



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

**Στρατηγικές ελέγχου DC μικροδικτύου και ανάλυση
μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης σε DC μικροδίκτυο στο
περιβάλλον προσομοίωσης Matlab/Simulink.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Αποστόλου Ιωάννη

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018



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

**Στρατηγικές ελέγχου DC μικροδικτύου και ανάλυση
μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης σε DC μικροδίκτυο στο
περιβάλλον προσομοίωσης Matlab/Simulink.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Αποστόλου Ιωάννη

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις

.....
Χατζηαργυρίου Ν.
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παπαθανασίου Σ.
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεωργιλάκης Π.
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

.....
Αποστόλου Ιωάννης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αποστόλου Ιωάννης, 2018.

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

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική μου εργασία στο πλαίσιο του προγράμματος σπουδών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χατζηαργυρίου Νικόλαο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, ευχαριστώ ολόψυχα τον ερευνητή κ. Κλεφτάκη Βασίλειο για την πολύτιμη καθοδήγηση και υποστήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που με στήριξε όλα τα χρόνια των σπουδών μου και συνέβαλε στην εξέλιξη μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός dc μικροδικτύου και οι στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του σε διάφορα σενάρια, τόσο σε αυτόνομη λειτουργία όσο και σε σύνδεση με το δίκτυο. Το μικροδίκτυο αποτελείται από μπαταρία, φωτοβολταϊκό και φορτία ενώ ο έλεγχος του μικροδικτύου βρίσκεται σε έναν κεντρικό ελεγκτή. Οι μονάδες αναλύονται συνοπτικά και εξετάζονται οι στρατηγικές ελέγχου ενός dc μικροδικτύου.

Η μοντελοποίηση του μικροδικτύου έγινε στο περιβάλλον Matlab/Simulink. Πέρα από την κάθε μονάδα του μικροδικτύου μοντελοποιήθηκε και ο αντίστοιχος ηλεκτρονικός μετατροπέας για την σύνδεσή τους, ενώ σχεδιάστηκε και ο απαραίτητος έλεγχος για την ομαλή λειτουργία τους.

Μέσω των προσομοιώσεων παρατηρήθηκε η ομαλή λειτουργία του μικροδικτύου σε διάφορα σενάρια. Το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα όταν το κεντρικό δίκτυο δεν είναι διαθέσιμο, όπου τροφοδοτούνται τα κρίσιμα φορτία. Στην σύνδεση με το δίκτυο το μικροδίκτυο λειτουργεί σε συνεργασία με τις ανάγκες του δικτύου ενώ η μετάβαση μεταξύ των δύο λειτουργιών, γίνεται ομαλά μέσω στρατηγικών του κεντρικού ελεγκτή. Τέλος, υλοποιείται τεχνική νησιδοποίησης όπου μέσω των προσομοιώσεων παρατηρείται η έγκυρη αποσύνδεση του μικροδικτύου σε περίπτωση σφάλματος.

Λέξεις κλειδιά: <<DC μικροδίκτυο, φωτοβολταϊκό, μπαταρία, Ιεραρχικός έλεγχος, Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, Μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης >>

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the study of a dc microgrid and the strategies that are used for its control in different scenarios, so on island operation as in connection with the main grid. The microgrid consists of a battery, a photovoltaic system and loads while his control takes place in the microgrid central controller. The units of the microgrid are briefly analyzed and the control strategies of the microgrid are examined.

The modeling of the microgrid took place in Matlab/Simulink. Every unit is designed with its appropriate electronic converter for its connection to the dc bus, while a control is necessary for smooth operation.

Through the results of the simulation, the smooth operation is observed in different scenarios. The microgrid can operate autonomously when the main grid is not available, where the critical loads are served. In connection with the main grid, the microgrid is operating in cooperation with the needs of the grid, while the transition between these modes becomes smooth through the control strategies of the central controller. At last, an islanding detection method is designed for the dc microgrid, where in case of an error of the upper grid, the microgrid detects it and disconnects in time.

Key Words: << DC microgrid, Photovoltaic System, Battery, Hierarchical control, Electronic Power Converters, Islanding Detection Method >>

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Μονάδες παραγωγής και συστήματα αποθήκευσης	17
1.2.1 Διεσπαρμένες πηγές παραγωγής ενέργειας	18
1.2.2 Αποθηκευτικά συστήματα	18
1.3 Δομή του μικροδικτύου	19
1.4 Ενσωμάτωση των AC και DC μικροδικτύων.....	20
1.5 Πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα των μικροδικτύων.....	22
1.6 AC μικροδίκτυο.....	23
1.7 DC μικροδίκτυο.....	25
1.8 Πλεονεκτήματα DC μικροδικτύου έναντι του AC	26
2 ΈΛΕΓΧΟΣ DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ.....	28
2.1 Εισαγωγή	28
2.2 Το πρότυπο ISA-95.....	29
2.3 Ιεραρχικός έλεγχος.....	31
2.4 Πρωτογενής έλεγχος	32
2.4.1 Παθητικός διαμοιρασμός φορτίου (καμπύλη droop).....	33
2.5 Δευτερογενής έλεγχος	35
2.5.1 Κεντρικός δευτερογενής έλεγχος	37
2.5.2 Μη κεντρικός δευτερογενής έλεγχος.....	39
2.5.2.1 Αποκεντρωμένος έλεγχος.....	40
2.5.2.2 Διεσπαρμένος έλεγχος	41
2.6 Τριτογενής έλεγχος	42
3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ (DC-DC CONVERTERS).....	45
3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (dc-dc boost converter).....	46

3.3 Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (dc-dc buck converter)	49
3.4 Αμφίδρομος μετατροπέας συνεχούς τάσης ανύψωσης-υποβιβασμού	53
3.5 Ηλεκτρικός συσσωρευτής - Μπαταρία.....	54
3.6 Κατηγορίες μπαταριών.....	55
3.7 Μπαταρία μολύβδου οξέος.....	56
3.8 Η μπαταρία του μικροδικτύου στο Matlab	57
4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	60
4.1 Εισαγωγή	60
4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα	61
4.3 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V φωτοβολταϊκού	64
4.4 Ιχνηλάτης εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος(MPPT)	65
4.5 Αλγόριθμος Perturb and Observe.....	67
4.6 Υλοποίηση φωτοβολταϊκού στο Matlab	68
5 ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΝΗΣΙΑΟΠΟΙΗΣΗΣ (ISLANDING DETECTION METHOD).....	70
5.1 Εισαγωγή	70
5.2 Χαρακτηριστικά των IDMs	71
5.3 Διάκριση των IDMs.....	72
5.4 Η IDM για το μικροδίκτυο στο MATLAB	75
5.5 Αρχή λειτουργίας της ενεργητικής τεχνικής	75
6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ. 78	
6.1 Το μικροδίκτυο στο Matlab/Simulink	78
6.2 Καμπύλη droop φωτοβολταϊκού.....	79
6.2.1 Πρώτος τρόπος υλοποίησης του ελέγχου με βάση την καμπύλη droop	81
6.2.1 Δεύτερος τρόπος υλοποίησης του ελέγχου με βάση την καμπύλη droop	84
6.3 Πειραματικά αποτελέσματα του ελέγχου droop του φωτοβολταϊκού για διαφορετικές ηλιοφάνειες	87

6.4 Συμβολή της καμπύλης droop του φωτοβολταϊκού στο μικροδίκτυο.....	89
6.5 Δευτερογενής έλεγχος/διόρθωση τάσης	92
6.6 Σύνδεση του μικροδικτύου στο δίκτυο (seamless transition)	95
6.7 Τριτογενής έλεγχος	99
6.8 Τεχνική ανίχνευσης νησιδοποίησης	102
6.8.1 Υλοποίηση της διαταραχής ρεύματος στο Matlab/Simulink	102
6.8.2 Πειραματικό σενάριο για την τεχνική ανίχνευσης νησιδοποίησης.....	105
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	110

1 Μικροδίκτυα

1.1 Εισαγωγή

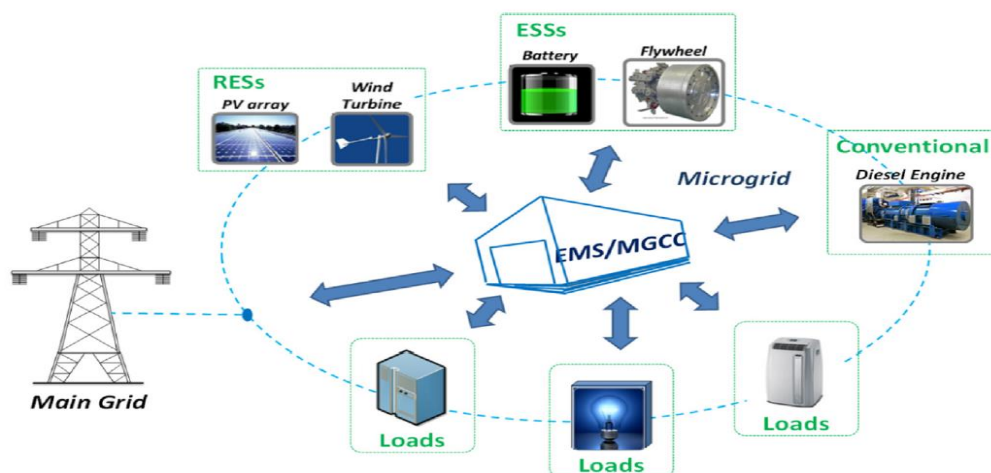
Τα δίκτυα διανομής με την πάροδο του χρόνου διαμορφώνονται από παθητικά σε ενεργά δίκτυα, υπό την έννοια ότι ο έλεγχος τους πλέον γίνεται διεσπαρμένα και η ροή ισχύος είναι αμφίδρομη. Αυτός ο τύπος δικτύου διευκολύνει την ενσωμάτωση της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας, των ανανεώσιμων πηγών και τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας ανοίγοντας τον δρόμο για νέους εξοπλισμούς και υπηρεσίες, πάντα σε συμφωνία με τα διεθνή πρωτόκολλα. Η κύρια λειτουργία ενός ενεργού δικτύου διανομής είναι η σύνδεση των καταναλωτών με την διαθέσιμη ηλεκτρική παραγωγή, επιτρέποντας και στους δύο να αποφασίσουν την βέλτιστη πολιτική λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται νέα συστήματα ελέγχου της τάσεως και της συχνότητας, κατάλληλα επικοινωνιακά συστήματα και συστήματα προστασίας. [1]

Η σταδιακή μετάβαση των δικτύων διανομής σε ενεργά δίκτυα οφείλεται κυρίως στην ανάγκη σύνδεσης των απομακρυσμένων φορτίων από το δίκτυο μεταφοράς, όπου το κόστος κατασκευής γραμμών μεταφοράς και διανομής είναι αρκετά μεγάλο συγκριτικά με τα φορτία. Επίσης φορτία τα οποία βρίσκονται σε νησιά και απομακρυσμένα αγροτικά φορτία από τις μονάδες παραγωγής οδήγησαν στην εύρεση νέων τρόπων για την μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα με την μείωση των υδρογονανθράκων, που αποτελεί το βασικό καύσιμο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την αύξηση των ρύπων, η ανάγκη ενσωμάτωσης εναλλακτικών μορφών ενέργειας, κυρίως των ανανεώσιμων πηγών, έγινε επιτακτική. Η ιδέα της άμεσης αξιοποίησης των τοπικών πηγών ενέργειας από τους τοπικούς καταναλωτές, η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάγκη για βέλτιστη ποιότητα ενέργειας προς τους καταναλωτές συντέλεσαν στην εξέλιξη των ενεργών συστημάτων διανομής.

Τέτοια ενεργά συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα **μικροδίκτυα**. Τα μικροδίκτυα αποτελούν την τελευταία εξέλιξη στο πεδίο των ηλεκτρικών συστημάτων και μπορούν να παρομοιαστούν σαν μικρής κλίμακας κεντρικά ηλεκτρικά συστήματα, τα οποία είναι ικανά να πετύχουν στόχους όπως αξιοπιστία στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, μείωση των ρύπων προς το περιβάλλον, μείωση κόστους, δημιουργία νέων θέσεων εργασίας κ.α. [3]

Τα μικροδίκτυα έχουν οριστεί από πολλούς ερευνητές και επιστήμονες. Σύμφωνα, με ευρωπαϊκές έρευνες [1] έχουν οριστεί ως εξής:

«Τα μικροδίκτυα περιλαμβάνουν συστήματα διανομής χαμηλής τάσεως με διεσπαρμένες πηγές παραγωγής (όπως ΑΠΕ, κυψέλες καυσίμου κ.α.), αποθηκευτικές συσκευές (ενεργειακοί πυκνωτές, μπαταρίες κ.α.) και φορτία. Τέτοια συστήματα μπορούν να λειτουργούν με μη αυτόνομο τρόπο όταν συνδέονται στο κεντρικό δίκτυο, ή με αυτόνομο τρόπο όταν αποσυνδέονται από το δίκτυο. Η λειτουργία των μικροσυστημάτων στο συνολικό δίκτυο μπορεί να προσφέρει οφέλη στην απόδοση του δικτύου, εφόσον διαχειρίζεται αποτελεσματικά.»



Εικόνα 1.1 : Τυπικό μικροδίκτυο

Συμπερασματικά, το μικροδίκτυο είναι ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που περιέχει πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ηλεκτρονικά ισχύος και φορτία. Μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα τροφοδοτώντας από τις πηγές τα φορτία του ή να συνδέεται στο δίκτυο απορροφώντας ή εγχέοντας ισχύ,

βελτιώνοντας την απόδοση του δικτύου ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις. Οι πηγές ηλεκτρικής ενέργειας είναι κυρίως ανανεώσιμες ενώ υπάρχουν και συμβατικές γεννήτριες σε περίπτωση που η παραγόμενη ισχύς από τα ΑΠΕ δεν είναι αρκετή. Χρησιμοποιούνται μπαταρίες τόσο για την αποθήκευση όσο και για την έγχυση ισχύος, μετατροπείς DC/AC και DC/DC που συνδέονται στις πηγές ενέργειας και τις μπαταρίες, για την μετατροπή και ενίσχυση του ρεύματος/τάσης στα επιθυμητά επίπεδα. Παρομοιάζεται λοιπόν, σαν ένα δίκτυο μικρής κλίμακας, ωστόσο η δομή, ο έλεγχος και τα χαρακτηριστικά του μικροδικτύου είναι διαφορετικά από αυτά ενός τυπικού δικτύου.

1.2 Μονάδες παραγωγής και συστήματα αποθήκευσης

Η διεύθυνση της διεσπαρμένης παραγωγής στο κεντρικό δίκτυο αυξάνεται κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Βασίζεται κυρίως σε ανανεώσιμες πηγές που μειώνουν την περιβαλλοντική ρύπανση ενώ κάνουν δυνατή την αξιοποίηση της τοπικής παραγόμενης ενέργειας. Η διεύθυνση αυτή μπορεί να ενισχύσει το κεντρικό δίκτυο μειώνοντας τις απώλειες, ελαχιστοποιώντας τα φορτία των γραμμών και ισοσταθμίζοντας την άεργο ισχύ όπου κρίνεται αναγκαίο. Από την άλλη, η διεύθυνσή τους απευθείας στο δίκτυο αποτελεί πρόκληση λόγω της αβεβαιότητας των ανανεώσιμων πηγών (απρόβλεπτα καιρικά φαινόμενα), συνεπώς ο τρόπος αξιοποίησής τους θα πρέπει να εξεταστεί.

Τα μικροδίκτυα όπως αναφέρθηκε ορίζονται ως τοπικά συστήματα διανομής που αποτελούνται από παραγωγή, αποθήκευση και φορτία και είναι ικανά να λειτουργήσουν τόσο σε αυτόνομη λειτουργία, όσο και σε σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο. Η δυνατότητα αυτή δίνει αξιοπιστία και καλύτερη ποιότητα ισχύος στους χρήστες που είναι συνδεδεμένοι στο μικροδίκτυο.

1.2.1 Διεσπαρμένες πηγές παραγωγής ενέργειας

Τα μικροδίκτυα μπορούν να περιλαμβάνουν διαφορετικές πηγές τόσο ανανεώσιμες όσο και μη-ανανεώσιμες, ανάλογα τις ανάγκες του μικροδικτύου αλλά και την διαθέσιμη ενέργεια του περιβάλλοντος του μικροδικτύου. Κάθε πηγή ενέργειας έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης τους. Ωστόσο με τον κατάλληλο οικονομικό σχεδιασμό μπορεί να αξιοποιηθεί οποιαδήποτε πηγή ενέργειας. Συνοπτικά οι διεσπαρμένες πηγές ενέργειας που μπορούμε να συναντήσουμε σε ένα μικροδίκτυο είναι:

Μη ανανεώσιμες πηγές όπως:

- Μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο, τροφοδοτούν μέχρι και 6MW.
- Τουρμπίνες αερίου με καύσιμο είτε το πετρέλαιο είτε το φυσικό αέριο. Η διαφορά με τις μηχανές εσωτερικής καύσης είναι στην ικανότητα ισχύος που προσφέρουν. Οι τουρμπίνες αερίου μπορούν να τροφοδοτήσουν μέχρι και 30MW.
- Μικροτουρμπίνες με κύριο καύσιμο την βιομάζα, προπάνιο η και φυσικό αέριο με ικανότητα ισχύος μέχρι και 1MW.
- Κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιώντας σαν καύσιμο αιθανόλη, υδρογόνο, άζωτο, φυσικό αέριο κ.α. Μπορούν να αποδώσουν μέχρι και 20MW ισχύ.

Ανανεώσιμες πηγές όπως:

- Ανεμογεννήτριες
- Φωτοβολταϊκά συστήματα
- Παραγωγή αερίου μέσω βιομάζας
- Υδροηλεκτρικοί κινητήρες
- Γεωθερμική ενέργεια
- Θερμική ενέργεια

1.2.2 Αποθηκευτικά συστήματα

Η χρησιμοποίησή τους βελτιώνει την ευστάθεια τους συστήματος, την ποιότητα ισχύος, την αξιοπιστία και γενικότερα την απόδοση του μικροδικτύου. Η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί, να επεξεργαστεί και να δοθεί στους τελικούς καταναλωτές σε

υψηλή ποιότητα και οποιαδήποτε στιγμή, μέσω των αποθηκευτικών συστημάτων. Κάθε αποθηκευτικό μέσο έχει διαφορετική ικανότητα ισχύος, εκφόρτισης, διάρκεια ζωής κ.α. συνεπώς η επιλογή του κάθε αποθηκευτικού μέσου γίνεται αναλογικά με τις ανάγκες του μικροδικτύου. Συνοπτικά οι τύποι των αποθηκευτικών μέσων που συναντάμε σε ένα μικροδίκτυο είναι:

- Θερμική αποθήκευση ενέργειας, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται σαν θερμική και μετατρέπεται σε ηλεκτρική κατά την χρησιμοποίησή της
- Αποθήκευση ενέργειας με υδροηλεκτρική αντλία (βλ. παραπάνω)
- Αποθήκευση υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα
- Αποθήκευση με σφόνδylους(flywheels)
- Μπαταρίες με πιο διαδεδομένες τις μπαταρίες μολύβδου οξέος, νικελίου-καδμίου, λιθίου και θειικού νατρίου
- Υπερπυκνωτές
- Αποθήκευση με υπεραγώγιμες μαγνητικές διατάξεις [4]

1.3 Δομή του μικροδικτύου

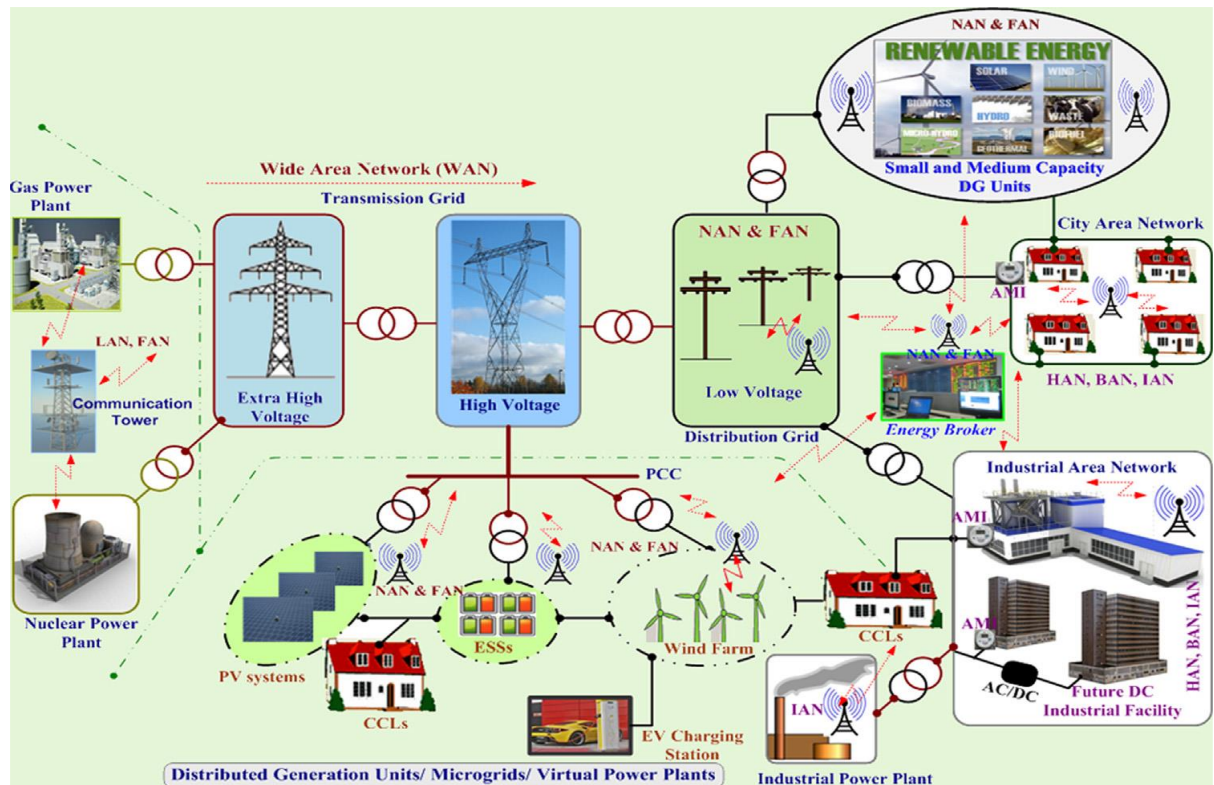
Αρχικά το μικροδίκτυο μπορεί να τροφοδοτεί δύο ειδών φορτία: τα κρίσιμα και τα μη κρίσιμα φορτία. Κάθε μικροδίκτυο θα πρέπει να έχει κάποια συγκεκριμένα στοιχεία για την εύρυθμη λειτουργία του σαν οντότητα αλλά και σε συνεργασία με το κεντρικό δίκτυο όπως:

- Σημείο κοινής σύζευξης με το δίκτυο (PCC). Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε σε σύνδεση με το δίκτυο, μέσω του κοινού σημείου σύζευξης. Αυτή η σύνδεση μπορεί να γίνει είτε μέσω διακόπτη είτε μέσω μετατροπέα.
- Διανομή. Τα κύρια στοιχεία ενός μικροδικτύου συνδέονται με τις γραμμές διανομής του κεντρικού δικτύου. Ειδικός σχεδιασμός απαιτείται τόσο για ac μικροδίκτυα όσο και για dc.
- Ασφάλεια. Τόσο σε σύνδεση με το δίκτυο, όσο και στην αυτόνομη λειτουργία, τα μικροδίκτυα θα πρέπει να διαθέτουν μηχανισμούς για την ασφαλή λειτουργία σύμφωνα με διεθνή πρωτόκολλα, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να μπορούν να προσαρμόζονται στις ανάγκες ασφάλειας του κάθε μικροδικτύου.

- Επίβλεψη μικροδικτύου. Το μικροδίκτυο θα πρέπει να διαθέτει μηχανισμούς παρακολούθησης της τάσης, συχνότητας, ποιότητα ισχύος και την ροή φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή.
- Μετατροπείς ισχύος. Τα στοιχεία του μικροδικτύου συνδέονται στις γραμμές διανομής μέσω μετατροπών, με σκοπό να προσαρμόζονται στα επίπεδα τάσης και ρεύματος στις συνδεδεμένες συσκευές.
- Έλεγχος. Στο μικροδίκτυο υπάρχουν διαφορετικές πηγές και μηχανισμοί που μας δίνουν πληροφορίες. Οι πληροφορίες αυτές πρέπει να επεξεργάζονται και να ελέγχονται ώστε να πραγματοποιούνται οι κατάλληλες λειτουργίες στο μικροδίκτυο (π.χ. διόρθωση τάσης, περισσότερη παραγωγή ενέργειας). Κάθε μικροδίκτυο διαθέτει έναν ιεραρχικό έλεγχο όπου συντονίζει αυτές τις λειτουργίες. [4]

1.4 Ενσωμάτωση των AC και DC μικροδικτύων

Το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο παρέχει ηλεκτρική ενέργεια από τα σημεία παραγωγής στους τελικούς καταναλωτές μέσω δύο συστημάτων: το σύστημα μετάδοσης και το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα μετάδοσης είναι υπεύθυνο για την μεταφορά της ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής προς τους υποσταθμούς διανομής ενώ το σύστημα διανομής παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς προς τους καταναλωτές. Συνήθως τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας βρίσκονται μακριά από τα φορτία, συνεπώς η επίβλεψη του δικτύου είναι δύσκολη λόγω της μεγάλης απόστασης. Παρ' όλα αυτά οι μονάδες παραγωγής που συνδέονται στο δίκτυο στην χαμηλή τάση υπό την μορφή των μικροδικτύων μετατρέπουν το σύστημα διανομής από παθητικό σε ενεργητικό.



Εικόνα 1.2 : Τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο

Το μικροδίκτυο μπορεί να συνδεθεί είτε στην υψηλή τάση είτε στην χαμηλή τάση ανάλογα με την ισχύ που μπορεί να αποδώσει. Όσο πιο κοντά βρίσκεται προς το σημεία διανομής, τόσες λιγότερες οι απώλειες ισχύος. Η σύνδεση των μικροδικτύων στους υποσταθμούς διανομής ανοίγει νέους δρόμους για την πιο εύκολη διαχείριση του συνολικού δικτύου. Ταυτόχρονα οι καταναλωτές θα έχουν την δυνατότητα να ελέγχουν, να αποθηκεύουν και να διαχειρίζονται μέρος της ενέργεια που καταναλώνουν μέσω των μικροδικτύων σε πραγματικό χρόνο.

Στο άμεσο μέλλον η συμμετοχή των μικροδικτύων υπό την μορφή "εργοστάσια παραγωγής ισχύος" σε διαφορετικές αγορές ενέργειας θα είναι αναγκαία. Το κάθε μικροδίκτυο ή ομάδα μικροδικτύων μπορεί να έχει έναν διαχειριστή όπου θα αποφασίζει εάν θα αυξήσει την τιμή της διαθέσιμης ενέργειας, τότε θα την διαθέσει και τότε να την αποθηκεύσει. Ταυτόχρονα οι καταναλωτές θα έχουν επίβλεψη της διαθέσιμης ενέργειας, της ποιότητας και της τιμής, καθώς και θα γνωρίζουν πληροφορίες για τις μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης του μικροδικτύου. [5]

1.5 Πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα των μικροδικτύων

Η εισαγωγή των μικροδικτύων στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας συντελεί στην αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου. Τα κύρια πλεονεκτήματα που οδηγούν στην περαιτέρω ανάπτυξη τους είναι:

- 1) Μικρότερη περιβαλλοντική ρύπανση, λόγω μειωμένων εκπομπών αερίων και σωματιδίων.
- 2) Η μείωση της απόστασης μεταξύ των φορτίων και των μικροπαραγωγών που οδηγεί σε:
 - Βελτίωση του προφίλ της τάσης, λόγω καλύτερης στήριξης από την άεργο ισχύ.
 - Μείωση των απωλειών σε μεταφορά και διανομή.
 - Μείωση επενδύσεων για επέκταση των συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς.
 - Μείωση της συμφόρησης ισχύος στη μεταφορά και διανομή.
- 3) Βελτίωση της ποιότητας ισχύος και της αξιοπιστίας, μέσω:
 - Αποκέντρωσης της παραγωγής.
 - Καλύτερης αντιστοίχισης παροχής και ζήτησης ενέργειας.
 - Μείωση των επιπτώσεων από τις μεγάλες διακοπές λειτουργίας στη μεταφορά και την παραγωγή.
 - Μείωση του χρόνου διακοπών και βελτίωση του χρόνου επανεκκίνησης της παραγωγής με χρήση της ισχύος των μικροπαραγωγών.
- 4) Εξοικονόμηση χρημάτων μέσω:
 - Χρησιμοποίησης της αποβαλλόμενης θερμότητας όταν λειτουργούν θερμοηλεκτρικές μονάδες, που λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ φορτίου και παραγωγής δεν χρειάζονται σημαντικές υποδομές για τη μεταφορά της θερμότητας και επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα.
 - Ενσωμάτωσης πολλών μικροπαραγωγών, ώστε να αυξηθεί η τοπική παραγωγή και να μειωθεί το κόστος απωλειών διανομής και μεταφοράς.
- 5) Κέρδη από τη συμμετοχή στην αγορά ενέργειας:
 - Μείωση της πίεσης που ασκούν οι εταιρείες παραγωγής ενέργειας.

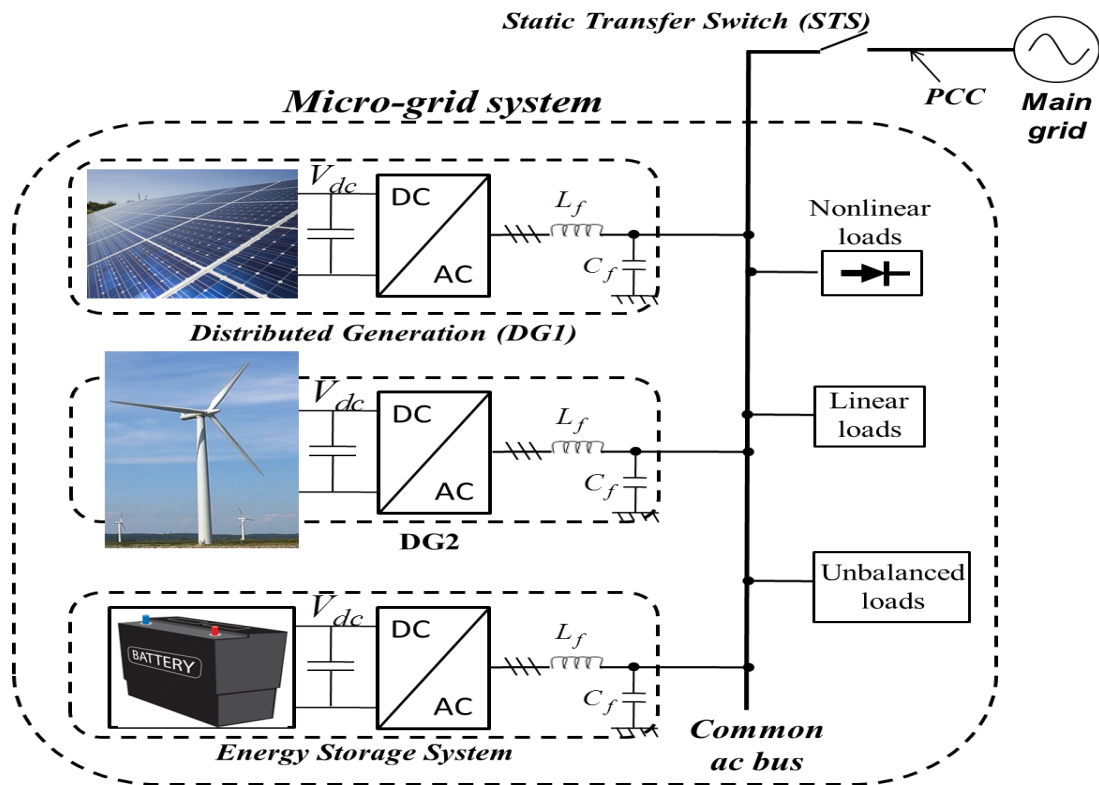
- Τα μικροδίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παροχή βοηθητικών υπηρεσιών.
- Η ευρεία εφαρμογή μικροπαραγωγών με σύνδεση και άμεση λειτουργία (plug and play) μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της τιμής της ενέργειας στην αγορά.
- Το κατάλληλο οικονομικό ισοζύγιο ανάμεσα σε επενδύσεις για το δίκτυο και τη χρησιμοποίηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι πιθανό να οδηγήσει σε μείωση της τιμής της ενέργειας των καταναλωτών.

Παρά τα οφέλη που αποδίδουν τα μικροδίκτυα στο ηλεκτρικό σύστημα ενέργειας, παρουσιάζουν μειονεκτήματα που ωστόσο δεν είναι ικανά για την αποτροπή της ενσωμάτωσής τους. Μερικά από αυτά είναι:

- 1) Υψηλά κόστη των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.
- 2) Τεχνικές δυσκολίες από την απειρία ελέγχου μεγάλου αριθμού μικροπαραγωγών.
- 3) Έλλειψη προτύπων αναφορικά με τη λειτουργία και την προστασία των μικροδικτύων.
- 4) Λόγω έλλειψης νομοθεσίας και κανονισμών σχετικά με τη λειτουργία των μικροδικτύων, υπάρχουν νομικά και διαχειριστικά ζητήματα.
- 5) Θέματα της αγοράς ενέργειας, όπως ρύθμιση της τιμής της ενέργειας που παρέχει το μικροδίκτυο κατά την αυτόνομη λειτουργία του. [2]

1.6 AC μικροδίκτυο

Το AC μικροδίκτυο οφείλει την ονομασία του στην εναλλασσόμενη ισχύ του ζυγού μεταφοράς του μικροδικτύου. Ένα τυπικό AC μικροδίκτυο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το κεντρικό δίκτυο μπορεί να είναι είτε AC είτε DC. Μέσω του κοινού σημείου σύζευξης (PCC) το μικροδίκτυο συνδέεται μέσω ενός μετασχηματιστή με το δίκτυο εάν είναι AC, ενώ με έναν μετατροπέα AC/DC στην περίπτωση που το κεντρικό δίκτυο είναι DC.



Εικόνα 1.3 : Τυπικό AC μικροδίκτυο

Το μικροδίκτυο μπορεί να αποτελείται από διάφορες πηγές ενέργειας, ανανεώσιμες και μη, και συνδέονται στον ζυγό του μικροδικτύου μέσω ενός μετατροπέα DC/AC στην περίπτωση που οι πηγές παραγωγής ενέργειας είναι DC (π.χ. φωτοβολταϊκά), ή μέσω μετασχηματιστών στην περίπτωση των AC. Τα φορτία του μικροδικτύου συνδέονται απευθείας στον ζυγό του μικροδικτύου εάν είναι AC ενώ στην περίπτωση των DC συνδέονται μέσω μετατροπέα DC/AC. Τα αποθηκευτικά συστήματα, όπως υπερπυκνωτές και μπαταρίες, συνδέονται με τον ζυγό μέσω DC/AC μετατροπέα διπλής κατεύθυνσης για την δυνατότητα φόρτισης και εκφόρτισης.

