηλεκτρονικά τμήματα του οχήματος, να ανάψουν οι ηλεκτρικές λυχνίες και να τροφοδοτηθεί η μίζα του αυτοκινήτου.

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μπαταριών μολύβδου οξέος

Οι δύο παράμετροι που χρησιμοποιούνται συνήθως για να περιγράψουμε την απόδοση της μπαταρίας είναι : η τάση και η χωρητικότητα.

Η τάση ενός στοιχείου μπαταρίας καθορίζεται από τις χημικές ύλες που χρησιμοποιούνται σε αυτό. Οι αντιδράσεις αναγωγής και οξειδωσης, παράγουν ένα σταθερό δυναμικό. Το ποσό της μείωσης και της οξειδωσης δυναμικά καθορίζει την τάση του στοιχείου.

Η αντίδραση εκκένωσης στο θετικό ηλεκτρόδιο του στοιχείου μολύβδου οξέος έχει ένα δυναμικό της τάξης των 1.685 Volt ενώ η αντίδραση στο αρνητικό ηλεκτρόδιο έχει ένα δυναμικό 0,356 Volt. Έτσι η συνολική τάση ενός κυττάρου μολύβδου-οξέος είναι 2,04 Volt. Η τιμή αυτή είναι γνωστή ως το πρότυπο δυναμικό ηλεκτροδίου. Άλλοι παράγοντες, όπως η συγκέντρωση οξέος μπορεί επίσης να επηρεάσει την τάση ενός στοιχείου μολύβδου-οξέος. Η τυπική τάση ανοικτού κυκλώματος των στοιχείων μολύβδου-οξέος του εμπορίου είναι περίπου 2,15 Volt. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά έτσι ώστε να παράγουν συσσωρευτές με μεγαλύτερη τάση εξόδου. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να υπάρχουν μπαταρίες μολύβδου-οξέος με ονομαστικές τάσεις 2V, 4V, 6V, κλπ που μπορούν να συναρμολογηθούν και να δώσουν μεγαλύτερες τάσεις.[32]

Ενώ η τάση καθορίζεται από τη χημεία του στοιχείου, η χωρητικότητά τους είναι μεταβλητή ανάλογα με την ποσότητα των ενεργών υλικών που περιέχει. Το μέγεθος της εξαρτάται κάθε φορά από τη χρήση της μπαταρίας και υπολογίζεται ανάλογα με την ενέργεια που έχουμε και την ονομαστική τάση της μπαταρίας (θα το δούμε παρακάτω στον υπολογισμό της μπαταρίας για τη διάταξη μας)

5.6 Υπολογισμός μπαταρίας για το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

Το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας σε μια κατοικία. Μια απλή κατοικία κατά μέσω όρο έχει περίπου ημερήσια κατανάλωση 8kWh.

Με βάση την εταιρεία Sunlight οι μπαταρίες μολύβδου οξέως έχουν βάθος εκφόρτισης 80% το οποίο θα ληφθεί υπόψη για τους υπολογισμούς. Ο συσσωρευτής που θα χρησιμοποιηθεί στη διάταξη συνδέεται με ένα αμφίδρομο μετατροπέα (ανύψωσης-υποβιβασμού) για να φορτίζεται και να εκφορτίζεται και καταλήγει σε μια σταθερή συνεχή τάση ζυγού (DC bus link) όπως και το φωτοβολταϊκό και έχει βαθμό απόδοσης κοντά στο 95%.

Ο υπολογισμός της απαιτούμενης χωρητικότητας των συσσωρευτών γίνεται με βάση την ημερήσια απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καθώς και το πόσες ημέρες αυτονομίας απαιτούνται. Η εγκατάσταση που θα μοντελοποιηθεί θα θεωρηθεί πως χρειάζεται τέσσερις μόνο ημέρες αυτονομίας. Έτσι θα υπολογιστεί η χωρητικότητα των μπαταριών ώστε να καλύπτεται το φορτίο τεσσάρων ημερών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για μία τυπική ημέρα είναι 8kWh.

Έτσι η μπαταρία θα πρέπει να δίνει ημερήσια ενέργεια:
(λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες από το μετατροπέα)

$$E = \frac{8\text{kWh}}{0.95} = 8.42\text{kWh}$$

Όμως η μπαταρία έχει επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης 80%. Επομένως πρέπει να έχει ενέργεια:

$$E = \frac{8.42\text{kWh}}{0.8} = 10.526\text{kWh}$$

ώστε αν είναι πλήρως φορτισμένη, να μπορεί να μας δώσει τις 8,42kWh που υπολογίστηκαν αν εκφορτιστεί μόνο κατά 80%.

Άρα για τέσσερις μέρες χρειάζονται 42.104kWh.

Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η τάση τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα και επομένως τόσο μικρότερες οι ωμικές απώλειες. Έστω ότι η τάση του συστήματος είναι 96V. Τότε η χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah θα είναι :

$$C(\text{Ah}) = \frac{42.104\text{kWh}}{96} = 438 \text{ Ah}$$

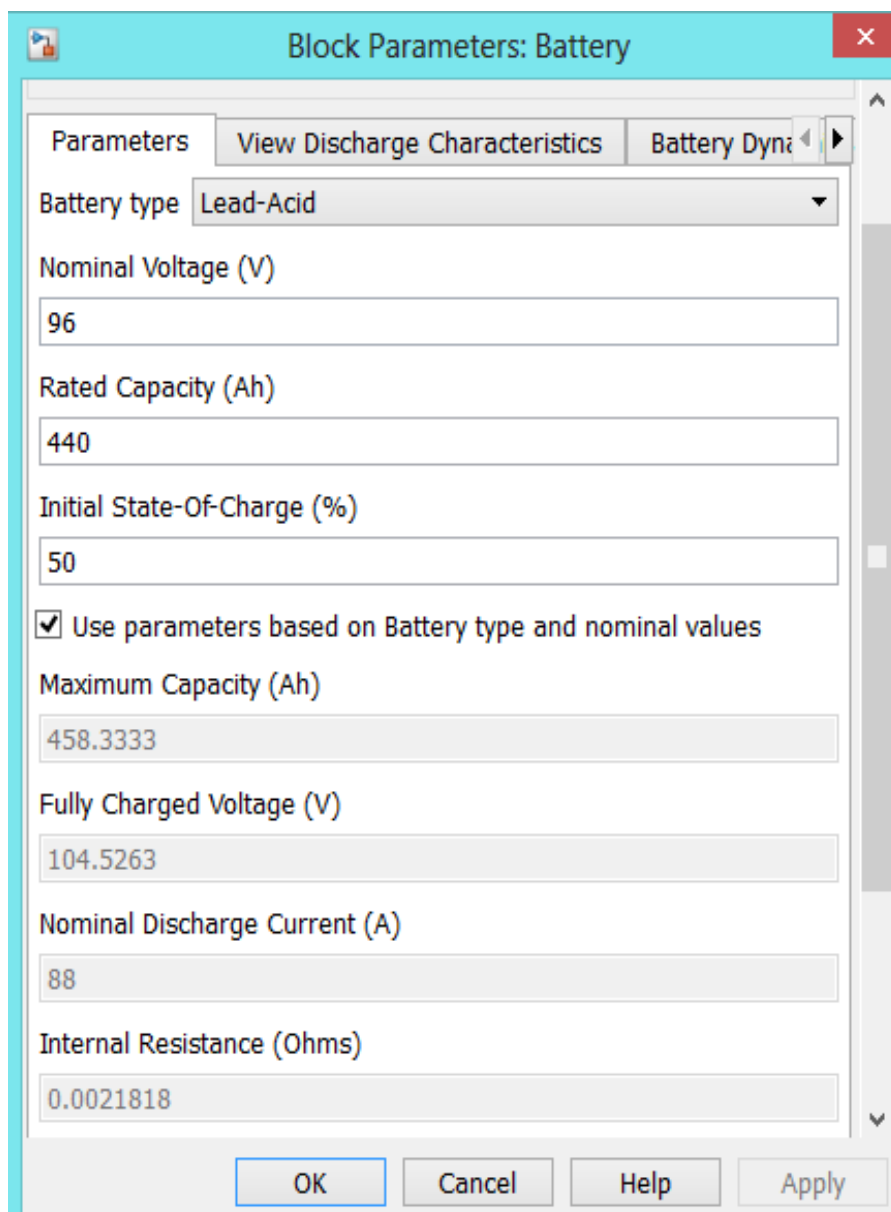
και δεδομένου ότι οι μπαταρίες διατίθενται σε στοιχεία των 2V θα συνδεθούν 48 στοιχεία σε σειρά.

Οπότε η μπαταρία που επιλέγεται για τη διάταξη θα έχει :

Τάση : 96 V

Χωρητικότητα : 440Ah

Το μοντέλο της μπαταρίας που θα χρησιμοποιηθεί υπάρχει έτοιμο στη βιβλιοθήκη του Matlab /Simulink και συγκεκριμένα το μπλοκ τιμών του φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 5.1 Παραμετροποίηση τιμών μπαταρίας

5.7 Σχεδιασμός αμφίδρομου μετατροπέα μπαταρίας

Με βάση την ανάλυση που έγινε για τον αμφίδρομο μετατροπέα στο κεφάλαιο 3 οι υπολογισμοί για τον μετατροπέα της διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί φαίνονται παρακάτω:

- Boost Converter

Για το σχεδιασμό του μετατροπέα ανύψωσης τα δεδομένα είναι :

$$I_{O_{\min}} = 5\% I_{O_{\max}}, V_r / V_{\text{out}} < 1\% \text{ και } f_s = 20\text{kHz}, V_{\text{out}} = 350\text{V}, V_{I_{\text{norm}}} = 96\text{V} \pm 10\%$$

και $P = 6\text{kW}$ (καθώς στα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα και στα αυτόνομα ο μετατροπέας μπορεί να είναι 6-7 kW αφού πρέπει να ακολουθεί το φορτίο)

Άρα $P_{I_{\max}} = 6000\text{W}$. Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας δεν παρουσιάζει απώλειες στη μέγιστη ισχύ έχουμε $P_{O_{\max}} = 6000 * 1 = 6000\text{W}$

$$\text{Άρα το μέγιστο ρεύμα εξόδου είναι } I_{O_{\max}} = \frac{P_{O_{\max}}}{V_{\text{out}}} = 17.14\text{A}$$

$$\text{Και το ελάχιστο } I_{O_{\min}} = \frac{I_{O_{\max}}}{20} = 0.85\text{A}$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση αντίστοιχα είναι:

$$R_{L_{\max}} = \frac{V_{\text{out}}}{I_{O_{\min}}} = 411.76\Omega \text{ και } R_{L_{\min}} = \frac{V_{\text{out}}}{I_{O_{\max}}} = 20.42\Omega$$

Με γνωστή την τάση εισόδου και εξόδου υπολογίζεται ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα ανύψωσης .

