



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

## Μελέτη στρατηγικών ελέγχου DC μικροδικτύων σε περιβάλλον προσομοίωσης Matlab/Simulink

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημοσχάκης Κωνσταντίνος

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017





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

## Μελέτη στρατηγικών ελέγχου DC μικροδικτύων σε περιβάλλον προσομοίωσης Matlab/Simulink

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημοσχάκης Κωνσταντίνος

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις .....

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

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

.....  
Γεωργιάκης Π.  
Επ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017

.....  
Δημοσχάκης Κωνσταντίνος

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

Copyright © Δημοσχάκης Κωνσταντίνος, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο πολύ ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, ευχαριστώ εκ βαθέων τον ερευνητή κ. Βασίλη Κλεφτάκη για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε, όπως επίσης και για τις πολύ σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές του.

Ευχαριστώ τους φίλους και συμφοιτητές που ήταν δίπλα μου σε αυτό το δύσκολο, αλλά πολύ ενδιαφέρον ταξίδι των σπουδών μου. Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια και έδωσε φτερά στα όνειρά μου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός μικροδικτύου συνεχούς τάσης, η μοντελοποίησή του και ο σχεδιασμός ενός συστήματος ελέγχου για τη λειτουργία του. Το εν λόγω μικροδίκτυο αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία, μία κυψέλη καυσίμου, ένα σύστημα συσσωρευτών, καθώς επίσης και φορτία. Οι μονάδες αναλύονται ξεχωριστά και εξετάζεται η στρατηγική ελέγχου που θα εφαρμοστεί στην κάθε μία. Ειδικότερα, η εργασία αναπτύσσεται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγή στη Διεσπαρμένη Παραγωγή, τις τεχνολογίες που περιλαμβάνει, τις επιπτώσεις που έχει στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα της χρήσης της.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται η έννοια του μικροδικτύου, οι διαφορές που παρουσιάζει με τα παραδοσιακά συστήματα ηλεκτρισμού και οι στρατηγικές ελέγχου που έχουν μελετηθεί στην διεθνή τεχνική βιβλιογραφία. Επίσης, γίνεται μια πρώτη ανάλυση της τεχνικής ελέγχου DBS(DC bus signaling), που θα χρησιμοποιήσουμε.

Στα κεφάλαια 3 έως 6 αναλύεται ξεχωριστά κάθε μονάδα του μικροδικτύου που σχεδιάσαμε. Για τη μοντελοποίηση του μικροδικτύου χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον Simulink του υπολογιστικού λογισμικού Matlab. Εκτός από τη δημιουργία μοντέλου για κάθε στοιχείο του συστήματος, δημιουργήθηκε και ο απαραίτητος ηλεκτρονικός μετατροπέας για τη σύνδεσή τους και τελικά σχεδιάστηκε ένας ξεχωριστός ελεγκτής για τον έλεγχο της λειτουργίας κάθε μονάδας.

Στο κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέσαμε για να επαληθεύσουμε τη σωστή λειτουργία του μικροδικτύου σε όλες τις πιθανές καταστάσεις. Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 γίνεται ο απολογισμός της συνολικής μελέτης και καταλήγουμε σε κάποια συμπεράσματα.

Λέξεις Κλειδιά: μικροδίκτυο, διεσπαρμένη παραγωγή, ιεραρχικός έλεγχος, φωτοβολταϊκό, συσσωρευτής, κυψέλη καυσίμου, ηλεκτρονικοί μετατροπείς συνεχούς τάσης, έλεγχος τάσης, χαρακτηριστική droop, DBS, Matlab /Simulink



## ABSTRACT

The purpose of this thesis is the study of a DC microgrid, the modeling and the design of a system that will control its operation. This microgrid consists of a photovoltaic array, a fuel cell, a battery system, as well as loads. The units and the control strategy that is applied to each one of them, are analyzed individually. Specifically, the project is developed as follows:

Chapter 1 gives an introduction to Distributed Generation, the technologies that it includes, the impact it has on power systems, the disadvantages and the advantages of its use.

Chapter 2 describes the concept of the microgrid, the differences it has in contrast with traditional power systems and the control strategies that have been studied in international technical literature. Also, there is a first analysis of the DBS control(DC bus signaling), which we will be using.

In chapters 3 to 6 we make a separate analysis for each of the microgrid units. For the modeling of the microgrid we used the Simulink environment of Matlab computing software. In addition to creating the model for each component of the system, we created the necessary electronic converter to connect them and finally designed a special controller for controlling the operation of each unit.

Chapter 7 presents the results of the simulations we performed to verify the good operation of the microgrid in all possible situations. Finally, Chapter 8 is the assessment of the overall study including our conclusions.

Key Words: microgrid, distributed generation, hierarchical control, photovoltaic, battery, fuel cell, DC converters, voltage control, droop characteristic, DBS, Matlab / Simulink

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Διεσπαρμένη Παραγωγή.....	13
1.1 Η ανάγκη για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	13
1.2 Γενικά για τη διεσπαρμένη παραγωγή.....	14
1.3 Τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.....	15
1.3.1 Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	15
1.3.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.....	21
1.4 Σύνδεση της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο.....	24
1.5 Πλεονεκτήματα από τη χρήσης Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	25
1.6 Μειονεκτήματα από τη χρήσης Διεσπαρμένης Παραγωγής.....	26

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μικροδίκτυα.....	28
2.1 Η έννοια του Μικροδικτύου.....	28
2.2 Περιγραφή ενός μικροδικτύου.....	29
2.2.1 Δομή.....	29
2.2.2 Σύγκριση AC και DC μικροδικτύων.....	30
2.2.3 Πρότυπα.....	31
2.2.4 Προστασία στα μικροδίκτυα.....	32
2.3 Ο έλεγχος του μικροδικτύου.....	33
2.3.1 Απαιτήσεις.....	33
2.3.2 Ελεγχόμενες μεταβλητές.....	34
2.3.3 Ο Ιεραρχικός έλεγχος.....	35
2.3.4 Έλεγχος DC μικροδικτύου – Η ιδέα του DBS.....	48

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	50
3.1 Θεωρητικό μοντέλο φωτοβολταϊκού.....	50
3.1.1 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	50
3.1.2 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού.....	51
3.1.3 Η χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	54
3.1.4 Υπολογισμός των αντιστάσεων $R_s$ και $R_p$ .....	55
3.2 Δημιουργία μοντέλου για το φωτοβολταϊκό στο Matlab.....	56
3.3 Σύνδεση του φωτοβολταϊκού στο μικροδίκτυο.....	57
3.3.1 Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή(dc-dc converters).....	57
3.3.2 Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης(dc-dc boost converter).....	58
3.3.3 Σχεδιασμός μετατροπέα για το Φ/Β σύστημα του μικροδικτύου.....	63
3.4 Έλεγχος της Φ/Β συστοιχίας με τον αλγόριθμο MPPT.....	65
3.4.1 Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).....	65
3.4.2 Αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης(Perturb and Observe).....	66
3.4.3 Σχεδιασμός του μοντέλου του MPPT στο Matlab.....	66

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Κυψέλη καυσίμου (fuel cell).....	68
4.1 Θεωρητικό μοντέλο fuel cell.....	68
4.2 Μοντέλο fuel cell στο Matlab/Simulink.....	70
4.3 Σύνδεση του fuel cell στο μικροδίκτυο.....	72
4.4 Έλεγχος του συστήματος fuel cell.....	74
4.4.1 Έλεγχος τάσης με χρήση του βαθμού χρησιμοποίησης D.....	74
4.4.2 Έλεγχος με σταθερό P (Pcommand).....	76
4.4.3 Έλεγχος Droop.....	80

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συσσωρευτές (μπαταρίες).....	90
5.1 Θεωρητικό μοντέλο μπαταρίας.....	90
5.2 Μοντέλο μπαταρίας στο Matlab/Simulink.....	91
5.3 Σύνδεση συστήματος αποθήκευσης μπαταριών στο μικροδίκτυο.....	93
5.3.1 Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης(Buck DC-DC converter).....	94
5.3.2 Αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης.....	97
5.3.3 Σχεδιασμός αμφίδρομου μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού συνεχούς τάσης για το σύστημα αποθήκευσης συσσωρευτών.....	98
5.4 Έλεγχος συστήματος αποθήκευσης μπαταριών.....	102
5.4.1 Έλεγχος με σταθερό P (Pcommand).....	102
5.4.2 Έλεγχος Droop.....	106
5.4.3 Περιορισμοί στον έλεγχο των μπαταριών.....	110

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Φορτία μικροδικτύου DC.....	113
6.1 Περιγραφή φορτίων μικροδικτύου.....	113
6.2 Μοντέλο φορτίου για το μικροδίκτυο μας.....	113
6.3 Έλεγχος φορτίου.....	115

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Προσομοίωση μικροδικτύου DC.....	117
7.1 Περιγραφή του μικροδικτύου.....	117
7.2 Εφαρμογή του ελέγχου DBS στο μικροδίκτυο.....	118
7.3 Προσομοίωση του μικροδικτύου.....	120
7.3.1 Σενάριο 1 <sup>ο</sup> .....	120
7.3.2 Σενάριο 2 <sup>ο</sup> .....	123
7.3.3 Σενάριο 3 <sup>ο</sup> .....	127
7.3.4 Σενάριο 4 <sup>ο</sup> .....	130
7.3.5 Σενάριο 5 <sup>ο</sup> .....	134

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συμπεράσματα.....	138
-------------------	-----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	139
-------------------	-----



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Διεσπαρμένη παραγωγή

### 1.1 Η ανάγκη για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι αναμφίβολα ένα από τα κυριότερα συστατικά της σύγχρονης κοινωνίας μας. Το παραδοσιακό μοντέλο για τα μεγάλα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) υπαγορεύει ότι η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται συγκεντρωμένα σε μεγάλης ισχύος θερμοηλεκτρικές μονάδες και η διανομή και μεταφορά της στα διάσπαρτα φορτία επιτυγχάνεται με καλωδιακές γραμμές πολλών χιλιομέτρων. Οι εν λόγω θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, παράγουν ηλεκτρική ενέργεια εκμεταλλευόμενοι την θερμική ενέργεια από την καύση ορυκτών υλικών, όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Μία δεύτερη πηγή που χρησιμοποιείται ευρύτατα είναι η θερμική ενέργεια από πυρηνικές αντιδράσεις.

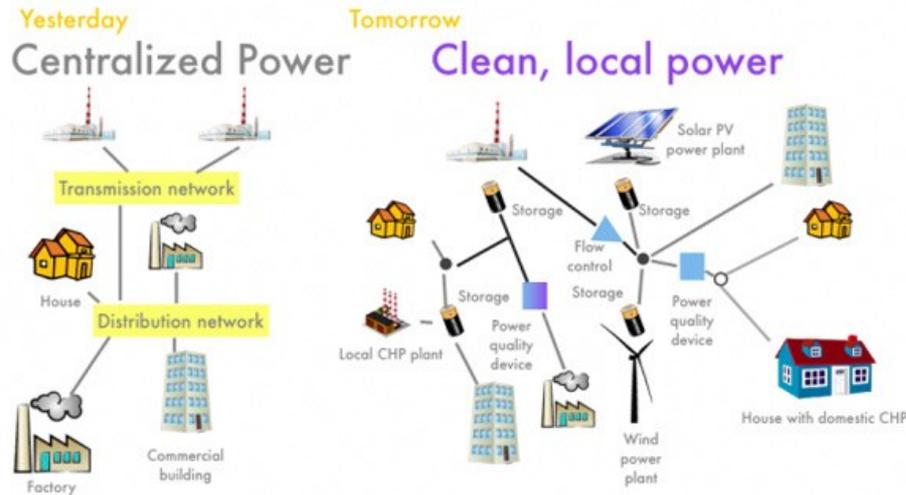
Το μοντέλο αυτό αν και απολύτως λειτουργικό, έχει σοβαρές συνέπειες στο περιβάλλον. Σε συνδυασμό με την χρήση ορυκτών καυσίμων για θέρμανση και συγκοινωνίες, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε σε ραγδαία αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων. Τα αέρια αυτά έχουν την ιδιότητα να εγκλωβίζουν την θερμότητα στο εσωτερικό της ατμόσφαιρας -όπως έχει διαπιστώσει ο John Tyndall από το 1860- κάτι που είναι ευρέως γνωστό ως φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Συνέπειες του παραπάνω φαινομένου είναι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κατά  $0.95^{\circ}\text{C}$  από το 1880[1] και δευτερογενώς το λιώσιμο των πάγων στους πόλους με ρυθμό 281 γιγατόνοι/χρόνο αυτή τη στιγμή. Το αποτέλεσμα αυτών των αλλαγών στη βιόσφαιρα ονομάζεται κλιματική αλλαγή και τα τελευταία χρόνια έχει γίνει έντονα αισθητή. Επιπροσθέτως, έχει προβλεφθεί ότι η στάθμη της θάλασσας θα ανέβει εξαφανίζοντας τεράστιες εκτάσεις ξηράς[2].

Ένας δεύτερος λόγος που η χρήση του παραπάνω μοντέλου ΣΗΕ δε μπορεί να συνεχιστεί, είναι ότι τα ορυκτά καύσιμα είναι πεπερασμένα και κάποια στιγμή θα εξαντληθούν. Επομένως, ένας πιο βιώσιμος σχεδιασμός είναι απαραίτητος.

Η λύση είναι η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια για την παραγωγή της απαραίτητης ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή όμως αυτές οι μορφές ενέργειας δεν βρίσκονται συσσωρευμένες, αλλά διεσπαρμένες στη φύση, πρέπει να τις συλλέξουμε σε πολλά ξεχωριστά σημεία του ηλεκτρικού δικτύου. Για το λόγο αυτό ονομάζονται κατακεκομμένες πηγές ενέργειας -διεθνώς γνωστές με τον όρο Distributed Energy Resources(DER). Επομένως πλέον, η παραγωγή μετατοπίζεται κοντά στα φορτία που εξυπηρετεί. Αυτός ο τύπος παραγωγής ηλεκτρισμού ορίζεται ως Διεσπαρμένη Παραγωγή(ΔΠ) και πρόκειται για παραγωγή και πιθανώς αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας κοντά στην κατοικία του τελικού καταναλωτή και λειτουργεί με σκοπό την παροχή του συνόλου ή ενός τμήματος του ηλεκτρικού φορτίου του πελάτη. Επιπλέον τα συστήματα αυτά είναι ικανά να εγγέουν στο δίκτυο κοινής ωφελείας ή να αντλούν από αυτό ισχύ ή και να είναι εντελώς απομονωμένα από το υπόλοιπο ηλεκτρικό σύστημα[3].

## 1.2 Γενικά για τη διεσπαρμένη παραγωγή



Εικόνα 1.1: Περιγραφή ενός συστήματος ΔΠ([www.mysolarhome.com](http://www.mysolarhome.com))

Ιστορικά, οι κεντρικές μονάδες παραγωγής βρίσκονται μακριά από τα μεγάλα αστικά κέντρα για προστασία των κατοίκων από τη μόλυνση και συνήθως κοντά στους πόρους καυσίμων για ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς μεταφέρουν την ενέργεια στο κέντρο των μεγάλων φορτίων και το σύστημα διανομής με τη σειρά του διανέμει την ισχύ από εκεί στους καταναλωτές. Αυτό το μοντέλο αγοράς αναπτύχθηκε όταν το κόστος μεταφοράς των καυσίμων και η δημιουργία τεχνολογιών για κατοικημένες περιοχές υπερέβαινε κατά πολύ το κόστος ανάπτυξης του δικτύου μεταφοράς-διανομής. Οι κεντρικές μονάδες συνήθως σχεδιάζονται ώστε να επωφεληθούν των διαθέσιμων οικονομιών κλίμακος, δηλαδή παράγουν συσσωρευμένα μεγάλη ισχύ ώστε να μειωθεί το κόστος ανά kWh.

Αυτές οι οικονομίες κλίμακος άρχισαν να αποτυγχάνουν στα τέλη της δεκαετίας του 1960, καθώς οι εν λόγω κεντρικοί παραγωγοί πλέον δε μπορούσαν να παρέχουν φθηνή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια στους πιο απομακρυσμένους πελάτες μέσω του δικτύου[4]. Αυτό επειδή οι ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες έφτασαν να κοστίζουν λιγότερο από ότι το δίκτυο και είχαν γίνει τόσο αξιόπιστες, ώστε σχεδόν όλες οι διακοπές ρεύματος να προέρχονται από το δίκτυο. Έτσι, το δίκτυο είχε γίνει ο κύριος παράγοντας του κόστους και των προβλημάτων ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία έγινε πιο σημαντική λόγω των απαιτήσεων του ψηφιακού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται πλέον σε κάθε οικία[5].

Τα συστήματα DER είναι μαζικής παραγωγής, μικρές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε. Οι λόγοι για τους οποίους άρχισαν να αναπτύσσονται είναι οι παρακάτω:

- Υπήρχαν ανησυχίες σχετικά με τα εξωτερικά κόστη της παραγωγής ρεύματος σε μεγάλες μονάδες, κυρίως όσον αφορά την περιβαλλοντική καταστροφή
- Η φθορά του υπάρχοντος συστήματος μεταφοράς-διανομής αυξάνεται και υπάρχουν περιορισμοί στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος
- Η ανάπτυξη της οικονομίας μαζικής παραγωγής των μικρότερων γεννητριών είναι τεράστια σε σχέση με αυτή των μεγαλύτερων μονάδων
- Οι τιμές του ηλεκτρισμού έχουν αυξηθεί και η οργάνωση της αγοράς του ρεύματος έχει γίνει σημαντικά περίπλοκη

Οι κεφαλαιαγορές έχουν αρχίσει να συνειδητοποιούν ότι παραγωγοί ενέργειας κατάλληλου μεγέθους είναι σε θέση να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις μεγάλες μονάδες. Μικρότερες μονάδες μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερες οικονομίες, μέσω της μαζικής παραγωγής τους, αντιθέτως με τα μεγάλα εργοστάσια ηλεκτρικής παραγωγής που κατασκευάζονται μια κι έξω. Οι μονάδες ΔΠ μειώνουν την ποσότητα της ενέργειας που χάνεται στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται πολύ κοντά στο σημείο όπου χρησιμοποιείται, ίσως ακόμη και στο ίδιο κτίριο. Αυτό μειώνει επίσης το μέγεθος και τον αριθμό των ηλεκτρικών γραμμών που πρέπει να κατασκευαστούν. Επιπροσθέτως, η κλιματική αλλαγή οδήγησε τις κυβερνήσεις να δημιουργήσουν χρεώσεις ανά τόνο CO<sub>2</sub> που εκπέμπει κάθε γεννήτρια. Συμπερασματικά, οι τεχνολογίες DER έχουν γίνει επενδυτικά ανταγωνιστικές των συμβατικών τρόπων ηλεκτροπαραγωγής .

### **1.3 Τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής**

Τα συστήματα ΔΠ είναι μικρής ισχύος(τυπικά από 1 kW έως 10.000 kW)[6] που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν μια εναλλακτική λύση ή μία βελτίωση του ήδη υπάρχοντος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εν λόγω εγκαταστάσεις συνήθως χαρακτηρίζονται από υψηλό αρχικό κόστος κεφαλαίου ανά kw και μικρό ή μηδενικό κόστος καυσίμου. Επειδή συνήθως, η ΔΠ είναι ταυτισμένη με τις ΑΠΕ, υπάρχει το πρόβλημα της στοχαστικότητας στην παραγόμενη ισχύ. Άρα, είναι αναγκαία και κάποια μορφή αποθήκευσης της ενέργειας όταν αυτή είναι σε αφθονία, ώστε τις ώρες ή μέρες με έλλειψη παραγωγής να καταναλωθούν τα αποθέματα. Οι τεχνολογίες που εντάσσονται σε αυτή την νέα μορφή ΣΗΕ χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- *Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας*
- *Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας*

Παρακάτω θα εξετάσουμε ξεχωριστά κάθε μία τις πιο σημαντικές από αυτές τις νέες τεχνολογίες.

#### **1.3.1 Τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας**

##### **■ Φωτοβολταϊκά**

Τα φωτοβολταϊκά είναι μακράν η πιο σημαντική τεχνολογία για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Αποτελούνται από ημιαγώγιμα στοιχεία, τα οποία μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια με χρήση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Πρόκειται για μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία που διπλασιάζεται παγκοσμίως σε εγκατεστημένη ισχύ κάθε δύο χρόνια. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να είναι συγκεντρωμένες εγκαταστάσεις που καλύπτουν έκταση αρκετών στρεμμάτων και έχουν ισχύ μερικών MW, σε στέγες κατοικιών ή καταστημάτων με ισχύ μέχρι 10KW συνήθως καθώς και γενικά ενσωματωμένα σε μεγάλα κτίρια.



*Εικόνα 1.2: Ο πιο συνηθισμένος τύπος φωτοβολταϊκής εγκατάστασης([www.explodedhome.com](http://www.explodedhome.com))*

Η επικρατούσα τεχνολογία φωτοβολταϊκών αυτή τη χρονική περίοδο είναι αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου, ενώ η τεχνολογία thin-film(TF) ηλιακών κυττάρων αντιπροσωπεύει περίπου το 10% της παγκόσμιας φωτοβολταϊκής εγκατεστημένης ισχύος[7]. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία φωτοβολταϊκών έχει βελτιώσει την απόδοση μετατροπής της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρική, έχει μειώσει το κόστος εγκατάστασης ανά watt, καθώς και το χρόνο αποπληρωμής επένδυσης και έχει φτάσει σε ισοτιμία δικτύου σε τουλάχιστον 19 διαφορετικές αγορές το 2014[8]. Με τον όρο «ισοτιμία δικτύου» (grid parity) εννοείται ότι μία εναλλακτική πηγή ενέργειας έχει πετύχει να παράγει την ηλεκτρική ενέργεια σε οριακό κόστος (LCOE) που είναι μικρότερο ή ίσο με την λιανική τιμή πώλησης στον τελικό καταναλωτή.

Όπως και οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και σε αντίθεση με τον άνθρακα και την πυρηνική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια είναι μεταβλητή και μη διακοπτόμενη, αλλά δεν έχει κανένα κόστος καυσίμου, καθόλου ρύπανση κι επίσης ελάχιστο κίνδυνο κατά την λειτουργία της. Τα φωτοβολταϊκά παράγουν μέγιστη ισχύ περίπου το μεσημέρι κάθε ημέρας στον τόπο που είναι εγκατεστημένα και ο χρόνος χρησιμοποίησής τους(capacity factor) είναι περίπου 20%.

#### ■ Ανεμογεννήτριες

Η αιολική ενέργεια είναι η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του αέρα από μία τουρμπίνα, ώστε μία μηχανικά συζευγμένη ηλεκτρική γεννήτρια να την μετατρέψει σε ηλεκτρική. Η αιολική ενέργεια, ως εναλλακτική λύση για την καύση των ορυκτών καυσίμων, είναι άφθονη, ανανεώσιμη, ευρέως διανεμημένη, καθαρή, δεν εκπέμπει αέρια του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, δεν καταναλώνει νερό, και χρησιμοποιεί μικρή έκταση[9]. Συμπερασματικά, οι επιπτώσεις της στο περιβάλλον είναι ελάχιστες σε σχέση με αυτές των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από πολλές μεμονωμένες ανεμογεννήτριες οι οποίες συνδέονται με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος. Η χερσαία αιολική ενέργεια είναι μια φθηνή πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανταγωνιστική ή σε πολλές χώρες

φθηνότερη από τις μονάδες λιγνίτη ή φυσικού αερίου[10]. Ο άνεμος στη θάλασσα είναι σταθερότερος και ισχυρότερος από ότι στην ξηρά, και τα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν λιγότερη οπτική ρύπανση, αλλά το κόστος κατασκευής και συντήρησης είναι σημαντικά υψηλότερα.



*Εικόνα 1.3: Αιολικό πάρκο μεγάλης ισχύος (energypress.gr)*

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν, είτε ως διεσπαρμένη πηγή ενέργειας, είτε ως μεγάλη παραγωγή στο δίκτυο. Τα μεγάλα αιολικά πάρκα έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, αλλά όταν είναι μικρού μεγέθους κατακεκομμένη παραγωγή, οι ανεμογεννήτριες έχουν πολύ υψηλότερο κόστος σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας[11]. Όπως και με την ηλιακή, έτσι και η αιολική ενέργεια είναι μεταβλητή και μη ελεγχόμενη. Οι πυλώνες των ανεμογεννητριών έχουν σημαντικές ασφαλιστικές υποχρεώσεις που οφείλονται στους ισχυρούς ανέμους, αλλά έχουν ασφαλή λειτουργία. Υπάρχουν σαν δομές τα υβριδικά αιολικά συστήματα ισχύος, τα οποία συνδυάζουν την αιολική ενέργεια με άλλα συστήματα DER. Ένα τέτοιο παράδειγμα, είναι η ενσωμάτωση των ανεμογεννητριών σε ηλιακά υβριδικά συστήματα ισχύος, καθώς η αιολική ενέργεια τείνει να συμπληρώνει την ηλιακή, επειδή οι δύο αυτοί ενεργειακοί πόροι παρουσιάζουν αιχμή ισχύος σε διαφορετικό χρόνο μέσα στην ημέρα και το έτος.

#### ■ Υδροηλεκτρικά

Γενικά, με τον όρο υδροηλεκτρική ενέργεια αναφερόμαστε σε όλες αυτές τις τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται την κίνηση του νερού για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι δύο κύριες κατηγορίες αυτής της ενεργειακής πηγής είναι η ηπειρωτική υδροηλεκτρική ενέργεια και η θαλάσσια ή κυματική ενέργεια.[12]

Στην ηπειρωτική παραγωγή συνήθως, υπάρχει μία δεξαμενή με νερό ψηλότερα από μία τουρμπίνα η οποία κινείται χάρη στην πτώση του νερού. Με τη σειρά της η τουρμπίνα δίνει κίνηση στην ηλεκτρογεννήτρια, η οποία παράγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Πρόκειται συνήθως, για μικρά έργα υδροηλεκτρικής ενέργειας με παραγωγή από 1 έως 20 MW, μεγέθη που συμβαδίζουν με την έννοια της κατακεκομμένης παραγωγής.

Παρόλα αυτά υπάρχουν και γιγαντιαία έργα, όπως το εργοστάσιο παραγωγής στο Χούβερ Νταμ των ΗΠΑ με 2074 MW. Παράλληλα, η τουρμπίνα μπορεί να κινείται χάρη σε ένα σταθερό υδάτινο ρεύμα, όπως γίνεται στην Κόστα Ρίκα, η οποία παράγει το 80% της ηλεκτρικής της ενέργειας από υδροηλεκτρικά στα ποτάμια της.

Η δεύτερη κατηγορία, η οποία χωρά πολλή ανάπτυξη και έρευνα ακόμη, είναι η ενέργεια των κυμάτων. Ειδικές συσκευές, που ονομάζονται μετατροπείς κυματικής ενέργειας( wave energy converters WEC) εκμεταλλεύονται την κίνηση του νερού της θάλασσας. Το πρώτο κυματικό πάρκο ξεκίνησε πειραματικά στην Πορτογαλία το 2008 και μέχρι σήμερα πολλές χώρες έχουν εντάξει θαλάσσια υδροηλεκτρική παραγωγή στο ενεργειακό τους μίγμα. Η Ελλάδα έχει πολύ καλές συνθήκες για τέτοια δράση, αλλά δεν έχει παρουσιάσει κάποια πρόοδο.

#### ■ Κυψέλη καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου(fuel cell) είναι μια συσκευή που μετατρέπει την χημική ενέργεια ενός καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας χημικής αντίδρασης των θετικών ιόντων υδρογόνου με οξυγόνο ή άλλο οξειδωτικό παράγοντα. Οι κυψέλες καυσίμου είναι διαφορετικές από τις μπαταρίες, καθώς απαιτούν μια συνεχή τροφοδοσία υδρογόνου και οξυγόνου ή αέρα για να διατηρηθεί η χημική αντίδραση, ενώ σε μια μπαταρία οι χημικές ουσίες που υπάρχουν στο συσσωρευτή αντιδρούν μεταξύ τους για τη δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δύναμης(EMF)[13].



*Εικόνα 1.4: Εγκατάσταση fuel cell(hfcarchive.org/fuelcells)*

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τρόπων παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Αρχικά, οι εκπομπές βλαβερών για το περιβάλλον παραπροϊόντων είναι μηδενική. Ακόμη πιο σημαντικά, η απόδοση των fuel cell είναι πάνω από 50%, διότι δεν εμπίπτουν στους περιορισμούς της θερμοδυναμικής, όπως οι συμβατικές γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, αν αξιοποιηθεί η θερμότητα των υδρατμών που αποβάλλει η κυψέλη καυσίμου κατά τη λειτουργία της η απόδοση μπορεί να ξεπεράσει το 80%. Επομένως, η εν λόγω διάταξη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, για παράδειγμα για ζεστό νερό χρήσης μίας οικίας, με μεγάλη απόδοση και μηδενικούς ρύπους.



*Εικόνα 1.5: Το αυτοκίνητο fuel cell γνωστής αυτοκινητοβιομηχανίας(motortrend.com)*

Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι το μεγάλο κόστος ανά KW εγκατεστημένης ισχύος, το οποίο οφείλεται κυρίως στα δυσεύρετα υλικά των μεμβρανών ανταλλαγής πρωτονίων, καθώς επίσης και το μεγάλο ενεργειακό τίμημα της παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυση νερού. Γίνονται ερευνητικές προσπάθειες για να ξεπεραστούν και τα δύο αυτά προβλήματα. Τέλος, το υδρογόνο έχει πολύ κακό λόγο όγκου προς ενεργειακό περιεχόμενο.

Οι πρώτες κυψέλες καυσίμου εφευρέθηκαν το 1838. Η πρώτη εμπορική χρήση τους ήρθε περισσότερο από έναν αιώνα αργότερα, στα διαστημικά προγράμματα της NASA για την παραγωγή ενέργειας για τους δορυφόρους και τις διαστημικές κάψουλες. Από τότε, οι κυψέλες καυσίμου έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές άλλες εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται ως κύρια, αλλά και ως εφεδρική πηγή ρεύματος σε εμπορικές, βιομηχανικές και οικιακές εγκαταστάσεις και σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές.

Χρησιμοποιούνται επίσης σε οχήματα, όπως ανυψωτικά μηχανήματα, επιβατικά αυτοκίνητα, λεωφορεία, πλοία και υποβρύχια. Κάποιες αυτοκινητοβιομηχανίες προσπαθούν να εισάγουν την τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Για να αντιμετωπιστεί το προαναφερθέν ζήτημα όγκου έχουν δημιουργηθεί εμπορικά δύο κλάσεις αποθήκευσης υδρογόνου, οι h35 και h70 που αντιστοιχούν σε πίεση mega-pascal. Έτσι, έχει επιτευχθεί αυτονομία 300 χιλιομέτρων με δεξαμενή μόνο 50 λίτρων.

#### ■ Ενέργεια από απορρίμματα(energy-to-waste)

Η ενέργεια από απόβλητα είναι η διαδικασία της παραγωγής ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας ή και θερμότητας από την επεξεργασία των αποβλήτων τροφής, των αστικών λυμάτων, της ζωικής κοπριάς και των γεωργικών παραπροϊόντων. Είναι μια μορφή ανάκτησης ενέργειας, καθώς και μία βιώσιμη λύση διαχείρισης των απορριμάτων μίας κοινωνίας[14].

Οι περισσότερες διαδικασίες EtW παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ή και θερμότητα απ'ευθείας μέσω της καύσης των αποβλήτων, ή συνθέτουν ένα υγρό ή αέριο καύσιμο, όπως μεθάνιο, μεθανόλη ή αιθανόλη, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει μία τεχνολογία που αποσπά αέριο υδρογόνο από τα απορρίμματα, το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει fuel cell. Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις αποτέφρωσης βιομάζας είναι πολύ διαφορετικές από τις παλιότερες που δεν έκαναν κανένα διαχωρισμό υλικών. Οι νέοι αποτεφρωτές ξεχωρίζουν κάθε ανακυκλώσιμο υλικό, αφαιρούν πλήρως την υγρασία και μειώνουν τον όγκο των αρχικών αποβλήτων κατά 95%. Η Σουηδία είναι το πιο λαμπρό παράδειγμα αυτής της μεθόδου.



*Εικόνα 1.6: Μονάδα EtW στη Σουηδία(planetforwardgw.files.wordpress.com)*

Ανησυχία αποτελεί η σωστή διαχείριση των υπολειμμάτων: της τοξικής στάχτης που εκπέμπεται, καθώς και η απομένουσα τέφρα στον καυστήρα, η οποία πρέπει να επαναχρησιμοποιείται σωστά. Όλες οι νέες εγκαταστάσεις αποτέφρωσης αποβλήτων στις χώρες του ΟΟΣΑ πρέπει να πληρούν τις αυστηρές προδιαγραφές εκπομπών, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων για τα οξείδια του αζώτου, το διοξείδιο του θείου, τα βαρέα μέταλλα και τις διοξίνες. Οι μονάδες αυτές εκπέμπουν λεπτά σωματίδια, βαρέα μέταλλα, ιχνοστοιχεία διοξινών και όξινων αερίων, ακόμη και αν οι εκπομπές αυτές είναι σχετικά χαμηλές[15]. Όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες δεν μπορούν να αποφευχθούν, υπάρχει το επιχείρημα ότι η βιομάζα προέρχεται από φυτά τα οποία όσο ζουν απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα το οποίο απλά επανέρχεται με την καύση τους. Έτσι, μία στρατηγική χρήσης βιομάζας θα έχει μηδενικό αποτέλεσμα στην ατμόσφαιρα.

#### ■ Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία διεσπαρμένης παραγωγής που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές σταθερής παραγωγής ενέργειας [16]. Πρόκειται για ένα είδος μηχανής εσωτερικής καύσης που παράγει τόσο θερμότητας όσο και ηλεκτρική ενέργεια σε σχετικά μικρή κλίμακα. Προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες μικρής κλίμακας: μικρό αριθμό κινούμενων μερών, συμπαγές μέγεθος, μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, χαμηλότερες εκπομπές ρύπων και μικρό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του βιοαερίου που αναφέρθηκε παραπάνω.

### 1.3.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

#### ■ Συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές (αλλιώς μπαταρίες) μετατρέπουν τη χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μπαταρία αποτελείται από κάποιο αριθμό βολταϊκών κυττάρων. Κάθε κύτταρο αποτελείται από δύο μέρη συνδεδεμένα σε σειρά μέσω ενός αγωγίμου ηλεκτρολύτη που περιέχει ανιόντα και κατιόντα. Κάθε ένα από τα δύο μέρη του κυττάρου περιλαμβάνει ηλεκτρολύτη και κάποιο μέταλλο, το ηλεκτρόδιο[17]. Το ένα ηλεκτρόδιο, στο οποίο μεταναστεύουν ανιόντα είναι το αρνητικό, ενώ αυτό στο οποίο μεταναστεύουν κατιόντα είναι το θετικό. Ένας διαχωριστής επιτρέπει ιόντα να ρέουν μεταξύ των δύο μερών, αλλά εμποδίζει την ανάμιξη των ηλεκτρολυτών. Όταν η μπαταρία τροφοδοτεί ηλεκτρική ενέργεια σε κάποια συσκευή, ο αρνητικός πόλος είναι η πηγή των ηλεκτρονίων που θα διέλθουν από την συνδεδεμένη συσκευή. Όταν μια μπαταρία είναι συνδεδεμένη σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, οι ηλεκτρολύτες είναι σε θέση να κινούνται εσωτερικά ως ιόντα, επιτρέποντας στις χημικές αντιδράσεις να ολοκληρωθούν σε χωριστούς ακροδέκτες και έτσι μεταφέρουν ενέργεια στο εξωτερικό κύκλωμα. Εφαρμόζοντας ηλεκτρικό ρεύμα στα κελιά η χημική αντίδραση μπορεί να αντιστραφεί. Αυτό αναγεννά τα αρχικά χημικά αντιδραστήρια, ώστε να μπορεί η μπαταρία να χρησιμοποιηθεί ξανά και ξανά.



*Εικόνα 1.7: Συστοιχία μπαταριών στην Αλάσκα(<http://news.uaf.edu>)*

Η παλαιότερη μορφή επαναφορτιζόμενης μπαταρίας είναι η μπαταρία μολύβδου, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Υπάρχουν και άλλοι τύποι φορητών επαναφορτιζόμενων μπαταριών, τα λεγόμενα "ξηρά κελιά", που είναι χρήσιμα σε εφαρμογές όπως κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές. Κύτταρα αυτού του τύπου είναι οι νικελίου-καδμίου (NiCd), νικελίου-ψευδαργύρου (NiZn), νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH) και ιόντων λιθίου(Li-ion).

Τα συστήματα αποθήκευσης με συσσωρευτές συνδεδεμένους με μεγάλους μετατροπείς στερεάς κατάστασης έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σταθεροποίηση των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας[18]. Για παράδειγμα, στο Puerto Rico ένα σύστημα με χωρητικότητα 5MWh χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση της συχνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται στο νησί. Ένα αντίστοιχο σύστημα, με μπαταρίες νικελίου-καδμίου χωρητικότητας 6.75MWh είχε εγκατασταθεί στο Fairbanks της Αλάσκας το 2003 για τη σταθεροποίηση της τάσης στο τέλος μιας μακράς γραμμής μεταφοράς. Επιπρόσθετα, πολλές οικιακές εγκαταστάσεις εκτός δικτύου (off-grid) βασίζονται σε συσσωρευτές για την ηλεκτρική τους ενέργεια.

## ■ Υδροηλεκτρική αποθήκευση

Σε πολλά μέρη, η άντληση ύδατος ως μορφή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για να εξομαλύνει την καθημερινή παραγόμενη ισχύ με την άντληση νερού σε δεξαμενή αποθήκευσης που βρίσκεται ψηλότερα κατά τις εκτός αιχμής ώρες και τα Σαββατοκύριακα, χρησιμοποιώντας την πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα από τις μονάδες άνθρακα ή τα πυρηνικά εργοστάσια. Κατά τις ώρες αιχμής, το νερό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, συχνά ως υψηλής αξίας απόθεμα ταχείας απόκρισης για την κάλυψη παροδικών αιχμών της ζήτησης. Η αποθήκευση μέσω άντλησης ανακτά περίπου από 70% έως 85% της αρχικής ενέργειας που καταναλώνεται, και είναι σήμερα η πιο οικονομικά αποδοτική μορφή μαζικής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας[19]. Το κύριο πρόβλημα με τις μονάδες άντλησης ύδατος είναι ότι απαιτούν συνήθως δύο κοντινές δεξαμενές με σημαντική υψομετρική διαφορά, κάτι το οποίο συχνά απαιτεί μεγάλες κεφαλαιουχικές δαπάνες.

Ο ρόλος της υδροηλεκτρικής αποθήκευσης στη διεσπαρμένη παραγωγή προβλέπεται ότι θα είναι σημαντικός στο μέλλον. Όταν η αιολική και ηλιακή παραγωγή είναι μεγαλύτερες της ζήτησης θα αντλείται νερό και τη νύχτα ή όταν έχει άπνοια το νερό θα εκτελεί αντίστροφη κίνηση, ώστε οι υδροστρόβιλοι να παράγουν την απαιτούμενη ισχύ.

## ■ Υδρογόνο

Το υδρογόνο έχει αναπτυχθεί ως ένα μέσο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο παράγεται, στη συνέχεια συμπιέζεται ή υγροποιείται, και αποθηκεύεται κρυογονικά στους  $-252.882\text{ }^{\circ}\text{C}$ , και στη συνέχεια μετατρέπεται πάλι σε ηλεκτρική ενέργεια ή θερμότητα. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για φορητή (οχήματα) ή σταθερή παραγωγή ενέργειας. Σε σύγκριση με την άντληση νερού και τις μπαταρίες, το υδρογόνο έχει το πλεονέκτημα ότι είναι ένα καύσιμο υψηλής ενεργειακής πυκνότητας[20].

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί, είτε με αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό, είτε με ηλεκτρόλυση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Η αναμόρφωση του φυσικού αερίου παράγει διοξείδιο του άνθρακα ως παραπροϊόν. Η ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας και υψηλή πίεσης είναι δύο τεχνικές, με τις οποίες η απόδοση της παραγωγής υδρογόνου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Το υδρογόνο στη συνέχεια, μετατρέπεται πάλι σε ηλεκτρική ενέργεια σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης, ή μία κυψέλη καυσίμου.

Η έννοια της ενέργειας από αμμωνία προσφέρει ένα σχέδιο αποθήκευσης ενέργειας χωρίς εκπομπές άνθρακα. Μερικές φορές, όταν υπάρχει πλεόνασμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μπορεί η ενέργεια να μετατραπεί σε αμμωνία τοπικά με τη χρήση εργοστασίων μικρού μεγέθους. Με την υπάρχουσα τεχνολογία μπορεί να παραχθεί αμμωνία από τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο με τη βοήθεια του ηλεκτρικού ρεύματος και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας υψηλή θερμοκρασία και πίεση να μετατραπεί το υδρογόνου μαζί με άζωτο από τον αέρα σε αμμωνία. Η αμμωνία είναι παρόμοια με το προπάνιο όταν αποθηκεύεται σε υγρή μορφή, σε αντίθεση με το υδρογόνο που είναι δύσκολο να υγροποιηθεί και να αποθηκευτεί κρυογονικά. Ένα μόνο λίτρο αμμωνίας μπορεί να παράγει 3.52 KWh. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης, απελευθερώνοντας μόνο νερό και άζωτο, αλλά όχι  $\text{CO}_2$  και λίγο ή καθόλου οξείδια του αζώτου.

### ■ Συμπίεση αέρα

Μια άλλη μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο είναι να χρησιμοποιήσουμε εκτός αιχμής ή ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ για τη συμπίεση αέρα, ο οποίος συνήθως αποθηκεύεται σε ένα παλιό ορυχείο ή κάποιο άλλο είδος γεωλογικού σχηματισμού. Όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή, ο συμπιεσμένος αέρας θερμαίνεται με μία μικρή ποσότητα φυσικού αερίου και στη συνέχεια περνά μέσα από στροβίλους για την παραγωγή ηλεκτρισμού[21]. Η απόδοση αυτής της μεθόδου είναι συνήθως γύρω στο 60 με 90%.



*Εικόνα 1.8: Ο νέος αποδοτικός σφόνδυλος που κατασκεύασε η NASA(πηγή NASA)*

### ■ Κινητική αποθήκευση ενέργειας

Η μηχανική αδράνεια είναι η βάση αυτής της μεθόδου αποθήκευσης. Όταν η ηλεκτρική ισχύς ρέει προς τη συσκευή, ένας ηλεκτρικός κινητήρας επιταχύνει ένα βαρύ περιστρεφόμενο δίσκο που ονομάζεται σφόνδυλος(flywheel). Όταν η ροή ρεύματος αντιστρέφεται, ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια επιβραδύνοντας το δίσκο και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται ως κινητική ενέργεια του δίσκου. Η τριβή πρέπει να διατηρείται στο ελάχιστο για να παρατείνεται ο χρόνος αποθήκευσης. Αυτό συχνά επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του σφονδύλου σε κενό και με τη χρήση μαγνητών, που κάνουν τη μέθοδο ακριβή. Μεγαλύτερες ταχύτητες του τροχού επιτρέπουν μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης, αλλά απαιτούν ισχυρά υλικά όπως ο χάλυβα ή σύνθετα υλικά για να μπορεί η συσκευή να αντισταθεί στις φυγόκεντρες δυνάμεις. Δυστυχώς, τα εν λόγω συστήματα γίνονται οικονομικά συμφέροντα σε μεγέθη ισχύος και χωρητικότητας, που τα καθιστούν κατάλληλα μόνο για εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίου, για ηλεκτροδότηση τρένων και για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως το σύστημα των 20MW στην Ιρλανδία[22].

#### ■ Θερμική αποθήκευση ενέργειας

Είναι η συλλογή της περίσσειας θερμικής ενέργειας για μελλοντική χρήση, ώρες, ημέρες ή και πολλούς μήνες αργότερα, σε συγκεκριμένο κτίριο ή πολλαπλά, σε μία ολόκληρη περιοχή, πόλη ή ακόμα και περιφέρεια ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία. Ως παραδείγματα: εξισορρόπηση της ζήτησης ενέργειας μεταξύ της ημέρας και της νύχτας, η ζέστη του καλοκαιριού από ηλιακούς συλλέκτες μπορεί να αποθηκευτεί για θέρμανση το χειμώνα και αντίστροφα, το κρύο του αέρα το χειμώνα μπορεί να συλλεχθεί για κλιματισμό το καλοκαίρι. Μία περιοχή που αυτή η μέθοδος έχει σημαντική αξία είναι οι περιοχές της ερήμου Σαχάρα, όπου η μέρα με τη νύχτα έχουν σημαντική θερμοκρασιακή διαφορά[23].

#### ■ Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας

Η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (Superconducting magnetic energy storage-SMES) αποθηκεύει ενέργεια σε μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο που ψύχεται κρυογονικά σε θερμοκρασία υπερβολικά χαμηλή. Ένα σύστημα SMES περιλαμβάνει τρία μέρη: το υπεραγώγιμο πηνίο, το σύστημα ψύξης και το σύστημα ρύθμισης ισχύος. Μόλις δοθεί στο πηνίο ρεύμα, αυτό θα το διατηρήσει ες άπειρον. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί πίσω στο δίκτυο με εκφόρτιση του πηνίου. Η παραπάνω μέθοδος είναι πολύ αποδοτική με απόδοση μεγαλύτερη από 95%. Ο κύριος περιορισμός για την εμπορική χρήση αυτής της μεθόδου αποθήκευσης ενέργειας είναι το υψηλό κόστος των υπεραγωγών. Λόγω των ενεργειακών αναγκών της ψύξης, και τα όρια της συνολικής ενέργειας που μπορούν να αποθηκευτούν, χρησιμοποιείται μόνο για αποθήκευση ενέργειας μικρής διάρκειας[24].

#### ■ Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές (Super Capacitors-SC) είναι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές με τιμές χωρητικότητας πολύ υψηλότερες από τους κοινούς πυκνωτές και γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών και επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Συνήθως, αποθηκεύουν από 10 έως 100 φορές περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου ή μάζας σε σχέση με τους απλούς πυκνωτές, μπορούν να φορτιστούν ή να εκφορτιστούν πολύ πιο γρήγορα από τις μπαταρίες και αντέχουν πολλούς περισσότερους κύκλους φόρτισης - αποφόρτισης από τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν πολλούς κύκλους ταχείας φόρτισης - αποφόρτισης και όχι μακροχρόνια αποθήκευση κάποιου ποσού ενέργειας[25].

### **1.4 Σύνδεση της διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο**

Για λόγους αξιοπιστίας, οι προαναφερόμενες τεχνολογίες ΔΠ συνδέονται στο ίδιο δίκτυο μεταφοράς με τους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής. Διάφορα τεχνικά και οικονομικά θέματα προκύπτουν από την ενσωμάτωση αυτών των ενεργειακών πόρων σε ένα δίκτυο. Τεχνικά προβλήματα που μπορεί να εμφανίζονται είναι σχετικά με την ποιότητα της ισχύος, τη σταθερότητα της τάσης, τις αρμονικές, την αξιοπιστία, την προστασία και τον έλεγχο. Η συμπεριφορά των προστατευτικών διατάξεων για το

δίκτυο πρέπει να εξετάζεται για όλους τους συνδυασμούς διεσπαρμένης και κεντρικής παραγωγής. Μια ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας της κατανεμημένης παραγωγής μπορεί να επηρεάσει βασικές λειτουργίες του δικτύου, όπως ο έλεγχος της συχνότητας και της κατανομής των αποθεμάτων. Ως αποτέλεσμα, λειτουργίες έξυπνου δικτύου (smart grid), εικονικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι απαραίτητα να προστίθενται στο δίκτυο[26].

Κάθε γεννήτρια ΔΠ έχει τα δικά της προβλήματα ένταξης στο δίκτυο. Η ηλιακή και η αιολική ενέργεια έχουν διακοπτόμενη και απρόβλεπτη παραγωγή, κι έτσι προκαλούν πολλά προβλήματα σταθερότητας τάσης και συχνότητας. Αυτή η ιδιοτροπία οδηγεί σε συνεχείς μεταβολές τον μηχανολογικό εξοπλισμό των μετασχηματιστών (ΣΑΤΥΦ) του δικτύου, με αποτέλεσμα αυτός να φθείρεται. Επίσης, χωρίς καμία μορφή αποθήκευσης ενέργειας σε περιόδους υψηλής ηλιακής φωτεινότητας, οι εταιρείες πρέπει να αυξάνουν γρήγορα την παραγωγή κατά την ώρα του ηλιοβασιλέματος, ώστε να αντισταθμιστεί η απώλεια της φωτοβολταϊκής παραγωγής. Αυτή η απότομη αλλαγή παραγωγής έχει ταυτιστεί με τον όρο καμπύλη πάπιας (duck curve)[27] που θα είναι μάλλον, μια σημαντική ανησυχία για τους διαχειριστές δικτύων στο μέλλον.

Η στρατηγική της αποθήκευσης θα μπορούσε να διορθώσει αυτά τα ζητήματα, εάν εφαρμοστεί. Οι σφόνδυλοι έχουν δείξει ότι μπορούν να επιτύχουν άριστη ρύθμιση συχνότητας[28]. Οι μπαταρίες βραχυπρόθεσμης χρήσης, σε μεγάλες συστοιχίες, μπορούν να βοηθήσουν στην εξομάλυνση της φωτοβολταϊκής παραγωγής, καθώς και στον έλεγχο της τάσης. Ωστόσο, το κόστος είναι ένας σημαντικά περιοριστικός παράγοντας για την αποθήκευση ενέργειας καθώς κάθε τεχνική είναι απαγορευτικά ακριβή για την παραγωγή σε ευρεία κλίμακα και συγκριτικά μη ενεργειακά πυκνή σε σύγκριση με τα υγρά ορυκτά καύσιμα. Τέλος, μια άλλη απαραίτητη μέθοδος που βοηθά στην ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών για την ορθή κατανεμημένη παραγωγή είναι η χρήση ευφώνων υβριδικών μετατροπέων.

## **1.5 Πλεονεκτήματα από τη χρήση Διεσπαρμένης Παραγωγής**

- ◆ Βοηθάει στη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και σε επιβλαβείς εκπομπές όπως τα οξείδια του θείου και του αζώτου, με την εκτεταμένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συνεισφέροντας έτσι με ουσιαστικό τρόπο στην προστασία του περιβάλλοντος.
- ◆ Μπορούν να βρεθούν πιο εύκολα τοποθεσίες για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες διεσπαρμένες πηγές από ότι για ένα μεγάλο, κεντρικό εργοστάσιο παραγωγής ισχύος και μάλιστα οι μονάδες αυτές είναι πιο εύκολο και κυρίως πιο γρήγορο να συνδεθούν στο δίκτυο. Η έκθεση και το ρίσκο του κεφαλαίου μειώνονται, και αποφεύγονται οι περιττές δαπάνες.
- ◆ Καλύπτει μία ευρεία γκάμα τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένου πολλών ανανεώσιμων τεχνολογιών που παρέχουν ισχύ μικρής κλίμακας, σε τοποθεσία κοντά στους χρήστες. Όλες αυτές οι τεχνολογίες δημιουργούν νέες ευκαιρίες στην αγορά και αυξημένο βιομηχανικό ανταγωνισμό.
- ◆ Οδηγεί σε ελαχιστοποίηση των απωλειών μεταφοράς, κοντά στην τοποθεσία στην οποία χρησιμοποιείται, όπως επίσης και του κόστους μεταφοράς, που αποτελεί ένα σημαντικό μέρος (πάνω από το 30%) του συνολικού κόστους του ηλεκτρισμού.

- ◆ Βοηθά επίσης στην αποσυμφόρηση των ήδη υπαρχόντων δικτύων. Επιπλέον, επιτρέπει τη χρήση της θερμικής ενέργειας σε εφαρμογές συμπαραγωγής, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του συστήματος.
- ◆ Παρέχει εναλλακτικές λύσεις για αξιόπιστη και οικονομική παροχή ενέργειας σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις, όσο αυξάνεται η ζήτηση για περισσότερη και καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ. Μπορεί να εξασφαλίσει στους πελάτες ότι η παροχή είναι συνεχόμενη και αξιόπιστη, αποκαθιστώντας την ηλεκτρική ενέργεια σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, σε περιπτώσεις διακοπής της ρευματοδότησης.
- ◆ Παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές θερμικών φορτίων, μέσω των εφαρμογών συμπαραγωγής, καθώς επίσης και σε εκείνους που έχουν πρόσβαση σε φτηνά καύσιμα, όπως για παράδειγμα στο φυσικό αέριο. Επιπρόσθετα, προσφέρει πλεονεκτήματα στους καταναλωτές που ευνοούνται από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής που ζούνε και μπορούν να αξιοποιήσουν τις ανανεώσιμες πηγές.
- ◆ Μπορεί να επιφέρει μείωση στις εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών, αλλά και άλλων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

## **1.6 Μειονεκτήματα από τη χρήσης Διεσπαρμένης Παραγωγής**

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

πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

- ◆ Ο μεγάλος αριθμός μονάδων παραγωγής μπορεί να προκαλέσει, εκτός από τη συνήθη ροή φορτίου από τη μέση τάση στη χαμηλή, επιπλέον ροή φορτίου, από την χαμηλή τάση στο δίκτυο μέσης τάσης. Αυτή η αμφίδρομη ροή φορτίου, απαιτεί διαφορετικά μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης. Επιπλέον, η σημαντική προσαρμοστικότητα που προσφέρουν οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, προϋποθέτει καλύτερη ανάλυση και μεγαλύτερη προσοχή, όσον αφορά τη διαχείριση και λειτουργία του δικτύου.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### Μικροδίκτυα

#### 2.1 Η έννοια του Μικροδικτύου

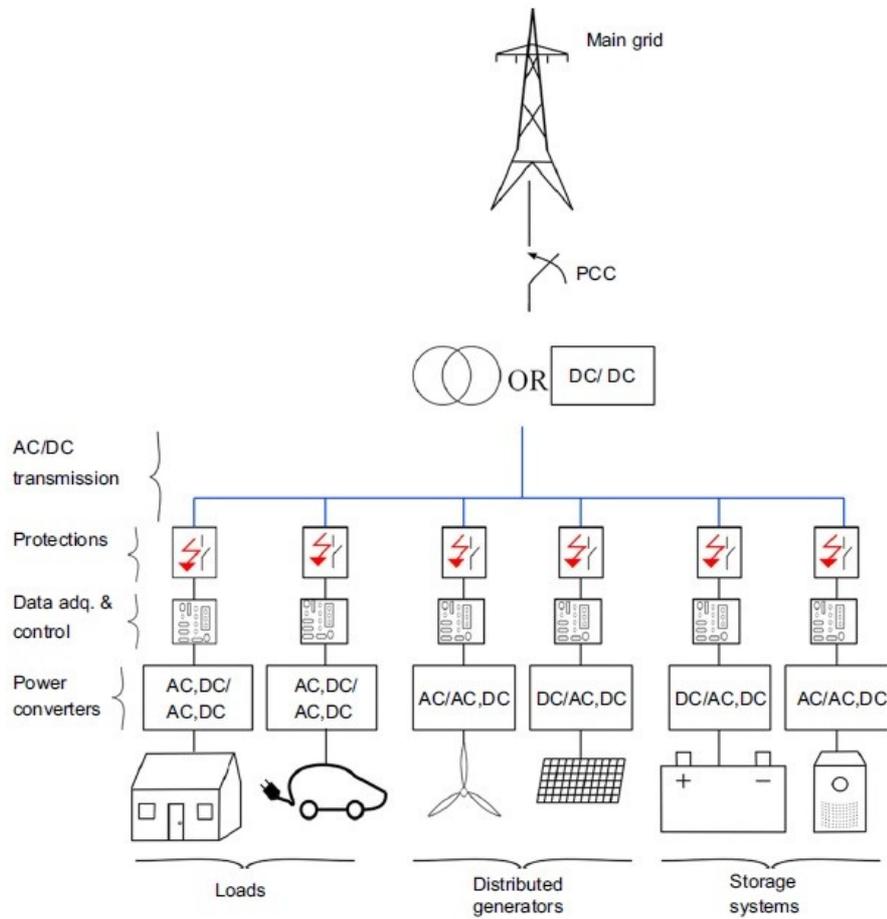
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη ΔΠ είναι μια αποτελεσματική, αξιόπιστη και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση σε σχέση με το παραδοσιακό συγκεντρωμένο σύστημα ενέργειας. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως το μικρό μέγεθος των γεννητριών, τη μικρότερη απόσταση μεταξύ της παραγωγής και των φορτίων, τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κτλ. Ωστόσο, λόγω της διακοπτόμενης λειτουργίας τους, της τυχαιότητας και αβεβαιότητας που προκαλείται από μετεωρολογικούς παράγοντες, είναι δύσκολο να ενσωματωθούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας απευθείας στο δίκτυο. Με την ενσωμάτωση διεσπαρμένων και ανανεώσιμων πηγών, συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, μια ποικιλία φορτίων, την απόκτηση δεδομένων και συσκευών εποπτικού ελέγχου, τα μικροδίκτυα είναι η διεπαφή μεταξύ των καταναμημένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και το δίκτυο κοινής ωφελείας. [30]

*Μικροδίκτυο μπορεί να οριστεί ένα μικρό, τοπικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, που περιέχει παραγωγές και φορτία και η λειτουργία του οποίου μπορεί να διαχωριστεί πλήρως από το κύριο σύστημα διανομής ή να είναι συνδεδεμένο με αυτό, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Διαφέρει από τα υπάρχοντα απομονωμένα συστήματα ισχύος, στα οποία η σύνδεση και αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο είναι μια μόνιμη κατάσταση.*

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να αποσυνδέεται από το κύριο δίκτυο, όταν εκείνο αποτυγχάνει ή όταν η ποιότητα του ρεύματος του δεν είναι ικανοποιητική και οι χρήστες μπορούν να αποκτήσουν μια υψηλότερης ποιότητας, φθηνότερη και καθαρότερη μορφή ενέργειας, εφόσον λογαριάζουμε το οικονομικό σκέλος και τις πολιτικές εκπομπών του θερμοκηπίου. Τα μικροδίκτυα έχουν πολλά χαρακτηριστικά που τα κάνουν να διαφέρουν από τα συμβατικά συστήματα ισχύος:

- (α) Τα χαρακτηριστικά χώρου κατάστασης και δυναμικότητας των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας (DERs) είναι διαφορετικά
- (β) υπάρχει ένας σημαντικός βαθμός ανισορροπίας λόγω της παρουσίας μονοφασικών φορτίων ή και παραγωγών, και
- (γ) υπάρχει μια σημαντική μερίδα τροφοδοσίας από "μη-ελεγχόμενες" πηγές, γεγονός που συνεπάγεται οι απαιτούμενες στρατηγικές ελέγχου να διαφέρουν από εκείνες που εφαρμόζονται στα συμβατικά συστήματα ισχύος.

Αρκετές εταιρείες και ιδρύματα έχουν αναπτύξει ένα μεγάλο αριθμό συστημάτων ελέγχου, ώστε να ικανοποιήσουν όλες τις λειτουργίες που απαιτούνται από ένα μικροδίκτυο. Ως εκ τούτου, ένα μεγάλο μέρος της επιστημονικής βιβλιογραφίας ασχολείται με διάφορες πτυχές των μικροδικτύων. Έτσι, ο σχεδιασμός ενός συστήματος ελέγχου για ένα μικροδίκτυο είναι ένα σύνθετο έργο που περιλαμβάνει μια σειρά από διαφορετικές λειτουργίες, οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους.



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα ενός μικροδικτύου [30]

## 2.2 Περιγραφή ενός μικροδικτύου

### 2.2.1 Δομή

Τα μικροδίκτυα είναι ολοκληρωμένα συστήματα στα οποία οι DER λειτουργούν με τη μορφή ενός δικτύου, το οποίο μπορεί να είναι συνδεδεμένο ή αποσυνδεδεμένο από το κύριο δίκτυο στο σημείο κοινής σύνδεσης - ΣΚΣ (point of common coupling - PCC). Τα στοιχεία που συναποτελούν ένα μικροδίκτυο περιγράφονται ως εξής:

- ◆ Διεσπαρμένες Γεννήτριες(ΔΓ). Τα ηλεκτρικά μικροδίκτυα είναι μια καλή επιλογή για την ενσωμάτωση ΔΓ διαφορετικού τύπου, δεδομένου ότι εκμεταλλεύονται τους διαθέσιμους πόρους κάθε τοποθεσίας (άνεμος, ήλιος, βιομάζα, κλπ). Μία ΔΓ μπορεί να λειτουργήσει με δύο τρόπους: ως πηγή ισχύος, αναφερόμενη και ως πηγή ρεύματος, που είναι υπεύθυνη για την ρύθμιση ισχύος ή ως πηγή τάσης, καθορίζοντας την τάση και τη συχνότητα του μικροδικτύου. Για τις γεννήτριες που είναι πηγές ρεύματος, οι ελεγκτές κατηγοριοποιούνται σε γραμμικούς και μη γραμμικούς. Όταν όμως, ασχολούμαστε με γεννήτριες, των οποίων οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς παίζουν το ρόλο πηγής τάσης, ο έλεγχος συνήθως βασίζεται σε ένα βρόχο τάσης που κλιμακώνεται από έναν εσωτερικό βρόχο ισχύος.