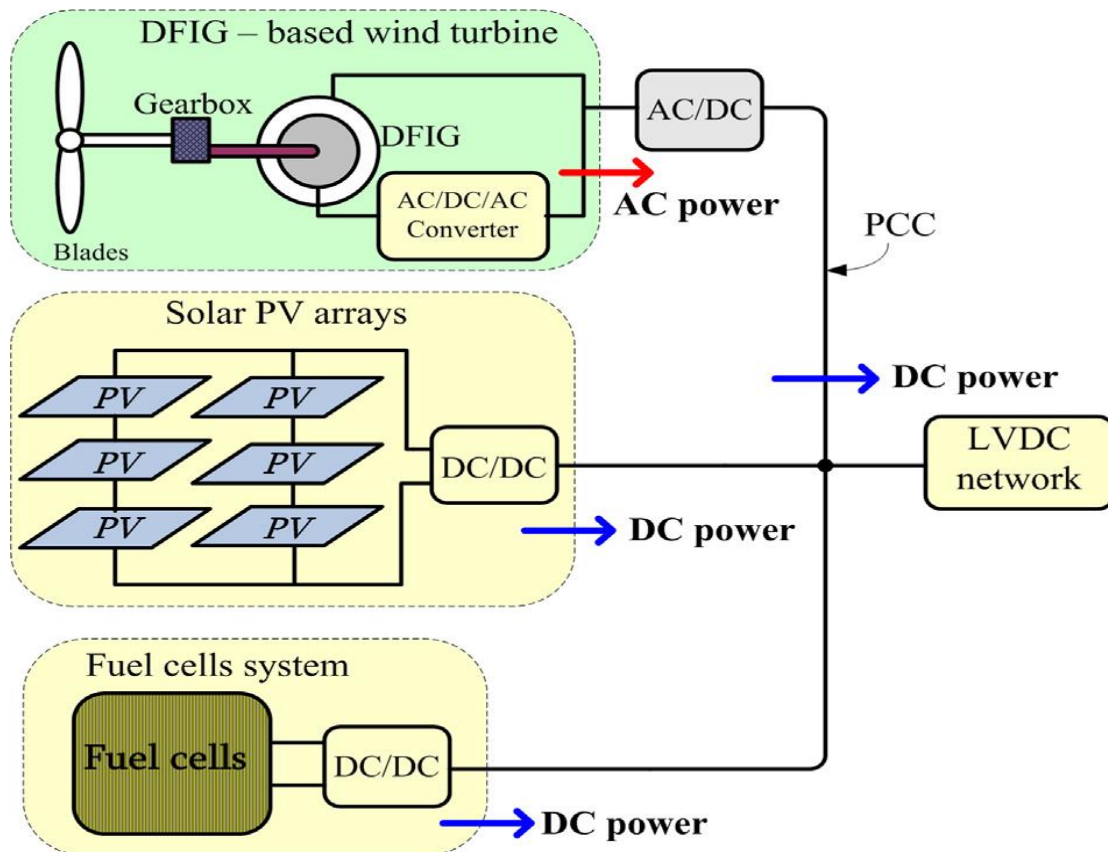
Κατά την αυτόνομη λειτουργία τα φορτία τροφοδοτούνται από τις τοπικές πηγές ενέργειας και η μπαταρία απορροφά ή δίνει ισχύ ανάλογα με το ισοζύγιο του μικροδικτύου. Στην σύνδεση του μικροδικτύου με το δίκτυο, τα φορτία απορροφούν ισχύ από τις τοπικές πηγές η ακόμα και από το δίκτυο, ενώ στην περίπτωση που το μικροδίκτυο έχει περίσσεια ενέργειας μπορεί να τροφοδοτήσει το δίκτυο. [5]

1.7 DC μικροδίκτυο

Το παραδοσιακό ηλεκτρικό σύστημα έχει σχεδιαστεί για να παράγει AC ισχύ και να στέλνεται μέσω των γραμμών μετάδοσης και των γραμμών διανομής στους τελικούς καταναλωτές, δηλαδή σε επιχειρήσεις και σπίτια. Τα dc συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικά συστήματα διανομής, σε υποδομές τηλεπικοινωνιών και σε μετάδοση ισχύος μεγάλων αποστάσεων μεταξύ ac δικτύων διαφορετικών συχνοτήτων. Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος, όπου η ρύθμιση της τάσης γίνεται εύκολα και με τον αυξανόμενο αριθμό των dc φορτίων και πηγών, οι ερευνητές έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους προς τα dc μικροδίκτυα και την συνολική τους απόδοση. Πηγές όπως φωτοβολταϊκά και κυψέλες καυσίμου, συστήματα αποθήκευσης όπως μπαταρίες και υπερπυκνωτές έχουν dc ρεύμα εξόδου. Εφαρμογές όπως κέντρα δεδομένων όπου χρησιμοποιούνται UPS και η σταδιακή ενσωμάτωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων κάνουν τα dc μικροδίκτυα αποτελεσματική λύση. Οι μετασχηματισμοί της ισχύος που χρειάζονται σε ένα ac μικροδίκτυο μπορούν να αποφευχθούν μέσω των dc μικροδικτύων, εξοικονομώντας έτσι σημαντικό ποσοστό απωλειών ενέργειας. [6]

Σε ένα DC μικροδίκτυο τα AC φορτία συνδέονται μέσω μετατροπών AC/DC στον ζυγό μεταφοράς του μικροδικτύου, ενώ τα DC φορτία συνδέονται απευθείας. Οι μονάδες παραγωγής χρησιμοποιούν AC/DC μετατροπέα στην περίπτωση που παράγουν AC ρεύμα ενώ για πηγές παραγωγής DC ισχύος χρησιμοποιούνται είτε άμεσα, είτε με DC/DC μετατροπείς για την ρύθμιση τους στα επιθυμητά επίπεδα λειτουργίας. Το μικροδίκτυο μέσω του κοινού σημείου σύζευξης (PCC) συνδέεται με το δίκτυο μέσω μετατροπέα DC/AC με το κεντρικό δίκτυο.

Όπως και στα AC μικροδίκτυα και τα DC αντίστοιχα μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε σε σύνδεση με το δίκτυο. Στην αυτόνομη λειτουργία τα τοπικά φορτία τροφοδοτούνται από τις πηγές παραγωγής ενέργειας του μικροδικτύου, ενώ τα αποθηκευτικά συστήματα συμπληρώνουν στο ισοζύγιο ισχύος που διαμορφώνεται. Στην σύνδεση με το δίκτυο η περίσσεια ισχύος του μικροδικτύου μπορεί να εξαχθεί στο κεντρικό δίκτυο.



Εικόνα 1.4 : Τυπικό DC μικροδίκτυο

1.8 Πλεονεκτήματα DC μικροδικτύου έναντι του AC

- Υψηλότερη αποδοτικότητα λόγω των μειωμένων απωλειών. Στα DC μικροδίκτυα τα φορτία χρειάζονται λιγότερους μετατροπείς για την σύνδεσή τους στο δίκτυο συνεπώς οι απώλειες λόγω των μετατροπέων είναι μικρότερες.
- Υψηλότερη αποδοτικότητα στην διανομή. Απώλειες στο AC ρεύμα, λόγω του επιδερμικού φαινομένου και της αέργου ισχύος, δεν υπάρχουν στο DC ρεύμα δίνοντας ισχύ υψηλότερης απόδοσης κατά την μεταφορά και διανομή.
- Πιο εύκολη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των αποθηκευτικών συστημάτων με πιο απλουστευμένες διεπαφές.
- Πιο φιλικό προς το περιβάλλον, αφού ενσωματώνει κυρίως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Πιο αποδοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε φορτία όπως ηλεκτρικά αυτοκίνητα και φωτισμό led.

- Απουσία ανάγκης συγχρονισμού των μηχανών παραγωγής με το δίκτυο, καθώς η ισχύς είναι συνεχής DC και κατ' επέκταση οποιοσδήποτε πιθανόν συγχρονισμός μέσα στο δίκτυο.
- Μικρότερο αρχικό κόστος. Το αρχικό κόστος έχει να κάνει με τον αριθμό και τον τύπο των μονάδων που εγκαθίστανται. Τα DC μικροδίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα κυρίως για να τροφοδοτούν γραφεία, κέντρα δεδομένων και οικιακά κυρίως φορτία, ενώ τα AC μικροδίκτυα είναι πιο κατάλληλα για την τροφοδότηση εργοστασίων.
- Μικρότερο λειτουργικό κόστος ως αποτέλεσμα της υψηλότερης απόδοσης ενέργειας των DC γραμμών.
- Μικρότερο κόστος σε μετατροπείς, και έλεγχο λόγω της απλούστερης αρχιτεκτονικής τους εξαιτίας των μειωμένων παραμέτρων του συστήματος (απουσία αέργου ισχύος, συχνότητας).

Το DC μικροδίκτυο έχει μειονεκτήματα που οφείλονται κυρίως στην έλλειψη της τεχνολογίας μέχρι σήμερα. Συνοπτικά είναι:

- Η ασφάλεια του DC μικροδικτύου αποτελεί πρόκληση. Το ενδιαφέρον για τα DC μικροδίκτυα είναι πρόσφατο με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν διεθνή πρότυπα και οδηγοί για την ασφάλεια, ενώ η πρακτική βιομηχανική εμπειρία είναι περιορισμένη.
- Υψηλά κόστη σε ασφάλειες και προστασίες. Λόγω της εξάπλωσης των AC μικροδικτύων μέχρι σήμερα, η τεχνογνωσία σε ασφάλειες και προστασίες, αναφέρονται σε ρεύματα AC.
- Η μετατροπή της τάσης είναι πιο εύκολη στα AC μικροδίκτυα μέσω μετασχηματιστών, ενώ στα DC μικροδίκτυα απαιτούνται μετατροπείς όπου η εφαρμογή τους είναι πιο πολύπλοκη. [4][7][16]

2 Έλεγχος DC μικροδικτύου

2.1 Εισαγωγή

Για τον έλεγχο ενός μικροδικτύου αρχικά θα πρέπει να αναφερθούν οι ανάγκες που οδηγούν στον σχεδιασμό του ελέγχου. Ένα μικροδίκτυο θα πρέπει να είναι ικανό να λειτουργεί σε σύνδεση με το δίκτυο, σε αυτόνομη λειτουργία καθώς και να χειρίζεται ομαλά τις μεταβάσεις μεταξύ των δύο λειτουργιών. Κατά την σύνδεση του μικροδικτύου στο δίκτυο, στην περίπτωση όπου υπάρχει έλλειμα ισχύος το δίκτυο πρέπει να συνεισφέρει στα φορτία, ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση που υπάρχει περίσσεια ισχύος, η ενέργεια του μικροδικτύου μπορεί να εξαχθεί ενώ παράλληλα το μικροδίκτυο να μπορεί να συνεισφέρει βοηθητικές υπηρεσίες προς το δίκτυο. Κατά την αυτόνομη λειτουργία, τα συστήματα αποθήκευσης σε συνδυασμό με τις μονάδες παραγωγής θα πρέπει να βρίσκονται σε ισορροπία με την τοπική ζήτηση. Η ομαλή μετάβαση μεταξύ των δύο λειτουργιών, είναι σημαντική για την ασφάλεια του συστήματος και του εξοπλισμού. Τέλος για την αξιόπιστη και βέλτιστη οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου, το μικροδίκτυο θα πρέπει να διαθέτει λειτουργίες όπως ρύθμιση της τάσης, διαχείριση της μπαταρίας, ισορροπία ισχύος, διαχείριση της ζήτησης και οικονομική βελτιστοποίηση. Ο σχεδιασμός του ελέγχου θα πρέπει να ανταποκρίνεται σε αυτές τις προκλήσεις. [8]

Στην διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχει μία γενική δομή αρχιτεκτονικής ελέγχου, καθώς το κάθε μικροδίκτυο διαμορφώνεται ανάλογα με την ήδη υπάρχουσα υποδομή και προσαρμόζεται ανάλογα στις ανάγκες τις. Ωστόσο σαν μία πρώτη διάκριση ο έλεγχος μπορεί να είναι είτε **κεντρικός** ή **αποκεντρωμένος**.

Στον κεντρικό έλεγχο οι διάφορες λειτουργίες του μικροδικτύου και η διαχείρισή του βρίσκονται στον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου (MGCC). Εκεί συλλέγονται και

επιβλέπονται όλες οι πληροφορίες του μικροδικτύου, καταγράφονται οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και των καυσίμων των μονάδων παραγωγής του δικτύου, ελέγχονται οι ανάγκες του δικτύου σε θέματα προστασίας και βοηθητικών υπηρεσιών, και με βάση όλα τα δεδομένα ο κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου δίνει μέσω καναλιών επικοινωνίας στις μονάδες παραγωγής τα νέα σημεία λειτουργίας.

Στον αποκεντρωμένο έλεγχο ο κύριος ρόλος δίνεται στους τοπικούς ελεγκτές(MC) των μονάδων παραγωγής, οι οποίοι θα πρέπει να συνεργαστούν, να βελτιστοποιήσουν την παραγωγή τους και να προσφέρουν την μέγιστη δυνατή ισχύ στα τοπικά φορτία αλλά και στο δίκτυο συνολικά. Ο έλεγχος αυτός είναι κατάλληλος για συστήματα όπου οι μονάδες παραγωγής έχουν διαφορετικό κάτοχο, και ο καθένας θέλει την βέλτιστη πολιτική για την μονάδα παραγωγής του. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος έρχεται σε αντίθεση με τον κεντρικό έλεγχο δυσκολεύοντας την γενική εποπτεία του μικροδικτύου και του δικτύου, δίνει όμως μία αυτονομία στο σύστημα καθώς μπορεί να λειτουργήσει με τοπικές παραμέτρους ανεξάρτητα από τον κεντρικό ελεγκτή.

Για να επιτευχθεί η εποπτεία του κεντρικού ελεγκτή, η γνώση της κατάστασης του μικροδικτύου κάθε στιγμή και η δυνατότητα αλλαγής λειτουργίας των μονάδων, ενώ ταυτόχρονα να διατηρείται η αυτονομία του συστήματος σε περίπτωση που η επικοινωνία με τον κεντρικό ελεγκτή δεν λειτουργεί, έχει αναπτυχθεί ο **υβριδικός έλεγχος**. Ο έλεγχος αυτός αποτελεί τον συνδυασμό του κεντρικού και του αποκεντρωμένου ελέγχου. Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τους καθιστώντας έτσι το μικροδίκτυο σε μία ενεργή οντότητα με πολλές διαφορετικές λειτουργίες. [1][9]

2.2 Το πρότυπο ISA-95

Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη των μικροδικτύων υπάρχουν προσπάθειες από ερευνητές να δημιουργήσουν ένα διεθνές πρότυπο για τον έλεγχο των μικροδικτύων. Ένα υπάρχον πρότυπο που εφαρμόζεται είναι το ISA-95 [11]. Είναι ένα διεθνές πρότυπο από τη διεθνή εταιρεία αυτοματισμού για την ανάπτυξη αυτοματοποιημένης διασύνδεσης μεταξύ επιχειρήσεων και συστημάτων ελέγχου.

Έχει αναπτυχθεί για τους παγκόσμιους κατασκευαστές. Αναπτύχθηκε για να εφαρμοστεί σε όλους τους κλάδους και σε κάθε είδους διαδικασίες, όπως διαδικασίες παρτίδας, συνεχείς και επαναλαμβανόμενες διαδικασίες. [10]

Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο ένας πολυεπίπεδος ιεραρχικός έλεγχος παρουσιάζεται με τα ακόλουθα επίπεδα: [12]

- Επίπεδο 5: Επιχείρησης. Σε αυτό το επίπεδο περιλαμβάνονται πολιτικές διαχείρισης μιας εμπορικής οντότητας. Έχει λειτουργική και αναπτυξιακή ευθύνη για την συνολική επιχείρηση συμπεριλαμβάνοντας τα εργοστάσια και τις γραμμές παραγωγής.
- Επίπεδο 4: Εγκατάστασης. Το επίπεδο της εγκατάστασης περιλαμβάνει πολιτικές διαχείρισης ενός τμήματος μιας επιχείρησης, η οποία περιλαμβάνει συνήθως τα στοιχεία του οικονομικού τμήματος της επιχείρησης.
- Επίπεδο 3: Κτιρίου/παραγωγής. Σε αυτό το επίπεδο περιλαμβάνονται πολιτικές ελέγχου που απαιτούνται για την διαχείριση καταστάσεων σε ένα σύνολο κτιρίων και τα συστήματα παραγωγής τους.
- Επίπεδο 2: Περιοχής/Γραμμής : Σε επίπεδο γραμμής περιέχονται οι πολιτικές διαχείρισης και ελέγχου που περιορίζονται σε μία συγκεκριμένη περιοχή ή γραμμή παραγωγής.
- Επίπεδο 1: Μονάδας. Στο επίπεδο μονάδας περιλαμβάνονται οι πολιτικές ελέγχου που αφορούν καταστάσεις μιας αυτοματοποιημένης μονάδας.
- Επίπεδο 0: Συσκευής. Στο κατώτατο επίπεδο περιλαμβάνονται ένα σύνολο πολιτικών που αφορούν τις λειτουργίες της συσκευής και περιορίζονται σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και τα συστήματα παραγωγής.

Σε κάθε επίπεδο γίνεται η επίβλεψη του κατώτερου επιπέδου από το ανώτερο. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να διασφαλιστεί πως οι διάφορες εντολές από το ένα επίπεδο στο χαμηλότερο, θα έχουν μικρή επίδραση στην ευστάθεια του συστήματος. Συνεπώς όσο υψηλότερο το επίπεδο του ελέγχου, τόσο χαμηλότερο το εύρος του ελέγχου.

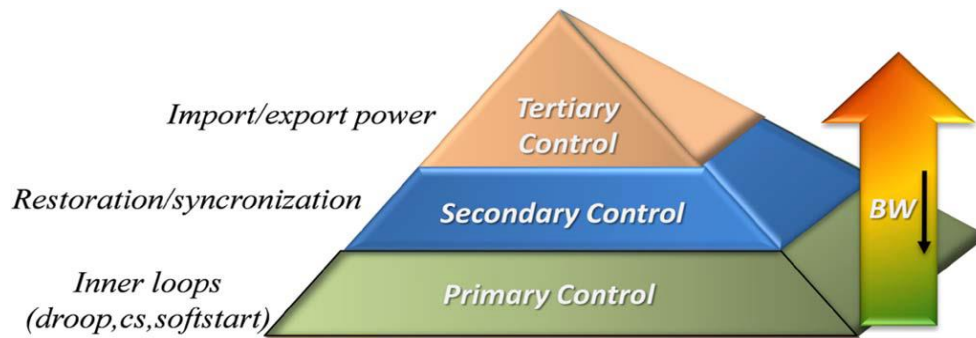
Σύμφωνα λοιπόν με αυτό το πρότυπο, ο έλεγχος των μικροδικτύων έχει υλοποιηθεί σε βαθμίδες, όπου κάθε βαθμίδα έχει συγκεκριμένες λειτουργίες ενώ ταυτόχρονα επιβλέπεται η κάθε βαθμίδα από την ανώτερή της. Ο έλεγχος αυτός αναφέρεται ως ιεραρχικός έλεγχος και οι μελέτες [11] και [13] θεωρούν τον έλεγχο αυτό πρότυπο για κάθε αποδοτικό μικροδίκτυο.

2.3 Ιεραρχικός έλεγχος

Τα συστήματα ενέργειας συνήθως επεκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις και η εφαρμογή ενός ελέγχου πλήρως κεντρικού είναι αδύνατη κυρίως λόγω των επικοινωνιακών αναγκών. Ταυτόχρονα μία πλήρως αποκεντρωμένη μέθοδος δεν είναι εφικτή λόγω της ισχυρής σύζευξης μεταξύ των λειτουργιών των διάφορων μονάδων, όπου απαιτούν ένα επίπεδο συντονισμού που δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο από τοπικές μεταβλητές. Συνεπώς απαιτείται ένας συμβιβασμός ανάμεσα στους δύο ελέγχους και μπορεί να επιτευχθεί μέσω του ιεραρχικού ελέγχου. [9]

Ο ιεραρχικός έλεγχος είναι ο πιο διαδομένος έλεγχος στα μικροδίκτυα. Αποτελείται από τρία επίπεδα ελέγχου, όπου κάθε βαθμίδα επιβλέπεται από την ανώτερη της. Συνοπτικά οι τρεις βαθμίδες είναι:

1. Πρωτογενής έλεγχος, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της τοπικής παραγωγής, τόσο σε τάση όσο και σε ρεύμα. Συνήθως ακολουθεί τα σημεία αναφοράς που δίνονται από τους ελεγκτές των ανώτερων βαθμίδων και δρα στους μετατροπείς ισχύος της κάθε μονάδας παραγωγής.
2. Δευτερογενής έλεγχος, ο οποίος βρίσκεται πάνω από τον πρωτογενή. Είναι υπεύθυνος για την ομαλή λειτουργία του μικροδικτύου όσον αφορά την τάση και την ποιότητα ισχύος, τον διαμοιρασμό του φορτίου καθώς και την ομαλή μετάβαση από αυτόνομη λειτουργία σε σύνδεση με το δίκτυο και αντίστροφα.
3. Τριτογενής έλεγχος, ασχολείται κυρίως με την ροή ισχύος μεταξύ δικτύου-μικροδικτύου. Επίσης έχει να κάνει με την διαχείριση συνολικά του μικροδικτύου και της βελτιστοποίησης του. [11][13]



Εικόνα 2.1 : Δομή Ιεραρχικού Ελέγχου [11]

2.4 Πρωτογενής έλεγχος

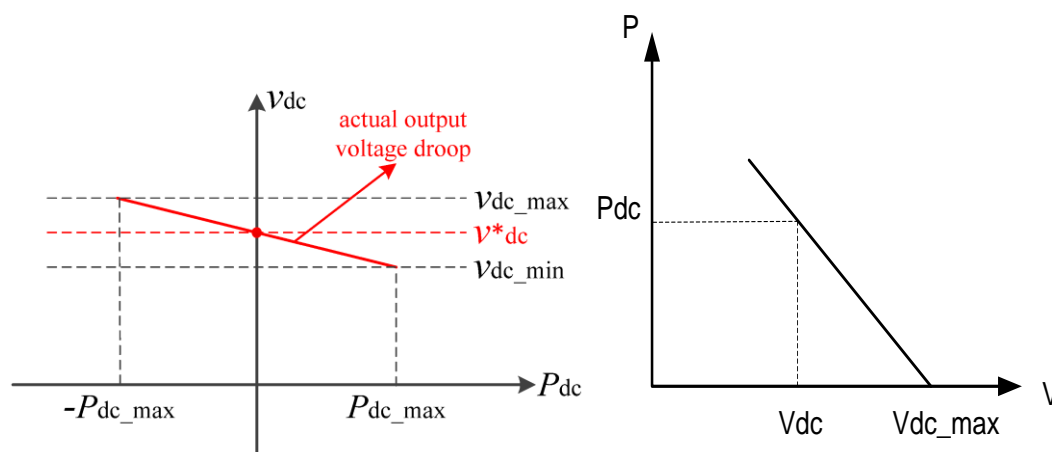
Ο πρωτογενής έλεγχος αλλιώς και τοπικός ή εσωτερικός έλεγχος, αποτελεί το πρώτο επίπεδο ελέγχου και διαθέτει την ταχύτερη απόκριση. Ο έλεγχος αυτός βασίζεται σε τοπικές μεταβλητές και δεν χρειάζεται επικοινωνία. Δεδομένου της εξάρτησής του από τοπικές μετρήσεις και την ανάγκη του για γρήγορη απόκριση, τεχνικές όπως αντι-νησιδοποίηση μετατροπέα, έλεγχος εξόδου και διαμοιρασμός ισχύος περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία.

Για την σύνδεση των DC πηγών χρησιμοποιούνται μετατροπείς πηγών-τάσης (Voltage-Source Inverters ή VSIs). Οι μετατροπείς αυτοί αποτελούνται από δύο στάδια: τον ελεγκτή διαμοιρασμού ισχύος της διεσπαρμένης πηγής και τον ελεγκτή εξόδου του μετατροπέα. Οι ελεγκτές διαμοιρασμού ισχύος είναι υπεύθυνοι για τον διαμοιρασμό των αναντιστοιχιών της ενεργού ισχύος στο μικροδίκτυο, ενώ οι ελεγκτές εξόδου είναι υπεύθυνοι για την ρύθμιση των τάσεων και των ρευμάτων εξόδου. Ο έλεγχος εξόδου του μετατροπέα αποτελείται από έναν εξωτερικό βρόγχο για τον έλεγχο της τάσης και έναν εσωτερικό βρόγχο αντίστοιχα για την ρύθμιση του ρεύματος. [9]

Συμπερασματικά, στον πρωτογενή έλεγχο πετυχαίνεται ο έλεγχος της τάσης και του ρεύματος των διεπαφών που βρίσκονται συνδεδεμένοι στις μονάδες παραγωγής ενέργειας DG, ενώ είναι υπεύθυνος και για τον διαμοιρασμό της ισχύος μεταξύ των μονάδων παραγωγής .

2.4.1 Παθητικός διαμοιρασμός φορτίου (καμπύλη droop)

Η καμπύλη droop είναι μία από τις πιο συνηθισμένες στρατηγικές ελέγχου όπου δεν χρειάζεται επικοινωνία μεταξύ των συσκευών. Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη για τα πλεονεκτήματα που προσφέρει σχετικά με άλλους ελέγχους όπως: δυνατότητα plug-and-play, διαμοιρασμό φορτίου, λιγότερα σφάλματα λόγω της απουσίας επικοινωνίας, απλή δομή κ.α. Ο σκοπός της καμπύλης droop στο DC μικροδίκτυο είναι η ρύθμιση της τάσης με βάση την ζήτηση της ενεργού ισχύος, για τον διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των συσκευών. Την στρατηγική αυτή την διαθέτουν συνήθως και τα αποθηκευτικά συστήματα του μικροδικτύου για τον βέλτιστο διαμοιρασμό του. [15]



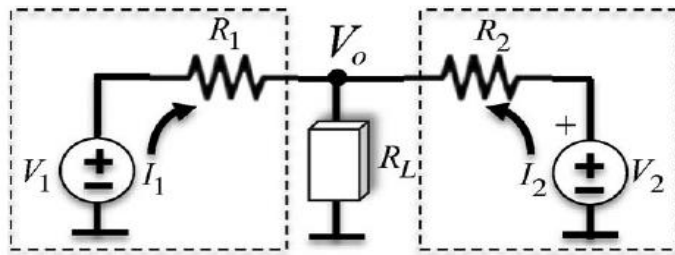
Εικόνα 2.2 : Χαρακτηριστικές καμπύλες droop: α) μπαταρίας, β) μονάδων παραγωγής

Στην εικόνα φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα δύο πηγών ενέργειας, παράλληλα συνδεδεμένων, όπου μοιράζονται ένα κοινό φορτίο R_L μέσω των αντιστάσεων εξόδου τους. Εάν υπάρχει κάποια διαφορά στην τάση, θα κυκλοφορήσει ρεύμα μεταξύ των δύο DC πηγών. Για να αποφύγουμε το ανεπιθύμητο ρεύμα προγραμματίζουμε τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου τους μέσω του πρωτογενή ελέγχου, δίνοντας έτσι στους εσωτερικούς βρόγχους ελέγχου τα νέα σημεία αναφοράς. Η τάση σε κάθε πηγή δίνεται αντίστοιχα από την εξίσωση :

$$v_o^* = v_{ref} - R_D \cdot i_o$$

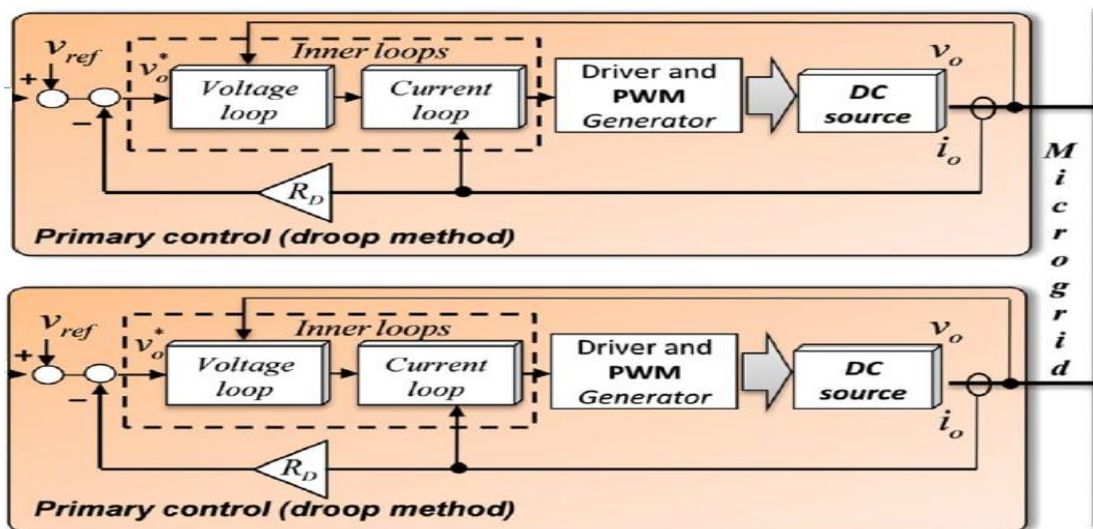
Το ρεύμα i_o αποτελεί το ρεύμα εξόδου, R_D είναι η εικονική αντίσταση και v_{ref} η τάση αναφοράς σε κενό φορτίο. Η εικονική αντίσταση αποτελεί τον συντελεστή της

καμπύλης droop όπου μεγαλύτερος συντελεστής σημαίνει καλύτερος διαμοιρασμός φορτίου αλλά μεγαλύτερη απόκλιση στην τάση.



Εικόνα 2.3 : Ισοδύναμο κύκλωμα δύο παράλληλα συνδεδεμένων μετατροπέων DC πηγών.

Αυτός ο έλεγχος όχι μόνο εξασφαλίζει την παράλληλη λειτουργία των μετατροπέων αλλά επίσης βελτιώνει και την δυναμική επίδοση της τάσης εξόδου. [11]



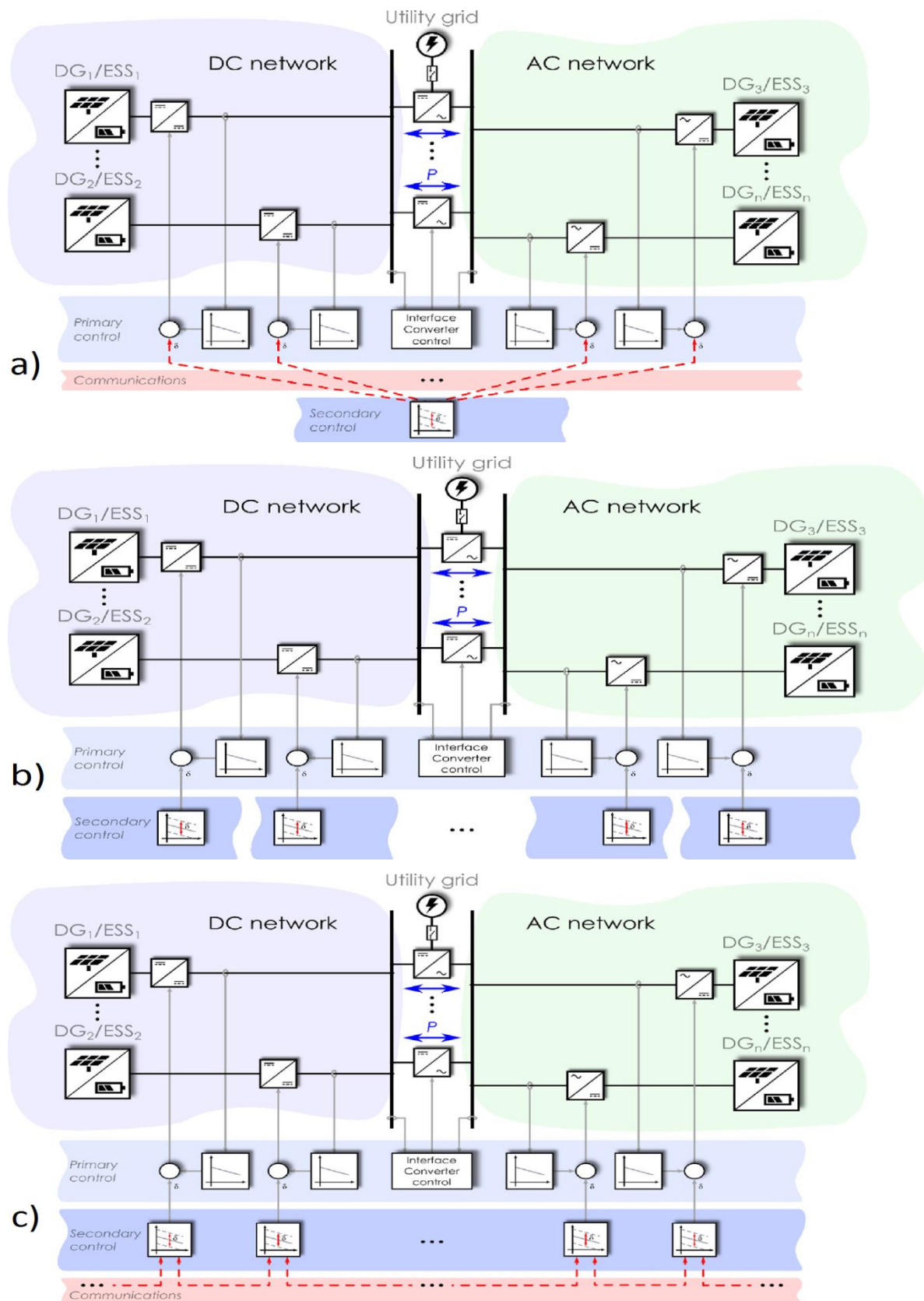
Εικόνα 2.4 : Πρωτογενής έλεγχος DC μικροδικτύου.

2.5 Δευτερογενής έλεγχος

Ο δευτερογενής έλεγχος αναφέρεται συχνά και ως σύστημα διαχείρισης ενέργειας (EMS) και είναι υπεύθυνος για την διόρθωση της τάσης από αποκλίσεις που προκύπτουν στον πρωτογενή, την αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου τόσο σε αυτόνομη λειτουργία όσο και σε σύνδεση με το δίκτυο. Το αντικείμενο του δευτερογενή είναι να βρίσκει την βέλτιστη σύμπραξη μεταξύ των μονάδων και να αποδεσμεύει τις διαθέσιμες πηγές ή φορτία, ανάλογα με τις ανάγκες του μικροδικτύου και τους στόχους που πρέπει να υλοποιηθούν.

Ο δευτερογενής έλεγχος είναι το υψηλότερο ιεραρχικό επίπεδο στην αυτόνομη λειτουργία και λειτουργεί σε χαμηλότερη ταχύτητα από αυτήν του πρωτογενή ελέγχου ώστε το σύστημα να μπορεί: α) να κάνει αποσύζευξη μεταξύ του πρωτογενή και του δευτερογενή ελέγχου, β) να μειώσει το εύρος επικοινωνίας χρησιμοποιώντας δειγματοληπτικές μετρήσεις των μεταβλητών του μικροδικτύου και γ) να αφήσει αρκετό χρόνο ώστε να υλοποιηθούν οι πολύπλοκοι υπολογισμοί. Επιπλέον είναι υπεύθυνος για την ομαλή μετάβαση του μικροδικτύου σε σύνδεση με το δίκτυο, καθώς και την ομαλή νησιδοποίηση του μικροδικτύου σε περίπτωση σφάλματος. [9]

Για τον κεντρικό διαχειριστή ενέργειας δύο κατηγορίες έχουν επικρατήσει: ο κεντρικός και ο μη κεντρικός έλεγχος. Ο μη κεντρικός έλεγχος διακρίνεται σε δύο κατηγορίες τον αποκεντρωμένο και τον διεσπαρμένο έλεγχο. Η διαφορά τους βρίσκεται στην επικοινωνία, όπου στον διεσπαρμένο έλεγχο χρησιμοποιείται χαμηλού εύρους σύστημα επικοινωνίας έναντι του αποκεντρωμένου που είναι πλήρως αυτόνομος. Οι τοπολογίες των ελέγχων φαίνονται στην εικόνα (2.5). [14][15][17]



Εικόνα 2.5 : Τοπολογίες δευτερογενή ελέγχου: α)κεντρικός, β)αποκεντρωμένος, γ)διεσπαρμένος [15]

2.5.1 Κεντρικός δευτερογενής έλεγχος

Σε αυτόν τον έλεγχο η διαχείριση του μικροδικτύου πραγματοποιείται σε έναν κεντρικό ελεγκτή γνωστός και ως MGCC. Στηρίζεται σε επικοινωνιακό σύστημα χαμηλού εύρους ζώνης για τον έλεγχο των επιμέρους μονάδων του μικροδικτύου. Ο ελεγκτής αυτός συλλέγει όλα τα δεδομένα των τάσεων και των ισχύων του μικροδικτύου, από τις μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και τα φορτία. Επιβλέπει την ποιότητα της ισχύος και λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την λειτουργία του μικροδικτύου. Πιο αναλυτικά ο κεντρικός ελεγκτής (MGCC):

- Διορθώνει αποκλίσεις στην τάση, οι οποίες προέρχονται είτε από τις αποκλίσεις στην έξοδο του πρωτογενούς ελέγχου, είτε από πιθανόν εσφαλμένο καταμερισμό ισχύος στους μετατροπείς των μονάδων. Η τάση του ζυγού του μικροδικτύου συγκρίνεται με την τάση αναφοράς και το σφάλμα δV , μέσω ενός αντισταθμιστή, στέλνεται σε όλους τους μετατροπείς των μονάδων μέσω του συστήματος επικοινωνίας, μετατοπίζοντας τις καμπύλες droop πάνω ή κάτω σύμφωνα με την σχέση:

$$V_i = V^{\text{ref}} - r_{i1} + \delta V_i,$$

όπου V^{ref} η επιθυμητή τάση λειτουργίας, r_{i1} η ισχύς εξόδου του κάθε μετατροπέα και V_i η τελική τάση του κάθε μετατροπέα μετά από την διόρθωση του δευτερογενή ελέγχου. [13]

- Επιβλέπει το μικροδίκτυο και επεμβαίνει στις λειτουργίες του σε πραγματικό χρόνο. Οι πληροφορίες από κάθε μονάδα του μικροδικτύου όπως τάσεις και ρεύματα, πληροφορίες όπως κόστη λειτουργίας, τεχνικά χαρακτηριστικά και περιορισμοί συλλέγονται στον κεντρικό ελεγκτή. Με βάση αυτές ο ελεγκτής προγραμματίζει τις λειτουργίες των επιμέρους μονάδων.
- Επιβλέπει την κατάσταση φόρτισης των αποθηκευτικών μέσων(SOC). Στην περίπτωση όπου τα αποθηκευτικά μέσα αδειάζουν, έχουν σημαντική επίπτωση στην λειτουργία του μικροδικτύου. Συγκεκριμένα αποτελούν τον σταθμιστικό παράγοντα μεταξύ παραγωγής-ζήτησης, όπου σε περίπτωση όπου υπάρχει έλλειμα ή περίσσεια το αποθηκευτικά συστήματα (ESS) το αντιμετωπίζουν. Επιπλέον λόγω των ESS οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να δουλεύουν στην μέγιστη απόδοση ενώ ταυτόχρονα λόγω της χωρητικότητάς

τους μπορούν να αποτρέψουν την λειτουργία άλλων κοστοβόρων μονάδων παραγωγής, σε περιόδους υψηλής ζήτησης. [9]

- Είναι υπεύθυνος για την ομαλή σύνδεση με το δίκτυο. Για την ομαλή σύνδεση θα πρέπει να γίνει ο συγχρονισμός του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο στο κοινό σημείο σύζευξης (PCC). Στα dc μικροδίκτυα ωστόσο, δεν υπάρχει συχνότητα συνεπώς η μοναδική μεταβλητή συγχρονισμού είναι η τάση στο PCC. [4][15]
- Διαθέτει τεχνικές νησιδοποίησης του μικροδικτύου. Σε περίπτωση σφάλματος του κεντρικού δικτύου, για την αποφυγή βλαβών στον εξοπλισμό του δικτύου και του μικροδικτύου, την ασφάλεια του προσωπικού και την αδιάλειπτη εξυπηρέτηση των κρίσιμων φορτίων, το μικροδίκτυο θα πρέπει να εντοπίζει το σφάλμα και να απομονώνεται από το δίκτυο. Ταυτόχρονα θα πρέπει να διατηρεί την αυτόνομη λειτουργία του για την εξυπηρέτηση των φορτίων. [4]
- Αποκόπτει φορτία στην αυτόνομη λειτουργία και στην σύνδεση με το δίκτυο. Στην αυτόνομη λειτουργία, στην περίπτωση όπου η παραγωγή του μικροδικτύου δεν είναι αρκετή ή η τοποθέτηση μονάδων παραγωγής σε λειτουργία είναι ακριβή, γίνεται αποκοπή των φορτίων με μικρότερη προτεραιότητα. Στην σύνδεση με το δίκτυο επιλέγεται η αποκοπή φορτίων μικρότερης προτεραιότητας, συνήθως τις ώρες αιχμής για να μειωθεί το φορτίο της ζήτησης.[9][19]
- Λαμβάνει αποφάσεις με βάση τα προγνωστικά καιρού και φορτίου, ώστε να αποδεσμεύσει ΑΠΕ στην περίπτωση όπου τα καιρικά φαινόμενα δεν ευνοούν ή να αυξήσει τις μονάδες παραγωγής για την κάλυψη της αναμενόμενης ζήτησης.
- Δέχεται αιτήματα από τον τριτογενή έλεγχο. Ο τριτογενής έλεγχος ενεργοποιείται στην σύνδεση του μικροδικτύου με το δίκτυο και στέλνει νέα σημεία λειτουργίας στις μονάδες παραγωγής του μικροδικτύου, μέσω του MGCC. [15]

Ο κεντρικός έλεγχος διαθέτει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία καθορίζουν το εύρος εφαρμογής αυτού του ελέγχου. Διαθέτει πολύ καλή επίβλεψη συνολικά του μικροδικτύου, ενώ μπορούν οι πληροφορίες του να διατηρηθούν

απόρρητες εφόσον συλλέγονται σε έναν κεντρικό ελεγκτή. Επίσης διατηρεί το χαρακτηριστικό 'plug-and-play' των μονάδων παραγωγής.