Οπότε υπολογίζεται και το εύρος τιμών του D που είναι

$$D_{\min} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{\text{out}}}{V_{I_{\max}}}} = 0.71$$

$$D_{\text{nom}} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{\text{out}}}{V_{I_{\text{nom}}}}} = 0.74$$

$$D_{\max} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{\text{out}}}{V_{I_{\max}}}} = 0.76$$

Οι τιμές είναι αποδεκτές καθώς ο λόγος κατατμήσεις δέχεται τιμές $0 < D < 1$

Επιλογή τιμής πηνίου

Το όριο για να έχουμε συνεχή λειτουργία είναι $D = 1/3$.Από τη στιγμή όμως που $D_{\min} = 0.49 > 1/3$ η ελάχιστη τιμή του πηνίου για να έχουμε συνεχή λειτουργία δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$L_{\min_boost} = \frac{R_{L_{\max}} D_{\min} (1 - D_{\min})^2}{2f_s} = 0.6\text{ mH}$$

Επιλογή τιμής πυκνωτή

Για να βρούμε το πυκνωτή εξόδου έχουμε δεδομένο ότι η κυμάτωση τάσης είναι 1%.

$$V_r = 0.01V_{out} = 3.5V$$

$$V_{rcpp} = V_r / 2 = 1.75 V$$

Άρα η τιμή του πυκνωτή είναι

$$C_{min_boost} = \frac{I_{o_{max}} D_{max}}{f_s V_{c_{pp}}} = \frac{V_{out} D_{max}}{V_{c_{pp}} R_{Lmin} f_s} = 372 \mu F$$

- Buck Converter

Για το σχεδιασμό του μετατροπέα υποβιβασμού τα δεδομένα είναι:

$$I_{O_{min}} = 10\% I_{O_{max}}, V_r / V_{out} < 1\% \text{ και } f_s = 20\text{kHz}, V_{out} = 96V, V_{Inorm} = 350V, \\ P = 6\text{kW}, \eta = 95\%$$

Άρα $P_{I_{max}} = 6000W$. Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας δεν παρουσιάζει απώλειες στη μέγιστη ισχύ έχουμε $P_{O_{max}} = 6000 * 1 = 6000W$

$$\text{Άρα το μέγιστο ρεύμα εξόδου είναι } I_{O_{max}} = \frac{P_{O_{max}}}{V_{out}} = 62.5A$$

$$\text{Και το ελάχιστο } I_{O_{min}} = \frac{I_{O_{max}}}{20} = 6.25A$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση αντίστοιχα είναι:

$$R_{Lmax} = \frac{V_{out}}{I_{O_{min}}} = 15.36\Omega \text{ και } R_{Lmin} = \frac{V_{out}}{I_{O_{max}}} = 1.53\Omega$$

$$M_{Vdc} = \frac{V_o}{V_I} = \frac{V_L}{V_H} = 0.27$$

$$\text{Άρα } D = \frac{M_{Vdc}}{0.95} = 0.288$$

Επιλογή τιμής πηνίου

Για συνεχή λειτουργία θέλουμε $D \geq 1/3$.

Άρα για $D = 1/3$ έχουμε :

$$L_{\min} = \frac{R_{L\max}(1-D)}{2f_s} = 0.256\text{mH}$$

Επιλογή τιμής πυκνωτή

$$V_r = 0.01V_{\text{out}} = 0.96\text{V}$$

$$\Delta I_{\max} = \frac{V_{\text{out}}(1-D)}{f_s L_{\min}} = 12.5\text{A}$$

$$r_{\text{cm}} = \frac{V_r}{\Delta I_{\max}} = 0.077\Omega$$

$$\text{Άρα } C_{\min} = \frac{D}{2f_s r_{\text{cm}}} = 108.2\mu\text{F}$$

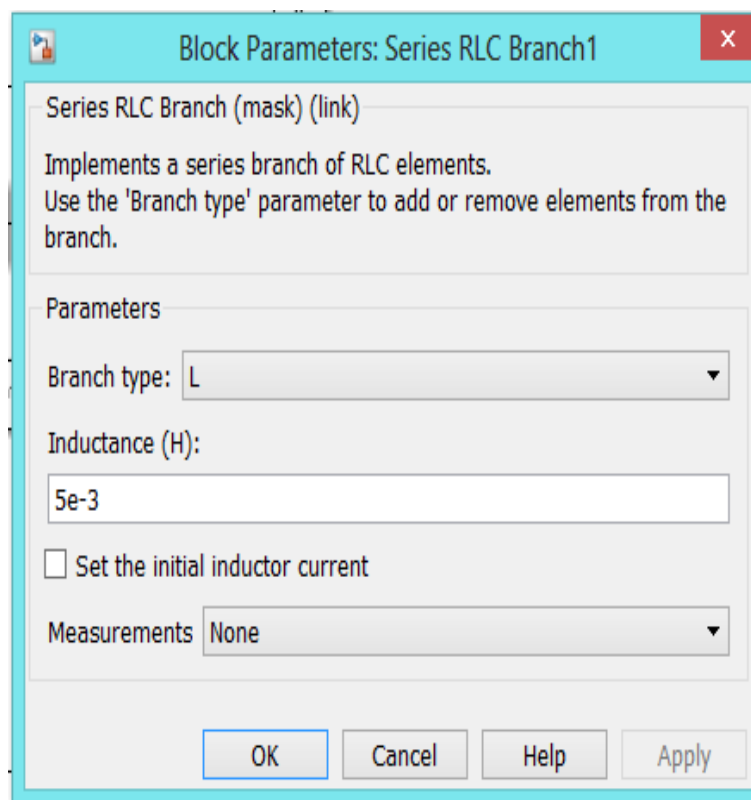
Επομένως ο αμφίδρομος μετατροπέας έχει :

$$L_{\min} = \max(L_{\min_Boost}, L_{\min_Buck}) = 0.6\text{mH}$$

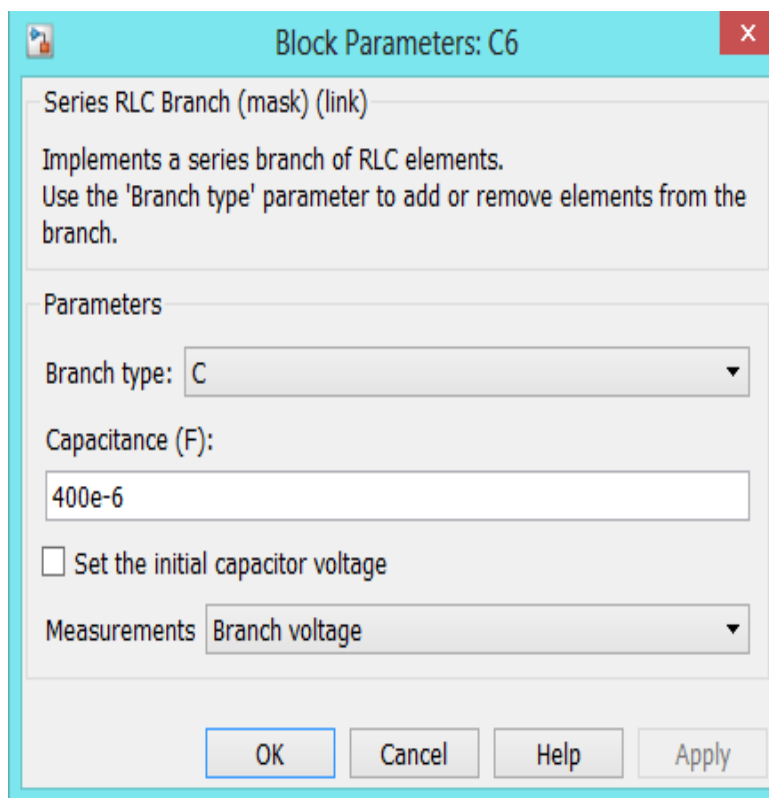
Και αντίστοιχα

$$C_{\min} = \max(C_{\min_Boost}, C_{\min_Buck}) = 372\mu\text{F}$$

Οι τιμές στο Matlab /Simulink που επιλέχτηκαν για τη διάταξη είναι:



Σχήμα 5.2 Παραμετροποίηση του πηνίου του μετατροπέα



Σχήμα 5.3 Παραμετροποίηση του πυκνωτή του μετατροπέα

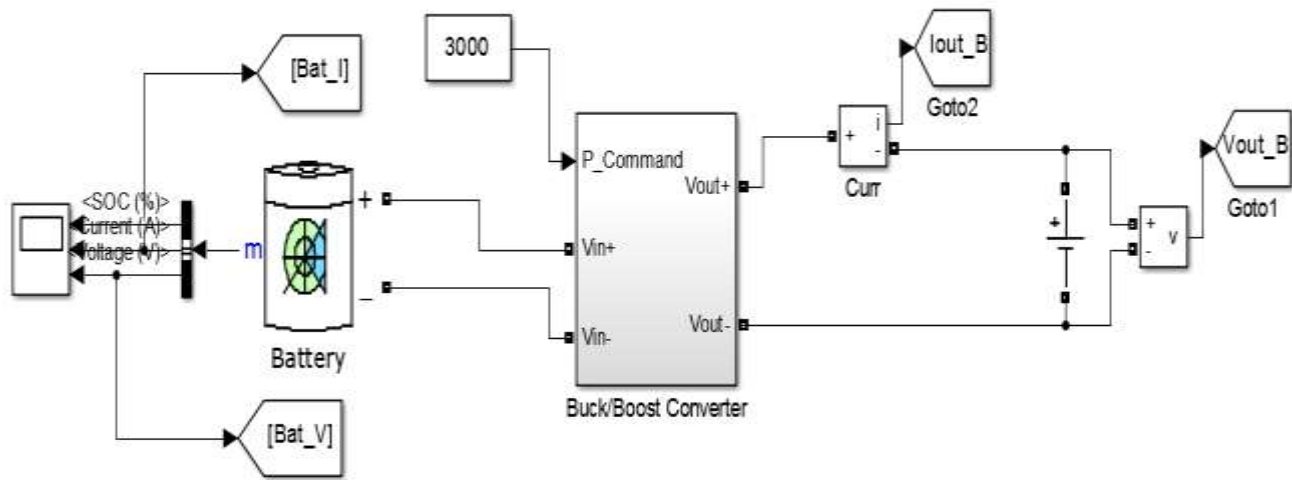
Οι τιμές του τρανζίστορ και της διόδου είναι ίδιες με αυτές του μετατροπέα ανύψωσης.

5.8 Προσομοιώσεις στο μοντέλο της μπαταρίας

Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα γίνουν τρεις προσομοιώσεις με χρήση του έτοιμου μοντέλου της μπαταρίας, με σκοπό να κατανοηθεί η λειτουργία του, καθώς και να μελετηθεί η τεχνική ελέγχου που μπορεί να εφαρμοστεί σ' αυτήν την διεσπαρμένη πηγή.

5.8.1 Έλεγχος φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας με σταθερή ισχύ

Το κύκλωμα της μπαταρίας μαζί με τον αμφίδρομο μετατροπέα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα :



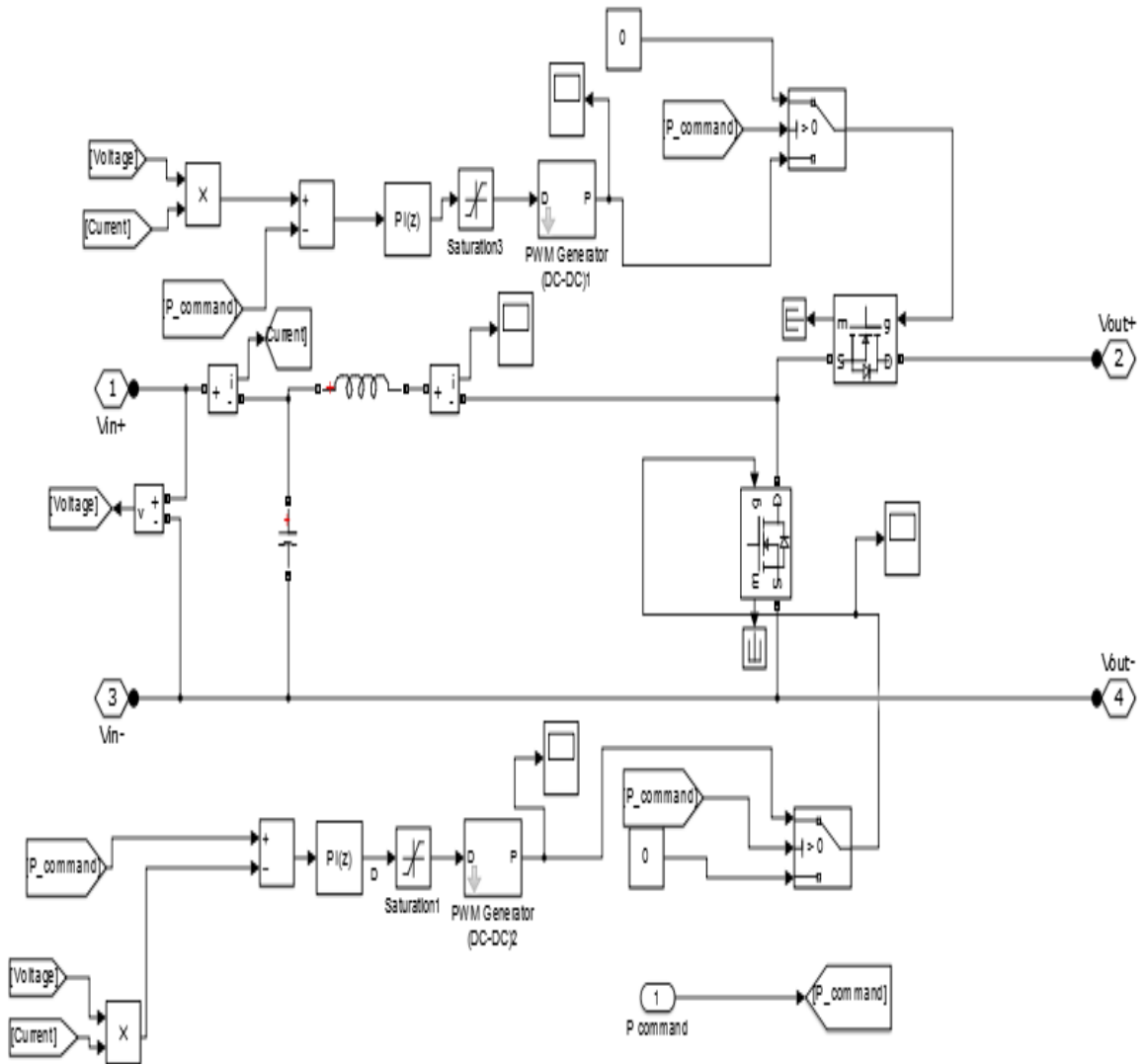
Σχήμα 5.4 Κύκλωμα μπαταρίας με αμφίδρομο μετατροπέα και σταθερή τάση εξόδου