- ◆ Συστήματα Αποθήκευσης(ΣΑ). Η σταθερότητα, η ποιότητα ισχύος και η αξιοπιστία της τροφοδοσίας βελτιώνονται χάρη στη χρήση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, ενισχύεται η συνολική απόδοση των μικροδικτύων με τρεις τρόπους: οι ΔΓ μπορούν να λειτουργούν με συνεχή και σταθερή παραγωγή ή να ακολουθούν βέλτιστα τις υποδείξεις του ελέγχου παρά τις διακυμάνσεις του φορτίου, παρέχεται η δυνατότητα να ξεπερνιούνται οι δυναμικές μεταβολές πρωτογενούς ενέργειας και επιτρέπεται στις ΔΓ να λειτουργούν απρόσκοπτα ως κατανεμημένες μονάδες.
- ◆ Φορτία. Τα μικροδίκτυα μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε διάφορα είδη φορτίων (οικιακά, βιομηχανικά κλπ). Τα φορτία αυτά ταξινομούνται ως κρίσιμα και μη κρίσιμα, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργία. Η λειτουργία αυτή περιλαμβάνει πτυχές όπως, η προτεραιότητα υπηρεσίας για κρίσιμα φορτία, η ενίσχυση της ποιότητας ισχύος συγκεκριμένων φορτίων, η βελτίωση της αξιοπιστίας προκαθορισμένων κατηγοριών φορτίου κλπ. Η τοπική παραγωγή με γρήγορα και ακριβή συστήματα προστασίας μπορεί να αποτρέψει διαταραχές που μπορούν να επηρεάσουν τα ευαίσθητα φορτία.

### **2.2.2 Σύγκριση AC και DC μικροδικτύων**

Όσον αφορά τον τύπο της διανομής, υπάρχουν τα μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος(AC), συνεχούς ρεύματος(DC) και τα ανάμικτα (AC/DC). Σχεδόν όλα τα πειραματικά μικροδίκτυα που έχουν δοκιμαστεί σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν ένα σύστημα διανομής AC. Σε γενικές γραμμές, τα AC μικροδίκτυα παρουσιάζουν έναν αριθμό πλεονεκτημάτων έναντι των αντίστοιχων συστημάτων DC:

- ➔ Εύκολος μετασχηματισμός της τάσης. Η AC τάση μπορεί να αυξάνεται και να μειώνεται εύκολα μέσω της χρήσης ηλεκτρικών μετασχηματιστών. Από την άλλη μεριά, η μετατροπή της DC τάσης γίνεται μέσω DC-DC μετατροπέων που απαιτούν μια πιο πολύπλοκη υλοποίηση.
- ➔ Διατάξεις προστασίας. Η προστασία των κυκλωμάτων είναι πιο ώριμη για τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος σε σχέση με τα συστήματα συνεχούς και απαιτείται περισσότερη έρευνα στο συγκεκριμένο ζήτημα.

Ωστόσο, τα συστήματα διανομής DC προσφέρουν, επίσης πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα συστήματα διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος:

- ➔ Ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι μπαταρίες, τα φωτοβολταϊκά και σχεδόν κάθε συσκευή που σχετίζεται με ΑΠΕ μπορεί εύκολα να συνδεθεί απευθείας με συστήματα διανομής DC χωρίς την ανάγκη κάποιου σταδίου αναστροφής.
- ➔ Μεγαλύτερη αξιοπιστία. Οι DC γραμμές παρουσιάζουν μικρότερη αντίσταση απ' ό,τι οι AC γραμμές. Επιπλέον, το επιδερμικό φαινόμενο είναι παρόν μόνο σε συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, το οποίο αυξάνει το πάχος των γραμμών των τελευταίων.

- Εξάλειψη άεργου ισχύος. Η άεργος ισχύς δεν υπάρχει σε γραμμές συνεχούς ρεύματος. Χάρη σε αυτό, η ικανότητα μεταφοράς ισχύος αυξάνεται και γίνεται μεγαλύτερη χρήση των δυνατοτήτων των γεννητριών.
- Δεν υπάρχει ανάγκη για συγχρονισμό. Τα συστήματα συνεχούς ρεύματος έχουν μηδενική συχνότητα, επομένως δεν απαιτείται έλεγχος συγχρονισμού κάθε φορά που επιθυμούμε να συνδεθεί ή να αποσυνδεθεί μία συσκευή στο δίκτυο.
- Σύνδεση φορτίων. Ένας μεγάλος αριθμός φορτίων (υπολογιστές, φορτιστές μπαταριών, κλπ) ενσωματώνουν στάδια ανόρθωσης της τάσης για τη σύνδεσή τους με το κοινό δίκτυο AC. Εάν χρησιμοποιείται μια γραμμή διανομής DC, αυτό το στάδιο αποφεύγεται και απαιτούνται μόνο οι απλούστεροι DC-DC μετατροπείς.
- Αποφεύγεται η έκθεση του ανθρώπου στη συχνότητα των 50 Hz. Οι πιθανές ανησυχίες για την υγεία από την έκθεση του ανθρώπου στη συχνότητα του εναλλασσομένου ρεύματος αποφεύγεται όταν οι γραμμές διανομής είναι DC.

Επιπλέον, τα στατιστικά δεδομένα λειτουργίας που χρησιμοποιούνται για την σύγκριση των συστημάτων AC και DC για κρίσιμα φορτία δείχνουν μία υψηλότερη διαθεσιμότητα των DC αρχιτεκτονικών. Τα DC μικροδίκτυα χαμηλής τάσης είναι η πιο κατάλληλη επιλογή σε εφαρμογές όπου τα περισσότερα από τα φορτία είναι ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές. Γι' αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί σε συστήματα ισχύος κέντρων τηλεπικοινωνιών, στον έλεγχο συστημάτων ισχύος και σε συστήματα προστασίας. Η παρουσία των DC μικροδικτύων εξακολουθεί να είναι περιορισμένη, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας όμως, αυξάνεται χάρη στα πλεονεκτήματα που προσφέρουν.

### **2.2.3 Πρότυπα**

Τις τελευταίες δεκαετίες, αρκετές εταιρείες και ιδρύματα έχουν αναπτύξει πολλές συσκευές και ελέγχους, ώστε να ενσωματώσουν στο κύριο δίκτυο με κατάλληλο τρόπο την ΔΠ. Ως εκ τούτου, πολλές ποικιλίες ελέγχων, τρόπων διασύνδεσης, ηλεκτρονικών διεπαφών κλπ μπορούν να βρεθούν, εμποδίζοντας τον σχεδιασμό ενός μοναδικού προτύπου για τη σύνδεση ΔΠ στο δίκτυο. Ένας αριθμός προτύπων έχουν αναπτυχθεί, με ένα από τα πιο σημαντικά να είναι το πρότυπο της IEEE “Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems 1547”. Αυτή η ομάδα προτύπων καθορίζει τα κριτήρια και τις απαιτήσεις για τη διασύνδεση των καταναμημένων πόρων με συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλο που δεν έχει αναπτυχθεί κάποιο ειδικό πρότυπο για το ζήτημα των μικροδικτύων, ορισμένα από τα υπάρχοντα πρότυπα για τη ΔΠ μπορούν να προσαρμοστούν σε αυτά. Συγκεκριμένα, το εδάφιο 1547/4 αντιμετωπίζεται ως θεμελιώδες πρότυπο για την τυποποίηση των μικροδικτύων, καθώς καλύπτει θέματα σχεδιασμού και λειτουργίας, όπως οι επιπτώσεις στην τάση, τη συχνότητα και ποιότητα ισχύος, τα συστήματα προστασίας και οι απαιτούμενες τροποποιήσεις, τα χαρακτηριστικά των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας, τα περιθώρια εφεδρείας, και η περικοπή φορτίου. Στην Ευρώπη, κάποια από τα υπάρχοντα πρότυπα, όπως το EN50160 και το IEC61000, μπορούν επίσης να προσαρμοστούν για τα μικροδίκτυα.

## **2.2.4 Προστασία στα μικροδίκτυα**

Οι διατάξεις και οι συσκευές προστασίας είναι ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα στα μικροδίκτυα. Σε γενικές γραμμές, ένα σύστημα προστασίας αποτελείται από συσκευές προστασίας, προστατευτικά ρελέ, όργανα μέτρησης, και γείωση. Τα ζητήματα σχετικά με την προστασία σε ένα μικροδίκτυο μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας (διασυνδεδεμένο ή απομονωμένο από το κύριο δίκτυο) και τα παραδοσιακά συστήματα προστασίας απαιτούν προσαρμογή για να μπορούν να εφαρμοστούν στα μικροδίκτυα για διάφορους λόγους:

- ➔ Το μέτρο και η κατεύθυνση των ρευμάτων σφάλματος. Τα μικροδίκτυα μπορούν να λειτουργούν τόσο συνδεδεμένα με το δίκτυο κοινής ωφελείας, όσο και αποσυνδεδεμένα από αυτό. Τα ρεύματα μπορούν να ρέουν και στις δύο κατευθύνσεις και οι προστασίες θα πρέπει να το λαμβάνουν αυτό υπόψη. Επιπλέον, τα επίπεδα των ρευμάτων σφάλματος διαφέρουν από αυτά στις παραδοσιακές διατάξεις, δεδομένου ότι η περιοχή ισχύος των γεννητριών είναι χαμηλότερα και τα όρια σφάλματος για το ρεύμα πρέπει να προσαρμοστούν σε αυτά τα επίπεδα.
- ➔ Η δυναμική δομή του μικροδικτύου. Η διάταξη ενός μικροδικτύου μπορεί να αλλάζει σε συνάρτηση με το χρόνο, δεδομένου ότι οι Διεσπαρμένες Γεννήτριες και τα φορτία μπορούν να συνδεθούν ή να αποσυνδεθούν ανά πάσα στιγμή. Αυτές οι αλλαγές στην ηλεκτρική διάταξη θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, δεδομένου ότι οι κατευθύνσεις και τα όρια των ρευμάτων που κυκλοφορούν στο μικροδίκτυο τροποποιούνται ανάλογα με αυτές τις αλλαγές. Διαφορετικά το σύστημα προστασίας μπορεί να αποσυνδέει φορτία και γεννήτριες χωρίς να συντρέχει λόγος. Η γείωση του μικροδικτύου πρέπει επίσης να σχεδιαστεί έχοντας στο νου ότι το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε σύνδεση, όσο και απομονωμένο από το κύριο δίκτυο.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, πρέπει να υπάρξουν νέες λύσεις προστασίας, ώστε να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του μικροδικτύου. Μια πιθανή λύση για την προστασία των μικροδικτύων χαμηλής τάσης είναι αυτό να διαιρεθεί σε ξεχωριστές ζώνες με διαφορετικούς τύπους συσκευών, ώστε να διαμορφωθεί μία κατάλληλη διάταξη προστασίας. Από την άλλη πλευρά, δεν πρέπει να λησμονείται ότι η προστασία των DC μικροδικτύων αντιμετωπίζει τις προκλήσεις που θέτει η έλλειψη προτύπων, κατευθυντήριων γραμμών και πρακτικής εμπειρίας. Ωστόσο, στις μέρες μας, υπάρχουν ήδη πολλές συσκευές προστασίας που διατίθενται στην αγορά για συστήματα χαμηλής DC τάσης, που περιλαμβάνουν ασφάλειες, ασφαλειοδιακόπτες, ασφαλειοδιακόπτες κλειστού τύπου, ασφαλειοδιακόπτες ισχύος και μονωμένους. Πρέπει επιπλέον, να ασχοληθούμε με τα μικτά μικροδίκτυα AC/DC. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το σύστημα μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη: το κύριο δίκτυο, το AC μικροδίκτυο και το DC μικροδίκτυο. Κι έτσι, εφαρμόζεται για το κάθε τμήμα ανάλογη διάταξη προστασίας. Η φύση του φορτίου είναι επίσης, πολύ σημαντική για τη σταθερότητα στη λειτουργία του μικροδικτύου και είναι απαραίτητη μία λεπτομερής μελέτη των πιθανών καταστάσεων σφάλματος με την παρουσία φορτίων διαφορετικού τύπου.

## 2.3 Ο έλεγχος του μικροδικτύου

### 2.3.1 Απαιτήσεις

Το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου πρέπει να είναι σε θέση να εξασφαλίζει την αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου, με παράλληλη αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προκλήσεων[31]. Ειδικότερα, μερικά από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του συστήματος ελέγχου είναι:

- ➔ Έλεγχος εξόδου: οι τάσεις και τα ρεύματα εξόδου των διαφόρων μονάδων πρέπει να παρακολουθούν τις τιμές αναφοράς τους και να εξασφαλίζουν την απόσβεση των ταλαντώσεων.
- ➔ Ισοζύγιο ισχύος: οι μονάδες ΔΠ στο μικροδίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίζουν ξαφνικές ανισορροπίες ενεργού ισχύος, είτε περίσσειας, είτε έλλειψης, διατηρώντας τις αποκλίσεις της συχνότητας και της τάσης εντός των αποδεκτών ορίων.
- ➔ Διαχείριση της ζήτησης: Ενδεχομένως, κατάλληλοι μηχανισμοί πρέπει να σχεδιαστούν προκειμένου να υπάρχει η ικανότητα να ελέγχεται ένα μέρος του φορτίου. Επιπλέον, για την ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων κοινοτήτων με άφθονες τοπικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ενεργός συμμετοχή της τοπικής κοινότητας μπορεί να είναι ευεργετική, προκειμένου να σχεδιαστεί μία αποδοτική στρατηγική που ενισχύει τον έλεγχο της συχνότητας των φορτίων.
- ➔ Οικονομική κατανομή: Ένας κατάλληλος διαμοιρασμός των μονάδων ΔΠ που συμμετέχουν στη λειτουργία ενός μικροδικτύου μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος λειτουργίας, ή να αυξήσει το κέρδος. Η αξιοπιστία πρέπει επίσης, να λαμβάνεται υπόψη για την κατανομή των μονάδων, ιδίως στην αυτόνομη λειτουργία.
- ➔ Μετάβαση μεταξύ των καταστάσεων λειτουργίας: Επιθυμητό χαρακτηριστικό του μικροδικτύου είναι η ικανότητα να εργάζεται και σε διασυνδεδεμένη, και σε αυτόνομη κατάσταση λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένης και μιας ομαλής μετάβασης μεταξύ των δύο. Διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου μπορεί να ορίζονται για κάθε τρόπο λειτουργίας και, ως εκ τούτου, ένας αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης υψηλής ταχύτητας είναι πολύ σημαντικός προκειμένου να προσαρμόζεται η ανάλογη στρατηγική ελέγχου.

Στο περιβάλλον ενός μικροδικτύου, που χαρακτηρίζεται από συχνές και πολλές αλλαγές στην τοπολογία, η αντοχή και η προσαρμοστικότητα είναι επιθυμητά γνωρίσματα των ελεγκτών. Η διαθεσιμότητα μετρήσεων, η επικοινωνία και οι εγκαταστάσεις υψηλής υπολογιστικής ταχύτητας είναι προκλήσεις που προστίθενται σε όλες τις παραπάνω απαιτήσεις. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να γίνει μία προσπάθεια προκειμένου να μειωθεί η ανάγκη για επικοινωνία υψηλής ταχύτητας και για υπολογισμούς σε κρίσιμες εργασίες. Η υιοθέτηση μιας ιεραρχικής δομής ελέγχου είναι αρκετά δυσχερής, δεδομένων των πολλών διαφορετικών χρονικών σταθερών που εμπλέκονται, συμπεριλαμβανομένης της γρήγορης δυναμικής στους ελέγχους της

παραγωγής και της αργής δυναμικής στην οικονομική κατανομή. Η πολυπλοκότητα και η επιτήδευση των λύσεων για τις απαιτήσεις ελέγχου του μικροδικτύου θα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό, από το αν είναι σχεδιασμένο πρωτίστως να λειτουργεί σε αυτόνομη ή διασυνδεδεμένη λειτουργία. Ενώ στη διασυνδεδεμένη λειτουργία η έμφαση θα δίνεται στην αλληλεπίδρασή του με το κύριο δίκτυο, στην αυτόνομη λειτουργία πιο σημαντικά θα είναι τα θέματα αξιοπιστίας. Ακολουθεί μια περιγραφή των μεταβλητών που επιδιώκει ο έλεγχος του μικροδικτύου να ελέγξει.

### **2.3.2 Ελεγχόμενες μεταβλητές**

Οι κύριες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της λειτουργίας ενός μικροδικτύου είναι:

- **η τάση(μέτρο και φάση)**
- **η συχνότητα**
- **η ισχύς(ενεργός και άεργος)**

Στη διασυνδεδεμένη λειτουργία, η συχνότητα και η τάση του μικροδικτύου στο ΣΚΣ καθορίζονται από το δίκτυο που το φιλοξενεί. Ο κύριος ρόλος του ελέγχου σε αυτή την περίπτωση είναι να διαχειριστεί την ενεργό και την άεργο ισχύ που παράγεται από τις μονάδες ΔΠ και τη ζήτηση του φορτίου. Έγχυση άεργου ισχύος από μια μονάδα ΔΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος, για ικανοποίηση της ζήτησης άεργου ισχύος από τα φορτία ή για τον έλεγχο της τάσης στο αντίστοιχο σημείο της σύνδεσης. Σε αυτή τη λειτουργία, το κύριο δίκτυο μπορεί να μην επιτρέπει τη ρύθμιση ή τον έλεγχο της τάσης από τις μονάδες ΔΠ κοντά στο ΣΚΣ για να αποφευχθεί η αλληλεπίδραση με τον έλεγχο που εκτελεί ταυτόχρονα το δίκτυο.

Στην αυτόνομη λειτουργία, το μικροδίκτυο λειτουργεί ως ανεξάρτητη οντότητα. Αυτή η λειτουργία είναι σημαντικά πιο απαιτητική από τη διασυνδεδεμένη, επειδή η κρίσιμη ισορροπία ζήτησης-προσφοράς απαιτεί την εφαρμογή μηχανισμών ακριβείας επιμερισμού του φορτίου για την εξισορρόπηση ξαφνικών αναντιστοιχιών ενεργού ισχύος. Η τάση και η συχνότητα του μικροδικτύου δεν υποστηρίζονται πλέον από το κύριο δίκτυο, και έτσι πρέπει να ελέγχονται από διαφορετικές μονάδες ΔΠ. Το ισοζύγιο ισχύος εξασφαλίζεται, είτε άμεσα από τους τοπικούς ελεγκτές αξιοποιώντας τοπικές μετρήσεις, είτε με μια κεντρική μονάδα ελέγχου που επικοινωνεί κατάλληλες τιμές αναφοράς προς τους τοπικούς ελεγκτές των διαφόρων μονάδων και στα ελεγχόμενα φορτία. Ο κύριος στόχος ενός τέτοιου μηχανισμού είναι να εξασφαλίσει ότι όλες οι μονάδες συμβάλλουν στον εφοδιασμό των φορτίων με προκαθορισμένο τρόπο. Η παραμικρή αναντιστοιχία στο πλάτος, τη φάση ή τη συχνότητα της τάσης εξόδου οποιασδήποτε μονάδας του συστήματος, μπορεί να οδηγήσει στην κυκλοφορία σχετικά μεγάλου ρεύματος. Αυτό το πρόβλημα ερευνάται εκτενώς στη βιβλιογραφία και διαφορετικά σχέδια ελέγχου προτείνονται για να ξεπεραστεί. Μία πιθανή προσέγγιση είναι να έχουμε ένα μετατροπέα να λειτουργεί ως κυρίαρχη μονάδα που ρυθμίζει την τάση του μικροδικτύου. Η ίδια μονάδα μπορεί επίσης, να ελέγχει την συχνότητα σε ανοικτό βρόχο μέσω ενός εσωτερικού ταλαντωτή κρυστάλλου. Αυτή η μονάδα ΔΠ μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως ακριβώς μια σύγχρονη γεννήτρια με φθίνουσα χαρακτηριστική άεργου ισχύος-τάσης, ενώ οι υπόλοιπες μονάδες θα εγχέουν ενεργό και άεργου ισχύ σύμφωνα με τις ονομαστικές τιμές που θα καθορίζονται από τον δευτερεύοντα ελεγκτή.

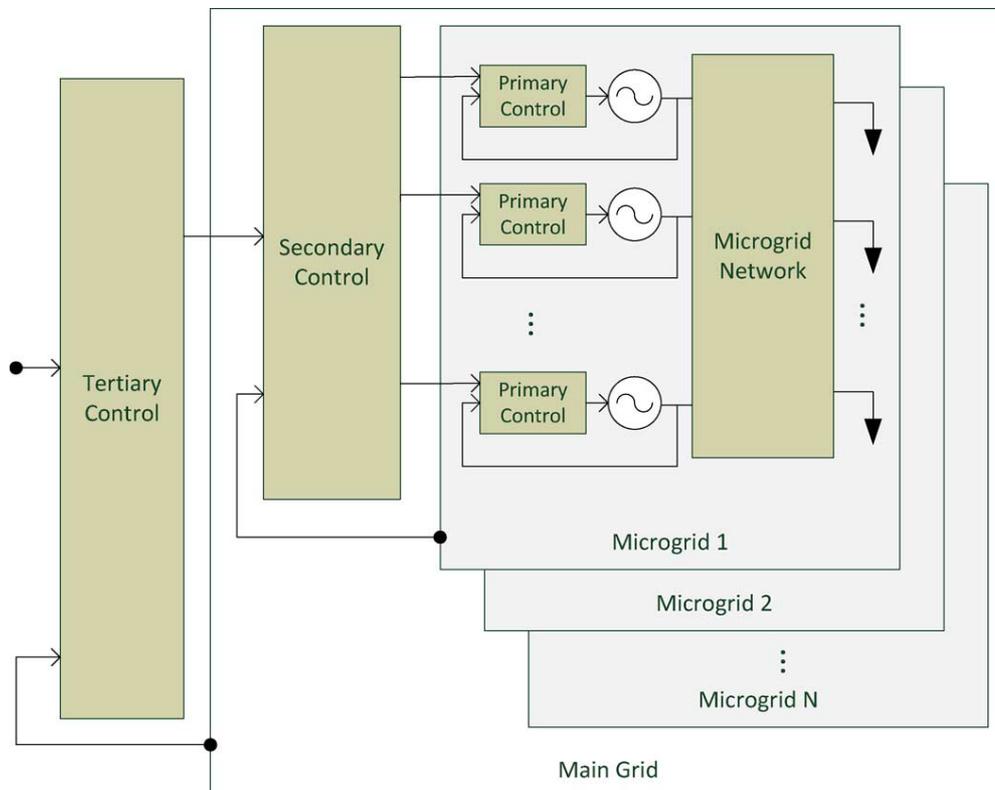
Μία παρόμοια στρατηγική μπορεί επίσης, να εφαρμοστεί και στον έλεγχο των DC μικροδικτύων, όπου μια κυρίαρχη μονάδα ΔΠ μπορεί να ελέγχει την τάση του μικροδικτύου, αντισταθμίζοντας τις στιγμιαίες αναντιστοιχίες ενεργού ισχύος. Εναλλακτικά, αρκετές μονάδες μπορούν να μοιράζονται τις εν λόγω αναντιστοιχίες ακολουθώντας μία φθίνουσα χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-τάσης.

### 2.3.3 Ο Ιεραρχικός έλεγχος

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική του ελέγχου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν δύο πολύ διαφορετικές προσεγγίσεις:

- ο κεντρικός έλεγχος(centralized)
- ο αποκεντρωμένος έλεγχος(decentralized)

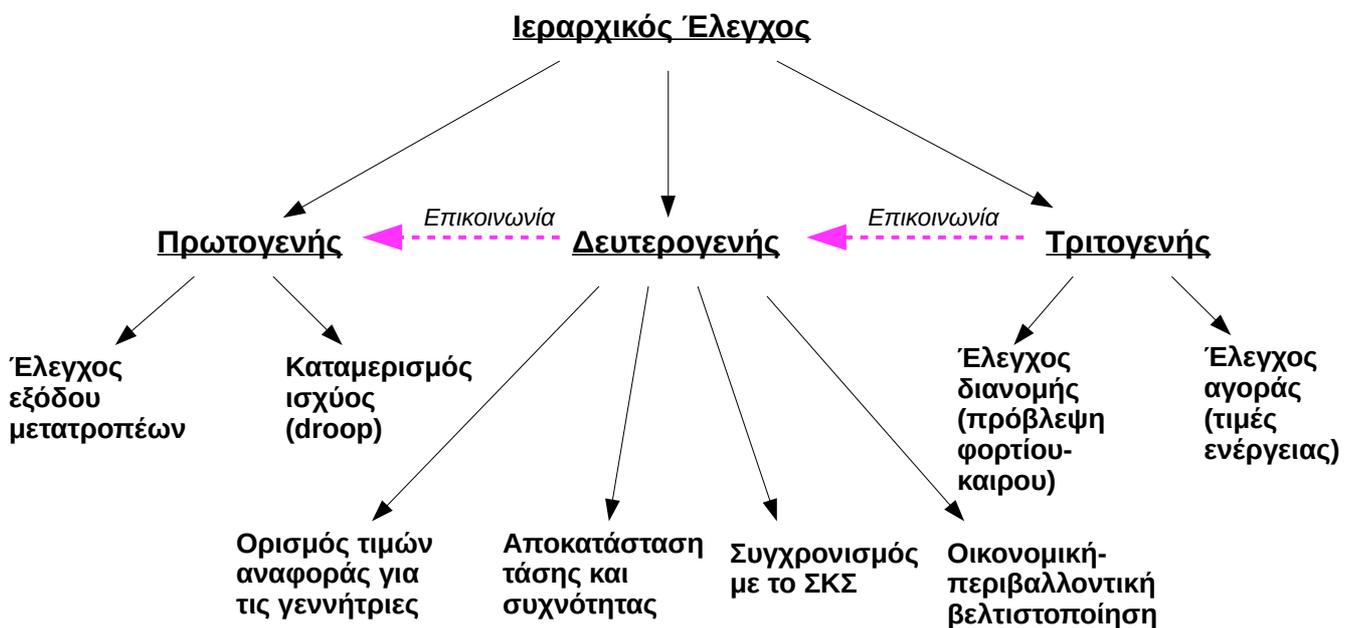
Ως πλήρως κεντρικό ονομάζουμε τον έλεγχο που βασίζεται σε δεδομένα που συγκεντρώνονται σε έναν ειδικό κεντρικό ελεγκτή που εκτελεί τους απαιτούμενους υπολογισμούς και καθορίζει τις δράσεις ελέγχου για όλες τις μονάδες σε ένα και μόνο σημείο. Αυτή η αρχιτεκτονική απαιτεί εκτεταμένη επικοινωνία μεταξύ του κεντρικού ελεγκτή και των ελεγχόμενων μονάδων. Από την άλλη, στον πλήρως αποκεντρωμένο έλεγχο κάθε μονάδα ελέγχεται από τον τοπικό ελεγκτή της, ο οποίος λαμβάνει μόνο τοπικές πληροφορίες και δεν έχει ούτε πλήρη επίγνωση των μεταβλητών σε όλο το σύστημα, ούτε γνωρίζει τις δράσεις των άλλων ελεγκτών.



Εικόνα 2.2: Οπτική απεικόνιση του ιεραρχικού ελέγχου [31]

Τα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, συνήθως καλύπτουν μία εκτεταμένη γεωγραφική περιοχή, καθιστώντας την εφαρμογή ενός πλήρως κεντρικού ελέγχου ανέφικτη λόγω των εκτεταμένων αναγκών επικοινωνίας και υπολογισμού. Την ίδια στιγμή, μία προσέγγιση πλήρως αποκεντρωμένου ελέγχου δεν είναι επίσης δυνατή λόγω της ισχυρής σύζευξης μεταξύ των ενεργειών διαφόρων μονάδων στο σύστημα, απαιτώντας ένα ελάχιστο επίπεδο συντονισμού που δεν μπορεί να επιτευχθεί με χρήση μόνο τοπικών μεταβλητών. Ένας συμβιβασμός μεταξύ κεντρικού και αποκεντρωμένου ελέγχου μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός *ιεραρχικού συστήματος ελέγχου* που θα αποτελείται από τρία επίπεδα ελέγχου: *πρωτογενή, δευτερογενή, και τριτογενή*. Αυτά τα επίπεδα ελέγχου διαφέρουν ως προς την ταχύτητα απόκρισης τους και το χρονικό πλαίσιο στο οποίο λειτουργούν, και ως προς τις απαιτήσεις υποδομής που χρειάζονται (για παράδειγμα απαιτήσεις επικοινωνίας). Αν και τα μικροδίκτυα δεν είναι απαραίτητα, τόσο εκτεταμένα γεωγραφικά όσο τα συμβατικά συστήματα ισχύος, μπορούν να επωφεληθούν από αυτήν την ιεραρχία ελέγχου, λόγω του μεγάλου αριθμού από ελεγχόμενους πόρους και των αυστηρών απαιτήσεων απόδοσης που τα διέπουν.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μία περιγραφή του ιεραρχικού ελέγχου. Το υπόλοιπο αυτής της ενότητας παρουσιάζει μια αναλυτική περιγραφή των τριών διαφορετικών επιπέδων ελέγχου, από τη σκοπιά των μικροδικτύων, καθώς και την εξέλιξη της τεχνολογίας στις μεθόδους ελέγχου που αφορούν το κάθε επίπεδο.



Εικόνα 2.3: Συνοπτική ανάλυση του ιεραρχικού ελέγχου μικροδικτύου

## **(I)Πρωτογενής έλεγχος**

Ο πρωτογενής έλεγχος, επίσης γνωστός και ως τοπικός ή εσωτερικός έλεγχος, είναι το πρώτο επίπεδο στην ιεραρχία του ελέγχου, και διαθέτει την ταχύτερη απόκριση. Ο έλεγχος αυτός βασίζεται αποκλειστικά σε τοπικές μετρήσεις και δεν απαιτεί καμία επικοινωνία. Η ανίχνευση νησιδοποίησης, ο έλεγχος εξόδου και ο έλεγχος κατανομής της ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις ταχύτητας που έχουν και την εξάρτησή τους από τοπικές μετρήσεις, υποχρεωτικά θα περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία. Στις σύγχρονες γεννήτριες, ο έλεγχος εξόδου και η κατανομή ισχύος γίνεται από τον ρυθμιστή τάσης και από την αδράνεια της ίδιας της μηχανής.

Οι μετατροπείς πηγής τάσης (Voltage-Source Inverters ή VSI) που χρησιμοποιούνται ως διεπαφή για DC πηγές, απαιτούν ειδικά σχεδιασμένο έλεγχο για να προσομοιάσουν την χαρακτηριστική αδράνειας των σύγχρονων γεννητριών και για να παρέχουν την κατάλληλη ρύθμιση συχνότητας. Για το σκοπό αυτό, οι μετατροπείς πηγής τάσης αποτελούνται από δύο στάδια: τον ελεγκτή κατανομής ισχύος της διεσπαρμένης γεννήτριας και τον ελεγκτή εξόδου του μετατροπέα. Οι ελεγκτές κατανομής ισχύος είναι υπεύθυνοι για τον επαρκή διαμοιρασμό των αναντιστοιχιών σε ενεργό και άεργο ισχύ που εμφανίζονται κάθε στιγμή στο μικροδίκτυο, ενώ οι ελεγκτές εξόδου των inverters θα πρέπει να ελέγχουν και να ρυθμίζουν τις τάσεις και τα ρεύματα εξόδου. Ο έλεγχος εξόδου του μετατροπέα, συνήθως αποτελείται από έναν εξωτερικό βρόχο για τον έλεγχο της τάσης και έναν εσωτερικό βρόχο για τη ρύθμιση του ρεύματος. Ο καταμερισμός της ισχύος στις διάφορες ΔΓ, επιτυγχάνεται χωρίς επικοινωνία, με χρήση κάποιας φθίνουσας χαρακτηριστικής (droop characteristic) ενεργού ισχύος συναρτήσεως της συχνότητας ή άεργου ισχύος συναρτήσεως της τάσης. Η συγκεκριμένη χαρακτηριστική μιμείται την συμπεριφορά μίας σύγχρονης γεννήτριας. Στη συνέχεια, θα δούμε αναλυτικότερα τον πρωτογενή έλεγχο των μικροδικτύων.

## **(A)Έλεγχος εξόδου μετατροπέα**

Ο έλεγχος μονάδων διεσπαρμένων πηγών ενέργειας που είναι ηλεκτρονικά συζευγμένες μεταξύ τους στο πλαίσιο ενός μικροδικτύου, έχει συζητηθεί εκτενώς στην τεχνική βιβλιογραφία. Οι ελεγκτές των μετατροπέων από την πλευρά του δικτύου είναι κατηγοριοποιημένοι με βάση το πλαίσιο αναφοράς τους σε: σύγχρονους (d-q), σε στατικούς (α-β), και σε φυσικούς (abc). Το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς σχετίζεται με μεταβλητές DC και ελεγκτές τύπου PI. Το στατικό πλαίσιο αναφοράς σχετίζεται με ημιτονοειδείς μεταβλητές και PR ελεγκτές. Το φυσικό πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιεί ελεγκτές που έχουν τη λογική των PI, PR, της υστέρησης, ή του dead-beat.

Ο έλεγχος εξόδου του αντιστροφέα τυπικά αποτελείται από έναν εξωτερικό βρόχο για τον έλεγχο της τάσης, και έναν εσωτερικό βρόχο για τη ρύθμιση του ρεύματος. Μία κοινή προσέγγιση στο σχεδιασμό των βρόχων ελέγχου είναι η χρήση των ελεγκτών PI, με μία πρόσθετη ανάδραση της εξόδου, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση των υπαρχόντων ρυθμιστών.

Έχουν προταθεί ορισμένες μέθοδοι ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών με στόχο να βελτιωθεί η δυναμική απόκριση των μικροδικτύων και να εξασφαλιστεί μία εύρωστη ευστάθεια (robust stability) έναντι των αβεβαιοτήτων στις παραμέτρους φορτίου λόγω της παρουσίας μη γραμμικών φορτίων. Η έρευνα σχετικά με τον έλεγχο πολλαπλών μεταβλητών στα μικροδίκτυα έχει επικεντρωθεί κατά κύριο λόγο στη ρύθμιση της τάσης ενός μικροδικτύου με μία μονάδα ΔΠ, και ένα φορτίο RLC, όπου οι παράμετροι

του φορτίου διαταράσσονται γύρω από την ονομαστική τους αξία, ή μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος.

Αν και εκτεταμένη έρευνα έχει διεξαχθεί για την ανάπτυξη των στρατηγικών πρωτογενούς ελέγχου του μικροδικτύου, τα παρακάτω ζητήματα επιδέχονται περαιτέρω έρευνα:

- ➔ βελτίωση της ευρωστίας σε τοπολογικές και παραμετρικές αβεβαιότητες
- ➔ βελτίωση της μεταβατικής απόκρισης των ελεγκτών
- ➔ απαλλαγή από πολύπλοκες υποδομές επικοινωνίας
- ➔ επίλυση των ανισορροπιών και των αρμονικών
- ➔ βελτίωση της επεκτασιμότητας των συστημάτων ελέγχου
- ➔ ενσωμάτωση της δυναμικής της dc πλευράς στο σχεδιασμό
- ➔ βελτίωση της διαχείρισης σφαλμάτων και
- ➔ ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου που λειτουργούν τόσο για διασυνδεδεμένη, όσο και αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου και να παρέχουν ομαλή μετάβαση.

## **(B) Έλεγχος καταμερισμού ισχύος**

Ένα δεύτερο στάδιο του πρωτογενούς ελέγχου των μικροδικτύων είναι ο έλεγχος καταμερισμού της ισχύος. Οι διάφορες τεχνικές εφαρμογής του ελέγχου αυτού μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το εάν χρησιμοποιούν ή όχι την έννοια της χαρακτηριστικής droop. Αν ο συγκεκριμένος έλεγχος ανατεθεί σε έναν κεντρικό ελεγκτή μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως τμήμα του δευτερογενούς ελέγχου.

### **(B1) Έλεγχος Droop**

Ο έλεγχος μικροδικτύου με χρήση χαρακτηριστικής droop έχει έντονη παρουσία στην τρέχουσα βιβλιογραφία. Η αναφερόμενη μέθοδος προέρχεται από τη βασική αρχή του ισοζυγίου ισχύος των σύγχρονων γεννητριών σε μεγάλα διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα. Μια ανισορροπία μεταξύ της μηχανικής ισχύος που εισάγεται στη γεννήτρια και της ηλεκτρικής ενεργού ισχύος εξόδου, προκαλεί μία μεταβολή στην ταχύτητα του δρομέα, η οποία μεταφράζεται σε μια απόκλιση στη συχνότητα. Ομοίως, μία μεταβολή στην άεργο ισχύ, οδηγεί σε απόκλιση στο μέτρο της τάσης. Η μέθοδος ελέγχου με χρήση της χαρακτηριστικής droop συχνότητας-ενεργού ισχύος, συμβαδίζει με τις εξισώσεις χώρου κατάστασης των συμβατικών μονάδων, όπως οι σύγχρονες γεννήτριες. Μπορεί λοιπόν, να κατασκευαστεί τεχνητά και για μονάδες ΔΠ που έχουν ηλεκτρονική διεπαφή με το υπόλοιπο σύστημα.

Στον έλεγχο droop, οι σχέσεις μεταξύ πραγματικής ισχύος και συχνότητας και μεταξύ άεργου ισχύος και τάσης μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$(I) \quad \omega_o = \omega' - K_p(P_o - P')$$

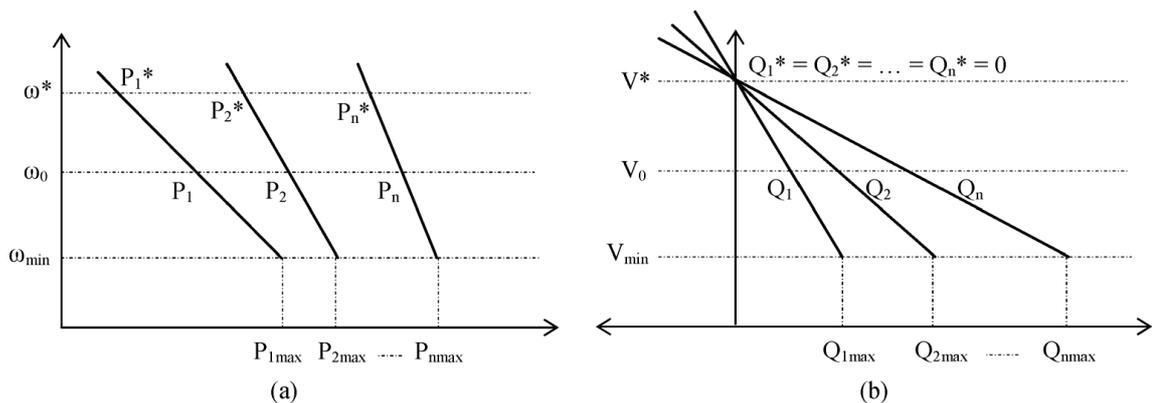
$$(II) \quad V_o = V' - K_Q(Q_o - Q')$$

,όπου τα  $\omega'$  και  $V'$  συμβολίζουν τις τιμές αναφοράς της γωνιακή συχνότητας και της τάσης αντίστοιχα, και τα  $\omega_o$  και  $V_o$  αναπαριστούν την μετρούμενη συχνότητα και τάση

εξόδου της διεσπαρμένης γεννήτριας, αντίστοιχα. Μια παρόμοια σύμβαση χρησιμοποιείται για την ενεργό και άεργο ισχύ  $P$  και  $Q$ . Οι σταθερές  $K_P$  και  $K_Q$  αποτελούν τους συντελεστές droop, και καθορίζονται με βάση τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

Μια συνηθισμένη χαρακτηριστική droop  $P-\omega$  φαίνεται στην εικόνα 2.4(a), ενώ μία συνηθισμένη χαρακτηριστική  $Q-V$  παρουσιάζεται στην εικόνα 2.4(b). Για λόγους απλούστευσης θεωρείται ότι στην ονομαστική τάση, οι μονάδες ΔΠ δεν παρέχουν άεργο ισχύ στο δίκτυο, παρέχοντας έτσι ενεργό ισχύ με συντελεστή ισχύος τη μονάδα. Στο σχήμα, τα  $\omega_{\min}$  και  $V_{\min}$  αναπαριστούν την ελάχιστη ανεκτή συχνότητα και τάση εξόδου, αντίστοιχα.

Σε μια διαφορετική προσέγγιση που έχει προταθεί, η ενεργός ισχύς ελέγχεται χρησιμοποιώντας την τάση εξόδου και η άεργος ισχύς ελέγχεται με τη χρήση της συχνότητας εξόδου. Δηλαδή, το ακριβώς αντίθετο των τυπικών ελέγχων σε συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες. Ο προτεινόμενος έλεγχος βασίζεται σε ένα δυναμικό μοντέλο του μετατροπέα της κατανεμημένης γεννήτριας που δείχνει κάποια εξάρτηση μεταξύ άεργου ισχύος και συχνότητας, καθώς και μεταξύ ενεργού ισχύος και τάσης εξόδου. Ωστόσο, αυτό το σχέδιο ελέγχου μπορεί να μην είναι κατάλληλο για μικροδίκτυα με ένα μείγμα παραγωγικών μονάδων με διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος και άμεσα συνδεδεμένων μονάδων στο σύστημα.



2.4: Συνηθισμένες χαρακτηριστικές droop (a) $P-\omega$  droop (b) $Q-V$  droop [31]

Το κύριο πλεονέκτημα του ελέγχου droop είναι ότι εξαλείφει την ανάγκη για επικοινωνία και οι δράσεις ελέγχου βασίζονται μονάχα σε τοπικές μετρήσεις. Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει στον έλεγχο droop σημαντική ευελιξία από την άποψη ότι, εφόσον η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης μπορεί να διατηρηθεί, δεν υπάρχει αλληλεξάρτηση των τοπικών ελεγκτών. Δηλαδή, ο ελεγκτής εκτελεί το έργο του με βάση τις τοπικές μετρήσεις και την droop χαρακτηριστική. Ωστόσο, η συμβατική μέθοδος ελέγχου droop έχει αρκετά μειονεκτήματα:

- ➔ Κακή μεταβατική απόδοση ή προβλήματα ευστάθειας λόγω της χρήση των μέσων τιμών της ενεργού και άεργου ισχύος σε ένα χρονικό κύκλο.
- ➔ Άγνοια της δυναμικής του φορτίου που μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία εξαιτίας κάποιας μεγάλης ή απότομης αλλαγής φορτίου.
- ➔ Αδυναμία για επανεκκίνηση μετά από κατάρρευση, καθώς απαιτούνται ειδικοί χειρισμοί για την αποκατάσταση του συστήματος.
- ➔ Κακή απόδοση όταν χρησιμοποιήθηκε για δίκτυα διανομής λόγω της χαμηλής αναλογία τους  $X/R$ , η οποία αυξάνει τη σύζευξη ενεργού και άεργου ισχύος.
- ➔ Αδυναμία για ακριβή κατανομή της ισχύος μεταξύ των μονάδων ΔΠ, λόγω της αβεβαιότητας στην αντίσταση εξόδου που αυτές εμφανίζουν.
- ➔ Ακατάλληλη μέθοδος ελέγχου για μη γραμμικά φορτία, δεδομένου ότι δεν λαμβάνει υπόψη τις αρμονικές συνιστώσες στο ρεύμα.
- ➔ Ανικανότητα να επιβάλει μια σταθερή συχνότητα στο δίκτυο ανεξάρτητα των συνθηκών φόρτισης του συστήματος.

Διάφορες τροποποιημένες μέθοδοι ελέγχου droop έχουν προταθεί, ώστε να ξεπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα. Ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον αποτέλεσμα αναφέρεται στη βιβλιογραφία, όπου μία ανάλυση ιδιοτιμών ενός γραμμικοποιημένου μοντέλου μικροδικτύου δείχνει ότι πιο αργοί τρόποι ταλάντωσης (κοντά στο πραγματικό άξονα), που συνδέονται με βρόχους ελεγκτή droop, παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις με αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Επί πλέον, οι παράγοντες απόσβεσης των τρόπων ταλάντωσης που εξετάστηκαν, εκπίπτουν σε χαμηλότερες τιμές όταν αυξάνεται η ενεργός ισχύς εξόδου της ελεγχόμενης μονάδας. Ένας βρόχος αποκατάστασης της συχνότητας έχει μελετηθεί επίσης, για να διατηρείται η συχνότητα του συστήματος στην ονομαστική τιμή. Επίσης, εξετάστηκε η χρήση μίας εικονικής αντίστασης εξόδου για να επιτευχθεί αυτόματη κατανομή των αρμονικών συνιστωσών και μείωση των ταλαντώσεων. Για να ξεπεραστούν τα προβλήματα ανακρίβειας στο διαμοιρασμό ισχύος, ο βρόχος ελέγχου αυξάνεται με μία εικονική επαγωγική αντίσταση εξόδου.

Μερικά επιπλέον στοιχεία για το σχεδιασμό του ελέγχου του καταμερισμού ισχύος μπορεί να προκύψουν, όταν διαφορετικά είδη συστημάτων DER(δισπαρμένων πηγών ενέργειας) περιλαμβάνονται στην ανάλυση. Ανάλογα με το ποσό της ενέργειας που είναι διαθέσιμο στις συσκευές αποθήκευσης και τις χρονικές σταθερές της κάθε πηγής ενέργειας, το μερίδιο ανάληψης των αναντιστοιχιών ισχύος που προκύπτουν στο μικροδίκτυο, θα πρέπει να είναι διαφορετικό για τις διάφορες δισπαρμένες γεννήτριες σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Η μελέτη αυτού του είδους λειτουργίας του ελέγχου droop, κυμαίνεται σε πιο εξελιγμένες τεχνικές, όπως τα Ευφυή Νευρωνικά Δίκτυα και ο Ασαφής Έλεγχος(fuzzy logic).

## **(B2) Μέθοδοι ελέγχου που δε βασίζονται στην έννοια Droop**

Οι παρακάτω μέθοδοι, ανήκουν στο πρωτογενές κομμάτι του ελέγχου ενός μικροδικτύου με πολλές μονάδες ΔΠ από την προοπτική του κεντρικού ελέγχου:

- Σε μία προσέγγιση που έχει μελετηθεί, το συνολικό ρεύμα του φορτίου μετράται και μεταδίδεται σε έναν κεντρικό ελεγκτή. Στη συνέχεια, καθορίζεται η συμβολή της κάθε δισπαρμένης γεννήτριας με βάση τα χαρακτηριστικά της,

και αποστέλλονται σε αυτές οι τιμές αναφοράς για το ρεύμα εξόδου που πρέπει να αποδώσουν. Ένας εξωτερικός βρόχος ελέγχει ταυτόχρονα την τάση του συστήματος. Η μέθοδος αυτή οδηγεί σε γρήγορο μετριασμό των μεταβατικών φαινομένων. Ωστόσο, η επικοινωνία είναι ζωτικής σημασίας και τυχόν αποτυχία της θα οδηγήσει σε κατάρρευση του συστήματος.

- Μία άλλη πρόταση είναι η στρατηγική ελέγχου master-slave, στην οποία μία κυρίαρχη διεσπαρμένη παραγωγική μονάδα, αναλαμβάνει το έργο της διατήρησης της τάσης του συστήματος εντός του επιτρεπτού εύρους τιμών και οι άλλες μονάδες παρέχουν ενέργεια στο φορτίο. Η εν λόγω μέθοδος είναι εμπνευσμένη από την λογική λειτουργίας των συμβατικών συστημάτων ισχύος. Εκεί υπάρχει ένας μόνο ζυγός ταλάντωσης(slack bus), ο οποίος ελέγχει την τάση και τη συχνότητα, και μια σειρά από PQ ζυγούς, οι οποίοι είτε εγχέουν, είτε απορροφούν ενεργό και άεργο ισχύ. Όσο διατηρείται μία ισορροπία μεταξύ του φορτίου και της παραγωγής, η μέθοδος αυτή είναι ευέλικτη στην σύνδεση και την αποσύνδεση των μονάδων ΔΠ. Ωστόσο, η παρουσία της κυρίαρχης μονάδας είναι ζωτικής σημασίας, και με αποτυχία αυτής το σύστημα καταρρέει άμεσα.
- Μια ακόμη μέθοδος ελέγχου της τάσης και της κατανομής ισχύος μεταξύ πολλαπλών παράλληλων μονάδων σε ένα μικροδίκτυο έχει εξεταστεί. Αυτή η στρατηγική χρησιμοποιεί έναν σύνδεσμο επικοινωνίας χαμηλού εύρους ζώνης για την επίτευξη του διαμοιρασμού της ισχύος και του ελέγχου της τάσης μέσω ενός κεντρικού ελεγκτή. Οι τοπικοί ελεγκτές είναι υπεύθυνοι για την απόρριψη κάθε ανισορροπίας και των αρμονικών.
- Τέλος, υπάρχει και μία προσέγγιση κατά την οποία, η μία μονάδα ΔΠ ελέγχει την τάση στο ΣΚΣ, χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό βρόχο ελέγχου και οι άλλες γεννήτριες ελέγχονται όσον αφορά το ρεύμα εξόδου τους. Ίσος καταμερισμός ισχύος και συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδέσμου επικοινωνίας που καλείται CANbus.

## (II) Δευτερογενής έλεγχος

Ο δευτερογενής έλεγχος, ο οποίος συχνά αναφέρεται και ως Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας(ΣΔΕ) του μικροδικτύου, είναι υπεύθυνος για την αξιόπιστη, ασφαλή και οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου, είτε σε διασυνδεδεμένη, είτε σε αυτόνομη λειτουργία. Αυτή η εργασία γίνεται ιδιαίτερα προκλητική σε απομονωμένα μικροδίκτυα με παρουσία πηγών ενέργειας υψηλής μεταβλητότητας. Εκεί ο ρυθμός ενημέρωσης των εντολών στις ελεγχόμενες μονάδες, θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να μπορεί να ακολουθήσει τις ξαφνικές αλλαγές του φορτίου και των μη ελεγχόμενων γεννητριών. Ο στόχος του ΣΔΕ είναι η εύρεση της βέλτιστης (ή σχεδόν βέλτιστης) δέσμευσης και κατανομής των διαθέσιμων μονάδων ΔΠ, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται ορισμένες επιθυμητές λειτουργίες. Τα μόνιμα σφάλματα στην τάση και τη συχνότητα που δημιουργούνται από το πρωτογενές στάδιο ελέγχου, εξαλείφονται επίσης από το δευτερεύον έλεγχο. Προκειμένου να προσδιοριστεί η δέσμευση και κατανομή των γεννητριών στο μικροδίκτυο, υπάρχουν τρεις κυρίαρχοι τρόποι: η βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο, τα ευφυή συστήματα, και ο αποκεντρωμένος ιεραρχικός έλεγχος.

Για την αρχιτεκτονική του ΣΔΕ, δύο προσεγγίσεις μπορούν να προσδιοριστούν: η κεντρική και η αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική. Ο δευτερεύον έλεγχος είναι το υψηλότερο ιεραρχικό επίπεδο κατά την αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου, και λειτουργεί σε ένα πιο αργό χρονικό πλαίσιο σε σύγκριση με τον πρωταρχικό έλεγχο με

σκοπό: (i) να είναι αποσυνδεδεμένος ο δευτερογενής από τον πρωτογενή έλεγχο, (ii) να μειωθεί το εύρος ζώνης της επικοινωνίας χρησιμοποιώντας δειγματοληψία μετρήσεων των μεταβλητών του μικροδικτύου, και (iii) να δίνεται αρκετός χρόνος για να εκτελεστούν οι πολύπλοκοι υπολογισμοί. Η τυπικά περιορισμένη γεωγραφική έκταση των μικροδικτύων, διευκολύνει την επικοινωνία με προσιτά και απλά πρωτόκολλα, η οποία πρέπει να έχει χαμηλό εύρος ζώνης και απαιτείται μόνο για παραμέτρους με αργές μεταβολές, όπως οι τιμές ελέγχου για την πραγματική και άεργο ισχύ. Ένας κεντρικός ελεγκτής οφείλει να εξασφαλίζει ότι η λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου, είναι όσο το δυνατόν απρόσκοπτη κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών, όπως η μετάβαση από διασυνδεδεμένη σε αυτόνομη λειτουργία. Στην προτεινόμενη προσέγγιση, η ο κύριος ελεγκτής είναι υπεύθυνος για την οικονομική βελτιστοποίηση του μικροδικτύου, όταν αυτό είναι δυνατόν (δηλαδή, σε κατάσταση μη-έκτακτης ανάγκης και όταν συνδέεται με το κύριο δίκτυο), καθώς επίσης και διατηρώντας αξιόπιστη, αδιατάρακτη και ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Σε μία μελέτη, η βέλτιστη λειτουργία επιδιώκεται μέσω της εφαρμογής ενός περιβάλλοντος αγοράς, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα πολλαπλών παρατηρητών (multi-agent), όπου οι μεμονωμένες μονάδες ΔΠ ελέγχονται από τοπικούς παρατηρητές που ανταλλάσσουν πληροφορίες με έναν κεντρικό ελεγκτή, ώστε να προσδιορίσουν τις προσφορές αγοράς και πώλησης.

Συμπερασματικά, η υιοθέτηση μιας κεντρικής προσέγγισης του δευτερογενούς ελέγχου επιτρέπει την εφαρμογή ρουτινών βελτιστοποίησης με χρήση κάποιου δικτύου επικοινωνίας, δεδομένου ότι όλες οι σχετικές πληροφορίες συγκεντρώνονται σε ένα μόνο σημείο την ίδια στιγμή. Ωστόσο, αυτό αποτρέπει την επιθυμητή ευελιξία (plug-and-play) σύνδεσης και αποσύνδεσης μονάδων στο μικροδίκτυο. Από την άλλη πλευρά, στην αποκεντρωμένη προσέγγιση μπορεί εύκολα να ενσωματώνονται νέες μονάδες ΔΠ, χωρίς να χρειάζεται να γίνονται συνεχείς αλλαγές στις ρυθμίσεις του ελεγκτή, αλλά έχει δυσκολίες χειρισμού της λειτουργίας του μικροδικτύου που απαιτούν υψηλά επίπεδα συντονισμού. Σε γενικές γραμμές, οι κεντρικές προσεγγίσεις είναι καταλληλότερες για απομονωμένα μικροδίκτυα με κρίσιμες ισορροπίες προσφοράς-ζήτησης και σταθερή τοπολογία, ενώ οι αποκεντρωμένες προσεγγίσεις είναι καλύτερες για διασυνδεδεμένα μικροδίκτυα, με πολλούς ιδιοκτήτες και ταχέως μεταβαλλόμενο αριθμό μονάδων ΔΠ. Μια λεπτομερής περιγραφή των κεντρικών και αποκεντρωμένων προσεγγίσεων του δευτερογενούς ελέγχου παρουσιάζεται ακολούθως.

### **(Α)Κεντρικός δευτερογενής έλεγχος**

Μια κεντρική ή αλλιώς συγκεντρωμένη προσέγγιση στην αρχιτεκτονική του δευτερογενούς ελέγχου, απαρτίζεται από έναν κεντρικό ελεγκτή, στον οποίο παρέχονται όλες οι σχετικές πληροφορίες για κάθε διεσπαρμένη γεννήτρια και φορτίο εντός του μικροδικτύου. Επίσης, ο κύριος ελεγκτής παίρνει πληροφορίες για το ίδιο το δίκτυο κοινής ωφελείας, όπως συναρτήσεις κόστους, τεχνικά χαρακτηριστικά και περιορισμοί, παράμετροι του δικτύου και τρόποι λειτουργίας. Τέλος, υπάρχει και ενημέρωση από συστήματα πρόβλεψης, για παράδειγμα πρόβλεψη τοπικού φορτίου, ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας. Ο κύριος ελεγκτής χρειάζεται όλες αυτές τις πληροφορίες προκειμένου να καθορίσει την κατάλληλη δέσμευση μονάδων και κατανομή των πόρων σύμφωνα με τους επιθυμητούς στόχους. Μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις είτε με χρήση υπολογισμών σε σύνδεση της βέλτιστης (ή σχεδόν βέλτιστης) λειτουργίας, είτε με προετοιμασμένες και διαρκώς ενημερωμένες βάσεις δεδομένων με πληροφορίες για τις

κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας, από εκτός σύνδεσης υπολογισμούς ή άλλους τρόπους εύρεσης. Οι μεταβλητές ή παράμετροι εισόδου του κεντρικού ελεγκτή μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Προβλεπόμενη ισχύς εξόδου των μη ελεγχόμενων γεννητριών για  $N$  ακόλουθες διαδοχικές περιόδους.
- Προβλεπόμενο τοπικό φορτίο για  $N$  ακόλουθες διαδοχικές περιόδους.
- Κατάσταση φόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.
- Τεχνικά όρια των ελεγχόμενων γεννητριών και αποθηκευτικών διατάξεων.
- Περιορισμοί αξιοπιστίας και σταθερότητας του μικροδικτύου.
- Κατάσταση λειτουργίας του κύριου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.
- Πρόβλεψη των τιμών της ενέργειας στο δίκτυο.

Οι παράμετροι εξόδου του δευτερογενούς ελεγκτή είναι οι τιμές αναφοράς που αποστέλλονται στο πρωτογενές σύστημα ελέγχου (για παράδειγμα ισχύς εξόδου, τάση) για κάθε ελεγχόμενη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, μαζί με μεταβλητές απόφασης για τον έλεγχο των φορτίων, δηλαδή μετατόπιση ή απόρριψη φορτίου.

*1) Βέλτιστη κατανομή:* Στα μικρά μικροδίκτυα με χαμηλό αριθμό σεναρίων παραγωγής, ο εκτός σύνδεσης υπολογισμός της βέλτιστης λειτουργίας για όλα τα πιθανά σενάρια μπορεί να είναι η καλύτερη εναλλακτική λύση όσον αφορά το κόστος και την απόδοση του συστήματος. Όλες οι δυνατές καταστάσεις λειτουργίας αναλύονται εκτός σύνδεσης και η βέλτιστη ρύθμιση του συστήματος για κάθε σενάριο υπολογίζεται και αποθηκεύεται σε έναν πίνακα υπενθύμισης, ώστε να χρησιμοποιείται σε λειτουργία πραγματικού χρόνου. Αν και αυτή η προσέγγιση παράγει στιγμιαία απόκριση του συστήματος όταν οι συνθήκες αλλάζουν, ο αριθμός των πιθανών σεναρίων μπορεί να γίνει σημαντικό ζήτημα αν λογαριάσουμε τα σφάλματα του συστήματος, ή αν τα θερμικά φορτία πρέπει να βελτιστοποιηθούν από κοινού με τα ηλεκτρικά. Επί πλέον, η παρουσία αποθηκευτικών διατάξεων στο μικροδίκτυο εμφανίζει εξάρτηση χρόνου στον υπολογισμό της βέλτιστης ρύθμισης. Επομένως, ο βέλτιστος τρόπος λειτουργίας δεν καθορίζεται αποκλειστικά από ένα συγκεκριμένο σενάριο ζήτησης.

Το πρόβλημα της βέλτιστη ενεργειακής διαχείρισης του μικροδικτύου, εμπίπτει στην κατηγορία του μη γραμμικού προγραμματισμού μικτών ακεραίων. Έτσι, η επιθυμητή λειτουργία μπορεί να περιλαμβάνει συναρτήσεις κόστους με πολυωνυμικές εξισώσεις δευτέρου ή μεγαλύτερου βαθμού με κάποιες αποφάσεις εκκίνησης/παύσης λειτουργίας. Επίσης, ορισμένοι πολύπλοκοι περιορισμοί εμπλέκονται με τη μοντελοποίηση των τεχνικών ορίων ορισμένων συσκευών παραγωγής ή αποθήκευσης ή με τον ορισμό ελεγχόμενων φορτίων και αποφάσεων δέσμευσης. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του δικτύου (ροής ισχύος στις γραμμές) προστίθεται ένας ακόμη βαθμός πολυπλοκότητας στο πρόβλημα της βέλτιστη ενεργειακής διαχείρισης του μικροδικτύου. Για να λυθούν οι διατυπώσεις αυτές του προβλήματος, έχουν εφαρμοστεί τεχνικές εύρεσης βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένων Γενετικών Αλγορίθμων, και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών -Ant Colony Optimization(ACO). Η διατύπωση του προβλήματος έγινε επίσης πιο χαλαρή, με την ενσωμάτωση των περιορισμών ανισότητας στην επιθυμητή λειτουργία χρησιμοποιώντας παράγοντες ποινής.