Από την άλλη για τον πλήρη συντονισμό του μικροδικτύου θα πρέπει ο MGCC να έχει ισχυρή υπολογιστική ικανότητα για να επεξεργάζεται την πληθώρα των δεδομένων. Σε μεγάλης κλίμακας μικροδίκτυα είναι δύσκολος ο κεντρικός έλεγχος ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου οι μονάδες παραγωγής είναι απομακρυσμένες, ενώ θα πρέπει να διαθέτει υψηλού εύρους επικοινωνιακό σύστημα για την αποδοτική του λειτουργία. Αν προκύψει σφάλμα στο επικοινωνιακό σύστημα, καταρρέει το συνολικό σύστημα του μικροδικτύου. Τέλος η ευελιξία και η επεκτασιμότητα του μικροδικτύου με κεντρικό έλεγχο είναι περιορισμένη.

Με βάση τα παραπάνω ο κεντρικός έλεγχος είναι κατάλληλος για μικροδίκτυα με χαρακτηριστικά:

1. Μικρής κλίμακας μικροδίκτυα όπου η συγκέντρωση των πληροφοριών και η λήψη αποφάσεων μπορεί να επιτευχθεί μέσω χαμηλού εύρους επικοινωνίας και μικρό κόστος υπολογιστικής ικανότητας.
2. Όλοι οι κάτοχοι των μονάδων παραγωγής να έχουν κοινούς στόχους ώστε το μικροδίκτυο να λειτουργεί σαν μονάδα για τον μέγιστο συντονισμό.
3. Προστασία των πληροφοριών όπως σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις.
4. Η ρύθμιση του συστήματος είναι προκαθορισμένη και δεν χρειάζεται επεκτασιμότητα. [4][9][13][15][18][19]

2.5.2 Μη κεντρικός δευτερογενής έλεγχος

Στον έλεγχο όπου δεν βασίζεται σε έναν κεντρικό ελεγκτή για τον συντονισμό του μικροδικτύου διακρίνονται δύο κατηγορίες [14][15][17]:

- I. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος όπου δεν υπάρχει κανένα σύστημα επικοινωνίας.
- II. Ο διεσπαρμένος έλεγχος όπου διαθέτει σύστημα επικοινωνίας.

2.5.2.1 Αποκεντρωμένος έλεγχος

Οι στρατηγικές που χρησιμοποιούνται στον αποκεντρωμένο έλεγχο πραγματοποιούνται μέσω των τοπικών ελεγκτών αποκλειστικά (LCs). Οι πιο δημοφιλείς στρατηγικές για τον συντονισμό πολλαπλών μετατροπέων είναι η τεχνική DBS, η τεχνική της προσαρμοσμένης ρύθμισης του συντελεστή droop και η τεχνική PLS. Καθώς τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι η απλότητα του ελέγχου και η ανεξαρτησία τους από σύστημα επικοινωνίας, έχουν περιορισμούς στην απόδοση τους λόγω απουσίας πληροφοριών από τις γειτονικές μονάδες. Βασίζονται στην ερμηνεία της τάσης του ζυγού DC συνεπώς οι αισθητήρες τάσης έχουν μεγάλη επίδραση στην αποδοτικότητα και την αξιοπιστία των τεχνικών. [17]

Στην τεχνική DBS η τάση του DC ζυγού χρησιμοποιείται σαν μέσο πληροφορίας για να διακρίνονται τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας των μονάδων παραγωγής. Η τάση χωρίζεται σε επίπεδα και σε κάθε επίπεδο πραγματοποιούνται διαφορετικές λειτουργίες για κάθε μονάδα παραγωγής, ανάλογα με τον σχεδιασμό που έχει υλοποιηθεί. Τα επίπεδα τάσεως θα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους τόσο, ώστε να μην οδηγήσουν το σύστημα σε αστάθεια. Ωστόσο ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως ο αριθμός των πηγών και των αποθηκευτικών συστημάτων περιορίζεται στον αριθμό των επιπέδων. Επίσης στην περίπτωση όπου τα καλώδια των συνδέσεων είναι αρκετά μεγάλα, η πτώση τάσης γίνεται εμφανής και μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στους μετατροπείς, λόγω των διαφορετικών επιπέδων τάσης που δημιουργούνται κατά μήκος. Η τεχνική του DBS συνίσταται για μικρά κυρίως μικροδίκτυα με μικρές ηλεκτρικές γραμμές. [14]

Η τεχνική της προσαρμοσμένης ρύθμισης των συντελεστών droop αποτελεί μία επέκταση της συμβατικής μεθόδου droop χωρίς να περιλαμβάνει αλλαγή των λειτουργιών. Χρησιμοποιείται συχνά για την εξισορρόπηση των SOC σε πολλαπλά αποθηκευτικά συστήματα προκειμένου να αποφευχθεί η υπερφόρτιση και η υπερβολική αποφόρτιση τους, μέσω της ρύθμισης των συντελεστών droop. Η ισχύς αναφοράς του κάθε αποθηκευτικού συστήματος αποφασίζεται μέσω της διαφοράς μεταξύ της τοπικής τάσης και της τάσης στο PCC, που καλείται γενική τάση. Η τοπική και η γενική τάση εισέρχονται σε φίλτρα νεκρής ζώνης και τα σήματα εξόδου πολλαπλασιάζονται με διαφορετικούς συντελεστές droop. Οι συντελεστές

επιλέγονται αναλογικά με το SOC του κάθε αποθηκευτικού συστήματος. Ο περιορισμός αυτής της μεθόδου είναι πως υπάρχει ένας συμβιβασμός μεταξύ απόκλισης της τάσης και ευστάθειας του συστήματος. [17]

Η τεχνική PLS (αλλιώς και PLC) βασίζεται σε ημιτονοειδή σήματα με συγκεκριμένη συχνότητα που στέλνονται στον DC ζυγό μέσω ενισχυτών. Μέσω των σημάτων, κάθε συνδεδεμένη συσκευή μπορεί να στείλει και να λάβει πληροφορίες για την κατάσταση και την απόδοση της, την ιστορική και εσωτερική λειτουργία της. Το PLS κατηγοριοποιείται στον αποκεντρωμένο έλεγχο καθώς η ψηφιακή επικοινωνία που διαθέτει είναι αποκλειστικά με τον ζυγό. Εφαρμόζεται συχνά για την αλλαγή λειτουργιών ή την απομόνωση εσφαλμένων μονάδων στο σύστημα. Η τεχνική αυτή είναι πιο δύσκολη στην εφαρμογή της συγκριτικά με τις άλλες δύο τεχνικές. Ωστόσο λόγω της έγχυσης των σημάτων, η κυματομορφή της τάσης προκύπτει καλύτερης ποιότητας. [17]

2.5.2.2 Διεσπαρμένος έλεγχος

Ο διεσπαρμένος δευτερογενής έλεγχος είναι ένας από τους πιο μελετημένους ελέγχους κυρίως λόγω της πολύ καλής απόδοσης του, σε συνδυασμό με το απλό σύστημα επικοινωνίας. Λαμβάνει όλες τις λειτουργίες του κεντρικού ελέγχου με λιγότερη επικοινωνία και μικρότερα κόστη υπολογισμού, ενώ είναι πιο ανθεκτικός σε σφάλματα. Επιπλέον προσφέρει επεκτασιμότητα και υψηλή αξιοπιστία λόγω της αυτονομίας που διαθέτει. Η ιδέα του διεσπαρμένου δευτερογενή ελέγχου είναι να ενώσει τον πρωτογενή και τον δευτερογενή έλεγχο σε έναν τοπικό ελεγκτή, ενώ ταυτόχρονα οι γειτονικοί μετατροπείς ισχύος να μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους. Συνεπώς η αρχή λειτουργίας του ελέγχου είναι να ανταλλάζει πληροφορίες μέσω επικοινωνίας των γειτονικών μονάδων παραγωγής, σε συνδυασμό με τα ισχύοντα πρωτόκολλα. [13][15]

Η πιο κοινή μέθοδος του διεσπαρμένου ελέγχου είναι τα συστήματα πολυ-πρακτόρων MAS (multi-agent systems). Αποτελεί ένα σύστημα από πολλαπλούς έξυπνους πράκτορες, οι οποίοι είναι είτε μονάδες λογισμικού ή τεχνικές μονάδες που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους μέσα σε ένα περιβάλλον. Διαθέτουν τοπικές γνώσεις

και συγκεκριμένες δυνατότητες, αλλά λόγω της επικοινωνίας που διαθέτουν μεταξύ τους μπορούν να επιτύχουν πέρα από τοπικούς και γενικούς στόχους. Οι πράκτορες μπορούν να λειτουργήσουν είτε με την βοήθεια συμβατικών στρατηγικών ελέγχου, είτε με προηγμένες μεθόδους όπως τεχνητή νοημοσύνη και εξειδικευμένα συστήματα. [9]

Άλλες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των γειτονικών μονάδων στον διεσπαρμένο έλεγχο είναι : η μέση κανονική, peer-to-peer, gossip-based (που αποτελεί τύπο της μεθόδου MAS) και consensus-based. [15]

Ο διεσπαρμένος έλεγχος προσφέρει συγκριτικά μεγαλύτερη αξιοπιστία από τον κεντρικό, καθώς σε περίπτωση σφάλματος το σύστημα εξακολουθεί να λειτουργεί. Οι αποφάσεις παίρνονται τοπικά βελτιώνοντας έτσι την χρονική απόκριση του συστήματος, ενώ ενισχύεται το χαρακτηριστικό 'plug-and-play' των συσκευών οδηγώντας σε καλύτερη ευελιξία του συστήματος. Το μειονέκτημα αυτού του ελέγχου είναι η έλλειψη του συντονισμού που προσφέρει ο κεντρικός έλεγχος.

Ο διεσπαρμένος έλεγχος είναι κατάλληλος για μικροδίκτυα όπου:

- Το μέγεθος του μικροδικτύου είναι μεγάλο, ή οι μονάδες παραγωγής, τα συστήματα αποθήκευσης και τα φορτία βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις.
- Οι μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης βρίσκονται υπό διαφορετικούς κάτοχους, οι οποίοι δεν διαθέτουν κοινούς στόχους οπότε και οι αποφάσεις λαμβάνονται τοπικά.
- Υπάρχει ανάγκη για γρήγορες αποκρίσεις του συστήματος, όπου οι μονάδες του μικροδικτύου συνδέονται και αποσυνδέονται με γρήγορο ρυθμό. [18]

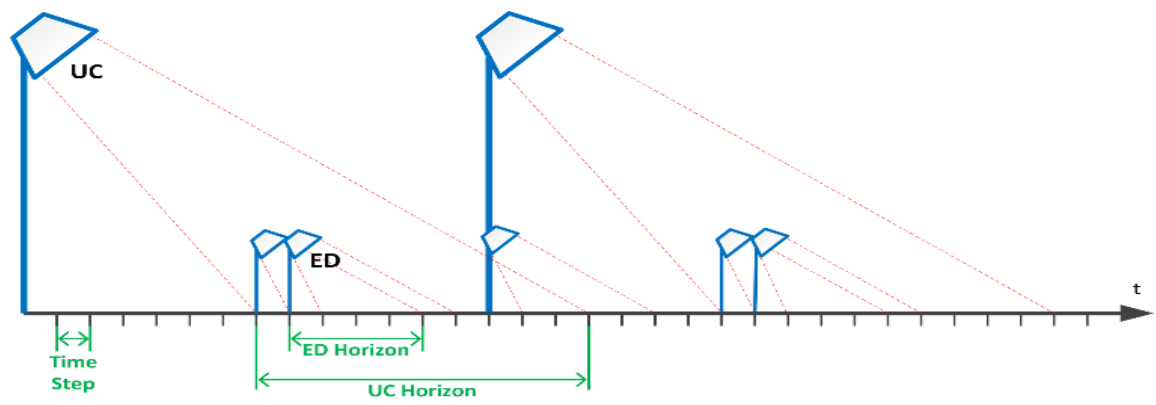
2.6 Τριτογενής έλεγχος

Ο τριτογενής έλεγχος είναι το υψηλότερο επίπεδο ελέγχου και στέλνει μακροπρόθεσμα τα βέλτιστα σημεία λειτουργίας με βάση τις ανάγκες του δικτύου διανομής, όπου το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο. Ο τριτογενής είναι υπεύθυνος για τον συντονισμό πολλαπλών μικροδικτύων που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους σε ένα

σύστημα. Για παράδειγμα ένα δίκτυο που αποτελείται από πολλά μικροδίκτυα μπορεί να συντονιστεί μέσω του τριτογενούς ελέγχου, όπου κάθε μικροδίκτυο στο PCC εισάγει ή εξάγει ισχύ προς και από το δίκτυο. Ο έλεγχος αυτός είναι πιο αργός από τον δευτερογενή, ενεργοποιείται όταν το μικροδίκτυο συνδεθεί στο δίκτυο διανομής και μπορεί να θεωρηθεί κομμάτι του δικτύου και όχι του μικροδικτύου[9]. Διαχειρίζεται το μικροδίκτυο στέλνοντας τα νέα σημεία λειτουργίας στον δευτερογενή, αλλά οι ανάγκες που εξυπηρετούνται είναι αυτές του δικτύου διανομής και όχι οι βέλτιστες απαραίτητα για το μικροδίκτυο.

Στον τριτογενή έλεγχο γίνεται η ανάλυση και ο έλεγχος της ροής ισχύος και είναι σημαντικός στις περιπτώσεις όπου η παραγωγή και η ζήτηση είναι διασκορπισμένες, αλλά και στον συντονισμό πολλαπλών μικροδικτύων που είναι συνδεδεμένοι σε ένα κοινό σύστημα διανομής. Χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως Newton-Raphson και προηγμένες εκδόσεις του. Η ανάλυση της ροής ισχύος μπορεί να δώσει πληροφορίες όπως την βέλτιστη δομή πολλαπλών μικροδικτύων για την καλύτερη προστασία τους και την ανθεκτικότητα σε σφάλματα. Τέλος βοηθάει στην εφαρμογή αλγόριθμων βελτιστοποίησης και την μείωση των απωλειών ισχύος του συστήματος.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του τριτογενή ελέγχου είναι η αποθήκευση της ενέργειας και ο προγραμματισμός χρησιμοποίησης των μονάδων παραγωγής. Ο προγραμματισμός αυτός βασίζεται σε μία διαδικασία λήψης αποφάσεων για μελλοντικές καταστάσεις όπως καιρικά φαινόμενα, διαθεσιμότητα ενέργειας και επίπεδα ζήτησης. Όπως πραγματοποιείται στα συμβατικά ηλεκτρικά δίκτυα και στα μικροδίκτυα μία διαχείριση πολλαπλών επιπέδων εφαρμόζεται συνήθως με την δέσμευση μονάδων(UC) και την οικονομική αποδέσμευση(EC). Η δέσμευση των μονάδων προσφέρει λύσεις βασισμένες στην 24ωρη παραγωγή και την πρόβλεψη της κατανάλωσης και στοχεύει στην εύρεση του βέλτιστου οικονομικά συνδυασμού των μονάδων παραγωγής για την απαιτούμενη ζήτηση. Η οικονομική αποδέσμευση αποτελεί μία ελαχιστοποίηση κόστους χρησιμοποίησης των μονάδων παραγωγής σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα, για να καλυφθεί η ζήτηση. [13]



Εικόνα 2.6 : Δέσμευση μονάδων(UC) και οικονομική αποδέσμευση(ED).

3 Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (dc-dc converters)

3.1 Εισαγωγή

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή ή ψαλιδιστές συνεχούς τάσης (DC Choppers) αλλιώς και μετατροπείς dc-dc, είναι τα κυκλώματα που μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης σε πηγή συνεχούς τάσης άλλης τιμής και ορισμένες φορές και άλλης πολικότητας. Οι μετατροπείς dc-dc εφαρμόζονται σε:

- Συστήματα ηλεκτρικής τροφοδοσίας τηλεπικοινωνιών και διαστημικών συστημάτων.
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Φωτοβολταϊκά συστήματα.
- Παλμοτροφοδοτικά ηλεκτρονικών ή ηλεκτρικών κυκλωμάτων, τα οποία είναι τροφοδοτικά υψηλής συχνότητας και υψηλής απόδοσης.
- Διόρθωση συντελεστή ισχύος ανορθωτικών διατάξεων με διόδους.
- Συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος, που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ηλεκτρικά τρένα και διάφορες άλλες βιομηχανικές εφαρμογές.

Οι μετατροπείς dc-dc υλοποιούνται χρησιμοποιώντας ημιαγωγούς, όπως το IGBT, το MOSFET ισχύος, το θυρίστορ ή κάποιο άλλο ελεγχόμενο ημιαγωγό ισχύος, σε συνδυασμό με διόδους και LC κυκλώματα. Οι παραπάνω ελεγχόμενοι από την πύλη τους ημιαγωγοί λειτουργούν ως διακόπτες. Μπορούν να βρεθούν μόνο σε δύο καταστάσεις λειτουργίας, στην κατάσταση αγωγής ή στην κατάσταση αποκοπής. Εάν σε ένα IGBT ή MOSFET δοθεί ένας παλμός οδήγησης στην πύλη τους, τότε αυτά μεταβαίνουν στην κατάσταση αγωγής και θα παραμείνουν εκεί καθ' όλη τη διάρκεια

του παλμού. Αντίστοιχα όταν ο παλμός οδήγησης γίνει μηδέν, τότε μεταβαίνουν στην κατάσταση αποκοπής. Για αυτό το λόγο στην συνέχεια θα καλούνται ημιαγωγικοί διακόπτες. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι μετατροπείς υποβιβασμού, ανύψωσης και υποβιβασμού ανύψωσης, ενώ για την ανάλυσή τους έχουν γίνει οι εξής παραδοχές:

1. Στην μελέτη των κυκλωμάτων λαμβάνεται υπ' όψη μόνο η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.
2. Τα ημιαγωγικά στοιχεία έχουν ιδανικές ιδιότητες.
3. Αγνοούνται οι αντιστάσεις, οι αυτεπαγωγές και οι χωρητικότητες των αγωγών. [26]

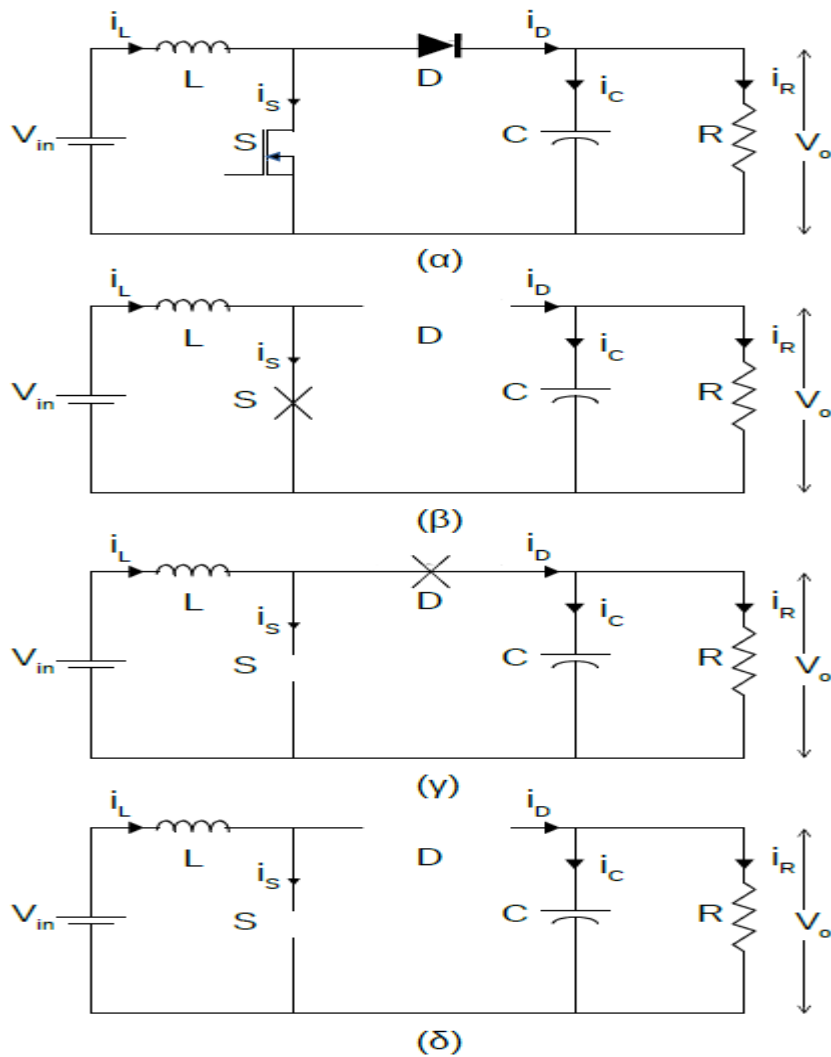
3.2 Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (dc-dc boost converter)

Στην εικόνα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος ενός μετατροπέα ανύψωσης. Μέσω του μετατροπέα αυτού η τάση εξόδου, η οποία είναι επίσης συνεχής, μπορεί να πάρει τιμές πάνω από την τάση τροφοδοσίας έως και τέσσερις φορές ανάλογα με την τιμή του πηνίου εισόδου και του βαθμού χρησιμοποίησης του διακόπτη. Η ελάχιστη τιμή της τάσης εξόδου είναι ίση με την τάση εισόδου. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει στις ακόλουθες τρεις φάσεις:

Φάση Ι(Φόρτιση πηνίου): Είναι η πρώτη φάση του μετατροπέα, όπου ο παλμός οδήγησης εφαρμόζεται στην πύλη του διακόπτη S, με αποτέλεσμα η τάση εισόδου να εφαρμόζεται στα άκρα του πηνίου εισόδου, ή όπως ονομάζεται πολλές φορές πηνίου ανύψωσης και να το φορτίζει. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη φάση αυτή φαίνεται στην εικόνα 3.1(β). Κατά τη φάση αυτή ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής εξόδου, ο οποίος είχε φορτιστεί από την προηγούμενη φάση λειτουργίας, τροφοδοτεί την αντίσταση του φορτίου. Η φάση αυτή παίρνει τέλος όταν αφαιρεθεί ο παλμός οδήγησης από τον διακόπτη S. Οι διάφορες κυματομορφές του μετατροπέα ανύψωσης, όταν το ρεύμα του πηνίου είναι συνεχές, παρουσιάζονται στην εικόνα 3.2(α). Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2(α), κατά την φάση αυτή το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται και η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση εισόδου.

Φάση II(Εκφόρτιση πηνίου): Κατά τη δεύτερη φάση, ο διακόπτης S δεν άγει, αλλά άγει η δίοδος D, με αποτέλεσμα να τροφοδοτεί την ενέργεια της πηγής εισόδου και την αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου στον πυκνωτή εξόδου και κατά συνέπεια στο φορτίο. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δεύτερη φάση παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1(γ), ενώ οι κυματομορφές για συνεχές ρεύμα πηνίου φαίνονται στην εικόνα 3.2(α). Στη φάση αυτή λειτουργίας του το ρεύμα του πηνίου, αφού έχει αναπτύξει τη μέγιστη τιμή του στην προηγούμενη φάση, αρχίζει να μειώνεται ενώ η τάση στα άκρα του πηνίου γίνεται $V_{in} - V_o$, όπου V_o είναι η τάση εξόδου η οποία θεωρείται να έχει σταθερή τιμή. Η φάση αυτή τελειώνει όταν το πηνίο αποφορτιστεί και το ρεύμα του πάει στο μηδέν με αποτέλεσμα και η δίοδος D να σταματήσει να άγει.

Φάση III(Ασυνεχή λειτουργία): Αυτή η φάση λειτουργίας δημιουργείται μόνο όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχές ρεύμα πηνίου. Αφού κατά τη φάση αυτή το ρεύμα πηνίου έχει μηδενικές τιμές τότε δεν άγει κανένα ημιαγωγό στοιχείο. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα κατά τη φάση αυτή φαίνεται στην εικόνα 3.1(δ). Το φορτίο κατά τη φάση αυτή τροφοδοτείται από τον ηλεκτρολυτικό πυκνωτή εξόδου. Ο μετατροπέας ανύψωσης ανάλογα με την τιμή του πηνίου, το χρόνο αγωγής του διακόπτη t_{on} , και τη διακοπτική συχνότητα f_s μπορεί να λειτουργήσει με συνεχές ή ασυνεχές ρεύμα πηνίου. Στην περίπτωση που το ρεύμα του πηνίου είναι ασυνεχές το κύκλωμα λειτουργεί και στις τρεις φάσεις που αναφέραμε. Αντίθετα, στην περίπτωση που είναι συνεχές λειτουργεί μόνο στις δύο πρώτες φάσεις.



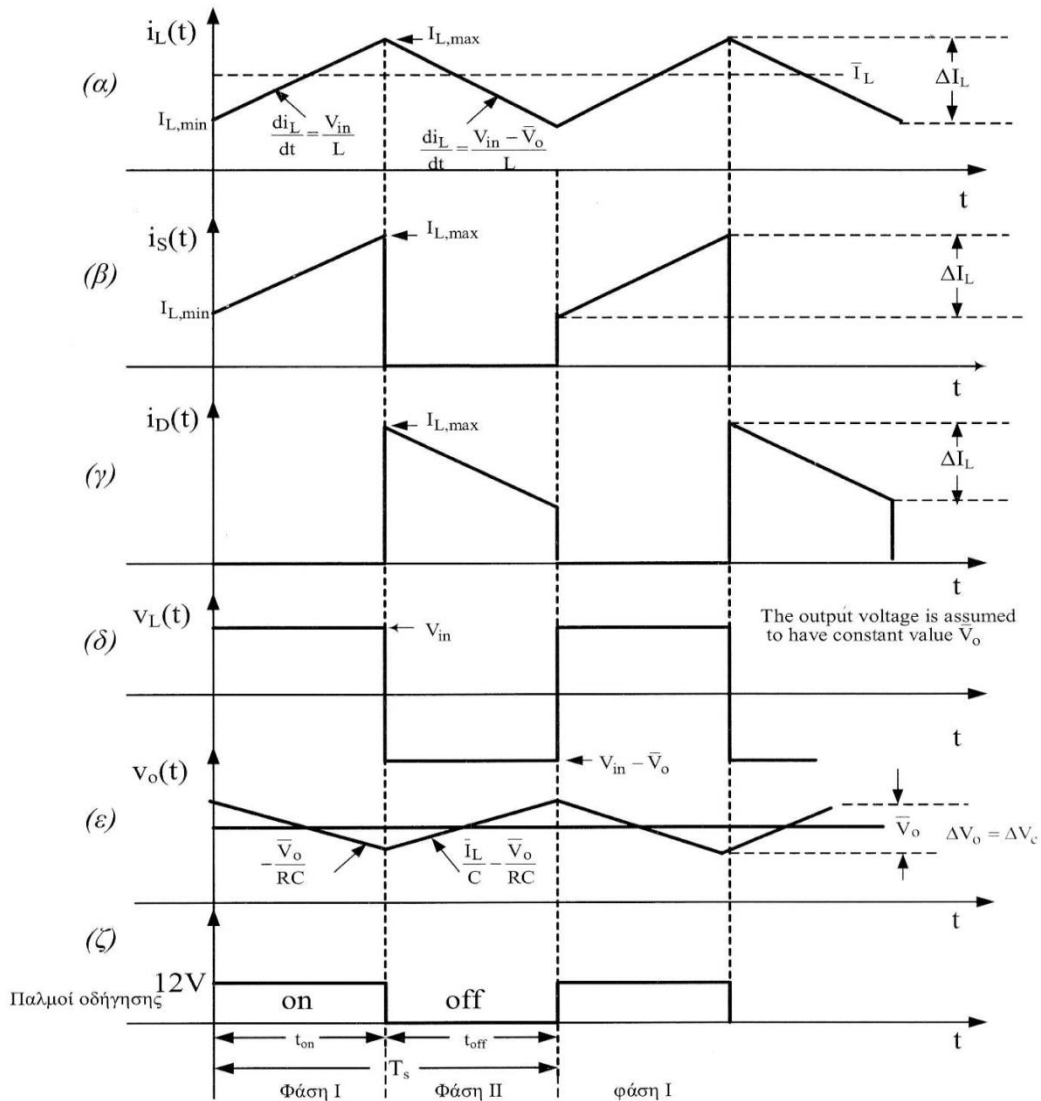
Εικόνα 3.1 : Μετατροπέας ανύψωσης και λειτουργικές φάσεις: (α) κύκλωμα ισχύος, (β) ισοδύναμο κύκλωμα όταν ο διακόπτης άγει, (γ) ισοδύναμο κύκλωμα όταν άγει η διόδος, (δ) ισοδύναμο κύκλωμα όταν δεν άγει κανένας ημιαγωγός.

Από τα ισοδύναμα κυκλώματα παραπάνω προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$V_L(t) = \frac{L di_L(t)}{dt}, \text{ όπου}$$

- $V_L(t) = V_{in}$ όταν ο διακόπτης άγει
- $V_L(t) = V_{in} - V_o$ όταν ο διακόπτης δεν άγει
- $V_c(t) = \frac{1}{C} \int_{t_1}^t i_c(t) dt + V_c(t_1)$, η τάση του πυκνωτή
- $i_c(t) = i_D(t) - i_o(t)$, το ρεύμα του πυκνωτή
- $i_D(t) = C \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{R}$, το ρεύμα διόδου
- $i_L(t) = \frac{i}{L} \int_{t_1}^t V_{in} dt + i_L(t_1)$, όταν ο διακόπτης άγει

- $i_L(t) = \frac{i}{L} \int_{t_1}^t (V_{in} - V_o(t)) dt + i_L(t_1)$, όταν ο διακόπτης δεν άγει [26]



Εικόνα 3.2 : Κυματομορφές μετατροπέα ανύψωσης όταν το ρεύμα πηνίου είναι συνεχές. (α) ρεύμα πηνίου ανύψωσης, (β) ρεύμα ημιαγωγικού διακόπτη, (γ) ρεύμα διόδου, (δ) τάση πηνίου ανύψωσης, (ε) τάση πυκνωτή, (ζ) παλμοί οδήγησης

3.3 Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (dc-dc buck converter)

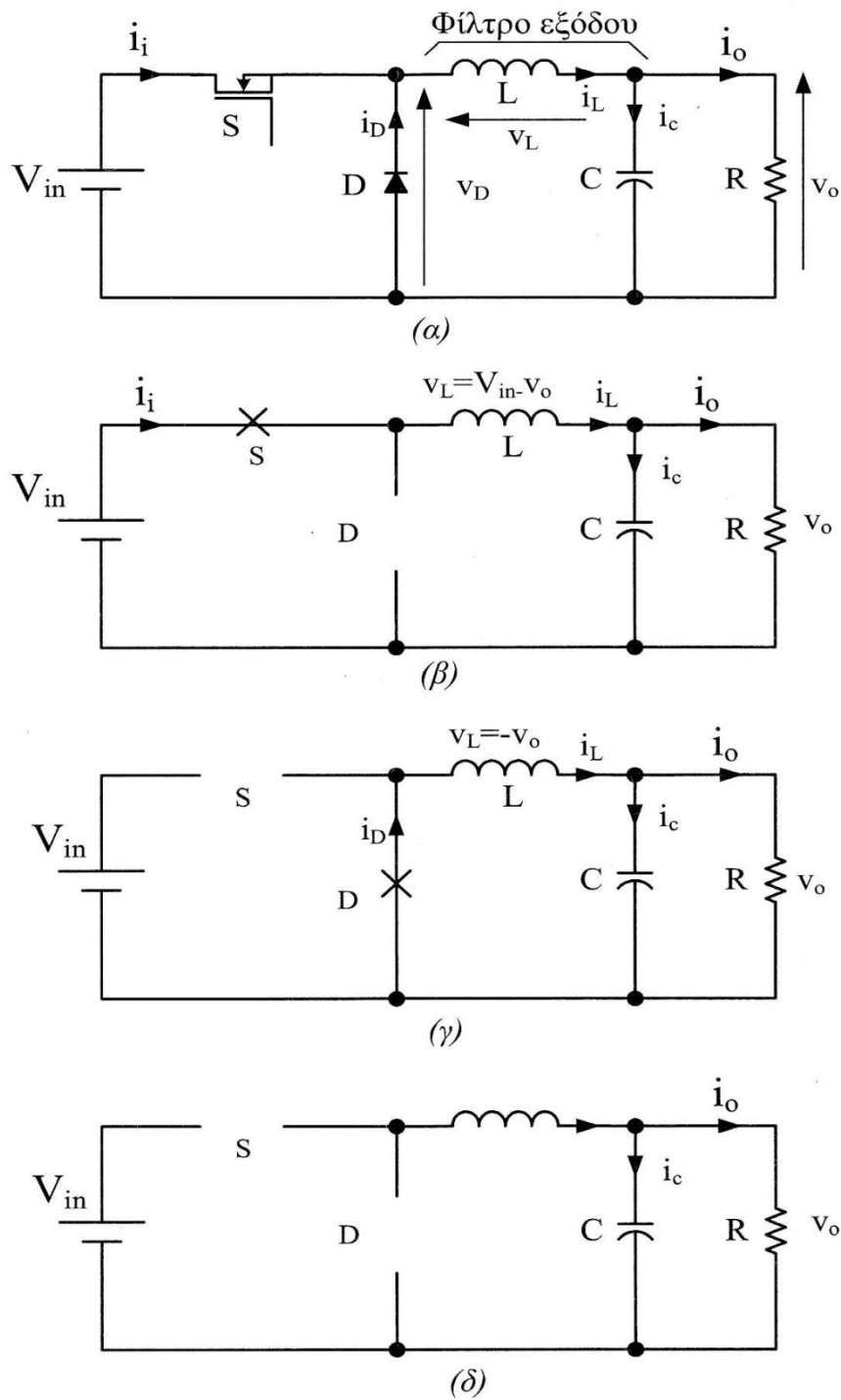
Ο μετατροπέας υποβιβασμού, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3(α), έχει την δυνατότητα παραγωγής τιμών DC τάσης εξόδου από μηδέν έως την τιμή της τάσης εισόδου.