Σκοπός της συγκεκριμένης προσομοίωσης είναι να κατανοηθεί

- 1) ο έλεγχος ισχύος για φόρτιση/ εκφόρτιση της μπαταρίας καθώς και
- 2) η λειτουργία του αμφίδρομου μετατροπέα

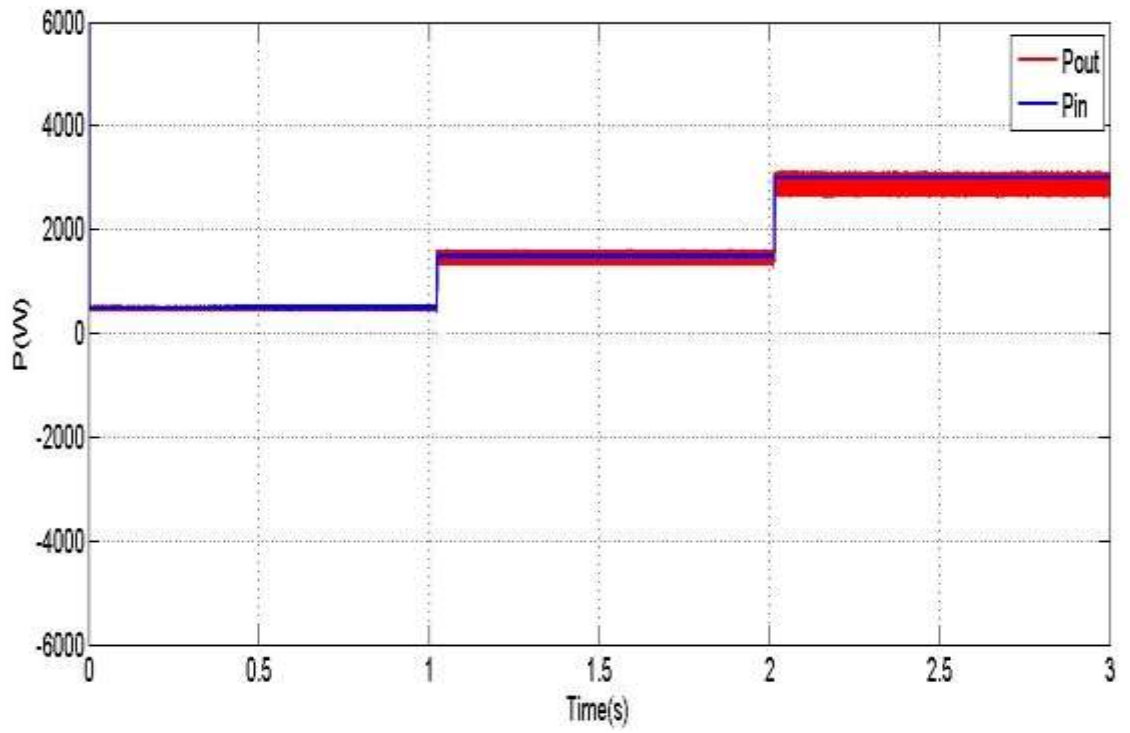
Όταν δέχεται ο μετατροπέας αρνητική ισχύ ($P_{com} < 0$) τότε η μπαταρία φορτίζεται με αυτή την ισχύ, ενώ όταν δίνεται στη μπαταρία θετική ισχύ ($P_{com} > 0$) η μπαταρία εκφορτίζεται με τη τιμή αυτής. Ο έλεγχος αυτός φαίνεται στο Σχήμα 5.5 που υπάρχει ένας συγκριτής ο οποίος ελέγχει κάθε στιγμή αν η τιμή του P_{com} είναι θετική ή αρνητική. Για αρνητική τιμή του P_{com} λειτουργεί ο αμφίδρομος μετατροπέας ως μετατροπέας υποβιβασμού τάσης και η μπαταρία φορτίζεται, ενώ για τη θετική τιμή του λειτουργεί ως μετατροπέας ανύψωσης και η μπαταρία εκφορτίζεται.

Συγκεκριμένα δίνεται στο υποσύστημα του αμφίδρομου μετατροπέα η τιμή του P_{com} , και έπειτα με έναν έλεγχο ισχύος εισάγεται στο PI η διαφορά του P_{com} με την ισχύ εισόδου, η οποία είναι και η είσοδος του PWM. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύγκριση για το P_{com} σχετικά με το πρόσημο του και ξεκινάει η αντίστοιχη λειτουργία του αμφίδρομου μετατροπέα.

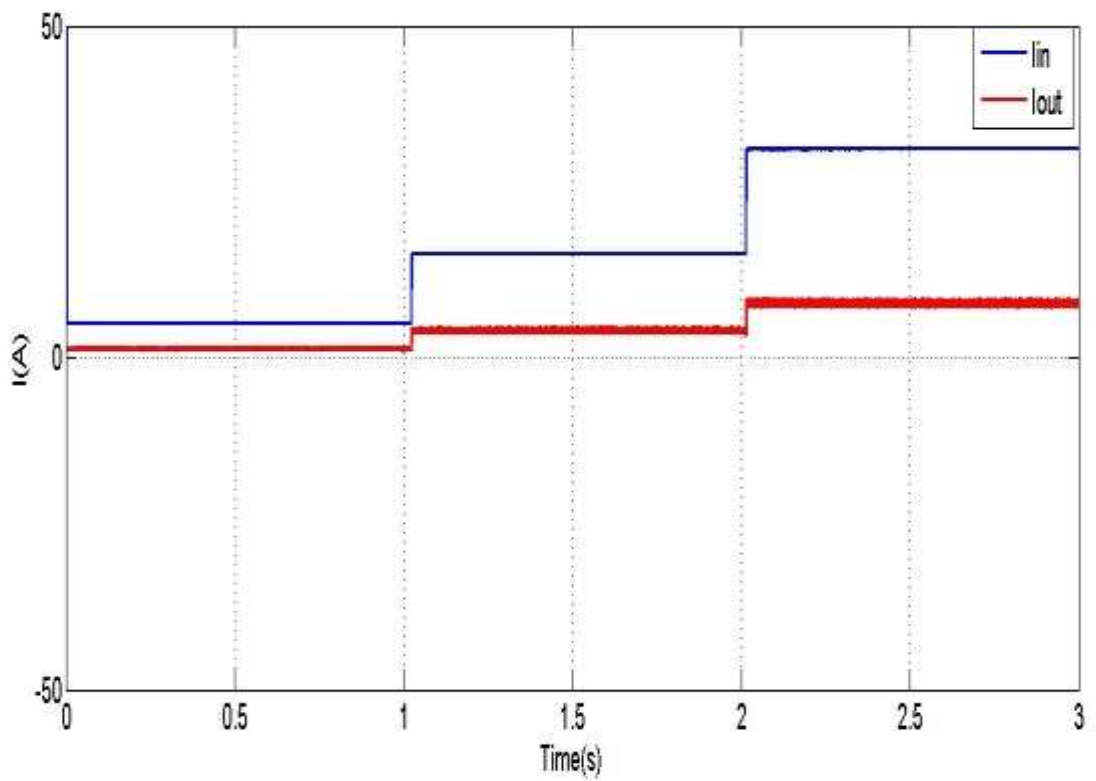


Σχήμα 5.5 Αμφίδρομος μετατροπέας

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για $P_{com} > 0$. Λειτουργεί επομένως ως μετατροπέας ανύψωσης και έχουμε εκφόρτιση της μπαταρίας. Εξετάζεται για ισχύ $P_{com} = 500W$, $P_{com} = 1500W$ και $P_{com} = 3000W$. Παρακάτω φαίνονται οι ισχύες εισόδου και εξόδου και τα αντίστοιχα ρεύματα :

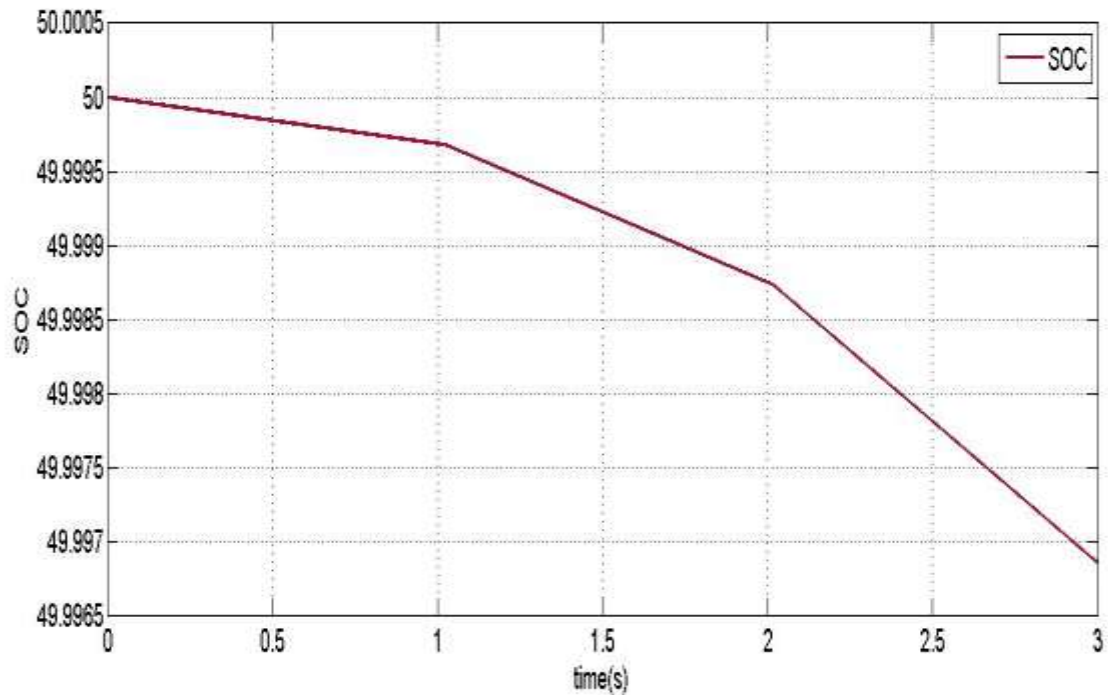


Σχήμα 5.6 Ισχύς εισόδου και εξόδου κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας



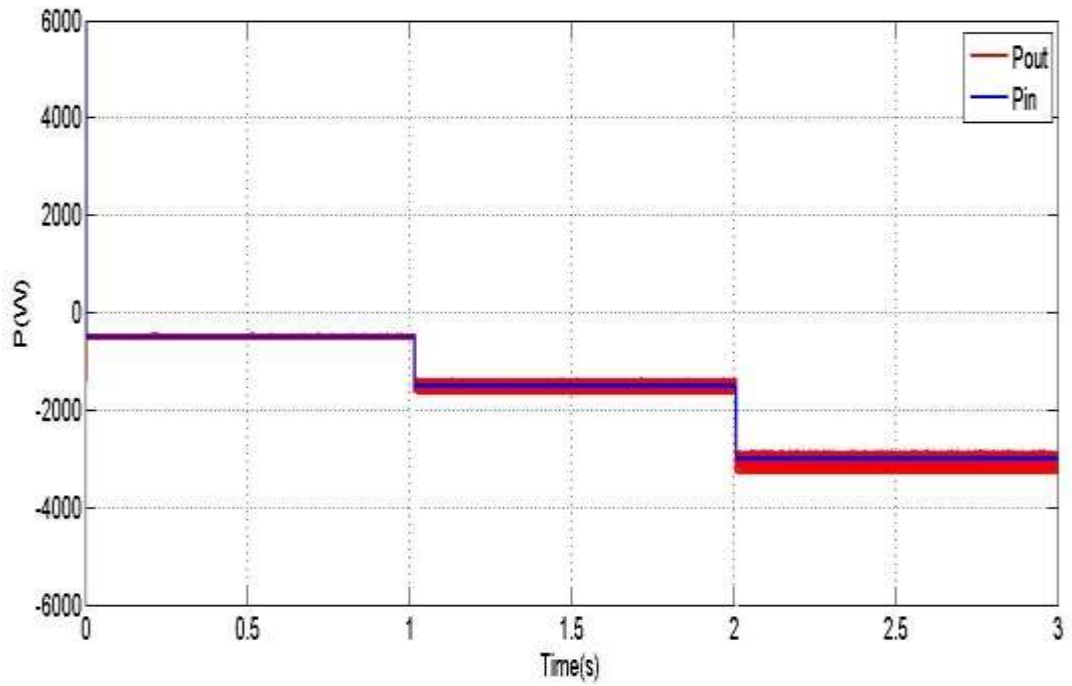
Σχήμα 5.7 Ρεύμα εισόδου και εξόδου κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας

Όπως αναμενόταν η ισχύς εισόδου και εξόδου προσεγγίζουν την ισχύ που δίνεται στο μετατροπέα για να εκφορτιστεί η μπαταρία. Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί και η κατάσταση σταθερής φόρτισης που σ' αυτή την περίπτωση περιμένουμε να μειώνεται.

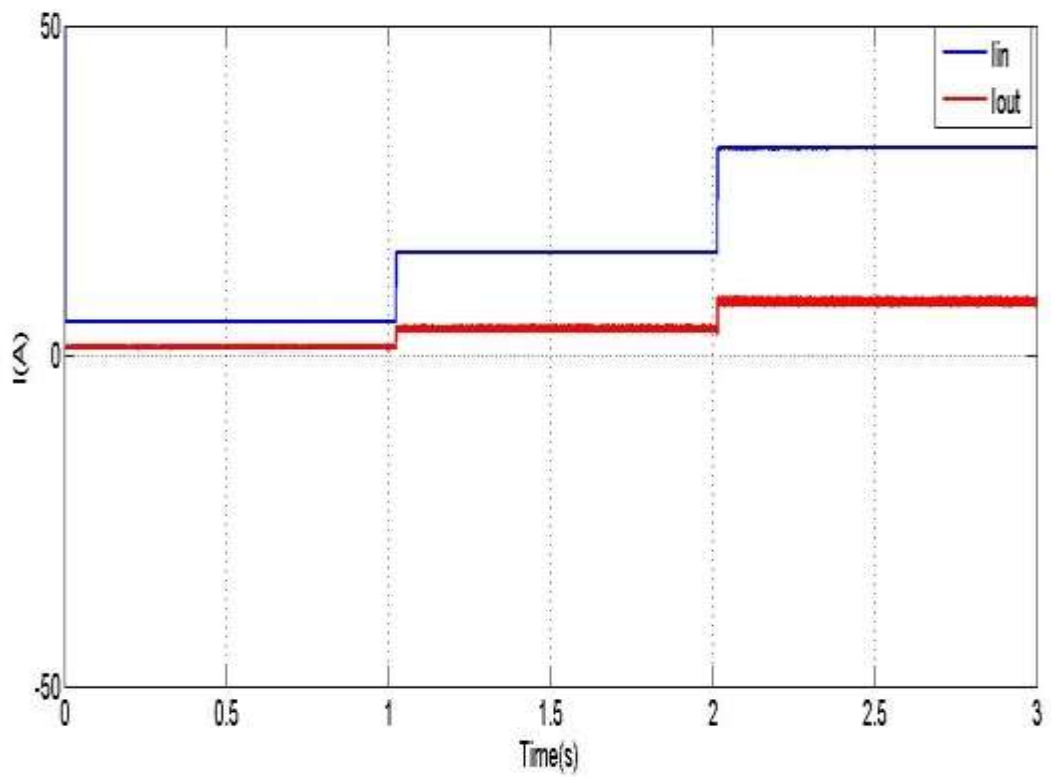


Σχήμα 5.8 Καμπύλη SOC κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας

Παρόμοια αποτελέσματα έχουμε και για $P_{com} < 0$ όπου λειτουργεί ως μετατροπέας υποβιβασμού και έχουμε κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Εξετάζεται για ισχύ $P_{com} = -500W$, $P_{com} = -1500W$ και $P_{com} = -3000W$. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα όπως και στη εκφόρτιση.

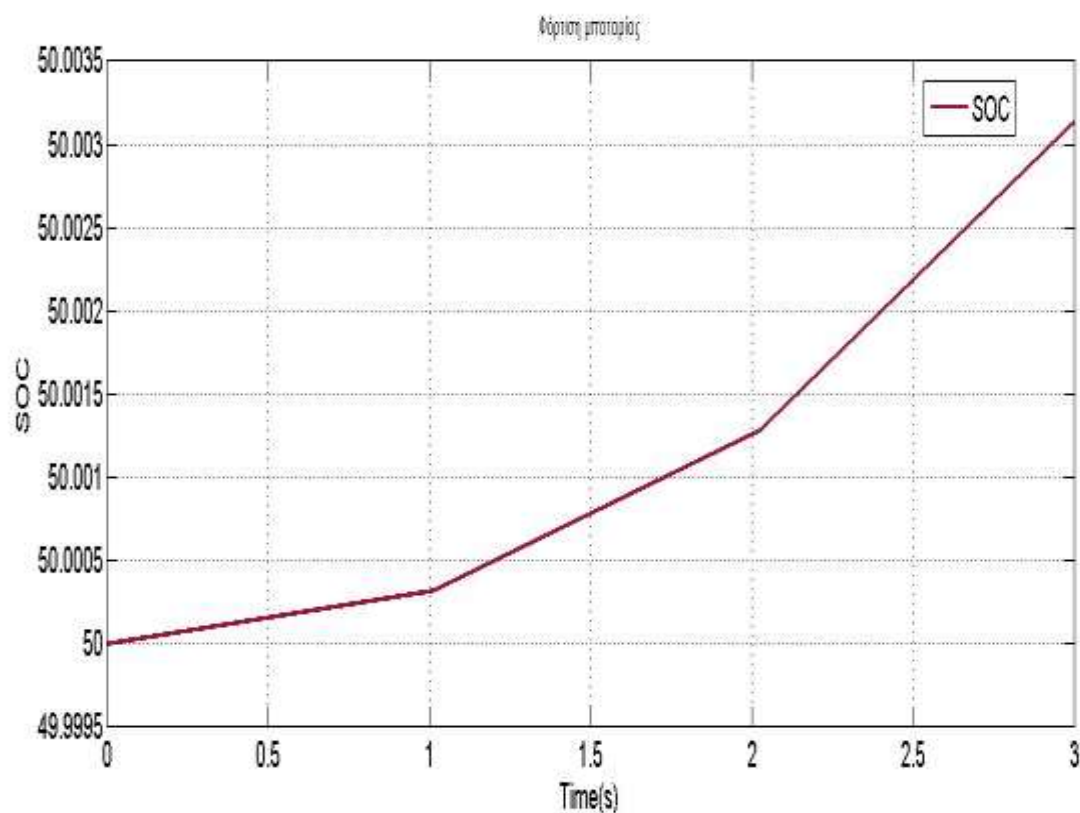


Σχήμα 5.9 Ισχύς εισόδου και εξόδου κατά την φόρτιση της μπαταρίας



Σχήμα 5.10 Ρεύμα εισόδου και εξόδου κατά την φόρτιση της μπαταρίας

Η κατάσταση σταθερής φόρτισης σ' αυτή την περίπτωση περιμένουμε να αυξάνεται.

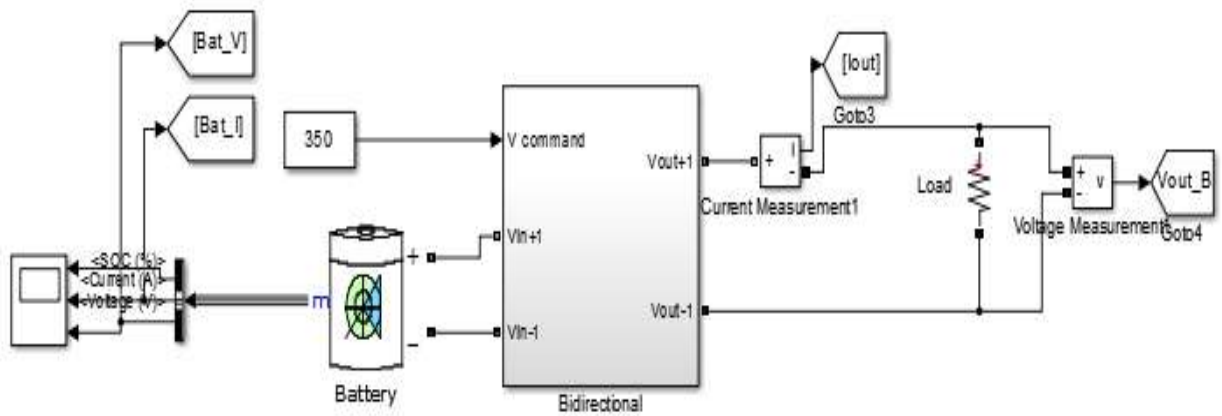


Σχήμα 5.11 Καμπύλη SOC κατά την φόρτιση της μπαταρίας

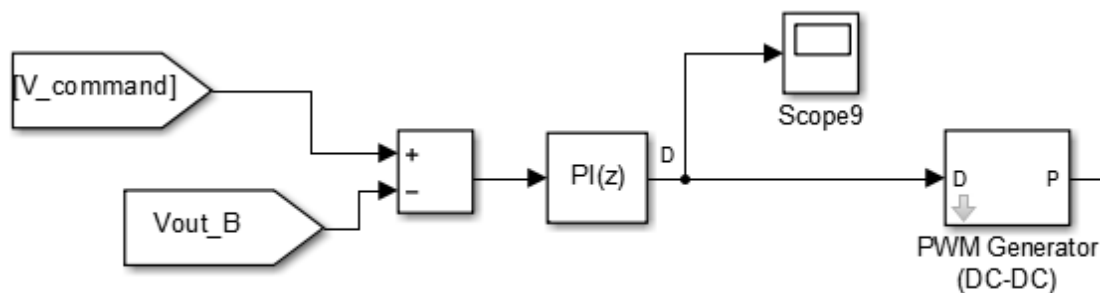
5.8.2 Έλεγχος τάσης στον αμφίδρομου μετατροπέα

Η προσομοίωση αυτή γίνεται στο ίδιο κύκλωμα που έγινε και η προηγούμενη απλά εδώ δεν υπάρχει σταθερή πηγή τάσης στην έξοδο, αλλά ένα φορτίο $R_{load}=150\Omega$. Δεν δίνεται στο μετατροπέα ισχύς P_{com} για έλεγχο ισχύος, αλλά V_{com} για έλεγχο τάσης.