Η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας κατά την αυτόνομη λειτουργία, και η μεγιστοποίηση του κέρδους για το μικροδίκτυο στη διασυνδεδεμένη λειτουργία είναι τυπικά δύο επιδιωκόμενοι στόχοι του δευτερογενούς ελέγχου. Ωστόσο, ορισμένες προσεγγίσεις έχουν ενσωματώσει τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου ως πρόσθετο στόχο για τη λειτουργία μικροδικτύου. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα διαχείρισης της ενέργειας διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων και επιλύεται με διαφορετικές τεχνικές.

2) Υποβολή προσφορών: Στην πιο τυπική περίπτωση του κεντρικού δευτεροβάθμιου ελέγχου, οι πληροφορίες σχετικά με τις συναρτήσεις κόστους και τα λειτουργικά όρια των διεσπαρμένων γεννητριών μεταφέρονται στον κύριο ελεγκτή του μικροδικτύου προκειμένου να καθοριστεί η κατάλληλη λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, είναι δυνατόν να υπάρξει μια πιο ενεργή συμμετοχή των γεννητριών και των πελατών, επιτρέποντάς τους να υποβάλλουν προσφορές για την ισχύ που παράγουν και καταναλώνουν αντίστοιχα, αντί απλώς να στέλνουν πληροφορίες για τις συναρτήσεις κόστους και τη διαθεσιμότητά τους.

3) Μη μοντελοποιημένη προσέγγιση: Οι συμβατικές μέθοδοι σχεδιασμού ελέγχου, όπως ο σχεδιασμός με βάση κάποιο μοντέλο και η βελτιστοποίηση βάσει προσομοιώσεων δεν είναι πάντα επαρκείς για έναν αρθρωτό σχεδιασμό που προωθεί τη λειτουργία plug-and-play (συχνής σύνδεσης και αποσύνδεσης μονάδων από το σύστημα), και μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στον αποτελεσματικό και γρήγορο μετριάσμο των μεταβατικών, όταν συμβαίνουν απρόσμενες αλλαγές στην τοπολογία. Για το λόγο αυτό, οι μέθοδοι που δεν απαιτούν ένα λεπτομερές μοντέλο του συστήματος και είναι ανθεκτικές σε αλλαγές παραμέτρων του συστήματος, είναι αρκετά ελκυστικές για εφαρμογές στον έλεγχο μικροδικτύου. Στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της επιθυμητής προσαρμοστικότητας, περιλαμβάνουν ασαφείς ελεγκτές και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Ωστόσο, περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητη σε αυτόν τον τομέα για να καθοριστεί ο επαρκής σχεδιασμός και οι διαδικασίες ζυγοστάθμισης τέτοιων ελεγκτών.

4) Η έννοια της αποθήκευσης: Η ανάπτυξη συστημάτων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην βέλτιστη λειτουργία των μικροδικτύων. Εκτός από την εξισορρόπηση της σχέσης προφοράς-ζήτησης όταν εμφανίζεται έλλειψη ή πλεόνασμα παραγωγής ισχύος, τα συστήματα αποθήκευσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για να επιτρέψουν στις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής να λειτουργούν στη μέγιστη αποδοτικότητά τους, και μπορούν να αποτρέψουν ή να μειώσουν τη χρήση δαπανηρών πηγών ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής. Η εφαρμογή μακροπρόθεσμης αποθήκευσης στην απομακρυσμένη κοινότητα της Bella Coola στον Καναδά, έφερε ως αποτέλεσμα σχεδόν 64% μείωση του κόστους ενέργειας σε μια τυπική μέρα του καλοκαιριού, όταν το επίπεδο φορτίου είναι σχετικά χαμηλό και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι σε θέση να καλύψουν το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης.

Με την παρουσία μιας διάταξης μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία διατυπώσεις πολλαπλών σταδίων του προβλήματος κατανομής, ώστε να ενταχθούν σωστά οι πόροι αποθήκευσης. Σε μια ερευνητική προσπάθεια πραγματοποιήθηκε η κατανομή φορτίου για ένα μικροδίκτυο εφοδιασμένο με διακοπτόμενες γεννήτριες και μια μονάδα αποθήκευσης. Η προγραμματισμένη

κατανομή προσαρμόζεται κάθε 15 λεπτά, ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι τάσεις διατηρούνται μέσα σε αποδεκτά όρια, προσπαθώντας να διατηρούνται οι ρυθμίσεις των μονάδων όσο το δυνατόν πιο κοντά στις προκαθορισμένες αξίες.

5) Έλεγχος Πρόβλεψης Μοντέλου(EIPM): Η αβεβαιότητα στα προφίλ του φορτίου και της παραγωγής έχει αντιμετωπιστεί έμμεσα στο πρόβλημα κατανομής με τη χρήση της προσέγγισης EIPM, η οποία είναι μία στρατηγική ελέγχου βελτιστοποίησης, όπου ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται και επιλύεται σε κάθε διακριτό χρονικό βήμα, και αποτελεί αναπόσπαστο μέρος μιας κεντρικής προσέγγισης ελέγχου. Οι στρατηγικές EIPM είναι αρκετά ελκυστικές για την ενεργειακή διαχείριση των μικροδικτύων, δεδομένου ότι επιτρέπουν την υλοποίηση δράσεων ελέγχου που προβλέπουν μελλοντικά γεγονότα, όπως διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου των μη ελεγχόμενων μονάδων, στις τιμές της ενέργειας και στη στιγμιαία ζήτηση.

Στον EIPM, σε κάθε χρονικό βήμα, η λύση για το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου, επιλύεται μέσα σε έναν προκαθορισμένο ορίζοντα χρησιμοποιώντας την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος, ως αρχική κατάσταση. Η βελτιστοποίηση υπολογίζει μια ακολουθία ελέγχου για το σύνολο του ορίζοντα τέτοια ώστε, οι επιλεγέντες στόχοι να ελαχιστοποιούνται, αλλά μόνο η δράση ελέγχου για το επόμενο χρονικό βήμα υλοποιείται. Η διαδικασία στη συνέχεια, επαναλαμβάνεται για το επόμενο χρονικό βήμα. Η υλοποίηση του EIPM για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης σε κάθε χρονικό βήμα, ονομάζεται μη γραμμικός EIPM.

Για να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα από το πρόβλημα βελτιστοποίησης, υπάρχει κίνητρο για χρήση μεγαλύτερου ορίζοντα βελτιστοποίησης. Ωστόσο, το προκύπτον πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορεί να είναι πολύ μεγάλο για να λυθεί σε λογικό υπολογιστικό χρόνο. Επί πλέον, η ακρίβεια και η ανάλυση της πρόβλεψης του μοντέλου, συνήθως μειώνεται με χρήση μεγαλύτερου ορίζοντα, που θα περιορίσει την ποιότητα των λύσεων που προκύπτουν.

Σε απομονωμένα μικροδίκτυα με ιδιαίτερα κρίσιμο ισοζύγιο παραγωγής-φορτίου, η EIPM προσέγγιση μπορεί να μην είναι αρκετή για να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, και μια περισσότερο λεπτομερής μοντελοποίηση της αβεβαιότητας μπορεί να είναι απαραίτητη. Τεχνικές όπως, η εύρωστη βελτιστοποίηση, η στοχαστική βελτιστοποίηση, και η βελτιστοποίηση με περιορισμό πιθανοτήτων σε συνδυασμό με τον παραδοσιακό EIPM, θα μπορούσαν να βοηθήσουν για καλύτερα αποτελέσματα και πιο αξιόπιστη λειτουργία των μικροδικτύων.

6) Επικοινωνία: Οι συγκεντρωμένες προσεγγίσεις ελέγχου βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε γρήγορα και αξιόπιστα συστήματα επικοινωνίας. Επιπλέον, οι περισσότερες εφαρμογές απαιτούν συντονισμό μεταξύ της διάταξης προστασίας και του συστήματος ελέγχου. Το πρότυπο IEC 61850 μπορεί να εφαρμοστεί για δίκτυα επικοινωνίας σε επίπεδο μικροδικτύου, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι παραπάνω απαιτήσεις. Το πρότυπο αυτό έχει σχεδιαστεί από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC), για την αυτοματοποίηση ηλεκτρικών υποσταθμών, και μπορεί να υλοποιηθεί μέσω δικτύων TCP/IP χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα υποδομή, δίνοντας χρόνους απόκρισης εντός του απαιτούμενου εύρους για εφαρμογές προστασίας. Το πρότυπο ορίζει αφηρημένα μοντέλα δεδομένων που μπορούν να χαρτογραφηθούν σε διάφορα πρωτόκολλα.

## **(B)Αποκεντρωμένος δευτερογενής έλεγχος**

Ένας αποκεντρωμένος δευτερογενής έλεγχος προτίθεται να λύσει το το πρόβλημα της διαχείρισης ενέργειας του μικροδικτύου, ενώ ταυτόχρονα παρέχει τη μέγιστη δυνατή αυτονομία στις διαφορετικές μονάδες ΔΠ και τα φορτία. Αν και αυτή η προσέγγιση μπορεί να εξακολουθεί να χρησιμοποιεί μια ιεραρχική δομή για την ανταλλαγή δεδομένων, οι αποφάσεις σχετικά με τις μεταβλητές ελέγχου γίνονται σε τοπικό επίπεδο. Η αυτονομία επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια ιεραρχική δομή με τρία τουλάχιστον επίπεδα:

- **Διαχειριστής Δικτύου Διανομής (ΔΔΔ)**
- **Κεντρικός Ελεγκτής Μικροδικτύου (ΚΕΜ)**
- **Τοπικοί Ελεγκτές (ΤΕ)**

Ο ΔΔΔ είναι υπεύθυνος για την αλληλεπίδραση του μικροδικτύου με το δίκτυο διανομής (δίκτυο υποδοχής) και τα γειτονικά μικροδίκτυα και είναι, ως εκ τούτου, μέρος του τριτογενούς ελέγχου. Ο ΚΕΜ συντονίζει τη συνολική λειτουργία των μονάδων ΔΠ και των φορτίων μέσα στο μικροδίκτυο, και είναι υπεύθυνος για την αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία τους, καθώς επίσης και την αλληλεπίδρασή τους με το κύριο δίκτυο. Τέλος, οι ΤΕ ελέγχουν τις γεννήτριες εντός του μικροδικτύου, ή μια δέσμη από αυτές, αλληλεπιδρώντας με ελεγκτές υψηλότερου επιπέδου και επιχειρώντας να επιτύχει τους τοπικούς, αλλά και γενικούς στόχους. Σε μια αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική, οι ΤΕ μπορούν να επικοινωνούν με τον ΚΕΜ και άλλους ΤΕ, ώστε να μοιραστούν γνώσεις, να αιτηθούν ή να προσφέρουν μια υπηρεσία, να επικοινωνούν τις επιδιώξεις τους, και να ανταλλάσσουν οποιαδήποτε άλλη πληροφορία, σχετική με τη λειτουργία του μικροδικτύου.

Με βάση τα χαρακτηριστικά τους, τα αποκεντρωμένα συστήματα δευτερογενούς ελέγχου έχουν απασχολήσει αρκετά στη βιβλιογραφία, χρησιμοποιώντας το πλαίσιο MAS(multi-agent system). Ένα MAS μπορεί εν συντομία, να περιγραφεί ως ένα σύστημα που αποτελείται από πολλούς ευφυείς παρατηρητές, που τους παρέχονται τοπικές πληροφορίες, και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, προκειμένου να επιτευχθούν πολλαπλοί ευρείς και τοπικοί στόχοι. Είναι αρκετά εμφανές, ότι η συνδεσιμότητα των παρατηρητών, οι λειτουργίες και οι ευθύνες που αποδίδονται σε κάθε έναν εξ αυτών, και τα χαρακτηριστικά των πληροφοριών που μοιράζονται, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος. Οι παρατηρητές είναι οντότητες που δρουν στο περιβάλλον και έχουν την ικανότητα επικοινωνίας, κάποιο επίπεδο αυτονομίας με βάση τους δικούς τους στόχους, και περιορισμένη γνώση του περιβάλλοντος (για παράδειγμα μετρήσεις του ακροδέκτη). Ένας ευφυής παρατηρητής, που παρουσιάζει σημαντική διαφορά από ένα απλό στοιχείο συμβατικού ηλεκτρικού συστήματος, όπως ένα ρελέ, παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της αντιδραστικότητας (δείχνει αντίδραση στις αλλαγές του περιβάλλοντος), της προληπτικότητας (που αναζητά πρωτοβουλίες), και της κοινωνικότητας (στηριζόμενος σε επικοινωνία). Η θεωρία εκτίμησης κατάστασης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο για τις περιορισμένες γνώσεις των παρατηρητών. Παρά το γεγονός ότι οι παρατηρητές μπορούν να επικοινωνούν, ένα μεγάλο μέρος του ελέγχου βασίζεται στην αυτονομία τους και εκτελείται σε τοπικό επίπεδο.

Την πρώτη φορά που προτάθηκε ο δευτερεύον έλεγχος βασισμένος στην έννοια MAS, ήταν ως εναλλακτική λύση για τη συντονισμένη λειτουργία μικροδικτύων σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον αγοράς και με πολλαπλούς ιδιοκτήτες γεννητριών. Τα διάφορα σημεία δράσης του μικροδικτύου, ομαδοποιούνται και αντιπροσωπεύονται από διαφορετικούς παρατηρητές, οι οποίοι αλληλεπιδρούν σε ένα περιβάλλον αγοράς, προκειμένου να καθοριστεί η λειτουργία του μικροδικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, οι καταναλωτές, οι γεννήτριες, τα συστήματα αποθήκευσης και το κύριο δίκτυο συμμετέχουν στην αγορά στέλνοντας προσφορές αγοράς και πώλησης στον KEM, με βάση τις ιδιαίτερες ανάγκες τους, τη διαθεσιμότητα, τις συναρτήσεις κόστους, τους τεχνικούς περιορισμούς, τις επιδιώξεις τους και τις προβλέψεις. Ο KEM είναι υπεύθυνος για το διακανονισμό της αγοράς του μικροδικτύου ταιριάζοντας προσφορές αγοράς και πώλησης, μεγιστοποιώντας το κοινωνικό κέρδος, και διασφαλίζοντας παράλληλα μία εφικτή κατανομή ενεργειακών πόρων. Χρήσιμοι μπορούν να φανούν επίσης, υπολογισμοί ροής φορτίου, ώστε να εξακριβωθεί η συμφωνία της κατανομής που έδωσε η αγορά, με τεχνικά πρότυπα και λοιπούς λειτουργικούς περιορισμούς. Υπάρχει τέλος, η ιδέα της χρήσης μίας συσκευής βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, που θα συμβάλλει στην γρήγορη εξισορρόπηση των μεταβολών της ζήτησης, χωρίς να συμμετέχει στην αγορά.

Μια ειδική περίπτωση ενός MAS είναι η λεγόμενη τεχνική gossip-based (δηλαδή που βασίζεται σε κουτσομπολιό). Σε αυτή την προσέγγιση δευτερογενούς ελέγχου, οι διαφορετικές μονάδες ανταλλάσσουν πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία τους, όπως οι αναντιστοιχίες μεταξύ προγραμματισμένων και πραγματικών εξόδων ισχύος, και τα οριακά κόστη. Για να επαναφέρουν τη συχνότητα και τις τάσεις στις αρχικές τιμές τους μετά από μία διαταραχή του συστήματος, οι διεσπαρμένες γεννήτριες ανταλλάσσουν τις αναντιστοιχίες που βλέπουν μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικής εξόδου σε ενεργό και άεργο ισχύ, και βάση αυτών υπολογίζουν το μέσο όρο αναντιστοιχίας για το σύνολο του μικροδικτύου. Η μέση αναντιστοιχία στη συνέχεια προστίθεται στην τιμή αναφοράς των droop ελεγκτών κάθε γεννήτριας προς αντιμετώπιση της αρχικής μετατόπισης.

### **(III) Τριτογενής έλεγχος**

Το τριτογενές επίπεδο ελέγχου είναι το υψηλότερο και ορίζει μακροπρόθεσμες και τυπικά βέλτιστες τιμές αναφοράς, ανάλογα με τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού δικτύου υποδοχής. Ο τριτοβάθμιος έλεγχος είναι υπεύθυνος για το συντονισμό της λειτουργίας πολλαπλών μικροδικτύων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσα στο σύστημα, και τα ενημερώνει για ανάγκες ή απαιτήσεις του κυρίου δικτύου, όπως υποστήριξη τάσης, ρύθμιση συχνότητας, κλπ. Για παράδειγμα, η διαχείριση της συνολικής άεργου ισχύος ενός δικτύου αποτελούμενο από πολλά μικροδίκτυα, θα μπορούσε να επιτευχθεί συντονίζοντας κατάλληλα, μέσω μίας τριτογενούς προσέγγισης ελέγχου, την έγχυση άεργου ισχύος των διεσπαρμένων γεννητριών κάθε μικροδικτύου στο ΣΚΣ, με βάση μια κεντρική προσέγγιση ελαχιστοποίησης απωλειών για ολόκληρο το δίκτυο. Αυτό το ιεραρχικό επίπεδο ελέγχου τυπικά λειτουργεί σε χρονικά πλαίσια της τάξης μερικών λεπτών, παρέχοντας σήματα στα δευτερογενή επίπεδα ελέγχου των μικροδικτύων και άλλων υποσυστημάτων που συναποτελούν το πλήρες σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι δευτερογενείς έλεγχοι, με τη σειρά τους, συντονίζουν τους εσωτερικούς πρωτογενείς ελέγχους εντός των μικροδικτύων και των υποσυστημάτων σε διάστημα λίγων λεπτών.

Τέλος, οι πρωτογενείς έλεγχοι έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν ανεξάρτητα και να αντιδρούν άμεσα με προκαθορισμένους τρόπους σε τοπικά συμβάντα. Ο τριτοταγής έλεγχος μπορεί να θεωρηθεί μέρος του δικτύου υποδοχής, και όχι κομμάτι του μικροδικτύου. Ως εκ τούτου, αυτό το επίπεδο ελέγχου δεν θα αναλυθεί περαιτέρω στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

### **2.3.4 Έλεγχος DC μικροδικτύου - Η ιδέα του DBS**

Τα DC μικροδίκτυα, έχουν αρχίσει πρόσφατα να προσελκύουν μεγάλη προσοχή, λόγω των πλεονεκτημάτων τους. Πρώτον, οι ενσωματωμένοι διεσπαρμένοι παραγωγοί μπορούν εύκολα να συμβαδίσουν με το σενάριο plug-and-play και να συνεργάζονται μεταξύ τους, δεδομένου ότι ελέγχουν μόνο την DC τάση. Επίσης, καθώς η ροή άεργου ισχύος είναι απύσχα, το αντίστοιχο κομμάτι του πρωτεύοντος ελέγχου είναι σημαντικά λιγότερο πολύπλοκο από την περίπτωση του AC μικροδικτύου. Επίσης, η έννοια του μικροδικτύου περιλαμβάνει κυρίως διεσπαρμένες γεννήτριες που έχουν έξοδο DC όπως, συσκευές αποθήκευσης, κυψέλες καυσίμου, φωτοβολταϊκά πάνελ κλπ. Οι περιττές μετατροπές ισχύος αποφεύγονται. Σημειώνουμε επίσης ότι, απουσιάζουν προβλήματα συγχρονισμού, ενώ τα υψηλά ρεύματα σφάλματος αποφεύγονται λόγω της ύπαρξης των μετατροπέων. Και τελικώς, τα μικρότερα επίπεδα τάσης που εμφανίζονται στους μετασχηματιστές βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση, το μέγεθος και το κόστος του δικτύου διανομής[32].

Για όλους τους παραπάνω λόγους, το ενδιαφέρον πλέον στρέφεται στο σχεδιασμό ελέγχου για μικροδίκτυα DC, και όχι AC. Στο παρελθόν, αρκετοί ερευνητές έχουν παρουσιάσει διάφορες στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας για τα DC μικροδίκτυα. Το σημείο-κλειδί όλων των ελέγχων διαχείρισης ενέργειας είναι να διατηρείται η ισορροπία ισχύος μεταξύ των πηγών ενέργειας, των συσκευών αποθήκευσης και των φορτίων σε κάθε χρονική στιγμή. Η ισορροπία αντιπροσωπεύεται από την σταθερή τάση στον DC ζυγό.

Οι πηγές σε ένα μικροδίκτυο[33], με βάση όσα έχουμε αναφέρει, μπορούν να ελεγχθούν με μία κεντρική λογική, αποκεντρωμένη, ή ένα συνδυασμό των δύο. Με τον κεντρικό έλεγχο, κάθε πηγή ελέγχεται από ένα μόνο σημείο, χρησιμοποιώντας έναν κύριο ελεγκτή και σύνδεση επικοινωνίας. Σε αυτή την περίπτωση ένας νόμος ελέγχου μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα, αφού ο κεντρικός ελεγκτής γνωρίζει στοιχεία για κάθε κόμβο του συστήματος. Όμως, η αξιοπιστία του συστήματος μειώνεται σημαντικά, εφόσον το σύστημα εξαρτάται από το δίκτυο επικοινωνίας και τον κεντρικό ελεγκτή για τη σωστή λειτουργία του. Σε περίπτωση που δυσλειτουργήσει κάποιο από τα δύο, θα έχουμε άμεση κατάρρευση του συστήματος. Επιπλέον, ο κεντρικός ελεγκτής δεν μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά τον όγκο δεδομένων ενός μεγάλου συστήματος. Έτσι, αυτό το είδος διαχείρισης συνήθως προτιμάται για μικρές κατοικίες ή εργαστηριακές εφαρμογές.

Λόγω των ανωτέρω μειονεκτημάτων, ορισμένοι ερευνητές στράφηκαν προς τις αποκεντρωμένες στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας, όπου οι διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής είναι όλες αυτόνομα ελεγχόμενες με τη χρήση τοπικών ανατροφοδοτήσεων σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, όλες οι μεταβάσεις στη λειτουργία του μικροδικτύου μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς επιπλέον των επικοινωνιών.

Μια δημοφιλής προσέγγιση αποκεντρωμένου ελέγχου, είναι η τεχνική DC bus signaling(DBS). Το επίπεδο της DC τάσης στον κοινό ζυγό του μικροδίκτυου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φορέας πληροφορίας για τη διάκριση των διαφορετικών καταστάσεων λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να καθοριστούν τα όρια της τάσης που υπαγορεύουν αυτούς τους διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας και τις προτεραιότητες των συσκευών. Τα όρια αυτά πρέπει να είναι πλήρως διακριτά μεταξύ τους, αλλά και αρκετά στενά, ώστε να μην αποσταθεροποιείται το σύστημα.

Με την αρχιτεκτονική ελέγχου DBS, κάθε συσκευή που ανήκει στο σύστημα, θα ελέγχεται αυτόνομα από το δικό της τοπικό ελεγκτή. Προφανώς, τα στοιχεία που τοπολογικά βρίσκονται κοντά μεταξύ τους και είναι του ίδιου τύπου, είναι σκόπιμο να ομαδοποιηθούν και να ελέγχονται από έναν κοινό ελεγκτή για λόγους κόστους και απλότητας. Για παράδειγμα, μία συστοιχία μπαταριών, μία ολόκληρη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση ή μία ομάδα φορτίων μπορούν να ενταχθούν σε έναν ελεγκτή. Είναι εμφανές, ότι ανάλογα με τον τύπο της συσκευής ή της ομάδας συσκευών, ο τοπικός ελεγκτής έχει να επιτελέσει και διαφορετικές λειτουργίες. Οι τρεις βασικές κατηγορίες ελεγκτών που απαιτούνται για την υλοποίηση ενός ελέγχου με την τεχνική DBS είναι οι εξής παρακάτω:

- **Ελεγκτές μικρο-πηγών** Οι ειδικοί αυτοί ελεγκτές αναλαμβάνουν τον χειρισμό των διεσπαρμένων γεννητριών που ανήκουν στο μικροδίκτυο. Υπάρχουν δύο υποκατηγορίες στους εν λόγω ελεγκτές. Αυτοί που ελέγχουν τις λεγόμενες ελεγχόμενες μονάδες και αυτοί που αναλαμβάνουν τις μη ελεγχόμενες. Οι πρώτοι περιορίζονται στην βελτιστοποίηση της παραγωγής των διακοπτόμενων γεννητριών (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες). Οι τελευταίοι ανάλογα με το επίπεδο της τάσης του κοινού ζυγού, ελέγχουν με κάποια μεθοδολογία, την ισχύ εξόδου της συσκευής, ώστε να διορθώσουν το ισοζύγιο παραγωγής-φορτίου που εξαρχής προκάλεσε την μεταβολή της τάσης.
- **Ελεγκτές συστημάτων αποθήκευσης** Σε ένα μικροδίκτυο είναι δεδομένο ότι θα υπάρχουν πηγές ηλεκτρικής ενέργειας με διακοπτόμενη παραγωγή. Άρα, η μόνη λύση για δημιουργία ενός σχετικά αυτόνομου συστήματος, είναι να συμπεριληφθούν αποθηκευτικές διατάξεις. Στην πράξη, μιλάμε κυρίως για μπαταρίες και υπερπυκνωτές, ως τις πιο αξιόπιστες και αποδοτικές λύσεις που υπάρχουν ευρέως στο εμπόριο. Υπάρχουν και άλλες εφαρμογές, όπως το flywheel και το SMES, όμως λόγω κόστους δεν χρησιμοποιούνται. Οι ελεγκτές των μονάδων αποθήκευσης, υλοποιούν το ρόλο τους ως ενεργειακά ενδιάμεσα για το μικροδίκτυο. Ο σχεδιασμός ελέγχου είναι παρόμοιος με αυτόν στις μικρο-πηγές, πρέπει όμως να συμπεριλάβουμε και τους περιορισμούς χωρητικότητας των συσκευών.
- **Ελεγκτές φορτίων** Οι συγκεκριμένοι ελεγκτές, είναι η διεπαφή των φορτίων με τον κοινό dc ζυγό του μικροδίκτυου. Ο ρόλος τους είναι να διαχωρίζουν τα φορτία σε ομάδες προτεραιότητας, και σε καταστάσεις έλλειψης ισχύος να αποκόπτουν τα λιγότερο σημαντικά φορτία, ώστε να διασφαλιστεί η λειτουργία των σημαντικότερων. Εναλλακτικά, μπορεί να εφαρμοστεί ένας προγραμματισμός φορτίων ανάλογα με την παραγόμενη ισχύ, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το ενεργειακό κόστος του συστήματος. Για παράδειγμα, τις ώρες με ηλιοφάνεια να λειτουργήσει το πλυντήριο, ώστε να μη χρειαστεί αργότερα να καταναλωθεί ακριβό καύσιμο ή να αγοραστεί ενέργεια από το δίκτυο.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### Φωτοβολταϊκά Συστήματα

#### 3.1 Θεωρητικό μοντέλο φωτοβολταϊκού

##### 3.1.1 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η λειτουργία των ηλιακών στοιχείων βασίζεται στην ικανότητα των ημιαγωγών να μετατρέπουν άμεσα το ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό με τη βοήθεια του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, όπου η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου που δέχεται την ακτινοβολία.

Έστω ότι το φως προσπίπτει από την πλευρά του ημιαγωγού τύπου n, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1 παρακάτω. Εφόσον η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου είναι μεγαλύτερη από αυτή του ενεργειακού διακένου του ημιαγωγού, τότε το κάθε ένα φωτόνιο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους που βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια. Η ενέργεια του κάθε φωτονίου που απορροφάται διεγείρει το ηλεκτρόνιο προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας πίσω στο πλέγμα μια κενή ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή μια οπή. Με τον τρόπο αυτό η οπτική διέγερση εισάγει ταυτόχρονα ζεύγη οπών (στη ζώνη σθένους) και ηλεκτρονίων (στη ζώνη αγωγιμότητας) καθ' όλο το εύρος της επαφής p-n, συμπεριλαμβανομένου και του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού.[34]

Καθώς το υλικό απορροφά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (από το ορατό φάσμα), δεν μπορεί να περιέλθει σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας λόγω της συνεχούς οπτικής διαταραχής που εισάγει διαρκώς ηλεκτρικούς φορείς στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος. Σύμφωνα με την προσέγγιση «Quasi – Equilibrium», η στάθμη Fermi διαχωρίζεται σε δύο διακριτές στάθμες Quasi – Fermi, μία για τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ( $\Phi_n$ ) και μία για τις οπές ( $\Phi_p$ ), όπως φαίνεται και στο σχήμα.

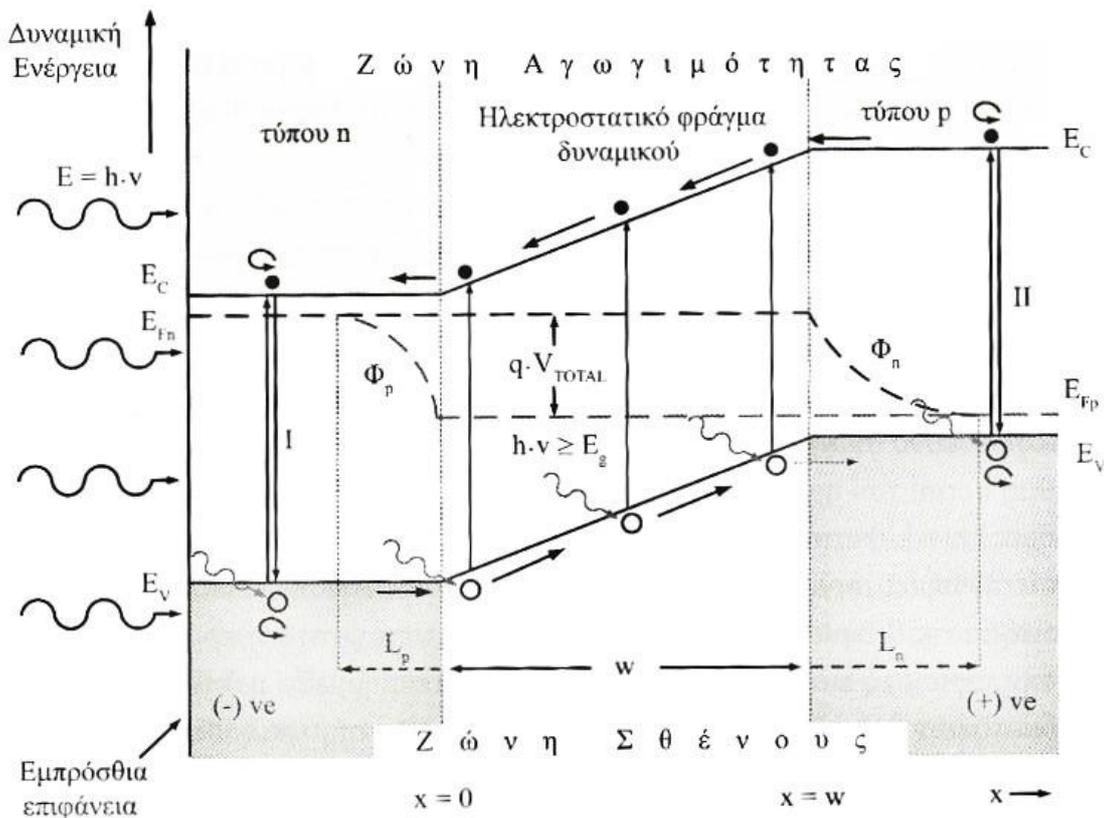
Όταν οι απορροφήσεις των φωτονίων γίνονται στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού, τα παραγόμενα ζεύγη ηλεκτρικών φορέων(ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) θα διαχωρίζονται αυτόματα από το ηλεκτροστατικό πεδίο, προκειμένου να ελαχιστοποιούν τη δυναμική τους ενέργεια και να καταλαμβάνουν θεμελιώδεις καταστάσεις στη δομή του υλικού. Οι αντίθετες πορείες που θα ακολουθήσουν κατά το διαχωρισμό τους οι οπές της ζώνης σθένους (κύκλοι στο σχήμα) και τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας (μαύρες κουκίδες στο σχήμα), σηματοδοτούνται από τα βέλη του σχήματος. Ο αυτόματος διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορέων που γίνεται από το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού διασφαλίζει ότι οι παραγόμενοι ηλεκτρικοί φορείς θα εκτραπούν προς διαφορετικές περιοχές και δεν θα μπορέσουν να επανασυνδεθούν.

Όσο χρόνο διαρκεί η οπτική διέγερση, τα ηλεκτρόνια που εισάγονται στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου n, ενώ οι οπές εκτρέπονται προς τον ημιαγωγό τύπου p. Συνεπώς, ο ημιαγωγός τύπου n θα αποκτήσει περισσότερα αρνητικά φορτία, ενώ ο ημιαγωγός τύπου p θα αποκτήσει περισσότερα θετικά φορτία. Η δημιουργία αυτών των κατανομών ισοδυναμεί με μια ορθά πολωμένη δίοδο p-n. Στη μόνιμη κατάσταση μιας διεγερμένης δίοδου p-n, οι

στάθμες  $\Phi_n$  και  $\Phi_p$  θα παραμένουν οριζόντιες καθ' όλο το εύρος του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού και θα διαχωρίζονται μεταξύ τους κατά την ενεργειακή διαφορά:

$$\Phi_n - \Phi_p = q \cdot V_{total} \quad (3-1)$$

Όπου  $q$  είναι το στοιχειώδες φορτίο, ενώ το δυναμικό  $V_{total}$  αντιστοιχεί στην τιμή της τάσεως εξόδου που θα αναπτυχθεί (και θα μετρηθεί) μεταξύ των εξωτερικών ακροδεκτών της φωτιζόμενης διόδου (p-n). Επιπροσθέτως, παρέχεται ρεύμα (το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού)  $I_{PV}$ , η ένταση του οποίου εξαρτάται από την απορροφούμενη φωτεινή ισχύ.

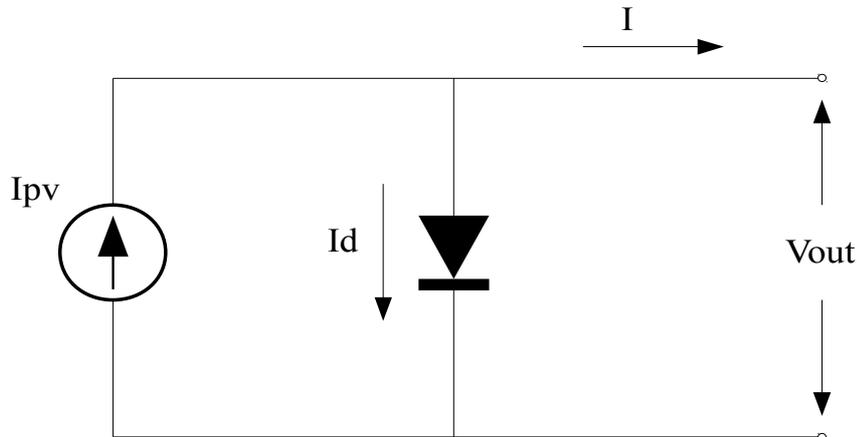


*Εικόνα 3.1: Διάγραμμα δυναμικής ενέργειας ηλεκτρονίων – απόστασης για μια φωτιζόμενη διόδο p-n στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.[34]*

### 3.1.2 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού

Ένα απλό φωτοβολταϊκό στοιχείο, από τη σκοπιά της μοντελοποίησης, μπορεί να αναπαρασταθεί από μία ιδανική πηγή ρεύματος παράλληλα συνδεδεμένη με μία ιδανική δίοδο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Δύο παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο και χαρακτηρίζουν το Φ/Β στοιχείο είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$  και το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ . Η  $V_{oc}$  είναι η μέγιστη τάση που μπορεί το στοιχείο να

αποδώσει για μηδενικό ρεύμα, ενώ το  $I_{sc}$  είναι το μέγιστο ρεύμα του Φ/Β στοιχείου, όταν η τάση του είναι μηδενική.



*Εικόνα 3.2: Ισοδύναμο κύκλωμα ιδανικού φωτοβολταϊκού*

Το ρεύμα εξόδου μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση:

$$\boxed{\mathbf{I = I_{pv} - I_d}} \quad \mathbf{(3-2.1)}$$

Το  $I_{pv}$  είναι το φωτορεύμα, η ένταση του οποίου εξαρτάται από την απορροφούμενη ηλιακή ισχύ, ενώ  $I_d$  είναι το ρεύμα που διαρρέει τη διόδο το οποίο υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\boxed{\mathbf{I_d = I_o \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V_d}{k \cdot T}} - 1 \right)}} \quad \mathbf{(3-2.2)}$$

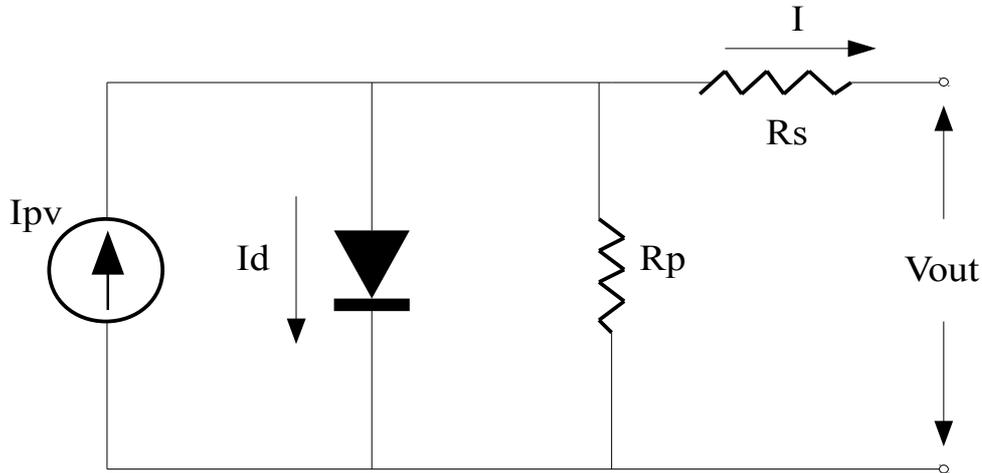
- $I_o$  το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου
- $q = 1.602 \cdot 10^{-23}$  Cb το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου
- $V_d$  η τάση της διόδου
- $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$  J/K η σταθερά του Boltzmann
- $T$  η θερμοκρασία επαφής σε Kelvin

Το Φ/Β στοιχείο μπορεί να δώσει τάση της τάξης του 0.5 V και συνεπώς υπάρχει η ανάγκη να συνδεθούν αρκετά σε σειρά (δημιουργώντας ένα Φ/Β πλαίσιο) ώστε να φτάσουμε στα επιθυμητά επίπεδα τάσης. Το παραπάνω ιδανικό ισοδύναμο κύκλωμα αποτυγχάνει να περιγράψει με ακρίβεια την έξοδο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος γιατί αγνοεί τα παρακάτω στοιχεία:

- ➔ Την αντίσταση σειράς  $R_s$ , η οποία μοντελοποιεί 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.

→ 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.

Με βάση τα παραπάνω παίρνουμε το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του πραγματικού (μη-ιδανικού) φωτοβολταϊκού στοιχείου όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



*Εικόνα 3.3: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού φωτοβολταϊκού*

Το ρεύμα διόδου ενός πραγματικού Φ/Β πλαισίου υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση, στην οποία προστέθηκε ο συντελεστής ιδανικότητας  $a$  (ideality factor), που παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2 (1 για ιδανική δίοδο, 2 για έντονο ρυθμό επανασύνδεσης φορέων):

$$I_d = I_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{a \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3-2.3)$$

Ενώ, η εξίσωση που περιγράφει το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού επομένως γίνεται:

$$I = I_{PV} - I_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{a \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3-2.4)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, το φωτορεύμα  $I_{PV}$  μεταβάλλεται για διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{PV} = \left[ I_{sc} \cdot \frac{R_s + R_p}{R_p} + K_I \cdot (T - T_n) \right] \cdot \frac{G}{G_n} \quad (3-2.5)$$

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

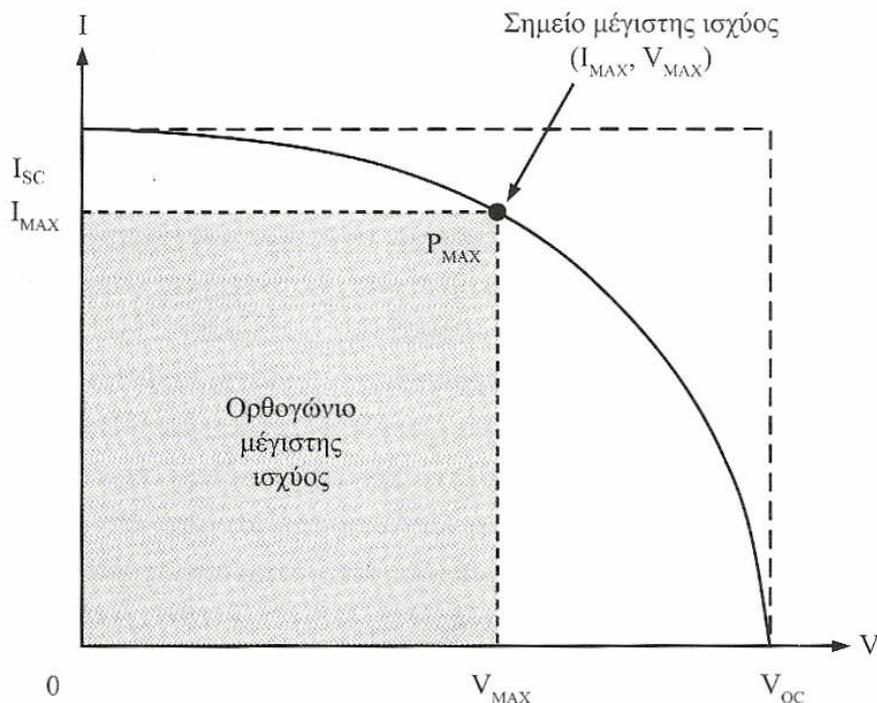
$R_s$ : η αντίσταση σειράς

- $R_p$ : η παράλληλη αντίσταση
- $K_i$ : ο θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης
- $T$ : η θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου
- $T_n$ : η θερμοκρασία αναφοράς (κατά κανόνα 25 °C)
- $G$ : η ηλιακή ακτινοβολία
- $G_n$ : η ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς (κατά κανόνα 1000 W/m<sup>2</sup>)

### 3.1.3 Η χαρακτηριστική I-V ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου. Τα σημεία που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι οι τομές με τους άξονες και το σημείο μέγιστης ισχύος.

Πιο συγκεκριμένα, για μηδενική τιμή τάσεως παίρνουμε  $I = I_{SC}$  το οποίο είναι και το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δώσει η διάταξη (ρεύμα βραχυκύκλωσης). Αντίστοιχα, για μηδενικό ρεύμα έχουμε τάση  $V = V_{OC}$ , ίση δηλαδή με τη μέγιστη τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού (τάση ανοιχτοκύκλωσης).



Εικόνα 3.4: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V Φ/Β στοιχείου [34]

Η ισχύς, ως το γινόμενο μεταξύ ρεύματος και τάσης, παρουσιάζει μεταβολές ανάλογα με το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας του φωτοβολταϊκού. Υπάρχει, όμως, ένα σημείο στο οποίο η τιμή της μεγιστοποιείται,  $P = P_{max}$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα. Καθώς βασικό μας ζητούμενο είναι η μέγιστη δυνατή ροή ισχύος από το Φ/Β προς την υπόλοιπη εγκατάσταση, είναι προφανές ότι θέλουμε το σημείο λειτουργίας μας να ταυτίζεται με το σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτή είναι η δουλειά που αναλαμβάνει ο MPPT, όπως θα αναλυθεί διεξοδικά σε επόμενη παράγραφο.

Με δεδομένες τιμές για τις αντιστάσεις  $R_S$  και  $R_P$  η χαρακτηριστική I-V επηρεάζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Την ένταση  $G$  της ηλιακής ακτινοβολίας: το ρεύμα που παρέχει το κύκλωμα είναι πρακτικά ανάλογο προς την ποσότητα της ακτινοβολίας που απορροφά, δηλαδή προς το γινόμενο της έντασης της ακτινοβολίας επί το εμβαδό της επιφάνειάς του. Καθώς αυξάνεται η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, παρατηρείται ένα «άνοιγμα» της καμπύλης I-V κυρίως προς τον άξονα του ρεύματος.
- Τη θερμοκρασία  $T$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου: η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας επηρεάζει το μέγεθος της τάσης ανοιχτοκύκλωσης  $V_{OC}$ . Πιο συγκεκριμένα, αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει σχεδόν γραμμική μείωση της  $V_{OC}$  και συνεπώς ένα «μάζεμα» της χαρακτηριστικής I-V από τη μεριά της τάσης.

### 3.1.4 Υπολογισμός των αντιστάσεων $R_S$ και $R_P$

Για να καταστεί εφικτή η μοντελοποίηση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου με ακρίβεια πρέπει πρώτα να υπολογιστούν οι τιμές των αντιστάσεων  $R_S$  και  $R_P$  του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος. Πολλές είναι οι μέθοδοι που έχουν προταθεί για τον παραπάνω υπολογισμό. Αυτή που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία περιγράφεται παρακάτω.

Στο φύλλο δεδομένων (datasheet) κάθε φωτοβολταϊκού δίνονται οι ακόλουθες πληροφορίες:

- 1) Πρότυπες συνθήκες λειτουργίας (Standard Operating Conditions):  $T_n=25$  °C καθώς και  $G_n=1000$  W/m<sup>2</sup>
- 2)  $I_{SC}$ : ρεύμα βραχυκύκλωσης στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
- 3)  $V_{OC}$ : τάση ανοιχτοκύκλωσης στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
- 4)  $I_{mpp}$ : ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος, στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
- 5)  $V_{mpp}$ : τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος, στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας
- 6)  $K_V$ : θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης ανοιχτοκύκλωσης
- 7)  $K_I$ : θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης
- 8)  $P_{max,e}$ : η πειραματικά μετρημένη μέγιστη τιμή της ισχύος στις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας

Από τα παραπάνω δεδομένα καθώς και τις εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα, θέλουμε να υπολογίσουμε τις τιμές των αντιστάσεων του ισοδύναμου κυκλώματος. Εξισώνοντας την πειραματική με τη θεωρητική (από τις εξισώσεις) μέγιστη τιμή της ισχύος, παίρνουμε τη σχέση:

$$P_{max,e} = V_{mpp} \cdot \left[ I_{pv} - I_o \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s)}{a \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s}{R_p} \right] \quad (3-3.1)$$

Με μόνους άγνωστους τα  $R_S$  και  $R_P$  μπορούμε χρησιμοποιώντας μία επαναληπτική μέθοδο να προσεγγίσουμε τις τιμές τους. Επιλύοντας ως προς  $R_P$  παίρνουμε:

$$R_p = \frac{V_{mpp} \cdot (V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s)}{V_{mpp} \cdot I_{pv} - V_{mpp} \cdot I_o \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_s)}{a \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - P_{max,e}} \quad (3-3.2)$$

Ο αλγόριθμος για τον υπολογισμό περιγράφεται παρακάτω:

Βήμα 1<sup>ο</sup>: Επιλογή ζευγαριού  $R_s$ ,  $R_p$

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Υπολογισμός σημείων καμπύλης I-V που προκύπτουν για τα  $R_s$ ,  $R_p$  αυτά

Βήμα 3<sup>ο</sup>: Εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος στην καμπύλη αυτή  $P_m$

Βήμα 4<sup>ο</sup>: Υπολογισμός σφάλματος  $|P_m - P_{max,e}|$

Βήμα 5<sup>ο</sup>: Αν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από κάποια ανοχή, επανάληψη

Με άλλα λόγια, για συγκεκριμένες συνθήκες (πρότυπες) παίρνουμε διαφορετικές χαρακτηριστικές I-V για διαφορετικά ζεύγη  $R_s$  και  $R_p$ . Ψάχνουμε το ζευγάρι τιμών εκείνο που να δίνει τέτοια καμπύλη I-V της οποίας το σημείο μέγιστης ισχύος να είναι ίδιο με το πειραματικό (από datasheet).

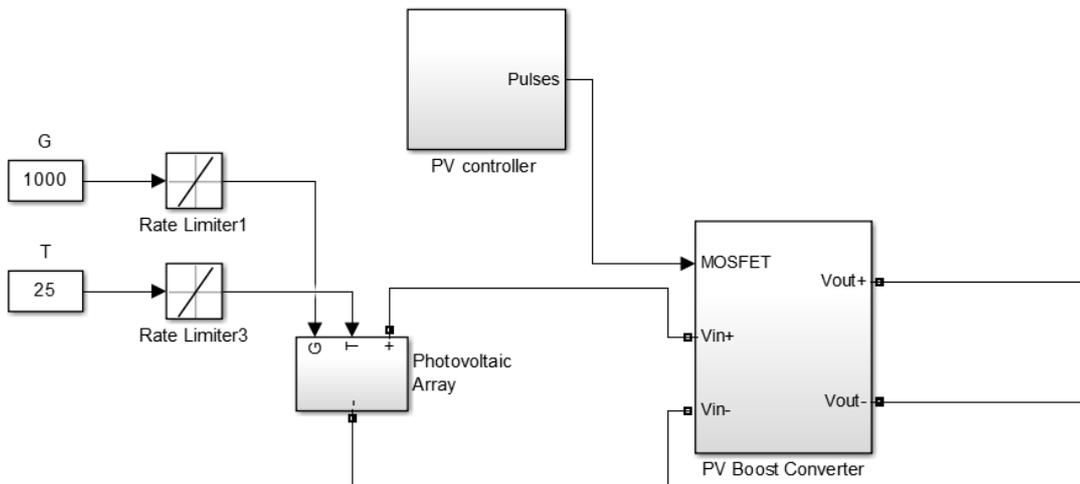
Στην πράξη ξεκινάμε από μία πολύ μικρή τιμή για το  $R_s$  το οποίο και αυξάνουμε με μικρό βήμα. Για κάθε τιμή του  $R_s$  υπολογίζουμε από την παραπάνω σχέση το  $R_p$ . Η δυσκολία έγκειται στον υπολογισμό των σημείων της εκάστοτε καμπύλης I-V, καθώς η εξίσωση που περιγράφει το σύστημα είναι μη γραμμική (όρος  $e^x$ ). Η επίλυση γίνεται με την αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson. [35]

### **3.2 Δημιουργία μοντέλου για το φωτοβολταϊκό στο Matlab**

Για να συμπεριλάβουμε στο μικροδίκτυο που θα κατασκευάσουμε, ένα Φ/Β σύστημα, πρέπει πρώτα να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο που να «μιμείται» τη συμπεριφορά ενός πραγματικού φωτοβολταϊκού. Η μοντελοποίηση αυτή έχει υλοποιηθεί στην διπλωματική [36], και εμείς απλά χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο του Φ/Β συστήματος και το εντάξαμε στο μικροδίκτυο μας.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήσαμε το πακέτο Simulink του Matlab. Το Matlab είναι ένα ευρέως διαδεδομένο εργαλείο στον ακαδημαϊκό, τον ερευνητικό και το βιομηχανικό τομέα για εφαρμογές που αφορούν μηχανικούς, φυσικούς, οικονομολόγους και άλλους. Για να τρέξει κανείς το μοντέλο του Φ/Β στο Simulink που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, είναι αναγκαίο να εκτελέσει πρώτα έναν αλγόριθμο(script) για τον υπολογισμό των αντιστάσεων  $R_s$  και  $R_p$ . Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων που λαμβάνονται από το φύλλο δεδομένων(datasheet) του φωτοβολταϊκού. Το μοντέλο είναι δυναμικό και μπορεί να υλοποιηθεί για οποιοδήποτε φωτοβολταϊκό ενδιαφερόμαστε, αρκεί φυσικά να περάσουμε τα στοιχεία του στον κώδικα. Από εκεί υπολογίζονται με την αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson οι τιμές των  $R_s$ ,  $R_p$  με βάση τις θεωρητικές σχέσεις που αναφέραμε στην παραπάνω ανάλυση.

Όπως, δείχνει η επόμενη εικόνα το μοντέλο του Φ/Β δέχεται ως εισόδους την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (G) και τη θερμοκρασία (T) και αποδίδει στην έξοδο τάση και ρεύμα. Το Φ/Β συνδέεται με έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα, ο οποίος ελέγχεται από έναν ελεγκτή. Τα δύο αυτά στοιχεία θα αναλύσουμε ακολούθως.



*Εικόνα 3.5: Το υποσύστημα του Φ/Β που θα συνδεθεί στο μικροδίκτυο*

### **3.3 Σύνδεση του φωτοβολταϊκού στο μικροδίκτυο**

Μία φωτοβολταϊκή συστοιχία, προκειμένου να συνδεθεί σε ένα δίκτυο, χρειάζεται μια διεπαφή. Δηλαδή, μία διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος ικανή να επιτελέσει δύο σκοπούς. Πρωτίστως, να εφαρμόσει κατάλληλη τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού συστήματος, μιας και το φωτοβολταϊκό δεν μπορεί μόνο του να δημιουργήσει τάση. Δευτερευόντως, η εν λόγω ηλεκτρονική διεπαφή οφείλει να μετατρέψει την τάση των Φ/Β στη μορφή που χρησιμοποιεί το δίκτυο και αντίστροφα. Στην πιο συχνή περίπτωση διασύνδεσης μιας Φ/Β εγκατάστασης σε κάποιο ηλεκτρικό σύστημα, απαιτείται μετατροπή από συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση. Αυτή τη λειτουργία εκτελεί ένας αντιστροφέας, πιο γνωστός με τον όρο inverter.

Στη δική μας περίπτωση, αντίθετα, μας ενδιαφέρει η σύνδεση του Φ/Β συστήματος σε ένα dc μικροδίκτυο. Άρα, χρειαζόμαστε μία διαφορετική διάταξη η οποία, απλά θα ανυψώνει την τάση των ακροδεκτών της Φ/Β εγκατάστασης στο επίπεδο της τάσης του κοινού dc ζυγού του μικροδικτύου. Αυτή η διάταξη ονομάζεται μετατροπέας dc-dc. Βασική λειτουργία του συγκεκριμένου μετατροπέα θα είναι ο έλεγχος της τάσης που εμφανίζεται στα άκρα της Φ/Β συστοιχίας, ώστε αυτή να παράγει τη μέγιστη ισχύ για τις τρέχουσες συνθήκες θερμοκρασίας και ηλιοφάνειας. Περισσότερα θα εξηγηθούν σε επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου.

#### **3.3.1 Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή(dc-dc converters)**

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή ή ψαλιδιστές συνεχούς τάσης (DC Choppers) είναι τα κυκλώματα εκείνα τα οποία μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης σε πηγή συνεχούς τάσης άλλης τιμής και ορισμένες φορές και άλλης πολικότητας. Οι μετατροπείς dc-dc βρίσκουν εφαρμογές στις εξής περιοχές:

- ◆ 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, καθώς επίσης με διόδους και LC κυκλώματα. Οι προαναφερόμενοι ελεγχόμενοι ημιαγωγοί λειτουργούν ως διακόπτες και μπορούν να βρεθούν σε δύο καταστάσεις λειτουργίας, στην κατάσταση αγωγής ή την 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. Όταν ο παλμός οδήγησης γίνει μηδέν, τότε μεταβαίνουν στην κατάσταση αποκοπής. Για αυτό το λόγο καλούνται συχνά και ως ημιαγωγικοί διακόπτες. Στη συνέχεια, θα περιγράψουμε αναλυτικά το κύκλωμα που απαιτείται για τη σύνδεση του Φ/Β στο μικροδίκτυο[37].

### **3.3.2 Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης(dc-dc boost converter)**

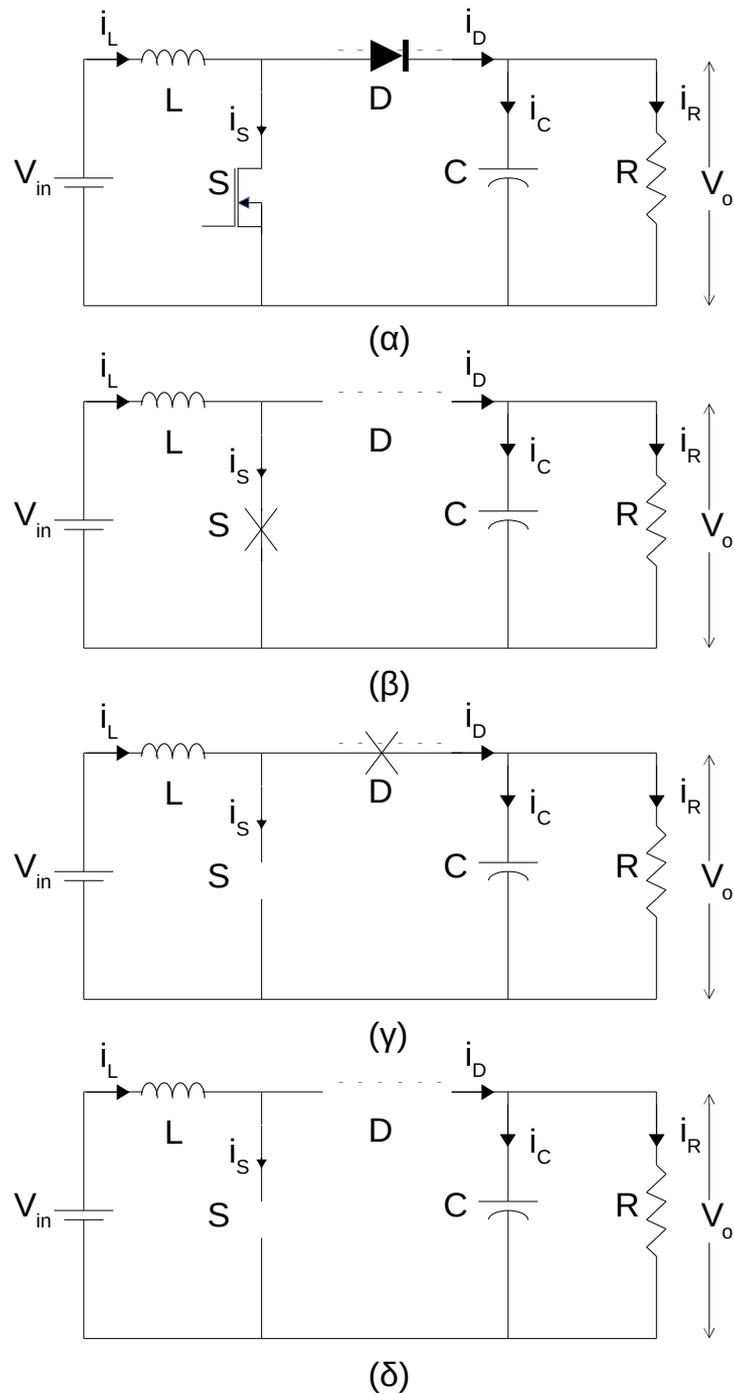
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος ενός μετατροπέα ανύψωσης. Μέσω του μετατροπέα αυτού η τάση εξόδου, η οποία είναι επίσης συνεχής, μπορεί να πάρει τιμές πάνω από την τάση τροφοδοσίας έως και τέσσερις φορές ανάλογα με την τιμή του πηνίου εισόδου και του βαθμού χρησιμοποίησης του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

**Φάση I:** 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 κατά τη φάση αυτή φαίνεται στο σχήμα (β) της εικόνας 3.6. 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 παύει 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 3.7. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, κατά την φάση αυτή λειτουργίας του κυκλώματος το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται και η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση εισόδου.