Όπως και στον μετατροπέα ανύψωσης, ο μετατροπέας υποβιβασμού λειτουργεί σε δύο ή τρεις φάσεις λειτουργίας ανάλογα εάν το ρεύμα του πηνίου εξόδου είναι συνεχές ή όχι. Παρακάτω δίνονται οι κυματομορφές του μετατροπέα για συνεχές ρεύμα πηνίου. Οι φάσεις χωρίζονται ως εξής :

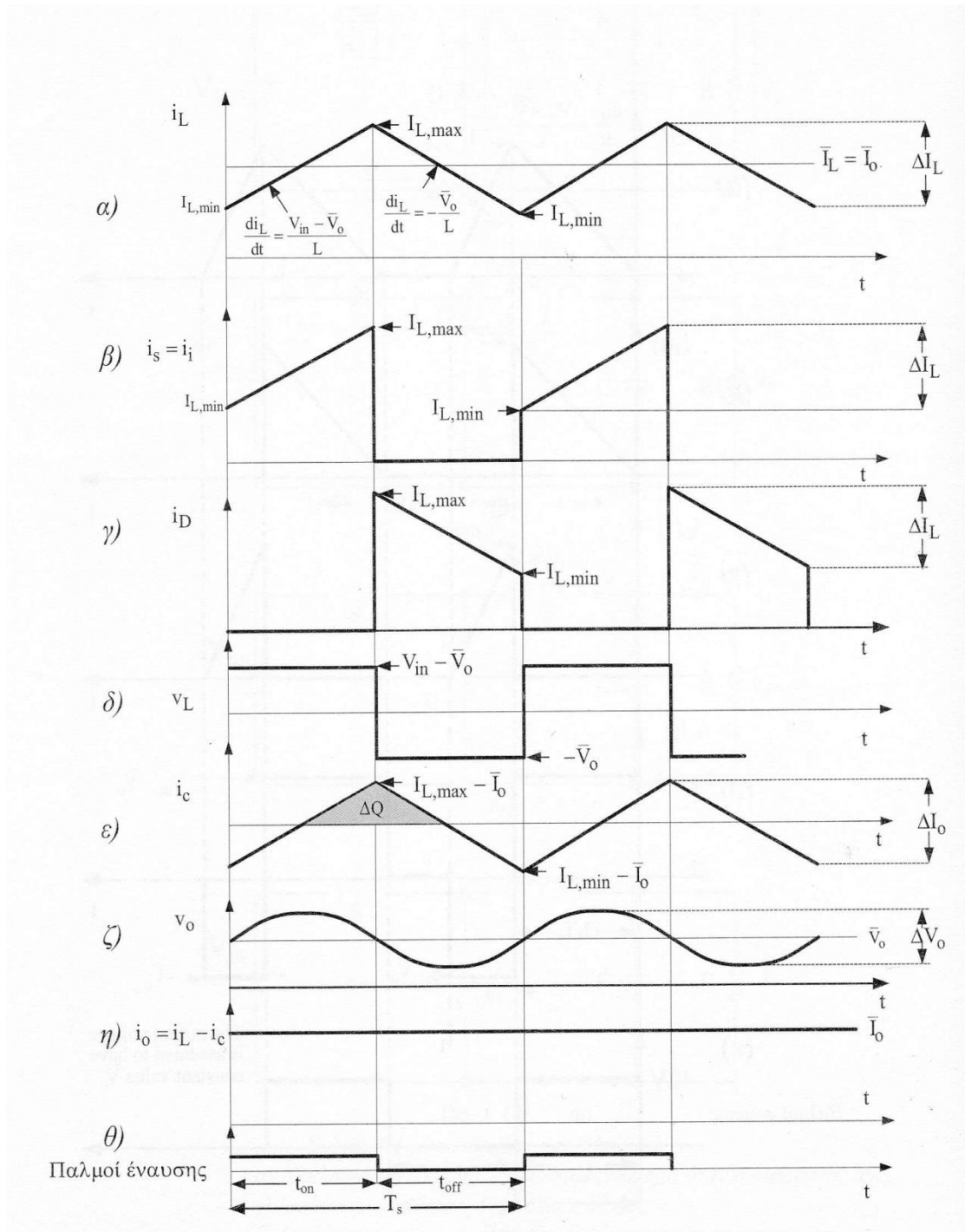
Φάση I (Φόρτιση πηνίου και πυκνωτή): Η φάση αρχίζει όταν ο διακόπτης S ξεκινά με αποτέλεσμα να συνδέει την τάση εισόδου στα άκρα της διόδου D και του φίλτρου εξόδου με αποτέλεσμα η διάδος να πολώνεται αρνητικά και να μην άγει. Κατά την διάρκεια αυτής της φάσης ο πυκνωτής και το πηνίο εξόδου φορτίζονται και ταυτόχρονα ο πυκνωτής παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στο φορτίο. Το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3(β). Η φάση τελειώνει όταν ο διακόπτης S σταματήσει να άγει.

Φάση II (Εκφόρτιση πηνίου): Η φάση αυτή αρχίζει όταν ο διακόπτης S σταματά να άγει και ξεκινά η αγωγή της διόδου D. Κατά την φάση αυτή το πηνίο εκφορτίζεται μέσω της διόδου D και γι' αυτό το λόγο ονομάζεται και διάδος ελεύθερης διέλευσης. Κατά την φάση αυτή πάλι ο πυκνωτής παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στο φορτίο. Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της φάσης παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3(γ). Η φάση τελειώνει όταν ο διακόπτης S ξεκινήσει πάλι να άγει.

Φάση III (Ασυνεχή λειτουργία): Κατά την φάση αυτή κανένας ημιαγωγός δεν άγει οπότε και δεν υπάρχει μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από την είσοδο προς το φορτίο. Αυτή η φάση λειτουργίας υπάρχει μόνο όταν το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα είναι ασυνεχές. Κατά την φάση αυτή ο πυκνωτής εξόδου, ο οποίος είναι φορτισμένος από τις προηγούμενες φάσεις, τροφοδοτεί το φορτίο. Στην εικόνα 3.3(δ) παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα αυτής της φάσης.



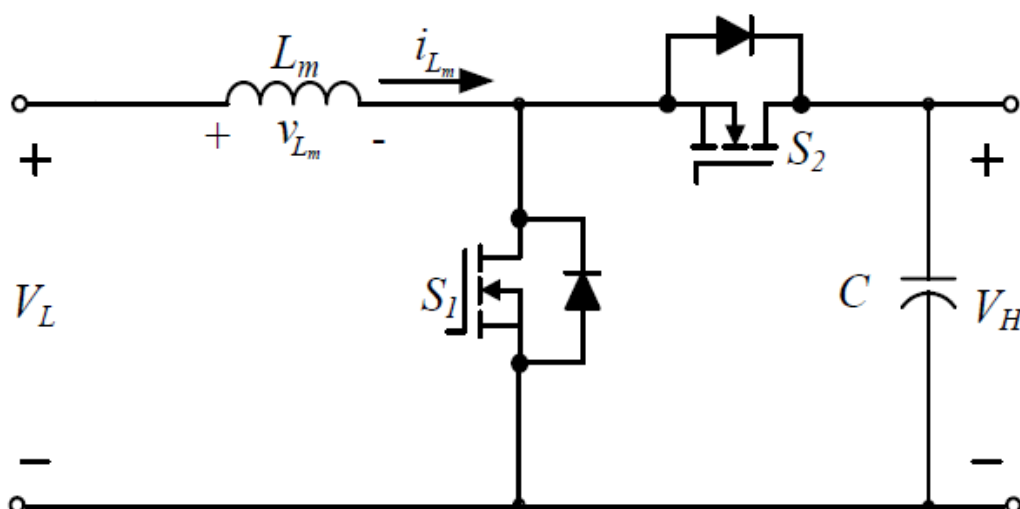
Εικόνα 3.3 : Μετατροπέας υποβιβασμού: (α) κύκλωμα ισχύος, (β) ισοδύναμο κύκλωμα όταν ο διακόπτης άγει, (γ) ισοδύναμο κύκλωμα όταν άγει η διόδος, (δ) ισοδύναμο κύκλωμα όταν δεν άγει κανένας ημιαγωγός.



Εικόνα 3.4 : Κυματομορφές μετατροπέα υποβιβασμού όταν το ρεύμα πηνίου είναι συνεχές. α) ρεύμα πηνίου, β) ρεύμα διακόπτη, γ) ρεύμα διόδου, δ) τάση διόδου, ε) τάση φορτίου, ζ) παλμοί οδήγησης διακόπτη.

3.4 Αμφίδρομος μετατροπέας συνεχούς τάσης ανύψωσης-υποβιβασμού

Ο μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού, είναι ο μετατροπέας όπου σε μία ενιαία διάταξη μπορεί τόσο να ανυψώνει όσο και να υποβιβάζει την τάση. Ο αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού είναι η διάταξη όπου η ροή ισχύος μπορεί να κατευθύνεται αμφίδρομα. Αυτό πετυχαίνεται μέσω της χρησιμοποίησης ημιαγωγικών διακοπών ισχύος όπως IGBTs και MOSFETs. Η διάταξη του αμφίδρομου μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού συνεχούς τάσης σε συνεχή φαίνεται στην εικόνα 3.5. Αποτελείται από ένα πηνίο L_m , τους ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες S_1, S_2 και ένα πυκνωτή C .



Εικόνα 3.5 : Αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού συνεχούς τάσης[3]

Το κύριο χαρακτηριστικό αυτού του μετατροπέα είναι πως με την κατάλληλη παλμοδότηση στα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία, μπορεί να λειτουργήσει σαν μετατροπέας ανύψωσης, μετατροπέας υποβιβασμού και μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού χωρίς καμία τροποποίηση της τοπολογίας του.

Για την έγχυση ισχύος από την μπαταρία προς το μικροδίκτυο, θα πρέπει η τάση εισόδου V_L να ανυψωθεί στην τάση V_H . Αυτό πραγματοποιείται όταν παλμοδοτείται ο διακόπτης S_1 και ο διακόπτης S_2 λειτουργεί σαν δίοδος, οπότε και υλοποιείται ο μετατροπέας ανύψωσης. Στην αντίθετη περίπτωση όπου η μπαταρία πρέπει να

φορτιστεί από το μικροδίκτυο, η τάση V_H θα πρέπει να υποβιβαστεί στην V_L . Δίνοντας αντίστοιχα παλμό στον διακόπτη S_2 και λειτουργώντας τον διακόπτη S_1 ως δίοδο, ο μετατροπέας λειτουργεί ως μετατροπέας υποβιβασμού. [3]

3.5 Ηλεκτρικός συσσωρευτής - Μπαταρία

Η ηλεκτρική μπαταρία είναι μία συσκευή που αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία, αποθηκεύει την χημική ενέργεια και την αποδεδμεύει υπό την μορφή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξωτερικά κυκλώματα όπως κινητά, ηλεκτρικά αυτοκίνητα, φορητοί υπολογιστές κ.α. Αποτελείται από δοχείο κατασκευασμένο από μονωτικό υλικό (εβονίτη, πλαστικό, γυαλί) με ηλεκτρολύτη (οξύ ή αλκάλιο), στο οποίο βυθίζονται τα ηλεκτρόδια. Η σύνδεσή τους σε εξωτερικό κύκλωμα προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος (εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή). Έτσι, στον ηλεκτρικό συσσωρευτή γίνονται χημικές διεργασίες, που έχουν σχέση με τη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Ο εκφορτισμένος ηλεκτρικός συσσωρευτής φορτίζεται όταν περάσει από αυτόν συνεχές ρεύμα από άλλη πηγή, ενώ ταυτόχρονα στον ηλεκτρικό συσσωρευτή γίνονται αντίστροφες χημικές διεργασίες, με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική. Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής χαρακτηρίζεται από: τη χωρητικότητα, δηλαδή την ποσότητα του ηλεκτρισμού σε αμπερώρια, όπου μπορεί ο συσσωρευτής να δώσει στο κύκλωμα που τροφοδοτεί, από τη μέση τάση σε Volt κατά το χρόνο της φόρτισης και εκφόρτισης, από την ειδική ενέργεια κατά βάρος και όγκο, δηλ. την ενέργεια σε βατώρια που παρέχεται κατά την εκφόρτιση, από την απόδοση κατά χωρητικότητα, δηλ. τον λόγο της ποσότητας των αμπερωρίων που αποδίδεται κατά την εκφόρτιση προς την ποσότητα των αμπερωρίων που απορροφάται κατά τη φόρτιση, από την απόδοση κατά ενέργεια (ή βαθμό απόδοσης), δηλ. το λόγο της ενέργειας που αποδίδεται κατά την εκφόρτιση προς την ενέργεια που απορροφάται κατά τη φόρτιση. Υπάρχουν ηλεκτρικοί συσσωρευτές σε μόνιμες εγκαταστάσεις όπως σε ηλεκτρικούς σταθμούς, τηλεφωνικούς και τηλεγραφικούς σταθμούς, ραδιοσταθμούς κ.α. αλλά και φορητοί συσσωρευτές που βρίσκονται σε κινητές ραδιοσυσκευές και συσκευές ενσύρματης επικοινωνίας, αυτοκίνητα, αεροπλάνα, φακούς, υπολογιστές τσέπης κ.α. [27]

3.6 Κατηγορίες μπαταριών

Οι μπαταρίες αποτελούνται από ένα ή περισσότερα στοιχεία όπου το καθένα περιέχει ένα θετικό ηλεκτρόδιο, ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο, έναν διαχωριστή και έναν ηλεκτρολύτη. Τα στοιχεία μπορούν να διαχωριστούν σε βασικές κατηγορίες: την πρωτογενή και την δευτερογενή.

Στην πρωτογενή κατηγορία οι μπαταρίες δεν μπορούν να επαναφορτιστούν ικανοποιητικά οπότε και αποβάλλονται όταν εκφορτιστούν. Είναι συνήθως ελαφριές πηγές ενέργειας και χαμηλού κόστους, βρίσκοντας εφαρμογή σε φορητές ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές, φορητό φωτισμό, παιχνίδια κ.α. Έχουν καλή διάρκεια ζωής, υψηλή πυκνότητα ενέργειας κατά την εκφόρτιση και ευκολία στην χρήση τους. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν μπαταρίες όπως:

- ψευδαργύρου-άνθρακα
- ψευδαργύρου-αλκαλίου-διοξείδιο του μαγγανίου
- ψευδαργύρου-οξείδιο του υδραργύρου
- κάδμιου-οξείδιο του υδραργύρου
- ψευδαργύρου-οξείδιο του αργύρου
- μαγνήσιου
- λιθίου
- αλουμινίου

Στην δευτερογενή κατηγορία ανήκουν οι μπαταρίες όπου μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά, μετά την εκφόρτισή τους, στην κανονική τους κατάσταση όπου το ρεύμα περνάει από μέσα τους προς την ανάποδη κατεύθυνση, από αυτό του ρεύματος εκφόρτισης. Αποτελούν τα αποθηκευτικά συστήματα της ηλεκτρικής ενέργειας και είναι γνωστές ως μπαταρίες αποθήκευσης. Έχουν ως χαρακτηριστικά την υψηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Βρίσκουν εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, σε συστήματα αεροσκαφών, σε UPS για την αδιάλειπτη τροφοδοσία κρίσιμων φορτίων, σε μικροδίκτυα και εφαρμογές στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτρισμού. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν μπαταρίες όπως:

- Μολύβδου οξέος
- Νικελίου-καδμίου
- Νικελίου-σιδήρου
- Οξειδίο του αργύρου
- νικελίου-ψευδαργύρου
- ψευδαργύρου-διοξειδίο του μαγγανίου
- ιόντων λιθίου [28]

3.7 Μπαταρία μολύβδου οξέος

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος είναι από τις πιο δημοφιλείς μπαταρίες στον χώρο των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Συνεχώς εξελίσσονται λόγω των εφαρμογών τους σαν ενεργειακά αποθηκευτικά συστήματα στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και στην διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελεί συνήθως την πιο φτηνή μπαταρία για οποιαδήποτε εφαρμογή ενώ προσφέρει καλή απόδοση (πάνω από 70%) και διάρκεια ζωής. Η μεγαλύτερη χρησιμότητα που έχουν βρει είναι στο ξεκίνημα των αυτοκινήτων, όπου χρησιμοποιείται μία μπαταρία 12V με χωρητικότητα συνήθως από 40 μέχρι 60Ah.

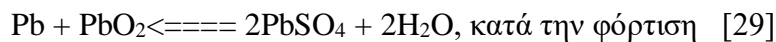
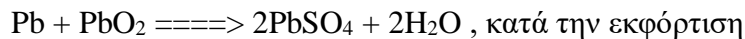
Κάθε στοιχείο αποτελείται από ένα πολλαπλό ηλεκτρόδιο μολύβδου στην άνοδο και ένα πολλαπλό ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου στην κάθοδο, ενώ ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται διάλυμα θεικού οξέος. Τα πολλαπλά ανοδικά και καθοδικά ηλεκτρόδια αποτελούνται από πολλές συνδεδεμένες μεταξύ τους ανοδικές και καθοδικές πλάκες αντίστοιχα και τοποθετούνται μέσα στο στοιχείο με τέτοιο τρόπο, ώστε μεταξύ δύο πλακών του αρνητικού ηλεκτροδίου να παρεμβάλλεται μία πλάκα του θετικού ηλεκτροδίου. Μεταξύ των πλακών τοποθετούνται φύλλα από διάτρητο πλαστικό, συνήθως μικροπορώδες πολυαιθυλένιο, που δεν προσβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη, με σκοπό να αποφευχθούν βραχυκυκλώσεις μεταξύ των πλακών των ηλεκτροδίων στο στάδιο της εκφόρτισης οπότε και διογκώνονται ή όταν χάσουν την επιπεδότητά τους από μεταβολές της θερμοκρασίας ή απότομες φορτίσεις και εκφορτίσεις.

Οι ηλεκτροδιακές πλάκες έχουν τη μορφή πλέγματος και κατασκευάζονται συνήθως από κράματα μολύβδου με μικρές ποσότητες αντιμονίου. Άλλα κράματα που χρησιμοποιούνται είναι κράματα με ασβέστιο. Τα κενά του πλέγματος γεμίζονται με πάστα από μόλυβδο-οξειδίο του μολύβδου, η οποία δημιουργείται με ανάμειξη με διάλυμα θεικού οξέος. Ο σχεδιασμός αυτός και η χρήση υλικών πολύ λεπτής κοκκομετρίας, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργούς επιφάνειας των ηλεκτροδίων και βελτίωση των χαρακτηριστικών του συστήματος.

Όταν οι ηλεκτροδιακές πλάκες τοποθετηθούν μέσα στο ηλεκτρολυτικό λουτρό του συσσωρευτή, το θεικό οξύ αντιδρά με τον μόλυβδο των πλακών και δημιουργεί στην επιφάνειά τους λεπτόκοκκο ίζημα $PbSO_4$. Στη συνέχεια για να λειτουργήσει ο συσσωρευτής πρέπει πρώτα να φορτιστεί. Δηλαδή πρέπει με δίοδο ρεύματος να γίνουν οι ηλεκτροχημικές δράσεις κατά τις οποίες στον θετικό πόλο ο Pb^{+2} του $PbSO_4$ θα οξειδωθεί προς Pb^{+4} , που μετατρέπεται σε PbO_2 , ενώ στον αρνητικό πόλο θα αναχθεί σε μεταλλικό Pb οδηγώντας στη δημιουργία του γαλβανικού στοιχείου:

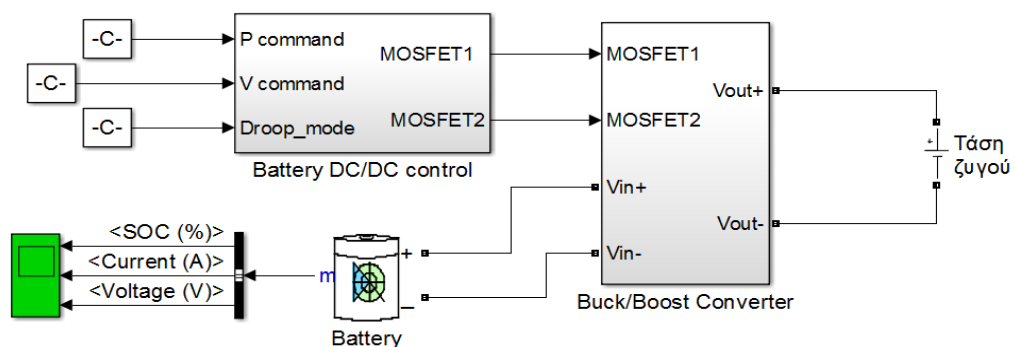


Η συνολική αντίδραση της μπαταρίας δίνεται από την εξίσωση:



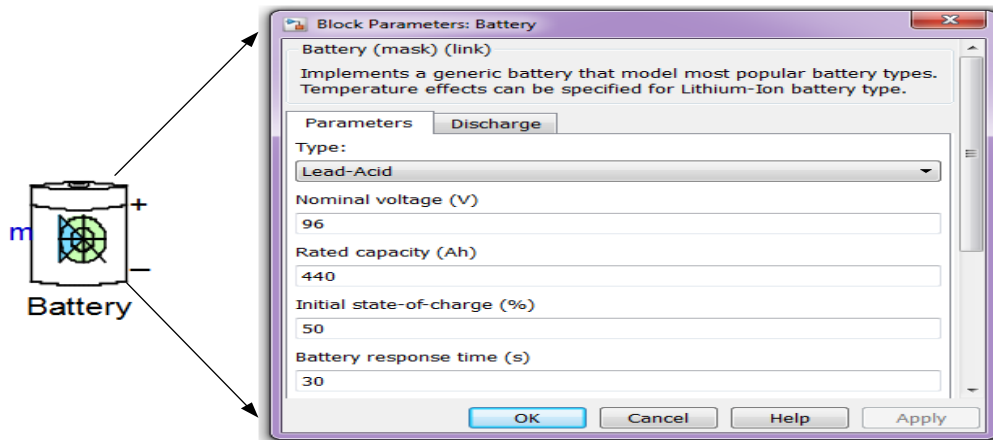
3.8 Η μπαταρία του μικροδικτύου στο Matlab

Η μπαταρία μαζί με τον έλεγχο της και τον αμφίδρομο μετατροπέα ανύψωσης/υποβιβασμού συνεχούς τάσης φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



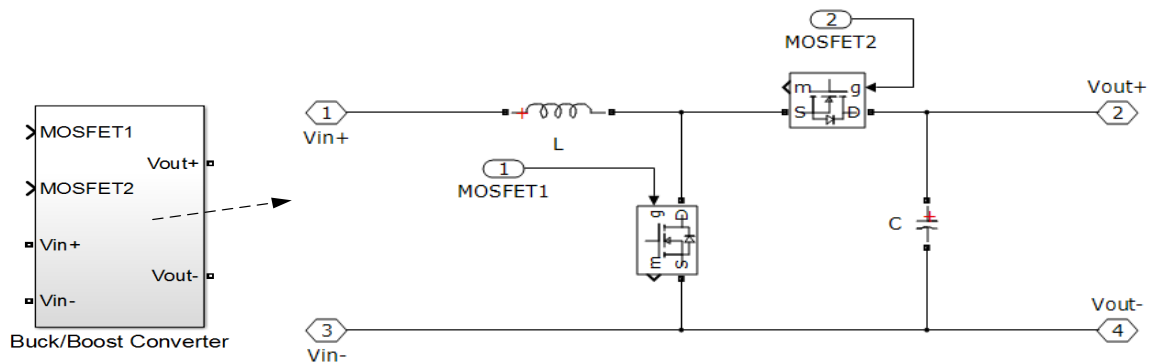
Εικόνα 3.6 : Η μπαταρία στο Matlab/Simulink.

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται συνήθως για την περιγραφή της απόδοσης της μπαταρίας είναι η τάση και η χωρητικότητα. Η τάση ορίστηκε $V = 96\text{Volts}$ και η χωρητικότητα 440Ah .



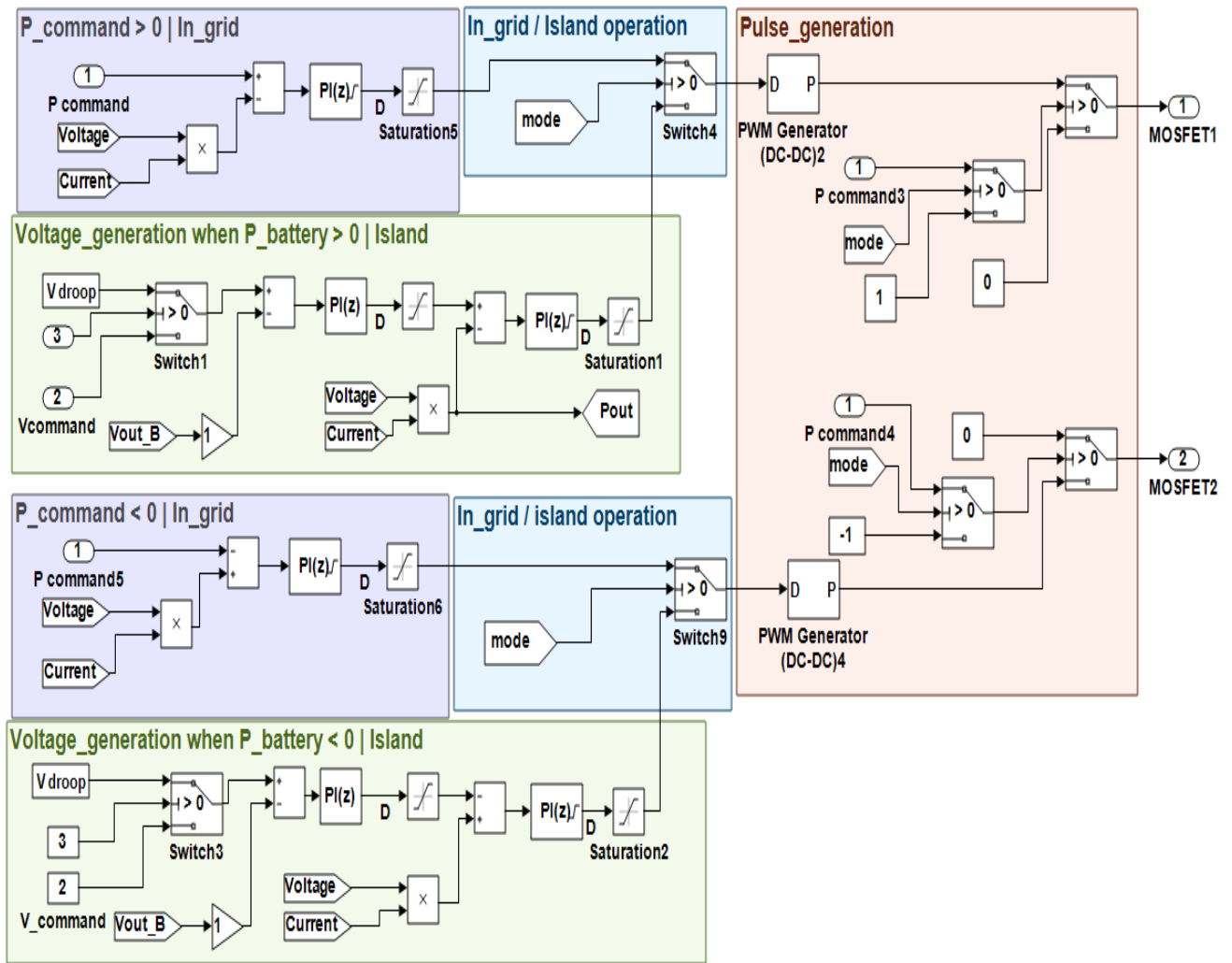
Εικόνα 3.7 : Χαρακτηριστικά μπαταρίας.

Ο μετατροπέας ανύψωσης που χρησιμοποιήθηκε για την σύνδεση της μπαταρίας στον ζυγό του dc μικροδίκτυου φαίνεται παρακάτω. Η αγωγιμότητα του πηνίου ορίστηκε ως $L = 0.005\text{H}$ και η χωρητικότητα του πυκνωτή $C = 0.001\text{F}$.



Εικόνα 3.8 : Ο αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης/υποβιβασμού στο Matlab/Simulink.

Τέλος ο έλεγχος της μπαταρίας αποτελείται από δύο βασικές λειτουργίες. Η πρώτη λειτουργία είναι το P_command, όπου γίνεται παραγωγή ισχύος ή απορρόφηση αντίστοιχα όταν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη/δικτύου. Η δεύτερη λειτουργία είναι η παραγωγή τάσης όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε αυτόνομη λειτουργία. Μπορεί να παράγει τάση είτε με κάποια τάση αναφοράς είτε με βάση την καμπύλη droop.



Εικόνα 3.9 : Έλεγχος της μπαταρίας στο Matlab/Simulink.

4 Φωτοβολταϊκά συστήματα

4.1 Εισαγωγή

Με τον γενικό όρο φωτοβολταϊκά ονομάζεται η βιομηχανική διάταξη πολλών φωτοβολταϊκών κυττάρων σε μία σειρά και ανήκουν στη κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Στην ουσία πρόκειται για τεχνητούς ημιαγωγούς (συνήθως από Πυρίτιο) οι οποίοι ενώνονται με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σειρά. Οι ημιαγωγοί αυτοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν μία ηλεκτρική τάση. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ (ή πλαίσια) φωτοβολταϊκών στοιχείων (αλλιώς κυψελών ή κυττάρων), μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή.

Δυο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων: το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό.

Εκτός από το πυρίτιο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως το Κάδμιο - Τελλούριο (CdTe) και ο ινδοδισεληνιούχος χαλκός. Σε αυτές τις κατασκευές, η μορφή του στοιχείου διαφέρει σημαντικά από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου, και έχει συνήθως τη μορφή λωρίδας πλάτους μερικών χιλιοστών και μήκους αρκετών εκατοστών. Τα πάνελ συνδέονται μεταξύ τους και δημιουργούν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει από 2 έως και αρκετές εκατοντάδες φωτοβολταϊκές γεννήτριες.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για το λόγο αυτό οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών

αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης: κάποια παραδείγματα είναι το κομπιουτεράκι τσέπης και οι δορυφόροι. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αντιστροφείς (inverters) - που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος(AC). [20]

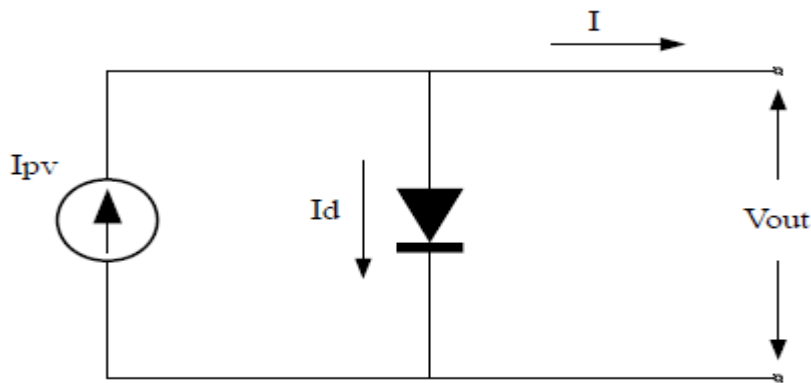


Εικόνα 4.1 : Φωτοβολταϊκό πάνελ.

4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο, όπως φαίνεται στο σχήμα, αποτελείται από μια ιδανική πηγή ρεύματος παράλληλα με μια ιδανική δίοδο. Οι δύο παράμετροι που είναι βασικοί για τη μοντελοποίηση του και το χαρακτηρίζουν είναι: η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) και το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}).

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



Εικόνα 4.2 : Ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού δίνεται από την εξίσωση:

$$I = I_{pv} - I_d \quad (4-2.1)$$

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

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{kT}} - 1 \right) \quad (4-2.2)$$

Όπου: I_o είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

V_d η τάση της διόδου

$q = 1.602 \cdot 10^{-23} C$ είναι το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου

$k = 1.381 \cdot 10^{-23} J/K$ η σταθερά Boltzmann

T η θερμοκρασία επαφής σε Kelvin.

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει το ρεύμα εξόδου του ιδανικού φωτοβολταϊκού ως:

$$I = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{q \cdot V_d}{kT}} - 1 \right) \quad (4-2.3)$$

όπου το V_d αποτελεί την τάση συνολικά του φωτοβολταϊκού.

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο συνήθως παράγει τάση περίπου 0.5V γι' αυτό και πρέπει να συνδεθούν αρκετά σε σειρά ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση και να διαμορφωθεί ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Μια συλλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων

αποτελούν ένα πάνελ ενώ μία φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι μια συλλογή από φωτοβολταϊκά πάνελ. Και οι τρεις διαμορφώσεις ακολουθούν τις ίδιες βασικές εξισώσεις μοντελοποίησης.

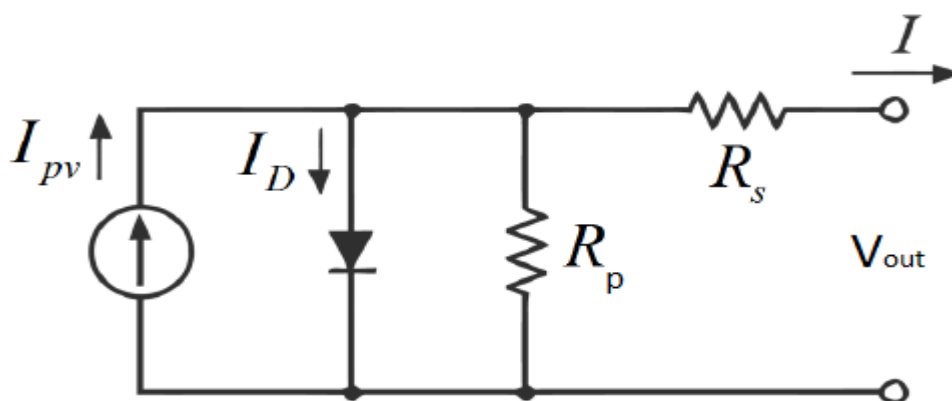
Συγκεκριμένα το παραπάνω ιδανικό ισοδύναμο κύκλωμα αποτυγχάνει να περιγράψει με ακρίβεια την έξοδο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος γιατί αγνοεί τα παρακάτω στοιχεία:

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.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω το ισοδύναμο κύκλωμα του πραγματικού φωτοβολταϊκού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.3 : Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού φωτοβολταϊκού.

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

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{q \cdot (V_d + IR_s)}{\alpha k T}} - 1 \right) \quad (4-2.4)$$

Το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού αντίστοιχα δίνεται από την εξίσωση:

$$I = I_{pv} - I_o \left(e^{\frac{q \cdot (V_d + IR_s)}{\alpha k T}} - 1 \right) * \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (4-2.5)$$

Όπου το ρεύμα I_{pv} μεταβάλλεται για τις διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού σύμφωνα με την σχέση:

$$I_{pv} = \left[I_{sc} \frac{R_s + R_p}{R_p} + K_I (T - T_n) \right] \frac{G}{G_n} \quad (4-2.6)$$

Όπου: I_{sc} το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη θερμοκρασία και ακτινοβολία αναφοράς

R_s η αντίσταση σειράς

R_p η παράλληλη αντίσταση

K_I ο θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης

T η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου

T_n η θερμοκρασία αναφοράς (κατά κανόνα 25 °C)

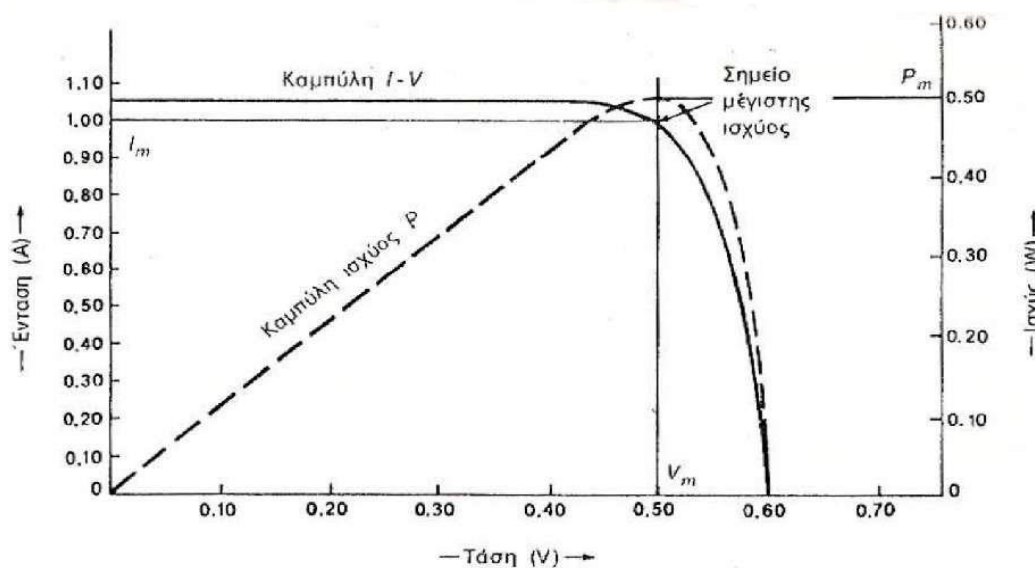
G η ηλιακή ακτινοβολία

G_n η ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς (κατά κανόνα 1000 W/m²) [21]

4.3 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V φωτοβολταϊκού

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας. Δηλαδή σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές (συσσωρευτές, ξηρά στοιχεία, ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη, μεγάλα δίκτυα διανομής), οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται έντονα και μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή. Στην κατάσταση βραχυκυκλώματος η ένταση του ρεύματος παίρνει τη μέγιστη τιμή I_{sc} ,

ενώ η τάση μηδενίζεται. Αντίθετα στην κατάσταση ανοιχτοκυκλώματος, μηδενίζεται η ένταση του ρεύματος αλλά η τάση παίρνει την τιμή V_{oc} . Επομένως, στη βραχυκυκλωμένη και στην ανοιχτοκυκλωμένη κατάσταση η ηλεκτρική ισχύς που παράγει το στοιχείο ($P=I \cdot V$) είναι μηδενική, αφού αντίστοιχα είναι μηδενική η τάση στην πρώτη περίπτωση και η ένταση του ρεύματος στη δεύτερη περίπτωση. Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος, ανάμεσα στις παραπάνω ακραίες καταστάσεις, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές, από μηδέν (όπου $V=0$) μέχρι άπειρη (όπου $I=0$). όπως φαίνεται στο σχήμα. Παράλληλα μεταβάλλεται ομαλά και η ισχύς που παράγει το στοιχείο, με μέγιστη P_m σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης V_m και έντασης I_m . Το ζεύγος αυτό καθορίζει, σε σχέση με το ζεύγος των τιμών V_{oc} και I_{sc} , τον συντελεστή απόδοσης του στοιχείου. Επομένως είναι πολύ σημαντικό η αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτείται από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο να έχει κατάλληλη τιμή, ώστε στις συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας να παράγεται από το στοιχείο η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς. [22]



Εικόνα 4.4 : Χαρακτηριστικές καμπύλες φωτοβολταϊκού I-Vκαι P-V.