Στον έλεγχο τάσης αυτό που επιδιώκεται να επιτευχθεί είναι να προσεγγίζει κάθε φορά η τάση εξόδου του μετατροπέα την V_{com} που του παρέχεται. Συγκεκριμένα δίνεται στο υποσύστημα του αμφίδρομου μετατροπέα η τιμή του V_{com} , και επείτα με έναν έλεγχο τάσεως εισάγεται στο PI η διαφορά του V_{com} με την τάση εξόδου, η οποία είναι και η είσοδος του PWM.



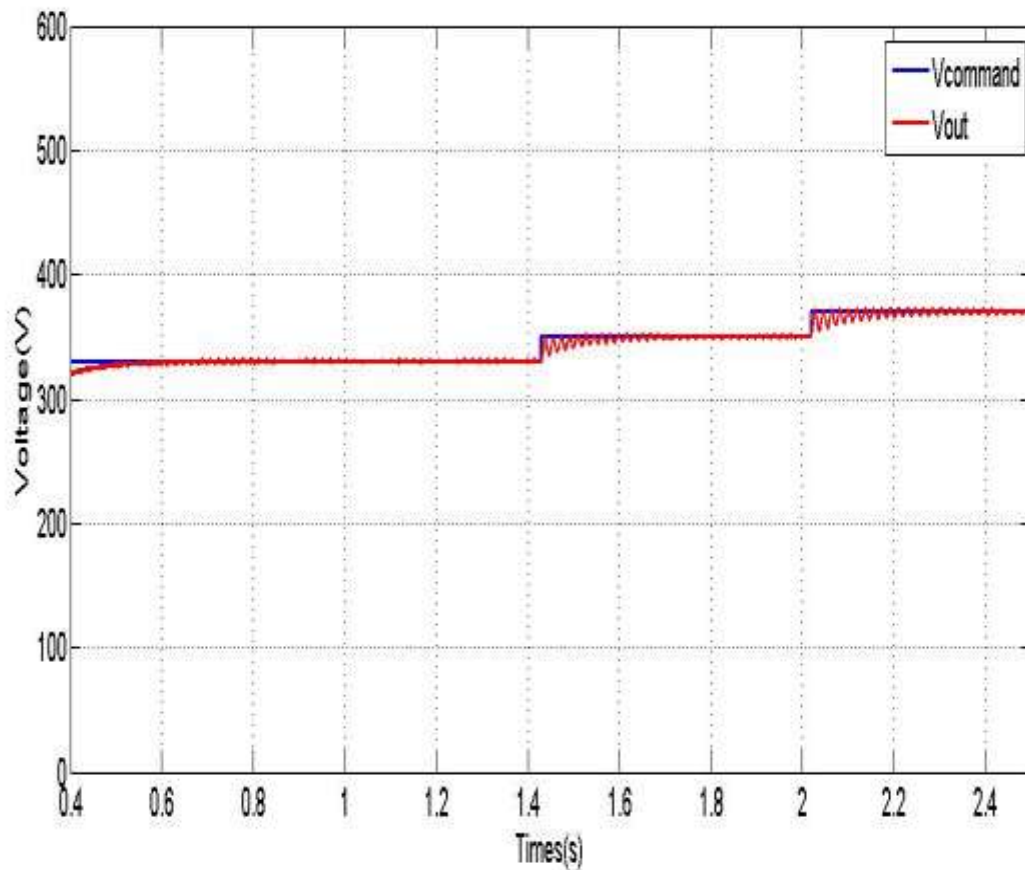
Σχήμα 5.12 Κύκλωμα μπαταρίας με αμφίδρομο μετατροπέα και φορτίο στην έξοδο



Σχήμα 5.13 Έλεγχος τάσης για είσοδο στο PI

Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε για $V_{com}=330V$, $V_{com}=350V$ και $V_{com}=370V$.

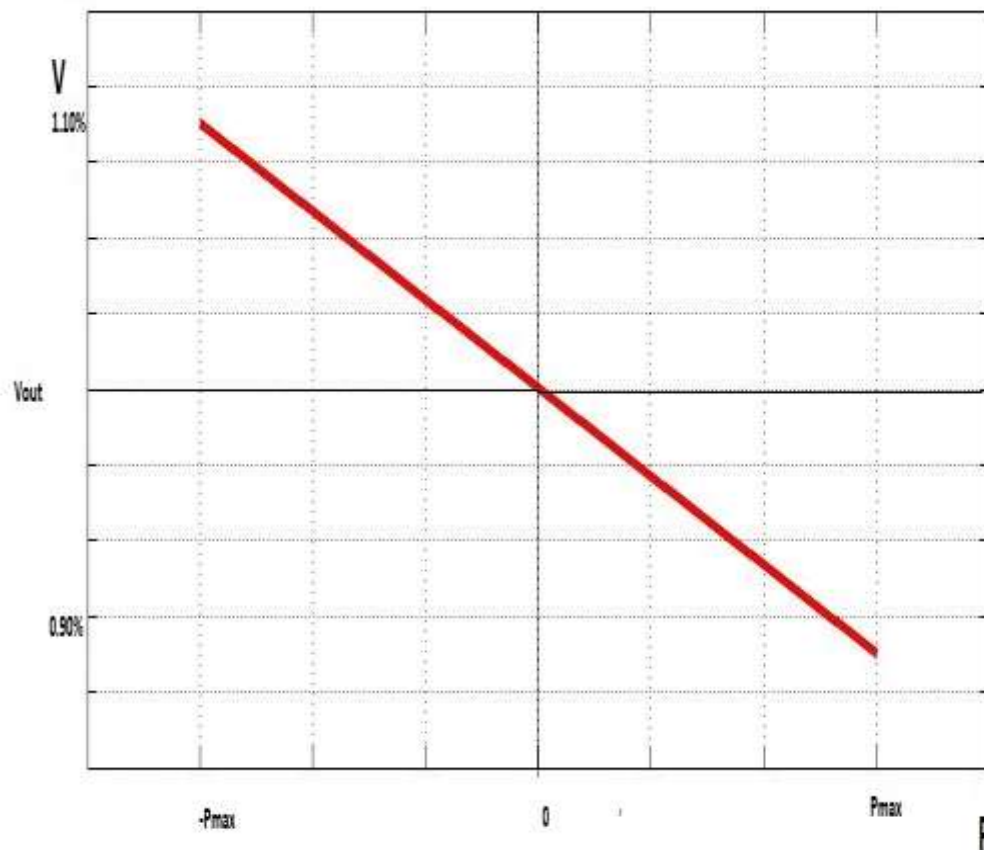
Συγκεκριμένα η σχέση V_{com} και V_{out} φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου παρατηρούμε ότι μετά από κάθε μεταβολή της V_{com} , η τάση εξόδου τείνει να προσεγγίσει την τάση αυτή. Επιτυγχάνεται επομένως, ο έλεγχος της ρύθμισης της τάσης εξόδου σύμφωνα με την επιθυμητή τιμή.



Σχήμα 5.14 Σχέση V_{com} με V_{out}

5.8.3 Έλεγχος με καμπύλη droop στον αμφίδρομο μετατροπέα

Στη προσομοίωση αυτή το κύκλωμα είναι ακριβώς όπως στην περίπτωση του υποκεφαλαίου 5.8.2, δηλαδή δεν έχουμε σταθερή πηγή τάσης, αλλά φορτίο στην έξοδο του μετατροπέα. Ο έλεγχος όμως εδώ δε γίνεται με την εισαγωγή σταθερή τιμής τάσης V_{com} , αλλά με την τιμή της τάσης που προκύπτει από την παρακάτω καμπύλη στατισμού.



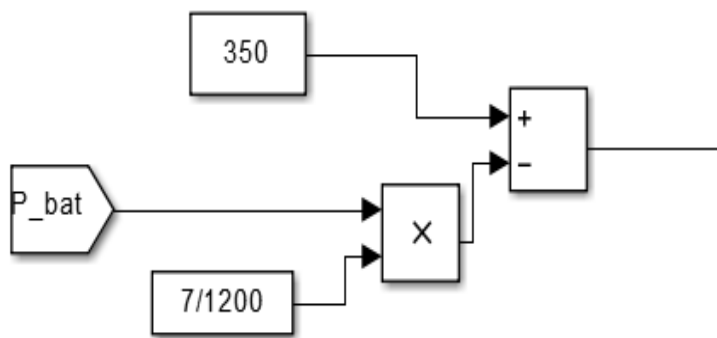
Σχήμα 5.15 Καμπύλη droop για εφαρμογή ελέγχου τάσης

Για $V_{out}=350V$ και $P_{max}=6000W$ σύμφωνα με την παραπάνω καμπύλη έχω τα σημεία $(-6000,385)$, $(0,350)$ και $(6000,315)$. Οπότε υπολογίζεται η εξίσωση της καμπύλης η οποία και θα εφαρμοστεί για τον έλεγχο τάσης του κυκλώματος.

Η ζητούμενη εξίσωση της droop καμπύλης είναι :

$$V_{out} = 350 - \frac{7 \cdot P_{bat}}{1200} \quad (5.1)$$

Όπου P_{bat} η ισχύς εξόδου του μετατροπέα που είναι ίση με την ισχύ του φορτίου.



Σχήμα 5.16 Έλεγχος με droop καμπύλη

Αλλάζοντας την τιμή του φορτίου υπολογίστηκαν στο Simulink οι παρακάτω τιμές :

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα ισχύος και τάσεως με αλλαγή φορτίου

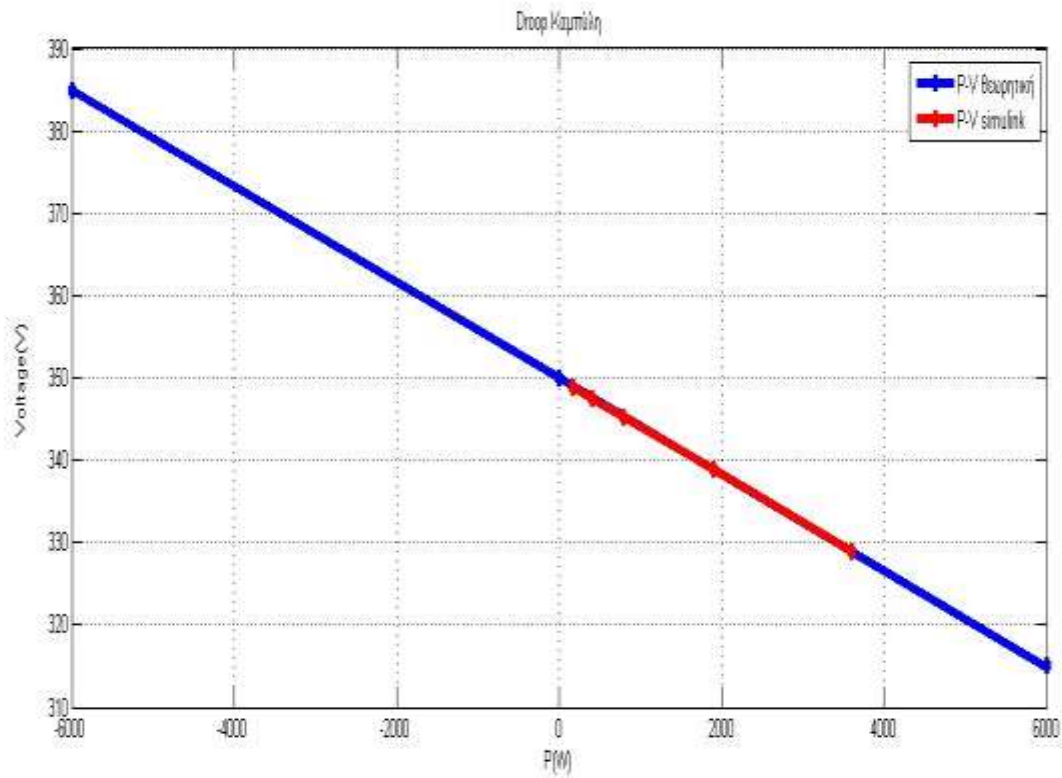
R_{load}	P_{bat}	V_{out}
60	1909.97	338.9
150	795.08	345.34
300	402.79	347.61
700	174.69	348.95

Σύμφωνα με τη σχέση (5.1) για τις παραπάνω τιμές ισχύος εξόδου της μπαταρίας η αντίστοιχη τάση εξόδου πρέπει να είναι :

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα από την εξίσωση καμπύλης droop

P_{bat}	V_{out}
1909.97	338.85
795.08	345.36
402.79	347.65
174.69	348.98

Όπως φαίνεται παρακάτω τα αποτελέσματα από το Matlab /Simulink επαληθεύουν την εξίσωση droop .