**Φάση II:** Κατά τη δεύτερη φάση, ο διακόπτης S δεν άγει, αλλά άγει η διάδος 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 στη σχήμα (γ) της εικόνας 3.6, ενώ οι κυματομορφές για συνεχές ρεύμα πηνίου φαίνονται στην εικόνα 3.7. Στη φάση αυτή λειτουργίας του το ρεύμα του πηνίου, αφού έχει αναπτύξει τη μέγιστη τιμή του στην προηγούμενη φάση, αρχίζει να μειώνεται. 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

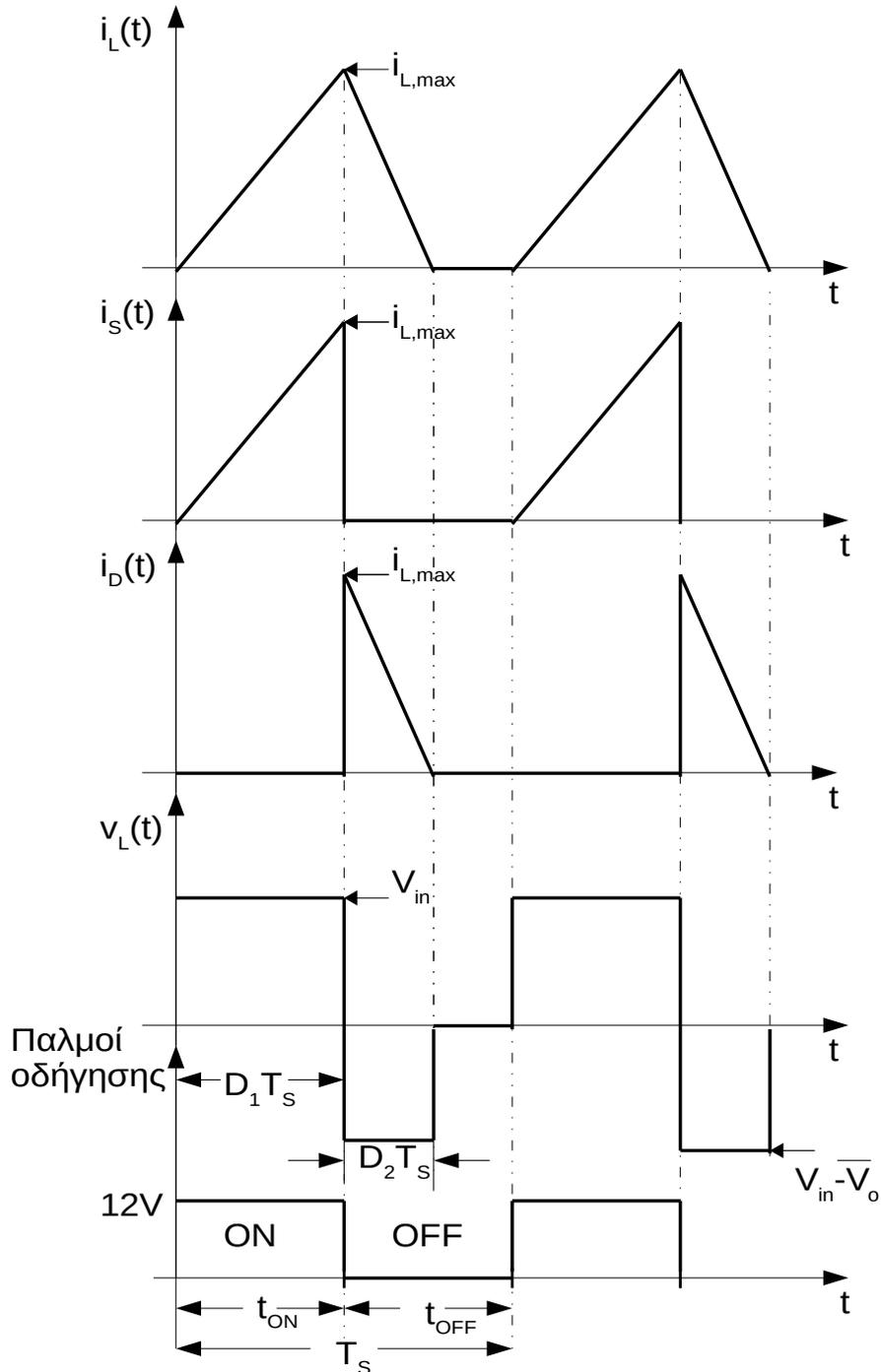
αυτή τελειώνει όταν το πηνίο αποφορτιστεί και το ρεύμα του πάει στο μηδέν με αποτέλεσμα και η διόδος D να σταματήσει να άγει.

**Φάση III:** 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 στο σχήμα (δ) της εικόνας 3.6. Το φορτίο



Εικόνα 3.6: Κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης [37]

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 3.7: Κυματομορφές μετατροπέα ανύψωσης όταν το ρεύμα πηνίου είναι συνεχές[37]*

Από τα ισοδύναμα κυκλώματα του μετατροπέα για κάθε φάση προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\text{τάση του πηνίου: } v_L(t) = \frac{L di_L(t)}{dt} \Rightarrow \begin{cases} V_L(t) = V_{in} \quad (3-4.1) & \text{όταν ο διακόπτης άγει} \\ V_L(t) = V_{in} - V_o \quad (3-4.2) & \text{όταν δεν άγει} \end{cases}$$

τάση του πυκνωτή:

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_{t_1}^t i_C(t) dt + v_C(t_1) \quad (3-4.3)$$

$$\text{ρεύμα πυκνωτή: } i_C(t) = i_D(t) - i_o(t) \quad (3-4.4)$$

$$\text{ρεύμα διόδου: } i_D(t) = C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{R} \rightarrow i_D(t) = \left( CS + \frac{1}{R} \right) v_C \quad (3-4.5)$$

$$\text{ρεύμα πηνίου: } \begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{t_1}^t V_{in} \cdot dt + i_L(t_1) \quad (3-4.6) & \text{ο διακόπτης άγει} \\ i_L(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_{t_1}^t (V_{in} - v_o(t)) \cdot dt + i_L(t_1) \quad (3-4.7) & \text{δεν άγει} \end{cases}$$

#### Ανάλυση του μετατροπέα όταν το ρεύμα του πηνίου είναι συνεχές

Όταν το ρεύμα του πηνίου του μετατροπέα ανύψωσης είναι σταθερό και έχει μια τιμή  $I_L$  τότε προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις από τις παραπάνω κυματομορφές:

$$I_{L,max} = I_L + \Delta I_L / 2 \quad (3-4.8) \quad \text{μέγιστο ρεύμα πηνίου και } I_L \text{ η μέση τιμή}$$

$$I_{L,min} = I_L - \Delta I_L / 2 \quad (3-4.9) \quad \text{ελάχιστο ρεύμα πηνίου}$$

$$\Delta I_L = I_{L,max} - I_{L,min} = (V_{in} \cdot t_{ON}) / L \quad (3-4.10) \quad \text{πλάτος κυμάτωσης ρεύματος πηνίου}$$

Η συνθήκη για να είναι συνεχές το ρεύμα πηνίου είναι:

$$I_{L,max} > \Delta I_L / 2 \quad (3-4.11)$$

Η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο όταν άγει ο διακόπτης S δίνεται από τη σχέση:

$$W_I = V_{in} I_L t_{on}$$

Επίσης, θεωρώντας ότι η τάση εξόδου είναι σταθερή με τιμή  $V_o$  τότε η ενέργεια που απελευθερώνεται από το πηνίο όταν δεν άγει ο διακόπτης, αλλά η δίοδος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_o = (V_{in} - V_o) I_L t_{off}$$

Για έναν μετατροπέα, ο οποίος δεν παρουσιάζει απώλειες, το άθροισμα των δύο παραπάνω ενεργειών πρέπει ιδανικά να ισούται με μηδέν ( $W_1 + W_o = 0$ ). Επομένως,

$$V_{in} I_L t_{on} = - (V_{in} - V_o) I_L t_{off} \rightarrow$$

$$V_o = V_{in} (t_{on} + t_{off}) / t_{off} = V_{in} T_s / (T_s - t_{ON}) \rightarrow$$

$$\boxed{V_o = V_{in} / (1 - D)} \quad (3-4.12)$$

όπου

$D$  = βαθμός χρησιμοποίησης του διακόπτη =  $t_{on} / T_s$

$T_s$  = διακοπτική περίοδος =  $t_{on} + t_{off}$

$V_{in}$  = τάση εισόδου

$t_{on}$  = χρόνος αγωγής διακόπτη

$t_{off}$  = χρόνος αποκοπής διακόπτη

Όπως, διαπιστώνεται από την παραπάνω σχέση (3-4.12) για τον μετατροπέα, κρατώντας τη διακοπτική συχνότητα σταθερή, αυξομειώνοντας το χρόνο αγωγής του διακόπτη (και κατά συνέπεια το  $D$ ) μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος της τάσης εξόδου. Για  $t_{ON} = 0$  τότε  $D = 0$  και επομένως η τάση εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης παίρνει την ελάχιστη τιμή που είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας. Όσο μεγαλύτερος γίνεται ο χρόνος  $t_{ON}$  τόσο μικρότερος γίνεται ο βαθμός χρησιμοποίησης  $D$  με αποτέλεσμα να γίνεται μεγαλύτερη η τάση εξόδου με βάση τον τύπο.

Σχεδιάζοντας έναν μετατροπέα ανύψωσης για μία συγκεκριμένη πηγή, όπως το Φ/Β μας, έχουμε ως στόχο αυτός να αποδίδει συνεχές ρεύμα εξόδου στις τιμές τάσης που θα λειτουργεί η διάταξη. Για να το εξασφαλίσουμε αυτό πρέπει να επιλέξουμε σωστές τιμές για το πηνίο και τον πυκνωτή. Οι εξισώσεις που δίνουν τις τιμές αυτές είναι:

$$\boxed{L_{min} = \frac{RD(1-D)^2}{2f_s}} \quad (3-5)$$

$$\boxed{C_{min} = \frac{I_{o_{max}} D_{max}}{f_s V_{C_{pp}}} = \frac{V_o D_{max}}{f_s R_{L_{min}} V_{C_{pp}}}} \quad (3-6)$$

όπου

$D_{max}$  = μέγιστος βαθμός χρησιμοποίησης του διακόπτη

$I_{o_{max}}$  = μέγιστο ρεύμα εξόδου μετατροπέα

$V_{C_{pp}}$  = η μέγιστη από κορυφή σε κορυφή AC συνιστώσα της τάσης

$V_o$  = τάση εξόδου

$R_{L_{min}}$  = ελάχιστη αντίσταση φορτίου

### 3.3.3 Σχεδιασμός μετατροπέα για το Φ/Β σύστημα του μικροδικτύου

Στο μικροδίκτυο που θα προσομοιάσουμε θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο μίας Φ/Β εγκατάστασης μέγιστης ισχύος εξόδου περίπου 1200 W, η οποία θα λειτουργεί βέλτιστα σε τάση 160 με 170 volt. Το μοντέλο της συγκεκριμένης εγκατάστασης το περιγράψαμε σε προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου. Με βάση την παραπάνω ανάλυση θα επιλέξουμε τα στοιχεία του μετατροπέα ανύψωσης μέσω του οποίου, θα συνδέσουμε το Φ/Β σύστημα στον dc ζυγό του μικροδικτύου.

Στην είσοδο του μετατροπέα θα έχουμε τάση ελάχιστης τιμής  $V_{min}=125V$  και μέγιστης  $V_{max}=195V$  (για λόγους ασφάλειας ορίζουμε λίγο παραπάνω από τα 188.5 volt, δηλαδή την τάση ανοιχτοκύκλωσης του φωτοβολταϊκού). Ο μετατροπέας θα πρέπει να λειτουργεί σε κατάσταση συνεχούς αγωγής και να δίνει στην έξοδο  $V_{out}=380V$ , την ονομαστική τάση του μικροδικτύου.

Επίσης θεωρούνται ως δεδομένα για τους υπολογισμούς ότι  $I_{Omin}=5\% I_{Omax}$ ,  $f_s=5kHz$  και  $V_r/V_{out} < 1\%$ . Τα 5 kHz είναι μία διακοπτική συχνότητα, στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά ο μετατροπέας. Ο μετατροπέας θα παρουσιάζει μέγιστη ισχύ εισόδου  $P_{in,max}=1,2kW$ . Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας δεν παρουσιάζει απώλειες στη μέγιστη ισχύ έχουμε  $P_{out,max} = 1,2 \cdot 1 = 1,2kW$ . Άρα, το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα εξόδου θα είναι:

$$I_{Omax} = \frac{P_{Omax}}{V_{out}} = 3.158 \text{ A} \quad I_{Omin} = 0.05 \cdot I_{Omax} = 0.158 \text{ A}$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση αντίστοιχα είναι:

$$R_{Lmax} = \frac{V_{out}}{I_{Omin}} = 2405 \text{ } \Omega \text{hm} \quad R_{Lmin} = \frac{V_{out}}{I_{Omax}} = 120.33 \text{ } \Omega \text{hm}$$

Γνωρίζοντας την τάση εισόδου και εξόδου μπορεί να βρεθεί ο βαθμός χρησιμοποίησης του μετατροπέα ανύψωσης. Έτσι, υπολογίζεται και το εύρος τιμών του D που είναι:

$$D_{min} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{Imax}}} = 0.487$$

$$D_{norm} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{Inorm}}} = 0.596$$

$$D_{max} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{Imin}}} = 0.671$$

Οι τιμές είναι αποδεκτές καθώς ο βαθμός χρησιμοποίησης δέχεται τιμές  $0 < D < 1$ . Η επιλογή της τιμής του πηνίου θα γίνει με χρήση του τύπου που έχουμε προαναφέρει.

$$L_{\min} = \frac{R_{\max} D_{\min} (1 - D_{\min})^2}{2 f_s} = 30.8 \text{ mH}$$

Οπότε για τη διάταξή μας επιλέγουμε τιμή  $L_{\min} > 30.8 \text{ mH}$ . Στο Matlab /Simulink οι προσομοιώσεις θα γίνουν για  $L = 50 \text{ mH}$ . Για να βρούμε τον πυκνωτή εξόδου έχουμε ως δεδομένο ότι η κυμάτωση της τάσης είναι 1%. Άρα,

$$V_{C_{pp}} \approx V_r - V_{r_{C_{pp}}}$$

$$V_r = 0.01 \cdot V_{out} = 3.8 \text{ volt}$$

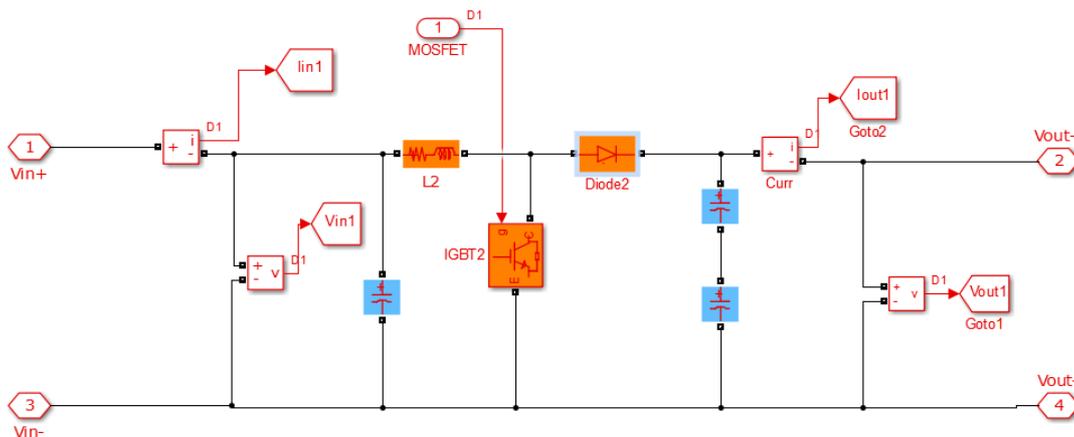
$$V_{r_{C_{pp}}} = \frac{V_r}{2} = 1.9 \text{ volt}$$

Άρα, η τιμή του πυκνωτή από τον τύπο που αναφέραμε στην ανάλυση προηγουμένως πρέπει να είναι:

$$C_{\min} = \frac{I_{O_{\max}} \cdot D_{\max}}{f_s \cdot V_{C_{pp}}} = \frac{V_{out} \cdot D_{\max}}{R_{L_{\min}} \cdot f_s \cdot V_{C_{pp}}} = 223.05 \mu\text{F}$$

Οπότε, για τη διάταξη επιλέγουμε τιμή  $C_{\min} > 223 \mu\text{F}$ . Στο Matlab /Simulink οι προσομοιώσεις γίνονται για  $C = 300 \mu\text{F}$ . Βάζουμε δύο πυκνωτές σε σειρά, άρα ο καθένας έχει διπλάσια τιμή. Έμεινε μόνο να επιλέξουμε το ημιαγωγό στοιχείο και τη διάοδο. Χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα της διάόδου και του IGBT που είχε το Simulink με προεπιλεγμένες τιμές.

Η τελική διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση της Φ/Β συστοιχίας στο μικροδίκτυο φαίνεται παρακάτω. Στην είσοδο του μετατροπέα, τοποθετήθηκε κι ένας πυκνωτής για την καλύτερη σύνδεση με το Φ/Β. Η είσοδος του IGBT δέχεται τους παλμούς οδήγησης από έναν ελεγκτή που θα εξετάσουμε στη συνέχεια.



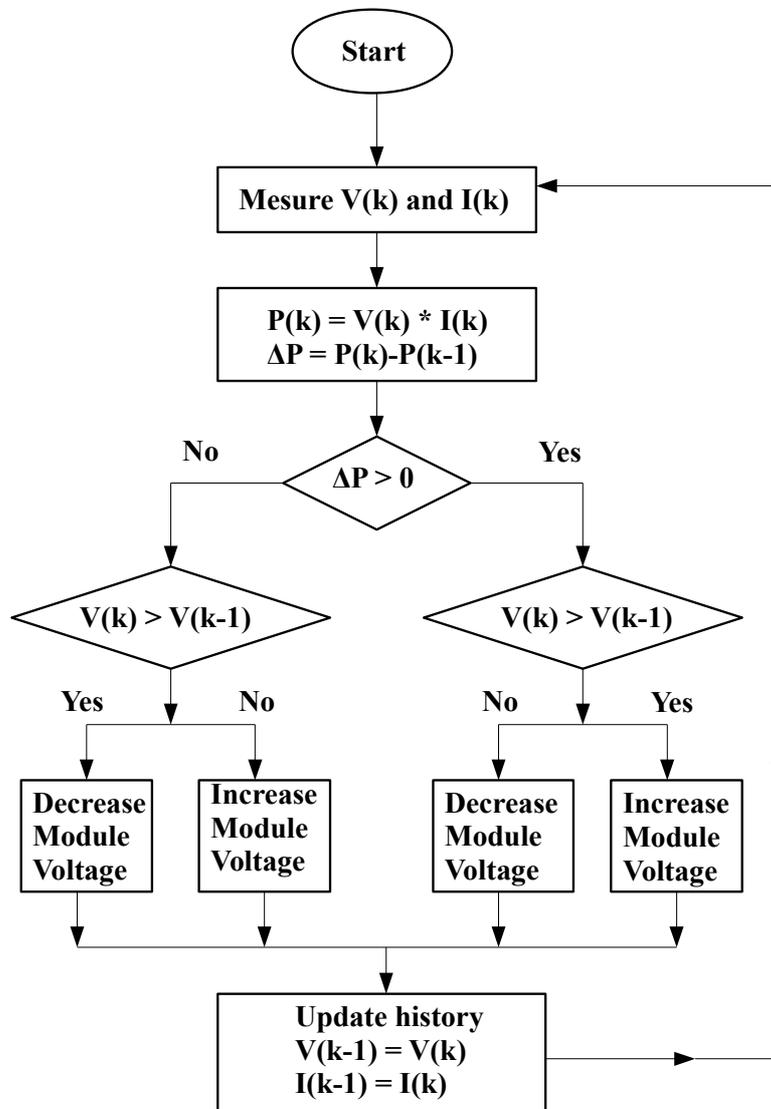
Εικόνα 3.8: Το κύκλωμα του μετατροπέα στο Simulink

### 3.4 Έλεγχος της Φ/Β συστοιχίας με τον αλγόριθμο MPPT

#### 3.4.1 Ανίχνευση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο βαθμός απόδοσης της Φ/Β γεννήτριας κυμαίνεται στα επίπεδα του 15–17%. Για τον λόγο αυτό είναι επιθυμητό, αν όχι απαραίτητο, το σημείο λειτουργίας να ταυτίζεται με αυτό της μέγιστης ισχύος για τις δεδομένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που επικρατούν κάθε στιγμή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του Maximum Power Point Tracker ο οποίος, από κυκλωματικής απόψεως, αναπροσαρμόζει διαρκώς την τιμή της αντίστασης φορτίου, ώστε να επιτύχει το επιθυμητό ζεύγος τάσης–ρεύματος.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται και έχουν προταθεί για τον σκοπό αυτό είναι αρκετοί, όπως πλούσια είναι και η έρευνα πάνω στη βελτιστοποίηση του MPPT. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία από τις πιο συνηθισμένες τεχνικές για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος, η οποία μοντελοποιείται στη συνέχεια στο Simulink του Matlab.



Εικόνα 3.9: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου διαταραχής- παρατήρησης

### 3.4.2 Αλγόριθμος Διαταραχής και Παρατήρησης(Perturb and Observe)

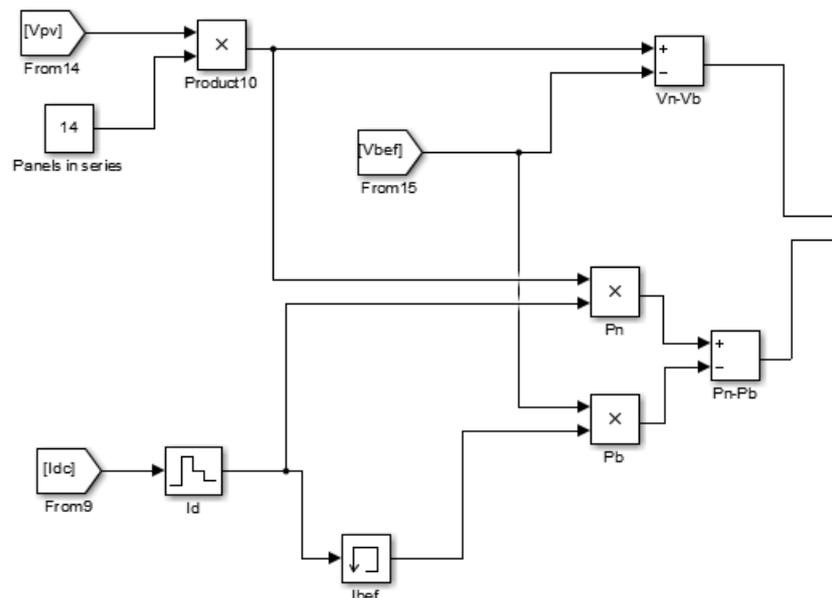
Ο αλγόριθμος Perturb and Observe, γνωστός και με την ονομασία Hill Climbing, είναι ένας από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους για την ανίχνευση του σημείου μέγιστης ισχύος. Όπως μαρτυράει και η ονομασία, η μέθοδος αυτή διαταράσσει το σύστημα είτε αυξάνοντας, είτε μειώνοντας την τάση λειτουργίας του. Ως αποτέλεσμα παρουσιάζεται μεταβολή στο ρεύμα εξόδου του συστήματος, άρα και στην ροή ισχύος. Αν η διαταραχή οδηγεί σε αύξηση της ισχύος εξόδου, τότε επιχειρείται νέα προς την ίδια κατεύθυνση, ενώ αν η ισχύς μειώθηκε σε σχέση με το προηγούμενο βήμα, η κατεύθυνση της διαταραχής αλλάζει. Η υλοποίηση του αλγορίθμου φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα ροής(Εικόνα 3.9).

Η τάση λειτουργίας μεταβάλλεται κατά ένα σταθερό βήμα σε κάθε κύκλο, κάτι που μας δείχνει ότι το σύστημα ταλαντώνεται εν τέλει γύρω από το σημείο μέγιστης ισχύος. Το μέγεθος της ταλάντωσης εξαρτάται από το μέγεθος της σταθερής διαταραχής στην οποία υποβάλλεται η τάση.

Εδώ υπεισέρχεται ένα είδος συμβιβασμού που πρέπει να γίνει καθώς μικρό μέγεθος διαταραχής σημαίνει μικρού πλάτους ταλάντωση (λιγότερες απώλειες ισχύος) αλλά και περισσότερο απαιτούμενο χρόνο για την ανίχνευση του επιθυμητού σημείου. Η τιμή του μεγέθους αυτού θα πρέπει να επιλέγεται για κάθε σύστημα ξεχωριστά. [38]

### 3.4.3 Σχεδιασμός του μοντέλου του MPPT στο Matlab

Ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε παραπάνω, δηλαδή ο αλγόριθμος της Διαταραχής και Παρατήρησης, σχεδιάστηκε στο Simulink του Matlab, ώστε να ελέγχει τον μετατροπέα ανύψωσης της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Ο MPPT βρίσκεται ενδιάμεσα του Φ/Β πεδίου και της διάταξης ελέγχου και σκοπό έχει να κάνει όσο το δυνατόν πιο αποδοτικό το σύστημα κάθε στιγμή με τη λειτουργία του στο σημείο μέγιστης ισχύος. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η ακριβής υλοποίηση στο Simulink.



*Εικόνα 3.10: Λογικό κύκλωμα υλοποίησης αλγορίθμου MPPT(1)*

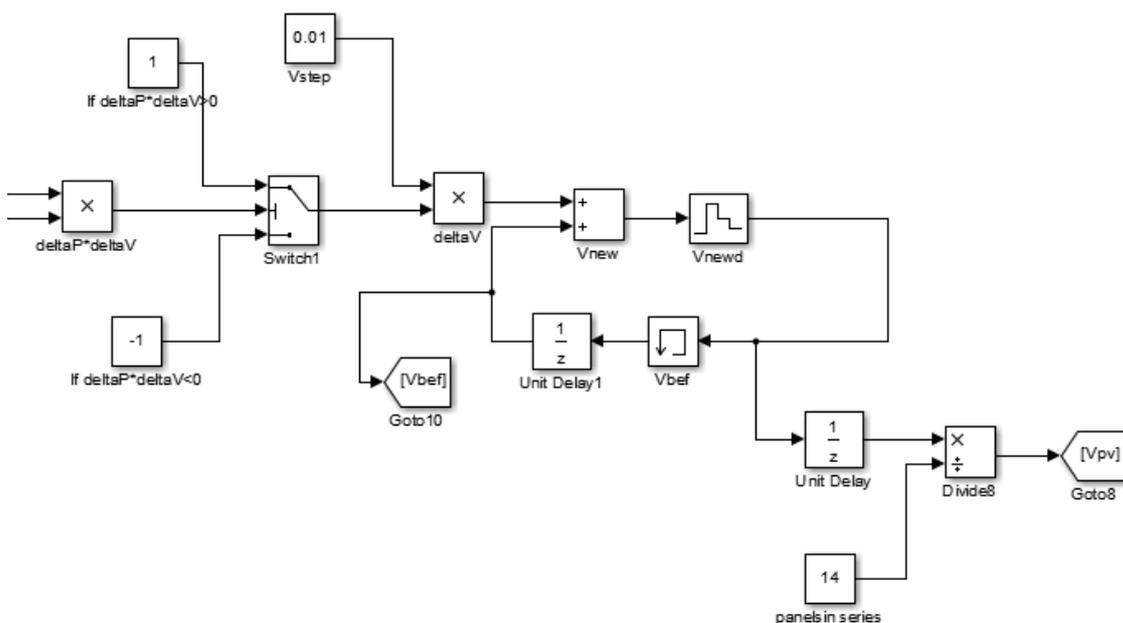
Στο παραπάνω μοντέλο του Simulink παρατηρούμε το σήμα της τάσης  $V_{pv}$ , το οποίο από την έξοδο ξαναδίνεται στην είσοδο, ώστε να υπάρχει η επαναληψιμότητα του αλγορίθμου. Εκτός βέβαια από τον mppt το σήμα της τάσης δίνεται και στην ελεγχόμενη από αυτό πηγή τάσης του ισοδύναμου κυκλώματος του φωτοβολταϊκού, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Το ρεύμα που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη τιμή της τάσης υπολογίζεται και δίνεται και αυτό σαν είσοδος στο mppt. Για να γίνει εφικτή η σύγκριση της τρέχουσας τιμής της ισχύος με την προηγούμενη, απαιτείται η χρήση και άλλων blocks του Simulink τα οποία φαίνονται στα παραπάνω σχήματα.

Τα συνεχή σήματα ρεύματος και τάσης μετατρέπονται σε διακριτά, ώστε να είναι συγκεκριμένη η τιμή τους για κάθε βήμα. Έπειτα ένα memory block διαβάζει την τρέχουσα τιμή και τη δίνει στην έξοδο στο επόμενο βήμα. Ο χρόνος δειγματοληψίας ( $T_s$ ) για τα blocks αυτά είναι ο ίδιος με τον αντίστοιχο του solver (που ορίζεται στο powergui).

Σε κάθε βήμα γνωρίζουμε την τρέχουσα και την προηγούμενη τιμή της ισχύος. Με βάση το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου (Εικόνα 3.9) και με τη χρήση switch για το λογικό έλεγχο των δεδομένων, επιλέγεται η αύξηση ή η μείωση της τάσης στο επόμενο βήμα κατά μία συγκεκριμένη τιμή που εδώ επιλέχθηκε ίση με 0,01.

Τα block καθυστέρησης (unit delay) χρησιμοποιήθηκαν για να είναι δυνατή η επίλυση του algebraic loop από το Matlab και δεν έχουν άλλο ρόλο. Κάτι σημαντικό είναι ο πολλαπλασιασμός και η διαίρεση του σήματος της τάσης με τον αριθμό των φωτοβολταϊκών που είναι σε σειρά. Αυτό έγινε γιατί ο mppt αναλαμβάνει την έξοδο από ολόκληρο το Φ/Β πεδίο και όχι από ένα και μόνο πάνελ. Στην περίπτωση που έχουμε τα πάνελ σε σειρά (θεωρώντας ότι είναι όμοια μεταξύ τους) το ρεύμα εξόδου δεν αλλάζει και η τάση είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων που συνεισφέρει το καθένα στην εγκατάσταση. Επειδή στη συνέχεια το σήμα της τάσης πρέπει να δοθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού, διαιρείται προηγουμένως με το πλήθος των πάνελ που είναι σε σειρά.



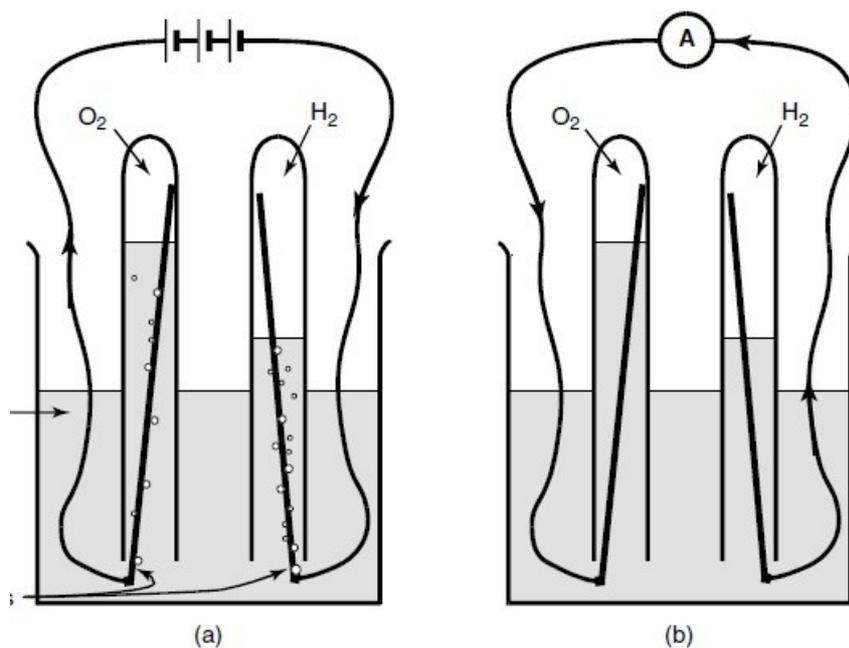
Εικόνα 3.11: Λογικό κύκλωμα υλοποίησης αλγορίθμου MPPT(2)

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Κυψέλη καυσίμου(fuel cell)

#### 4.1 Θεωρητικό μοντέλο fuel cell

Η βασική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου είναι εξαιρετικά απλή. Η πρώτη επίδειξη της εν λόγω διάταξης έγινε από τον δικηγόρο και επιστήμονα William Grove το 1839. Στο σχήμα 4.1(a), το νερό υφίσταται ηλεκτρόλυση, καθώς διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο. Αν η τροφοδοσία αντικατασταθεί με ένα αμπερόμετρο, όπως στο σχήμα 4.1(b), θα παρατήσουμε ένα μικρό ρεύμα να διαρρέει το κύκλωμα. Δηλαδή, η ηλεκτρόλυση του νερού θα αντιστραφεί και θα έχουμε επανένωση του υδρογόνου και του οξυγόνου σε νερό και παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος[39].



*Εικόνα 4.1: Πείραμα επίδειξης της βασικής αρχής των fuel cell[39]*

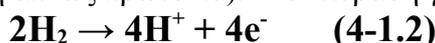
Ένας απλός τρόπος να δούμε την κυψέλη καυσίμου είναι να πούμε ότι το υδρογόνο «καίγεται» στην παρακάτω απλή χημική αντίδραση:



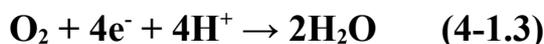
Ωστόσο, αντί για απελευθέρωση θερμικής ενέργειας, από την εν λόγω «καύση» παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Το πείραμα που φαίνεται στα παραπάνω σχήματα είναι μία πολύ καλή επίδειξη της βασικής αρχής της κυψέλης καυσίμου, αλλά τα ρεύματα που παράγονται είναι πολύ μικρά. Οι κύριοι λόγοι που περιορίζουν το ρεύμα είναι: (α) η χαμηλή «επιφάνεια επαφής» μεταξύ αερίου, ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη. (β) η μεγάλη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, καθώς ο ηλεκτρολύτης αντιστέκεται στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος.

Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, τα ηλεκτρόδια γίνονται συνήθως επίπεδα, με ένα λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Η δομή του ηλεκτροδίου είναι πορώδης, έτσι ώστε τόσο ο ηλεκτρολύτης από τη μία πλευρά όσο και το αέριο από την άλλη να μπορούν να το διαπεράσουν. Αυτό γίνεται για να δοθεί η μέγιστη δυνατή επαφή μεταξύ του ηλεκτροδίου, του ηλεκτρολύτη, και του αερίου.

Ωστόσο, για να καταλάβουμε πώς η αντίδραση μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου παράγει ηλεκτρικό ρεύμα, και από που προέρχονται τα ηλεκτρόνια, πρέπει να εξετάσουμε τις χωριστές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε κάθε ηλεκτρόδιο. Αυτές οι σημαντικές λεπτομέρειες διαφέρουν για διαφορετικούς τύπους κυψελών καυσίμου, αλλά μπορούμε να θεωρήσουμε μία διάταξη βασισμένη σε ηλεκτρολύτη οξέος, δηλαδή τον πιο απλό και ακόμα πιο κοινό τύπο κυψέλης καυσίμου. Στην άνοδο ενός fuel cell ηλεκτρολύτη οξέος, το αέριο υδρογόνο ιονίζεται, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και δημιουργώντας ιόντα  $H^+$  (ή απλώς πρωτόνια). Η αντίδραση γράφεται:

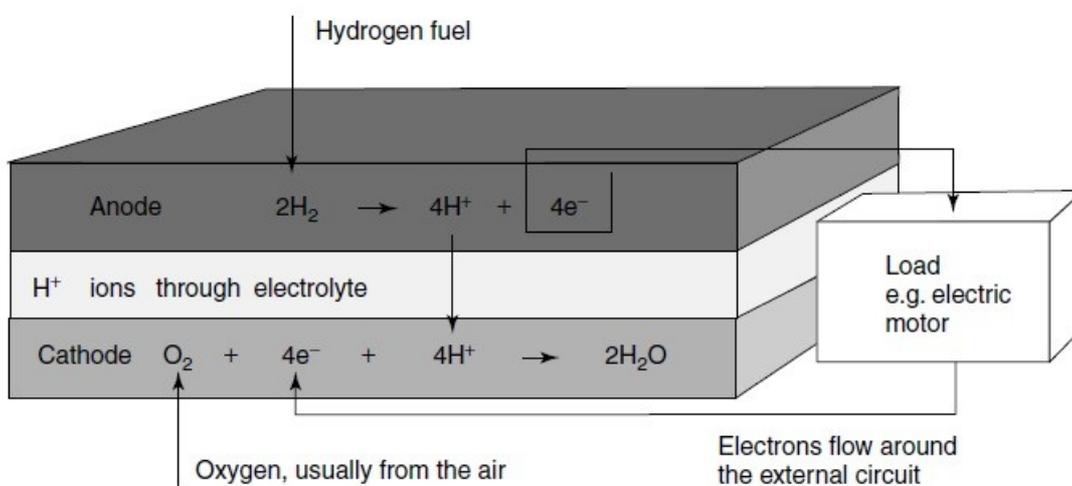


Αυτή η αντίδραση απελευθερώνει ενέργεια. Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από το ηλεκτρόδιο, και ιόντα  $H^+$  από τον ηλεκτρολύτη, για να σχηματίσει νερό.



Προφανώς, για να πραγματοποιούνται συνεχώς οι δύο παραπάνω αντιδράσεις, τα ηλεκτρόνια που παράγονται στην άνοδο πρέπει να οδηγούνται μέσα από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα στην κάθοδο. Επίσης, τα ιόντα υδρογόνου πρέπει να περνάνε μέσα από τον ηλεκτρολύτη. Ένα οξύ είναι ένα ρευστό με ελεύθερα ιόντα  $H^+$ , και έτσι εξυπηρετεί το σκοπό αυτό πολύ καλά. Ορισμένα πολυμερή μπορούν επίσης να κατασκευαστούν, ώστε να περιέχουν κινητά ιόντα  $H^+$ . Τα υλικά αυτά ονομάζονται μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων, εφόσον ένα ιόν  $H^+$  είναι ένα πρωτόνιο.

Συγκρίνοντας τις δύο παραπάνω χημικές εξισώσεις μπορούμε να δούμε ότι δύο μόρια υδρογόνου θα απαιτούνται για κάθε μόριο οξυγόνου, εάν το σύστημα πρόκειται να διατηρείται σε ισορροπία. Θα πρέπει επίσης, να σημειωθεί ότι ο ηλεκτρολύτης πρέπει να επιτρέπει μόνο στα ιόντα  $H^+$  να διέλθουν μέσα από αυτό, και όχι στα ηλεκτρόνια. Σε αντίθετη περίπτωση, όλα τα ηλεκτρόνια θα περνούν από τον ηλεκτρολύτη, και όχι διαμέσου του εξωτερικού κυκλώματος, και έτσι όλη η ενέργεια θα χάνεται.

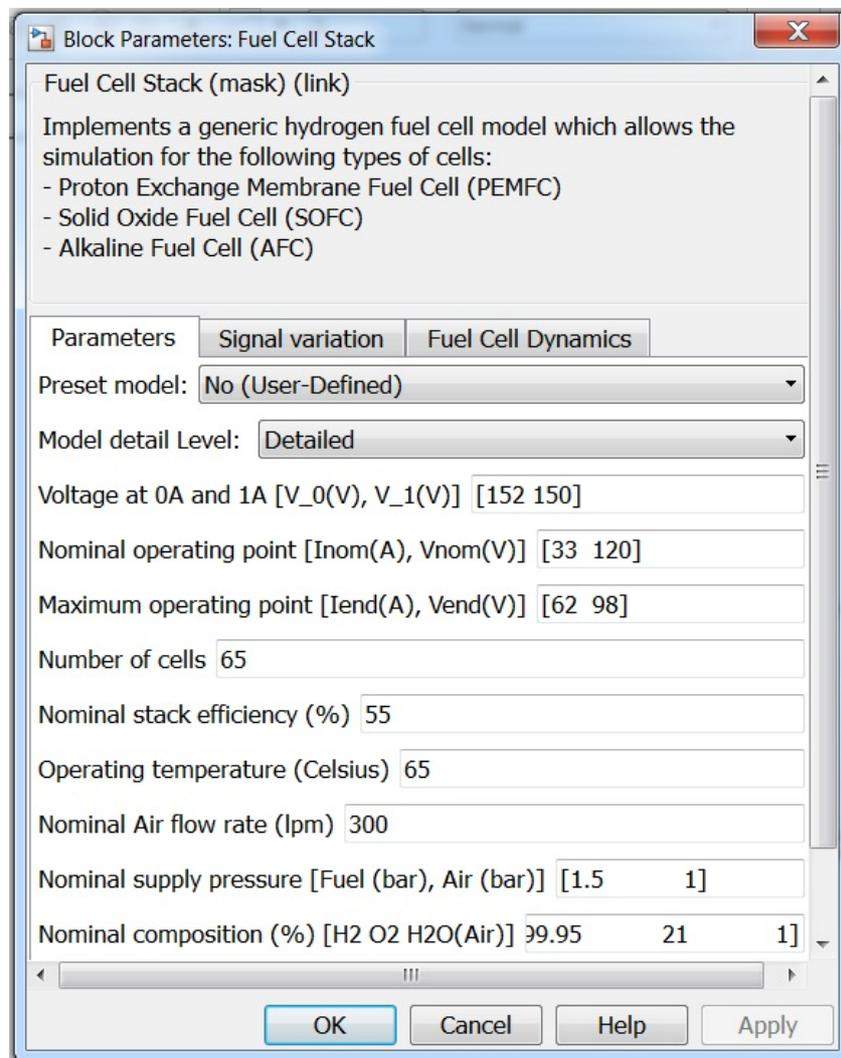


*Εικόνα 4.2: Οι χημικές αντιδράσεις στα δύο ηλεκτρόδια και η ροή φορτίου σε μία κυψέλη καυσίμου ηλεκτρολύτη οξέος. [39]*

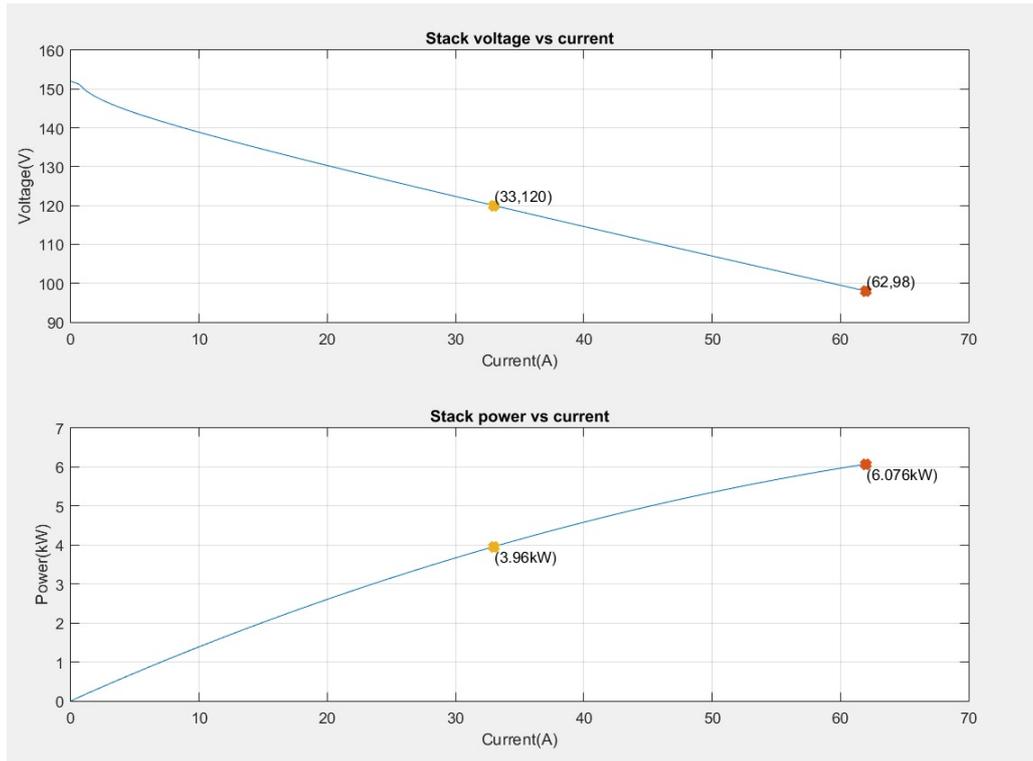
## 4.2 Μοντέλο fuel cell στο Matlab/Simulink

Το Simulink έχει έτοιμο μοντέλο για την προσομοίωση ενός fuel cell, επομένως δε θα χρειαστεί να δημιουργήσουμε εξ αρχής ένα καινούριο μοντέλο για να εντάξουμε την κυψέλη καυσίμου στο μικροδίκτυο μας. Στο μοντέλο του λογισμικού μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε την τάση και το ρεύμα κατά την ονομαστική λειτουργία της διάταξης, καθώς και στο σημείο μέγιστης λειτουργίας. Η συμπεριφορά του στοιχείου στα ενδιάμεσα σημεία λειτουργίας καθορίζεται από την μοντελοποίηση που έχει γίνει για το fuel cell.

Εμείς επιλέξαμε να δημιουργήσουμε ένα fuel cell μέγιστης ισχύος 6 kw περίπου, καθώς και το μέγιστο φορτίο του μικροδικτύου μας θα είναι σε αυτό το επίπεδο. Στόχος του σχεδιασμού είναι η κυψέλη καυσίμου να μπορεί να εξυπηρετήσει μόνη της ολόκληρο το φορτίο σε κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας. Η ονομαστική τάση του fuel cell επιλέχθηκε στα 120 volt, ενώ στη μέγιστη ισχύ παραγωγής στα 98 volt. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το παράθυρο καθορισμού του μοντέλου.

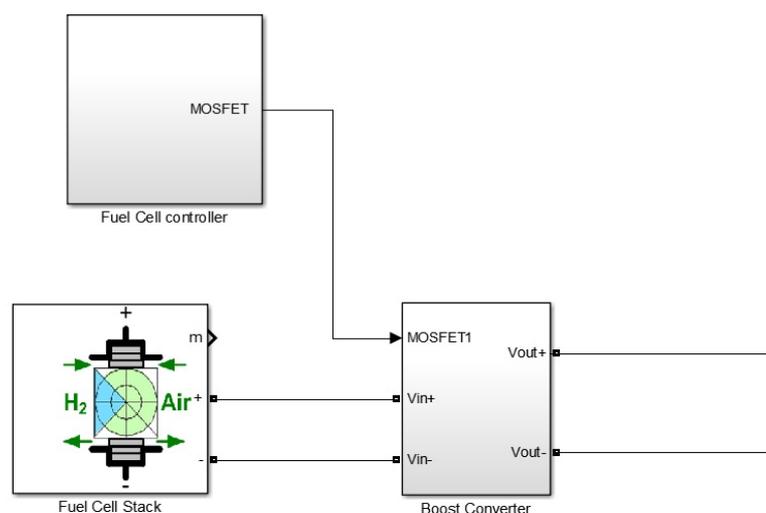


Εικόνα 4.3: Παράθυρο καθορισμού παραμέτρων μοντέλου fuel cell



*Εικόνα 4.4: Χαρακτηριστικές I-V και I-P του fuel cell*

Όλες οι συσκευές κυψέλης καυσίμου υδρογόνου εκ κατασκευής έχουν μία φθίνουσα χαρακτηριστική I-V. Δηλαδή, όσο αυξάνει η ισχύς εξόδου, τόσο μειώνεται η τάση. Αυτό είναι βασικό στοιχείο για τον έλεγχο της ισχύος που παράγει το fuel cell. Με μία διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος, αντίστοιχη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στη Φ/Β συστοιχία, μπορούμε να ελέγξουμε την τάση που εμφανίζεται στα άκρα της διάταξης. Στην εικόνα 4.4 φαίνονται οι χαρακτηριστικές του μοντέλου, όπως παράχθηκαν από το Simulink, ενώ παρακάτω φαίνεται η κυψέλη καυσίμου όπως θα συνδεθεί στο μικροδίκτυο με την ηλεκτρονική διεπαφή και τον τοπικό ελεγκτή της.



*Εικόνα 4.5: Το σύστημα fuel cell όπως θα συνδεθεί στο μικροδίκτυο*

### 4.3 Σύνδεση του fuel cell στο μικροδίκτυο

Όπως και στην περίπτωση του Φ/Β συστήματος, έτσι και με το fuel cell δε μπορούμε απλώς να το συνδέσουμε στον κοινό ζυγό dc του μικροδικτύου. Κι αυτό, διότι η τάση της κυψέλης καυσίμου είναι διαφορετική από τα 380 volt λειτουργίας. Επίσης, σκοπεύουμε να ελέγχουμε το ρεύμα του fuel cell με στόχο το συνολικό έλεγχο του μικροδικτύου. Για τους δύο αυτούς λόγους απαιτείται μία διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος που θα ανυψώνει την τάση του fuel cell και θα δίνει δυνατότητα ελέγχου.

Αυτή η διάταξη είναι ο μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επομένως, ακολουθεί απλώς η διαστασιολόγηση του μετατροπέα για τα δεδομένα της κυψέλης καυσίμου. Ακολουθούν οι υπολογισμοί και τα παράθυρα ορισμού παραμέτρων στο Simulink.

### Σχεδιασμός μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης για το σύστημα fuel cell του μικροδικτύου

Στο μικροδίκτυο που θα προσομοιάσουμε θα χρησιμοποιήσουμε όπως αναφέραμε, ένα fuel cell μέγιστης ισχύος εξόδου 6076 W, η οποία θα λειτουργεί βέλτιστα σε τάση 120 volt.

Στην είσοδο του μετατροπέα θα έχουμε τάση ελάχιστης τιμής  $V_{min} = 95V$  και μέγιστης  $V_{max} = 160V$  (ορίζουμε λίγο παραπάνω από τα 152 volt μέγιστη τάση, και λίγο λιγότερο από τα 98 volt ελάχιστη τάση που δίνει το μοντέλο για να είμαστε βέβαιοι ότι ο μετατροπέας θα λειτουργεί σωστά κάθε στιγμή). Ο μετατροπέας θα πρέπει να λειτουργεί σε κατάσταση συνεχούς αγωγής και να δίνει στην έξοδο  $V_{out} = 380V$ , την ονομαστική τάση του μικροδικτύου.

Επίσης θεωρούνται ως δεδομένα για τους υπολογισμούς ότι  $I_{Omin} = 5\% I_{Omax}$ ,  $fs = 5kHz$  και  $Vr / V_{out} < 1\%$ . Τα 5 kHz είναι μία διακοπτική συχνότητα, στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά ο μετατροπέας. Ο μετατροπέας θα παρουσιάζει μέγιστη ισχύ εισόδου  $P_{in,max} = 6076 W$ . Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας δεν παρουσιάζει απώλειες στη μέγιστη ισχύ έχουμε  $P_{out,max} = 6076 * 1 = 6076 W$ .

Άρα, το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα εξόδου θα είναι:

$$I_{Omax} = \frac{P_{Omax}}{V_{out}} \approx 16 A \quad I_{Omin} = 0.05 \cdot I_{Omax} = 0.8 A$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση αντίστοιχα είναι:

$$R_{Lmax} = \frac{V_{out}}{I_{Omin}} = 475 \Omega m \quad R_{Lmin} = \frac{V_{out}}{I_{Omax}} = 23.75 \Omega m$$

Γνωρίζοντας την τάση εισόδου και εξόδου μπορεί να βρεθεί ο βαθμός χρησιμοποίησης του μετατροπέα ανύψωσης. Έτσι, υπολογίζεται και το εύρος τιμών του D που είναι:

$$D_{\min} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{Imax}}}} = 0.5789$$

$$D_{\text{norm}} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{Inorm}}}} = 0.6872$$

$$D_{\max} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{Imin}}}} = 0.75$$

Οι τιμές είναι αποδεκτές καθώς ο βαθμός χρησιμοποίησης δέχεται τιμές  $0 < D < 1$ . Η επιλογή της τιμής του πηνίου θα γίνει με χρήση του τύπου που έχουμε προαναφέρει.

$$L_{\min} = \frac{R_{\max} D_{\min} (1 - D_{\min})^2}{2 f_s} = 4.876 \text{ mH}$$

Οπότε για τη διάταξη μας επιλέγουμε τιμή  $L_{\min} > 4.876 \text{ mH}$ . Στο Matlab /Simulink οι προσομοιώσεις θα γίνουν για  **$L = 5 \text{ mH}$** .

Για να βρούμε τον πυκνωτή εξόδου έχουμε ως δεδομένο ότι η κυμάτωση της τάσης είναι 1%. Άρα,

$$V_{\text{C}_{\text{pp}}} \approx V_r - V_{r_{\text{C}_{\text{pp}}}}$$

$$V_r = 0.01 \cdot V_{\text{out}} = 3.8 \text{ volt}$$

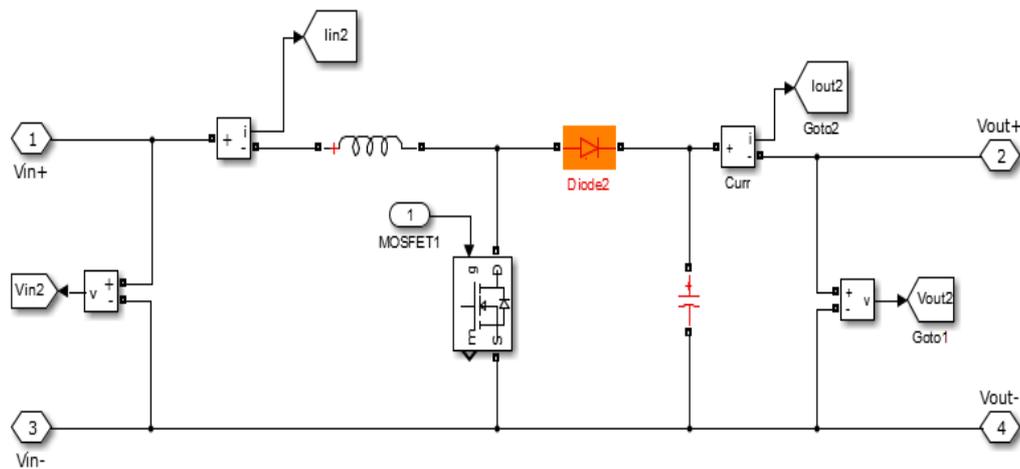
$$V_{r_{\text{C}_{\text{pp}}}} = \frac{V_r}{2} = 1.9 \text{ volt}$$

Άρα, η τιμή του πυκνωτή από τον τύπο που αναφέραμε στην ανάλυση προηγουμένως πρέπει να είναι:

$$C_{\min} = \frac{I_{\text{Omax}} \cdot D_{\max}}{f_s \cdot V_{\text{C}_{\text{pp}}}} = \frac{V_{\text{out}} \cdot D_{\max}}{R_{L_{\min}} \cdot f_s \cdot V_{\text{C}_{\text{pp}}}} = 1.26 \text{ mF}$$

Οπότε, για τη διάταξη επιλέγουμε τιμή  $C_{\min} > 1260 \mu\text{F}$ . Στο Matlab /Simulink οι προσομοιώσεις γίνονται για  **$C = 1300 \mu\text{F}$** . Έμεινε μόνο να επιλέξουμε διακοπτικό στοιχείο και δίοδο. Χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα που είχε το Simulink για το Mosfet και τη δίοδο με προεπιλεγμένες τιμές.

Η τελική διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου στο μικροδίκτυο φαίνεται παρακάτω. Η είσοδος του Mosfet δέχεται τους παλμούς οδήγησης από τον ελεγκτή του fuel cell που θα εξετάσουμε στη συνέχεια.



Εικόνα 4.6: Το κύκλωμα του μετατροπέα για το fuel cell στο Simulink

## 4.4 Έλεγχος του συστήματος fuel cell

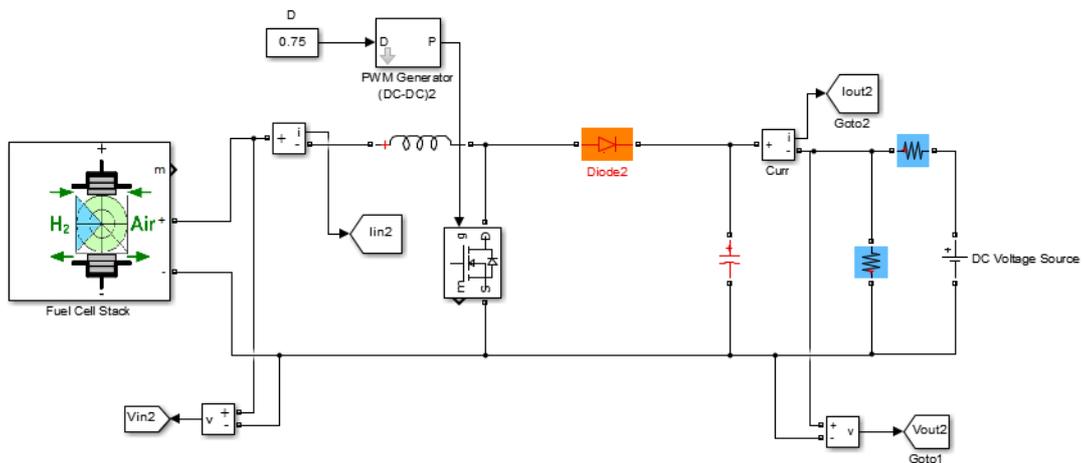
### 4.4.1 Έλεγχος τάσης με χρήση του βαθμού χρησιμοποίησης D

Ο έλεγχος της λειτουργίας του fuel cell ξεκινάει από τον μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης, στον οποίο είναι συνδεδεμένο. Όπως προαναφέραμε, ο συντελεστής χρησιμοποίησης D των παλμών που εφαρμόζουμε στο διακοπτικό στοιχείο του μετατροπέα, επηρεάζει το λόγο των τάσεων εισόδου και εξόδου με βάση τον τύπο:

$$V_o = V_{in} / (1-D) \quad (4-2)$$

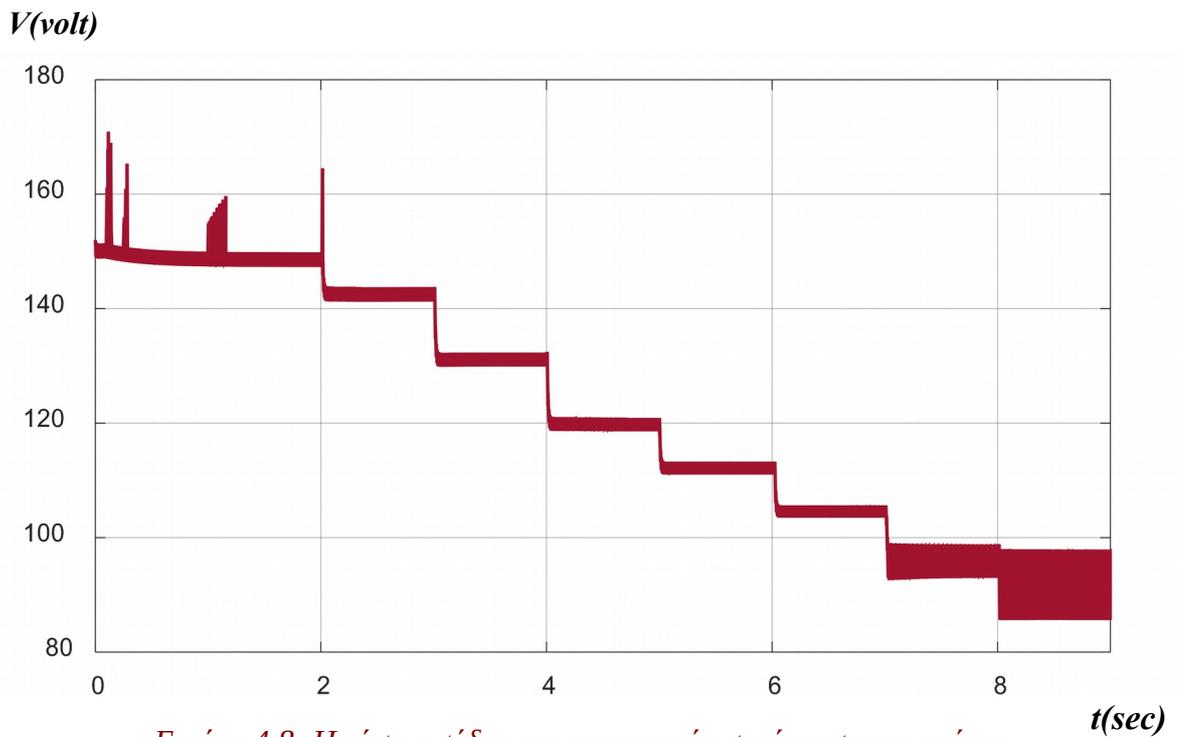
Στην πρώτη μας προσομοίωση στο πρόγραμμα Simulink, θα εξετάσουμε το πως μεταβάλλεται η τάση στα άκρα του fuel cell για διάφορες τιμές του D, και θα συγκρίνουμε με τα θεωρητικά αποτελέσματα από τον παραπάνω τύπο. Στην έξοδο του μετατροπέα θα έχουμε συνδεδεμένο ένα φορτίο και μία πηγή τάσης των 380 volt. Ουσιαστικά, προσομοιάζουμε τη συνδεδεμένη με το κύριο δίκτυο λειτουργία του μικροδικτύου που κατασκευάζουμε.