4.4 Ιχνηλάτης εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος(MPPT)

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μία καθαρή και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας με ένα συγκριτικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να δώσουν ισχύ μέχρι

και μερικά MWatts. Ωστόσο το υψηλό κόστος εγκατάστασης σε συνδυασμό με την χαμηλή απόδοση της ενέργειας που κυμαίνεται 9-17% , κάνει αναγκαία την εύρεση αλγόριθμων για την εύρεση της μέγιστης απόδοσης του φωτοβολταϊκού. Το σημείο αυτό στα φωτοβολταϊκά είναι μοναδικό και εξαρτάται μόνο από τις κλιματικές αλλαγές και την ακτινοβολία. Σε διαφορετικές θερμοκρασίες και ακτινοβολίες, η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού αλλάζει και οφείλεται στην αλλαγή των χαρακτηριστικών καμπυλών του. Συνεπώς και το σημείο μέγιστης ισχύος αλλάζει ανάλογα, οπότε ο ιχνηλάτης σε κάθε μεταβολή των καιρικών συνθηκών θα πρέπει να υπολογίζει το σημείο αυτό.

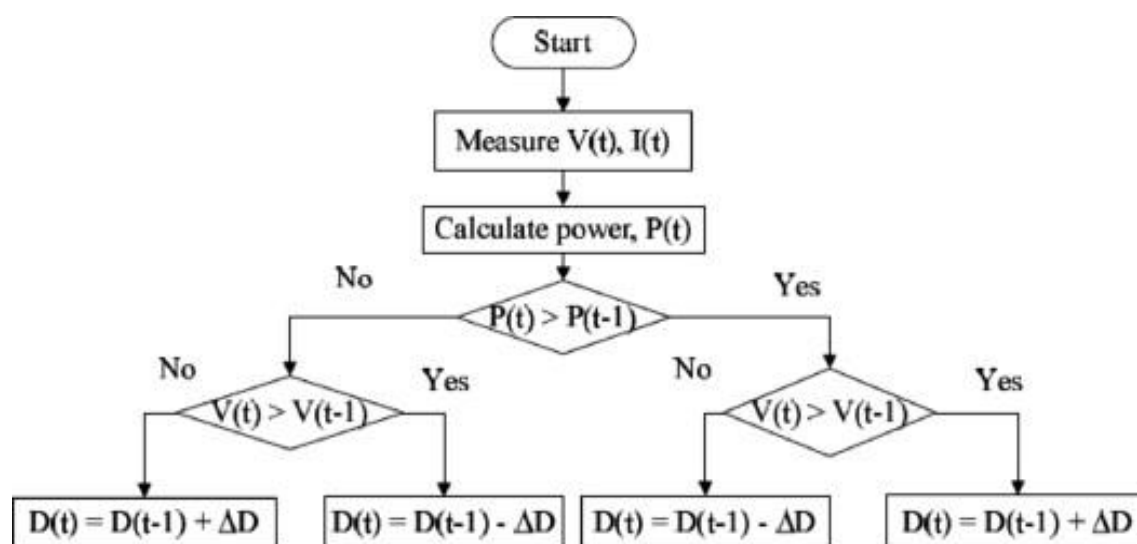
Για την υλοποίηση του MPPT έχουν βρεθεί πολλές τεχνικές και μπορούν να διακριθούν κυρίως σε δύο κατηγορίες: τις συμβατικές και τις τεχνικές υπολογισμού μέσω λογισμικού. Οι συμβατικές τεχνικές περιλαμβάνουν τεχνικές όπως το κλασματικό βραχυκύκλωμα και το κλασματικό ανοιχτοκύκλωμα., διαταραχή και παρατήρηση (perturb and observe), την διαδοχική αγωγιμότητα (incremental conductance), την τεχνική σκαρφάλωμα του λόφου (hill climbing) και γενικές τεχνικές MPPT. Με την πάροδο του χρόνου και την εισαγωγή υπολογιστικού λογισμικού στα φωτοβολταϊκά έχουν εφαρμοστεί νέοι αλγόριθμοι που δίνουν πλεονεκτήματα όπως, την ικανότητα να χειριστούν την μη γραμμικότητα και την ευρεία εξερεύνηση στον ρυθμό αναζήτησης. Η εφαρμογή των αλγόριθμων είναι κατάλληλοι για την μη γραμμική βελτιστοποίηση. Μερικοί από τους αλγόριθμους που έχουν αναπτυχθεί είναι: ο έλεγχος ασαφής λογικής, τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, γενετικός αλγόριθμος, βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (Particle swarm), μη γραμμικός έλεγχος, διαφορική εκτίμηση, αποικία μελισσών αλγόριθμος αναζήτησης κ.α.

Η εφαρμογή του MPPT γίνεται μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος, όπου ένας μετατροπέας παρεμβάλλεται μεταξύ του φωτοβολταϊκού και του φορτίου ή του ζυγού. Ο μετατροπέας αλλάζει το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού μέσω του κύκλου λειτουργίας του. Ανάλογα την τεχνική MPPT που εφαρμόζεται αλλά και τα χαρακτηριστικά του συστήματος, ο μετατροπέας μπορεί να είναι ανύψωσης, υποβιβασμού, διπλής κατεύθυνσης ανύψωσης/υποβιβασμού, ώθησης έλξης, cuk, flyback. Ωστόσο στο πειραματικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, το

φωτοβολταϊκό συνδέεται σε dc ζυγό μέσω μετατροπέα ανύψωσης όπου και θα αναλυθεί περαιτέρω. [23][24]

4.5 Αλγόριθμος Perturb and Observe

Ο αλγόριθμος perturb and observe είναι ο πιο κοινός αλγόριθμος που υλοποιείται στην πράξη λόγω της ευκολίας εφαρμογής του. Στην εικόνα 4.5 φαίνεται το διάγραμμα ροής της μεθόδου. Διαταράσσει την τερματική τάση του φωτοβολταϊκού περιοδικά και ύστερα συγκρίνει την ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού με αυτήν του προηγούμενου κύκλου της διαταραχής.



Εικόνα 4.5 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου PerturbandObserve.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.5 όταν η ισχύς και η τάση του φωτοβολταϊκού αυξηθούν την ίδια στιγμή και αντίστροφα, ένα βήμα διαταραχής ΔD θα προστεθεί στο duty cycle D , παράγοντας έτσι τον επόμενο κύκλο διαταραχής με σκοπό να μετατοπίσει το σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού προς το MPP. Όταν η ισχύς του φωτοβολταϊκού μειωθεί, η τάση αυξηθεί και αντίστροφα, το βήμα διαταραχής θα αφαιρεθεί από το duty cycle για τον επόμενο κύκλο διαταραχής. Η διαδικασία θα επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρι το σημείο λειτουργίας να είναι το MPP.

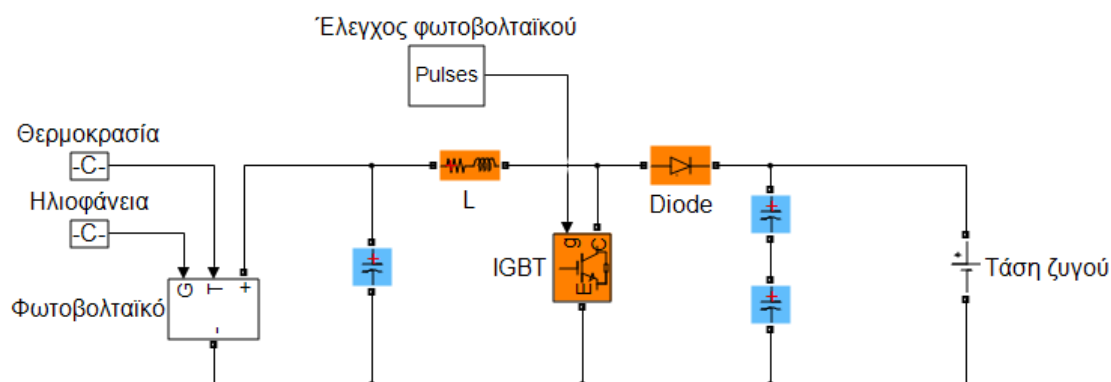
Πρέπει να σημειωθεί πως το σύστημα θα ταλαντεύεται γύρω από το MPP στην διάρκεια της διαδικασίας το οποίο οδηγεί σε απώλειες ισχύος. Μειώνοντας το βήμα

της διαταραχής θα ελαχιστοποιήσει τις ταλαντώσεις, αλλά θα κάνει την ανίχνευση του MPP πιο αργή. Συνεπώς θα πρέπει να γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ απωλειών και ταχύτητας ανίχνευσης.

Η μέθοδος αυτή προτιμάται στην πράξη για την απλότητά της και την ευκολία εφαρμογής της. Ωστόσο διαθέτει κάποιους περιορισμούς όπως την δυσκολία ανίχνευσης του MPP σε χαμηλές ακτινοβολίες και το γεγονός πως η μέθοδος δεν μπορεί να αναγνωρίσει το σημείο MPP, αλλά ταλαντώνεται γύρω του οδηγώντας σε απώλειες. Παρ' όλα αυτά έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι για την βελτιστοποίησή του όπως η μείωση της περιόδου διαταραχής όταν το σημείο MPP βρεθεί, αλλά και μείωση του βήματος ΔD όταν το φωτοβολταϊκό βρίσκεται στο MPP. [23]

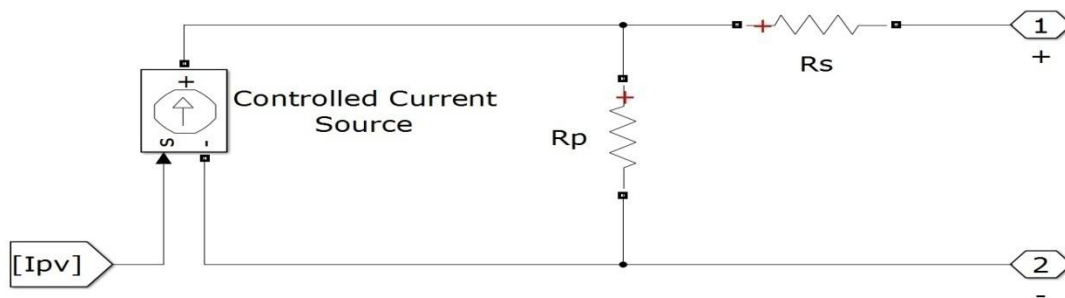
4.6 Υλοποίηση φωτοβολταϊκού στο Matlab

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το φωτοβολταϊκό όπως υλοποιήθηκε στο matlab σύμφωνα με την διπλωματική εργασία [21]. Η τάση του ζυγού του μικροδικτύου ορίστηκε στα 380V. Το φωτοβολταϊκό δίνεται στην εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6 : Το φωτοβολταϊκό σύστημα στο Matlab/Simulink.

Αποτελείται από το φωτοβολταϊκό μοντέλο που δέχεται ως παραμέτρους την θερμοκρασία και την ηλιοφάνεια και παράγει ρεύμα I_{pv} σύμφωνα με την σχέση (4-2.6). Το ρεύμα αυτό οδηγείται στον μετατροπέα ανύψωσης DC/DC και ύστερα στον ζυγό του μικροδικτύου. Το mosfet του μετατροπέα ελέγχεται από τον έλεγχο του φωτοβολταϊκού που είναι εξοπλισμένος με δύο λειτουργίες, τον αλγόριθμο MPPT και την καμπύλη droop.



Εικόνα 4.7 : Ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στο Matlab/Simulink.

5 Τεχνική ανίχνευσης νησιδοποίησης (Islanding detection method)

5.1 Εισαγωγή

Η μελέτη των IDMs μέσα στο πεδίο των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας μπορεί να συναντηθεί με διάφορες ονομασίες όπως ανίχνευση νησιδοποίησης, αντι-νησιδοποίηση, μη προγραμματισμένη ή μη επιθυμητή νησιδοποίηση. Όλες αυτές οι ονομασίες αναφέρονται στο γεγονός όπου οι διαχειριστές των μονάδων παραγωγής δεν ελέγχουν την διαδικασία της νησιδοποίησης. Στην περίπτωση των AC μικροδικτύων κατά την αντι-νησιδοποίηση, μη κανονικές τιμές τάσης και συχνότητας μπορούν να οδηγήσουν ένα μικροδίκτυο σε νησιδοποίηση. Οι παραπάνω ονομασίες αναφέρονται λοιπόν στις δράσεις που εκτελούνται για την προστασία των πηγών ενέργειας κατά την διάρκεια μιας νησιδοποίησης, η οποία δεν ελέγχεται από τους διαχειριστές των πηγών. Οι τεχνικές νησιδοποίησης αποτελούνται από δύο βασικά στοιχεία: την διάγνωση της νησιδοποίησης των πηγών μέσα από διάφορες μετρήσεις και την διαδικασία αποσύνδεσης των πηγών από το τοπικό ηλεκτρικό σύστημα διανομής.

Οι τεχνικές νησιδοποίησης που έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα αφορούν κυρίως τις διεσπαρμένες πηγές ενέργειας. Σχεδιάστηκαν με σκοπό την ασφαλή λειτουργία των μονάδων παραγωγής, ώστε να αποδίδουν τις υπηρεσίες τους στο τοπικό ηλεκτρικό σύστημα ενώ σε περίπτωση σφάλματος να αποσυνδέονται μέχρι να διορθωθεί. Έτσι ο μετατροπέας κάθε πηγής ενέργειας διαθέτει τεχνική ανίχνευσης για την ασφαλή λειτουργία της. Ωστόσο στην περίπτωση όπου πολλαπλοί μετατροπείς συνδέονται παράλληλα σε ένα κοινό σημείο, έρευνες έχουν δείξει πως υποβαθμίζεται η ικανότητα ανίχνευσης της νησιδοποίησης. Επιπλέον στην περίπτωση του μικροδικτύου, η αποσύνδεση των πηγών ενέργειας δεν είναι πρακτική καθώς το

μικροδίκτυο πιθανόν να περιέχει κρίσιμα φορτία τα οποία θα πρέπει να τροφοδοτηθούν. Έτσι η ανίχνευση της νησιδοποίησης του μικροδικτύου θα πρέπει να οδηγεί στην αυτόνομη λειτουργία του, σε αντίθεση με την ανίχνευση νησιδοποίησης των μεμονωμένων μονάδων που οδηγούνται σε αποσύνδεση.

Η ανίχνευση της νησιδοποίησης είναι απαραίτητο χαρακτηριστικό για την ασφάλεια και την προστασία του εξοπλισμού όπου εγκαθίσταται. Μπορεί να προκληθεί από σφάλμα στις γραμμές διανομής, σφάλμα στον εξοπλισμό, ανθρώπινο λάθος κ.α. Σε επίπεδο μικροδικτύου εξασφαλίζεται η προστασία τόσο των διεσπαρμένων πηγών όσο και των φορτίων, η ασφάλεια του προσωπικού συντήρησης και αποφεύγεται το ενδεχόμενο επανασύνδεσης του μικροδικτύου με το δίκτυο χωρίς τον απαραίτητο συγχρονισμό τάσης και συχνότητας. [30]

5.2 Χαρακτηριστικά των IDMs

Η ανίχνευση της μη προγραμματισμένης νησιδοποίησης μπορεί να είναι γρήγορη, ακριβής και αποδοτική με βάση την επίδοση της τεχνικής που χρησιμοποιείται. Τα χαρακτηριστικά τα οποία κάθε τεχνική καλείται να αντιμετωπίσει είναι : η μη ανιχνεύσιμη περιοχή (Non-detection zone), ο χρόνος ανίχνευσης, η αναλογία σφάλματος της ανίχνευσης και η ποιότητα της ισχύος.

- Η μη ανιχνεύσιμη περιοχή (NDZ) είναι ο λόγος όπου ο IDM αποτυγχάνει να εντοπίσει την νησιδοποίηση. Η NDZ των μεθόδων που βασίζεται στην παρακολούθηση της τάσης, συχνότητας και απόκλισης φάσης συχνά αναφέρεται και ως χώρος αναντιστοιχίας ισχύος (power mismatch space), ενώ η NDZ των μεθόδων που αποτελούνται από εισαγωγή μιας διαταραχής στο σύστημα αναφέρεται ως χώρος παραμέτρων φορτίου (load parameter space).
- Ο χρόνος ανίχνευσης είναι ο χρόνος από την αρχή της αποσύνδεσης του μικροδικτύου από το κεντρικό δίκτυο μέχρι το τέλος της ανίχνευσης της νησιδοποίησης από τις IDMs και ορίζεται ως: $\Delta T = T_{IDM} - T_{trip}$, όπου ΔT είναι ο χρόνος που διαρκεί η νησιδοποίηση, T_{IDM} είναι η στιγμή που ανιχνεύεται η νησιδοποίηση και T_{trip} είναι ο χρόνος όπου το μικροδίκτυο αποσυνδέεται από το δίκτυο.

- Το σφάλμα της ανίχνευσης σημαίνει πως ο IDM ανιχνεύει ψευδή νησιδοποίηση, καθώς το μικροδίκτυο παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο. Συνήθως η ψευδής ανίχνευση προκαλείται από αλλαγές φορτίου ή άλλες παρεμβολές που οδηγούν τις παραμέτρους πάνω από τα κανονικά όρια λειτουργίας. η αναλογία του σφάλματος δίνεται από την σχέση:

$$E = \frac{N_{error}}{N_{error} + N_{correct}}, \text{ όπου } N_{error} \text{ και } N_{correct} \text{ το πλήθος των σφαλμάτων και}$$

των επιτυχιών αντίστοιχα.

- Οι μέθοδοι που βασίζονται σε εισαγωγή διαταραχής μπορούν να μειώσουν σημαντικά την NDZ. Ωστόσο είναι αναπόφευκτο όταν εγχέεται διαταραχή να μην αλλοιώσει την ισχύ εξόδου και κατ' επέκταση την ποιότητα της ισχύος. Η ποιότητα της ισχύος αποτελεί σημαντικό δείκτη όταν επιλέγεται μία τεχνική ανίχνευσης νησιδοποίησης. [30]

5.3 Διάκριση των IDMs

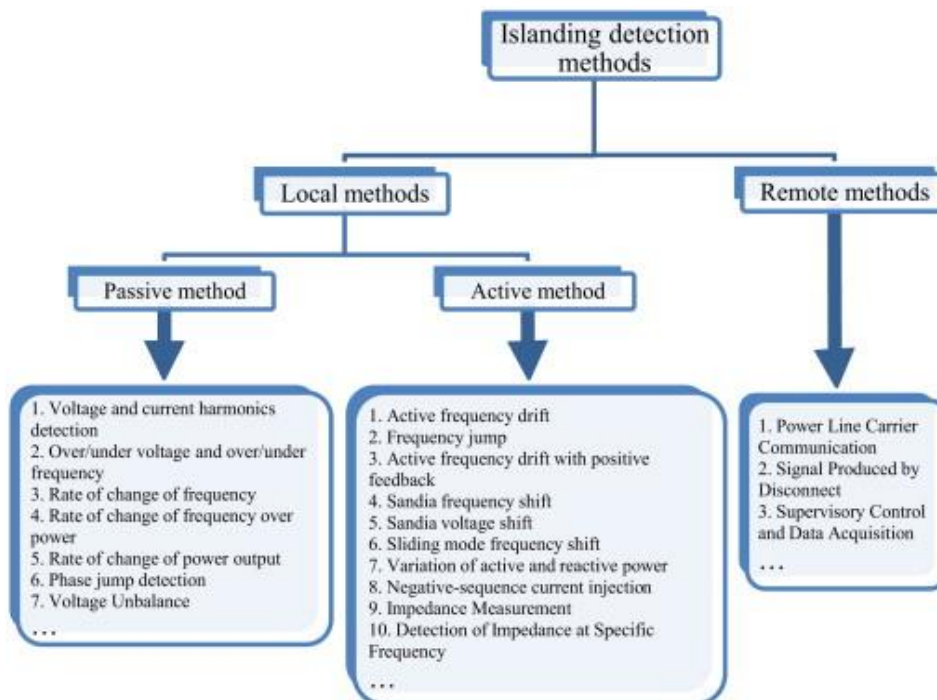
Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στα AC μικροδίκτυα. Διακρίνονται στις απομακρυσμένες και τις τοπικές τεχνικές. Οι απομακρυσμένες τεχνικές είναι γενικά πιο ακριβές και υπόκεινται σε σφάλματα επικοινωνίας αλλά δεν έχουν μη ανιχνεύσιμη περιοχή. Οι τοπικές τεχνικές χωρίζονται επιπλέον σε ενεργητικές, παθητικές και υβριδικές τεχνικές ανίχνευσης.

1. Οι Ενεργητικές τεχνικές ανίχνευσης, εισάγουν σήματα διαταραχών στο σύστημα για να προκαλέσουν δυσαναλογίες στην ισχύ, ώστε να διαφοροποιηθούν συγκεκριμένες παράμετροι όταν συμβεί η μη προγραμματισμένη νησιδοποίηση. Τα σήματα μπορεί να αποτελούνται από αλλαγές φάσεις, αλλαγή ενεργού ισχύος, αλλαγές στην άεργο ισχύ ή και αλλαγές στις αρμονικές. Το μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι η μειωμένη ποιότητα ισχύος και η μειωμένη απόδοση στην περίπτωση πολλαπλών μετατροπέων.
2. Οι παθητικές τεχνικές βασίζονται στον υπολογισμό τοπικών παραμέτρων και τις συγκρίνουν με τις τιμές αναφοράς. Στην περίπτωση όπου ανιχνεύσουν σημαντικές διαφορές σε τάση, συχνότητα, φάση και αρμονική αλλοίωση

ενεργοποιούν την νησιδοποίηση. Το μειονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι η μεγάλη NDZ ειδικά στην περίπτωση όπου η παραγωγή του μικροδικτύου είναι ίδια με την ζήτηση των φορτίων.

3. Οι υβριδικές τεχνικές αποτελούν ένα συνδυασμό των παραπάνω κατηγοριών για την βέλτιστη και έγκαιρη ανίχνευση της νησιδοποίησης. [32]

Στην παρακάτω εικόνα διακρίνονται μερικές από τις πιο γνωστές τεχνικές που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα.



Εικόνα 5.1 : Τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης

Οι παθητικές τεχνικές νησιδοποίησης περιλαμβάνουν ανίχνευση μέσω των αρμονικών ρεύματος και τάσης, πάνω και κάτω όρια λειτουργίας τάσης/συχνότητας, ρυθμός αλλαγής συχνότητας/ισχύος, άλμα στην φάση κ.α. Οι ενεργητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τεχνικές όπως αλλαγή τάσης/συχνότητας Sandia, άλμα συχνότητας, διαφορά ενεργού και άεργου ισχύος κ.α.

Οι πιο γνωστές απομακρυσμένες μέθοδοι είναι : επικοινωνία μέσω γραμμής μεταφοράς (PLCC), σήμα που παράγεται από την αποσύνδεση (SPD) και μέσω συστήματος SCADA. Στην τεχνική PLCC τοποθετούνται πομποί στην γραμμή

μεταφοράς προς την μεριά του δικτύου και δέκτες στις μονάδες παραγωγής. Στην περίπτωση όπου το σήμα μεταξύ πομπού δέκτη χαθεί σηματοδοτεί την μη προγραμματισμένη νησιδοποίηση. Η τεχνική SPD είναι παρόμοια με την PLCC, με την διαφορά πως η επικοινωνία μεταξύ πομπών και δεκτών βασίζεται σε μικροκύματα ή γραμμές τηλεπικοινωνίας. Στην τεχνική μέσω συστήματος SCADA επιβλέπονται οι διακόπτες του δικτύου και σε περίπτωση σφάλματος στέλνεται η πληροφορία μέσω συστήματος επικοινωνίας στις αντίστοιχες μονάδες.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η αποδοτικότητα των μεθόδων νησιδοποίησης έχουν άμεση εξάρτηση από το σύστημα όπου θα χρησιμοποιηθούν. Στην περίπτωση σύνδεσης πολλαπλών μετατροπέων παράλληλα έχει σημαντική επίπτωση στην αξιοπιστία καθώς μπορεί να τα ρεύματά τους να ακυρώνονται μεταξύ τους ή και να κάνουν την απόκλιση της τάσης μη ανιχνεύσιμη. Συνεπώς οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την νησιδοποίηση θα πρέπει να επιλέγονται ανάλογα με το επίπεδο χρησιμοποίησής τους, δηλαδή σε επίπεδο ενός ή πολλαπλών μετατροπέων ή σε επίπεδο μικροδικτύου.

Όπως αναφέρθηκε ήδη οι τεχνικές ανίχνευσης έχουν διαμορφωθεί με βάση τις πηγές παραγωγής και τα AC μικροδίκτυα, όπου οι μεταβλητές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν παράμετροι είναι η συχνότητα, η τάση, η ενεργός και άεργος ισχύς και η αρμονική ανάλυση του συστήματος. Ωστόσο στα DC μικροδίκτυα η μοναδική παράμετρος προς μέτρηση είναι η τάση και κατ' επέκταση η ενεργός ισχύς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα πολλές από τις παραπάνω τεχνικές να μην βρίσκουν εφαρμογή στο πεδίο των DC μικροδικτύων. Σε συνδυασμό με το πρόσφατο ενδιαφέρον για τα DC μικροδίκτυα δεν έχουν διαμορφωθεί ακόμα πρότυπα για την ανίχνευση της νησιδοποίησης, αποτελώντας έτσι πρόκληση για τους ερευνητές. [31]

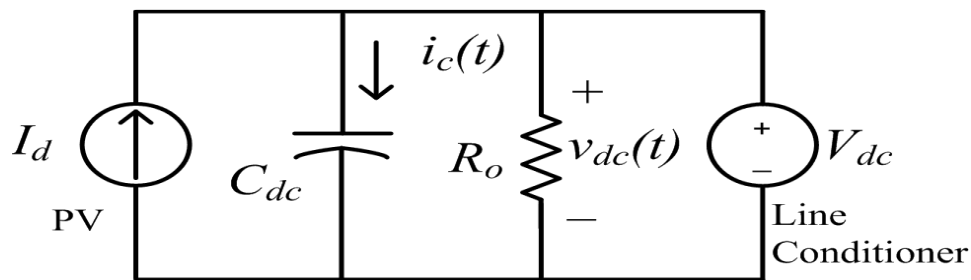
5.4 Η IDM για το μικροδίκτυο στο MATLAB

Η τεχνική μη προγραμματισμένης νησιδοποίησης που υλοποιήθηκε στο Matlab έγινε σύμφωνα με την μελέτη [33], όπου σκοπός είναι ο εντοπισμός της νησιδοποίησης του φωτοβολταϊκού και κατ' επέκταση συνολικά του μικροδικτύου όπου σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 1547 η νησιδοποίηση να λάβει χώρα εντός των δύο δευτερολέπτων. Στην περίπτωση του φωτοβολταϊκού αυτό θα πρέπει να αποσυνδεθεί από δίκτυο ενώ στην περίπτωση του μικροδικτύου, θα πρέπει να περάσει στην αυτόνομη λειτουργία για την εξυπηρέτηση των κρίσιμων φορτίων.

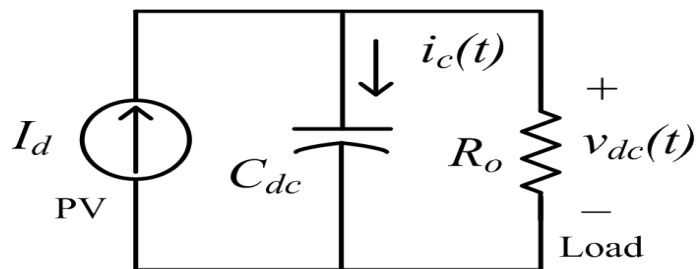
Η τεχνική αποτελεί έναν συνδυασμό από μία παθητική και μία ενεργητική τεχνική ανίχνευσης. Η παθητική μέθοδος είναι παρόμοια με την τεχνική over/undervoltage , όπου στην περίπτωση μεγάλης δυσαναλογίας ισχύος μεταξύ παραγωγής ζήτησης, με την νησιδοποίηση του μικροδικτύου από το δίκτυο αυξάνεται/μειώνεται απότομα η τάση ξεπερνώντας τα όρια λειτουργίας υποδεικνύοντας έτσι το σφάλμα. Για την ανίχνευση της νησιδοποίησης όταν δεν υπάρχει ροή ισχύος η παθητική μέθοδος δεν είναι αρκετή. Μία ενεργητική μέθοδος χρησιμοποιείται, όπου μία διαταραχή ρεύματος εισέρχεται στο σύστημα προκαλώντας διαφορετικό ισοζύγιο ισχύος και παρατηρώντας το σύστημα δίνεται διάγνωση για την μη προγραμματισμένη νησιδοποίηση του μικροδικτύου. Η ενεργητική μέθοδος βελτιώνει έτσι την NDZ.

5.5 Αρχή λειτουργίας της ενεργητικής τεχνικής

Η ενεργητική τεχνική χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της νησιδοποίησης στην χειρότερη περίπτωση, αυτή δηλαδή όπου το ισοζύγιο μεταξύ φωτοβολταϊκού και φορτίων αλλά και δικτύου/μικροδικτύου είναι ισορροπημένο και δεν υπάρχει ροή. Στην περίπτωση της μη προγραμματισμένης νησιδοποίησης, δεν θα διαμορφωθεί δυσαναλογία ισχύος οπότε δεν θα υπάρξει μεταβολή στην τάση. Για την αξιόπιστη ανίχνευση σε αυτή την περίπτωση δημιουργείται μία διαταραχή ρεύματος για συγκεκριμένο χρόνο και συγκεκριμένη συχνότητα και παρατηρείται η απόκριση του συστήματος. Η διαταραχή ρεύματος που εισάγεται μεταβάλλει το ισοζύγιο ισχύος και αν προκαλέσει σημαντική διαφορά στην τάση, τότε η διαταραχή ρεύματος ενισχύεται μέχρι η τάση να φτάσει τα όρια λειτουργίας, όπως στην παθητική μέθοδο OUV.



Εικόνα 5.2 : Ισοδύναμο κύκλωμα κανονικής λειτουργίας.



Εικόνα 5.3 : Ισοδύναμο κύκλωμα αυτόνομης λειτουργίας.

Στις εικόνες 5.2, 5.3 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μικροδικτύου σε σύνδεση με το δίκτυο και του μικροδικτύου σε αυτόνομη λειτουργία. Στην περίπτωση όπου το δίκτυο είναι συνδεδεμένο η διαταραχή δεν θα προκαλέσει διαφορά τάσης καθώς η τάση διαμορφώνεται από δίκτυο (V_{DC}). Στην αυτόνομη λειτουργία, όπου το δίκτυο παύει να διαμορφώνει την τάση, οποιαδήποτε διαταραχή μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την τάση. Με γνώρισμα ότι η μεταβολή της τάσης σηματοδοτεί την αυτόνομη λειτουργία, υλοποιείται η τεχνική νησιδοποίησης και αποτελεί το κριτήριο για την ανίχνευση της νησιδοποίησης.

Μαθηματική ανάλυση της τεχνικής νησιδοποίησης

Στην εικόνα 5.2 η αντίσταση R_o είναι η αντίσταση του φορτίου και θεωρείται πως αντιστοιχεί ακριβώς στο ρεύμα πριν την διαταραχή. Το ρεύμα I_d είναι το ρεύμα που παράγει το φωτοβολταϊκό και θεωρείται σαν συνεχής πηγή ρεύματος. Η V_{dc} είναι η τάση του ζυγού και C_{DC} η χωρητικότητα εξόδου του μετατροπέα. Στην αυτόνομη λειτουργία η παράγωγος της τάσης ζυγού προκύπτει:

$$\frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \left[(1-k) I_d - \frac{1}{R_o} V_{dc}(t) \right]$$

Η λύση της εξίσωσης ως προς την τάση ζυγού προκύπτει ως:

$$V_{dc}(t) = (1-k) I_d R_o + [(V_{dc} - R_o (1-k) I_d) e^{-t/(R_o C_{dc})}] ,$$

όπου η τάση V_{dc} είναι η τάση πριν την μετάβαση στην αυτόνομη λειτουργία (τάση δικτύου).

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται πως όταν ο παράγοντας k αυξάνεται, ο χρόνος ανίχνευσης μειώνεται. Ωστόσο όσο μεγαλύτερο το k τόσο μεγαλύτερη η διαταραχή του ρεύματος άρα μικρότερη αποδοτικότητα του MPPT του φωτοβολταϊκού.

Όσον αφορά την συχνότητα της διαταραχής που εισάγεται, μεγαλύτερη συχνότητα σημαίνει και μικρότερη αποδοτικότητα του MPPT. Το ίδιο ισχύει και για την διάρκεια της διαταραχής. Συνεπώς η επιλογή των παραμέτρων του ρεύματος διαταραχής θα πρέπει να επιλεγούν λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητα του MPPT.

6 Πειραματικά σενάρια για τον έλεγχο του μικροδικτύου

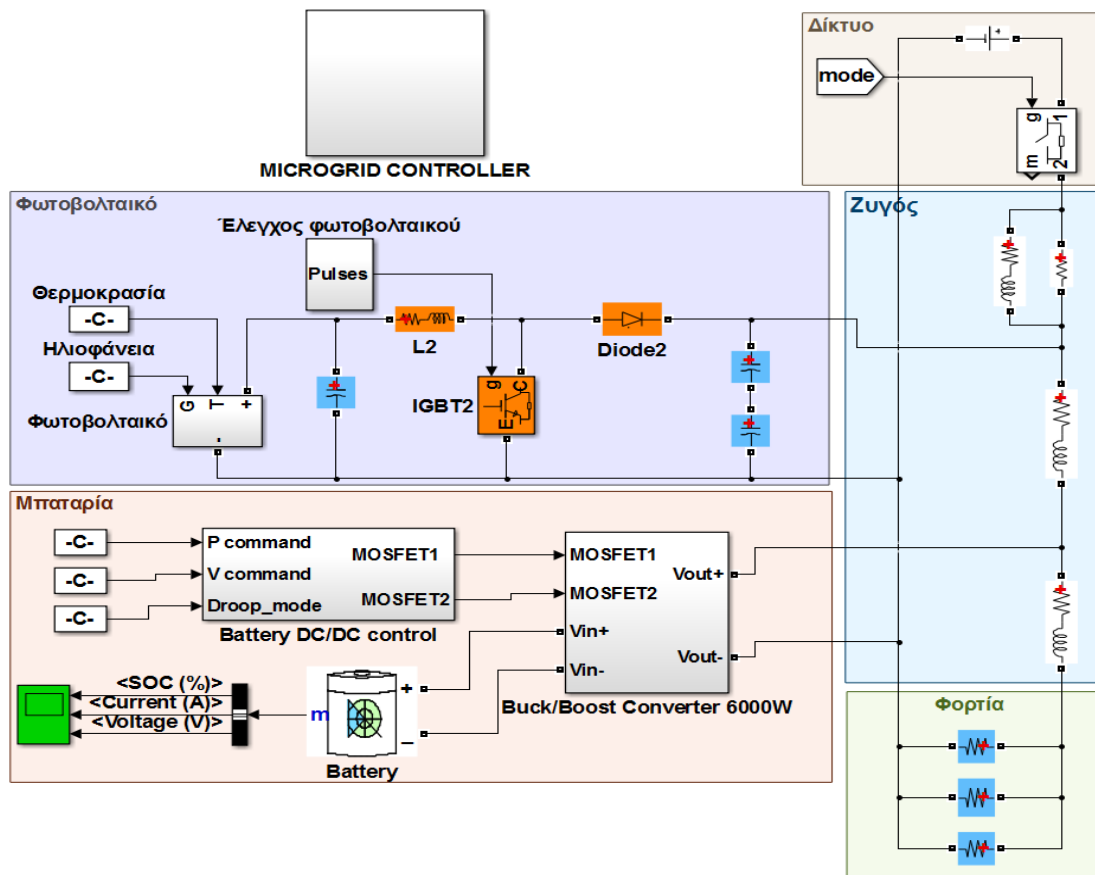
6.1 Το μικροδίκτυο στο Matlab/Simulink

Το μικροδίκτυο αποτελείται από μία μπαταρία μαζί με τον αμφίδρομο μετατροπέα ανύψωσης/υποβιβασμού συνεχούς τάσης, ένα φωτοβολταϊκό σύστημα μαζί με τον μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης, ωμικά φορτία που αποτελούν τους καταναλωτές του μικροδικτύου, το δίκτυο που αποτελείται από μία πηγή τάσης DC, τον ζυγό με τις απώλειες γραμμής τύπου RL με τιμές $R = 0,32/4 \Omega$ και $L = (0.17e-3)/4 H$ και τον κεντρικό έλεγχο του μικροδικτύου (MGCC), ο οποίος είναι υπεύθυνος για όλες τις λειτουργίες του μικροδικτύου, τόσο σε αυτόνομη λειτουργία όσο και στην σύνδεση με το δίκτυο.