Σχήμα 5.17 Καμπύλη droop των αποτελεσμάτων των πινάκων (Πίνακας 5.1 και Πίνακας 5.2)

Επομένως, ο έλεγχος πραγματοποιείται με επιτυχία με την droop καμπύλη.

Κεφάλαιο 6

Προσομοίωση DC μικροδικτύου

6.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η προσομοίωση ενός μικροδικτύου συνεχούς τάσης, το οποίο αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία με το μετατροπέα ανύψωσης, τις μπαταρίες με τον αμφίδρομο μετατροπέα και ένα φορτίο. Το μικροδίκτυο έχει δημιουργηθεί για να καλύψει ανάγκες μιας κατοικίας. Συγκεκριμένα αποτελεί ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με αυτονομία τεσσάρων ημερών σε περίπτωση διακοπής από το δίκτυο.

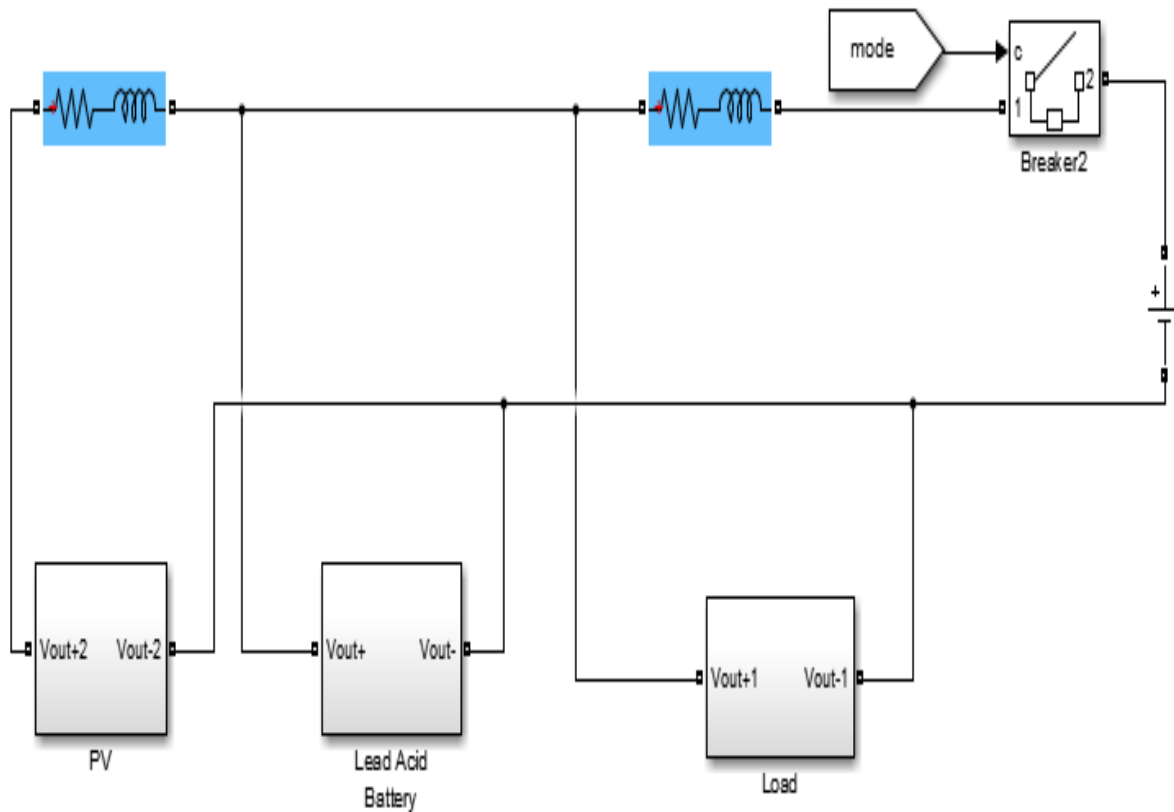
Στο κεφάλαιο 4 αναφέρθηκαν δύο είδη σύνδεσης φωτοβολταϊκών, αυτά που είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο και αυτά που λειτουργούν αυτόνομα. Έτσι, ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού με φωτοβολταϊκά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με το δίκτυο της ΔΕΗ (διασυνδεδεμένο σύστημα), όπου χρησιμοποιείται το ρεύμα από τη ΔΕΗ για να καλυφθούν τυχόν ανάγκες, καθώς και σ' αυτή την περίπτωση η περίσσεια ηλιακή ενέργεια των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιείται για να φορτιστούν οι συσσωρευτές του συστήματος.

Εναλλακτικά, μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση μπορεί να αποτελεί ένα αυτόνομο σύστημα, σε περίπτωση βλάβης ή αποκοπής από το δίκτυο, όπου η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για να καλυφθεί η απαιτούμενη ενέργεια του φορτίου. Αν η ενέργεια του φορτίου είναι περισσότερη από αυτή που προσφέρει το φωτοβολταϊκό ή δεν υπάρχει ακτινοβολία για να παρέχεται ενέργεια από το φωτοβολταϊκό, τότε αρχίζει να εκφορτίζεται η μπαταρία για να καλύψει την ανάγκη του φορτίου.

Εδώ θα παρουσιαστούν δύο σενάρια, ώστε να γίνει αντιληπτό πως λειτουργεί το μοντέλο σε περίπτωση διασυνδεδεμένης λειτουργίας και σε λειτουργία αποκομμένης από το δίκτυο. Ζητούμενο είναι να κατανοηθούν πως όλες οι προηγούμενες προσομοιώσεις μπορούν να εφαρμοστούν παράλληλα, ώστε να συντελέσουν στη δημιουργία ενός DC μικροδικτύου.

Το μικροδίκτυο στο οποίο θα εφαρμοστούν τα δύο σενάρια φαίνεται παρακάτω. Σ' αυτό υπάρχει ένας διακόπτης που ρυθμίζεται για συνδεδεμένη λειτουργία με την επιλογή της σταθεράς 1 και για αυτόνομη λειτουργία με επιλογή της σταθεράς 0. Η DC γραμμή έχει αντίσταση και πηγίο

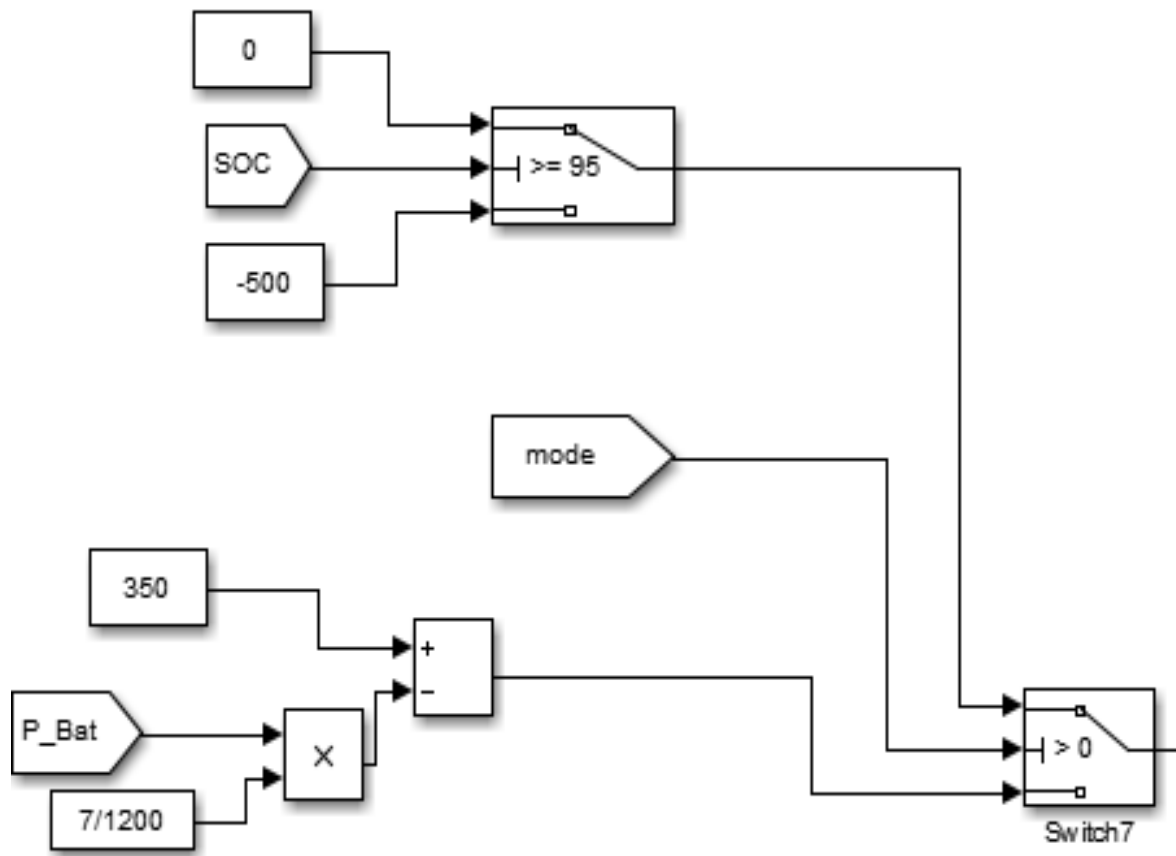
υπολογισμένα για μήκος 50 μέτρα (25m το κάθε ζευγάρι). Οι τιμές τους είναι $R=0.32\Omega$ και $L=0.17\text{ mH}$.



Σχήμα 6.1 Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με φωτοβολταϊκό, μπαταρία και φορτίο

6.2 Σενάριο 1^ο : Διασυνδεδεμένο Δίκτυο

Στην περίπτωση αυτή το μικροδίκτυο βρίσκεται συνδεδεμένο με το δίκτυο της ΔΕΗ και έχει σταθερή γραμμή τάσης στα 350V. Το φωτοβολταϊκό έχει ρυθμιστεί να λειτουργεί σύμφωνα με την droop καμπύλη, η οποία έχει σχεδιαστεί για τις πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας, γι' αυτό και αυτό που θα παρουσιαστεί είναι η ισχύς που δίνει το φωτοβολταϊκό σύμφωνα με τον έλεγχο της καμπύλης. Από την άλλη, στη κατάσταση αυτή η μπαταρία πρέπει να είναι πάντα φορτισμένη όποτε την φορτίζουμε με ισχύ 500W όσο η κατάσταση φόρτισης είναι μικρότερη του 95% (Σχήμα 6.2).