Το κύκλωμα το οποίο υλοποιήσαμε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το φορτίο είναι μία αντίσταση 28.88 Ohm και η εν σειρά αντίσταση με την πηγή τάσης είναι πολύ μικρή. Η παλμογεννήτρια έχει διακοπτική συχνότητα 5 kHz και παράγει παλμούς με το βαθμό χρησιμοποίησης (duty cycle) που δίνουμε στην είσοδό του.



Εικόνα 4.7: Υλοποίηση ελέγχου με χρήση του βαθμού χρησιμοποίησης στο Simulink

Στην προσομοίωση δώσαμε τιμές του Duty Cycle από 0.6 μέχρι 0.75 (που είναι και το μέγιστο για το οποίο σχεδιάσαμε τον μετατροπέα) σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η συμπεριφορά που θα επιδείξει η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του fuel cell και πόσο κοντά είναι στη θεωρητική σχέση. Επίσης, θέλουμε να καταδείξουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να ελέγχουμε με τους παλμούς τη λειτουργία του fuel cell. Η προσομοίωση έδωσε το παρακάτω διάγραμμα τάσης συνάρτηση του χρόνου.



Εικόνα 4.8: Η τάση εισόδου του μετατροπέα συνάρτηση του χρόνου

Στον πίνακα παρακάτω φαίνονται οι θεωρητικές τιμές της τάσης εισόδου του μετατροπέα από τον τύπο, και οι πειραματικές τιμές για τις διάφορες τιμές του D. Παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι πολύ κοντά, άρα επιβεβαιώνεται η θεωρητική σχέση.

Χρόνος(sec)	Duty Cycle	V <sub>in</sub> (V)- θεωρητικό	V <sub>in</sub> (V)- πειραματικό
0-2	0.6	152.0	149
2-3	0.62	144.4	142.5
3-4	0.65	133.0	131
4-5	0.68	121.6	120
5-6	0.7	114.0	112
6-7	0.72	106.4	104.5
7-8	0.74	98.8	96
8-9	0.75	95.0	92

#### **4.4.2 Έλεγχος με σταθερό P (Pcommand)**

Με την παρακάτω τεχνική θα επιδιώξουμε να ελέγξουμε την ισχύ εξόδου του συστήματος fuel cell. Δηλαδή, στόχος μας είναι κάθε χρονική στιγμή να ορίζουμε εμείς μια τιμή ισχύος, και το σύστημα να λειτουργεί με σταθερή ισχύ εξόδου σύμφωνα με αυτή την τιμή αναφοράς.

Για να το επιτύχουμε αυτό θα δώσουμε ως σήμα στην παλμογεννήτρια PWM, όχι κάποια τιμή για το D, αλλά το σήμα εξόδου ενός ελεγκτή PI, ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτείται με τη διαφορά της επιθυμητής ισχύος (Pcommand) από την πραγματική ισχύ του συστήματος εκείνη τη χρονική στιγμή. Πριν προχωρήσουμε στην περαιτέρω ανάλυση αυτής της τεχνικής και στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, οφείλουμε να αναφερθούμε στη λειτουργία των PI ελεγκτών.

#### **Ελεγκτές PI**

Ένας ελεγκτής PI είναι μία υποκατηγορία των PID ελεγκτών. Η ονομασία σημαίνει proportional–integral–derivative controller (PID controller), δηλαδή αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής. Πρόκειται για μία τεχνική ελέγχου ανάδρασης ευρέως διαδεδομένη σε βιομηχανικές εφαρμογές[40],[41].

Ένας ελεγκτής PID υπολογίζει συνεχώς την τιμή σφάλματος  $e(t)$ , ως τη διαφορά ανάμεσα σε μία επιθυμητή τιμή και μια μετρούμενη μεταβλητή του συστήματος και εφαρμόζει μια διόρθωση με βάση έναν αναλογικό, έναν ολοκληρωτικό και έναν διαφορικό όρο. Ο ελεγκτής προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει κάποια στιγμή το σφάλμα με προσαρμογή του σήματος ελέγχου  $u(t)$ , το οποίο προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση. Όπου,  $K_p$  ο αναλογικός όρος,  $K_i$  ο ολοκληρωτικός, και  $K_d$  ο διαφορικός. Είναι σταθερές και μη αρνητικές τιμές.

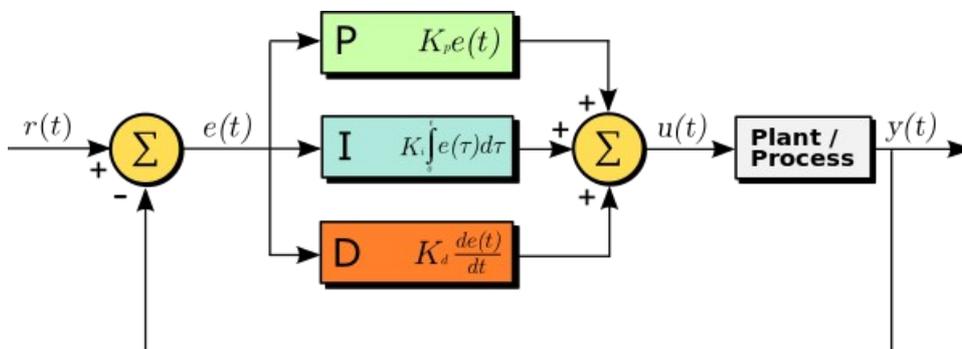
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4-3)$$

Αυτή η τεχνική ελέγχου χρησιμοποιεί μόνο μία μέτρηση, και δεν απαιτεί γνώση του συστήματος. Γιαντό και έχει τόσο ευρεία χρήση στη βιομηχανία. Το μόνο που χρειάζεται για τη σχεδίαση ενός τέτοιου ελέγχου είναι η ρύθμιση των τριών όρων. Αν και έχουν μελετηθεί αναλυτικές μέθοδοι εύρεσής τους συνήθως ακολουθούνται οι παρακάτω εμπειρικοί κανόνες ρύθμισης.

(α) Αύξηση του  $K_p$  προκαλεί μείωση του μόνιμου σφάλματος και του χρόνου ανόδου, αλλά αυξάνει το overshoot(αύξηση παραπάνω από την επιθυμητή τιμή).

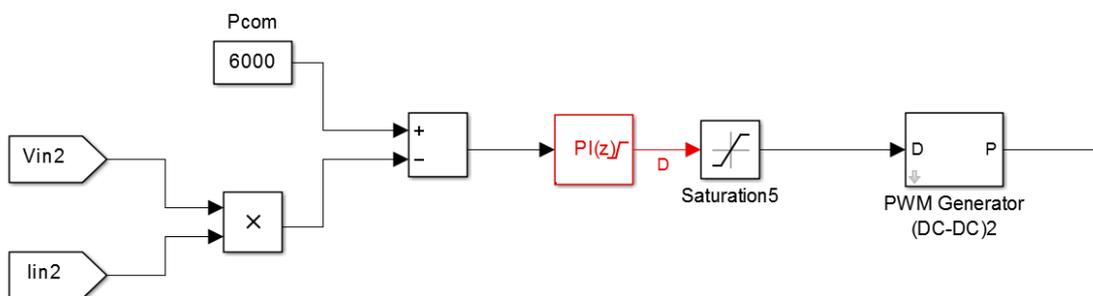
(β) Αύξηση του  $K_i$  οδηγεί σε εξάλειψη του μόνιμου σφάλματος και μείωση του χρόνου ανόδου, αλλά χειροτερεύει συνολικά τη μεταβατική συμπεριφορά.

(γ) Αύξηση του  $K_d$  οδηγεί σε μείωση των μεταβατικών, αλλά αύξηση του χρόνου ανόδου.



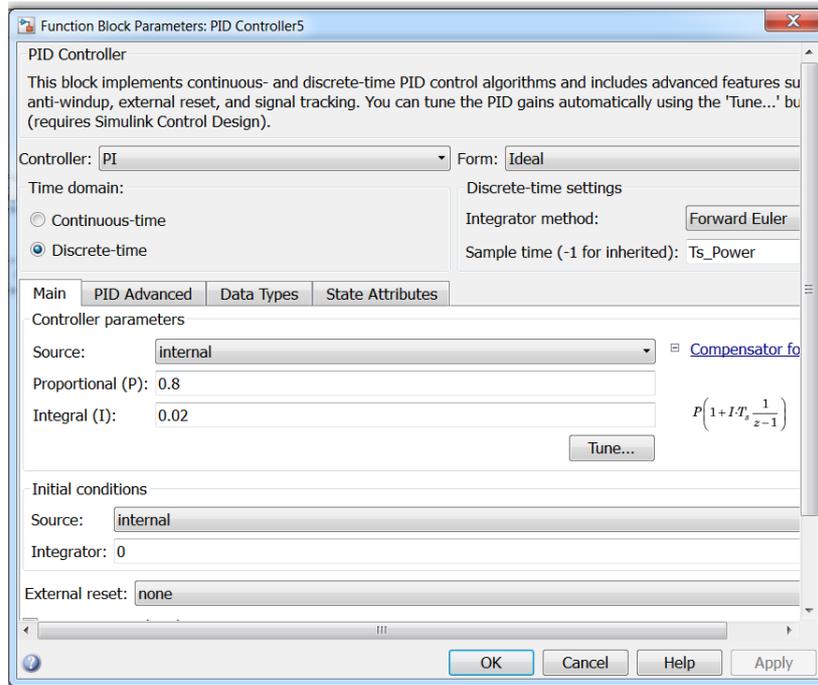
Εικόνα 4.9: Διάγραμμα ροής ενός PID ελεγκτή ( πηγή wikipedia)

Σε ορισμένες εφαρμογές μπορεί να παραλειφθεί κάποιος από τους τρεις όρους, δηλαδή να οριστεί μηδέν στην παραπάνω εξίσωση. Έτσι, καταλήγουμε σε ελεγκτές PD, PI, P και I. Στις εφαρμογές ηλεκτρικής ισχύος δίνουν καλύτερη συμπεριφορά οι ελεγκτές PI. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε αυτό το είδος ελεγκτή, ώστε να ελέγξουμε την ισχύ εξόδου του συστήματος κυψέλης καυσίμου υδρογόνου. Ακολουθεί, η υλοποίηση του ελέγχου στο Simulink. Το block saturation περιορίζει τις τιμές του D μεταξύ 0 και 1 που έχουν νόημα.



Εικόνα 4.10: Υλοποίηση ελέγχου P command

Ουσιαστικά λοιπόν, ο ελεγκτής δέχεται ως είσοδο την μετρούμενη ισχύ εξόδου του fuel cell κάθε χρονική στιγμή, όπως προκύπτει από το γινόμενο του ρεύματος και της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα. Στη συνέχεια, ο ελεγκτής υπολογίζει το σφάλμα της μετρούμενης ισχύος σε σχέση με την επιθυμητή ισχύ που εμείς του έχουμε ορίσει. Κατόπιν, εισάγει αυτή τη διαφορά στην εξίσωση (4-3), ώστε να υπολογίσει κατάλληλο D το οποίο θα οδηγήσει σε μείωση του σφάλματος. Στην περίπτωση μας, ο διαφορικός όρος δεν υπάρχει. Επίσης οι τιμές για το  $K_p$  και το  $K_i$  επιλέχθηκαν με βάση τους παραπάνω κανόνες και μετά από πάρα πολλές δοκιμές. Στην εικόνα 4.11 φαίνεται το παράθυρο επιλογής των παραμέτρων για τον ελεγκτή PI που χρησιμοποιήσαμε.

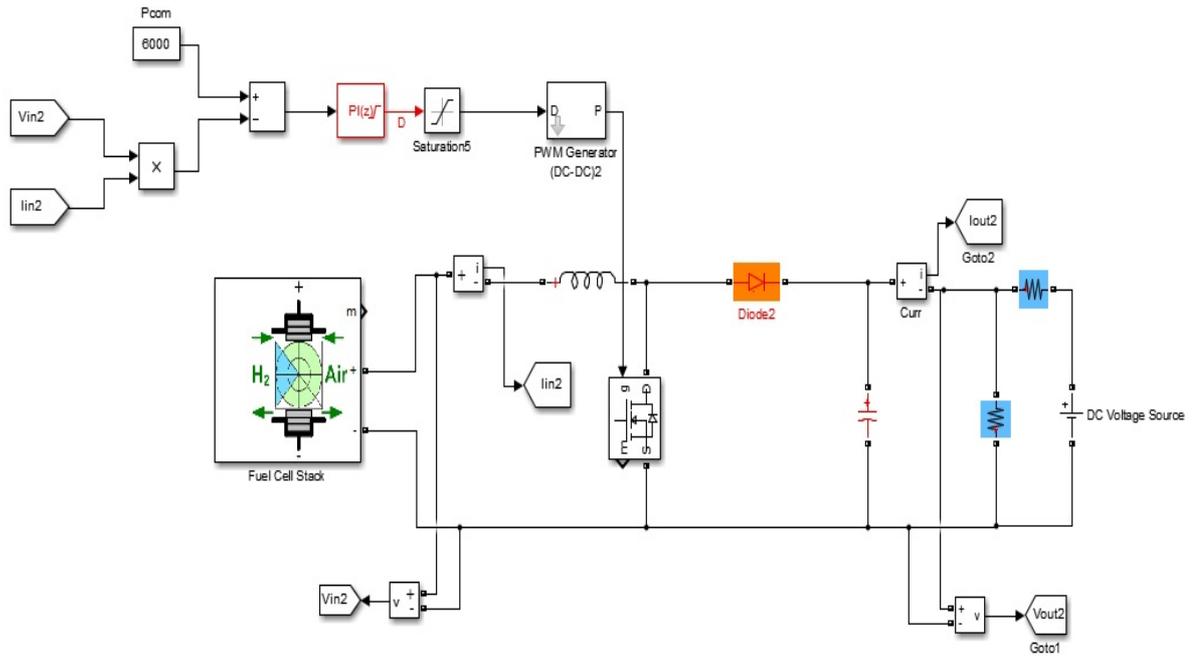


*Εικόνα 4.11: Παράθυρο καθορισμού παραμέτρων PI ελεγκτή*

Στη δοκιμή που εκτελέσαμε, ορίσαμε διάφορες τιμές εντολής P command μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να επαληθεύσουμε αν λειτουργεί επιτυχώς ο έλεγχος σταθερής ισχύος και να παρατηρήσουμε πόσο γρήγορα αποκρίνεται. Οι τιμές αυτές είναι:

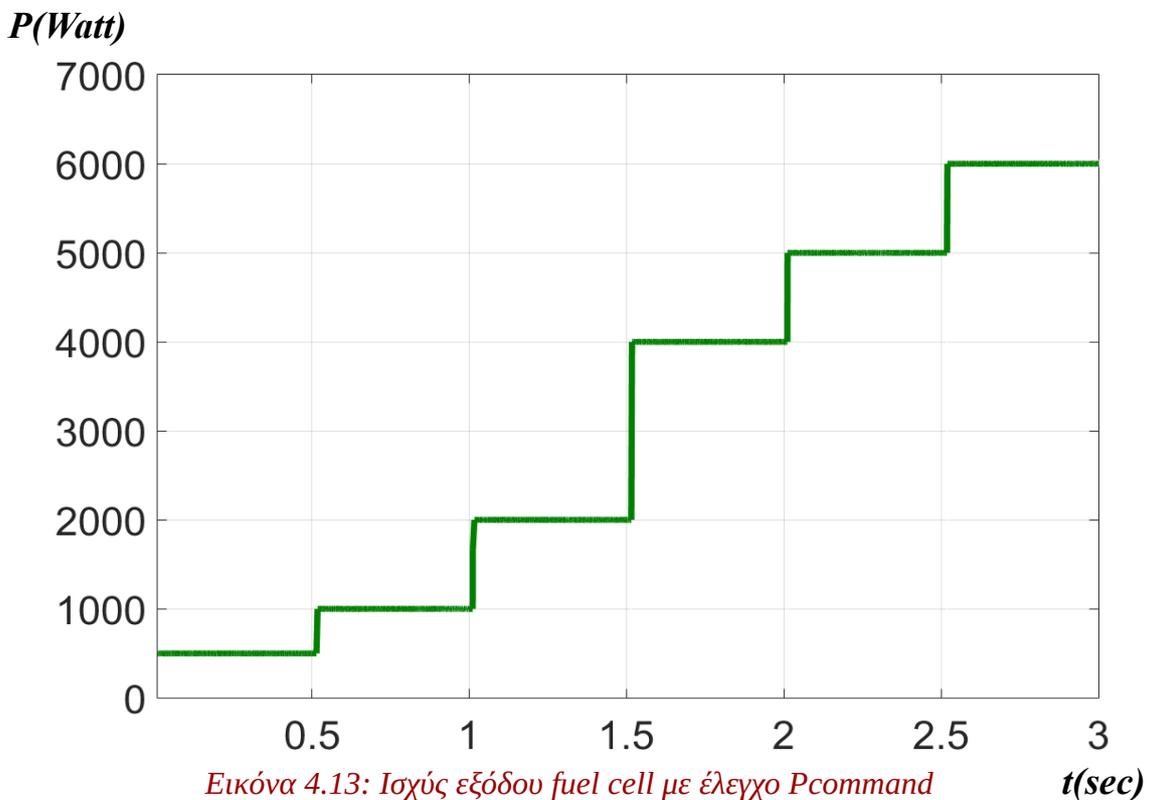
Χρόνος(sec)	Pcommand(Watt)	Χρόνος(sec)	Pcommand(Watt)
0-0.5	500	1.5-2	4000
0.5-1	1000	2-2.5	5000
1-1.5	2000	2.5-3	6000

Το συνολικό κύκλωμα προσομοίωσης για το σύστημα fuel cell με έλεγχο σταθερής ισχύος ακολουθεί παρακάτω.



Εικόνα 4.12: Κύκλωμα προσομοίωσης ελέγχου  $P_{command}$

Ακολουθεί το διάγραμμα ισχύος εξόδου που προέκυψε από την προσομοίωση. Παρατηρούμε ότι το fuel cell ανταποκρίνεται στις τιμές αναφοράς που εμείς ορίζουμε. Προφανώς οι τιμές που ορίσαμε είναι μέσα στα τεχνικά όρια του fuel cell, καθώς η μέγιστη ισχύς είναι στα 6100W.



Εικόνα 4.13: Ισχύς εξόδου fuel cell με έλεγχο  $P_{command}$

$t(sec)$

### 4.4.3 Έλεγχος Droop

Η παραπάνω σχεδίαση ελέγχου είναι πολύ χρήσιμη για ένα μικροδίκτυο, καθώς με το P command ως «εργαλείο» μπορούμε να καθορίζουμε κάθε στιγμή την ισχύ όλων των διεσπαρμένων γεννητριών. Ο συγκεκριμένος έλεγχος όμως, εξυπηρετεί μόνο την περίπτωση της συνδεδεμένης λειτουργίας του μικροδικτύου, όπου δηλαδή το κύριο δίκτυο κρατάει σταθερή την τάση στον κοινό dc ζυγό. Στην απομονωμένη κατάσταση αντιθέτως, είναι απαραίτητο κάποια από τις γεννήτριες να παίζει το ρόλο του δικτύου. Δηλαδή, να ελέγχει την τάση του ζυγού και να την κρατάει στην ονομαστική της τιμή, ανεξάρτητα από τις αλλαγές στη ζήτηση ισχύος (φορτίο) και στη μη ελεγχόμενη παραγωγή ισχύος (φωτοβολταϊκή συστοιχία). Τον πρωταρχικό αυτό ρόλο στο μικροδίκτυο που σχεδιάζουμε θα επιτελέσει το σύστημα fuel cell.

Η μεγάλη πρόκληση στη σχεδίαση του εν λόγω μηχανισμού ελέγχου είναι η έλλειψη συστήματος επικοινωνίας. Δηλαδή, ο ο ελεγκτής της κυψέλης καυσίμου θα πρέπει να ελέγχει την τάση του μικροδικτύου χωρίς να έχει στη διάθεσή του καμία απολύτως πληροφορία για το υπόλοιπο σύστημα. Αν είχε γνώση των ρευμάτων του φορτίου και των άλλων γεννητριών, με έναν απλό υπολογισμό ροής φορτίου θα έβρισκε τη βέλτιστη ισχύ που πρέπει να παράγει το fuel cell για να ικανοποιηθεί το ισοζύγιο ισχύος και θα έδινε την τιμή αυτή στον έλεγχο P command. Έτσι, η τάση θα παρέμενε σταθερή στην ονομαστική τιμή. Για λόγους αξιοπιστίας όμως, επιλέγουμε να ακολουθήσουμε τη φιλοσοφία του ελέγχου DBS(dc bus signaling) που αναφέραμε στο κεφάλαιο 2, δηλαδή οι τοπικοί ελεγκτές δε θα έχουν καμία πληροφορία για τους άλλους κόμβους του μικροδικτύου.

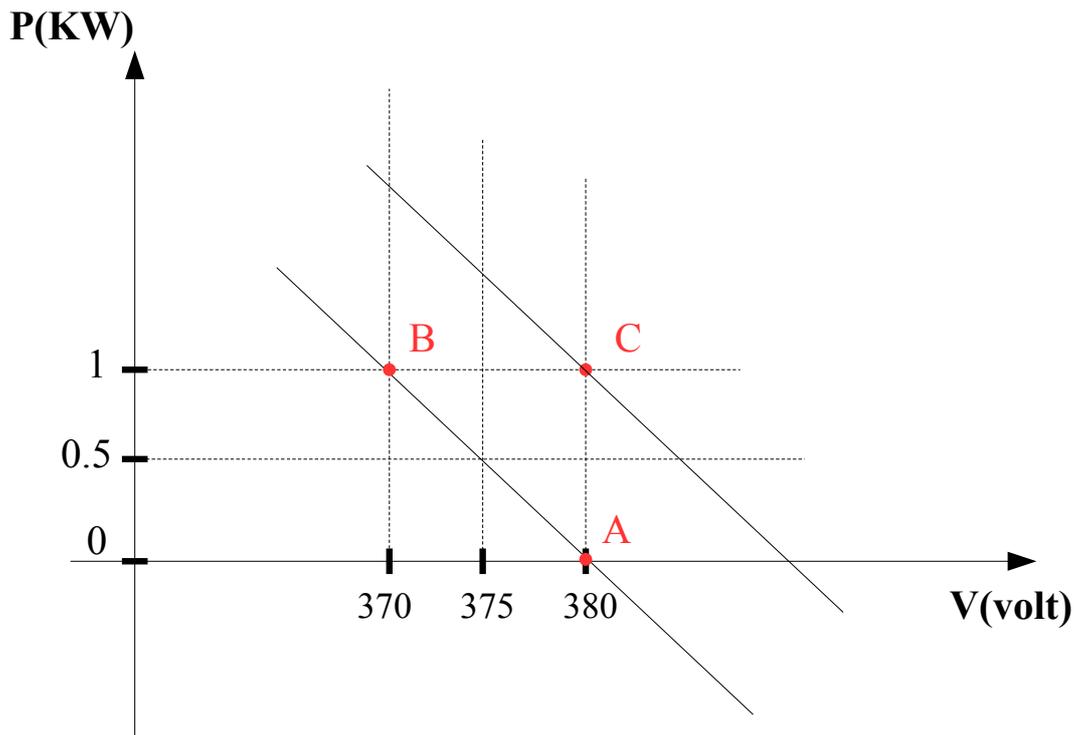
Η πρώτη προσέγγιση της σχεδίασης είναι να προσπαθήσουμε να μιμηθούμε τη συμπεριφορά μίας συμβατικής γεννήτριας. Αν συνδέσουμε μία σύγχρονη γεννήτρια με ένα κυμαινόμενο φορτίο, θα παρατηρήσουμε ότι η τάση θα αλλάζει ανάλογα με την ισχύ που ζητάει το φορτίο. Αν για παράδειγμα, κάποια χρονική στιγμή αυξηθεί η ζήτηση ισχύος του φορτίου η τάση θα αρχίσει να μειώνεται. Η γεννήτρια θα αντιδράσει σε αυτή τη μείωση αυξάνοντας από μόνη της την ισχύ που παράγει, μέχρι κάποια στιγμή η τάση να σταθεροποιηθεί. Αν αντιθέτως μειωθεί η ζήτηση του φορτίου, η τάση θα αρχίσει να αυξάνεται και η γεννήτρια θα αρχίσει να μειώνει την παραγωγή της. Δηλαδή, η γεννήτρια εκ κατασκευής, ακολουθεί μία φθίνουσα χαρακτηριστική(droop characteristic) και χωρίς κάποιο έλεγχο από εμάς σταθεροποιεί το σύστημα. Προφανώς, η ισχύς του φορτίου πρέπει να είναι μέσα στα τεχνικά όρια της γεννήτριας.

Επομένως, η σύγχρονη γεννήτρια περιέχει τον έλεγχο που επιθυμούμε να σχεδιάσουμε εγγενώς. Επιπλέον, ακολουθεί τη λογική του DBS, καθώς δε χρησιμοποιεί κάποια επικοινωνία στη λειτουργία της. Αρκεί λοιπόν, να σχεδιάσουμε έναν ελεγκτή που μιμείται αυτή τη συμπεριφορά της φθίνουσας χαρακτηριστικής. Μία εξίσωση χαρακτηριστικής droop θα είναι:

$$P = -c_1 \cdot V + c_2 \quad (4-4.1) \quad \text{με } c_1, c_2 \text{ μη αρνητικές σταθερές.}$$

Επιδίωξή μας είναι να κρατάμε σταθερή την τάση κοντά στην ονομαστική της τιμή που για το δικό μας μικροδίκτυο είναι  $V_{nom} = 380$  volt. Άρα, είναι χρήσιμο να εκφράσουμε την τάση σε σχέση με την ονομαστική. Επομένως:

$$P = (380 - V) \cdot a + b \quad (4-4.2) \quad \text{με } a, b \text{ μη αρνητικές σταθερές.}$$



Εικόνα 4.14: Χαρακτηριστική droop που υλοποιεί ο ελεγκτής του fuel cell

Ας δούμε ένα πρακτικό παράδειγμα για να καταλάβουμε πως λειτουργεί η χαρακτηριστική droop. Έστω ότι στο μικροδίκτυο έχουμε μόνο το fuel cell κι ένα φορτίο και είμαστε αποσυνδεδεμένοι από το δίκτυο κοινής ωφελείας. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες στις γραμμές. Αρχικά βρισκόμαστε σε τάση 380 volt, δηλαδή στην ονομαστική τιμή και έχουμε μηδενικό φορτίο και μηδενική παραγωγή από το fuel cell (σημείο A στην εικόνα 4.18). Όσο υπάρχει ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ισχύος η τάση θα παραμένει σταθερή στα 380 volt. Από τη χαρακτηριστική droop εφόσον  $V = 380$  volt, έχουμε:

$$P = (380 - V) \cdot a + b \rightarrow P = b = 0 \text{ kW}$$

Το  $b$  ονομάζεται βέλτιστη (optimum) ισχύς, και αποτελεί την τιμή ισχύος του fuel cell που ικανοποιεί το ισοζύγιο ισχύος. Άρα, ορίσαμε ότι:  $b = P_{opt} = 0 \text{ kW}$ . Το  $a$  είναι η σταθερά droop και καθορίζει πόσο γρήγορα θα αντιδρά σε μεταβολές ο ελεγκτής. Για τις ανάγκες του παραδείγματος ας υποθέσουμε ότι  $a = 100$ . Η σχέση (4-4.2) λοιπόν παίρνει τη μορφή:

$$P = (380 - V) \cdot a + P_{opt} \rightarrow P = (380 - V) \cdot 100 \text{ W}$$

Αν ξαφνικά το φορτίο γίνει 1kW, η τάση στο ζυγό θα αρχίσει να μειώνεται και μετά από ένα χρονικό διάστημα θα έχει πάρει την τιμή  $V = 375$  volt. Με τις τιμές που πριν ορίσαμε για το  $a$  και το  $P_{opt}$  η σχέση θα δώσει μια νέα ισχύ για το fuel cell:

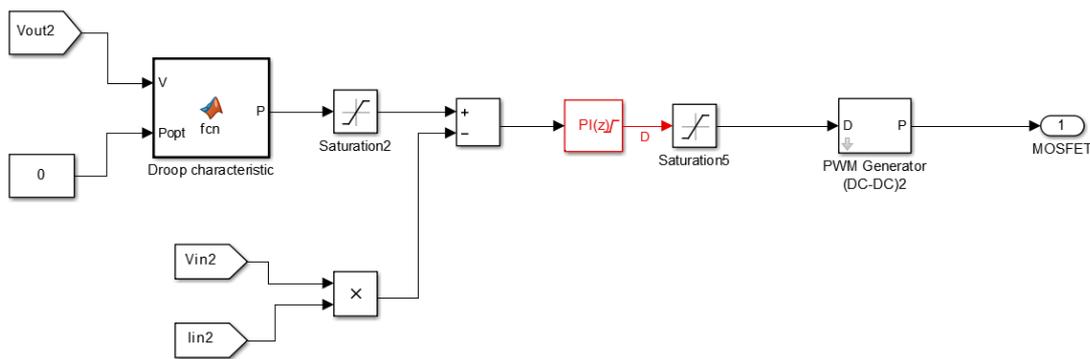
$$P = (380 - 375) \cdot 100 + 0 \text{ W} = 500 \text{ W}$$

Αν το fuel cell συνέχιζε να παράγει 0 W, η τάση θα μειωνόταν ασταμάτητα μέχρι να «γονατίσει» εντελώς. Γιαυτό η χαρακτηριστική ορίζει μία αύξηση της ισχύος του fuel cell, ώστε να αντιμετωπίσει την αναντιστοιχία ισχύος που παρουσιάστηκε. Ως αποτέλεσμα η μείωση της τάσης αρχικά επιβραδύνεται και κάποια στιγμή η τάση σταθεροποιείται. Αυτό θα γίνει όταν η εξίσωση (4-4.2) δώσει αποτέλεσμα  $P = 1\text{kW}$ , που θα ικανοποιεί το ισοζύγιο ισχύος:

$$1000 \text{ W} = (380 - V) \cdot 100 \rightarrow V = 370 \text{ volt}$$

Αρα, λοιπόν η χαρακτηριστική droop επανέφερε το ισοζύγιο ισχύος στο ζυγό και σταθεροποίησε την τάση του μικροδικτύου στα 370 volt(σημείο B). Κατορθώσαμε λοιπόν να προσομοιάσουμε τη συμπεριφορά μίας σύγχρονης γεννήτριας και να ελέγξουμε το μικροδίκτυο χωρίς επικοινωνία μεταξύ του φορτίου και του fuel cell.

Για να υλοποιήσουμε αυτόν τον ελεγκτή στο Simulink χρησιμοποιήσαμε ένα block συνάρτησης που δέχεται ως είσοδο την τάση και δίνει ως έξοδο την ισχύ P που υπαγορεύει η χαρακτηριστική droop. Κατόπιν, εισάγουμε αυτή την ισχύ στον προηγούμενο ελεγκτή που κατασκευάσαμε, δηλαδή στον μηχανισμό για το P command. Ακολουθεί το μοντέλο που σχεδιάσαμε στο Simulink.



*Εικόνα 4.15: Υλοποίηση ελέγχου droop στο Simulink*

Επειδή, ο ελεγκτής αρχίζει να γίνεται αρκετά περίπλοκος, δημιουργούμε ξεχωριστό υποσύστημα fuel cell controller, ώστε να είναι πιο οργανωμένο και κατανοητό το συνολικό μοντέλο. Όπως φαίνεται στο πάνω διάγραμμα, αλλά και στο συνολικό που ακολουθεί, όλα τα στοιχεία του ελεγκτή εμπεριέχονται στο block του υποσυστήματος το οποίο δίνει σαν έξοδο τους παλμούς οδήγησης του IGBT του μετατροπέα. Αυτό που προσθέσαμε σε σχέση με πριν είναι μόνο η συνάρτηση Droop characteristic. Το saturation block μετά τη συνάρτηση περιορίζει την ισχύ στο διάστημα [0-6200Watt] που είναι τα τεχνικά όρια του fuel cell. Στην προσομοίωση που εκτελέσαμε το φορτίο του 1kW και το fuel cell θα είναι αρχικά συνδεδεμένα με το δίκτυο (την πηγή τάσης 380 volt), ώστε να ηλεκτριστεί το μικροδίκτυο με τα 380 volt. Γιαυτό ορίσαμε τη βέλτιστη ισχύ ως μηδενική  $P_{opt} = 0$ . Δηλαδή, το fuel cell όσο είμαστε συνδεδεμένοι στο δίκτυο και η τάση είναι στα 380 volt από την χαρακτηριστική droop θα ορίζεται ότι P command = 0 και άρα το φορτίο θα τροφοδοτείται μόνο από το δίκτυο.

Στη συνέχεια, θα αποσυνδέσουμε το δίκτυο και άμεσα θα δημιουργηθεί ανισορροπία ισχύος. Το φορτίο θα ζητάει 1 kW, ενώ το fuel cell δε θα παράγει καθόλου ισχύ. Στην προσομοίωση θα παρατηρήσουμε πως θα αντιδράσει ο έλεγχος droop που έχουμε σχεδιάσει και αν θα κατορθώσει να σταθεροποιήσει την τάση του μικροδικτύου χωρίς την πηγή τάσης. Παρακάτω στην εικόνα είναι το περιεχόμενο της συνάρτησης droop characteristic. Η τιμή της σταθεράς droop, επιλέχθηκε για τα μεγέθη του μικροδικτύου που κατασκευάζουμε μετά από πολλές δοκιμές.

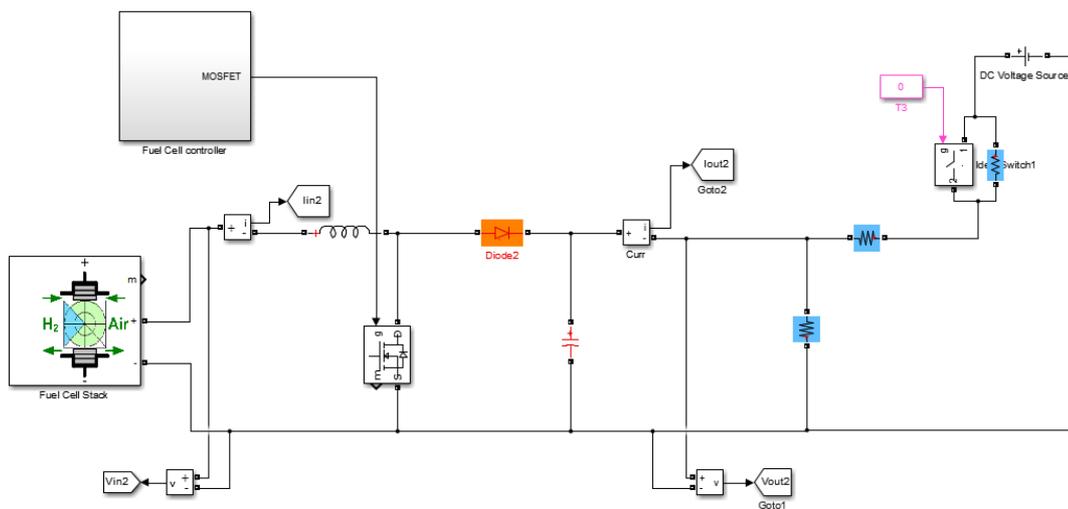
```

Editor - Block: fuelcellalone/Fuel Cell controller/Droop characteristic
EDITOR VIEW
+ New Open Save Find Files Compare Go To Comment % Indent Breakpoints Run Model
Fuel Cell controller/Droop characteristic
1 function P = fcn(V, Popt)
2     %#codegen
3     a=100;
4     P=(380-V)*a+Popt;
5 end
6

```

Εικόνα 4.16: Ο κώδικας της συνάρτησης droop characteristic

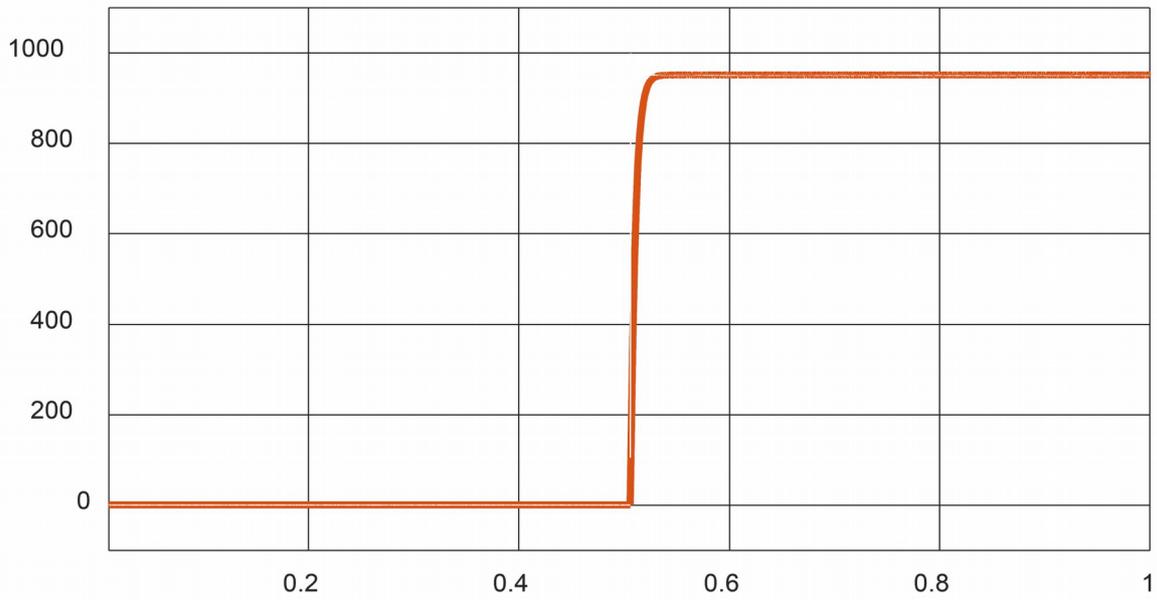
Ακολουθεί το συνολικό διάγραμμα του συστήματος, όπως το κατασκευάσαμε στο περιβάλλον του Simulink. Ο διακόπτης με είσοδο μία σταθερά και μία παράλληλη αντίσταση εξυπηρετεί τη σύνδεση και αποσύνδεση του δικτύου, ενώ «τρέχει» η προσομοίωση. Απλά αλλάζουμε τη σταθερά από 1 σε 0. Η τιμή της αντίστασης του φορτίου είναι 144.4 Ωhm, δηλαδή φορτίο 1kW σε τάση 380 volt.



Εικόνα 4.17: Το κύκλωμα της προσομοίωσης του ελέγχου droop

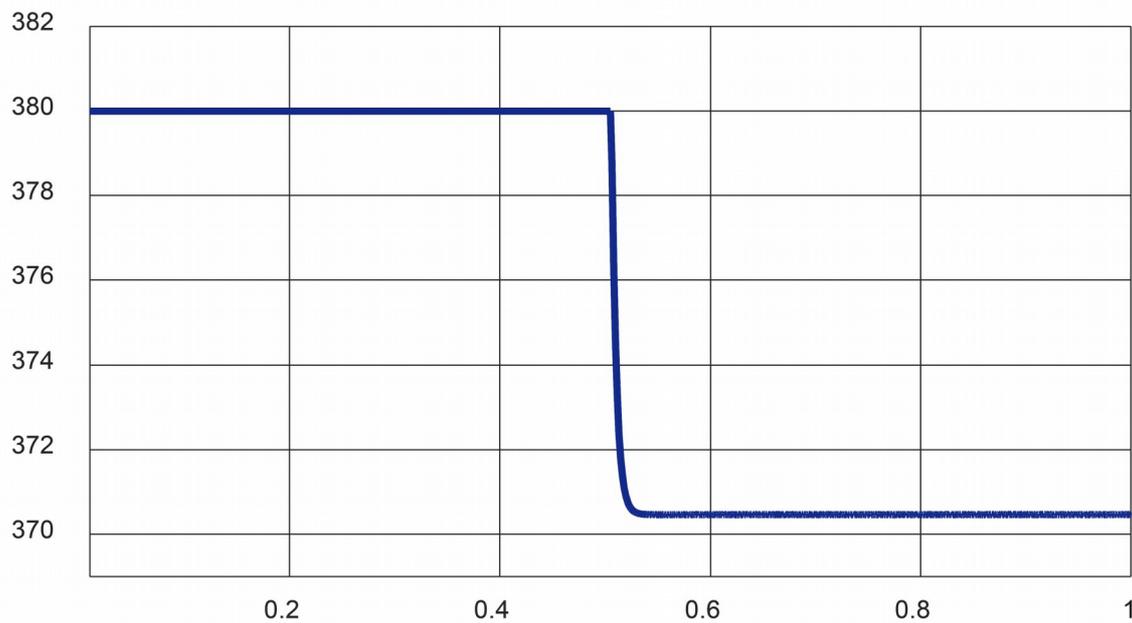
Παρακάτω βλέπουμε τα διαγράμματα ρεύματος και τάσης στην έξοδο του μετατροπέα. Μέχρι τη χρονική στιγμή 0.5 sec το δίκτυο ήταν συνδεδεμένο και μετά έχουμε απομονωμένη λειτουργία.

***P(watt)***



*Εικόνα 4.18: Ισχύς εξόδου fuel cell με έλεγχο droop* **t(sec)**

***V(volt)***



*Εικόνα 4.19: Τάση εξόδου fuel cell με έλεγχο droop* **t(sec)**

Όπως παρατηρούμε, ο έλεγχος droop ανταποκρίθηκε στην αναντιστοιχία ισχύος επιτυχώς. Αύξησε την ισχύ του fuel cell από 0 σε 1 kW, και σταθεροποίησε την τάση στα 370 volt περίπου.

Ο έλεγχος του μικροδικτύου όμως είναι ακόμη ελλιπής. Σκοπός μας ήταν να διατηρούμε σε κάθε περίπτωση την τάση κοντά στην ονομαστική τιμή των 380 volt. Με τον υπάρχον μηχανισμό σταθεροποιήσαμε την τάση, αλλά σε χαμηλότερο επίπεδο. Όσο μεγαλύτερο το φορτίο τόσο χαμηλότερα θα σταθεροποιείται και η τάση, κάτι που δεν είναι ανεκτό για τη σωστή λειτουργία των φορτίων.

Στην περίπτωση της προσομοίωσής μας, αφού καταρχάς η τάση σταθεροποιήθηκε στα 370 volt, μπορούμε να αλλάξουμε το  $P_{opt}$  από 0 σε 1kW. Η σχέση (4-4.2) την επόμενη χρονική στιγμή θα δώσει ισχύ  $P$  command:

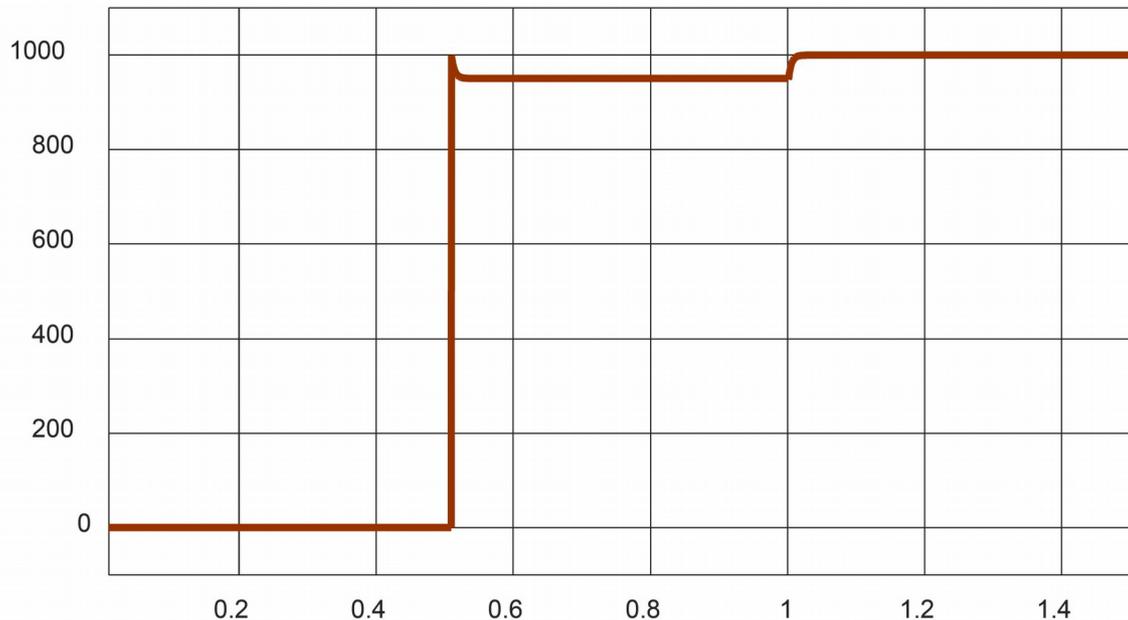
$$P = (380 - V) \cdot a + P_{opt, new} \rightarrow P = (380 - 370) \cdot 100 + 1000 = 2 \text{ kW}$$

Δηλαδή, η εξίσωση θα ορίσει στο fuel cell να παράγει παραπάνω ισχύ από αυτή που ζητάει το φορτίο. Αυτή η περίσσεια ισχύος θα οδηγήσει σε αύξηση της τάσης και μείωση της ισχύος από τη σχέση (4-4.2). Κάποια στιγμή η εξίσωση θα κάνει την ισχύ ξανά ίση με τη βέλτιστη, δηλαδή 1kW. Αυτό θα γίνει σε τάση:

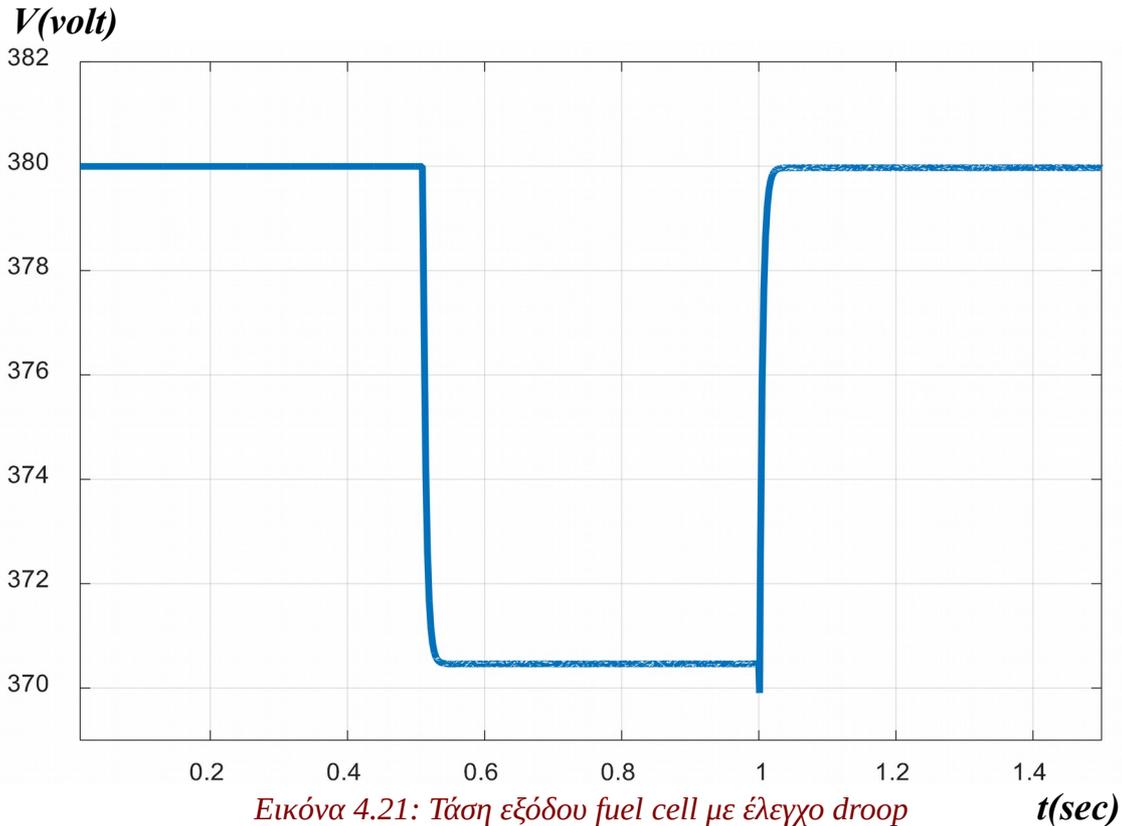
$$1 \text{ kW} = (380 - V) \cdot a + 1 \text{ kW} \rightarrow (380 - V) \cdot a = 0 \rightarrow V = 380 \text{ volt}$$

Με τον τρόπο αυτό η χαρακτηριστική droop επαναφέρει την τάση στα 380 volt (σημείο C στην εικόνα 4.14). Στην επόμενη προσομοίωση δοκιμάσαμε το παραπάνω σενάριο. Ξεκινήσαμε με  $P_{com}=0$  και συνδεδεμένο το δίκτυο. Τη στιγμή 0.5 sec αποσυνδέουμε το δίκτυο και αφήνουμε την τάση να σταθεροποιηθεί (στα 370 volt). Στη συνέχεια, τη στιγμή 1 sec αλλάζουμε χειροκίνητα την τιμή της βέλτιστης ισχύος της χαρακτηριστικής σε  $P_{opt}=1\text{kW}$ . Ακολουθούν τα διαγράμματα ρεύματος και τάσης εξόδου του fuel cell.

***P(watt)***



***Εικόνα 4.20: Ισχύς εξόδου fuel cell με έλεγχο droop t(sec)***



Στα διαγράμματα φαίνεται ότι με αυτή τη μέθοδο καταφέραμε να επιδιορθώσουμε την τάση μετά τη μεταβολή ισχύος. Το πρόβλημα όμως, είναι ότι η επιδιόρθωση έγινε αργά και με δική μας παρέμβαση. Πρέπει να βρούμε έναν τρόπο, ώστε ο ελεγκτής αυτόματα να αλλάζει την τιμή του  $P_{opt}$  και να επαναφέρει την τάση στα 380 volt μετά από αλλαγές. Πως μπορεί όμως ο ελεγκτής να ξέρει τι βέλτιστη ισχύ να ορίσει κάθε φορά; Πότε θα πρέπει να την αυξήσει και πότε να τη μειώσει;

Όταν παρουσιάζεται μείωση στην τάση σημαίνει ότι αυξήθηκε το φορτίο, άρα θέλουμε να αυξηθεί το  $P_{opt}$ . Αντίθετα όταν έχουμε αύξηση στην τάση καταλαβαίνουμε ότι το φορτίο μειώθηκε και πρέπει να μειώσουμε το  $P_{opt}$ . Για να το επιτύχουμε αυτό θέλουμε μία καινούρια σχέση, η οποία θα αλλάζει το  $P_{opt}$ , με βάση τη μεταβολή της τάσης σε σχέση με την ονομαστική. Έτσι, η μεταβολή θα είναι γρήγορη όταν απομακρυνόμαστε πολύ από τα 380 volt (σε περιπτώσεις απότομης αλλαγής φορτίου) και πολύ αργή κοντά στα 380 volt, ώστε να μην ταλαντώνεται άσκοπα το σύστημα. Οι δύο εξισώσεις που θα συναποτελούν τον ελεγκτή του fuel cell είναι λοιπόν:

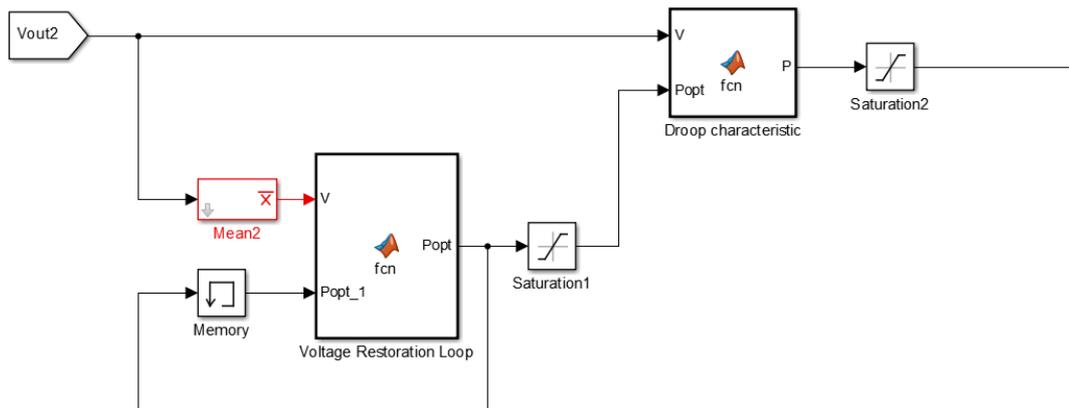
$$\mathbf{P(t) = [380 - V(t)] \cdot a + P_{opt}(t)} \quad (4-5.1)$$

$$\mathbf{P_{opt}(t) = [380 - V(t)] \cdot b + P_{opt}(t-1)} \quad (4-5.2)$$

Για να εξασφαλίσουμε ότι η αλλαγή του  $P_{opt}$  θα γίνεται πολύ πιο αργά από την αλλαγή της ισχύος του fuel cell από τη σχέση (4-5.1), η σταθερά αυτής της δεύτερης σχέσης θα είναι πολύ μικρότερης τιμής. Η σταθερά αυτή είναι το  $b = 0.005$  (ενώ  $a=100$ ) και η τιμή της επιλέχθηκε μετά από πολλές δοκιμές για τα μεγέθη του μικροδικτύου

μας. Η μεταβλητή  $t$  δηλώνει το χρόνο, άρα ο όρος  $P_{opt}(t-1)$  είναι η τιμή που είχε το  $P_{opt}$  την προηγούμενη χρονική στιγμή. Οι δύο εξισώσεις θα δρουν ταυτόχρονα στον ελεγκτή και θα επιτελούν τον ομαλό έλεγχο της τάσης του μικροδικτύου.

Παρακάτω ακολουθεί η πραγματοποίηση του συνολικού ελεγκτή στο Simulink. Η σχέση (4-5.2) υλοποιείται από το block συνάρτησης voltage restoration loop. Η βέλτιστη ισχύς της προηγούμενης χρονικής στιγμής  $P_{opt}(t-1)$  αποθηκεύεται με το memory block το οποίο έχει μηδενική αρχική τιμή. Η έξοδος της συνάρτησης  $P_{opt}$  στη συνέχεια τροφοδοτείται στη συνάρτηση droop characteristic από όπου προκύπτει η ισχύς που δίνεται ως εντολή στον ελεγκτή P command και παράγονται οι κατάλληλοι παλμοί για το IGBT του μετατροπέα.



Εικόνα 4.22: Υλοποίηση του συμπληρωματικού βρόχου επιδιόρθωσης τάσης

Παρακάτω εμφανίζεται το περιεχόμενο της συνάρτησης που υπολογίζει το  $P_{opt}$ . Επειδή το ηλεκτρικό δίκτυο κοντά στην ονομαστική τιμή είναι φυσιολογικό να κάνει κάποιες μικρές ταλαντώσεις, δε θέλουμε να ενεργοποιείται αυτός ο βρόχος με κάθε μικρή απόκλιση από τα 380 volt. Αυτό θα μπορούσε να αποσταθεροποιήσει το σύστημα. Για το λόγο αυτό, ορίσαμε μία συνθήκη (if) που ενεργοποιεί το βρόχο επιδιόρθωσης τάσης μόνο όταν ξεφεύγουμε από κάποια όρια.

```

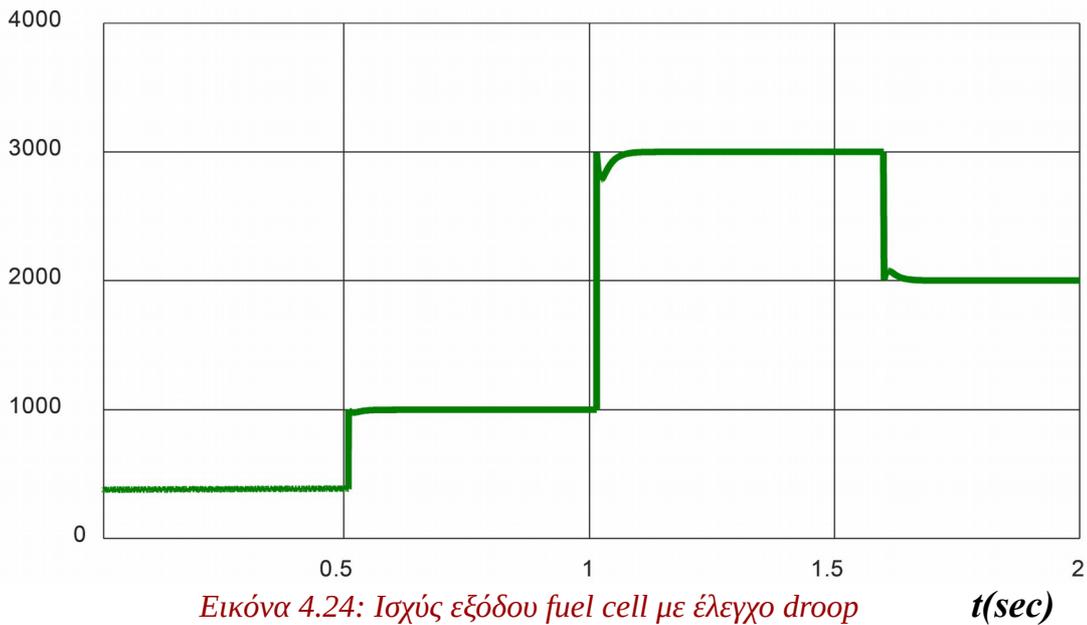
Editor - Block: fuelcellalone/Fuel Cell controller/Voltage Restoration Loop
EDITOR VIEW
+ New Open Save Find Files Compare Go To Comment % % % Breakpoints Run Model
FILE NAVIGATE EDIT BREAKPOINTS
Fuel Cell controller/Voltage Restoration Loop x +
1 function Popt = fcn(V,Popt_1)
2 %#codegen
3 b=0.005;
4 if V>=380 && V<=380.05
5     Popt=Popt_1;
6 else
7     Popt=(380-V)*b + Popt_1;
8 end;
9 end
10

```

Εικόνα 4.23: Ο κώδικας της συνάρτησης Voltage Restoration Loop

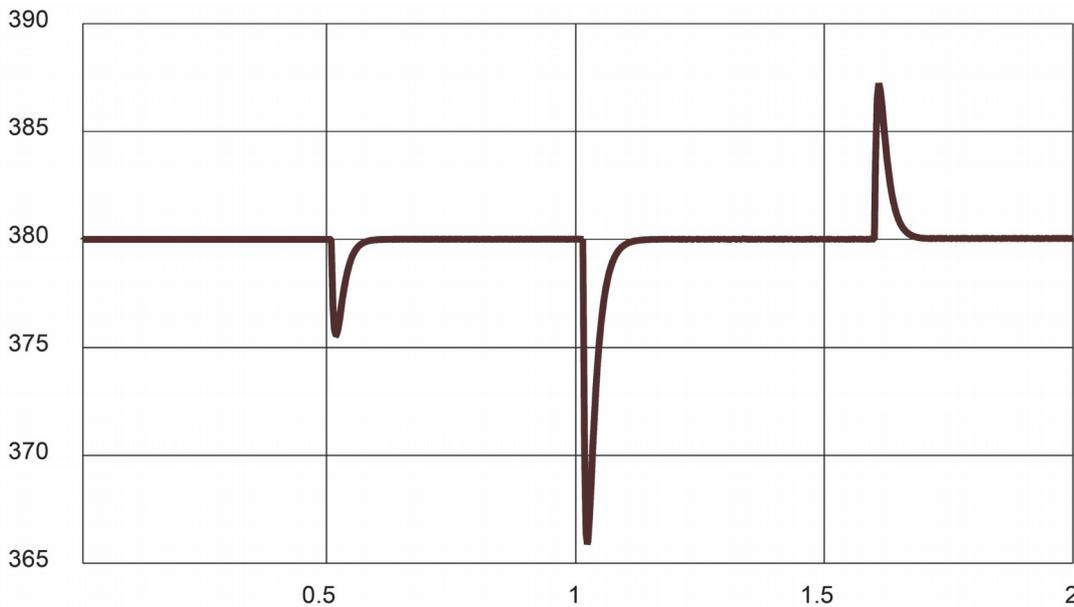
Για να επαληθεύσουμε αν λειτουργεί ο μηχανισμός ελέγχου που υλοποιήσαμε πραγματοποιούμε την εξής προσομοίωση. Αρχικά έχουμε συνδεδεμένο το μικροδίκτυο στο κυρίως δίκτυο με την τάση σταθερή στα 380 volt, άρα και το fuel cell να παράγει μηδενική ισχύ όπως υπαγορεύει η χαρακτηριστική droop. Το φορτίο είναι 1kW στην αρχή του πειράματος. Τη χρονική στιγμή 0.5 sec αποσυνδέουμε το δίκτυο και αφήνουμε τον ελεγκτή να αντιμετωπίσει τη ζήτηση του φορτίου. Μετά τη σταθεροποίηση της τάσης στα 380 volt, αυξάνουμε το φορτίο από 1 σε 3kW. Αφού ο έλεγχος droop αντιμετωπίσει και αυτή τη διαταραχή, μειώνουμε το φορτίο από 3 σε 2kW. Με τον τρόπο αυτό θα παρατηρήσουμε και το αντίστροφο σενάριο με την τάση να ανεβαίνει πάνω από τα 380 volt. Ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

***P(watt)***



*Εικόνα 4.24: Ισχύς εξόδου fuel cell με έλεγχο droop*

***V(volt)***



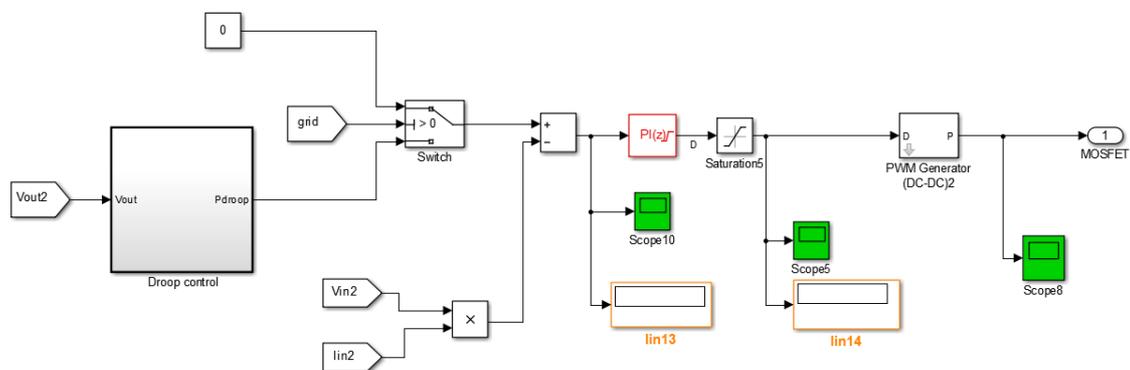
*Εικόνα 4.25: Τάση εξόδου fuel cell με έλεγχο droop*

Παρατηρούμε ότι ο έλεγχος droop που σχεδιάσαμε ανταποκρίθηκε στις μεταβολές του φορτίου που το υποβάλλαμε. Στην αρχή της προσομοίωσης το δίκτυο κρατάει την τάση σταθερή στα 380 volt. Ενώ δε θέλαμε το fuel cell να δίνει ρεύμα στο μικροδίκτυο, εντούτοις εγγεί μιά μικρή κυμαινόμενη ισχύ γύρω μέχρι 300Watt περίπου. Θα αναφερθούμε όμως παρακάτω σε αυτό.