Το μικροδίκτυο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Τάση ζυγού	380 Volts
Τάση δικτύου	390 Volts
Περίοδος προσομοίωσης	1μsec

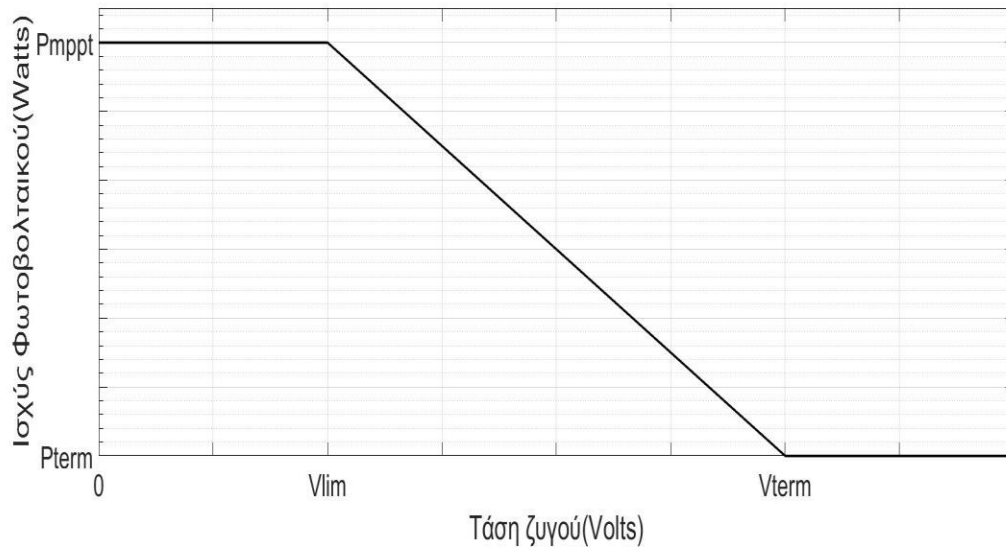
Η περίοδος της προσομοίωσης ορίζεται στον 1μsec το οποίο σηματοδοτεί πως οποιοσδήποτε έλεγχος στις επιμέρους μονάδες θα πρέπει να είναι ίσης ή μεγαλύτερης περιόδου από αυτήν της προσομοίωσης. Ο έλεγχος συνήθως θα πρέπει να είναι πιο αργός από τον πραγματικό χρόνο, τόσο για να μην είναι επιρρεπής σε σφάλματα όσο και για την καλύτερη απόκριση του συστήματος μέσω της συλλογής δεδομένων στον χρόνο αυτό της καθυστέρησης.



Εικόνα 6.1 : Το μικροδίκτυο συνολικά στο Matlab/Simulink.

6.2 Καμπύλη droop φωτοβολταϊκού

Ο ρόλος της καμπύλης droop είναι ο καταμερισμός της ισχύος μεταξύ των μονάδων παραγωγής και η διαμόρφωση της εγχεόμενης ισχύς με βάση την τάση του ζυγού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το φωτοβολταϊκό αποτελεί την μοναδική μονάδα παραγωγής. Συνεπώς η καμπύλη χρησιμοποιείται για να μειωθεί η παραγωγή ισχύος όταν η τάση ξεπεράσει κάποιο επιθυμητό επίπεδο τάσης και κατ' επέκταση τον μηδενισμό της στην περίπτωση όπου η τάση ξεπεράσει τα όρια λειτουργίας. Η ιδανική καμπύλη droop φαίνεται στην εικόνα 6.2:



Εικόνα 6.2 : Καμπύλη droop του φωτοβολταϊκού.

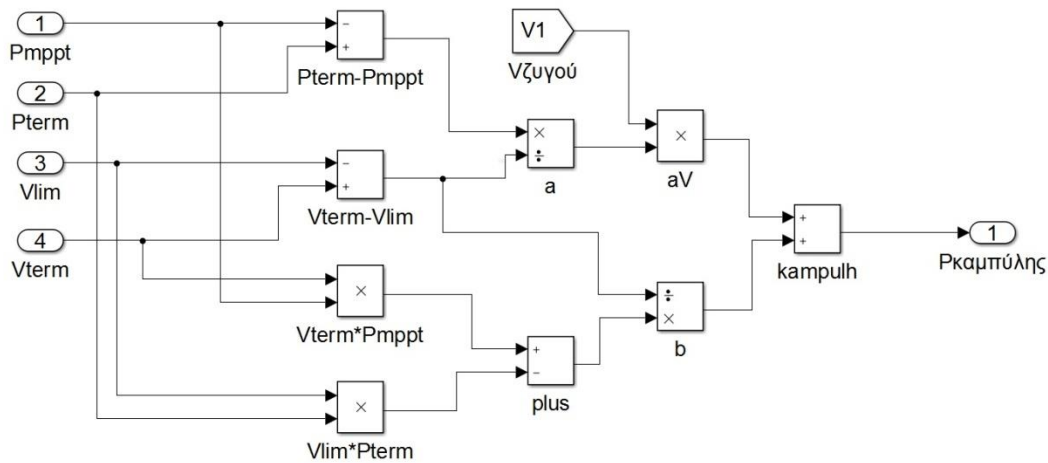
Περιγράφεται από την εξίσωση:

$$P_{out} = P_{mppt} \quad , \text{ για } V < V_{lim}$$

$$P_{out} = \frac{P_{term} - P_{mppt}}{V_{term} - V_{lim}} V + \frac{V_{term} * P_{mppt} - V_{lim} * P_{term}}{V_{term} - V_{lim}} \quad , \text{ για } V \geq V_{lim}$$

Στην παραπάνω σχέση η ισχύς P_{mppt} είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει το φωτοβολταϊκό στην μέγιστη ηλιοφάνεια. Συνεπώς περιμένουμε το φωτοβολταϊκό σε μέγιστη ηλιοφάνεια να έχει την συμπεριφορά της παραπάνω καμπύλης. Σε χαμηλότερες ηλιοφάνειες θέλουμε το φωτοβολταϊκό να προσαρμόζει την ισχύ του στην καμπύλη, μόνο όταν η παραγόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού ξεπερνά την καμπύλη droop. Αυτό φαίνεται καλύτερα και στις ακόλουθες πειραματικές δοκιμές.

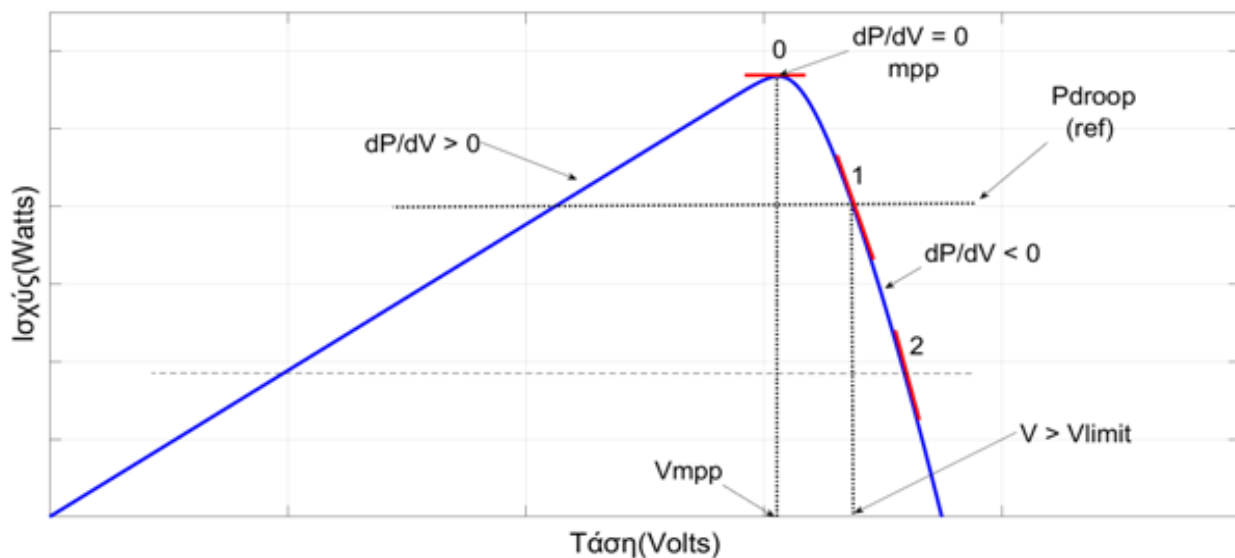
Τα υπόλοιπα δεδομένα P_{term} , V_{term} , V_{lim} προσαρμόζονται από τον χρήστη ανάλογα με τις ανάγκες του μικροδικτύου και του αντίστοιχου ελέγχου. Να σημειωθεί πως όσο μικρότερη η διαφορά τάσης μεταξύ V_{lim} και V_{term} τόσο πιο γρήγορη η πτώση της ισχύος του φωτοβολταϊκού. Από την άλλη μεγαλύτερη διαφορά τάσης σημαίνει και καλύτερη ευστάθεια του συστήματος. Συνεπώς θα πρέπει να γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ κλίσης της καμπύλης και ευστάθειας. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η υλοποίηση της καμπύλης droop στο Simulink.



Εικόνα 6.3 : Υλοποίηση της καμπύλης droop στο Matlab/Simulink.

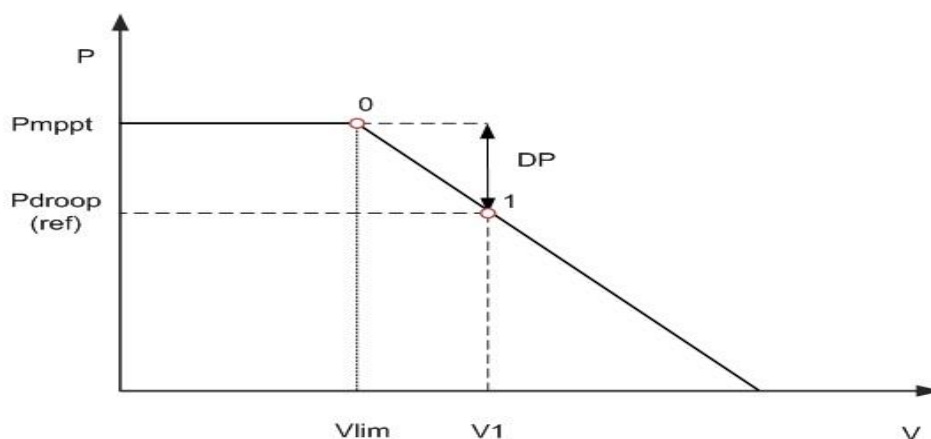
6.2.1 Πρώτος τρόπος υλοποίησης του ελέγχου με βάση την καμπύλη droop

Αρχικά η περίοδος του ελέγχου droop του φωτοβολταϊκού ορίστηκε στα 10μsec, το οποίο σημαίνει πως ο έλεγχος είναι δέκα φορές πιο αργός από την περίοδο της προσομοίωσης. Στον πρώτο τρόπο ως μεταβλητή ελέγχου του φωτοβολταϊκού ορίστηκε η κλίση της καμπύλης ισχύος του φωτοβολταϊκού DP/DV. Επιθυμητά σημεία λειτουργίας είναι τα σημεία της καμπύλης του φωτοβολταϊκού πέρα από το MPP, δηλαδή με αρνητική κλίση όπως φαίνεται και στην εικόνα. Αυτό κρίνεται ως αναγκαίο γιατί η ισχύς εκεί έχει πιο απότομη κλίση και μπορούμε να έχουμε πιο ραγδαία μείωση της ισχύος στην περίπτωση που έχουμε ραγδαία αύξηση της τάσης.



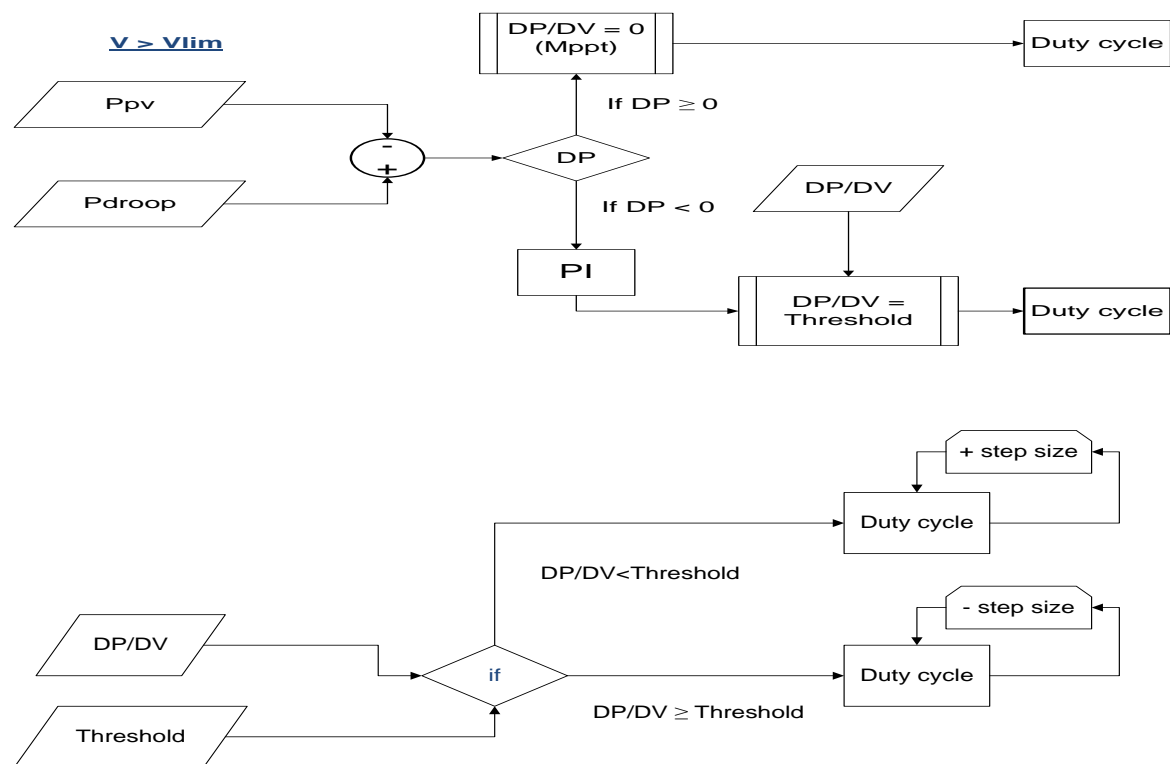
Εικόνα 6.4 : Χαρακτηριστική καμπύλη P-V.

Η αρχή λειτουργίας αυτής της υλοποίησης έχει ως εξής: το φωτοβολταϊκό βρίσκεται σε λειτουργία MPPT και όταν η τάση ανέβει πάνω από το V_{lim} , τότε γίνεται η υλοποίηση της droop. Πιο αναλυτικά στην εικόνα 6.5 βρισκόμαστε στο σημείο 0 με ισχύ P_{mppt} και τάση μικρότερη ή ίση της V_{lim} . Εφ' όσον βρισκόμαστε στο σημείο μέγιστης ισχύος, η κλίση της καμπύλης DP/DV με βάση την χαρακτηριστική καμπύλη P-V (εικόνα 6.4) θα έχει τιμή 0. Έστω ότι η τάση ζυγού αυξάνεται μέχρι την τάση V_1 . Με βάση την καμπύλη droop (εικόνα 6.5) θα πρέπει και η ισχύς του φωτοβολταϊκού να πέσει μέχρι το νέο σημείο λειτουργίας να είναι το 1.



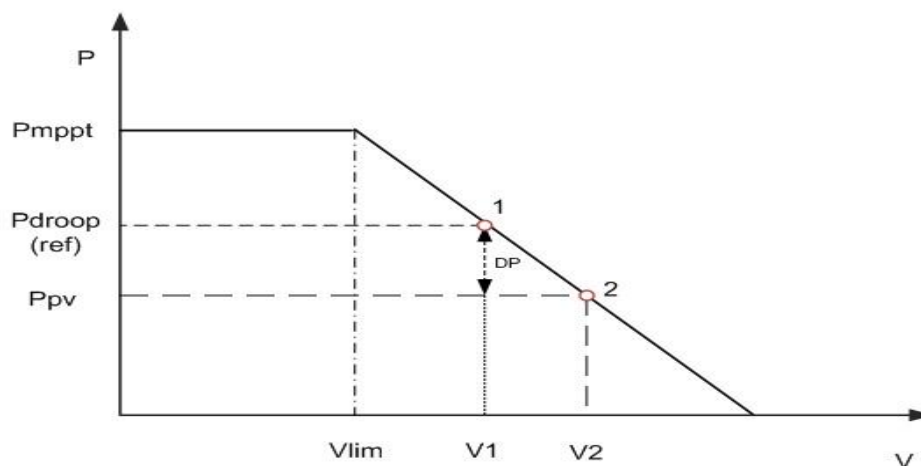
Εικόνα 6.5 : Σημεία λειτουργίας 0 και 1 του φωτοβολταϊκού με βάση την καμπύλη droop.

Αυτό επιτυγχάνεται χαλώντας την ισορροπία και δίνοντας στην κλίση DP/DV της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V του φωτοβολταϊκού, την αρνητική κλίση που αναλογεί στο σημείο 1(εικόνα 6.4). Υπολογίζεται η διαφορά της ισχύος μεταξύ των δύο σημείων 0 και 1 ως DP(εικόνα 6.5), η οποία με βάση την υλοποίηση στο Simulink(εικόνα 6.6) προκύπτει αρνητική, εξασφαλίζοντας την αρνητική κλίση. Αυτή η αρνητική ποσότητα DP μέσω του PI controller εισάγεται ως κλίση αναφοράς (THRESHOLD) του φωτοβολταϊκού και είναι μικρότερη από την κλίση που είχε στο σημείο 0 ($DP/DV = 0$). Συνεπώς το duty cycle με βάση την υλοποίηση (εικόνα 6.6) μειώνεται μέχρι η κλίση DP/DV να γίνει ίση με την αρνητική αυτή ποσότητα. Το σύστημα φτάνει σε ισορροπία όταν η έξοδος του PI γίνει σταθερή, οπότε και η ισχύς του φωτοβολταϊκού να γίνει η επιθυμητή, $P_{pv} = P_{droop}$. Να σημειωθεί πως όταν συναντηθεί το επιθυμητό σημείο, η ισχύς εξόδου θα ταλαντώνεται γύρω από το σημείο αυτό που αποτελεί χαρακτηριστικό της μεθόδου perturb and observe.



Εικόνα 6.6 : Διάγραμμα λογικής για τον υπολογισμό του επιθυμητού duty cycle.

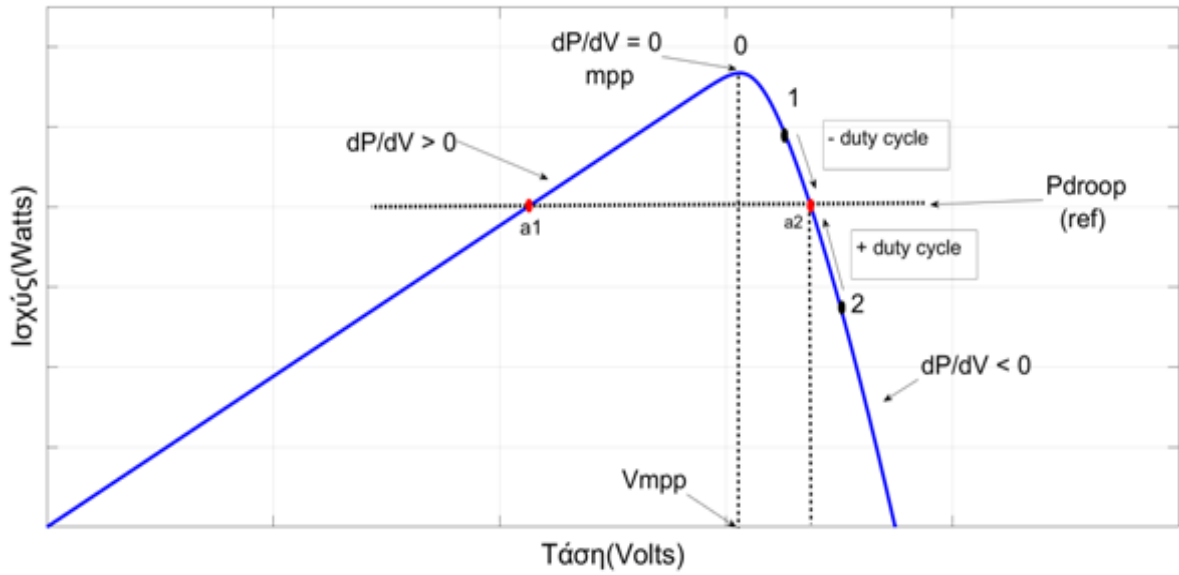
Αν υποθέσουμε πως βρισκόμαστε στο σημείο 2 (εικόνα 6.7) με τάση V_2 και ύστερα από πτώση τάσης ο ζυγός βρίσκεται στην V_1 , τότε σύμφωνα με την καμπύλη droop θα πρέπει να αυξηθεί και η παραγωγή του φωτοβολταϊκού για να συναντήσει το σημείο 1. Αυτό επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό του DP και με βάση την υλοποίηση (εικόνα 6.6), το DP θα είναι θετικό. Αμέσως δίνεται η εντολή το φωτοβολταϊκό να λειτουργήσει σε MPPT μέχρι να συναντήσει το σημείο 1. Εάν το ξεπεράσει το σημείο, τότε το DP προκύπτει αρνητικό και επαναλαμβάνεται η διαδικασία όπως περιγράφηκε παραπάνω. Οπότε η ισχύς εξόδου εν τέλει, ταλαντώνεται γύρω από την ισχύ στο σημείο 1. Στην περίπτωση όπου έχουμε μικρότερη ηλιοφάνεια και η ισχύς του φωτοβολταϊκού δεν επαρκεί για να συναντήσει το σημείο 1, το φωτοβολταϊκό θα δίνει την μέγιστη ισχύ του αφού θα έχουμε συνεχώς DP θετικό οπότε και λειτουργία MPPT.



Εικόνα 6.7 : Σημεία λειτουργίας 1 και 2 με βάση την καμπύλη droop.

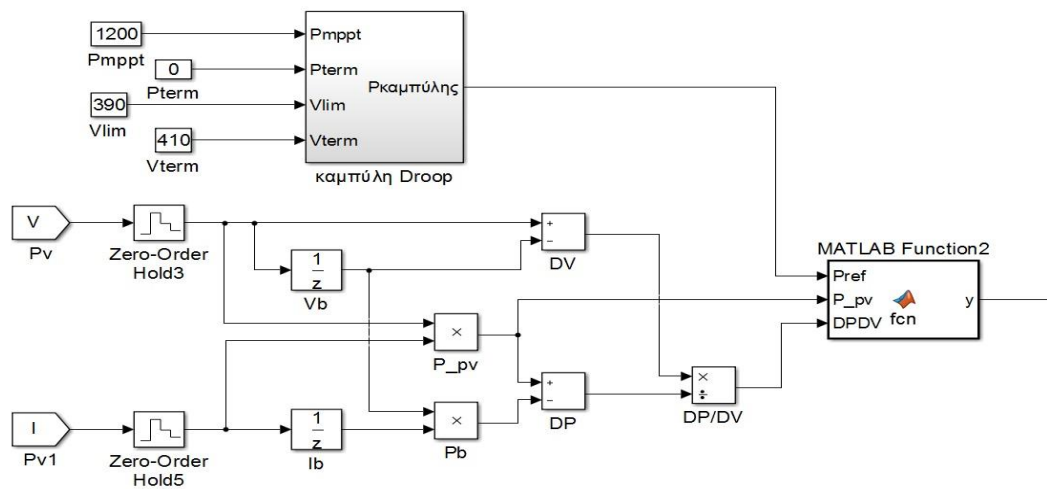
6.2.1 Δεύτερος τρόπος υλοποίησης του ελέγχου με βάση την καμπύλη droop

Η περίοδος του ελέγχου και σε αυτήν την υλοποίηση ορίστηκε στα 10μsec. Στην δεύτερη υλοποίηση γίνεται η σύγκριση μεταξύ της ισχύος του φωτοβολταϊκού και της επιθυμητής τιμής και ανάλογα την διαφορά μεταξύ τους αλλάζει αντίστοιχα το duty cycle του φωτοβολταϊκού. Και πάλι με βάση την καμπύλη P-V (εικόνα 6.8), θέλουμε να δουλεύουμε πέρα από το σημείο MPP, εκεί που η κλίση της καμπύλης είναι αρνητική.



Εικόνα 6.8 : Χαρακτηριστική καμπύλη P-V.

Αυτή η υλοποίηση παρουσίασε καλύτερη ευστάθεια στο μικροδίκτυο οπότε και χρησιμοποιήθηκε στα παρακάτω πειράματα. Η υλοποίησή του στο matlab/Simulink φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6.9 : Υλοποίηση του ελέγχου droop στο Matlab/Simulink.

Η ισχύς της καμπύλης droop, η πραγματική ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού και η κλίση της καμπύλης DP/DV εισάγονται σε έναν αλγόριθμο.

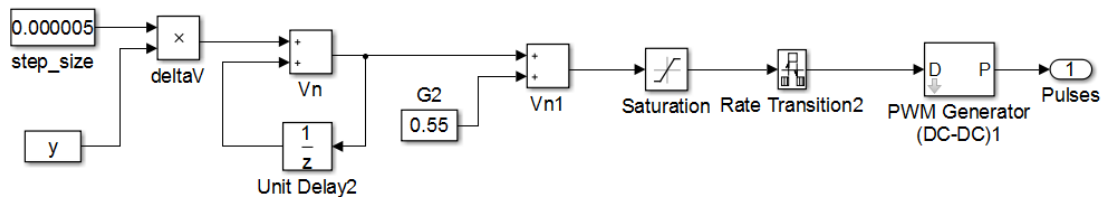
```

1 function y = fcn(Pref,P_pv,DPDV)
2   if (DPDV > 0)
3     y = -1;
4   else
5     if (P_pv >= Pref)
6       y = -1;
7     else
8       y = 1;
9     end
10  end
11 end

```

Εικόνα 6.10 : Αλγόριθμος ελέγχου droop.

Ο αλγόριθμος αρχικά υπολογίζει την κλίση για να σιγουρευτεί πως η περιοχή λειτουργίας είναι η αυτή με αρνητική κλίση. Έπειτα συγκρίνει κάθε φορά την ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού με την ισχύ της καμπύλης droop και μεταβάλλει ανάλογα το duty cycle που καταλήγει στο mosfet του μετατροπέα.



Εικόνα 6.11 : Διαμόρφωση του dutycycleγια τον μετατροπέα ανύψωσης του φωτοβολταϊκού στο Matlab/Simulink.

Με την βοήθεια της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V η υλοποίηση αυτή δουλεύει ως εξής: έστω ότι δίνεται μία ισχύς αναφοράς με βάση την καμπύλη droop. Αυτή δίνεται ως Pref και τέμνει την καμπύλη του φωτοβολταϊκού σε δύο σημεία έστω α_1 και α_2 (εικόνα 6.8). Όπως έχει αναφερθεί επιθυμητό σημείο λειτουργίας είναι το α_2 εφόσον έχει αρνητική κλίση. Οπότε για να αποκλείσουμε το σημείο α_1 υπολογίζεται η κλίση του σημείου λειτουργίας μέσω του αλγόριθμου(εικόνα 6.10) και αν είναι θετική, ο αλγόριθμος δίνει σαν έξοδο την τιμή $y = -1$ που αντιστοιχεί στην μείωση του duty cycle μέχρι να φτάσει στο mppt και ύστερα στις αρνητικές κλίσεις της καμπύλης. Φτάνοντας στο σημείο 1 (εικόνα 6.8) και υπολογίζοντας πως η επιθυμητή ισχύς(Pref) είναι μικρότερη από την ισχύ εξόδου(P_pv), το duty cycle συνεχίζει να μειώνεται ($y = -1$) μέχρι να συμπέσει στο επιθυμητό σημείο, όπου και το φωτοβολταϊκό ταλαντώνεται γύρω από το νέο σημείο. Αν βρισκόμαστε στο σημείο 2,

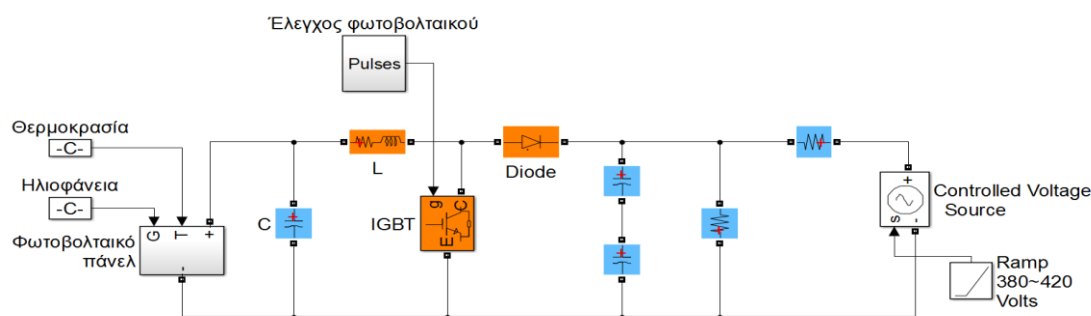
όπου η ισχύς εξόδου είναι μικρότερη από την επιθυμητή, δίνεται η εντολή να αυξηθεί το duty cycle ($y=1$) μέχρι να συμπέσει στην επιθυμητή ισχύ P_{ref} (εικόνα 6.8). Εν τέλει η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού θα ταλαντώνεται γύρω από το επιθυμητό σημείο λειτουργίας.

Με τα δεδομένα που δίνονται στον παρακάτω πίνακα υλοποιήθηκε η καμπύλη droop του φωτοβολταϊκού για τα πειραματικά δεδομένα.

Μεγέθη	Τιμές
P_{mppt}	1200 Watt
P_{term}	0 Watt
V_{lim}	385 Volts
V_{term}	415 Volts

6.3 Πειραματικά αποτελέσματα του ελέγχου droop του φωτοβολταϊκού για διαφορετικές ηλιοφάνειες

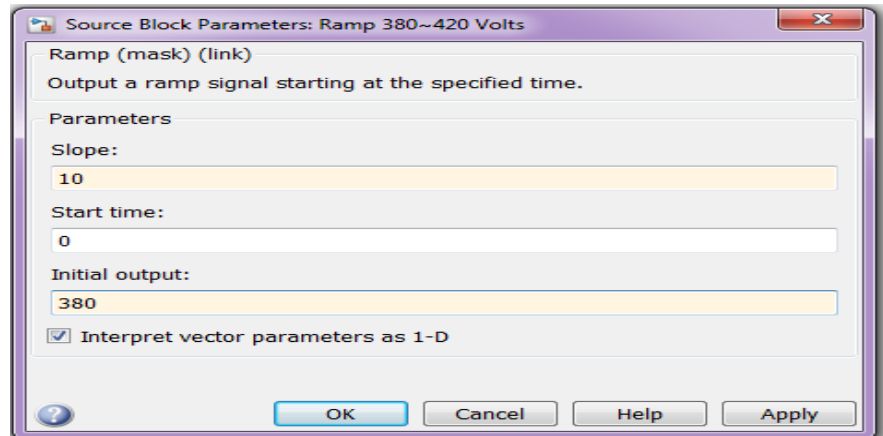
Το πείραμα διακρίνεται σε δύο δοκιμές. Η πρώτη αποτελεί προσομοίωση της περίπτωσης όπου η τάση αυξάνεται ξεπερνώντας το όριο λειτουργίας, ενώ η δεύτερη δείχνει την επανασύνδεση του φωτοβολταϊκού στην παραγωγή ισχύος καθώς η τάση του ζυγού τείνει προς την ονομαστική.



Εικόνα 6.12 : Φωτοβολταϊκό σε σύνδεση με ελεγχόμενη πηγή τάσης.

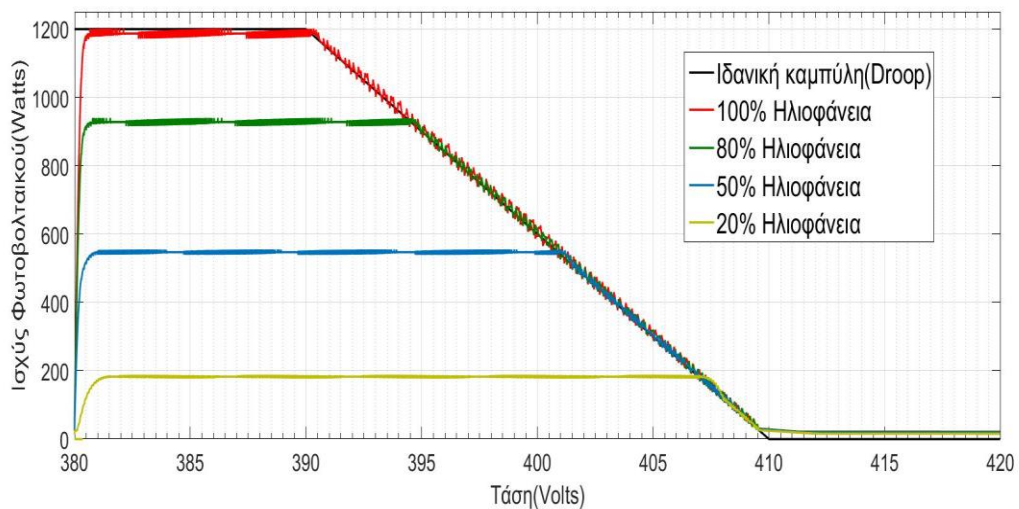
Στην πρώτη δοκιμή, η θερμοκρασία ορίστηκε $T = 25^{\circ}\text{C}$ και ηλιοφάνειες όπως δίνονται στον πίνακα παρακάτω, ενώ η ράμπα ρυθμίστηκε να ανεβάζει την τάση της ελεγχόμενης πηγής με ρυθμό (slope) 10Volts/sec και αρχική τάση τα 380Volts .

Ηλιοφάνειες	Τιμές
G ₁	1000
G ₂	800
G ₃	500
G ₄	200



Εικόνα 6.13 : Ηλιοφάνειες - Παράμετροι της ελεγχόμενης πηγής τάσης.

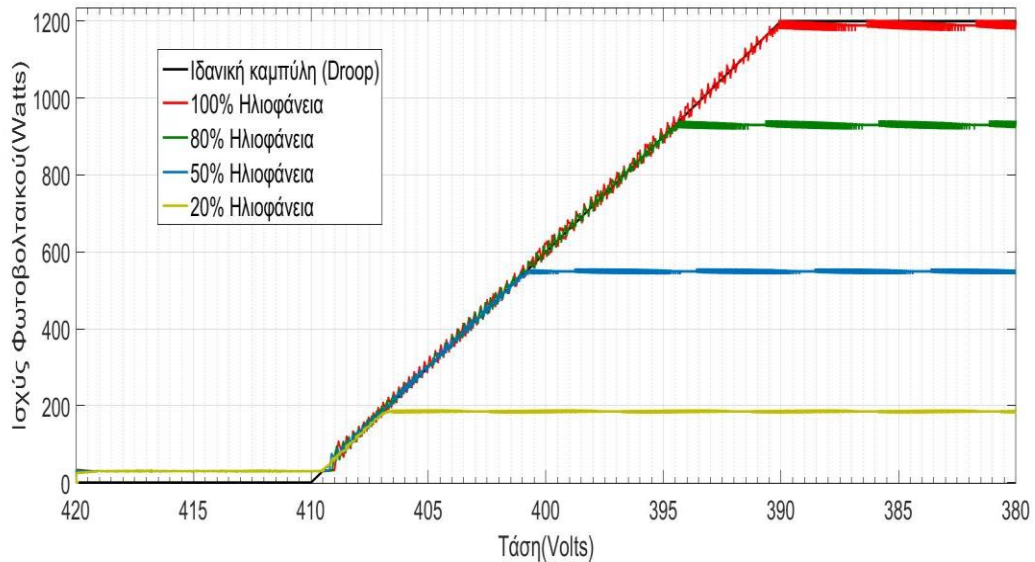
Με την εκκίνηση του πειράματος, καθώς αυξάνεται η τάση ζυγού, το φωτοβολταϊκό προσαρμόζει την ισχύ εξόδου του ανάλογα με την καμπύλη droop. Παρατηρούμε πως για μικρότερες ηλιοφάνειες, η ισχύς εξόδου συναντά την καμπύλη droop σε μεγαλύτερες τάσεις.



Εικόνα 6.14 : Ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού με έλεγχο droop σε αύξηση της τάσης για διαφορετικές ηλιοφάνειες.

Στην δεύτερη δοκιμή ορίζεται ίδια θερμοκρασία $T = 25^{\circ}\text{C}$ και ηλιοφάνειες αντίστοιχες με την πρώτη δοκιμή. Η ελεγχόμενη πηγή τάσης σε αυτή την δοκιμή έχει αρχική τάση 420 Volts και ρυθμό πτώσης τάσης 10Volts/sec. Σκοπός αυτής της δοκιμής είναι να παρατηρήσουμε πως ενεργοποιείται το φωτοβολταϊκό παράγοντας ισχύ σε συνάρτηση με την πτώση της τάσης. Με την εκκίνηση του πειράματος, η τάση του ζυγού μειώνεται και αντίστοιχα το φωτοβολταϊκό αυξάνει σε συνάρτηση με

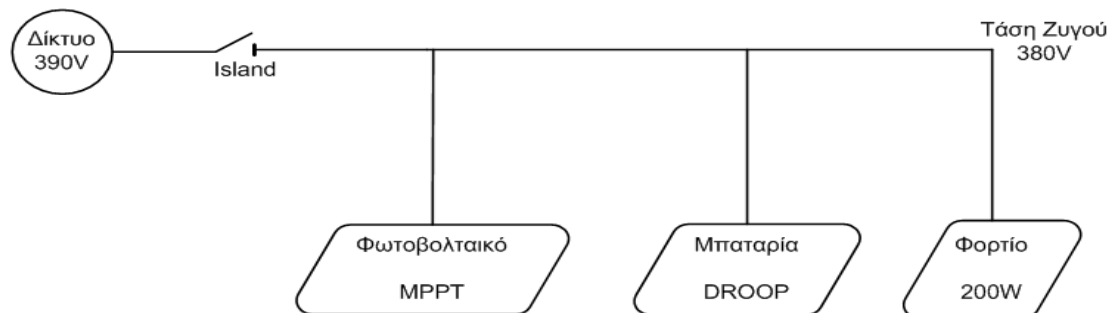
την droop την ισχύ του. Όπως και στο πρώτο πείραμα για διαφορετικές ηλιοφάνειες παρατηρούμε πως στην περίπτωση που η ισχύς εξόδου δεν είναι αρκετή για να συναντήσει την καμπύλη droop, το φωτοβολταϊκό δίνει την μέγιστη ισχύ του.