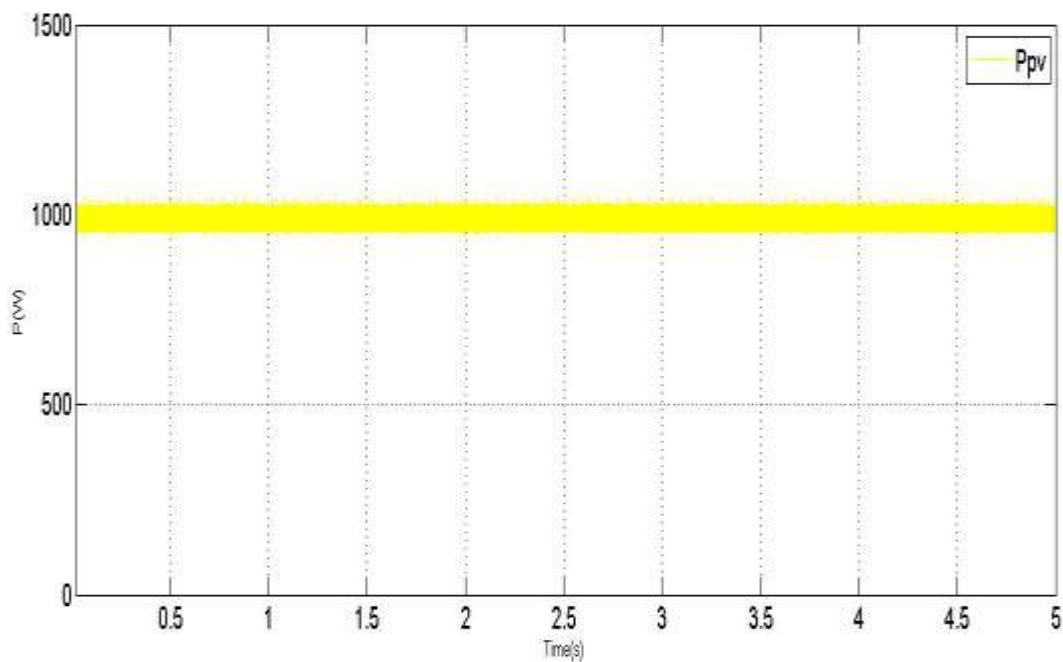


Σχήμα 6.2 Έλεγχος για την μπαταρία ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας (mode 1 ή 2)

Τέλος, το φορτίο πρέπει να δέχεται όλη του την ισχύ που χρειάζεται. Η τιμή του φορτίου έχει επιλεγεί $R_{load}=150\Omega$ και η ισχύς που χρειάζεται αναμένεται να είναι $P_{Load}=\frac{V_{out}^2}{R_{Load}}=816.7W$.

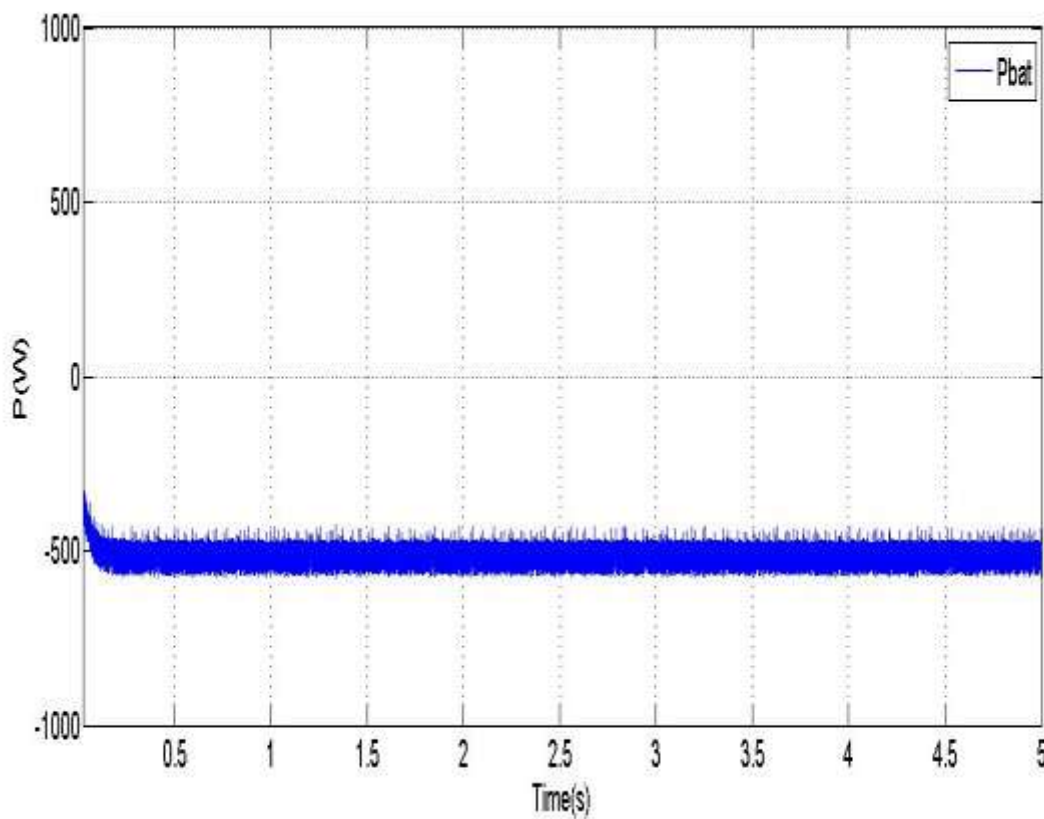
Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διασυνδεδεμένης λειτουργίας, για το κάθε τμήμα ξεχωριστά.

Το Φωτοβολταϊκό, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της ισχύος εξόδου (Σχήμα 6.2) δίνει ισχύ γύρω στα 1000W, γεγονός που συμφωνεί με τη λειτουργία της καμπύλης droop καθώς η τάση εξόδου (τάση του δικτύου) είναι σταθερή στα 350V μικρότερη από τα 367.5V , τάση στην οποία αρχίζει η ισχύς να μειώνεται όπως είδαμε στη προσομοίωση του κεφαλαίου 4.6.4. Αποδίδει με άλλα λόγια την ισχύ $P_{command}$ που έχει ορισθεί στα 1000W.



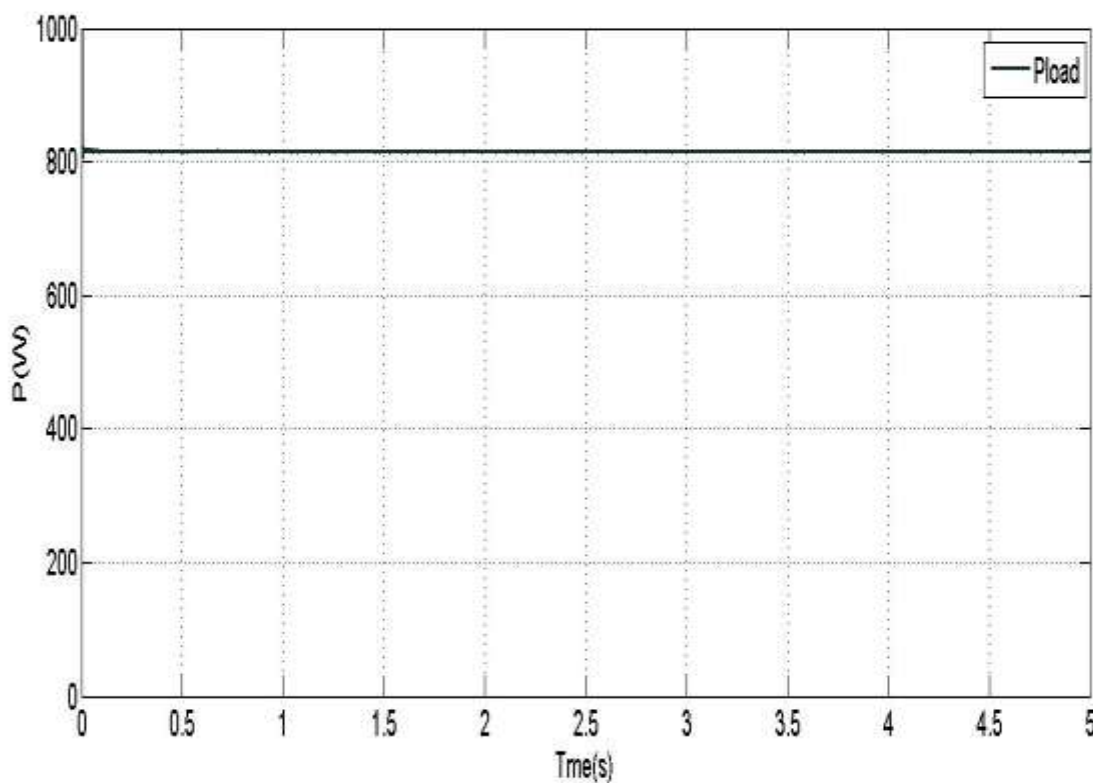
Σχήμα 6.3 Ισχύς εξόδου φωτοβολταϊκού

Η μπαταρία όπως φαίνεται φορτίζεται με την ισχύ που έχει ορισθεί να είναι 500W. Στη περίπτωση αυτή γίνεται έλεγχος ισχύος στον αμφίδρομο μετατροπέα με $P_{com} < 0$.



Σχήμα 6.4 Ισχύς εξόδου –φόρτισης της μπαταρίας

Τέλος, στο φορτίο παρέχεται όπως προβάλλεται και στο διάγραμμα η ισχύς που αναμενότανε.



Σχήμα 6.5 Ισχύς φορτίου

6.3 Σενάριο 2^ο : Λειτουργία αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο

Στην περίπτωση αυτή το μικροδίκτυο είναι αποκομμένο από το κεντρικό δίκτυο και βρίσκεται σε islanding λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα, σ' αυτή την κατάσταση καλείται η μπαταριά να δημιουργήσει μια σταθερή τάση στην έξοδο του συστήματος εφαρμόζοντας έλεγχο τάσης στον αμφίδρομο μετατροπέα.

Εδώ ισχύει το ισοζύγιο ισχύος όπου η ισχύς της μπαταρίας ισούται με τη διαφορά της ισχύος του φορτίου μείον της εξόδου του φωτοβολταϊκού. Δηλαδή:

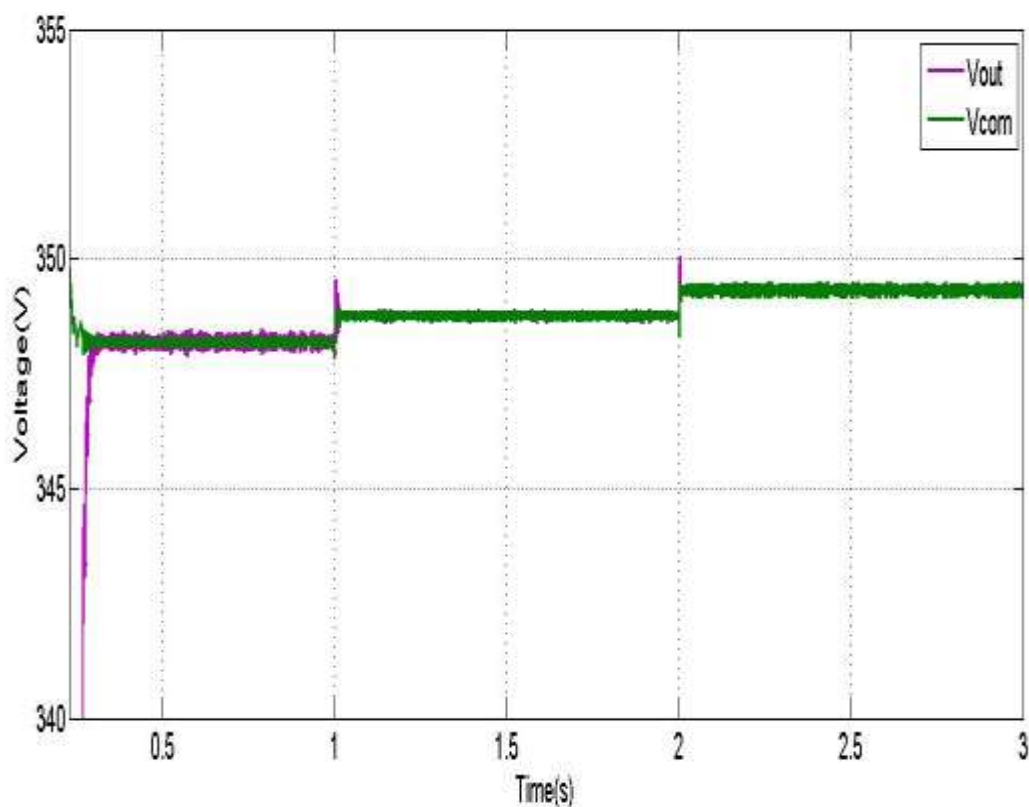
$$P_{bat}=P_{Load}-P_{pv} \quad (6.1)$$

Η μελέτη έχει γίνει μόνο για να προσφέρει η μπαταρία ισχύ όταν το δίκτυο είναι εκτός λειτουργίας. Επομένως αυτό που κάνει η μπαταρία είναι να προσφέρει στο φορτίο την υπολειπόμενη ισχύ.