Με την αποσύνδεση του δικτύου βλέπουμε ότι η τάση μειώνεται όμως πολύ σύντομα ο ελεγκτής αυξάνει το ρεύμα του fuel cell και ο συμπληρωματικός βρόχος επανορθώνει την τάση στα 380 volt. Στη συνέχεια, ενώ έχει σταθεροποιηθεί το σύστημα αυξάνουμε το φορτίο στα 3kW. Παρατηρούμε την ίδια μεταβολή. Η τάση μειώνεται και στη συνέχεια επανέρχεται στην ονομαστική τιμή της. Αυτή τη φορά η πτώση της τάσης ήταν μεγαλύτερη γιατί και η διαταραχή ήταν μεγαλύτερη.

Τη χρονική στιγμή 1.6 sec μειώνουμε το φορτίο. Τώρα η τάση αντί να μειωθεί, αυξάνεται. Και πάλι όμως ο ελεγκτής μειώνει το ρεύμα του fuel cell και αντιμετωπίζει τη μεταβολή. Σε όλες τις μεταβολές η τάση επανήλθε στα 380 volt και σε μικρό χρονικό διάστημα (σε λιγότερο από 0.1 sec).

Όσον αφορά την ισχύ που παράγει το fuel cell με συνδεδεμένο το δίκτυο, οφείλεται στις απώλειες των γραμμών και τη μη ιδανικότητα των ηλεκτρικών στοιχείων. Ως αποτέλεσμα σε αυτές τις μικρές αποκλίσεις αντιδράει η χαρακτηριστική droop και το fuel cell δεν έχει μηδενική ισχύ όπως θα θέλαμε. Αυτό μπορεί να βελτιώνει την ποιότητα της τάσης για το φορτίο, όμως καταναλώνει ακριβό καύσιμο σε στιγμές που το μικροδίκτυο δεν το έχει ανάγκη. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με την προσθήκη μίας ακόμα συνθήκης στον ελεγκτή. Όσο το δίκτυο είναι συνδεδεμένο ο ελεγκτής θα δίνει απλά την εντολή P command = 0, δηλαδή ο έλεγχος droop θα είναι ανενεργός. Όταν αποσυνδέεται το δίκτυο ο έλεγχος droop θα ενεργοποιείται. Παρακάτω φαίνεται η τελική μορφή του τοπικού ελεγκτή του fuel cell με την προσθήκη της συνθήκης. Το block Droop control περιέχει όλα τα στοιχεία που υλοποιούν τον έλεγχο droop που έχουμε περιγράψει.



*Εικόνα 4.26: Η τελική υλοποίηση του ελεγκτή του fuel cell*

Άρα λοιπόν, βασισμένοι στη θεωρία για τον έλεγχο droop στα μικροδίκτυα που υπάρχει στη βιβλιογραφία [32], καταφέραμε να υλοποιήσουμε έναν ελεγκτή για το fuel cell που ελέγχει την τάση του ζυγού χωρίς επικοινωνιακό σύστημα. Παρατηρούμε όμως ότι η τάση απομακρύνεται αρκετά από τα 380 volt στις διαταραχές. Σε αυτό θα βοηθήσει η ένταξη μπαταριών στο μικροδίκτυο που θα υποβοηθούν το fuel cell να αντιμετωπίζει τις μεταβολές στο ισοζύγιο ισχύος.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### Συσσωρευτές(μπαταρίες)

#### 5.1 Θεωρητικό μοντέλο μπαταρίας

Οι μπαταρίες είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας τους εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 1. Αυτό που μας ενδιαφέρει στην παρούσα φάση είναι να μπορέσουμε να μοντελοποιήσουμε τους συσσωρευτές, ώστε να μελετήσουμε με ποια μέθοδο μπορούμε να ελέγξουμε ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και να το εντάξουμε στο μικροδίκτυο. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά των μπαταριών που μας ενδιαφέρουν απαριθμούνται ακολούθως.

#### Χωρητικότητα

Η χωρητικότητα μίας μπαταρίας είναι η ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου μπορεί να αποδώσει στην ονομαστική της τάση. Όσο περισσότερο είναι το υλικό του ηλεκτροδίου που περιέχεται στο κύτταρο τόσο μεγαλύτερη θα είναι η χωρητικότητά του[42]. Η χωρητικότητα μετριέται σε ampere-ώρα (A·h). Η ονομαστική χωρητικότητα μίας μπαταρίας εκφράζεται συνήθως ως το γινόμενο 20 ωρών με το ρεύμα που μπορεί να παρέχει συνεχώς για 20 ώρες στους 20 °C, ενώ παραμένει πάνω από μια καθορισμένη τάση. Για παράδειγμα, μια μπαταρία, ισχύος 100 A·h μπορεί να αποδώσει 5 A για 20 ώρες σε θερμοκρασία δωματίου. Το ποσοστό φορτίου που αποδίδει η μπαταρία σε σχέση με το φορτίο που αποθηκεύτηκε σε αυτήν εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, ο χρόνος αναμονής και ο ρυθμός εκφόρτισης. Όσο μεγαλύτερο το ρεύμα εκφόρτισης τόσο μειώνεται η χωρητικότητα.

#### Ρυθμός εκφόρτισης (C rate)

Πρόκειται για τον ρυθμό με τον οποίο η μπαταρία εκφορτίζεται. Ορίζεται ως το ρεύμα εκφόρτισης διαιρούμενο με το θεωρητικό ρεύμα σύμφωνα με το οποίο η μπαταρία αποδίδει την ονομαστική της χωρητικότητα σε μία ώρα. Μια μπαταρία με ρυθμό 1C θα αποδώσει την ονομαστική της χωρητικότητα σε 1 ώρα, ενώ αντίθετα με ρυθμό 2C σε 30 λεπτά[43].

#### Κατάσταση φόρτισης (SoC)

Η κατάσταση φόρτισης (state of charge - SoC) είναι το ισοδύναμο του μετρητή καυσίμων για μία μπαταρία, ένα ηλεκτρικό όχημα ή οτιδήποτε γενικά χρησιμοποιεί ως πηγή ενέργειας κάποιον συσσωρευτή. Οι μονάδες SoC είναι ποσοστιαίες μονάδες, δηλαδή 0% SOC σημαίνει άδεια μπαταρία, ενώ 100% πλήρης. Μια εναλλακτική έκφραση της ίδιας πληροφορίας είναι το βάθος εκφόρτισης (depth of discharge - DoD), το αντίστροφο του SoC. Συνεπώς, 100% DoD σημαίνει άδεια μπαταρία και 0% πλήρης.

Συνήθως, το SoC δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα, αλλά μπορεί να εκτιμηθεί από άλλες μετρούμενες μεταβλητές. Υπάρχουν τεχνικές, όπως η μέτρηση Coulomb που υπολογίζουν offline το SoC, απαιτούν όμως φόρτιση και αποφόρτιση της μπαταρίας με σταθερό ρυθμό,. Αυτή η μέθοδος δίνει ακριβή εκτίμηση SoC, αλλά είναι χρονοβόρα και

δαπανηρή, και επεμβαίνει στη λειτουργία της μπαταρίας. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές ψάχνουν για κάποια online τεχνική. Σε γενικές γραμμές υπάρχουν πέντε μέθοδοι για έμμεσο προσδιορισμό SoC:

- Η χημική μέθοδος
- Η μέθοδος της τάσης
- Η μέθοδος του ρεύματος
- Με φίλτρο Kalman
- Η μέθοδος της πίεσης

### Τάση εξόδου

Η τάση που εμφανίζει στην έξοδο της μία μπαταρία όταν είναι συνδεδεμένη με κάποιο φορτίο και εκφορτίζεται. Οι κατασκευαστές έχουν ως στόχο η τάση αυτή να παραμένει σταθερή για κάθε SoC στην ονομαστική της τιμή. Στην πράξη όμως όσο μειώνεται το SoC η τάση που εμφανίζει στα άκρα του ο συσσωρευτής μειώνεται.

### Αποδοτικότητα

Λόγω της εσωτερικής αντίστασης και του γεγονότος ότι η τάση φόρτισης είναι μεγαλύτερη από την τάση εκφόρτισης η ενέργεια που επιστρέφεται από την μπαταρία κατά την εκφόρτιση, θα είναι μικρότερη από την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την επαναφόρτιση. Έτσι, η αποδοτικότητα ενός συσσωρευτή ορίζεται ως:

$$\text{Efficiency [A} \cdot \text{h]} = \frac{\text{discharged A} \cdot \text{h}}{\text{charging A} \cdot \text{h}} \times 100 \% \quad (5-1)$$

### Κύκλος ζωής

Ο κύκλος ζωής μπαταρίας ορίζεται ως ο αριθμός της πλήρους φόρτισης και αποφόρτισης που μια μπαταρία μπορεί να εκτελέσει για ένα συγκεκριμένο DoD πριν η ονομαστική χωρητικότητά της πέσει κάτω από το 80% της αρχικής ονομαστικής χωρητικότητάς της. Πιο συγκεκριμένα είναι ένα μέτρο που δείχνει πόσους κύκλους μια μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει κατά τη διάρκεια της χρήσιμης ζωής της. Όπως αναφέρθηκε εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το βάθος του κάθε κύκλου. Εάν ο κύκλος ζωής μετριέται πειραματικά για ένα υψηλό DoD, τότε σε χαμηλότερα DoD το αποτέλεσμα του γινομένου του αριθμού των κύκλων επί το DoD είναι 110 περίπου σταθερό, δηλαδή ο κύκλος εργασιών της χωρητικότητας (capacity turnover) είναι περίπου ο ίδιος για χαμηλότερα DoD.

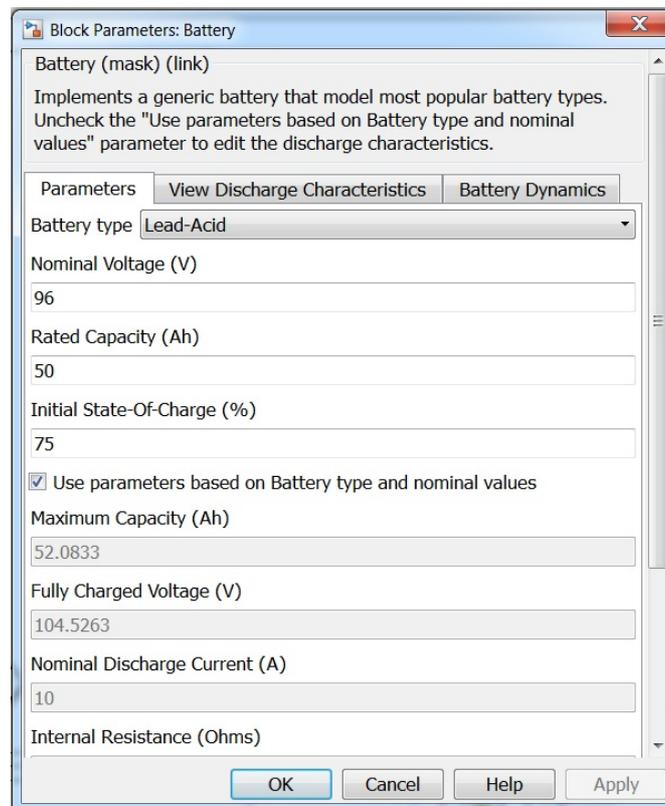
## 5.2 Μοντέλο μπαταρίας στο Matlab/Simulink

Το μικροδίκτυο που σχεδιάζουμε θα πρέπει να συντηρεί φορτίο ορισμένου μεγέθους ακόμα και σε χρονικές περιόδους που το δίκτυο κοινής ωφελείας δε θα παρέχει ενέργεια. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας, μπορεί να επέρχεται είτε από δική μας επιλογή, είτε απρόσμενα λόγω αδυναμίας του δικτύου. Η χρήση φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν είναι ικανή να υποστηρίξει αυτή την κατάσταση λειτουργίας λόγω της στοχαστικότητας στην παραγωγή τους. Απαιτείται η χρήση κάποιας ελεγχόμενης διεσπαρμένης γεννήτριας, όπως η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου που μελετήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Όπως είδαμε όμως, το fuel cell ενώ μπορούσε να υποκαταστήσει το κύριο δίκτυο στην υποστήριξη της τάσης, σε κάθε μεταβολή του φορτίου υπήρχε μία σημαντική βύθιση ή ανύψωση της τάσης. Αυτές οι διαταραχές είναι σε αποδεκτά επίπεδα, δηλαδή εντός του  $\pm 5\%$  της ονομαστικής τάσης και πολύ σύντομες (για 0.1 sec περίπου). Εντούτοις, στην περίπτωση της ξαφνικής μείωσης φορτίου το fuel cell το καλύτερο που θα μπορεί να κάνει είναι να μηδενίσει στιγμιαία την παραγωγή του, όχι όμως και να απορροφήσει ισχύ. Για να εξασφαλίσουμε ότι το σύστημα δε θα αποσταθεροποιηθεί σε πολύ απότομες μειώσεις φορτίου, αλλά και να βελτιώσουμε γενικά τη λειτουργία του, είναι σκόπιμο να δημιουργήσουμε έναν ακόμη μηχανισμό υποστήριξης της τάσης.

Για λόγους αξιοπιστίας λοιπόν, θα σχεδιάσουμε ένα σύστημα αποθήκευσης με συσσωρευτές που θα έχει βοηθητικό ρόλο στην αποσυνδεδεμένη λειτουργία. Σε περίπτωση πολύ απότομης μείωσης του φορτίου, η μπαταρία θα μπορεί στιγμιαία να φορτιστεί με την περίσσια ισχύ, μέχρι το fuel cell να προσαρμόσει την παραγωγή του στα νέα δεδομένα. Έτσι, η μετάβαση θα είναι σχεδόν ανεπαίσθητη στην τάση του μικροδικτύου. Στη συνδεδεμένη λειτουργία η μπαταρία θα φορτίζεται ή θα είναι ανενεργή.

Εφόσον επιλέξαμε το fuel cell, ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει φορτία μεγέθους μέχρι 6kW, επιλέγουμε τις μπαταρίες με μέγιστη ισχύ εκφόρτισης και φόρτισης 1kW. Η χωρητικότητά τους θα είναι στα 50 A·h. Σαν τάξη μεγέθους δηλαδή, θα μπορεί το σύστημα των μπαταριών να αποδώσει τη μέγιστη ισχύ του για περίπου 5 ώρες. Καθώς όμως, ο ρόλος τους είναι να καλύπτουν μόνο τις μεταβολές, θα μπορούν να υποστηρίξουν το δίκτυο για αρκετές μέρες χωρίς φόρτιση.

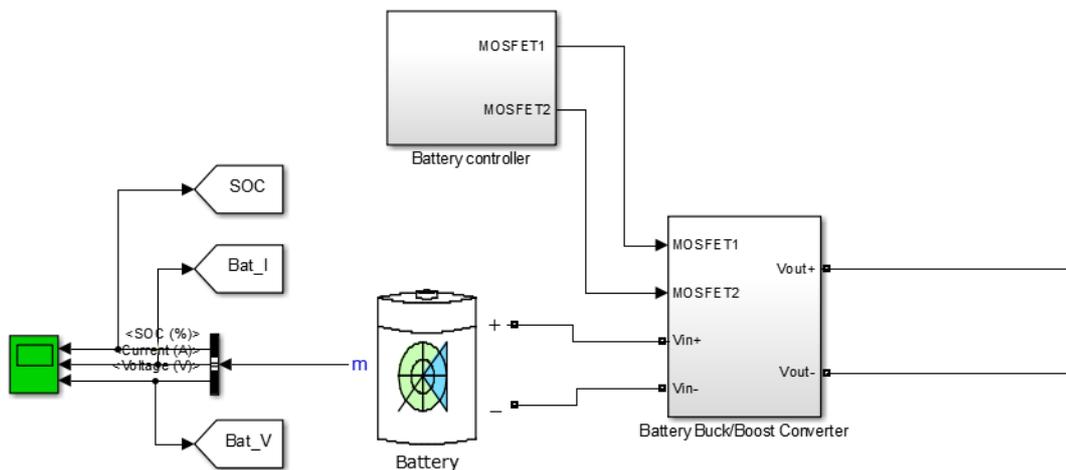


*Εικόνα 5.1: Παράθυρο καθορισμού παραμέτρων μοντέλου μπαταρίας*

Το περιβάλλον του Simulink μας παρέχει διάφορους τύπους μπαταριών. Εμείς επιλέγουμε τον πιο διαδεδομένο τύπο που χρησιμοποιείται σε υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Δηλαδή, συσσωρευτές κατηγορίας μολύβδου οξέος. Στο παράθυρο παραπάνω φαίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές της μπαταρίας, όπως η ονομαστική τάση στα 96 volt και η χωρητικότητα 50 A·h.. Επίσης, μπορούμε για κάθε προσομοίωση να ορίζουμε εμείς την αρχική τιμή του SoC.

Το μοντέλο αυτό που θα χρησιμοποιήσουμε επιτρέπει online μέτρηση του SoC της μπαταρίας. Έτσι, θα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη μεταβλητή στον τοπικό ελεγκτή που θα κατασκευάσουμε για το σύστημα αποθήκευσης, καθώς παίζει βασικό ρόλο για τις αποφάσεις ελέγχου. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, ο χρόνος ζωής μίας μπαταρίας μειώνεται αν την αφήνουμε να ξεφορτίζεται κάτω από ένα όριο. Επομένως, πρέπει να θέσουμε περιορισμούς για να την προστατέψουμε.

Στο σχήμα παρακάτω φαίνεται η οπτική απεικόνιση του συστήματος αποθήκευσης συσσωρευτών, όπως ακριβώς θα είναι συνδεδεμένο στον κοινό ζυγό του μικροδίκτυου. Σε ξεχωριστά υποσυστήματα είναι η ηλεκτρονική διεπαφή της μπαταρίας και ο τοπικός ελεγκτής των μπαταριών.



*Εικόνα 5.2: Το υποσύστημα της μπαταρίας που θα συνδεθεί στο μικροδίκτυο*

### **5.3 Σύνδεση συστήματος αποθήκευσης μπαταριών στο μικροδίκτυο**

Η σύνδεση των μπαταριών σε ένα ηλεκτρικό σύστημα απαιτεί πάντα κάποιο κύκλωμα ισχύος. Συνήθως, όταν πρόκειται να συνδεθούν σε δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιείται κάποιος αναστροφέας (inverter), ο οποίος θα μετατρέψει τη συνεχή τάση του συσσωρευτή σε εναλλασσόμενη. Στην περίπτωση μας όμως, το μικροδίκτυο χρησιμοποιεί επίσης συνεχή τάση. Άρα, απλά πρέπει να μετατρέψουμε τα 96 volt των μπαταριών, σε 380 volt που είναι και η επιθυμητή τιμή για τον κοινό ζυγό. Όπως και στην σύνδεση του Φ/B συστήματος και του fuel cell, αυτή την εργασία μπορούμε να την αναθέσουμε σε έναν μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης.

Με αυτή τη διάταξη μπορούμε όχι μόνο να επιτύχουμε τον μετασχηματισμό τάσης που απαιτείται, αλλά και να εφαρμόσουμε κάποιον μηχανισμό ελέγχου της ισχύος που θα εγγεί το σύστημα αποθήκευσης στο μικροδίκτυο.

Οι μπαταρίες όμως, παρουσιάζουν μία σημαντική διαφορά σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά και την κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Εκτός από το να παράγουν ισχύ για το μικροδίκτυο, μπορούν επίσης να απορροφούν ισχύ. Ο ρόλος των συσσωρευτών στο μικροδίκτυο είναι να αποθηκεύουν ενέργεια σε στιγμές που είτε υπάρχει περίσσεια παραγωγής από τις τοπικές γεννήτριες, είτε συμφέρει οικονομικά να αγοραστεί ενέργεια από το κυρίως δίκτυο και να την επιστρέφουν σε στιγμές που υπάρχει έλλειψη ισχύος ή η ενέργεια είναι ακριβή.

Άρα, χρειαζόμαστε και μία δεύτερη διάταξη που θα εκτελεί την αντίστροφη εργασία από τον μετατροπέα ανύψωσης, δηλαδή που θα υποβιβάζει τα 380 volt του μικροδικτύου στην ονομαστική τάση των συσσωρευτών που είναι τα 96 volt. Η συγκεκριμένη διάταξη ονομάζεται μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης σε συνεχή. Ακολουθεί η θεωρητική ανάλυση αυτού του κυκλώματος ισχύος.

### 5.3.1 Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης(Buck DC-DC converter)

Ο μετατροπέας υποβιβασμού, του οποίου το κύκλωμα ισχύος παρουσιάζεται στην εικόνα 5.3(α), έχει τη δυνατότητα παραγωγής τιμών DC τάσης εξόδου από το μηδέν έως την τιμή της τάσης εισόδου. Όπως και με το μετατροπέα ανύψωσης ο μετατροπέας υποβιβασμού λειτουργεί σε δύο ή τρεις φάσεις λειτουργίας ανάλογα με το αν το ρεύμα του πηνίου εξόδου είναι συνεχές ή όχι. Η πρώτη φάση του μετατροπέα αυτού αρχίζει όταν ο παλμός οδήγησης εφαρμοστεί στην πύλη του διακόπτη και πάει σε αγωγή με αποτέλεσμα η δίοδος να είναι αρνητικά πολωμένη. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα κατά τη φάση αυτή εμφανίζεται στο σχήμα 5.3(β). Όπως διαπιστώνεται και από το σχήμα κατά τη φάση αυτή φορτίζεται ο πυκνωτής εξόδου.

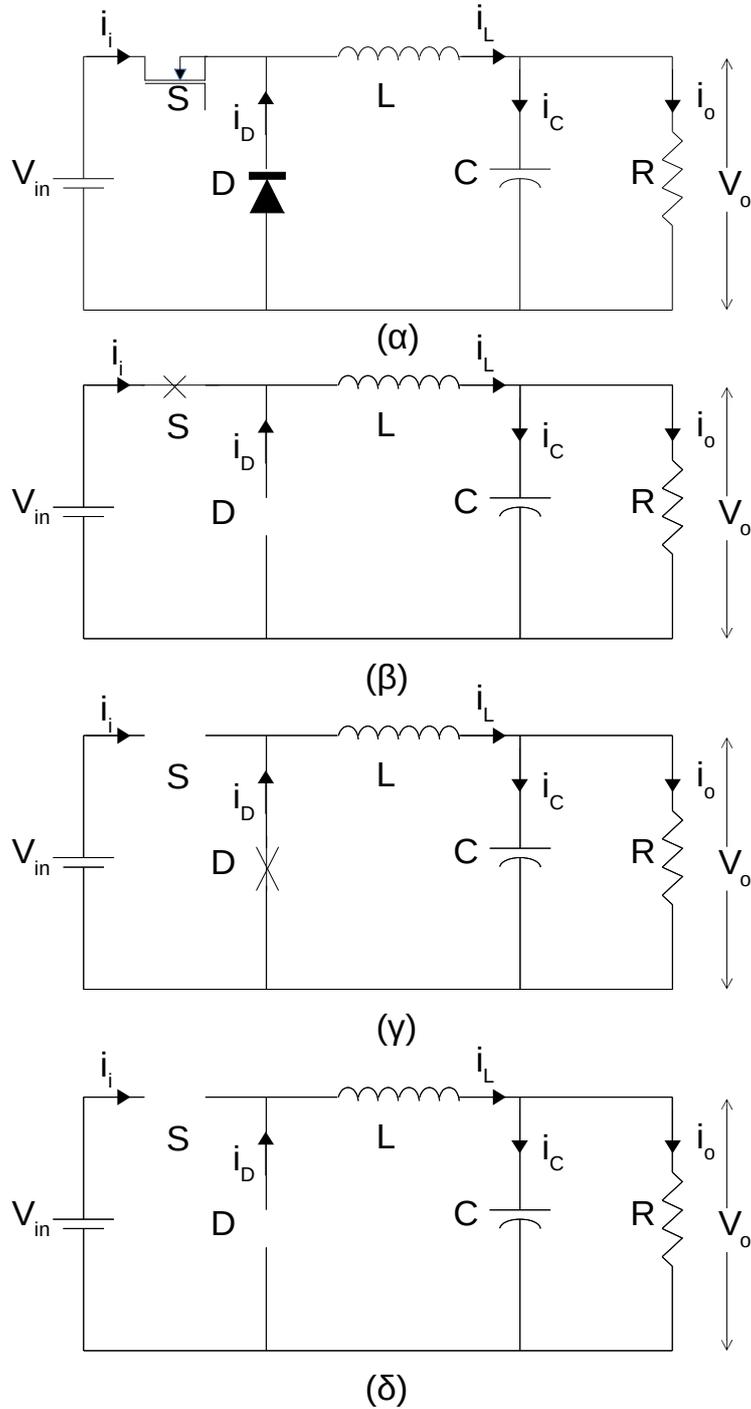
Η δεύτερη φάση αρχίζει από τη στιγμή που αφαιρείται ο παλμός οδήγησης από την πύλη του διακόπτη με αποτέλεσμα αυτός να πάει σε κατάσταση αποκοπής και η δίοδος αρχίζει να άγει για την αποφόρτιση του πηνίου εξόδου. Κατά τη φάση αυτή, της οποίας το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3(γ), ο πυκνωτής εξόδου τροφοδοτεί με ισχύ το φορτίο[37].

Στην εικόνα 5.4 παριστάνονται οι κυματομορφές του μετατροπέα όταν το ρεύμα είναι συνεχές. Σύμφωνα με τις κυματομορφές και τα κυκλώματα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\boxed{\bar{V}_o = V_{in} \cdot D} \quad (5-2) \quad (\text{όταν το ρεύμα πηνίου είναι συνεχές})$$

όπου  $D = \text{βαθμός χρησιμοποίησης } t_{ON}/T_s$   
 $T_s = \text{διακοπτική περίοδος}$

$V_{in} = \text{τάση εισόδου}$   
 $V_o = \text{μέση τιμή τάσης εξόδου}$

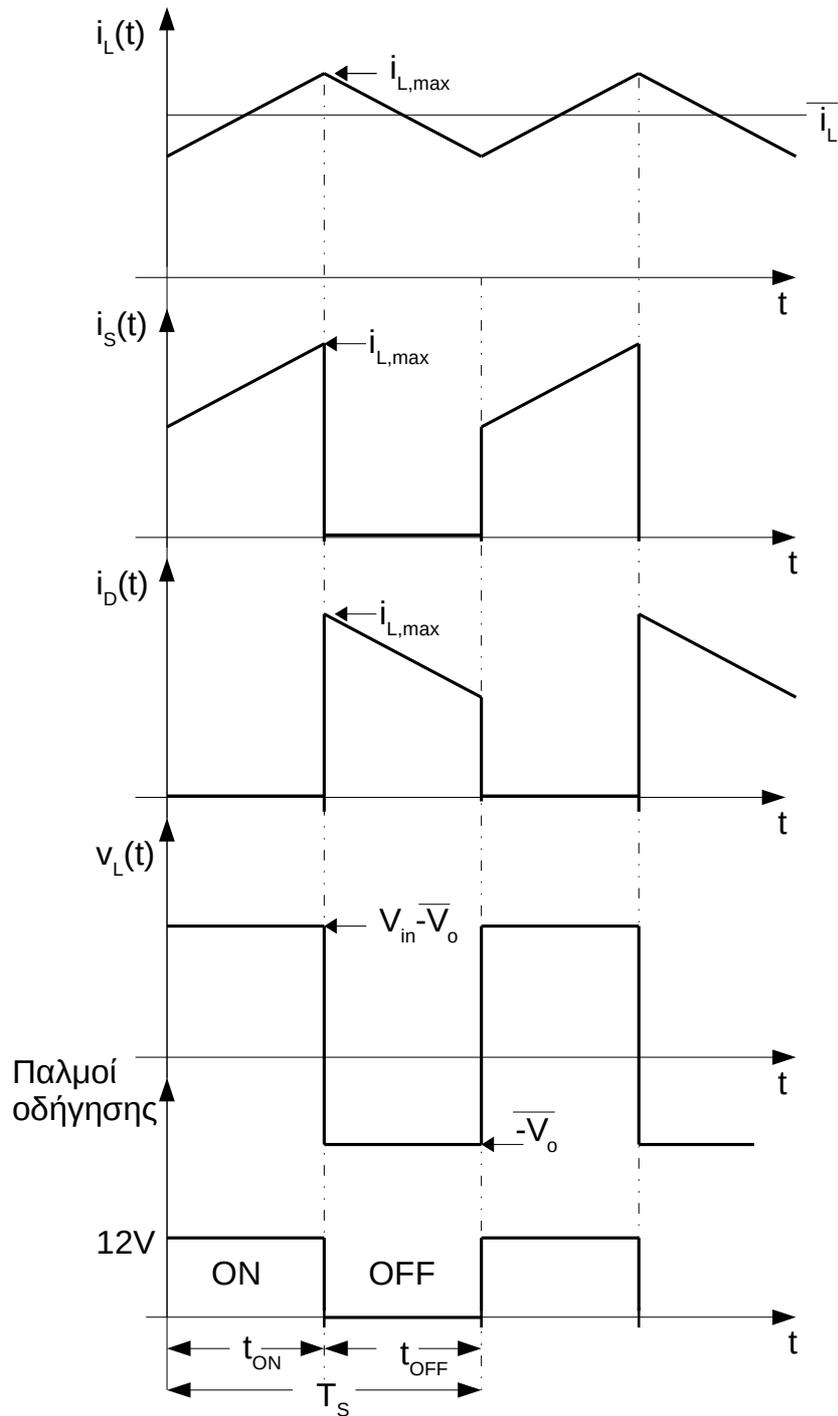


Εικόνα 5.3: Κύκλωμα υποβιβασμού dc τάσης [37]

Όπως διαπιστώνεται από τη σχέση (5-2), κρατώντας τη διακοπτική συχνότητα  $T_s$  σταθερή, αυξομειώνοντας το χρόνο αγωγής  $t_{ON}$  του διακόπτη μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος της τάσης εξόδου. Όταν ο χρόνος  $t_{ON} = 0$ , τότε η τάση εξόδου παίρνει την ελάχιστη τιμή της ίση με το μηδέν. Όταν ο χρόνος  $t_{ON} = T_s$ , τότε η τάση εξόδου παίρνει τη μέγιστη τιμή της ίση με την τάση τροφοδοσίας.

$$v_L(t) = V_{in} - v_o \quad (5-3.1) \quad (\text{όταν ο διακόπτης άγει})$$

$$v_L(t) = -v_o \quad (5-3.2) \quad (\text{όταν άγει η δίοδος})$$



*Εικόνα 5.4: Κυματομορφές μετατροπέα υποβιβασμού όταν το ρεύμα πηγίου είναι συνεχές[37]*

Όπως και στην περίπτωση του μετατροπέα ανύψωσης, όταν σχεδιάζουμε έναν μετατροπέα υποβιβασμού για μία συγκεκριμένη πηγή, μας ενδιαφέρει αυτός να λειτουργεί με συνεχές ρεύμα εξόδου. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούμε τους δύο παρακάτω τύπους για την επιλογή της τιμής του πηνίου και του πυκνωτή.

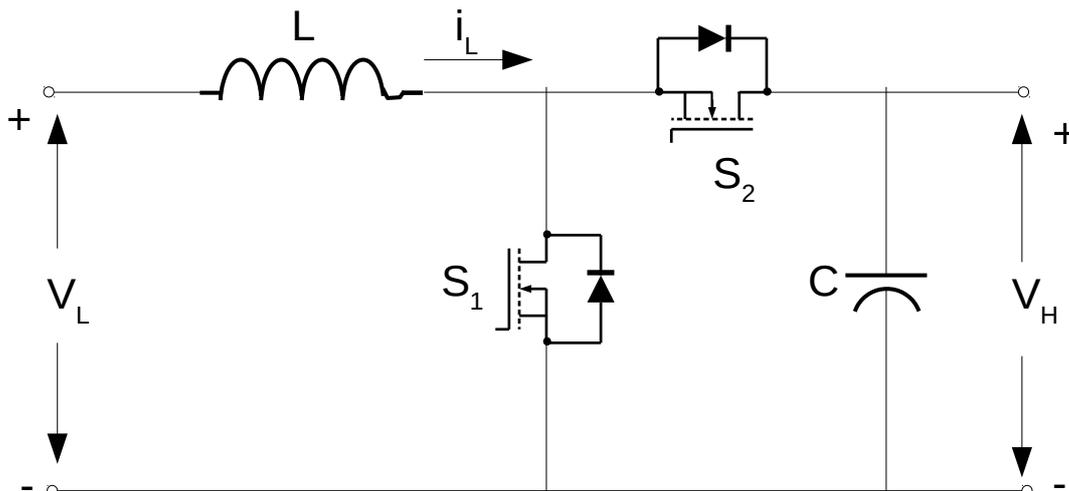
$$L_{\min} = \frac{R_{L,\max}(1-D)}{2 \cdot f_s} \quad (5-4)$$

$$C_{\min} = \frac{D \cdot V_o \cdot (1-D)}{2 \cdot f_s^2 \cdot V_r \cdot L_{\min}} \quad (5-5)$$

όπου:  $R_{L,\max} = \frac{V_o}{I_{o,\min}}$  και  $V_r = 1\% V_o$  η κυμάτωση της τάσης εξόδου.

### 5.3.2 Αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης

Για να πετύχουμε και τις δύο απαραίτητες μετατροπές τάσης δεν είναι υποχρεωτικό να χρησιμοποιήσουμε δύο διαφορετικές διατάξεις. Υπάρχει μία διάταξη με διακοπτικά στοιχεία ημιαγωγούς IGBT ή Mosfet που μπορεί να επιτελέσει και υποβιβασμό και ανύψωση dc τάσης, και επίσης επιτυγχάνει αμφίδρομη ροή ενέργειας. Αυτό το κύκλωμα ονομάζεται αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού συνεχούς τάσης σε συνεχή. Το κύκλωμά του φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 5.5: Αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού συνεχούς τάσης

Ο εν λόγω μετατροπέας αποτελείται από τη σύνδεση ενός μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης έχοντας κοινό στοιχείο το πηνίο. Δηλαδή, πρόκειται για έναν συμμετρικό μετατροπέα ο οποίος μπορεί να άγει και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου μετατροπέα είναι ότι προσδιορίζοντας τους παλμούς που πηγαίνουν στα διακοπτικά στοιχεία, μπορούμε να ορίσουμε αν θα λειτουργήσει σαν μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (buck), σαν μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost) και σαν μετατροπέας υποβιβασμού/ανύψωσης τάσης (buck /boost), χωρίς καμία τροποποίηση της τοπολογίας του.

Όταν θέλουμε η μπαταρία να φορτίζεται από το μικροδίκτυο, μας ενδιαφέρει να υποβιβάσουμε την τάση των 380 volt σε 96 volt. Έτσι, εκείνη τη χρονική στιγμή θέλουμε το κύκλωμα να λειτουργεί ως μετατροπέας υποβιβασμού και για να το πετύχουμε αυτό θέλουμε το στοιχείο S2 να είναι διακόπτης και το στοιχείο S1 να είναι απλή δίοδος. Άρα, δίνουμε παλμούς στο S2 και μηδενικό σήμα στο S1. Αντίστροφα, όταν θέλουμε η μπαταρία να εγγεί ισχύ στο μικροδίκτυο, θέλουμε μετατροπέα ανύψωσης. Δηλαδή, το στοιχείο S1 να είναι διακόπτης και το S2 απλή δίοδος. Έτσι, πρέπει αντίστοιχα να δώσουμε παλμούς στο S1 και μηδενικό σήμα στο S2.

Η σχεδίαση ενός αμφίδρομου μετατροπέα μπορεί να γίνει ακολουθώντας τους τύπους για την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή πηνίου και πυκνωτή που δίνει η ανάλυση του μετατροπέα υποβιβασμού και του μετατροπέα ανύψωσης. Οι τελικές τιμές πηνίου και πυκνωτή που πρέπει να επιλέξουμε για τη διάταξή μας πρέπει να ακολουθούν τον παρακάτω κανόνα:

$$L_{\min} = \max \{ L_{\min/\text{buck}}, L_{\min/\text{boost}} \} \quad (5-6)$$

$$C_{\min} = \max \{ C_{\min/\text{buck}}, C_{\min/\text{boost}} \} \quad (5-7)$$

### 5.3.3 Σχεδιασμός αμφίδρομου μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού συνεχούς τάσης για το σύστημα αποθήκευσης συσσωρευτών

Αρχικά, θα σχεδιάσουμε μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης, όπως κάναμε και στην περίπτωση του Φ/B συστήματος και του fuel cell. Οι τύποι που θα χρησιμοποιήσουμε αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3. Στο μικροδίκτυο που σχεδιάζουμε θα συνδέσουμε το μοντέλο μπαταρίας που περιγράψαμε στην παράγραφο 5.2. Επιλέξαμε η ισχύς εξόδου να είναι στα 1000 W, και η ονομαστική τάση της μπαταρίας είναι 96 volt.

Στην είσοδο του μετατροπέα θα έχουμε τάση ελάχιστης τιμής  $V_{\min} = 0.9V_{\text{nom}} = 86.4$  volt και μέγιστης  $V_{\max} = 1.1V_{\text{nom}} = 105.6$  volt, δηλαδή  $\pm 10\% * V_{\text{nom}}$ . Ο μετατροπέας θα πρέπει να λειτουργεί σε κατάσταση συνεχούς αγωγής και να δίνει στην έξοδο τάση  $V_{\text{out}} = 380\text{V}$ , την ονομαστική του μικροδικτύου. Επίσης, θεωρούνται ως δεδομένα για τους υπολογισμούς ότι  $I_{\text{omin}} = 5\% * I_{\text{Omax}}$ ,  $f_s = 5\text{kHz}$  και  $V_r / V_{\text{out}} < 1\%$ . Τα 5 kHz είναι μία διακοπτική συχνότητα, στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά ο μετατροπέας.

Ο μετατροπέας θα παρουσιάζει μέγιστη ισχύ εισόδου  $P_{\text{in,max}} = 1000$  W. Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας δεν παρουσιάζει απώλειες έχουμε:  $P_{\text{out,max}} = 1 * P_{\text{in,max}} = 1000\text{W}$ .

Άρα, το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα εξόδου θα είναι:

$$I_{Omax} = \frac{P_{Omax}}{V_{out}} = 2.632 \text{ A} \quad I_{Omin} = 0.05 \cdot I_{Omax} = 0.132 \text{ A}$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση αντίστοιχα είναι:

$$R_{Lmax} = \frac{V_{out}}{I_{Omin}} = 2888 \Omega \text{hm} \quad R_{Lmin} = \frac{V_{out}}{I_{Omax}} = 144.38 \Omega \text{hm}$$

Γνωρίζοντας την τάση εισόδου και εξόδου μπορεί να βρεθεί ο βαθμός χρησιμοποίησης του μετατροπέα ανύψωσης. Έτσι, υπολογίζεται και το εύρος τιμών του D που είναι:

$$D_{min} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{Imax}}} = 0.722$$

$$D_{norm} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{Inorm}}} = 0.747$$

$$D_{max} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{out}}{V_{Imin}}} = 0.773$$

Οι τιμές είναι αποδεκτές καθώς ο βαθμός χρησιμοποίησης δέχεται τιμές  $0 < D < 1$ . Η επιλογή της τιμής του πηνίου θα γίνει με χρήση του τύπου που έχουμε προαναφέρει.

$$L_{min} = \frac{R_{max} D_{min} (1 - D_{min})^2}{2 f_s} = 16.1 \text{ mH}$$

Για να βρούμε τον πυκνωτή εξόδου έχουμε ως δεδομένο ότι η κυμάτωση της τάσης είναι 1%. Άρα,

$$V_{C_{pp}} \approx V_r - V_{r_{c_{pp}}}$$

$$V_r = 0.01 \cdot V_{out} = 3.8 \text{ volt}$$

$$V_{r_{c_{pp}}} = \frac{V_r}{2} = 1.9 \text{ volt}$$

Άρα, η τιμή του πυκνωτή από τον τύπο που αναφέραμε στην ανάλυση προηγουμένως πρέπει να είναι:

$$C_{\min} = \frac{I_{O\max} \cdot D_{\max}}{f_s \cdot V_{C\text{pp}}} = \frac{V_{\text{out}} \cdot D_{\max}}{R_{L\min} \cdot f_s \cdot V_{C\text{pp}}} = 214.16 \mu\text{F}$$

Προχωράμε με τη σχεδίαση του *μετατροπέα υποβιβασμού συνεχούς τάσης* με βάση την ανάλυση που έγινε στην παράγραφο 5.3.1. Η τάση εισόδου τώρα είναι τα **380 volt**, ενώ η τάση εξόδου είναι **V<sub>out</sub> = 96 volt**. Η μέγιστη ισχύς φόρτισης είναι **P<sub>max</sub> = 1000W** και κατά μήκος του μετατροπέα έχουμε πτώση τάσης  $\eta = 95\%$ , ενώ δεν έχουμε απώλειες ισχύος. Η διακοπτική συχνότητα παραμένει **f<sub>s</sub> = 5kHz** και ισχύουν οι σχέσεις: **I<sub>omin</sub> = 10% \* I<sub>Omax</sub>** και **V<sub>r</sub>/ V<sub>out</sub> < 1%**.

Επομένως, το μέγιστο και ελάχιστο ρεύμα εξόδου δίνονται από τις σχέσεις:

$$I_{O\max} = \frac{P_{O\max}}{V_{\text{out}}} = 10.42 \text{ A} \quad I_{O\min} = 0.1 \cdot I_{O\max} = 1.04 \text{ A}$$

Η μέγιστη και η ελάχιστη αντίσταση αντίστοιχα είναι:

$$R_{L\max} = \frac{V_{\text{out}}}{I_{O\min}} = 92.16 \Omega\text{hm} \quad R_{L\min} = \frac{V_{\text{out}}}{I_{O\max}} = 9.21 \Omega\text{hm}$$

Και ο βαθμός χρησιμοποίησης για το μετατροπέα υπολογίζεται ως εξής:

$$0.95 \cdot D = \frac{96 \text{ volt}}{380 \text{ volt}} \quad \rightarrow \quad D = \frac{0.2526}{0.95} \quad \rightarrow \quad D = 0.266$$

Για να έχουμε συνεχή λειτουργία θέλουμε  $D \geq 1/3$ . Επομένως, για  $D = 1/3$  έχουμε:

$$(5-4) \quad \rightarrow \quad L_{\min} = \frac{R_{L,\max}(1-D)}{2 \cdot f_s} \quad \rightarrow \quad L_{\min} = 6.14 \text{ mH}$$

Όσον αφορά την επιλογή του πυκνωτή ακολουθούμε την εξής ανάλυση:

$$V_r = 0.01 \cdot V_{\text{out}} = 0.96 \text{ volt}$$

$$\Delta I_{\max} = \frac{V_{\text{out}} \cdot (1 - D)}{f_s \cdot L_{\min}} = 2.08 \text{ A}$$

$$r_{\text{cm}} = \frac{V_r}{\Delta I_{\max}} = 0.4615 \text{ volt}$$

Άρα, από τον τύπο (5-5) προκύπτει η ελάχιστη τιμή πυκνωτή για το μετατροπέα:

$$C_{\min} = \frac{D}{2 \cdot f_s \cdot r_{\text{cm}}} = 72.23 \mu\text{F}$$

Αφού λοιπόν εξετάσαμε ξεχωριστά τους μετατροπείς υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης, μπορούμε να επιλέξουμε τα στοιχεία του αμφίδρομου μετατροπέα από τους τύπους (5-6) και (5-7).

*Επιλογή πηνίου για τον αμφίδρομο μετατροπέα*

$$L_{\min} = \max(L_{\min/\text{buck}}, L_{\min/\text{boost}}) \rightarrow$$

$$L_{\min} = \max(6.14 \text{ mH}, 16.1 \text{ mH}) = 16.1 \text{ mH}$$

Εμείς για τη διάταξη μας λοιπόν επιλέγουμε πηνίο τιμής **L = 20mH**. Παρακάτω φαίνεται το παράθυρο καθορισμού της αυτεπαγωγής του πηνίου.

*Επιλογή πυκνωτή για τον αμφίδρομο μετατροπέα*

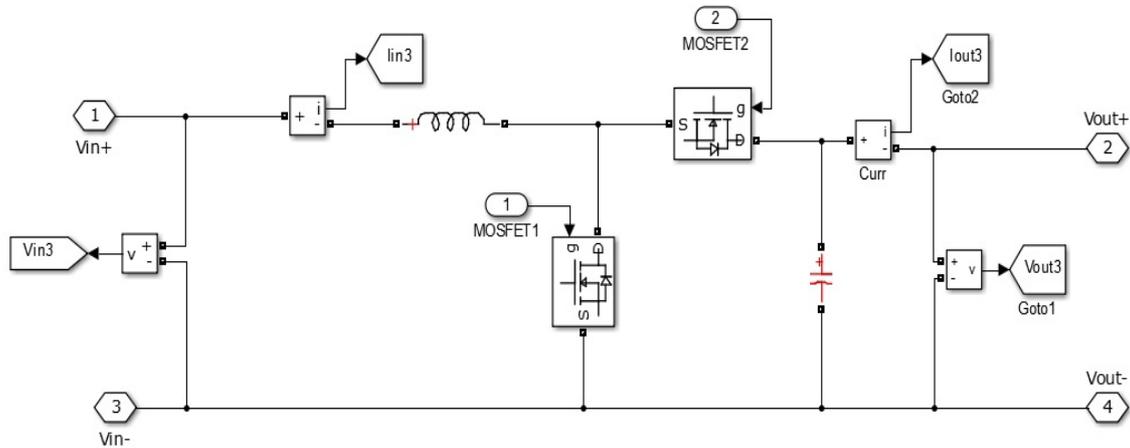
$$C_{\min} = \max(C_{\min/\text{buck}}, C_{\min/\text{boost}}) \rightarrow$$

$$C_{\min} = \max(72.23 \mu\text{F}, 214.16 \mu\text{F}) = 214.16 \mu\text{F}$$

Στο μοντέλο μας τοποθετούμε πυκνωτή με τιμή **C = 400μFarad**. Παρακάτω φαίνεται το παράθυρο καθορισμού της χωρητικότητας του ηλεκτρολυτικού πυκνωτή.

Το μόνο που απέμεινε είναι να επιλέξουμε το διακοπτικό στοιχείο για το κύκλωμα. Χρησιμοποιήσαμε Mosfet με τα προκαθορισμένα στοιχεία που είχε το Simulink. Το παράθυρο των χαρακτηριστικών του μοντέλου φαίνεται ακολούθως.

Επομένως, με βάση τις επιλογές που κάναμε παραπάνω, κατασκευάσαμε στο περιβάλλον του Simulink έναν μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης συνεχούς τάσης που θα συνδέει με σωστό τρόπο τις μπαταρίες στον κοινό ζυγό του μικροδικτύου μας. Ακολουθεί το τελικό κύκλωμα του μετατροπέα.



*Εικόνα 5.6: Το κύκλωμα του αμφίδρομου μετατροπέα της μπαταρίας*

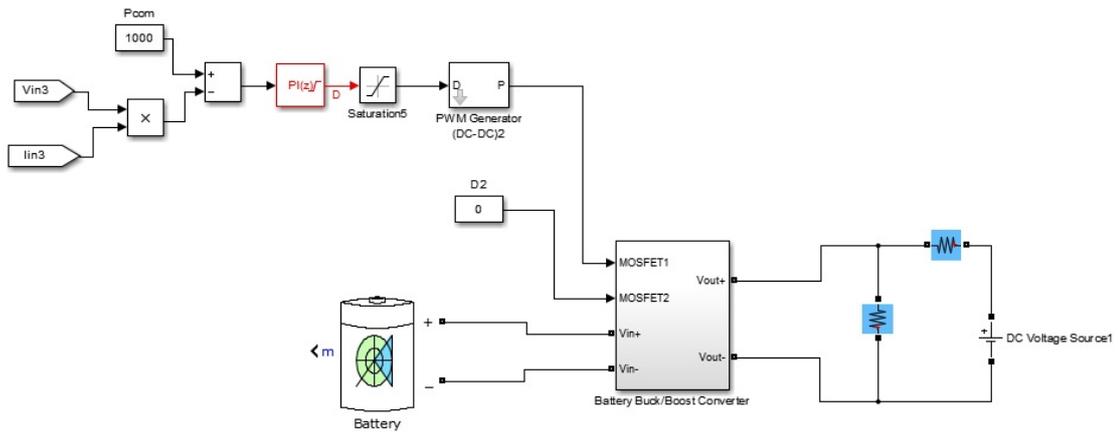
## 5.4 Έλεγχος συστήματος αποθήκευσης μπαταριών

### 5.4.1 Έλεγχος με σταθερό P (Pcommand)

Όπως και με το fuel cell, πρώτα θα επιχειρήσουμε τη δημιουργία ενός μηχανισμού που θα ελέγχει την ισχύ εξόδου του συστήματος fuel cell. Δηλαδή, στόχος μας είναι κάθε χρονική στιγμή να ορίζουμε εμείς μια τιμή ισχύος, και το σύστημα συσσωρευτών να λειτουργεί με σταθερή ισχύ εξόδου σύμφωνα με αυτή την τιμή αναφοράς.

Για να το επιτύχουμε αυτό θα δώσουμε ως σήμα στην παλμογεννήτρια PWM, όχι κάποια συγκεκριμένη τιμή για το D, αλλά το σήμα εξόδου ενός ελεγκτή PI, ο οποίος με τη σειρά του τροφοδοτείται με τη διαφορά της επιθυμητής ισχύος (Pcommand) από την πραγματική ισχύ του συστήματος εκείνη τη χρονική στιγμή. Η πραγματική ισχύς θα προκύψει από το γινόμενο ρεύματος και τάσης εξόδου των συσσωρευτών.

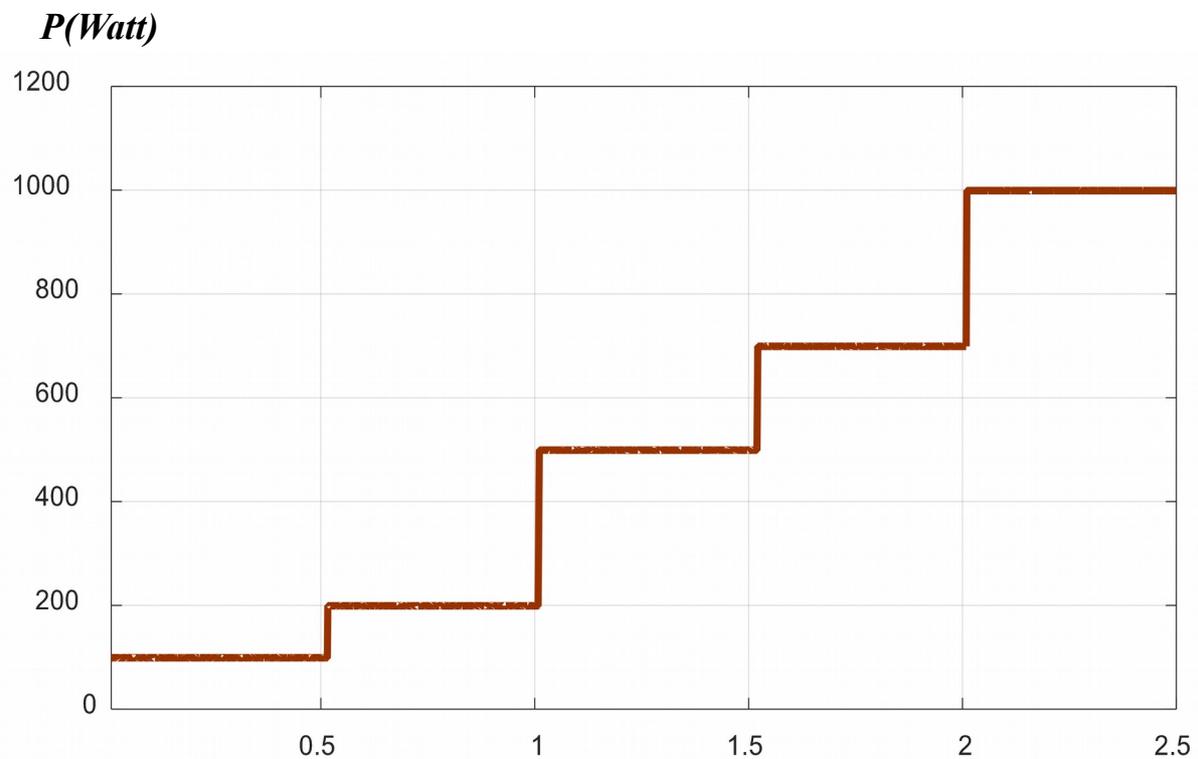
Αυτό το κομμάτι του ελέγχου είναι ίδιο ακριβώς με αυτό που σχεδιάσαμε για τον έλεγχο σταθερής ισχύος για το fuel cell. Οι μπαταρίες όμως παρουσιάζουν μία σημαντική διαφορά. Ο μετατροπέας που χρησιμοποιούν απαιτεί δύο και όχι ένα σήμα για να ελεγχθεί, καθώς έχει δύο διακοπτικά στοιχεία. Πρέπει να σχεδιάσουμε λοιπόν δύο ξεχωριστούς ελεγκτές που θα παράγουν τα δύο αυτά σήματα. Ο πρώτος ελεγκτής θα δίνει παλμούς στο Mosfet 1 που φαίνεται στο κύκλωμα. Άρα, θα είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία εκφόρτισης των μπαταριών. Η διάταξη με την οποία θα εκτελέσουμε προσομοίωση εκφόρτισης με σταθερή ισχύ φαίνεται παρακάτω. Ο ελεγκτής δίνει παλμούς στο στοιχείο S1, ενώ στο S2 δίνουμε μηδενικό σήμα.



Εικόνα 5.7: Η διάταξη της προσομοίωσης του ελέγχου P command(εκφόρτιση)

Στη δοκιμή που εκτελέσαμε, ορίσαμε διάφορες τιμές P command σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Οι τιμές που επιλέξαμε φαίνονται τον πίνακα παρακάτω.

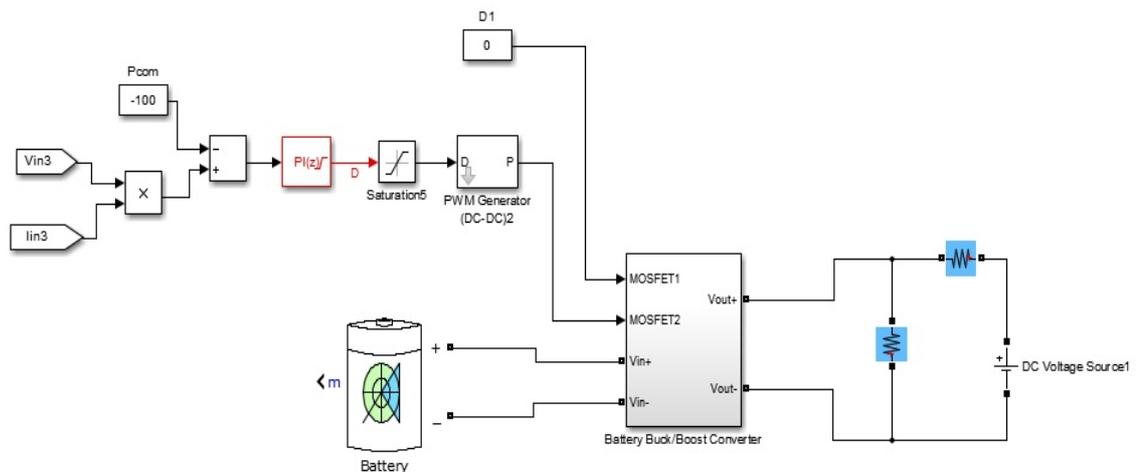
Χρόνος(sec)	Pcommand(Watt)	Χρόνος(sec)	Pcommand(Watt)
0-0.5	100	1.5-2	700
0.5-1	200	2-2.5	1000
1-1.5	500		



Εικόνα 5.8: Ισχύς εξόδου της μπαταρίας με έλεγχο Pcommand(εκφόρτιση) t(sec)

Παραπάνω φαίνεται το διάγραμμα ισχύος εξόδου που προέκυψε από την προσομοίωση. Παρατηρούμε ότι το σύστημα των συσσωρευτών ανταποκρίνεται στην τιμή αναφοράς που εμείς ορίζουμε. Προφανώς οι τιμές που ορίζουμε πρέπει να είναι πάντα μέσα στα τεχνικά όρια, δηλαδή με μέγιστη τιμή ισχύος 1000W.

Τώρα πρέπει να σχεδιάσουμε και έναν ελεγκτή που θα εκτελεί με τον ίδιο τρόπο έλεγχο σταθερής ισχύος για αρνητικές τιμές, δηλαδή για τη λειτουργία της φόρτισης των μπαταριών. Αυτό που πρέπει να αλλάξουμε είναι ότι στον PI ελεγκτή πρέπει να εισάγουμε αντίθετα τη διαφορά πραγματικής και επιθυμητής ισχύος  $\Delta P = P_{real} - P_{com}$ . Η διάταξη του ελεγκτή παραθέτεται ακολούθως. Τώρα, ενώ ο ελεγκτής δίνει παλμούς στο στοιχείο S2, το S1 παίρνει μηδενικό σήμα.