Εικόνα 6.15 : Ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού με έλεγχο droop σε πτώση της τάσης για διαφορετικές ηλιοφάνειες.

6.4 Συμβολή της καμπύλης droop του φωτοβολταϊκού στο μικροδίκτυο

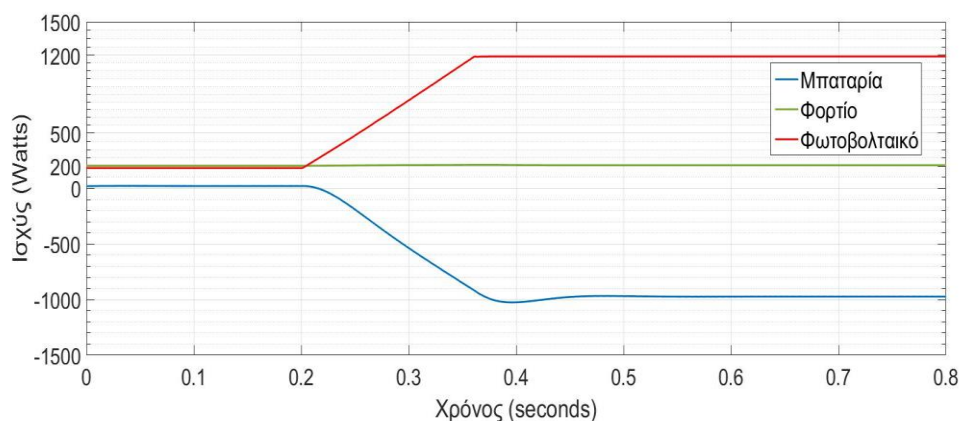
Το επόμενο σενάριο πραγματοποιείται για να δειχθεί η συμβολή της καμπύλης droop του φωτοβολταϊκού στο μικροδίκτυο συνολικά, κατά την αυτόνομη λειτουργία του. Το σενάριο αποτελείται από δύο δοκιμές.



Εικόνα 6.16 : Σενάριο μικροδικτύου χωρίς έλεγχο droop.

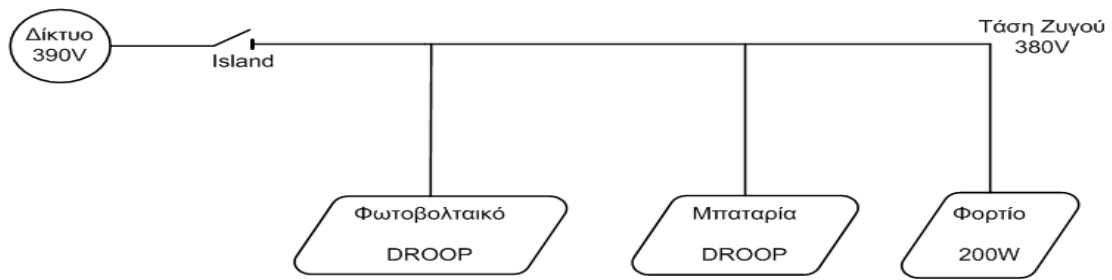
Κατά την πρώτη δοκιμή (εικόνα 6.16) ονομαστική τάση του ζυγού είναι τα 380Volts και το φορτίο του μικροδικτύου ορίζεται στα 200Watts μέσω της σχέσης $R = \frac{V*V}{P} = \frac{380V*380V}{200W} = 722\Omega$ ωμικής αντίστασης. Η droop της μπαταρίας έχει οριστεί ώστε όταν η μπαταρία δεν δίνει ούτε απορροφά ισχύ να παράγει τάση 385Volts.

Το φωτοβολταϊκό λειτουργεί σε mppt, συνεπώς δίνει την μέγιστη ισχύ του ανεξάρτητα από την τάση του ζυγού. Η ηλιοφάνεια του φωτοβολταϊκού ορίζεται αρχικά ως $G_1 = 200$ και σε χρόνο 0,2 seconds φτάνει στην μέγιστη ηλιοφάνεια $G_2 = 1000$ αποδίδοντας μέγιστη ισχύ. Η θερμοκρασία για το πείραμα παραμένει $T = 25^\circ C$.



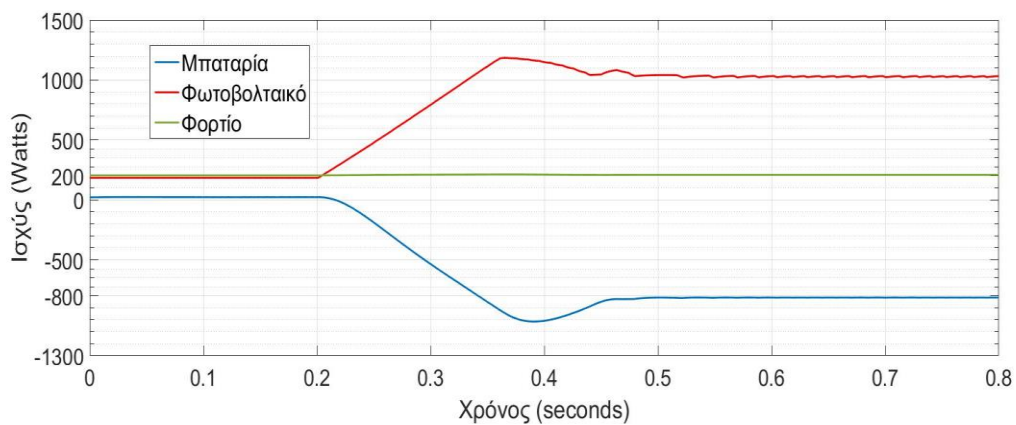
Εικόνα 6.17 : Ισοζύγιο ισχύος χωρίς έλεγχο droop.

Αρχικά όπως φαίνεται στην εικόνα 6.17, λόγω της μειωμένης ηλιοφάνειας η ισχύς που αποδίδει το φωτοβολταϊκό είναι στα 200Watts και είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει το φορτίο. Η μπαταρία δεν δίνει ούτε απορροφά ισχύ οπότε και η τάση του ζυγού διαμορφώνεται στα 385Volts. Μετά από 0,2 seconds το φωτοβολταϊκό φτάνει σε μέγιστη ηλιοφάνεια, αποδίδοντας 1200Watts και δημιουργείται μία περίσσεια ισχύος 1000Watts. Η μπαταρία απορροφά αυτή την περίσσεια ισχύος και με βάση την καμπύλη droop διαμορφώνει την τάση του ζυγού στα 390 Volts.



Εικόνα 6.18 : Σενάριο μικροδικτύου με έλεγχο droop.

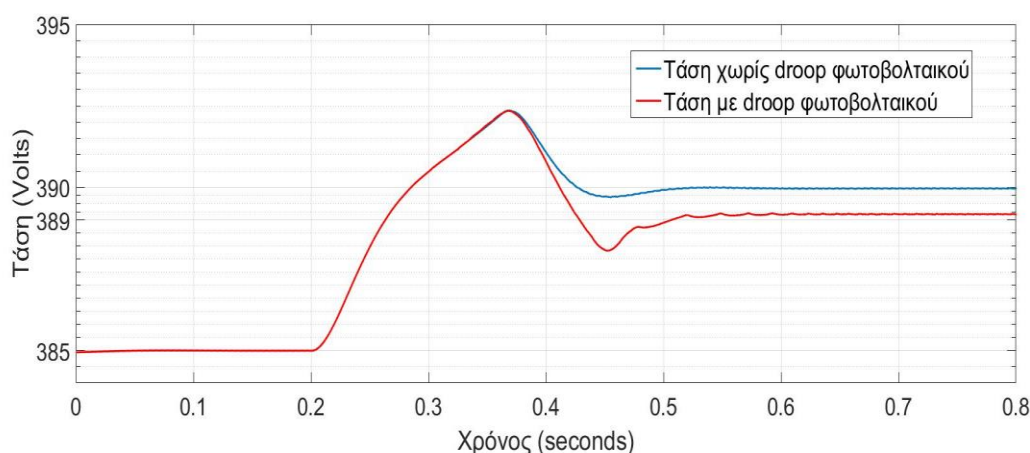
Στην δεύτερη δοκιμή πραγματοποιείται το πείραμα με τις ίδιες παραμέτρους, με μόνη διαφορά το φωτοβολταϊκό όπου τοποθετείται σε λειτουργία droop ώστε να ρίξει την παραγωγή του σε αυξημένη τάση του ζυγού. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ο έλεγχος droop ενεργοποιείται για τάση ζυγού πάνω από τα 385Volts.



Εικόνα 6.19 : Ισοζύγιο ισχύος με έλεγχο droop.

Και σε αυτή την περίπτωση, λόγω της μειωμένης ηλιοφάνειας αρχικά έχουμε την παραγωγή ισχύος στα 200Watts όπου και καλύπτει τις ανάγκες του φορτίου. Την χρονική στιγμή 0,2 seconds έχουμε μέγιστη ηλιοφάνεια και το φωτοβολταϊκό αποδίδει μέγιστη ισχύ 1200Watts, δημιουργώντας έτσι μία περίσσεια ισχύος 1000watts στα 0,35 seconds. Με βάση την καμπύλη droop της μπαταρίας θα φτιάξει τάση ζυγού 390Volts. Έχοντας όμως ξεπεράσει το όριο της καμπύλης droop του φωτοβολταϊκού στα 385 volts, το φωτοβολταϊκό μειώνει την ισχύ του και αποδίδει εν τέλει 1000Watts. Συνεπώς η τελική περίσσεια ισχύος που δημιουργείται είναι 800Watts και η μπαταρία απορροφώντας αυτή την ισχύ φτιάχνει τάση ζυγού στα 389 Volts. Σε μεγαλύτερες τάσεις, η μείωση της ισχύος του φωτοβολταϊκού και κατ'

επέκταση της τάσης ζυγού είναι πιο έντονη. Η διαφορά της διαμόρφωσης της τάσης στις πειραματικές δοκιμές φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

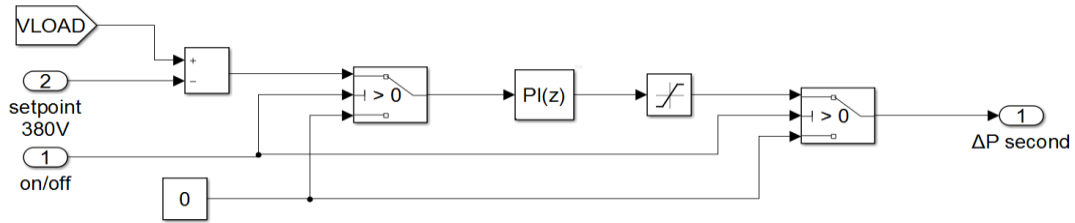


Εικόνα 6.20 : Τάση ζυγού μικροδικτύου χωρίς/με έλεγχο droop.

Από αυτές τις δοκιμές φαίνεται πως η καμπύλη droop του φωτοβολταϊκού συνεισφέρει στην διαμόρφωση της τάσης του ζυγού σαν πρωτογενής έλεγχος, όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε αυτόνομη λειτουργία. Το κέρδος από την καμπύλη droop στην τάση ζυγού είναι ένα Volt σε αυτή την πειραματική εκτέλεση. Ωστόσο με διαφορετικές παραμέτρους της καμπύλης, μπορούμε να πετύχουμε πιο δραστική μείωση στην τάση.

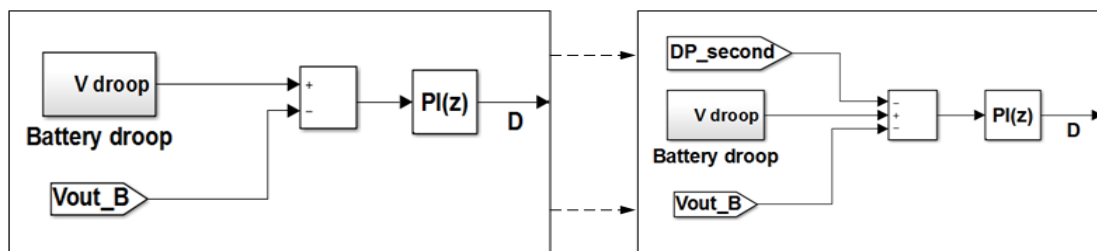
6.5 Δευτερογενής έλεγχος/διόρθωση τάσης

Για την διόρθωση των αποκλίσεων της τάσης που οφείλονται κυρίως στον πρωτογενή έλεγχο και για την βέλτιστη ποιότητα ισχύος, ο δευτερογενής έλεγχος είναι υπεύθυνος κατά την αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου. Η υλοποίηση για την διόρθωση της τάσης ζυγού στο matlab/Simulink βρίσκεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.21: Υλοποίηση της διόρθωσης τάσης στο matlab/Simulink.

Σε αυτόνομη λειτουργία, η βελτιστοποίηση της τάσης ζυγού γίνεται προς την μεριά των φορτίων ώστε να παρέχεται προς αυτά η μέγιστη δυνατή ποιότητα ισχύος. Η τάση ζυγού του μικροδικτύου είναι 380Volts οπότε αποτελεί την τάση αναφοράς για τον δευτερογενή έλεγχο. Η τάση αυτή (εικόνα 6.21) συγκρίνεται με την τάση του ζυγού κοντά στα φορτία και η διαφορά τους, μέσω ενός ελεγκτή PI, οδηγείται στον πρωτογενή έλεγχο της μπαταρίας.

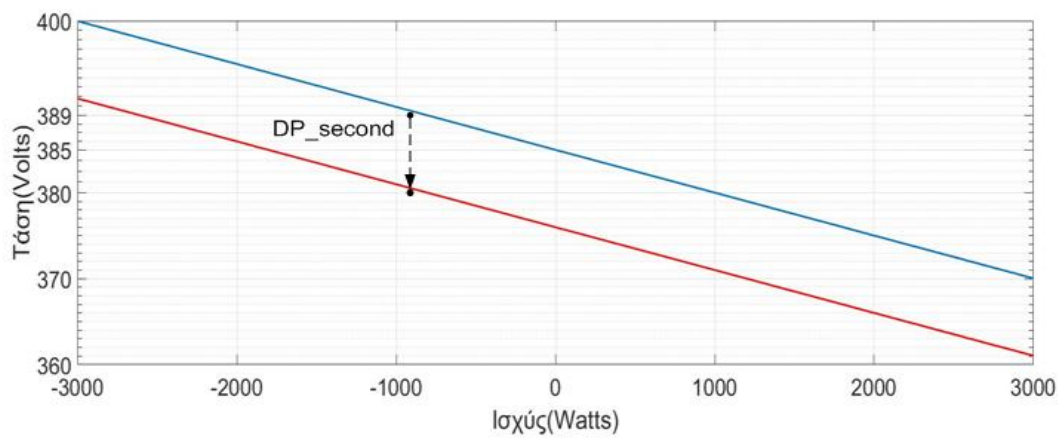


Εικόνα 6.22 : Εισαγωγή της διόρθωσης στο πρωτογενή έλεγχο droop της μπαταρίας στο matlab/Simulink.

Η μπαταρία, έχοντας ως νέα τάση αναφοράς το άθροισμα μεταξύ καμπύλης droop και διόρθωσης τάσης (εικόνα 6.22), θα φτιάξει την τάση που δίνεται ως αναφορά στον δευτερογενή έλεγχο. Εν κατακλείδι, ο δευτερογενής έλεγχος θα μετακινήσει την καμπύλη droop της μπαταρίας κάθετα μέχρι να συμπέσει στην επιθυμητή τάση λειτουργίας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.23.

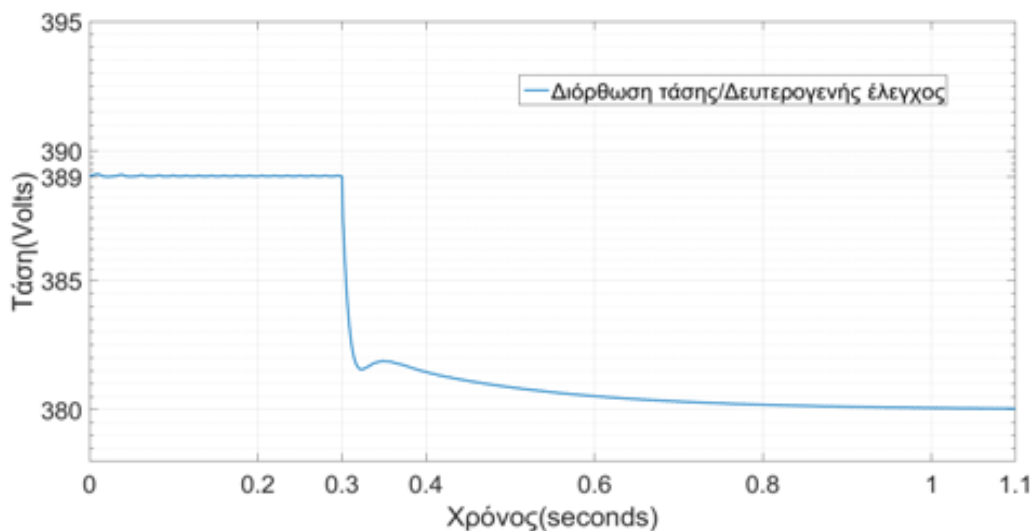
Για να δούμε την επίδραση του δευτερογενή ελέγχου στο μικροδίκτυο συνολικά, θεωρούμε το προηγούμενο σενάριο σαν αρχική κατάσταση συστήματος (κεφ. 6.4) και πάνω σε αυτό θα επαναφέρουμε την τάση ζυγού στην ονομαστική. Έχοντας

διαμορφωθεί η τάση στα 389 Volts και το ισοζύγιο ισχύος όπως φαίνεται στην εικόνα 6.25, σε χρόνο 0,3seconds ενεργοποιείται ο δευτερογενής έλεγχος.



Εικόνα 6.23 : Διαμόρφωση της droop της μπαταρίας από τον δευτερογενή έλεγχο.

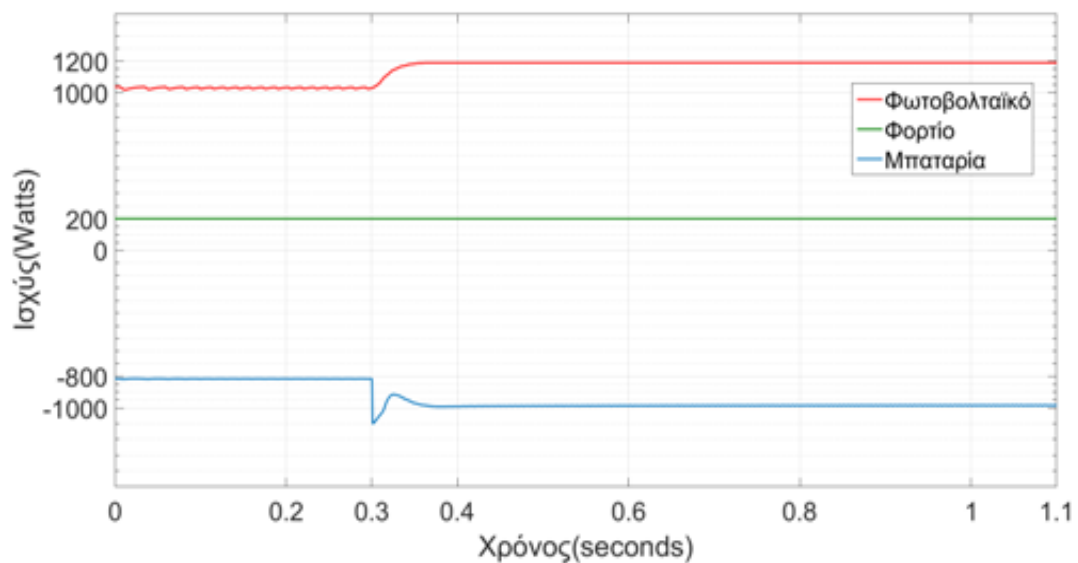
Μέσω του δευτερογενή ελέγχου η καμπύλη μετακινείται κατά DP_second, όπου είναι η διαφορά μεταξύ της τάσης του ζυγού 389Volts και της επιθυμητής 380Volts, διαμορφώνοντας έτσι την τάση ζυγού στα 380Volts.



Εικόνα 6.24 : Τάση μετά τον δευτερογενή έλεγχο.

Η τάση φτάνει την επιθυμητή σε χρόνο περίπου 0,7 seconds και το ισοζύγιο ισχύος διαμορφώνεται όπως φαίνεται στην εικόνα 6.25. Την χρονική στιγμή 0.3sec

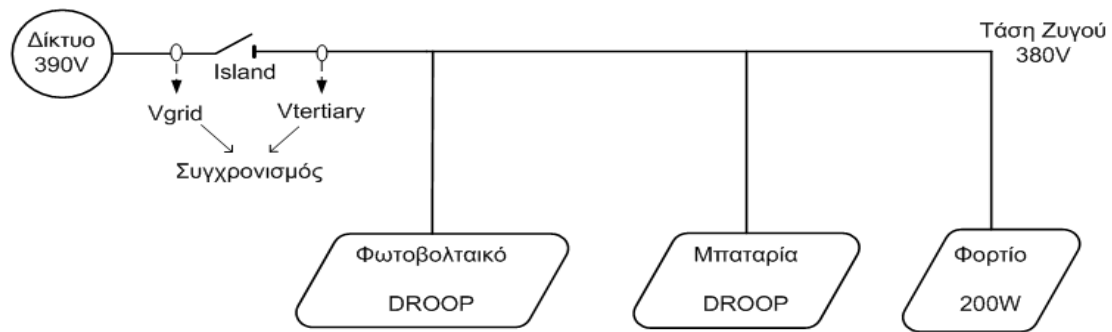
παρατηρείται η επαναφορά της ισχύος του φωτοβολταϊκού στην μέγιστη. Αυτό οφείλεται στην μείωση της τάσης του ζυγού και ξεπερνώντας τα 385Volts, που αποτελεί όριο για τον έλεγχο droop του φωτοβολταϊκού, ενεργοποιείται και πάλι η λειτουργία του MPPT για μέγιστη ισχύ. Συνεπώς μετά τον δευτερογενή έλεγχο το φωτοβολταϊκό παράγει 1200Watts και η μπαταρία απορροφά την περίσσεια ισχύος των 1000Watts.



Εικόνα 6.25 : Ισοζύγιο ισχύος στην διάρκεια του δευτερογενή ελέγχου.

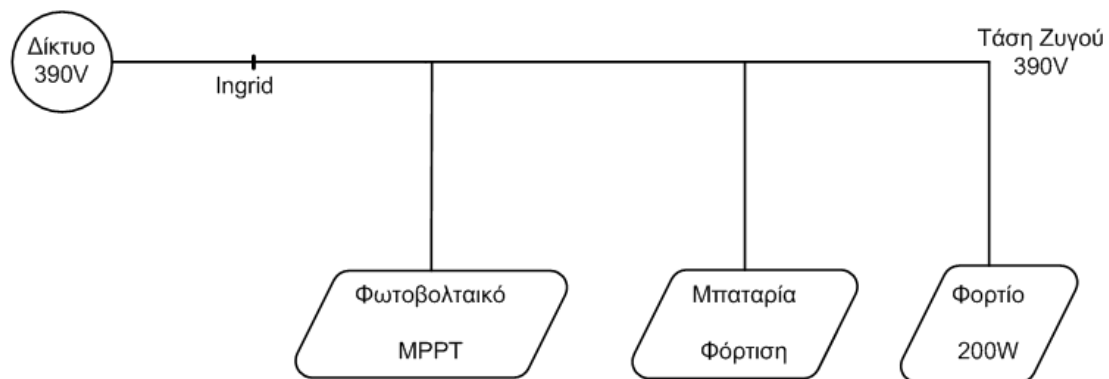
6.6 Σύνδεση του μικροδικτύου στο δίκτυο (seamless transition)

Για την σύνδεση στο δίκτυο, σε αυτόνομη λειτουργία ο δευτερογενής έλεγχος θα πρέπει να δώσει εντολή να συγχρονιστεί η τάση ζυγού με την τάση του δικτύου, προκειμένου να έχουμε μία ομαλή μετάβαση.



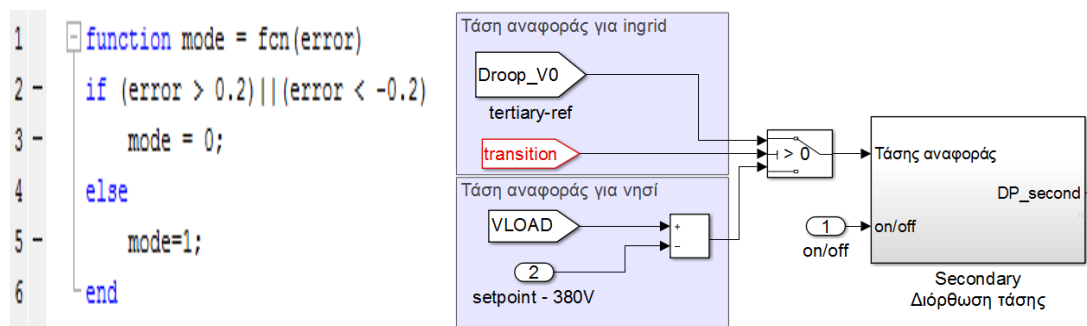
Εικόνα 6.26 : Συγχρονισμός τάσης μικροδικτύου για σύνδεση με δίκτυο.

Όταν η τάση ζυγού συγχρονιστεί με την τάση δικτύου, τότε μπορεί με ασφάλεια να κλείσει ο διακόπτης. Το φωτοβολταϊκό τότε λειτουργεί σε MPPT για μέγιστη ισχύ προς το δίκτυο, τα φορτία τροφοδοτούνται από το δίκτυο ενώ η μπαταρία είτε φορτίζει είτε είναι διαθέσιμη για οποιαδήποτε απαίτηση ισχύος του τριτογενή ελέγχου.



Εικόνα 6.27 : Μικροδίκτυο σε σύνδεση με το δίκτυο.

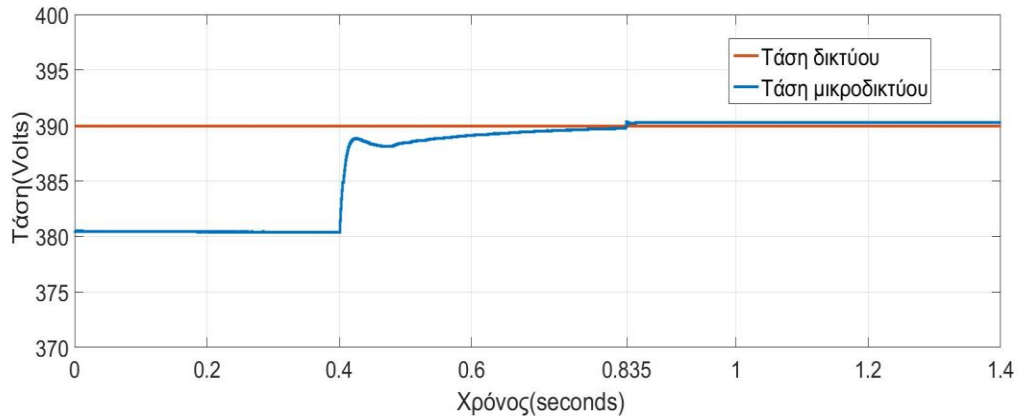
Για να την μετάβαση σε σύνδεση με το δίκτυο, ο δευτερογενής έλεγχος δίνει την νέα τάση αναφοράς η οποία είναι η τάση δικτύου 390Volts. Επειδή ο διακόπτης σύνδεσης με το δίκτυο βρίσκεται προς την μεριά του φωτοβολταϊκού και μακριά από τα φορτία (εικόνα 6.26), σαν τάση σύγκρισης επιλέγεται η τάση του ζυγού κοντά στον διακόπτη για να ελαττωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο το σφάλμα λόγω απωλειών της γραμμής. Η υλοποίηση στο matlab/Simulink για την σύνδεση στο δίκτυο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



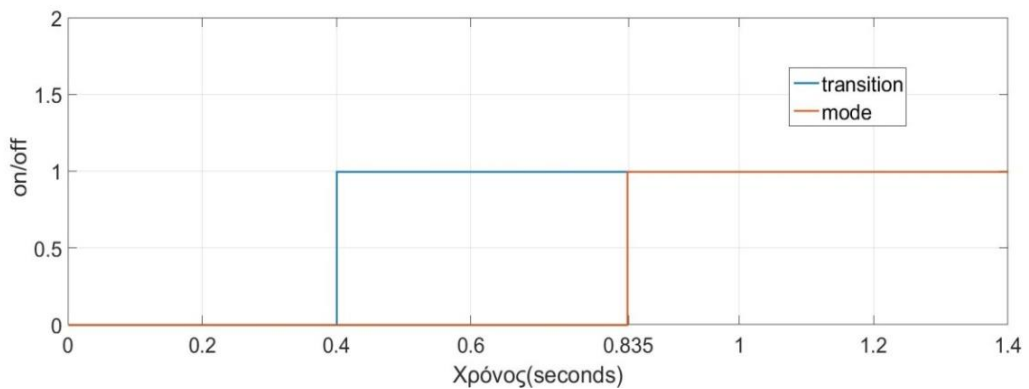
Εικόνα 6.28 : Υλοποίηση της μετάβασης στο δίκτυο στο matlab/Simulink.

Η αρχή λειτουργίας έχει ως εξής: η διαδικασία σύνδεσης με το δίκτυο ξεκινάει με έναν διακόπτη τον transition χειροκίνητα. Όταν ο διακόπτης κλείσει τότε δίνει στον δευτερογενή έλεγχο την νέα τάση αναφοράς που θα πρέπει να έχει ο ζυγός. Υπολογίζεται η διαφορά της τάσης δικτύου και της τάσης μικροδικτύου κοντά στον διακόπτη (V_{tertiary}) σαν tertiary-ref/error, και οδηγείται στον δευτερογενή και αυτός με την σειρά στέλνει την νέα τάση αναφοράς στον πρωτογενή έλεγχο της μπαταρίας. Προϋπόθεση για να κλείσει όμως ο διακόπτης του δικτύου, όπου στην περίπτωση μας ονομάζεται mode, θα πρέπει η τάση του ζυγού να γίνει ίδια με την τάση δικτύου (εικόνα 6.28). Όσο η διαφορά της τάσης (error) είναι μεγαλύτερη από $|0,2|\text{Volts}$, το mode θα παραμένει 0 υποδεικνύοντας πως είμαστε σε αυτόνομη λειτουργία. Καθώς η τάση ζυγού πλησιάζει την τάση δικτύου, το error συνεχώς μειώνεται. Όταν το error γίνει μικρότερο του $|0,2|$, τότε ο διακόπτης mode γίνεται 1 και έχουμε σύνδεση με το δίκτυο.

Για να δειχθεί η σύνδεση με το δίκτυο υλοποιήθηκε το ακόλουθο σενάριο. Σαν αρχική κατάσταση του συστήματος ορίστηκε η κατάσταση στο προηγούμενο πείραμα (κεφ. 6.5) του δευτερογενή ελέγχου. Το φορτίο του μικροδικτύου βρίσκεται στα 200Watts, το φωτοβολταϊκό δίνει μέγιστη ισχύ, η μπαταρία απορροφά την περίσσεια ισχύος και η τάση ζυγού βρίσκεται στα 380Volts.



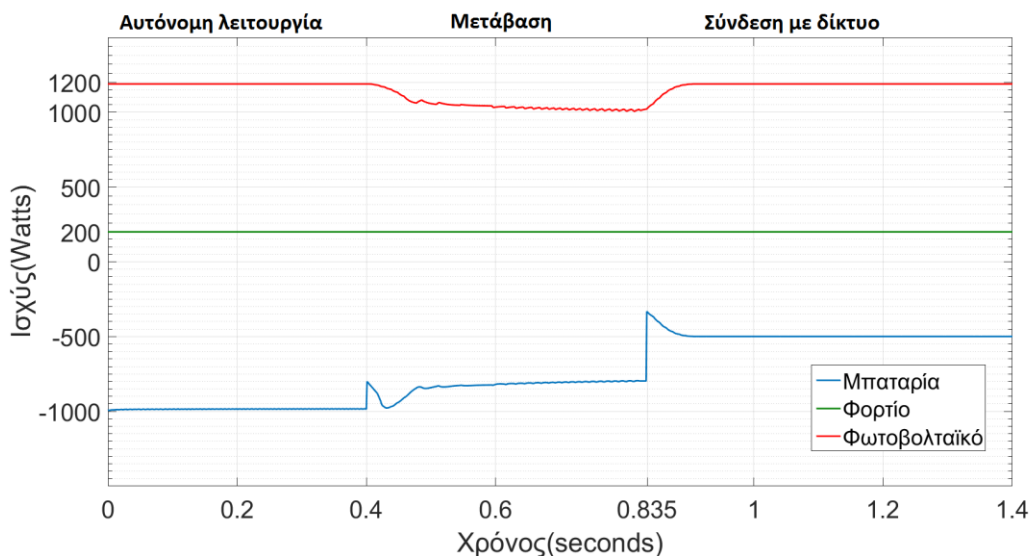
Εικόνα 6.29 : Συγχρονισμός της τάσης για σύνδεση με δίκτυο.



Εικόνα 6.30 : Διακόπτες mode/transition.

Την χρονική στιγμή 0.4seconds κλείνει ο διακόπτης transition εκκινώντας την σύνδεση με το δίκτυο. Η νέα τάση αναφοράς στέλνεται στον δευτερογενή έλεγχο και η τάση ζυγού πλησιάζει την τάση του δικτύου(εικόνα 6.29). Μετά από χρόνο 0,435 seconds ο διακόπτης mode κλείνει καθώς η τάσεις δικτύου-μικροδικτύου έχουν γίνει ίδιες και πλέον το μικροδίκτυο είναι σε σύνδεση με το δίκτυο.

Από την μεριά της ισχύος το σενάριο φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



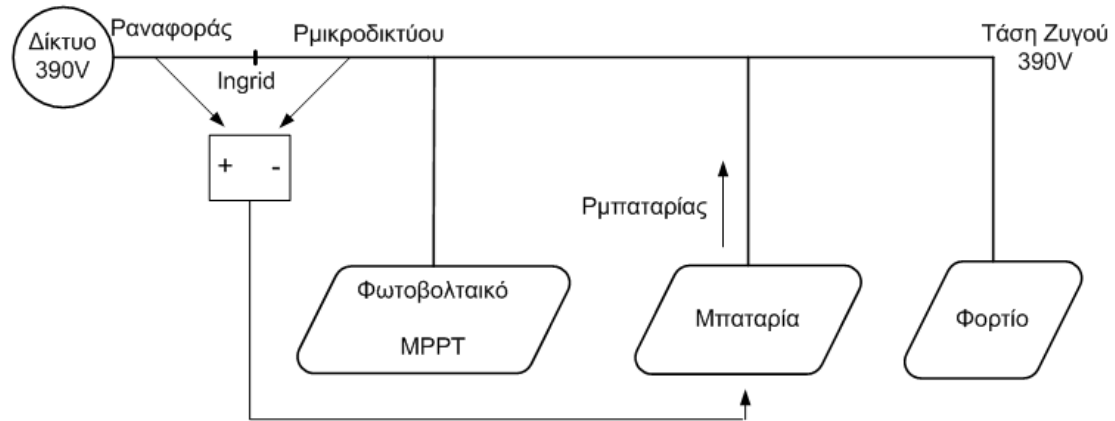
Εικόνα 6.31 Ισοζύγιο ισχύος κατά την μετάβαση σύνδεσης με το δίκτυο.

Το πείραμα εκκινεί σε αυτόνομη λειτουργία με τάση ζυγού στα 380Volts. Το φωτοβολταϊκό παράγει μέγιστη ισχύ στα 1180 Watts και το φορτίο απορροφά 200Watts. Σύμφωνα με το ισοζύγιο ισχύος, η περίσσεια ισχύος που δημιουργείται στα 980Watts απορροφάται από την μπαταρία. Σε χρόνο 0.4seconds όπου ξεκινάει η μετάβαση στο δίκτυο, η τάση ζυγού αυξάνεται πάνω από τα 385 Volts μέχρι να συναντήσει την τάση του δικτύου, ενεργοποιώντας έτσι την droop του φωτοβολταϊκού. Αυτό ρίχνει την παραγωγή του σύμφωνα με την καμπύλη ενώ αντίστοιχα η μπαταρία συνεχίζει να αποθηκεύει την περίσσεια ισχύος. Την χρονική στιγμή 0.835 seconds όπου το μικροδίκτυο συνδέεται με το δίκτυο, το φωτοβολταϊκό γυρνάει σε λειτουργία mppt για μέγιστη ισχύ ενώ η μπαταρία φορτίζεται από το δίκτυο απορροφώντας 500Watts.

6.7 Τριτογενής έλεγχος

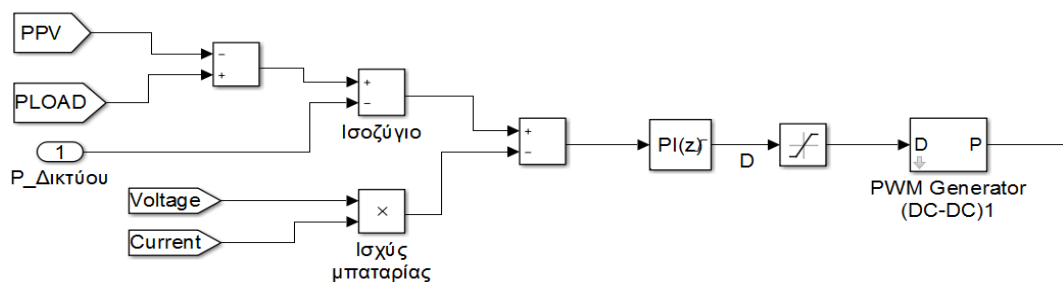
Ο τριτογενής έλεγχος πραγματοποιείται όταν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Αποτελεί μέρος του συστήματος διανομής που το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο και ελέγχει την ροή ισχύος μεταξύ του μικροδικτύου και του δικτύου. Λαμβάνεται η ισχύς αναφοράς από το σύστημα διανομής και συγκρίνεται με την παραγόμενη/καταναλισκόμενη ισχύ του μικροδικτύου. Η διαφορά τους στέλνεται

στην μπαταρία η οποία καλύπτει την περίσσεια/έλλειμα ισχύος που χρειάζεται για να εξυπηρετήσει την απαίτηση του δικτύου σε ισχύ.