Στη προσομοίωση που θα παρουσιαστεί παραμένει σταθερή η τιμή του φορτίου και μεταβάλλεται η ισχύς του φωτοβολταϊκού. Εξετάζεται λοιπόν το ποσό της ισχύος που χρειάζεται να προσφέρει η μπαταρία κάθε χρονική στιγμή.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα από τον έλεγχο τάσης που γίνεται στη μπαταρία η οποία ρυθμίζει την τάση εξόδου του αντιστρόφρα.

Το δίκτυο όπως συμπεραίνει κανείς σταθεροποιείται πολύ γρήγορα στην τάση που επιβάλλει η droop καμπύλη της μπαταρίας από τη στιγμή που αποσυνδέεται.



Σχήμα 6.6 Διάγραμμα τάσης εξόδου και τάσης ελέγχου

Αυτό όμως που δείχνει ότι η islading λειτουργία έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία, είναι η επαλήθευση του ισοζυγίου ισχύος με τα αποτελέσματα που θα δώσει η προσομοίωση.

Παρατηρείται, λοιπόν, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.7, ότι η ισχύς εξόδου της μπαταρίας εξισώνεται κάθε στιγμή με τη διαφορά ισχύος φορτίου και φωτοβολταϊκού, σύμφωνα και με τη σχέση (6.1). Η ισχύς του φωτοβολταϊκού μεταβάλλεται σύμφωνα με το παρακάτω πίνακα :

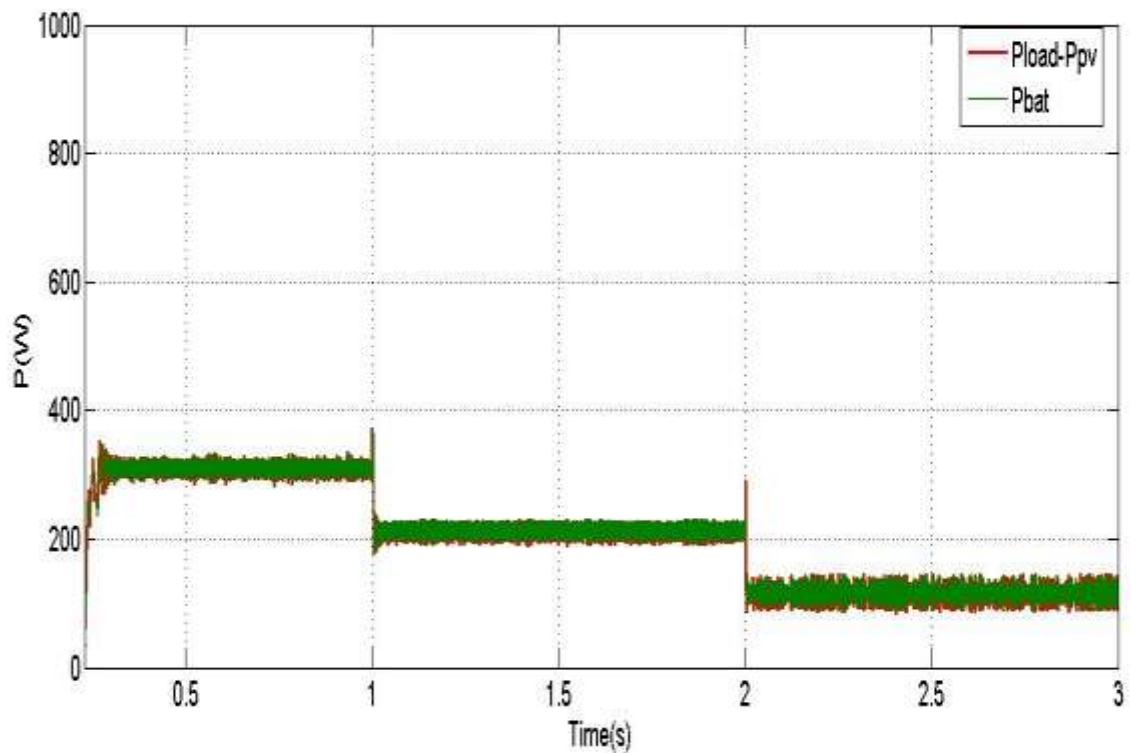
Πίνακας 6.1 Η ισχύς που δίνει το φωτοβολταϊκό σε κάθε χρονική στιγμή

Time(s)	$P_{pv}(W)$
0-1	500
1-2	600
2-3	700

Το φορτίο χρειάζεται ισχύ όπως αναφέρθηκε και στην παραπάνω προσομοίωση $P_{Load}=816.7W$. Άρα σύμφωνα με το ισοζύγιο ισχύος η ισχύς που θα πρέπει να προσφέρει η μπαταρία για κάθε διάστημα φαίνεται στο πίνακα (6.2)

Πίνακας 6.2 Η ισχύς που πρέπει να προσφέρει στο δίκτυο η μπαταρία κάθε χρονική στιγμή

Time(s)	$P_{bat}(W)$
0-1	$816.7-500=316.7$
1-2	$816.7-600=216.7$
2-3	$816.7-700=116.7$



Σχήμα 6.7 Διάγραμμα ισχύος εξόδου μπαταρίας και διαφορά ισχύος φορτίου με φωτοβολταϊκό

Στο παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι η μπαταρία συμφωνεί με τον τύπο του ισοζυγίου ισχύος (6.1). Η τιμή της παραπάνω διακύμανσης συμπίπτει με τις τιμές του πίνακα 6.2.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η υλοποίηση ενός DC μικροδικτύου, στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ως μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μια φωτοβολταϊκή διάταξη και ως δευτερεύουσα μονάδα υποστήριξης ένας συσσωρευτής μολύβδου οξέος. Χρησιμοποιώντας κατάλληλους ελέγχους κάθε φορά καταφέραμε να παράγουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα σε ικανοποιητικό βαθμό. Το φωτοβολταϊκό είναι σε θέση να παράγει ισχύ ανάλογα με την καμπύλη στατισμού και η μπαταρία μπορεί να φορτίζεται και εκφορτίζεται ανάλογα με την ισχύ που της παρέχεται. Ακόμα, το φορτίο στην islanding λειτουργία ανεξάρτητα των διαταραχών ισχύος του φωτοβολταϊκού καταφέρνει να έχει μια σταθεροποιημένη τάση εξόδου σε μια επιθυμητή τιμή, η οποία ρυθμίζεται από τον έλεγχο τάσης με την αντίστοιχη καμπύλη στατισμού στον αμφίδρομο μετατροπέα της μπαταρίας. Τέλος, έγινε φανερό πως οι ίδιες αρχές που ισχύουν για τα AC μικροδίκτυα ισχύουν και για τα DC.

Ακόμα, για να εξελιχθεί το παραπάνω μοντέλο και να γίνουν και άλλα περισσότερα σενάρια θα μπορούσαν να προστεθούν διαφορετικές και περισσότερες μονάδες παραγωγής, όπως ανεμογεννήτριες ή κύτταρα καυσίμου και ταυτόχρονα διαφορετικές και περισσότερες μονάδες αποθήκευσης. Τέλος, θα μπορούσαν να μελετηθούν και περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα: το φωτοβολταϊκό να παράγει περισσότερη ενέργεια από ότι απαιτεί το φορτίο και ταυτόχρονα η μπαταρία να φορτίζεται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] <http://www.wbdg.org/resources/der.php>

[2] Ζαχαροπούλου Δήμητρα (Ιούλιος 2012). Μέθοδοι περιορισμού των ανυψώσεων τάσης σε δίκτυα διανομής με δισπαρμένη παραγωγή. Διπλωματική εργασία.

[3] <http://www.renewwisconsin.org> . An Introduction to Distributed Generation Interconnection.

[4] Purchala K., Belmans R., KULeuven Exarchakos L., Hawkes A. D. Distributed generation and the grid integration issues. Imperial College London.

[5] <http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31570.pdf>

[6] Mariya Soshinskayaa, Wina H. J. Grausa, Josep M. Guerrerob, Juan C. Vasquezb (2014). Microgrids: experiences, barriers and success factors. Renewable & Sustainable Energy Reviews.

[7] Tom Bourgeois (June 11, 2013). Preliminary Microgrid Study Findings. Pace Energy & Climate Center Pace Law School.

[8] Κατσαρός Γεωργιος (Οκτώβριος 2012). Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση μικροδικτύου. Διπλωματική Εργασία.

[9] Justoa J. J., Mwasilua F, Leeb J., Junga J. W. (2013). AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

[10] Savage P., Nordhaus R. R. and Jamieson S. DC Microgrids: Benefits and Barriers. Yale school of forestry and environmental studies.

[11] VANDOORN T. L., VÁSQUEZ J. C., KOONING J., GUERRERO J. M. and VANDEVELD L. (2013). Microgrids Hierarchical Control and an Overview of the Control and Reserve Management Strategies. IEEE industrial electronics magazine.

[12] Che L., Student Member, IEEE, and Mohammad Shahidehpour, Fellow, IEEE (2014). DC Microgrids: Economic Operation and Enhancement of Resilience by Hierarchical Control. IEEE industrial electronics magazine.

[13] Yu X., She X, Huang A. (2013). Hierarchical Power Management for DC Microgrid in islanding mode and Solid State Transformer Enabled Mode. IEEE industrial electronics magazine.

[14] Huang P., Xiao W. and Moursi M. S. (2013). A Practical Load Sharing Control Strategy for DC Microgrids and DC Supplied Houses. IEEE industrial electronics magazine.

[15] Μανιάς Σ.Ν .Ηλεκτρονικά ισχύος.Εκδόσεις Συμείων.

[16] http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation

[17] Μαλληκίδης Γ. Ονούφριος (Ιούλιος 2014). Σχεδιασμός και κατασκευή DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης για ένταξη σε DC μικροδίκτυο. Διπλωματική εργασία.

[18] <http://gun.teipir.gr/DSAELAB/Ergastiriakes/pidtutorial.pdf>

[19] ALSWED K. S. (2014).Improved droop control for parallel inverter system with load. Degree of Master of Electrical and Electronic Engineering

[20]Kazimierczuk K. M. (2008). Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters. John Wiley & Sons. United Kingdom.

[21] Chao K., Tseng M., Huang C., Liu Y. and Huang L (2013). Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems. International Journal of Computer, Consumer and Control.

[22]http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_system

[23]<http://www.energyalternatives.ca/PDF/Photovoltaic%20Systems%20Introduction.pdf>

[24] <http://www.triplepundit.com/2012/04/solar-photovoltaics-pros-cons/>

[25]<http://www.renewableenergyworld.com/rea/blog/post/2012/12/advantages-and-disadvantages-of-solar-photovoltaic-quick-pros-and-cons-of-solar-pv>

[26] Luque A., Hegedus S. (2011). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition.

[27] <http://chuck-wright.com/SolarSprintPV/SolarSprintPV.html>

[28] Bratt J. (2011). Grid connected pv inverter: Modeling and simulation. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Electrical Engineering

[29] http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_%28electricity%29

[30] Linden D., Reddy B. T. (2001). Handbook of batteries, Third Edition.

[31] Solis J. (2013). Dynamic modelling, monitoring and control of energy storage system. Degree Project of 30 credit points Master's Program in Electrical Engineering

[32] <http://www.erikdeman.de/html/sail080e.htm>