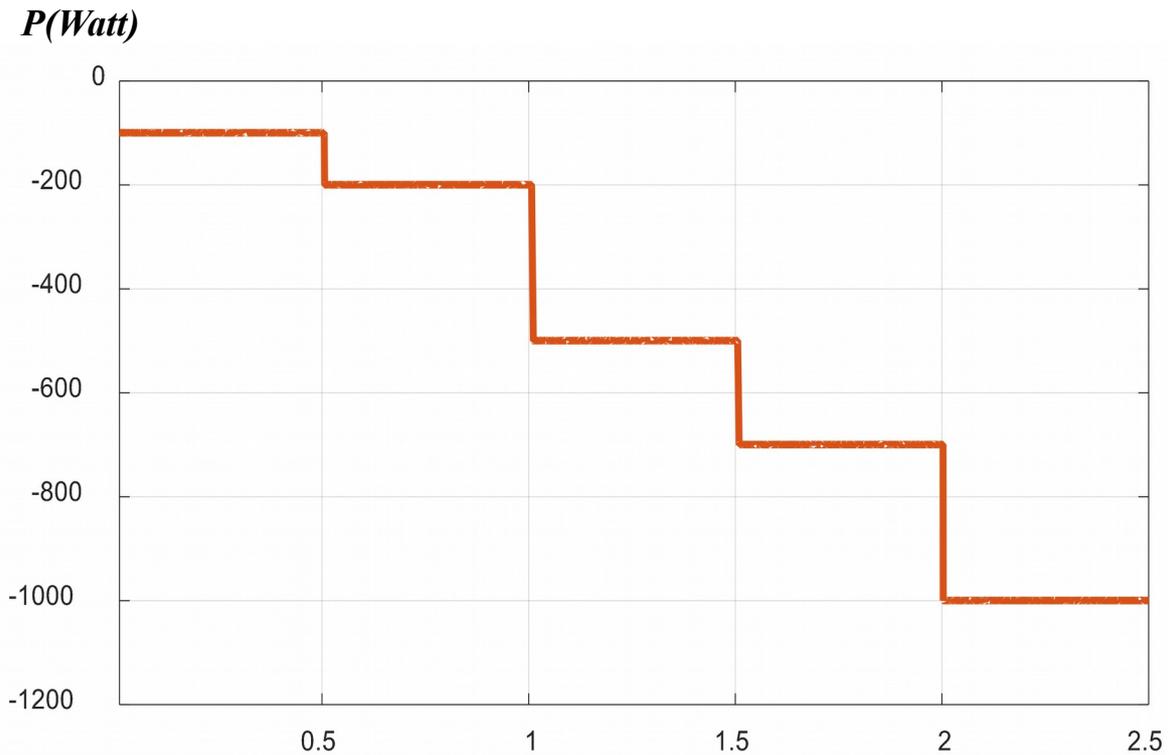


*Εικόνα 5.9: Η διάταξη της προσομοίωσης του ελέγχου P command(φόρτιση)*

Στη δοκιμή που εκτελέσαμε, ορίσαμε διάφορες τιμές P command σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Οι τιμές που επιλέξαμε φαίνονται τον πίνακα παρακάτω.

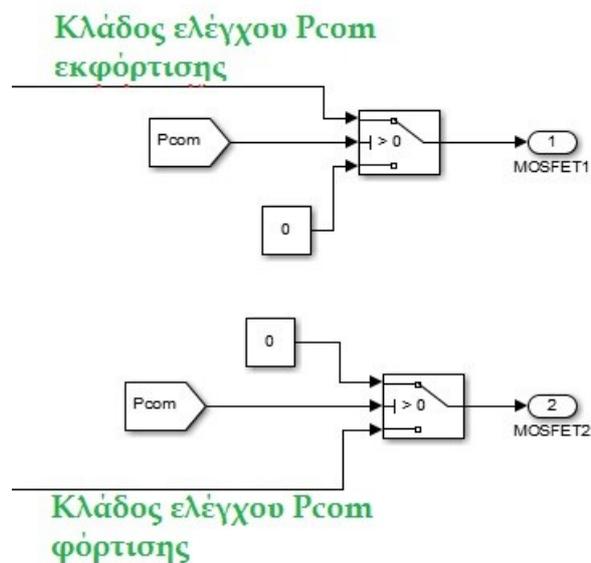
Χρόνος(sec)	Pcommand(Watt)	Χρόνος(sec)	Pcommand(Watt)
0-0.5	-100	1.5-2	-700
0.5-1	-200	2-2.5	-1000
1-1.5	-500		

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ισχύος που έδωσε η προσομοίωση φόρτισης. Και πάλι παρατηρούμε ότι ο ελεγκτής πετυχαίνει να καθορίσει την ισχύ με την οποία φορτίζεται το σύστημα αποθήκευσης των μπαταριών.



Εικόνα 5.10: Ισχύς εξόδου της μπαταρίας με έλεγχο Pcommand(φόρτιση) t(sec)

Τώρα πρέπει να σκεφτούμε έναν τρόπο να αυτοματοποιήσουμε την εναλλαγή μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης. Δηλαδή, να μπορούμε να ορίζουμε ότι τιμή θέλουμε κάθε στιγμή στο διάστημα από -1000 έως 1000 Watt και οι μπαταρίες να ανταποκρίνονται στην εντολή. Για το σκοπό αυτό λοιπόν, προσθέτουμε μία συνθήκη η οποία ανάλογα με το αν η τιμή του P command είναι θετική ή αρνητική επιλέγει αν θα πάρει παλμούς το στοιχείο S1 ή το S2.



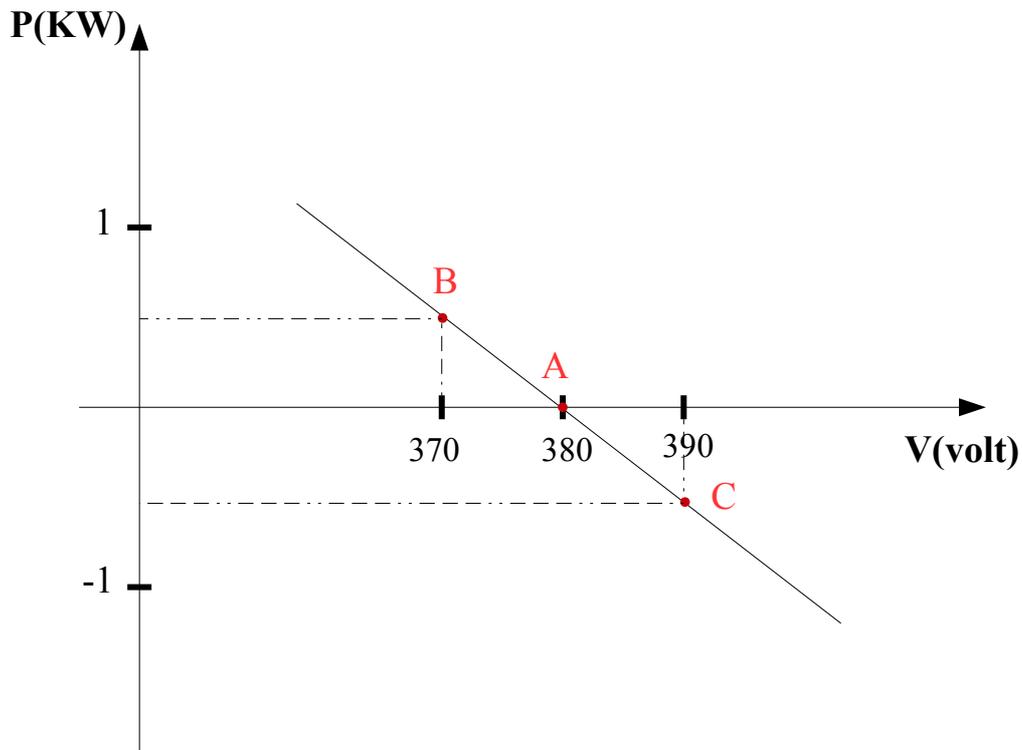
Εικόνα 5.11: Υλοποίηση συνδυασμού των δύο ελέγχων

### 5.4.2 Έλεγχος Droop

Σχεδιάσαμε λοιπόν, τον ελεγκτή που μπορεί να καθορίζει την ισχύ που θα εγχέουν στο μικροδίκτυο ή θα απορροφούν από αυτό οι μπαταρίες. Τώρα πρέπει να κατασκευάσουμε έναν μηχανισμό, ώστε να μπορεί το σύστημα αποθήκευσης να σταθεροποιεί την τάση χωρίς την ύπαρξη του κυρίου δικτύου.

Όταν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο κοινής ωφελείας, την τάση του ζυγού τη διαμορφώνει το δίκτυο. Στην περίπτωση όμως που το μικροδίκτυο λειτουργεί απομονωμένο, όπως έχουμε πει, το ρόλο του δικτύου θα αναλαμβάνει το fuel cell με τον έλεγχο droop και το συμπληρωματικό βρόχο επαναφοράς της τάσης. Από τις μπαταρίες θέλουμε να συμβάλλουν στο έργο της κυψέλης καυσίμου. Δηλαδή, σε κάθε μεταβολή του φορτίου που θα «χαλάει» το ισοζύγιο ισχύος στον ζυγό, θέλουμε η μπαταρία να βοηθάει με στιγμιαία έγχυση ή απορρόφηση ισχύος ανάλογα με το αν το φορτίο αυξήθηκε ή μειώθηκε.

Θα ακολουθήσουμε παρόμοια στρατηγική με τον ελεγκτή του fuel cell. Ειδικότερα, θα εφαρμόσουμε τη λογική του ελέγχου droop. Την αρχή λειτουργίας αυτού του ελέγχου την εξηγήσαμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, οπότε δε θα την επαναλάβουμε. Επειδή ο ρόλος των μπαταριών θα είναι βοηθητικός, ο ελεγκτής τους θέλουμε να εκτελεί το πρώτο επίπεδο του ελέγχου droop και όχι το δεύτερο επίπεδο που επαναφέρει την τάση στα 380 volt. Παρακάτω φαίνεται η φθίνουσα χαρακτηριστική που θα υλοποιεί ο ελεγκτής των συσσωρευτών.

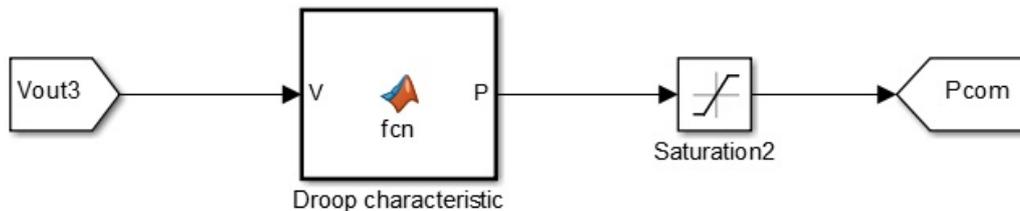


Εικόνα 5.12: Χαρακτηριστική droop του συστήματος των μπαταριών

Συνεπώς, η χαρακτηριστική droop των μπαταριών θα είναι σταθερή και δε θα μετακινείται. Όταν η τάση βρίσκεται σταθερή στα 380 volt θέλουμε η ισχύς εξόδου να είναι μηδενική, άρα η βέλτιστη ισχύς  $P_{opt}$  θα είναι ίση με το μηδέν. Όταν το φορτίο αυξάνεται και παρουσιάζεται πτώση στην τάση του ζυγού, θέλουμε η χαρακτηριστική να δίνει θετική τιμή  $P_{command}$ , δηλαδή να εκφορτίζονται οι συσσωρευτές. Αντίθετα, όταν μειώνεται το φορτίο και έχουμε αύξηση τάσης θέλουμε η χαρακτηριστική να δίνει αρνητική τιμή  $P_{command}$ , δηλαδή εντολή για φόρτιση. Η εξίσωση που θα ακολουθεί ο ελεγκτής φαίνεται παρακάτω. Το  $a$  είναι η σταθερά droop.

$$P = (380 - V) \cdot a \quad (5-8)$$

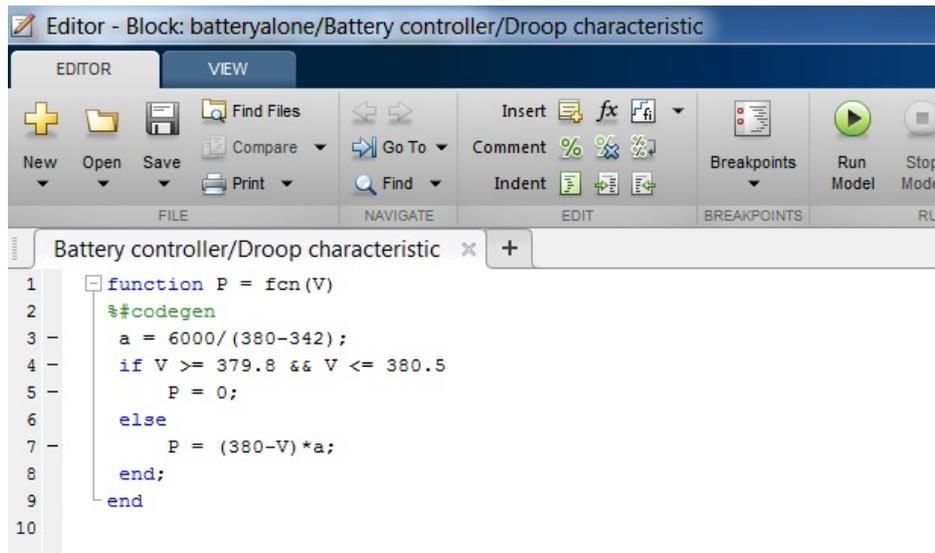
Για να υλοποιήσουμε αυτόν τον ελεγκτή στο Simulink χρησιμοποιήσαμε ένα block συνάρτησης που δέχεται ως είσοδο την τάση και δίνει ως έξοδο την ισχύ  $P$  που υπαγορεύει η χαρακτηριστική droop. Το saturation block μετά τη συνάρτηση περιορίζει την ισχύ στο διάστημα  $[-1000, 1000 \text{ Watt}]$  που είναι τα τεχνικά όρια των συσσωρευτών. Κατόπιν, εισάγουμε αυτή την ισχύ στον προηγούμενο ελεγκτή που κατασκευάσαμε, δηλαδή στον μηχανισμό για το  $P_{command}$ . Ακολουθεί το μοντέλο που σχεδιάσαμε στο Simulink.



*Εικόνα 5.13: Ο ελεγκτής droop που σχεδιάσαμε για την μπαταρία στο Simulink*

Παρακάτω φαίνεται η συνάρτηση που υπολογίζει την ισχύ  $P_{com}$  με βάση τη σχέση (5-8). Η τιμή του  $a$  επιλέχθηκε μετά από πολλές για δοκιμές για το συνολικό μικροδίκτυο. Για τη συγκεκριμένη προσομοίωση που δεν έχουμε παρουσία του fuel cell, χρησιμοποιήσαμε την ίδια τιμή  $a = 100$ . Η συνθήκη (if) εξασφαλίζει ότι όταν η τάση είναι στα 380 volt η μπαταρία θα είναι ανενεργή.

Επειδή, ο ελεγκτής αρχίζει να γίνεται αρκετά περίπλοκος, δημιουργούμε ξεχωριστό υποσύστημα battery controller, ώστε να είναι πιο οργανωμένο και κατανοητό το συνολικό μοντέλο. Όπως φαίνεται στο συνολικό κύκλωμα που ακολουθεί, οι δύο κλάδοι  $P_{com}$  για εκφόρτιση και φόρτιση και η συνάρτηση της χαρακτηριστικής droop ανήκουν στο υποσύστημα το οποίο δίνει σαν έξοδο τους παλμούς οδήγησης των δύο IGBT του μετατροπέα.



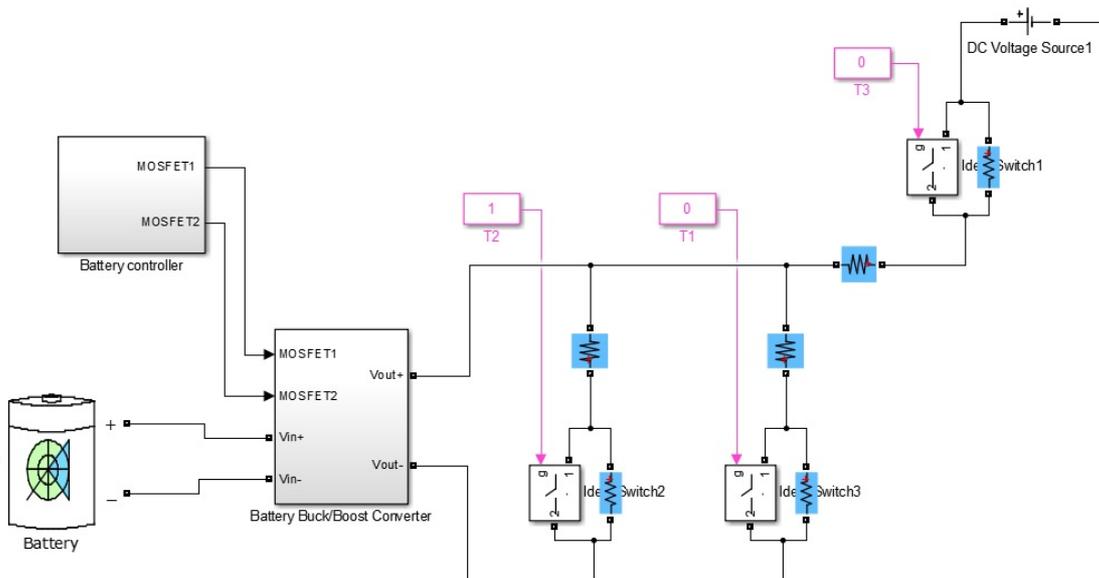
```

1 function P = fcn(V)
2     %#codegen
3     a = 6000/(380-342);
4     if V >= 379.8 && V <= 380.5
5         P = 0;
6     else
7         P = (380-V)*a;
8     end;
9 end
10

```

*Εικόνα 5.14: Το περιεχόμενο της συνάρτησης droop characteristic*

Ακολουθεί το συνολικό διάγραμμα του συστήματος, όπως το κατασκευάσαμε στο περιβάλλον του Simulink. Οι διακόπτες με είσοδο μία σταθερά και μία παράλληλη αντίσταση εξυπηρετούν στη σύνδεση και αποσύνδεση του δικτύου και τη μεταβολή του φορτίου ενώ «τρέχει» η προσομοίωση. Απλά αλλάζουμε τη σταθερά από 1 σε 0. Η τιμή των δύο αντιστάσεων του φορτίου είναι 722 Ωm και 288.8 Ωm, που αντιπροσωπεύουν φορτίο 200W και 500W σε τάση 380 volt.



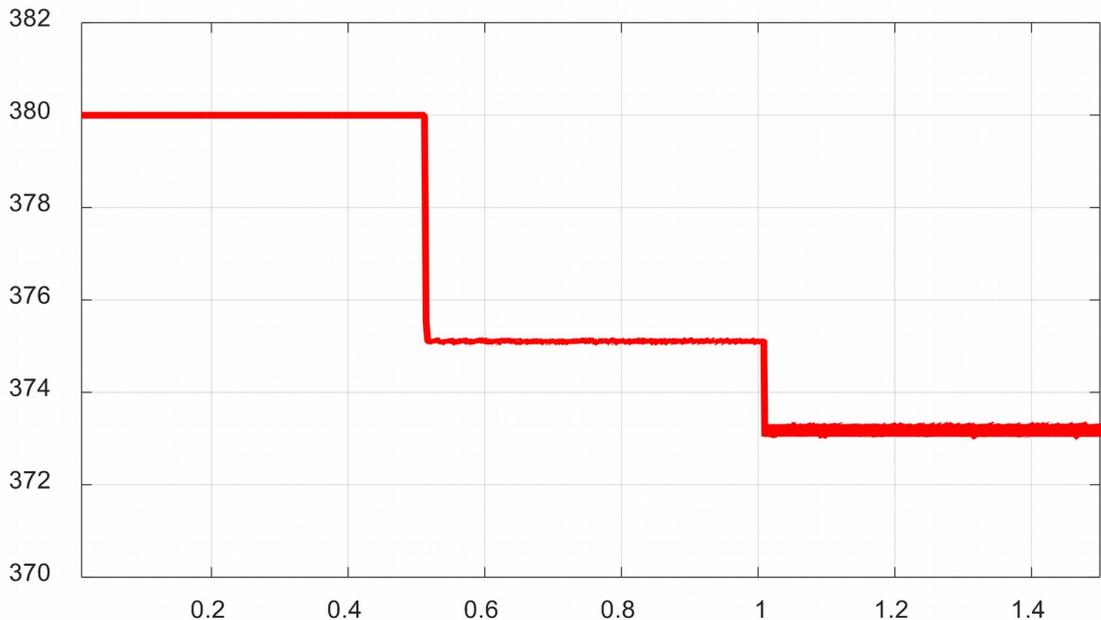
*Εικόνα 5.15: Το συνολικό σύστημα του fuel cell*

Στην προσομοίωση που εκτελέσαμε το φορτίο των 500 Watt και η μπαταρία θα είναι αρχικά συνδεδεμένα με το δίκτυο (την πηγή τάσης 380 volt), ώστε να ηλεκτριστεί το μικροδίκτυο με τα 380 volt. Με βάση τη σχέση (5-8) λοιπόν η μπαταρία θα έχει μηδενική ισχύ  $P_{com} = 0$ . Στη συνέχεια, θα αποσυνδέσουμε το δίκτυο και άμεσα θα δημιουργηθεί ανισορροπία ισχύος. Το φορτίο θα ζητάει 500W, ενώ η μπαταρία δε θα παράγει καθόλου ισχύ. Στην προσομοίωση θα παρατηρήσουμε πως θα αντιδράσει ο

έλεγχος droop που έχουμε σχεδιάσει και αν θα κατορθώσει να σταθεροποιήσει την τάση του μικροδικτύου χωρίς την πηγή τάσης. Τέλος, αφού σταθεροποιηθεί η τάση θα αυξήσουμε κι άλλο το φορτίο στα 700 Watt, ώστε να δοκιμάσουμε αν θα αντιμετωπίσει και αυτή τη διαταραχή ο έλεγχος.

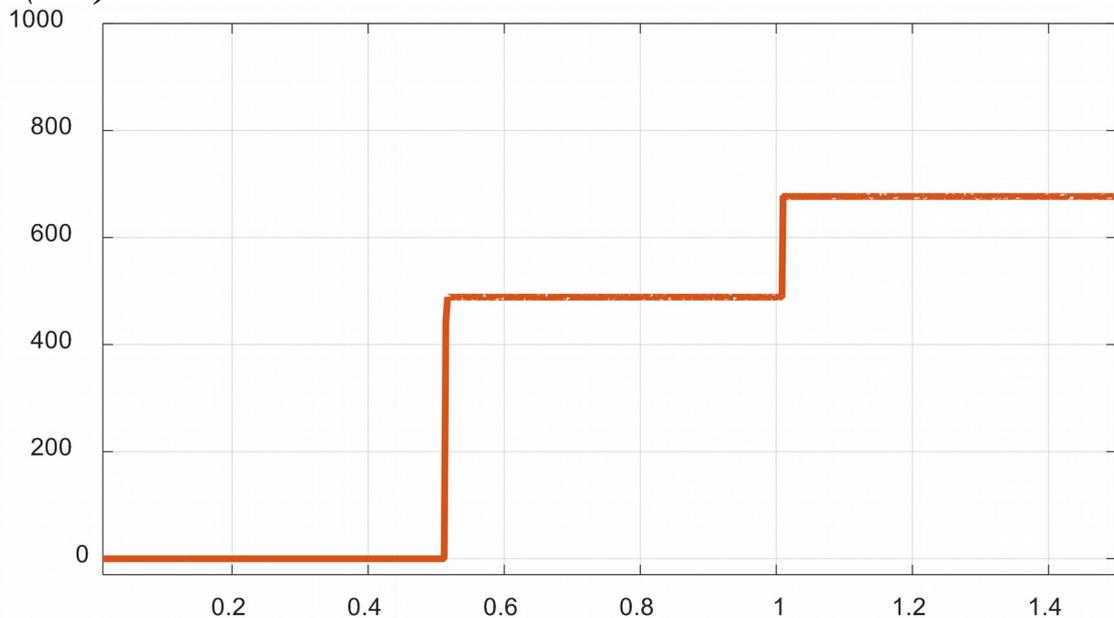
Παρακάτω βλέπουμε τα διαγράμματα ρεύματος και τάσης στην έξοδο του μετατροπέα. Μέχρι τη χρονική στιγμή 0.5 sec το δίκτυο ήταν συνδεδεμένο και μετά έχουμε απομονωμένη λειτουργία. Όπως παρατηρούμε, ο έλεγχος droop ανταποκρίθηκε στην αναντιστοιχία ισχύος επιτυχώς. Αύξησε την ισχύ των μπαταριών από 0 σε 500 W, και σταθεροποίησε την τάση στα 375 volt περίπου. Στη συνέχεια, που το φορτίο έγινε 700 W, και πάλι ο έλεγχος σταθεροποίησε την τάση στα 373 volt.

***P(Watt)***



*Εικόνα 5.16: Ισχύς εξόδου του fuel cell με τον τελικό ελεγκτή t(sec)*

***V(Volt)***

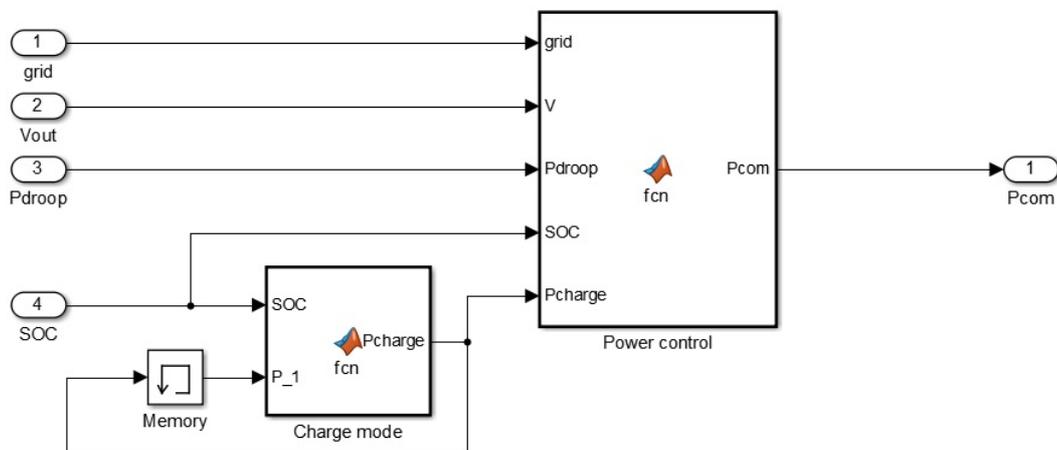


*Εικόνα 5.17: Τάση εξόδου του fuel cell με τον τελικό ελεγκτή t(sec)*

### 5.4.3 Περιορισμοί στον έλεγχο των μπαταριών

Κατορθώσαμε λοιπόν να υλοποιήσουμε τον έλεγχο droop και για την μπαταρία. Το ζήτημα που προκύπτει όμως, είναι η ικανότητα της μπαταρίας να ανταποκριθεί στις εντολές του ελεγκτή κάθε στιγμή. Δε μπορούμε να ζητάμε από την μπαταρία να παράγει ισχύ για το μικροδίκτυο όταν είναι πολύ μικρό το SoC της, διότι έτσι θα μειώσουμε πολύ το χρόνο ζωής της. Επίσης, δε μπορούμε να ζητάμε από την μπαταρία να φορτιστεί όταν  $SoC = 100\%$ , γιατί μπορεί να την καταστρέψουμε λόγω υπερφόρτισης. Αυτό που έμεινε τότε είναι να συμπεριλάβουμε τους περιορισμούς αυτούς στον έλεγχο.

Το fuel cell θα έχει δεξαμενή υδρογόνου η οποία θα πρέπει να ελέγχεται και να συμπληρώνεται όταν είναι κοντά στο να αδειάσει. Η «δεξαμενή» της μπαταρίας είναι το SoC. Αν και θα φορτίζεται στιγμιαία κάθε φορά που μειώνεται το φορτίο, αυτό δεν είναι αρκετό. Πρέπει να φορτίζουμε για μεγάλο χρονικό διάστημα την μπαταρία μέχρι να φορτιστεί πλήρως. Αυτό μπορεί να γίνεται όταν το μικροδίκτυο είναι σε συνδεδεμένη λειτουργία. Τότε η τάση θα ρυθμίζεται από το δίκτυο και η μπαταρία θα είναι ελεύθερη να φορτιστεί. Άρα, η πρώτη συνθήκη που ορίζουμε είναι **όταν το δίκτυο είναι ON και  $SoC \leq 95\%$ , η μπαταρία να φορτίζεται με  $P_{com} = -500 \text{ Watt}$** . Το αν έχουμε ή όχι το δίκτυο, συμβολίζεται με το σήμα grid (grid = 1  $\rightarrow$  ON, grid = 0  $\rightarrow$  OFF). Το εν λόγω σήμα μπορεί να προέρχεται από κάποιον ανιχνευτή στο σημείο κοινής σύνδεσης. Αν η μπαταρία είναι φορτισμένη θέλουμε η μπαταρία να είναι ανενεργή. Άρα, **για grid = 1 και  $SoC > 95\%$ , η μπαταρία να παίρνει εντολή  $P_{com} = 0$** .

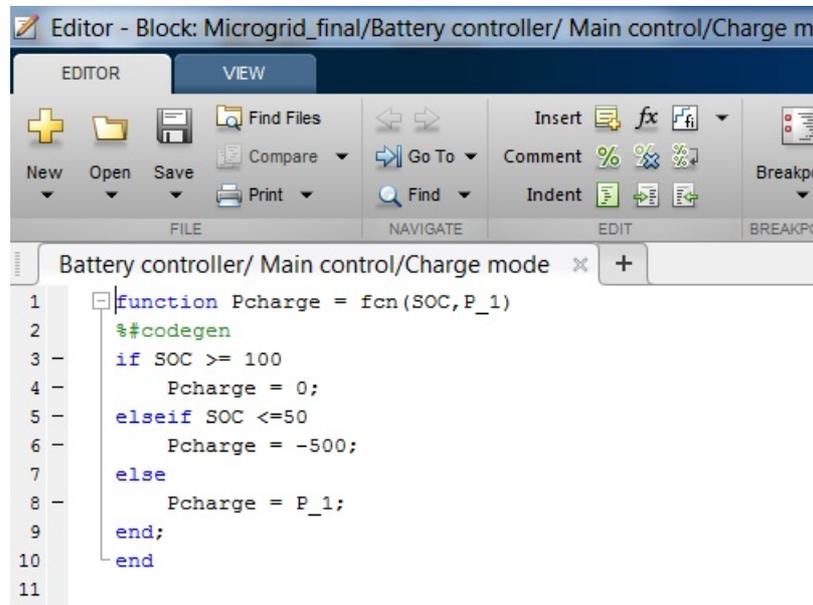


Εικόνα 5.18: Η υλοποίηση των περιορισμών της μπαταρίας στον έλεγχο

Στην απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου, επιθυμούμε η μπαταρία να εκτελεί έλεγχο droop. Αν είναι όμως, πλήρως φορτισμένη θέλουμε να μην φορτίζεται καθόλου. Δηλαδή, **για grid = 0 αν  $SoC \geq 100\%$ ,  $P_{com} = P_{droop}$  μόνο αν  $P_{droop} \geq 0$ , αλλιώς  $P_{com} = 0$** . Αυτό μπορεί να ελέγχεται με τη συνθήκη για την τάση του ζυγού  $V \leq 380$  volt, αφού μόνο όταν  $V > 380$  volt ο έλεγχος droop δίνει εντολή για αρνητικό  $P_{com}$ .

Σε περίπτωση που κατά την απομονωμένη λειτουργία, η μπαταρία αποφορτιστεί κάτω από το 50% θέλουμε να μπει σε λειτουργία σταθερής φόρτισης μέχρις ότου να φορτιστεί πλήρως. Για να το πετύχουμε αυτό ορίζουμε την μεταβλητή Pcharge, η οποία θα παίρνει τιμές ανάλογα με το SoC. Αν  $50\% < \text{SoC} < 100\%$  τότε το Pcharge παίρνει την τιμή της προηγούμενης χρονικής στιγμής από ένα block μνήμης. Αν το SoC σε κάποια χρονική στιγμή γίνει  $\leq 50\%$ , τότε το Pcharge παίρνει τιμή ίση με -500Watt. Οπότε, όταν αυξηθεί λόγω της φόρτισης το SoC η φόρτιση δε θα σταματήσει. Μόνο όταν  $\text{SoC} = 100\%$  το Pcharge μηδενίζεται και πάλι.

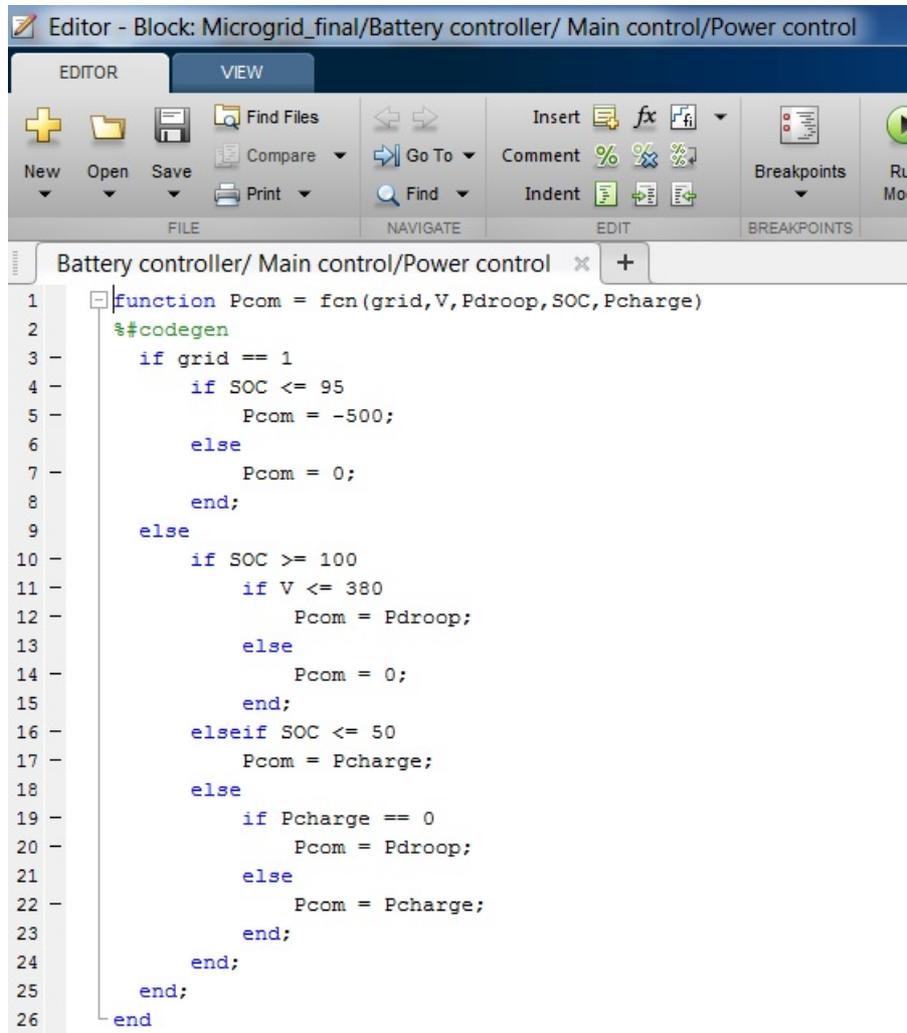
Παρακάτω φαίνεται η συνάρτηση που ορίζει το Pcharge. Την τιμή του Pcharge, την τιμή ισχύος που δίνει ο έλεγχος droop Pdroop, την τάση, το SoC και το σήμα grid τα εισάγουμε στην συνάρτηση Power control που δίνει την τελική τιμή του P command λαμβάνοντας υπόψιν όλους τους περιορισμούς που αναφέραμε.



```
Editor - Block: Microgrid_final/Battery controller/ Main control/Charge mode
EDITOR VIEW
+ New Open Save Find Files Compare Print Go To Find Insert Comment Indent Breakpo
FILE NAVIGATE EDIT BREAKPO
Battery controller/ Main control/Charge mode x +
1 function Pcharge = fcn(SOC,P_1)
2 %#codegen
3 if SOC >= 100
4     Pcharge = 0;
5 elseif SOC <=50
6     Pcharge = -500;
7 else
8     Pcharge = P_1;
9 end;
10 end
11
```

Εικόνα 5.19: Ο κώδικας της συνάρτησης charge mode

Παρακάτω φαίνεται το περιεχόμενο της συνάρτησης Power Control που υπολογίζει την ισχύ που θα δοθεί στον έλεγχο P command με βάση όλους τους περιορισμούς της μπαταρίας.



```
1 function Pcom = fcn(grid,V,Pdroop,SOC,Pcharge)
2     %#codegen
3     if grid == 1
4         if SOC <= 95
5             Pcom = -500;
6         else
7             Pcom = 0;
8         end;
9     else
10        if SOC >= 100
11            if V <= 380
12                Pcom = Pdroop;
13            else
14                Pcom = 0;
15            end;
16        elseif SOC <= 50
17            Pcom = Pcharge;
18        else
19            if Pcharge == 0
20                Pcom = Pdroop;
21            else
22                Pcom = Pcharge;
23            end;
24        end;
25    end;
26 end
```

Εικόνα 5.20: Ο κώδικας της συνάρτησης power control

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### Φορτία μικροδικτύου DC

#### 6.1 Περιγραφή φορτίων μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο που σχεδιάζουμε έχει σκοπό να υποστηρίξει το ηλεκτρικό φορτίο μιας μικρής κατοικίας σε περιόδους που το κύριο δίκτυο τροφοδοσίας παρουσιάζει πρόβλημα. Η μέγιστη κατανάλωση του φορτίου που επιλέξαμε λοιπόν είναι 6000W. Στο χρόνο που το δίκτυο προσφέρει ικανοποιητική τάση, το μικροδίκτυο απλά θα εξοικονομεί ενέργεια χρησιμοποιώντας την ισχύ της Φ/Β συστοιχίας και θα φροντίζει να φορτίζει την μπαταρία για μετέπειτα χρήση.

Στην περίπτωση της απομονωμένης λειτουργίας, αν το φορτίο ξεπεράσει τη μέγιστη αναμενόμενη τιμή, δε θέλουμε το σύστημα να καταρρεύσει ολοκληρωτικά. Αν για παράδειγμα έχουν συνδεθεί στο ζυγό δύο φορτία ισχύος 5kW το καθένα, οι πηγές του μικροδικτύου δε μπορούν να ικανοποιήσουν τη συνολική ζήτηση των 10kW, μπορούν όμως να απορρίψουν το ένα από τα δύο φορτία και να τροφοδοτήσουν κανονικά το άλλο. Έτσι, η τάση θα παραμείνει στα 380 volt, και δε θα χάσουν την τροφοδοσία και τα δύο φορτία.

Το κριτήριο με το οποίο, μπορούμε να επιλέγουμε σε κάθε κατάσταση μεταξύ δύο φορτίων, είναι η κρισιμότητά τους. Κάποια φορτία είναι λιγότερο σημαντικά από άλλα. Στα νοσοκομεία αυτός ο διαχωρισμός γίνεται με γνώμονα κατά πόσο εξαρτάται από ένα φορτίο η ανθρώπινη ζωή. Για το λόγο αυτό βάση νομοθεσίας, το ηλεκτρικό σύστημα ενός νοσοκομείου διαθέτει συστήματα αδιάλειπτης παροχής ηλεκτρισμού (UPS), αλλά και ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη για περιπτώσεις αποτυχίας του δικτύου παροχής.

Στην εγκατάστασή μας, δεν υπάρχουν τόσο κρίσιμα φορτία αλλά μπορεί να γίνει κάποιος διαχωρισμός. Για παράδειγμα, ένας υπολογιστής είναι πιο σημαντικός από ένα κλιματιστικό, διότι με διακοπή της τροφοδοσίας μπορεί να χαθούν σημαντικά δεδομένα. Επίσης, σημαντικό είναι το ψυγείο διότι μπορεί τα ευαίσθητα τρόφιμα να χαλάσουν αν μείνει για πολύ χρόνο χωρίς τροφοδοσία, καθώς και ορισμένα φώτα ασφαλείας για να μπορούν οι χρήστες να κινηθούν σε περίπτωση διακοπής. Επομένως, για το λόγο αυτό εμείς δημιουργούμε 3 ομάδες(γραμμές) φορτίων με διαφορετική προτεραιότητα, για τις οποίες πρέπει να βρούμε έναν αυτόματο μηχανισμό, ο οποίος θα εκτελεί απόρριψη φορτίου όταν αυτό είναι απαραίτητο.

#### 6.2 Μοντέλο φορτίου για το μικροδίκτυο μας

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ηλεκτρικών φορτίων. Με βάση την τάση τροφοδοσίας τους χωρίζονται σε δύο ομάδες:

- ◆ Φορτία DC: Φωτιστικά σώματα Led, υπολογιστές, φορτιστές ηλεκτρονικών συσκευών (κινητά, φορητοί υπολογιστές, ψηφιακές κάμερες)
- ◆ Φορτία AC: Ηλεκτρική κουζίνα, ψυγείο, πλυντήριο κτλ.

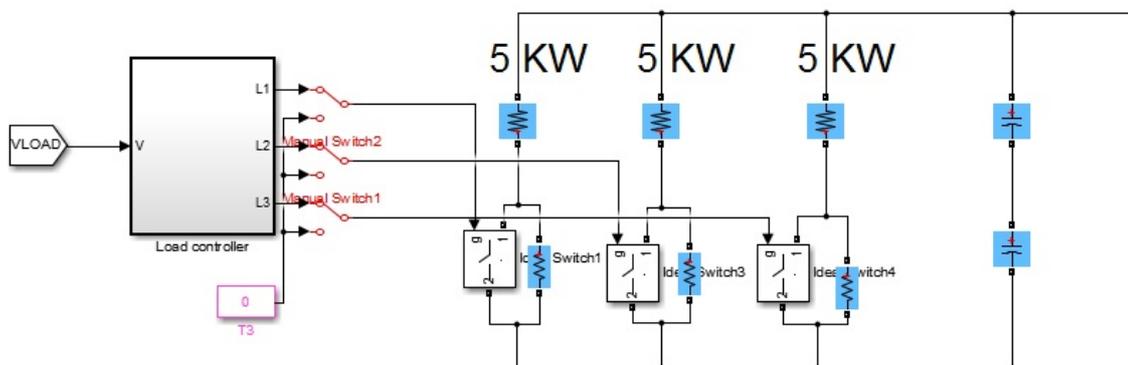
Ενώ τα φορτία DC μπορούν να συνδεθούν άμεσα σε ένα DC μικροδίκτυο απλώς με έναν μετατροπέα DC-DC, τα AC φορτία απαιτούν και κάποιον inverter.

Όλα τα παραπάνω είδη φορτίων, αναπαριστώνται ικανοποιητικά σε ηλεκτρικά κυκλώματα με το μοντέλο της σύνθετης αντίστασης. Ακόμα και οι κινητήρες μπορούν να προσομοιωθούν με μία αντίσταση και ένα πηνίο. Η αντίσταση εκφράζει την ενεργό ισχύ που καταναλώνει το φορτίο, ενώ η επαγωγή την άεργο ισχύ.

Στην περίπτωση όμως του μικροδικτύου μας, δεν υπάρχει άεργος ισχύς, διότι η τάση είναι DC. Άρα, όλα τα φορτία στο Matlab/Simulink μοντελοποιούνται με μία ιδανική αντίσταση. Η επιλογή της τιμής της θα γίνεται σε κάθε προσομοίωση με γνώμονα την ισχύ που θέλουμε να καταναλώνει το φορτίο. Η ονομαστική τάση του φορτίου είναι τα 380 volt, άρα η αντίσταση ενός φορτίου ονομαστικής ισχύος  $P_{load}$  θα είναι:

$$R_{Load} = \frac{380^2}{P_{Load}} \quad (6-1)$$

Για να έχουμε τη δυνατότητα της απόρριψης φορτίου, αλλά και να μεταβάλλουμε το φορτίο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, χρησιμοποιούμε όχι μία, αλλά τρεις παράλληλες αντιστάσεις. Κάθε αντίσταση εξοπλίζεται με έναν διακόπτη (όπως αυτόν που χρησιμοποιήσαμε για τη σύνδεση και αποσύνδεση του κυρίου δικτύου). Ο διακόπτης δέχεται δύο τιμές, 0→OFF και 1→ON. Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα φορτίου που χρησιμοποιήσαμε στο συνολικό μικροδίκτυο.



*Εικόνα 6.1: Η υλοποίηση του ελεγκτή φορτίου στο Simulink*

Στο σχήμα φαίνονται οι διακόπτες που προαναφέραμε. Μπορούν να πάρουν τιμή από το υποσύστημα Load controller, το οποίο είναι υπεύθυνο για την απόρριψη φορτίου και θα αναλυθεί ακολούθως. Επίσης, έχουμε τοποθετήσει 3 διακόπτες που παρακάμπτον τον ελεγκτή και δίνουν ελεγχόμενα από εμάς τιμή 0 σε κάποιον από τους διακόπτες των φορτίων. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να αλλάζουμε τη συνολική ισχύ του φορτίου, ενώ τρέχει η προσομοίωση, για να ελέγξουμε τη συμπεριφορά του μικροδικτύου στη μεταβολή αυτή. Οι αντιστάσεις που είναι παράλληλα συνδεδεμένες με τους διακόπτες έχουν πολύ μεγάλη τιμή και είναι απαραίτητες για να μη δημιουργηθούν υψηλά ρεύματα κατά την αποσύνδεση μιας ομάδας φορτίων.

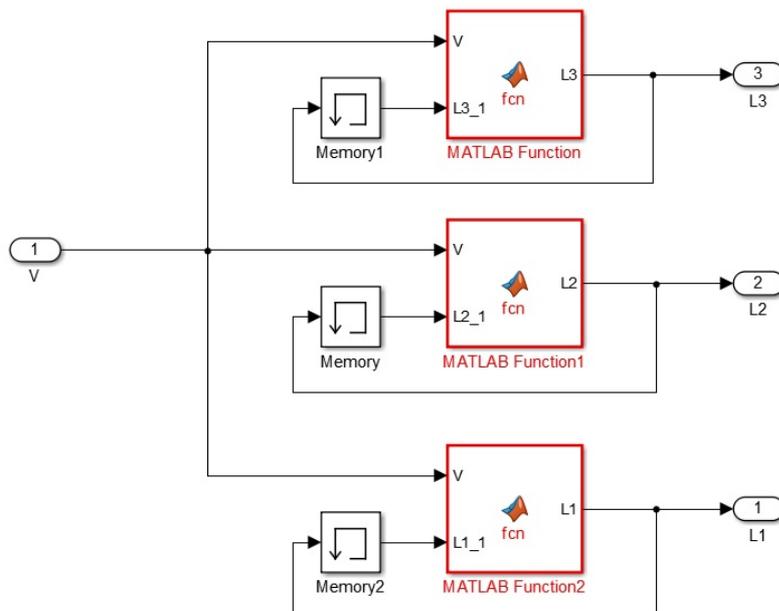
### 6.3 Έλεγχος φορτίου

Ο ελεγκτής που φαίνεται στο κύκλωμα παραπάνω, θέλουμε να καταλαβαίνει πότε πρέπει να αποσυνδέσει κάποια από τις ομάδες φορτίων. Η μοναδική πληροφορία που θα έχει ο ελεγκτής είναι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του φορτίου, λόγω της έλλειψης επικοινωνιών. Άρα, πρέπει να αποφασίσουμε με βάση την τάση μια στρατηγική απόρριψης φορτίου.

Ξέρουμε ότι η υπάρχει έλλειψη ισχύος, όταν η τάση πέσει χαμηλότερα από το κατώφλι των 361 volt(- 5% της ονομαστικής). Αυτό διότι, οι ελεγκτές του fuel cell και της μπαταρίας έχουν σχεδιαστεί, ώστε να μην επιτρέπουν στην τάση να πέσει κάτω από το όριο αυτό. Άρα, από αυτό το σημείο και μετά πρέπει να επιλέξουμε επίπεδα τάσης στα οποία θα αποσυνδέουμε κάθε ομάδα φορτίων. Τα εν λόγω επίπεδα δεν πρέπει να έχουν σημαντική διαφορά, ώστε να μην αποσταθεροποιείται το σύστημα. Από την άλλη όμως αν η διαφορά είναι πολύ μεγάλη, μπορεί να αποσυνδέονται φορτία που μπορούν να ικανοποιηθούν. Με βάση την παραπάνω λογική και μετά από πολλές δοκιμές, επιλέξαμε ότι η ομάδα χαμηλότερης προτεραιότητας θα αποσυνδέεται όταν η τάση φτάνει στα 355 volt και η ομάδα δεύτερης προτεραιότητας στα 348 volt.

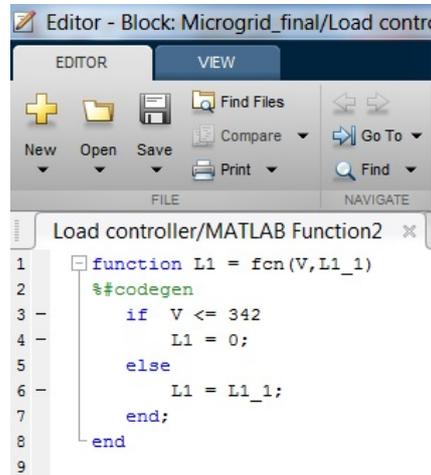
Επίσης, γνωρίζουμε ότι με βάση τους κατασκευαστές, τα περισσότερα φορτία δε μπορούν να λειτουργήσουν σωστά αν η τάση, πέσει κάτω από το -10% της ονομαστικής τιμής, δηλαδή 342 volt για εμάς. Αυτό θα είναι το έσχατο όριο στο οποίο οφείλουμε να αποσυνδέουμε και την τελευταία ομάδα φορτίων, διότι έτσι και αλλιώς θα παρουσιάσει πρόβλημα. Έτσι, η πιο κρίσιμη ομάδα φορτίων προγραμματίζουμε να αποσυνδέεται στα 342 volt.

Στο σχήμα παρακάτω φαίνεται η εσωτερική δομή του ελεγκτή του φορτίου. Βασικά, απαρτίζεται από 3 block συναρτήσεων. Η κάθε συνάρτηση δέχεται ως είσοδο την τάση και δημιουργεί ως έξοδο το σήμα(0 ή 1) ενός εκ των διακοπών L1,L2,L3 που ελέγχουν τις τρεις ξεχωριστές ομάδες φορτίων. Επίσης, κάθε συνάρτηση χρησιμοποιεί κι ένα block μνήμης, το οποίο αποθηκεύει την έξοδο της προηγούμενης χρονικής στιγμής και χρησιμεύει ώστε, όταν ανοίξει ένας διακόπτης (όταν δηλαδή η τιμή του γίνεται 0) να παραμείνει ανοικτός ακόμα και όταν η τάση επανέλθει σε φυσιολογικά επίπεδα.

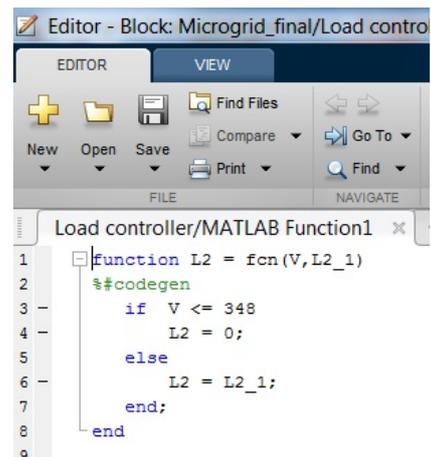


Εικόνα 6.2: Το εσωτερικό του load controller με τις 3 συναρτήσεις

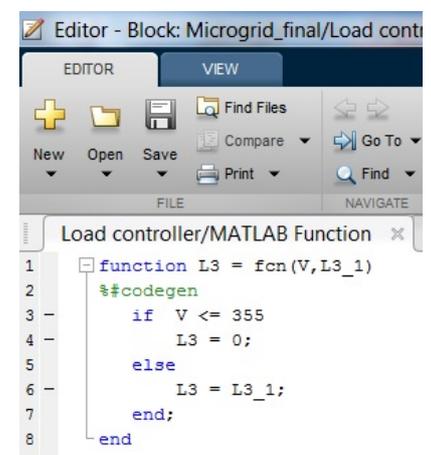
Παρακάτω φαίνονται οι συναρτήσεις που δίνουν τιμή στους διακόπτες με βάση την τάση του ζυγού. Οι μεταβλητές L1\_1, L2\_1 και L3\_1 είναι οι αποθηκευμένες τιμές και κρατούν σταθερή την κατάσταση του διακόπτη(ανοικτός) από τη στιγμή που η τάση ξεπεράσει για πρώτη φορά το κρίσιμο κατώφλι.



```
1 function L1 = fcn(V,L1_1)
2     %#codegen
3     if V <= 342
4         L1 = 0;
5     else
6         L1 = L1_1;
7     end;
8 end
```



```
1 function L2 = fcn(V,L2_1)
2     %#codegen
3     if V <= 348
4         L2 = 0;
5     else
6         L2 = L2_1;
7     end;
8 end
```



```
1 function L3 = fcn(V,L3_1)
2     %#codegen
3     if V <= 355
4         L3 = 0;
5     else
6         L3 = L3_1;
7     end;
8 end
```

*Εικόνα 6.3: Το εσωτερικό του load controller με τις 3 συναρτήσεις*

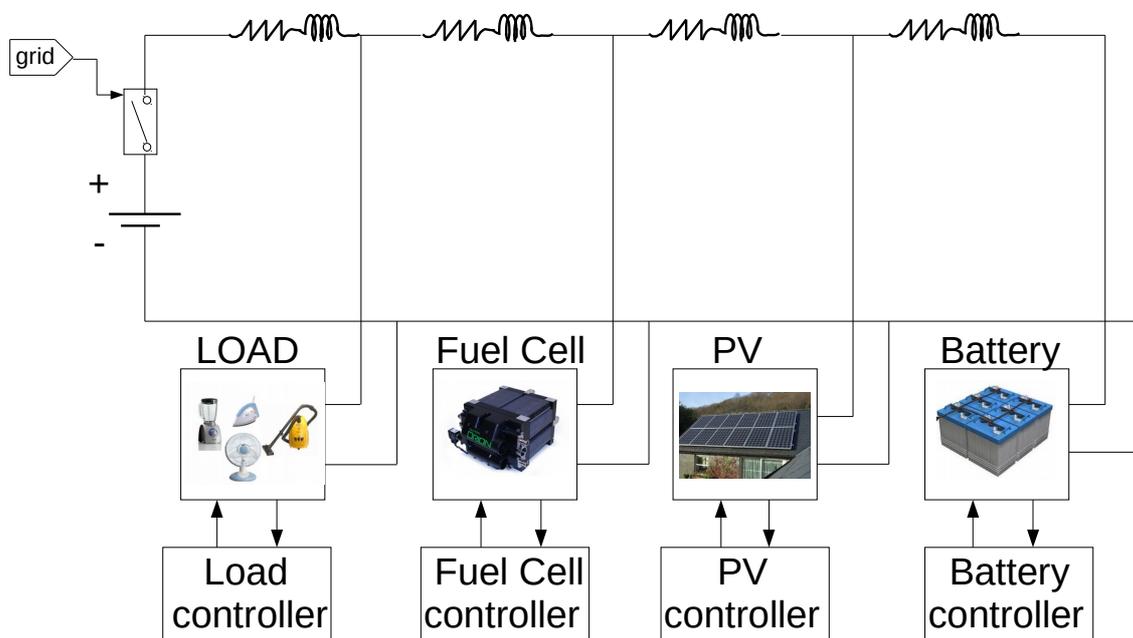
## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

### Προσομοίωση μικροδικτύου DC

#### 7.1 Περιγραφή του μικροδικτύου

Αφού έχουμε αναλύσει διεξοδικά το κάθε υποσύστημα, τώρα μπορούμε να συγκροτήσουμε το συνολικό σύστημα, ώστε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Ας συνοψίσουμε λοιπόν, τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται το μικροδίκτυο μας.

- **Φ/Β συστοιχία** μέγιστης ισχύος ~1.2kW (με τις βέλτιστες συνθήκες ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας)
- **Fuel Cell** μέγιστης ισχύος 6kW
- **Σύστημα αποθήκευσης μπαταριών** μέγιστης ισχύος εκφόρτισης - φόρτισης 1kW
- **Φορτίο** (προσομοιάζεται με 3 αντιστάσεις) το οποίο θεωρούμε ότι έχει μέγιστη κατανάλωση ~6kW.



*Εικόνα 7.1: Το συνολικό κύκλωμα του μικροδικτύου*

Όλες οι παραπάνω μονάδες συνδέονται στον κοινό DC ζυγό του μικροδικτύου μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων και ελέγχονται η κάθε μία ξεχωριστά από τον τοπικό ελεγκτή της. Στον DC ζυγό συνδέεται και το κύριο δίκτυο μέσω ενός αμφίδρομου αναστροφέα τάσης (VSC) και ενός διακόπτη νησιδοποίησης. Έτσι, το μικροδίκτυο υποστηρίζει δύο τρόπους λειτουργίας, οι οποίοι θα εναλλάσσονται μη ελεγχόμενα και απροειδοποίητα.

Ο πρώτος τρόπος είναι η *συνδεδεμένη λειτουργία*, όπου ο διακόπτης είναι κλειστός και το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο κοινής ωφελείας. Σε περίπτωση που οι ανάγκες του φορτίου δεν καλύπτονται από τους τοπικούς πόρους του μικροδικτύου, θα έχουμε ροή ισχύος από το δίκτυο προς τον ζυγό DC. Αντιθέτως, αν η Φ/Β παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση του φορτίου, θα έχουμε ροή ισχύος από το ζυγό προς το δίκτυο. Ο δεύτερος τρόπος είναι η *απομονωμένη λειτουργία*, κατά την οποία ο διακόπτης είναι ανοικτός και άρα το μικροδίκτυο νησιδοποιείται. Στην περίπτωση αυτή μόνο οι τοπικές γεννήτριες θα υποστηρίζουν τις ανάγκες του φορτίου.

Οι δύο αυτές καταστάσεις λειτουργίας, απαιτούν διαφορετική προσέγγιση ως προς τον έλεγχο που θα εφαρμόσουμε σε κάθε μονάδα. Στην περίπτωση της συνδεδεμένης λειτουργίας προτεραιότητα των μονάδων είναι η οικονομική βελτιστοποίηση της παραγωγής και η αποθήκευση ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, στην απομονωμένη κατάσταση προτεραιότητα είναι η διατήρηση της τάσης του ζυγού και η αξιοπιστία στην τροφοδοσία του φορτίου.

## **7.2 Εφαρμογή του ελέγχου DBS στο μικροδίκτυο**

Όπως έχουμε εξηγήσει, η φιλοσοφία ελέγχου που ακολουθήσαμε είναι αυτή του DBS. Δηλαδή, ο κάθε τοπικός ελεγκτής δε θα επικοινωνεί με τους άλλους και θα λαμβάνει αποφάσεις με βάση τοπικές μετρήσεις. Το σημείο κλειδί στον έλεγχο, είναι να διατηρείται η ισορροπία μεταξύ της ισχύος των πηγών (FC, VSC), του συστήματος αποθήκευσης (Battery) και των φορτίων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Αυτή η ισορροπία αντιπροσωπεύεται από τη σταθερή τάση του ζυγού V<sub>dc</sub>. Η μόνη πληροφορία που πρέπει να λαμβάνουν εξωτερικά είναι για το αν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο ή όχι. Αυτό το σήμα θα προέρχεται από έναν ανιχνευτή σφάλματος στο ΣΚΣ, που θα ελέγχει την τάση του κύριου δικτύου και όταν αυτή παρουσιάζει κάποια ανωμαλία θα ανοίγει τον διακόπτη νησιδοποίησης. Όταν η τάση επανέρχεται ο ανιχνευτής θα κλείνει τον διακόπτη και θα συνδέει και πάλι το μικροδίκτυο. Στην προσομοίωση το εν λόγω σήμα είναι το grid (grid = 1 → δίκτυο ON, grid = 0 → OFF). Αυτή η πληροφορία δεν αναιρεί τη λογική του DBS, καθώς σε περίπτωση που υποστεί βλάβη ο δίαυλος επικοινωνίας θα έχουμε μηδενικό σήμα, δηλαδή grid = 0. Άρα, οι ελεγκτές θα λειτουργούν σαν να είμαστε σε αποσυνδεδεμένη λειτουργία, το οποίο δε θα διαταράξει την τάση του ζυγού.

Όσον αφορά την *αποσυνδεδεμένη λειτουργία* του μικροδικτύου είναι χωρισμένη σε πέντε διαφορετικές καταστάσεις (modes). Αυτά τα 5 modes προσδιορίζονται από διαφορετικά επίπεδα τάσης στο ζυγό. Οι τοπικοί ελεγκτές δηλαδή, καταλαβαίνουν την μετάβαση από το ένα mode στο άλλο, με τη μέτρηση της τάσης του ζυγού, χωρίς πρόσθετες συνδέσεις επικοινωνίας. Η ονομαστική τάση ορίζεται V<sub>nom</sub> = 380V και οποιαδήποτε απόκλιση από την τιμή αυτή, νοείται ως μετάβαση σε άλλη κατάσταση. Οι διαφορετικές καταστάσεις της νησιδοποιημένης λειτουργίας είναι οι παρακάτω:

**Mode 0:**  $V_{dc} > 380V$ . Οι πηγές δίνουν περισσότερη ισχύ από αυτή που χρειάζεται το φορτίο. Άρα, οι διεσπαρμένες γεννήτριες πρέπει να μειώσουν τη συνισταμένη παραγωγή τους.