Εικόνα 6.32 : Τριτογενής έλεγχος.

Η υλοποίηση του τριτογενή ελέγχου στο matlab/Simulink φαίνεται στην εικόνα 6.32. Αποτελεί μία τροποποίηση της λειτουργίας του P_command της μπαταρίας όπου η τάση αναφοράς που δίνεται δεν ορίζεται από τον χρήστη αλλά από τον τριτογενή έλεγχο.



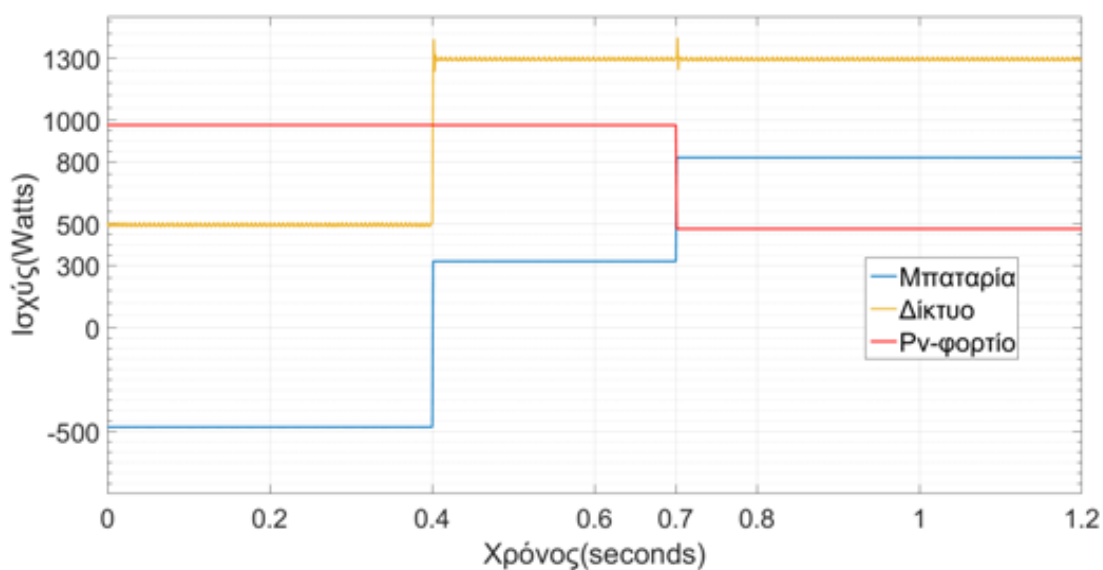
Εικόνα 6.33 : Υλοποίηση στο matlab/Simulink του τριτογενή ελέγχου στην μπαταρία.

Στο ακόλουθο πείραμα φαίνεται ο τριτογενής έλεγχος. Σαν αρχική κατάσταση του μικροδικτύου θεωρείται το αποτέλεσμα του προηγούμενου σεναρίου. Το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο, το φωτοβολταϊκό παράγει σε MPPT 1180Watts, το φορτίο είναι 200Watts και η μπαταρία φορτίζει απορροφώντας 480Watts. Την στιγμή

0,4sec το δίκτυο αυξάνει την απαίτηση σε ισχύ από το μικροδίκτυο σε 1300Watts ενώ την χρονική στιγμή 0,7sec το φορτίο του μικροδικτύου αυξάνεται κατά 500watts διαμορφώνοντας διαφορετικό ισοζύγιο ισχύος. Οι απαιτήσεις σε ισχύ σε κάθε χρονική στιγμή δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

		Αύξηση ζήτησης του δικτύου (+800watts)	Αύξηση φορτίου (+500Watts)
Χρόνος(seconds)	0-0,4	0,4- 0,7	0,7-1,2
P_{pn} (watts)	1180	1180	1180
$P_{φορτίου}$	200	200	700
$P_{pn} - P_{φορτίου}$	980	980	480
$P_{δικτύου}$	500	1300	1300
$P_{μπαταρίας}$	-480	320	820

Το ισοζύγιο ισχύος σε κάθε στιγμή όπως προέκυψε στο matlab/Simulink συνοψίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.34 : Ισοζύγιο ισχύος στο σενάριο του τριτογενή ελέγχου.

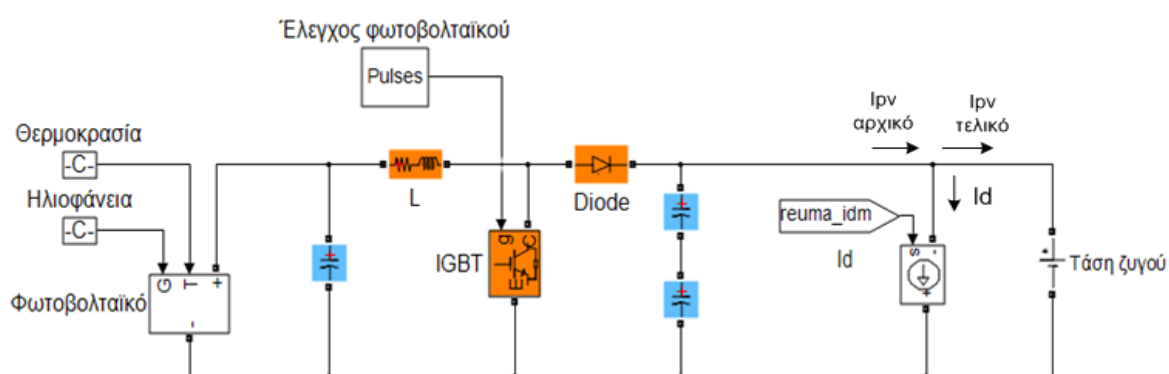
Την χρονική στιγμή 0,4 sec η μπαταρία υπολογίζοντας την ισχύ που εξάγεται στο δίκτυο(980watts), συμπληρώνει το έλλειμα για να καλύψει τα 1300watts που απαιτούνται. Την χρονική στιγμή 0,7sec το φορτίο αυξάνεται κατά 500watts ενώ η

απαιτήση του δικτύου παραμένει στα 1300watts. Η μπαταρία για να μην αλλάξει την ροή ισχύος προς το μικροδίκτυο, καλύπτει το φορτίο δίνοντας επιπλέον την απαιτούμενη ισχύ.

6.8 Τεχνική ανίχνευσης νησιδοποίησης

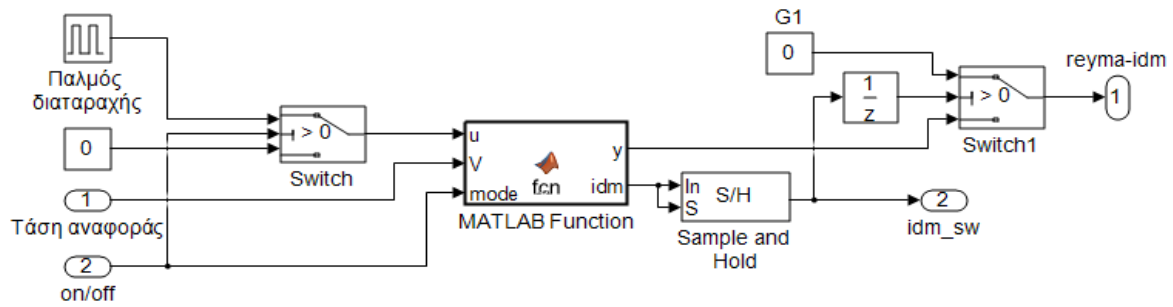
6.8.1 Υλοποίηση της διαταραχής ρεύματος στο Matlab/Simulink

Η τεχνική της νησιδοποίησης στην πραγματικότητα βρίσκεται ενσωματωμένη στον έλεγχο του φωτοβολταϊκού και επηρεάζει άμεσα το dutycycle, εισάγοντας έτσι μία διαταραχή η οποία μεταβάλλει την ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού. Ωστόσο στο περιβάλλον του Simulink μπορεί να προσομοιωθεί σαν μία πηγή ρεύματος συνδεδεμένη στην έξοδο του φωτοβολταϊκού όπως στην εικόνα 6.35. Αυτή η πηγή εισάγει την διαταραχή ρεύματος που απορροφά κομμάτι της ισχύος εξόδου, μειώνοντας έτσι την απόδοσή του.



Εικόνα 6.35 : Πηγή τάσης συνδεδεμένη στην έξοδο του φωτοβολταϊκού.

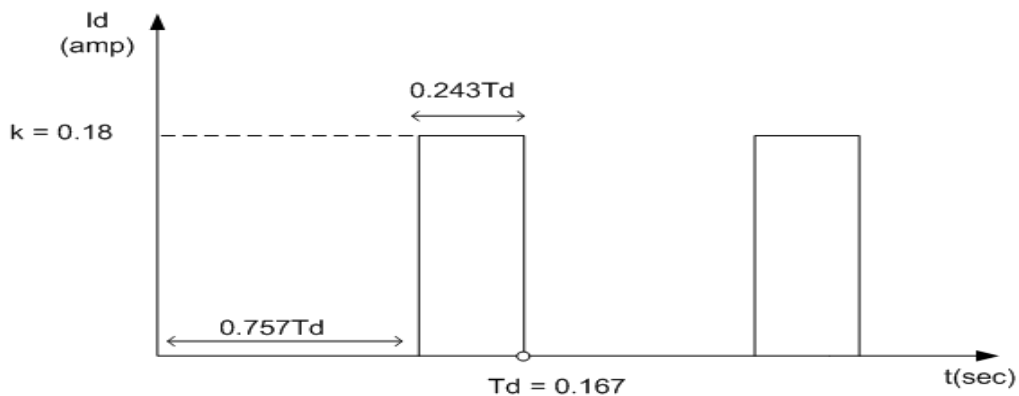
Στην έξοδο του μετατροπέα DC/DC συνδέεται μία ελεγχόμενη πηγή ρεύματος όπου το ρεύμα δίνεται με φορά όπως στην εικόνα 6.35. Το τελικό ρεύμα του φωτοβολταϊκού διαμορφώνεται ως $I_{pn_τελικό} = I_{pn_αρχικό} - I_d$, αλλάζοντας έτσι το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού κατά I_d . Με άλλα λόγια η πηγή ρεύματος απορροφά ρεύμα από το φωτοβολταϊκό μειώνοντας το ρεύμα εξόδου του. Το ρεύμα της πηγής ρεύματος διαμορφώνεται από το reuma_idm που δίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 6.36 : Υλοποίηση του ρεύματος διαταραχής στο matlab/Simulink.

Αποτελείται από τον παλμό της διαταραχής, την τάση αναφοράς όπου συγκεκριμένα στο πείραμα είναι 390Volts και τον διακόπτη λειτουργίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδηγούνται σε έναν αλγόριθμο όπου καθορίζει το ρεύμα της διαταραχής. Ο παλμός διαταραχής έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Η συχνότητα του παλμού επιλέγεται 6 Hz που σημαίνει πως ο παλμός επαναλαμβάνεται με περίοδο $T_d = 0,167$ seconds. Η διαταραχή διαρκεί 40.5msec που αντιστοιχεί σε duty cycle 24,3%. Το πλάτος της διαταραχής k ρυθμίστηκε σε 0.18 Amp. Ο σχεδιασμός της τεχνικής αποσκοπεί στην ανίχνευση της νησιδοποίησης σε λιγότερο από 2seconds σύμφωνα με το πρότυπο . Ο παλμός διαταραχής φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.37 : Παλμός διαταραχής.

Ο παλμός της διαταραχής ενεργοποιείται όταν το μικροδίκτυο βρίσκεται σε σύνδεση με το δίκτυο. Αυτός ο παλμός αποτελεί το ρεύμα της διαταραχής (reyma-idm) όσο δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή της τάσης του ζυγού από την τάση του δικτύου

(390 Volts). Στην περίπτωση όπου η τάση ζυγού πέσει κάτω από τα 387Volts αντιλαμβάνεται πιθανό σφάλμα και ο αλγόριθμος διπλασιάζει το ρεύμα διαταραχής. Εάν η τάση συνεχίσει να πέφτει και ξεπεράσει το επόμενο όριο των 384Volts, το ρεύμα τριπλασιάζεται κ.ο.κ. μέχρι να φτάσει το κατώτατο όριο των 370Volts όπου γίνεται η ανίχνευση της νησιδοποίησης και το μικροδίκτυο περνάει στην αυτόνομη λειτουργία. Το ρεύμα αυξάνεται αφ' ενός για να σιγουρευτεί η διάγνωση της νησιδοποίησης (καθώς σε κανονική σύνδεση με το δίκτυο η μεταβολή θα ήταν ασήμαντη) και αφ'ετέρου για να επισπευσθεί η μετάβαση στην αυτόνομη λειτουργία.

```

1  function [y,idm]= fcn(u,V,mode)
2  -   idm = 0;
3  -   y = u;
4  -   k = 0.18;
5  -   if mode == 1;
6  -       if V > 393
7  -           idm = 1;
8  -       end
9  -       if V < 387
10 -           y = 0.18 + k;
11 -       end
12 -       if V < 384
13 -           y = y + k;
14 -       end
15 -       if V < 380
16 -           y = y + k;
17 -       end
18 -       if V < 375
19 -           y = y + k;
20 -       end
21 -       if V < 370
22 -           idm = 1;
23 -           y=0;
24 -       end
25 -   end

```

Εικόνα 6.38 : Αλγόριθμος ρεύματος διαταραχής.

Από τον τύπο της ισχύος $P = V * I$, με τάση $V = 390\text{Volts}$ η τάση του δικτύου και $I=k= 0,18$, δηλαδή το ρεύμα του παλμού ή αλλιώς το ρεύμα που απορροφά η διαταραχή από το φωτοβολταϊκό προκύπτει η ισχύς της διαταραχής ως $P_d = 70\text{Watts}$.

Η απόδοση του MPPT υπολογίζεται ως:

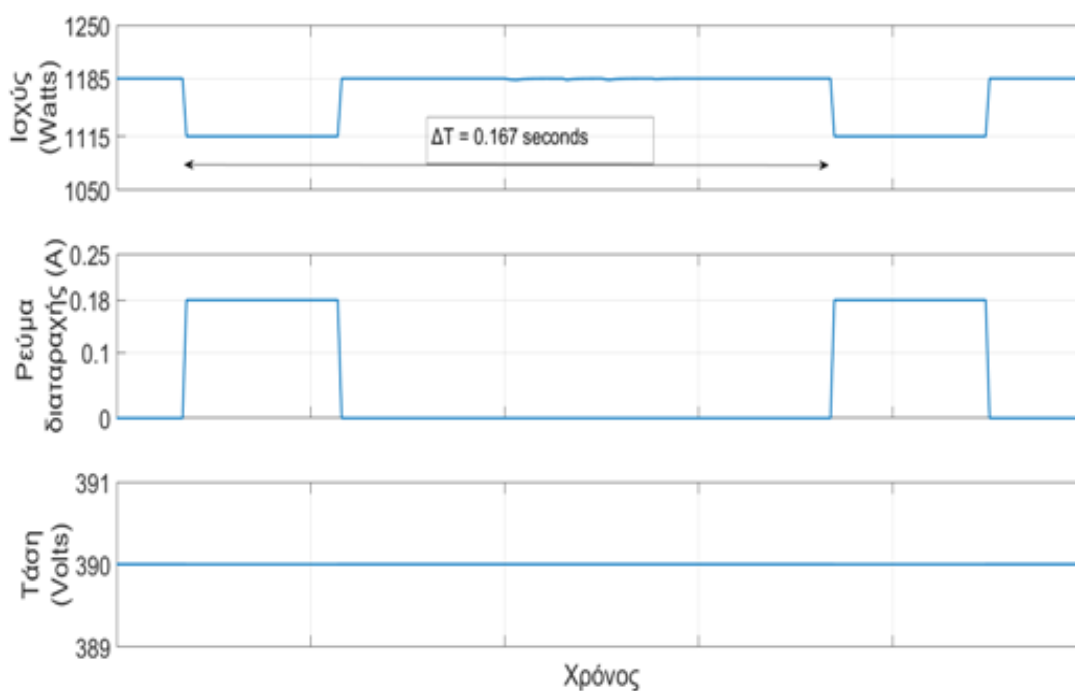
$$\frac{P_{MPPT} * 0.757 + (P_{MPPT} - P_d) * 0.243}{P_{MPPT}} = \frac{1180 * 0.757 + 1110 * 0.243}{1180} = 98.5\%$$

όπου $P_{MPPT} = 1180$ η ισχύς σε μέγιστη ηλιοφάνεια.

6.8.2 Πειραματικό σενάριο για την τεχνική ανίχνευσης νησιδοποίησης

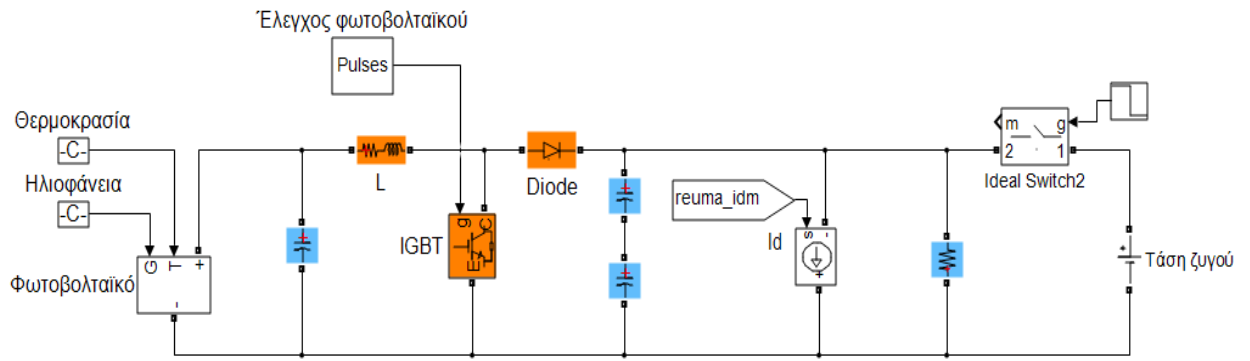
Το πείραμα υλοποιήθηκε σε δύο δοκιμές για την ανίχνευση της μη προγραμματισμένης νησιδοποίησης, τόσο του φωτοβολταϊκού όσο και του μικροδικτύου συνολικά στην χειρότερη περίπτωση, όπου δηλαδή δεν υπάρχει ροή ισχύος μεταξύ φωτοβολταϊκού/φορτίου και μικροδικτύου/δικτύου. Η πρώτη δοκιμή αφορούσε την τεχνική νησιδοποίησης για τον έλεγχο του φωτοβολταϊκού αποκλειστικά και ύστερα από την ανίχνευσή της, την αυτόματη αποσύνδεση του από το δίκτυο. Η δεύτερη δοκιμή εκτελέστηκε στο μικροδίκτυο συνολικά, όπου μετά την ανίχνευση της νησιδοποίησης το μικροδίκτυο περνάει στην αυτόνομη λειτουργία.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το ρεύμα διαταραχής πως επηρεάζει την ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού όταν βρίσκεται σε σύνδεση με το δίκτυο. Σε κάθε παλμό η ισχύς του μειώνεται κατά 70 Watts ενώ η τάση ζυγού παραμένει σταθερή λόγω του δικτύου.



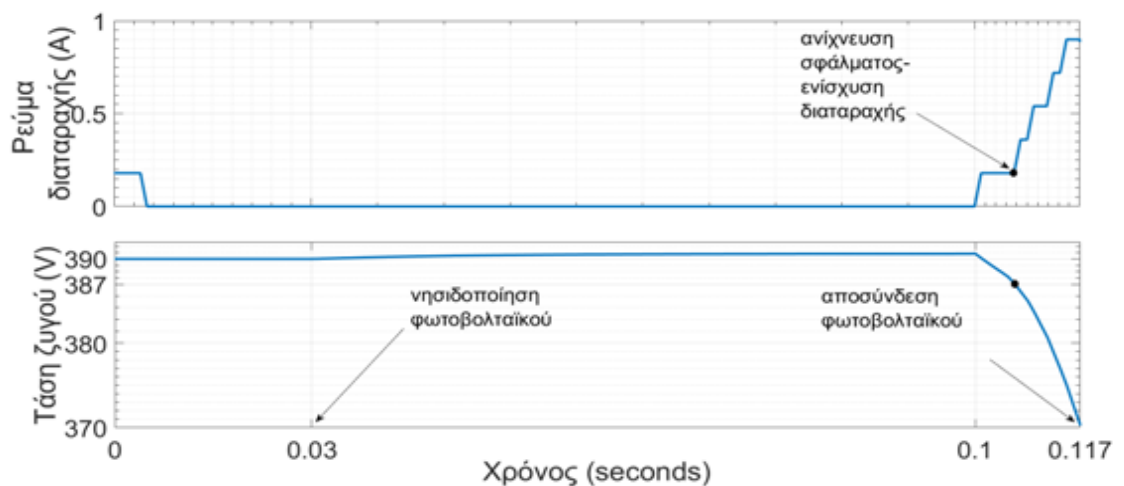
Εικόνα 6.39 : Ισχύς φωτοβολταϊκού σε κανονική σύνδεση με δίκτυο.

Στην πρώτη δοκιμή η τοπολογία στο matlab/Simulink φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6.40 : Τοπολογία δοκιμής της τεχνικής ανίχνευσης στο φωτοβολταϊκό.

Για την πειραματική δοκιμή το φορτίο επιλέχθηκε ως $R = 128.89 \Omega$ μέσω της σχέσης $R = \frac{V^2}{P}$, όπου V η τάση ζυγού στα 390Volts και P η ισχύς του φωτοβολταϊκού στα 1180Watts. Στο άνοιγμα του διακόπτη, που σηματοδοτεί σφάλμα στο δίκτυο, λόγω του φορτίου δεν υπάρχει ανισότητα στο ισοζύγιο ισχύος οπότε και η τάση παραμένει σταθερή. Λόγω όμως του ρεύματος διαταραχής όπως περιγράφηκε πιο πάνω, δημιουργεί μία ανισορροπία η οποία οδηγεί την τάση στο κατώτατο επίπεδο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 6.41.

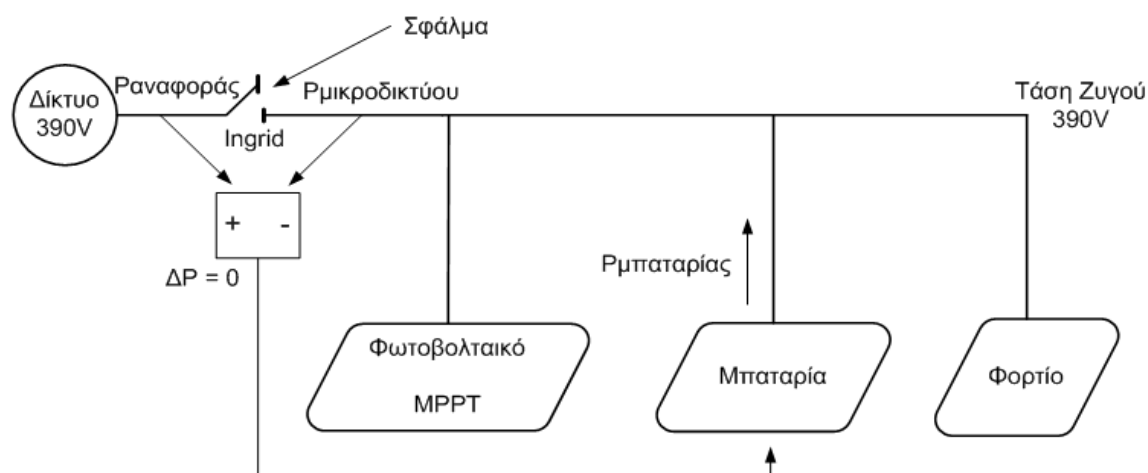


Εικόνα 6.41 : Τάση κατά την ανίχνευση νησιδοποίησης του φωτοβολταϊκού.

Την χρονική στιγμή 0,03 sec γίνεται η μη προγραμματισμένη νησιδοποίηση του φωτοβολταϊκού χωρίς να υπάρχει μεταβολή της τάσης. Ωστόσο την χρονική στιγμή 0,1 sec εισάγεται ο περιοδικός παλμός της διαταραχής και ρίχνει την τάση κάτω από

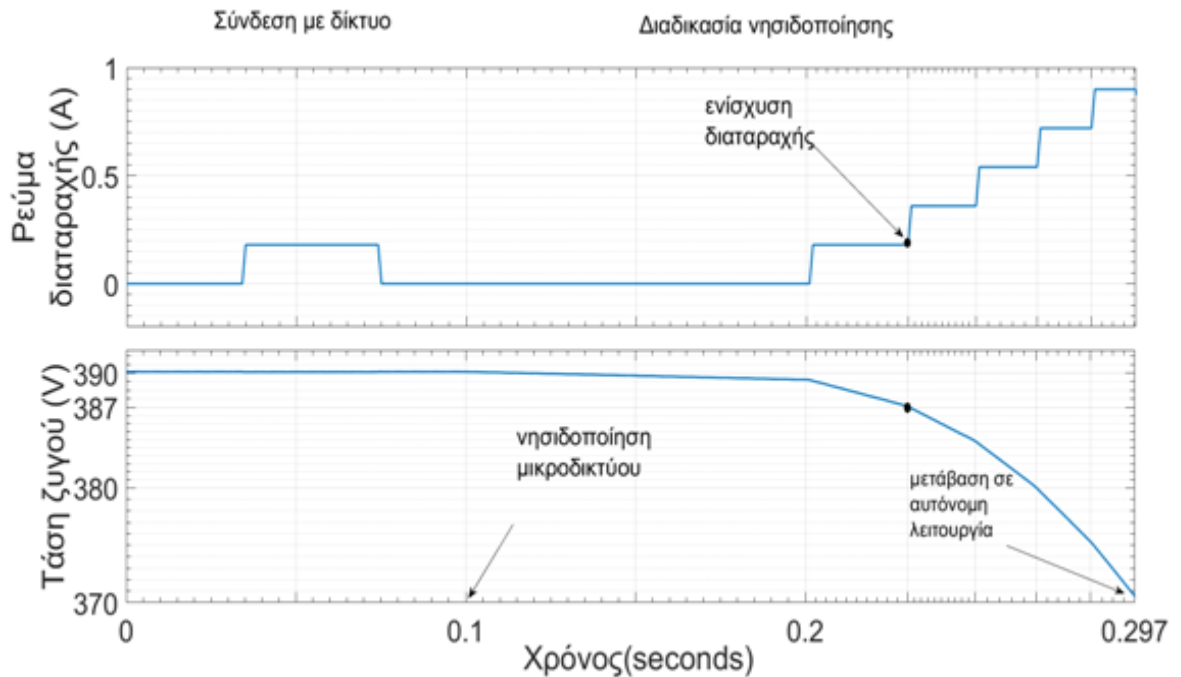
το πρώτο κατώφλι (387Volts), όπου σηματοδοτεί ένδειξη σφάλματος. Το ρεύμα ενισχύεται και η τάση πέφτει σημαντικά, μέχρι την αποσύνδεση του φωτοβολταϊκού όταν η τάση πέσει κάτω από τα 370Volts. Ο χρόνος που χρειάζεται η τεχνική για να οδηγήσει το φωτοβολταϊκό σε αποσύνδεση είναι 0,017 sec ενώ ο μέγιστος χρόνος που χρειάζεται η τεχνική για να ανιχνεύσει το σφάλμα και να οδηγήσει το φωτοβολταϊκό σε αποσύνδεση είναι $0,126 (0,757 \Delta T) + 0,017 = 0,143 \text{ sec}$.

Η δεύτερη δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο μικροδίκτυο συνολικά και φαίνεται στην εικόνα 6.42. Η μπαταρία ρυθμίζεται ώστε πριν εκδηλωθεί το σφάλμα να καλύπτει την περίσσεια ισχύος μεταξύ φωτοβολταϊκού και φορτίων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του τριτογενούς ελέγχου όπου η ισχύς αναφοράς ορίζεται στο μηδέν.



Εικόνα 6.42 : Σενάριο μικροδικτύου για την τεχνική ανίχνευσης νησιδοποίησης.

Το μικροδίκτυο αρχικά βρίσκεται σε σύνδεση με το δίκτυο και η τεχνική ανίχνευσης είναι ενεργοποιημένη για τον εντοπισμό πιθανού σφάλματος. Η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού φαίνεται στην εικόνα 6.39.



Εικόνα 6.43 : Τάση ζυγού κατά την νησιδοποίηση του μικροδικτύου.

Την χρονική στιγμή 0,1 second γίνεται μη προγραμματισμένη νησιδοποίηση του μικροδικτύου. Το μικροδίκτυο ωστόσο δεν έχει αντιληφθεί το σφάλμα καθώς οι μετρήσεις δεν δείχνουν κάποια μεταβολή στην τάση. Αυτό συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή 0,2 second, όπου εισέρχεται ο επόμενος παλμός της τεχνικής ανίχνευσης. Ο νέος παλμός προκαλεί διαταραχή στο ισοζύγιο με αποτέλεσμα την πτώση της τάσης κάτω από το πρώτο κατώφλι των 387Volts, δίνοντας την πρώτη ένδειξη σφάλματος. Το ρεύμα διαταραχής διπλασιάζεται μέχρι να ξεπεράσει και το επόμενο όριο τάσης κ.ο.κ μέχρι η τάση να πέσει στα 370Volts όπου και το μικροδίκτυο μεταβαίνει στην αυτόνομη λειτουργία. Ο χρόνος που χρειάζεται το μικροδίκτυο για την ανίχνευση της νησιδοποίησης μέχρι την μετάβαση στην αυτόνομη λειτουργία είναι 0,097sec ενώ αντίστοιχα ο μέγιστος χρόνος ανίχνευσης του σφάλματος και αντιμετώπισης είναι $0,126 (0,757 \Delta T) + 0,097 = 0,223$ seconds, όπου προκύπτει εάν το σφάλμα εκδηλωθεί αμέσως μετά το τέλος του παλμού.

Από τις δύο δοκιμές βλέπουμε πως η τάση οδηγείται στο κατώτερο όριο σε διαφορετικό χρόνο. Συγκεκριμένα στην περίπτωση του μικροδικτύου συνολικά, η τεχνική της ανίχνευσης είναι πιο αργή και οφείλεται στην αυξημένη πολυπλοκότητα του συστήματος.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιήθηκε στο matlab/Simulink ένα DC μικροδίκτυο το οποίο αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, μία μπαταρία μολύβδου οξέος, ωμικά φορτία ως καταναλωτές και μία πηγή τάσης ως προσομοίωση του δικτύου. Πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος του συνολικού μικροδικτύου, τόσο σε αυτόνομη λειτουργία όσο και σε σύνδεση με το δίκτυο, μέσω του ιεραρχικού ελέγχου σε τρία επίπεδα.

Ο πρωτογενής έλεγχος πραγματοποιείται υπό την μορφή της καμπύλης droop στο φωτοβολταϊκό σύστημα και την μπαταρία. Μέσα από τις πειραματικές δοκιμές φαίνεται η αξιοπιστία του συστήματος, καθώς σε αυτόνομη λειτουργία οι μονάδες μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς επικοινωνία παρά μόνο με την διάγνωση της τάσης.

Μέσω ενός κεντρικού δευτερογενή ελέγχου πετύχαμε την βέλτιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές,. Αυτό επετεύχθη μέσω της διόρθωσης των αποκλίσεων της τάσης που οφείλονταν στον πρωτογενή έλεγχο. Επιπλέον, ο δευτερογενής έλεγχος έκανε αποτελεσματική την μετάβαση μεταξύ της αυτόνομης λειτουργίας και της σύνδεσης με το δίκτυο, μέσω της συνολικής επίβλεψης του μικροδικτύου και του δικτύου.

Όσον αφορά τον τριτογενή έλεγχο, παρατηρήθηκε η δυνατότητα εκμετάλλευσης της ισχύος του μικροδικτύου από το σύστημα διανομής, μέσω της χρήσης της μπαταρίας κατά το δοκούν.

Τέλος στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε τεχνική ανίχνευσης μη προγραμματισμένης νησιδοποίησης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Επιπροσθέτως η τεχνική αυτή δοκιμάστηκε και στο μικροδίκτυο συνολικά και μέσα από τις πειραματικές δοκιμές, διακρίνεται η αποτελεσματική αντιμετώπιση του σφάλματος σύμφωνα με τα πρότυπα.

Η μελέτη που διεκπεραιώθηκε μπορεί να επεκταθεί με την εισαγωγή επιπλέον μονάδων παραγωγής ενέργειας όπου διαθέτουν διαφορετικές συμπεριφορές, όπως ανεμογεννήτριες και καυστήρες βιομάζας. Η εισαγωγή επιπλέον αποθηκευτικών συστημάτων θα οδηγήσει σε στρατηγικές διαμοιρασμού της ισχύος αλλά και διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Τέλος για την βέλτιστη προσομοίωση του πειραματικού μικροδικτύου σε πραγματικές συνθήκες, είναι απαραίτητη μία έρευνα που θα αποσκοπεί στην οικονομική διαχείριση και βελτιστοποίηση του κόστους λειτουργίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. Χατζηαργυρίου, *Microgrids : Architectures and Control*, John Wiley and Sons, 2014
- [2] N. Βοβός, *Εξελιγμένα Δίκτυα Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2014
- [3] K. Chao, M. Tseng, C. Huang, Y. Liu, L. Huang, *Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems*, *International Journal of Computer, Consumer and Control*, 2013, pp. 44-55
- [4] E. Planas, J. Andreu, J. I. Garate, I. Martinez de Alegria, E. Ibarra, *AC and DC technology in microgrids: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, pp. 726-749
- [5] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, J. Jung, *AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, pp.387-405
- [6] A. T. Elsayed, A. A. Mohamed, O. A. Mohammed, *DC microgrids and distribution systems: An overview*, *Electric Power Systems Research*, 2015, pp. 401-417
- [7] H. Lotfi, A. Khodaei, *AC versus DC Microgrid Planning*, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, pp.296-304
- [8] J. Ashna, G. Sijo, P. Jasmine, *Study on DC Microgrid*, *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2017, pp. 89-94
- [9] C. A. Canizares, R. Palma-Behnke, *Trends in microgrid control*, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, pp. 1905-1919
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/ANSI/ISA-95>
- [11] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, *Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids - A General Approach Toward Standardization*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, pp. 158-172
- [12] S. L. Hamilton, E. W. Gunther, R. V. Drummond, and S. E. Widergren, *Interoperability—A key element for the grid and DER of the future*, *IEEE*, 2006, pp. 927–931.
- [13] L. Meng, Q. Shafiee, G. F. Trecate et al, *Review on Control of DC Microgrids*, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, pp. 1-20
- [14] C. N. Papadimitriou, E.I. Zountouridou, N. D. Hatziaargyriou, *Review of hierarchical control in DC microgrids*, *Electric Power Systems Research*, 2015, pp. 159-167
- [15] E. Unamuno, J. A. Barrena, *Hybrid ac/dc microgrids —Part II : Review and classification of control strategies*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, pp. 1123-1134

- [16]E. Planas, A. Gil-de-Muro, J. Andreu, I. Kortabarria, I. Martinez de Alegria, General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, pp. 147-159
- [17]T. Dragicevic, X. Lu, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, DC Microgrids-Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques, *IEEE Transactions on Power Electronics*
- [18]L. Meng, E. R. Sanseverino, A. Luna, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, Microgrid supervisory controllers and energy management systems: A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, pp. 1263-1273
- [19] A. Kaur, J. Kaushal, P. Basak, A review on microgrid central controller, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, pp. 338-345
- [20] A. Luque, S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley and Sons, 2014
- [21] Π. Αικατερίνη, Διπλωματική εργασία: Κατασκευή DC μικροδικτύου σε περιβάλλον Matlab/Simulink και μελέτη τεχνικών ελέγχου, ΕΜΠ Αθήνα 2015
- [22]Γ. Κατσαρός, Διπλωματική εργασία: Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση μικροδικτύου, Παν. Πάτρας 2012
- [23] M. A. Eltawil, Z. Zhao, MPPT techniques for photovoltaic applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, pp.793-813
- [24]J. P. Ram, T. S. Babu, N. Rajasekar, A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, pp. 826-847
- [26] Σ. Ν. Μανιας, Ηλεκτρονικά ισχύος, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα 2014
- [27]T.R. Crompton, *Battery Reference Book*, Third edition, 2000
- [28] D. Linden, T. B. Reddy, *Handbook of Batteries*, Third Edition, 2001
- [29]Π. Πικάσης, Πτυχιακή εργασία: Ηλεκτρικοί συσσωρευτές. “Αρχές λειτουργίας και βασικά χαρακτηριστικά τους”, Αθήνα 2015
- [30] Jonathan M. Lee, *Islanding detection methods formicrogrids* ,degree of master of electrical engineering, 2011
- [31]C. Li, C. Cao, Y. Cao, Y. Kuang, L. Zeng, B. Fang, A review of islanding detection methods for microgrid, *Renewable and sustainable energy reviews*, 2014, pp. 211-220
- [32]C.N. Papadimitriou, V.A. Kleftakis, N.D. Hatziaergyriou, A novel islanding detection method for microgrids based on variable impedance insertion, *Electric Power Systems Research*, 2015, pp. 58-66
- [33]G.S. Seo, B.H. Cho, DC Islanding Detection Algorithm Using Injection Current Perturbation Technique for Photovoltaic Converters in DC Distribution, *IEEE*, 2012, pp. 3722-3726