**Mode 1:**  $V_{dc} = 380V$ . Οι πηγές δίνουν ακριβώς όση ισχύ χρειάζεται το φορτίο. Έτσι, πρέπει να διατηρήσουν σταθερή την ισχύ τους.

**Mode 2:**  $361V < V_{dc} < 380V$ . Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από αυτή που προσφέρουν οι πηγές. Άρα, οι διεσπαρμένες γεννήτριες πρέπει να αυξήσουν τη συνισταμένη παραγωγή τους. Με τον τρόπο αυτό θα υπάρξει επαναφορά του συστήματος στο mode 1.

**Mode 3:**  $342V < V_{dc} \leq 361V$ . Σε αυτό το εύρος τάσης η ζήτηση του φορτίου είναι μεγαλύτερη από το τεχνικό μέγιστο των διεσπαρμένων γεννητριών και πρέπει να γίνει περικοπή φορτίου. Το φορτίο της μελέτης αυτής είναι χωρισμένο σε τρία ίσα μέρη με διαφορετικά επίπεδα προτεραιότητας. Όταν η τάση φτάσει 355V αποκόπτεται η ομάδα τελευταίας προτεραιότητας και στα 348V αποκόπτεται η δεύτερη ομάδα. Με τον τρόπο αυτό θα μπορεί να επανέλθει η τάση στα 380V και να συνεχίσει να τροφοδοτείται το φορτίο πρώτης προτεραιότητας.

**Mode 4:**  $V_{dc} \leq 342V$ . Σε περίπτωση που φτάσουμε σε τόσο χαμηλό επίπεδο τάσης, είτε έχει υποστεί βλάβη η σημαντικότερη μονάδα - το fuel cell, είτε το φορτίο πρώτης προτεραιότητας είναι πολύ μεγάλο. Στην κατάσταση αυτή, αποκόπτεται και η τελευταία ομάδα φορτίων, καθώς δε θα μπορούν να λειτουργούν σωστά στην τάση αυτή.

Για την διασυνδεδεμένη λειτουργία, η ρύθμιση της τάσης στα 380V γίνεται μέσω του αναστροφέα του κύριου δικτύου(VSC). Το σύστημα αποθήκευσης βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής ή σε κατάσταση φόρτισης(αν  $SoC < 95\%$ ). Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται συνοπτικά οι στρατηγικές που ακολουθούν οι τοπικοί ελεγκτές κάθε μονάδας, στις διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί το μικροδίκτυο. Η μόνη περίπτωση που δεν αναφέρεται είναι όταν η μπαταρία έχει  $SoC < 50\%$  στην απομονωμένη λειτουργία. Στην κατάσταση αυτή ο ελεγκτής της μπαταρίας μπαίνει σε λειτουργία φόρτισης μέχρι να φορτιστεί πλήρως η μπαταρία και στο χρονικό αυτό διάστημα δεν μπορεί να βοηθήσει στη διατήρηση της τάσης του ζυγού.

	Συνδεδεμένη λειτουργία	Απομονωμένη λειτουργία				
		Mode 0	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
PV	MPPT	MPPT	MPPT	MPPT	MPPT	MPPT
FC	OFF	Droop-μείωση ισχύος	Σταθερή ισχύς	Droop-αύξηση ισχύος	Droop-αύξηση ισχύος	Droop-αύξηση ισχύος
Battery	OFF/φόρτιση	Droop-φόρτιση	OFF	Droop-εκφόρτιση	Droop-εκφόρτιση	Droop-εκφόρτιση
VSC	Ρύθμιση τάσης	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

*Εικόνα 7.2: Πίνακας με τη στρατηγική ελέγχου κάθε μονάδας*

### **7.3 Προσομοίωση του μικροδικτύου**

Για να διαπιστώσουμε κατά πόσο ο έλεγχος που σχεδιάσαμε είναι επαρκής και αν εξασφαλίζει την αξιόπιστη λειτουργία του μικροδικτύου σε κάθε προβλεπόμενο συνδυασμό συνθηκών, θα εκτελέσουμε την προσομοίωση 5 διαφορετικών σεναρίων. Στη συνέχεια, θα παραθέσουμε για κάθε σενάριο ξεχωριστά τις αρχικές συνθήκες και τις διαταραχές στις οποίες υποβάλλαμε το μικροδίκτυο καθώς και τα αποτελέσματα που έδωσε η προσομοίωση.

#### **7.3.1 Σενάριο 1<sup>ο</sup>**

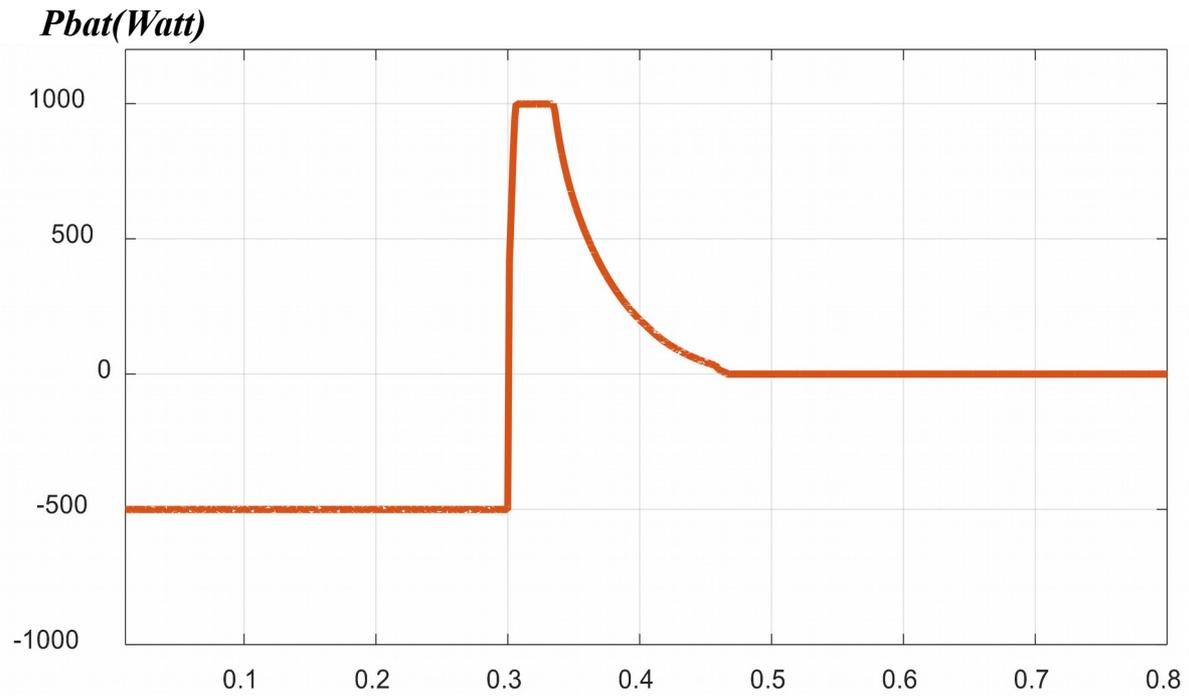
Στην πρώτη προσομοίωση θέλουμε να δοκιμάσουμε αν το μικροδίκτυο μεταβαίνει σωστά από τη διασυνδεδεμένη στην απομονωμένη λειτουργία. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αρχικές συνθήκες των μεταβλητών του μικροδικτύου που ορίσαμε για το συγκεκριμένο σενάριο.

<b>Μεταβλητή Συστήματος</b>	<b>Αρχική Τιμή</b>
G-ηλιακή ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	1000
T-θερμοκρασία (°C)	25
Φ/B παραγωγή (Watt)	1170
Ισχύς φορτίου (Watt)	6000
SoC μπαταρίας (%)	75
grid ( 1 → ON / 0 → OFF)	1

Επίσης, παραθέτεται ο πίνακας που παρουσιάζει χρονικά τις μεταβολές που προκαλέσαμε στην εν λόγω προσομοίωση.

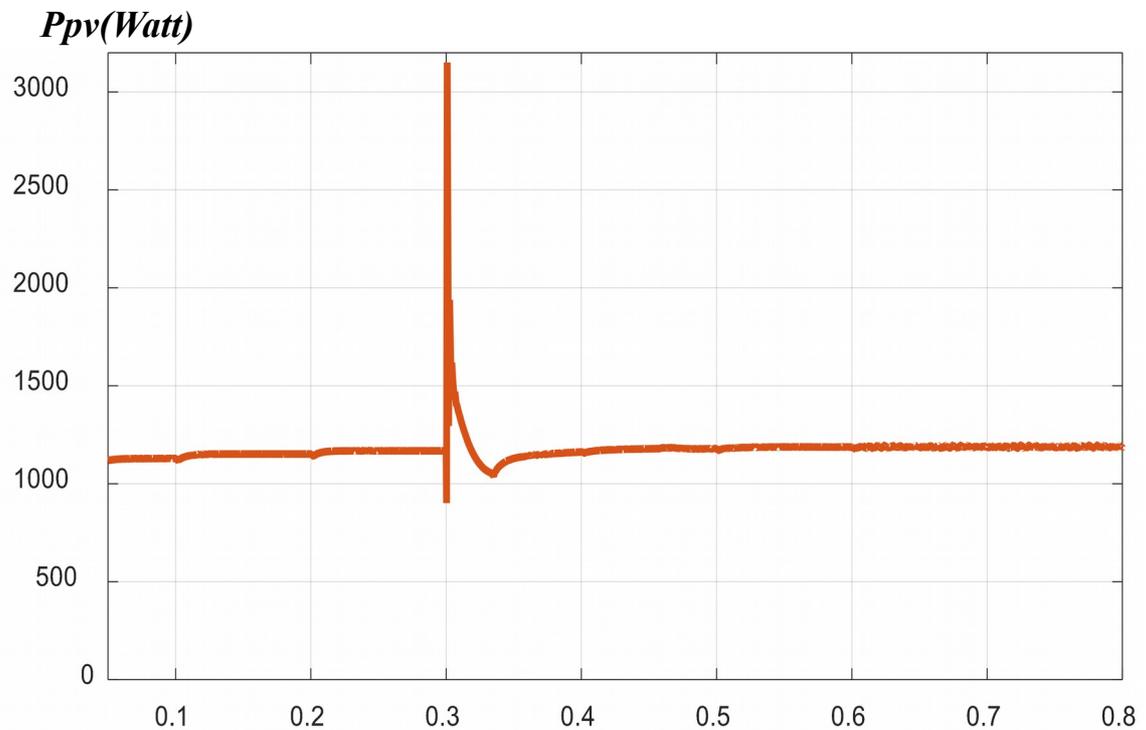
<b>Χρονική στιγμή t (sec)</b>	<b>Μεταβολή στο μικροδίκτυο</b>
0	Έναρξη προσομοίωσης
0.3	grid = 0

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, ξεχωριστά για κάθε στοιχείο του μικροδικτύου ξεκινώντας από τη μπαταρία. Επειδή SoC = 75%, το χρονικό διάστημα που είμαστε συνδεδεμένοι (0 – 0.3 sec) αυτή φορτίζει με 500W όπως ακριβώς ορίζει ο έλεγχος που αναλύσαμε στην παράγραφο 5.4.3. Τη στιγμή που αποσυνδεόμαστε (t = 0.3 sec) αυξάνει η μπαταρία στιγμιαία την ισχύ της μέχρι να σταθεροποιήσει την τάση το fuel cell στα 380 volt και μετά η ισχύς μηδενίζεται.



Εικόνα 7.3(α): Ισχύς εξόδου του μετατροπέα της μπαταρίας  $t(sec)$

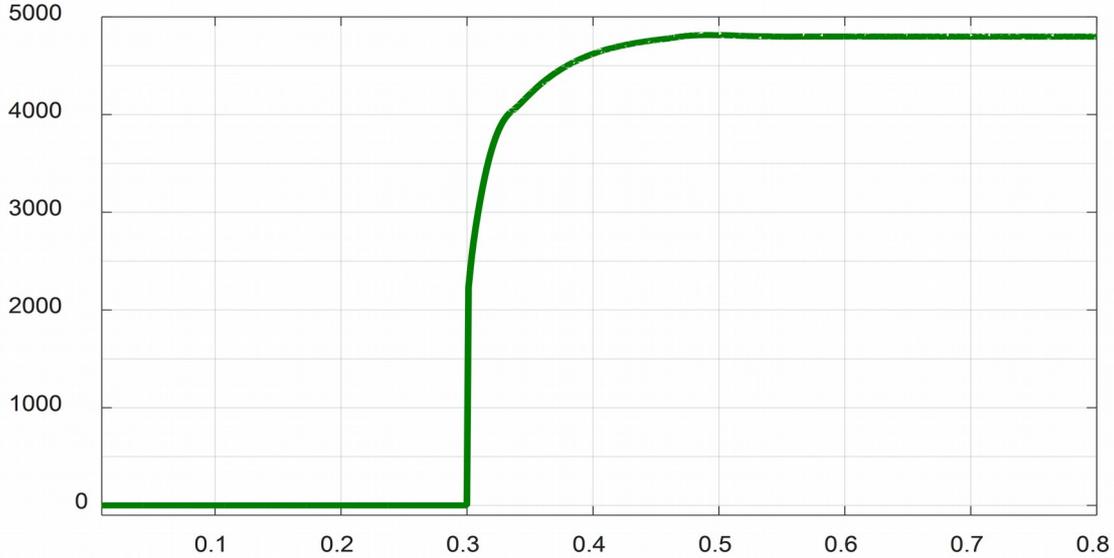
Το Φ/Β όπως αναμενόταν με τις βέλτιστες συνθήκες ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας αποδίδει περίπου 1170W καθ' όλη τη διάρκεια χάρη στον αλγόριθμο MPPT.



Εικόνα 7.3(β): Ισχύς εξόδου του μετατροπέα του Φ/Β  $t(sec)$

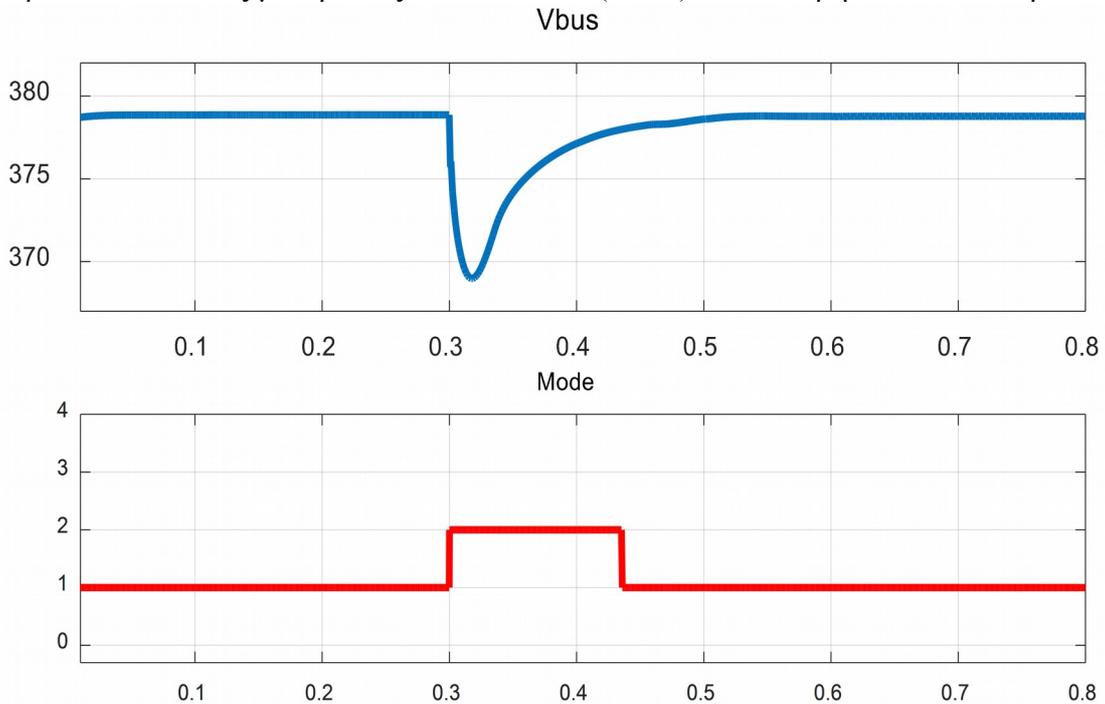
Το fuel cell όσο υπάρχει το δίκτυο(0 - 0.3 sec) έχει μηδενική ισχύ όπως παρατηρούμε στην εικόνα 7.3(γ). Μετά πρέπει αυτό να διατηρήσει την τάση στα 380 volt. Το φορτίο ζητάει 6kW, ενώ το Φ/B καλύπτει τα 1.2kW. Τη στιγμή της αποσύνδεσης το fuel cell βάση του ελέγχου droop(§4.4.3), καταρχήν σταθεροποιεί την τάση και ταυτόχρονα αυξάνει την τιμή αναφοράς ισχύος της από  $P_{opt} = 0$  σε  $P_{opt} = 4800W$ , ώστε να καλύψει την επιπλέον ζήτηση του φορτίου. Στη συνέχεια, αφού δεν υπάρχει άλλη μεταβολή η ισχύς παραμένει σταθερή και η τάση στα 380 volt.

***Pfc(Watt)***



***Εικόνα 7.3(γ): Ισχύς εξόδου του μετατροπέα του fuel cell t(sec)***

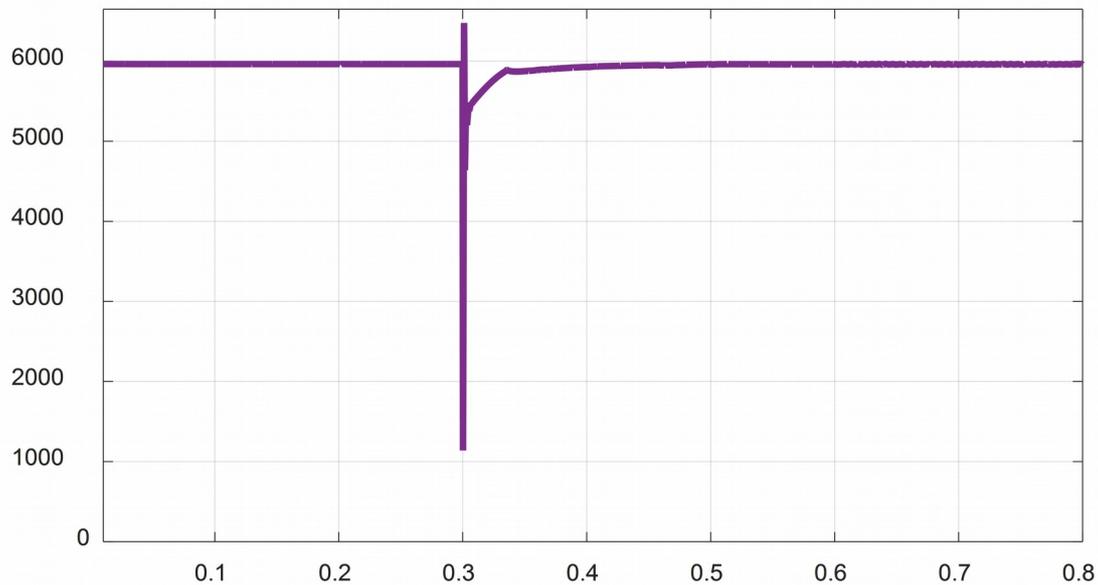
Το επόμενο διάγραμμα της εικόνας 7.3(δ) παρουσιάζει την τάση του ζυγού DC του μικροδικτύου και τις μεταβάσεις καταστάσεων (mode) που συνέβησαν στο σενάριο.



***Εικόνα 7.3(δ): Τάση ζυγού-κατάσταση λειτουργίας t(sec)***

Επομένως, εφόσον ο έλεγχος ήταν επιτυχής στο συγκεκριμένο σενάριο, το φορτίο είχε σταθερή ισχύ όπως αναμέναμε. Υπήρξε μία πολύ μικρή διαταραχή τη στιγμή της μετάβασης από συνδεδεμένη σε απομονωμένη λειτουργία, αλλά η διαταραχή ήταν στιγμιαία και μέσα στα ανεκτά όρια (η τάση έπεσε μέχρι 369 volt, δηλαδή -3%).

### ***Pload(Watt)***



*Εικόνα 7.3(ε): Ισχύς που απορροφά το φορτίο t(sec)*

### **7.3.2 Σενάριο 2<sup>ο</sup>**

Σε αυτή την προσομοίωση εξετάζουμε την ικανότητα του droop ελέγχου του fuel cell και της μπαταρίας να ανταπεξέλθει σε μεταβολές της ζήτησης ισχύος σε απομονωμένη λειτουργία. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αρχικές συνθήκες των μεταβλητών του μικροδικτύου που ορίσαμε για το συγκεκριμένο σενάριο.

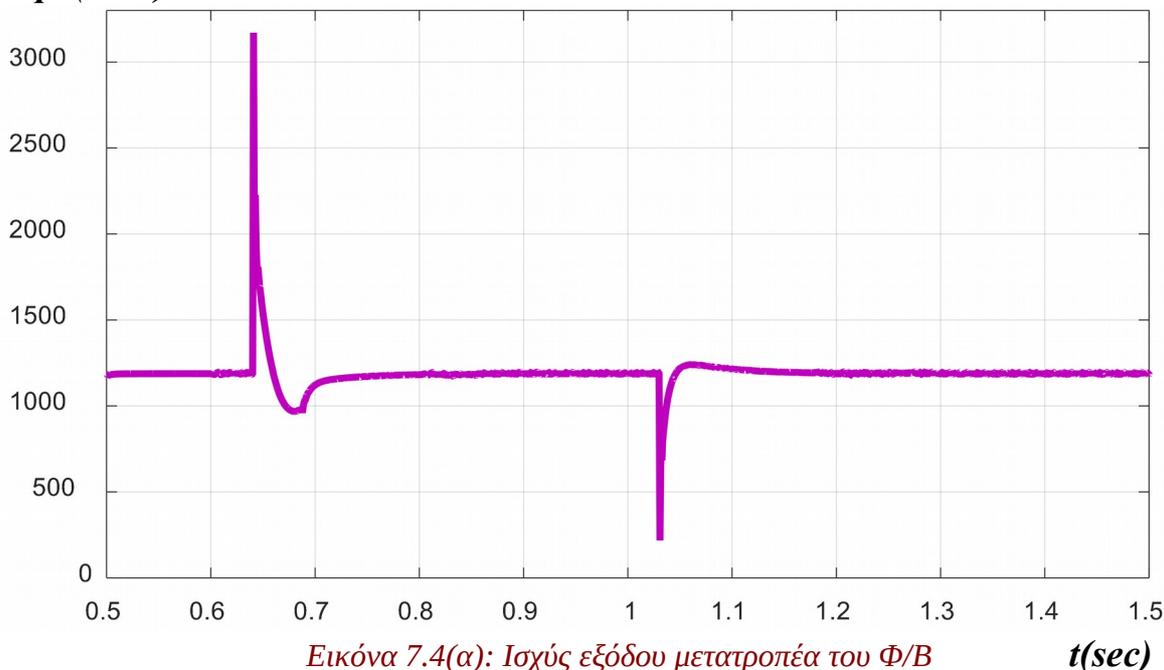
<b>Μεταβλητή Συστήματος</b>	<b>Αρχική Τιμή</b>
G-ηλιακή ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	1000
T-θερμοκρασία (°C)	25
Φ/B παραγωγή (Watt)	1170
Ισχύς φορτίου (Watt)	2000
SoC μπαταρίας (%)	75
grid ( 1 → ON / 0 → OFF)	1

Παρακάτω φαίνονται οι μεταβολές που αντιμετώπισε το μικροδίκτυο στη διάρκεια του σεναρίου.

Χρονική στιγμή t (sec)	Μεταβολή στο μικροδίκτυο
0	Έναρξη προσομοίωσης
0.3	grid = 0
0.64	Φορτίο = 6000W
1.03	Φορτίο = 4000W

Στο σχήμα 7.4(α) φαίνεται η ισχύς του Φ/Β. Όπως ήταν αναμενόμενο η ισχύς είναι σταθερή περίπου στα 1170W καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

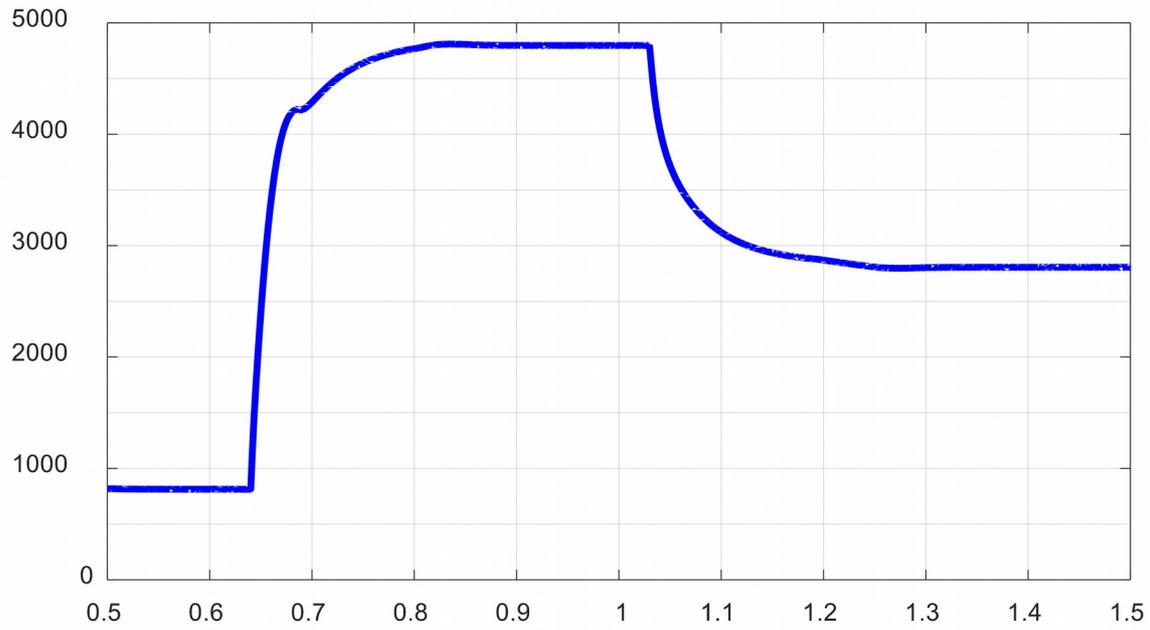
***Ppv(Watt)***



***Εικόνα 7.4(α): Ισχύς εξόδου μετατροπέα του Φ/Β t(sec)***

Στο επόμενο σχήμα 7.4(β) παρουσιάζεται η ισχύς του fuel cell. Μας ενδιαφέρει το διάστημα μετά τα 0.5 sec, όπου το μικροδίκτυο έχει πλέον σταθεροποιηθεί στα 380 volt μετά την αποσύνδεση από το δίκτυο. Σε αυτή τη χρονική στιγμή το φορτίο ζητάει 2000W, εκ των οποίων τα 1170W τα παίρνει από το Φ/Β και τα υπόλοιπα 830W από το fuel cell. Τη στιγμή  $t = 0.64$  sec το φορτίο αρχίζει να ζητάει 6000W(αυτό το πετύχαμε αλλάζοντας την αντίσταση φορτίου από 72.2Ωhm σε 24.1Ωhm, ενώ η προσομοίωση έτρεχε), επομένως δημιουργείται ανισορροπία ισχύος στο ζυγό. Αρχικά, έχουμε πτώση τάσης, αλλά ο έλεγχος droop προκαλεί αύξηση της ισχύος του fuel cell σταδιακά στα 4830W που χρειάζεται το φορτίο. Στη συνέχεια, τη στιγμή  $t = 1.03$  sec το φορτίο μειώνεται στα 4000W. Εδώ ο έλεγχος droop εκτελεί την ανάποδη διεργασία, καθώς αρχικώς σταματάει την αύξηση της τάσης και στη συνέχεια μειώνει τη βέλτιστη ισχύ της κυψέλης καυσίμου στα 2830W. Έτσι, για δεύτερη φορά επαναφέρει την τάση στα 380 volt.

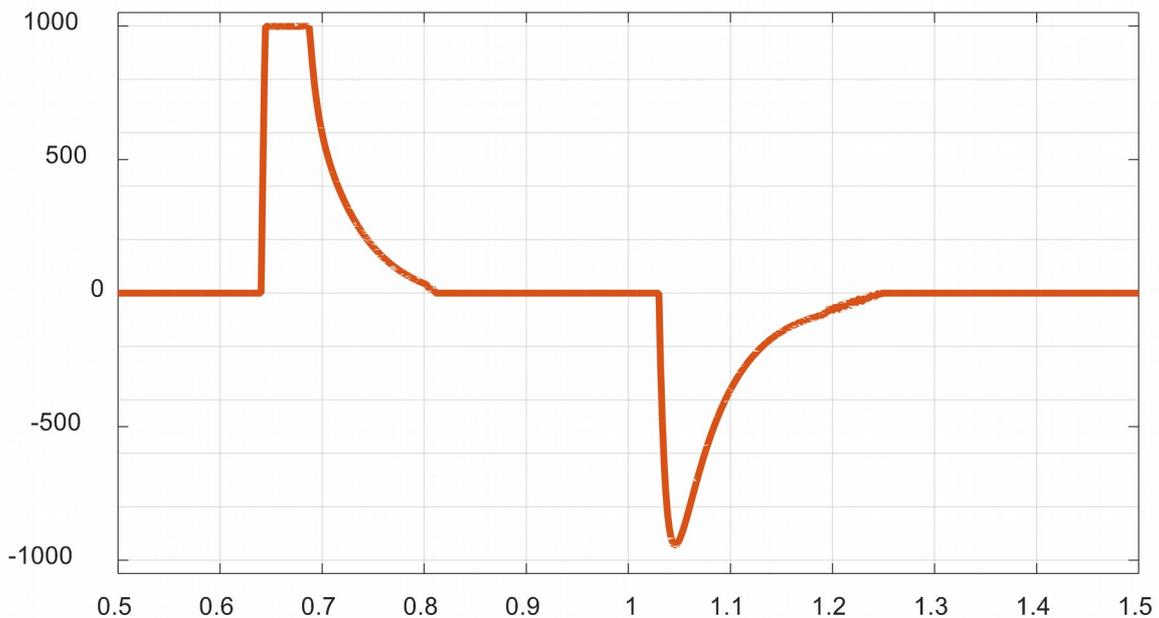
***P<sub>fc</sub>(Watt)***



*Εικόνα 7.4(β): Ισχύς εξόδου μετατροπέα fuel cell* ***t(sec)***

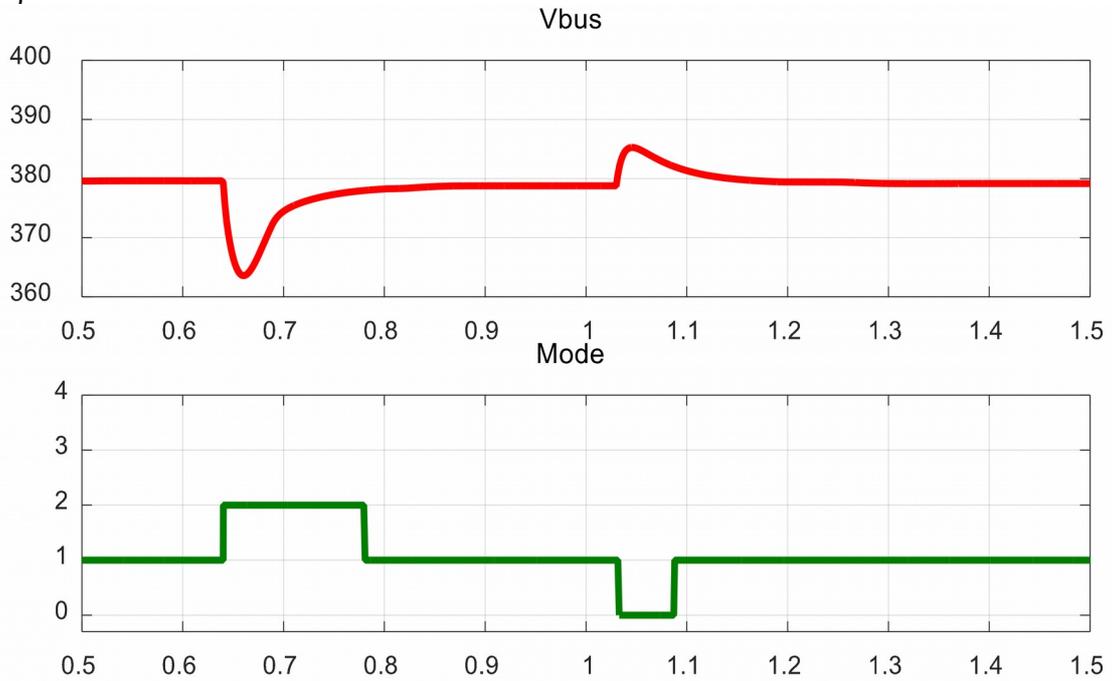
Η μπαταρία σε αντίθεση με το fuel cell προσφέρει ή αντλεί ισχύ μόνο στις μεταβατικές στιγμές. Η πρώτη διαταραχή  $t = 0.64 \text{ sec}$ , προκαλεί στιγμιαία έλλειψη ισχύος στο ζυγό και γι' αυτό παρατηρούμε ότι η μπαταρία εκφορτίζεται. Στη δεύτερη διαταραχή  $t = 1.03 \text{ sec}$ , έχουμε περίσσια ισχύος, επομένως η μπαταρία φορτίζεται στιγμιαία, όπως υπαγορεύει η σταθερή καμπύλη droop που ακολουθεί.

***P<sub>bat</sub>(Watt)***



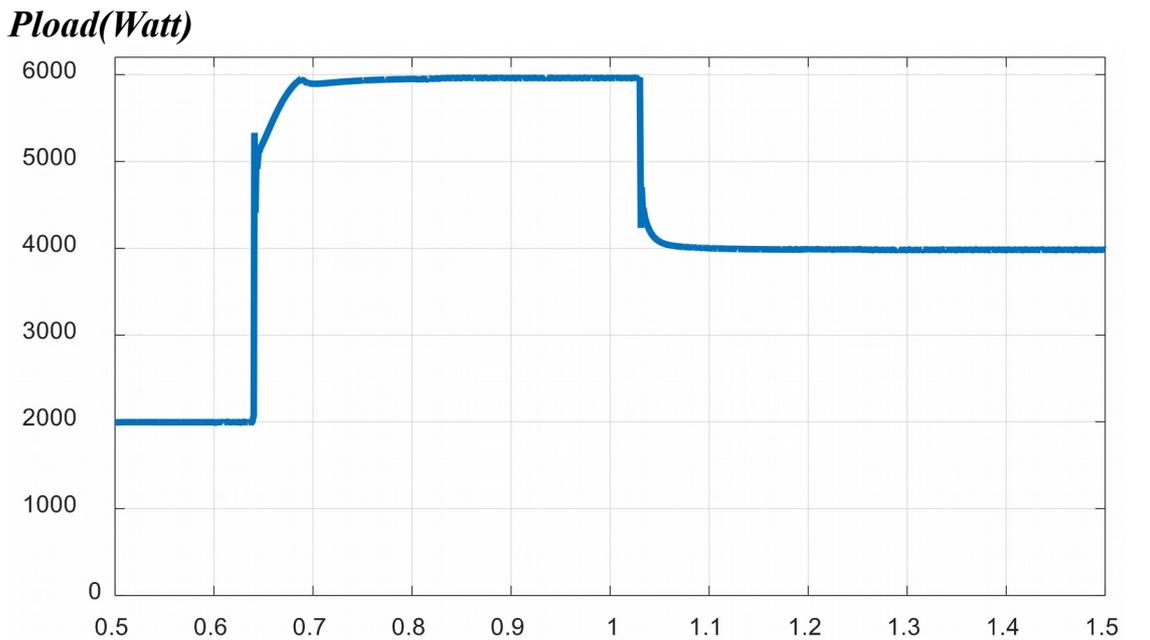
*Εικόνα 7.4(γ): Ισχύς εξόδου μετατροπέα μπαταρίας* ***t(sec)***

Άρα, οι μεταβάσεις καταστάσεων που έγιναν στο μικροδίκτυο στο σενάριο αυτό είναι δύο. Αρχικά, με την αύξηση του φορτίου η τάση μειώθηκε και είχαμε την μετάβαση **mode 1**→**mode 2**. Στη συνέχεια, που διευθετήθηκε η διαταραχή το μικροδίκτυο επανήλθε σε **mode 1**. Στη μείωση φορτίου, είχαμε παρόμοια τις μεταβάσεις **mode 1** → **mode 0**→**mode 1**. Η εξέλιξη της τάσης και οι μεταβάσεις φαίνονται στο διάγραμμα παρακάτω.



*Εικόνα 7.4(δ): Τάση ζυγού κατάσταση λειτουργίας  $t(sec)$*

Οι διάφορες μεταβολές που εμείς προκαλέσαμε στην ισχύ που καταναλώνει το φορτίο φαίνονται στην εικόνα 7.4(ε) παρακάτω.



*Εικόνα 7.4(ε): Ισχύς του φορτίου  $t(sec)$*

### 7.3.3 Σενάριο 3<sup>ο</sup>

Σε αυτή την προσομοίωση εξετάζουμε την ικανότητα του droop ελέγχου του fuel cell και της μπαταρίας να ανταπεξέλθει σε μεταβολές της Φ/Β παραγωγής σε απομονωμένη λειτουργία. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αρχικές συνθήκες των μεταβλητών του μικροδικτύου που ορίσαμε για το συγκεκριμένο σενάριο.

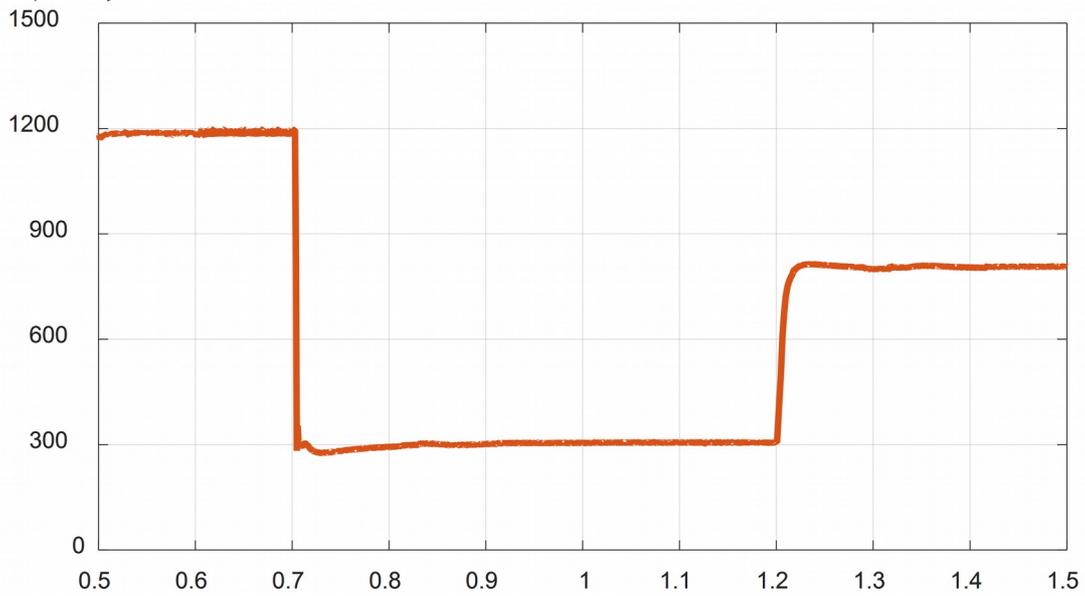
Μεταβλητή Συστήματος	Αρχική Τιμή
G-ηλιακή ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	1000
T-θερμοκρασία (°C)	25
Φ/Β παραγωγή (Watt)	1170
Ισχύς φορτίου (Watt)	5000
SoC μπαταρίας (%)	75
grid ( 1 → ON / 0 → OFF)	1

Παρακάτω, δίνονται και οι μεταβολές που απαρτίζουν το συγκεκριμένο σενάριο.

Χρονική στιγμή t (sec)	Μεταβολή στο μικροδίκτυο
0	Έναρξη προσομοίωσης
0.3	grid = 0
0.7	$P_{\Phi/B} = 280W$ (G=300, T=22)
1.2	$P_{\Phi/B} = 800W$ (G=700, T=23)

Αρχικά παραθέτουμε στην εικόνα 7.5(α) το διάγραμμα ισχύος του Φ/Β, όπου φαίνονται οι μεταβολές που προκαλέσαμε. Εμείς αλλάξαμε τις τιμές ηλιακής έντασης και θερμοκρασίας αρχικά σε  $G = 300W/m^2$  και  $T = 22$  °C, ώστε να μειώσουμε την Φ/Β παραγωγή. Η ισχύς που θα προέκυπτε δε μας ήταν γνωστή και είναι αποτέλεσμα του ελέγχου MPPT. Στη συνέχεια, με σκοπό να αυξήσουμε και πάλι την Φ/Β παραγωγή ορίσαμε τις τιμές  $G = 700W/m^2$  και  $T = 23$  °C. Η μεταβολή της Φ/Β παραγωγής έχει ακριβώς τον ίδιο αντίκτυπο στο ζυγό με μία μεταβολή της ζήτησης του φορτίου. Άρα, περιμένουμε οι ελεγκτές της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου να αντιδράσουν, όπως ακριβώς και στο 2<sup>ο</sup> σενάριο.

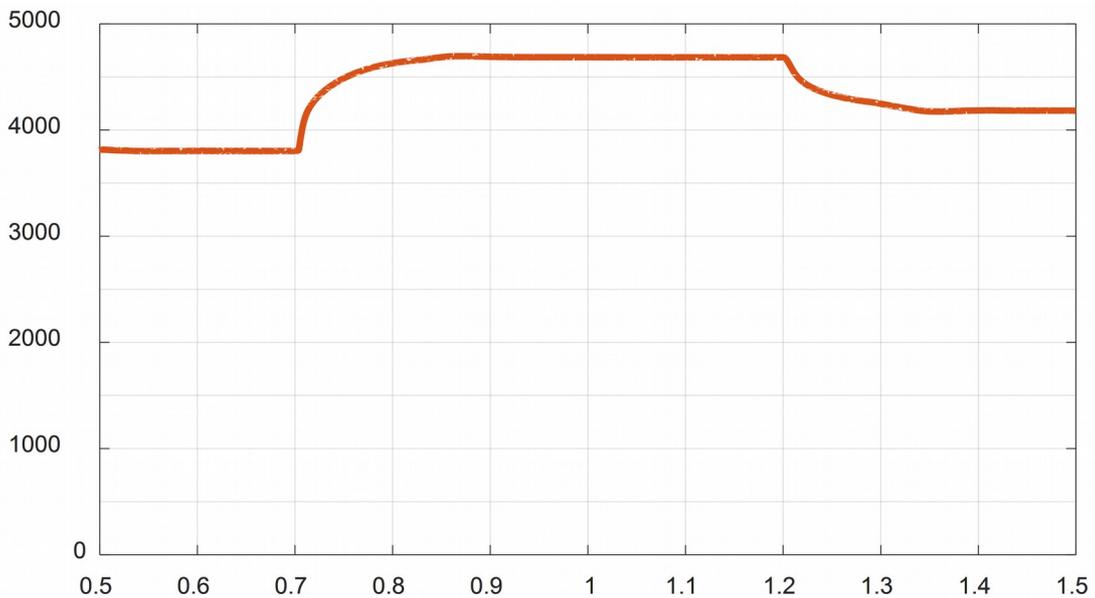
***Ppv(Watt)***



***Εικόνα 7.5(α): Ισχύς εξόδου μετατροπέα του Φ/Β t(sec)***

Στην εικόνα 7.5(β) φαίνεται ότι το fuel cell, όπως περιμέναμε, αντέδρασε παρόμοια με την προηγούμενη προσομοίωση. Δηλαδή, αρχικά με τη μείωση της Φ/Β παραγωγής η τάση μειώθηκε και αυτό αύξησε την ισχύ του. Στη συνέχεια, που αυξήθηκε λίγο η ισχύς του Φ/Β προκαλώντας αύξηση τάσης, η κυψέλη καυσίμου μείωσε λίγο την δική της παραγωγή.

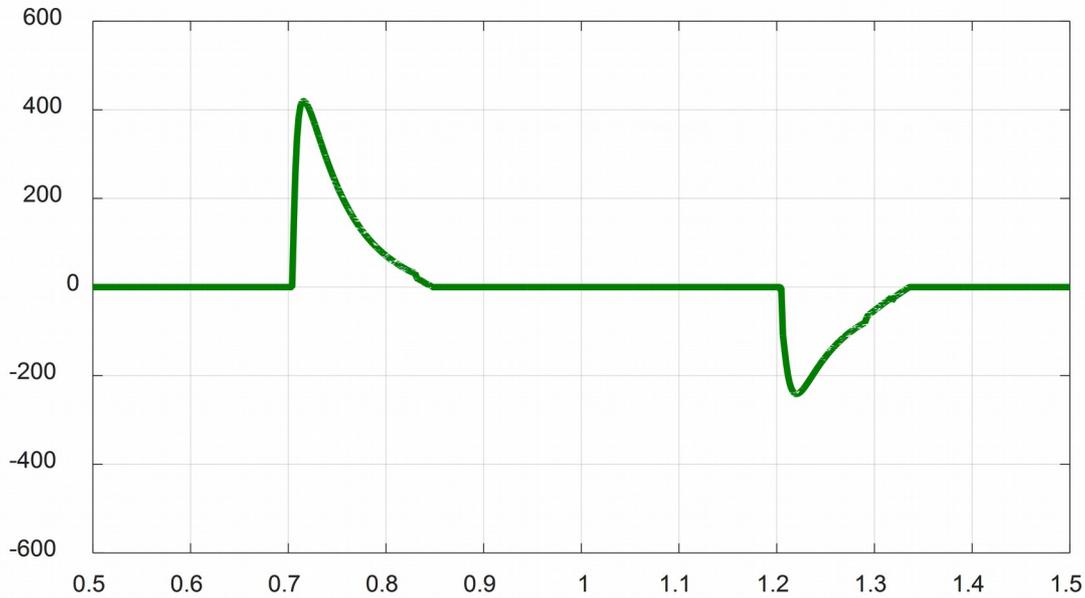
***Pfc(Watt)***



***Εικόνα 7.5(β): Ισχύς εξόδου μετατροπέα fuel cell t(sec)***

Η ισχύς της μπαταρίας φαίνεται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι επειδή οι μεταβολές ήταν πιο ήπιες σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο, δε χρειάστηκε να εκφορτιστεί και να φορτιστεί η μπαταρία με τη μέγιστη ισχύ της.

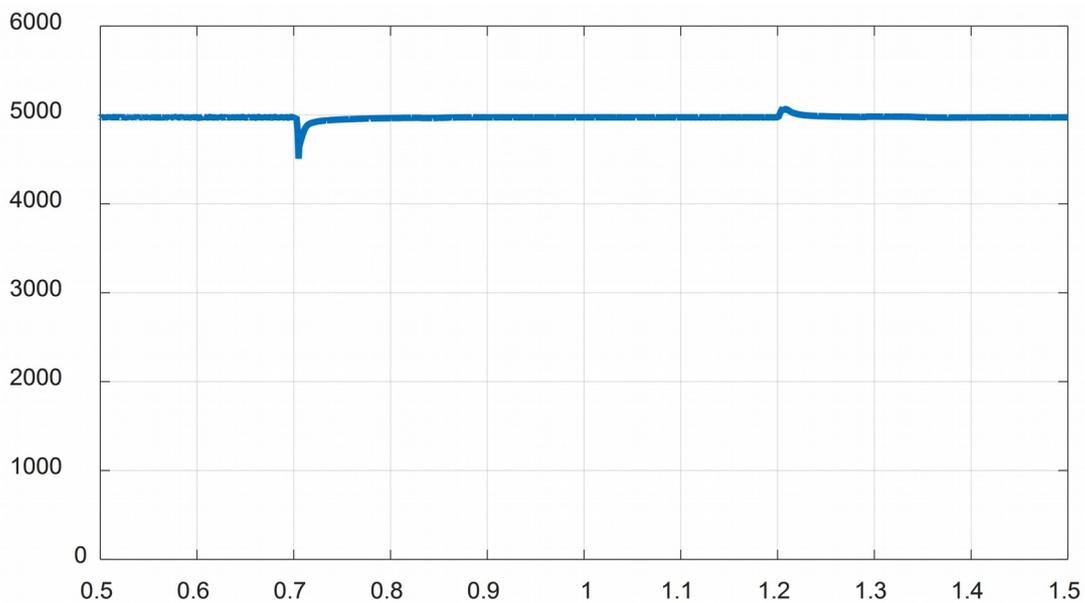
***P<sub>bat</sub>(Watt)***



*Εικόνα 7.5(γ): Ισχύς εξόδου μετατροπέα της μπαταρίας* **t(sec)**

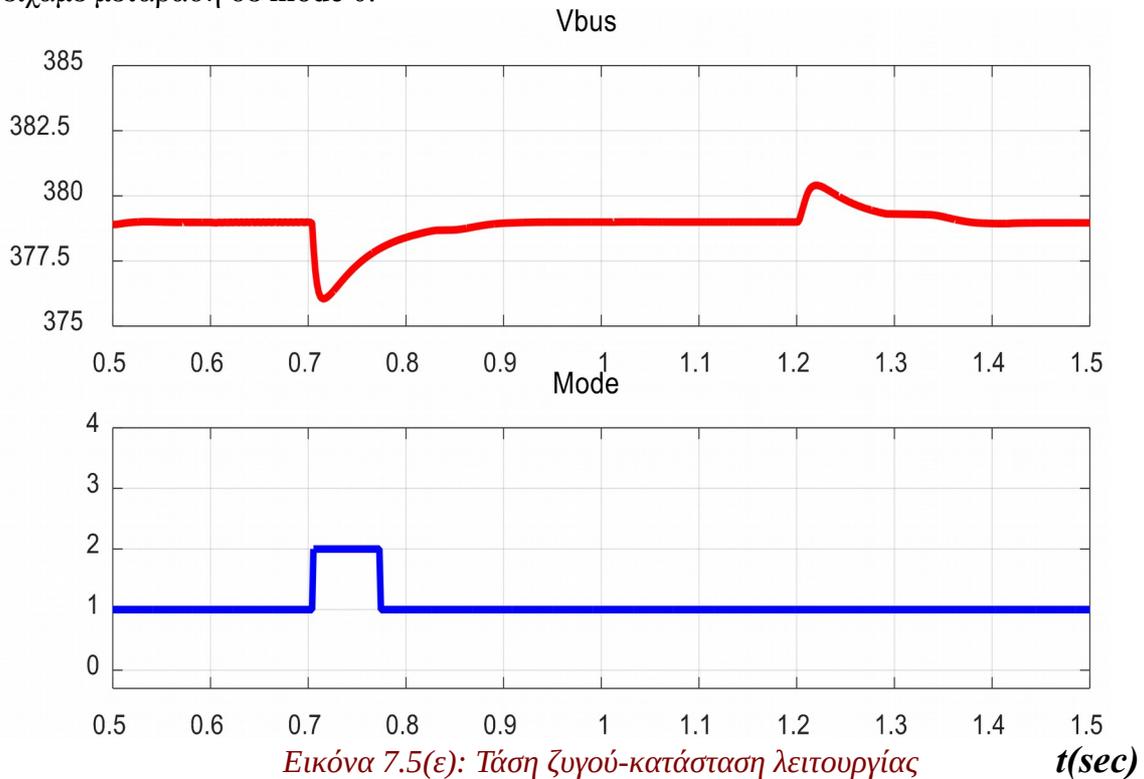
Η ισχύς του φορτίου χάρη στις ενέργειες των ελεγκτών της μπαταρίας και της κυπέλης καυσίμου παρέμεινε σταθερή, όπως φαίνεται ακολούθως.

***P<sub>load</sub>(Watt)***



*Εικόνα 7.5(δ): Ισχύς που καταναλώνει το φορτίο* **t(sec)**

Η τάση και η κατάσταση λειτουργίας του κοινού ζυγού DC συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζονται στο διάγραμμα παρακάτω. Οι μεταβάσεις κατάστασης είναι οι ίδιες ακριβώς με το 2<sup>ο</sup> σενάριο, μόνο που η δεύτερη διαταραχή ήταν τόσο μικρή που δεν είχαμε μετάβαση σε **mode 0**.



*Εικόνα 7.5(ε): Τάση ζυγού-κατάσταση λειτουργίας  $t(sec)$*

### 7.3.4 Σενάριο 4<sup>ο</sup>

Σε αυτή τη δοκιμή θέλουμε να εξετάσουμε αν ο ελεγκτής της μπαταρίας τηρεί τους περιορισμούς που του έχουμε ορίσει. Επομένως, επιλέγουμε η μπαταρία στην αρχή της προσομοίωσης να είναι σχεδόν αφόρτιστη. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αρχικές συνθήκες των μεταβλητών του μικροδικτύου που επιλέξαμε σε αυτό το σενάριο.

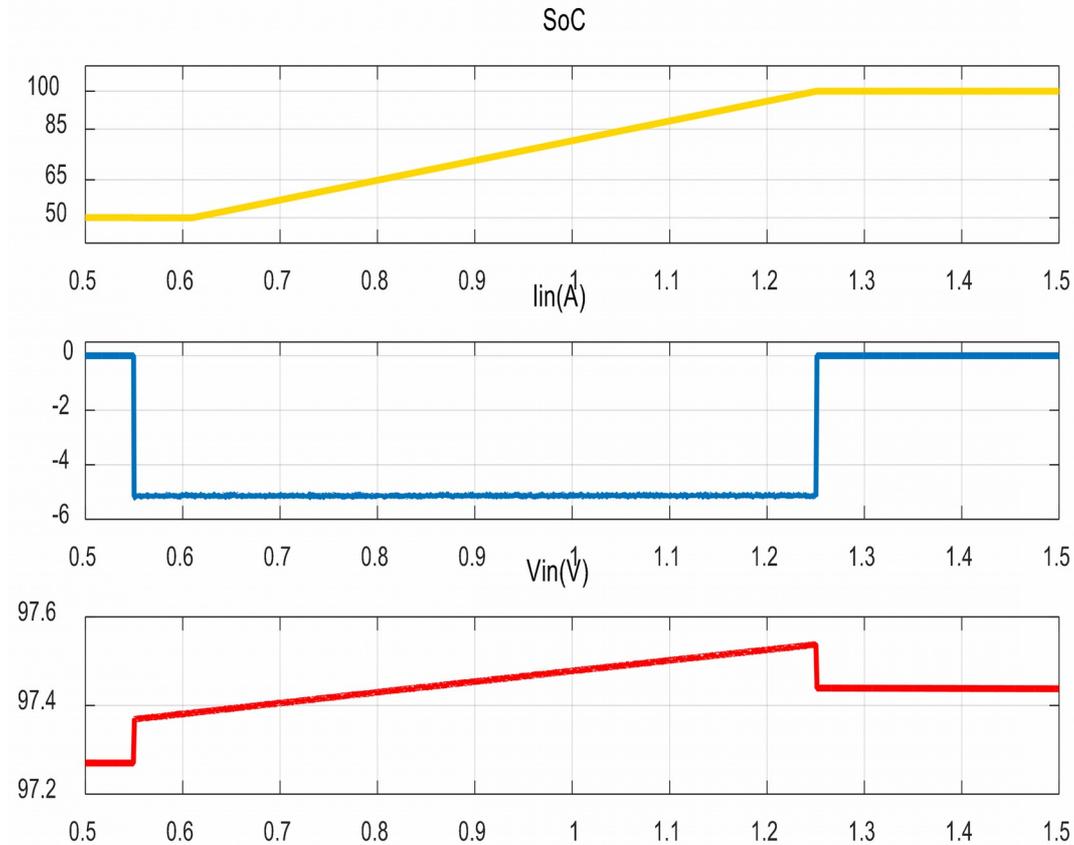
Μεταβλητή Συστήματος	Αρχική Τιμή
G-ηλιακή ακτινοβολία ( $W/m^2$ )	1000
T-θερμοκρασία ( $^{\circ}C$ )	25
$\Phi/B$ παραγωγή (Watt)	1170
Ισχύς φορτίου (Watt)	4000
SoC μπαταρίας (%)	50.1
grid ( 1 $\rightarrow$ ON / 0 $\rightarrow$ OFF)	1

Λόγω της χωρητικότητας της η μπαταρία, χρειάζεται πολλές ώρες προσομοίωσης για να φορτιστεί από 50 σε 100%. Αυτό δεν είναι υπολογιστικά εφικτό, όμως δεν μπορεί να αλλάξει χειροκίνητα το SoC κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για το λόγο αυτό τροποποιήσαμε τον ελεγκτή της μπαταρίας για το συγκεκριμένο σενάριο, ώστε να δέχεται σαν είσοδο όχι την πραγματική τιμή του SoC, αλλά μία σταθερά που μπορούμε να μεταβάλλουμε, ενώ τρέχει ο υπολογισμός.

Κατόπιν της σταθεροποίησης της τάσης μετά την αποσύνδεση του δικτύου, αλλάζουμε το SoC της μπαταρίας σε 50%, ώστε να ενεργοποιηθεί η λειτουργία φόρτισης. Στη συνέχεια, το SoC αυξάνεται γραμμικά μέχρι να φτάσει στο 100%, ώστε να βγει από τη λειτουργία φόρτισης η μπαταρία. Οι μεταβολές που ορίσαμε για την παρούσα προσομοίωση είναι οι παρακάτω.

Χρονική στιγμή $t$ (sec)	Μεταβολή στο μικροδίκτυο
0	Έναρξη προσομοίωσης
0.25	grid = 0
0.55	SoC = 50%
1.25	SoC = 100%

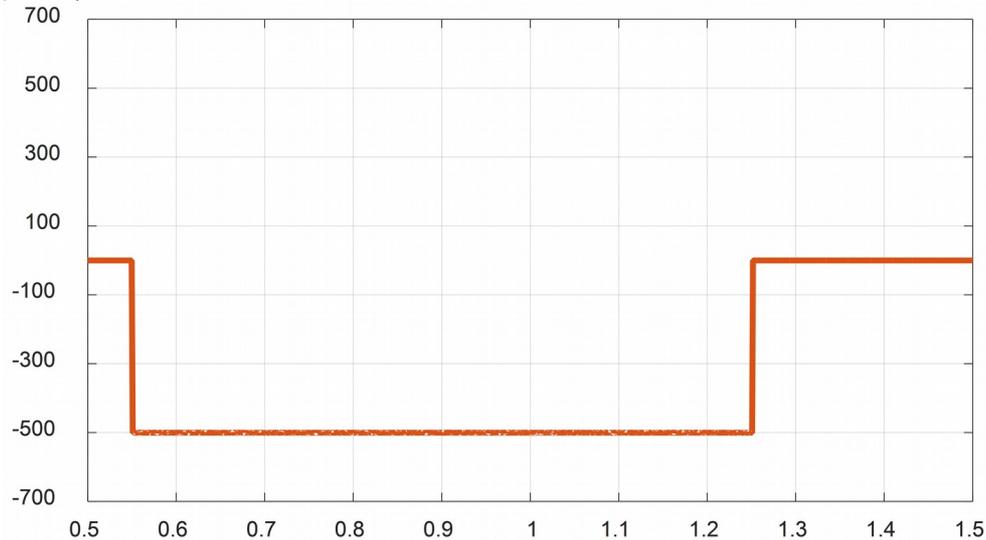
Στη εικόνα 7.6(α) παρουσιάζονται οι μεταβολές που εμείς προκαλέσαμε στο SoC της μπαταρίας, καθώς επίσης το ρεύμα και η τάση εισόδου του μετατροπέα της.



Εικόνα 7.6(α): SoC μπαταρίας-ρεύμα και τάση εισόδου μετατροπέα μπαταρίας  $t(sec)$

Η ισχύς της μπαταρίας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Μέχρι τη στιγμή  $t = 0.55 \text{ sec}$ , η μπαταρία ήταν ανενεργή, καθώς δεν υπήρχε κάποια μεταβολή στην τάση. Στη συνέχεια, αλλάξαμε το SoC σε 50% και όπως είναι φανερό, ο ελεγκτής έδωσε ορθά εντολή να ξεκινήσει φόρτιση. Για το λόγο αυτό η ισχύς από 0 έγινε  $-500 \text{ W}$  και παρέμεινε σταθερή μέχρι τη στιγμή  $t = 1.25 \text{ sec}$ , όπου είχε φορτιστεί πλήρως. Τη στιγμή αυτή παρατηρούμε ότι σωστά η ισχύς της μπαταρίας μηδενίζεται και πάλι.

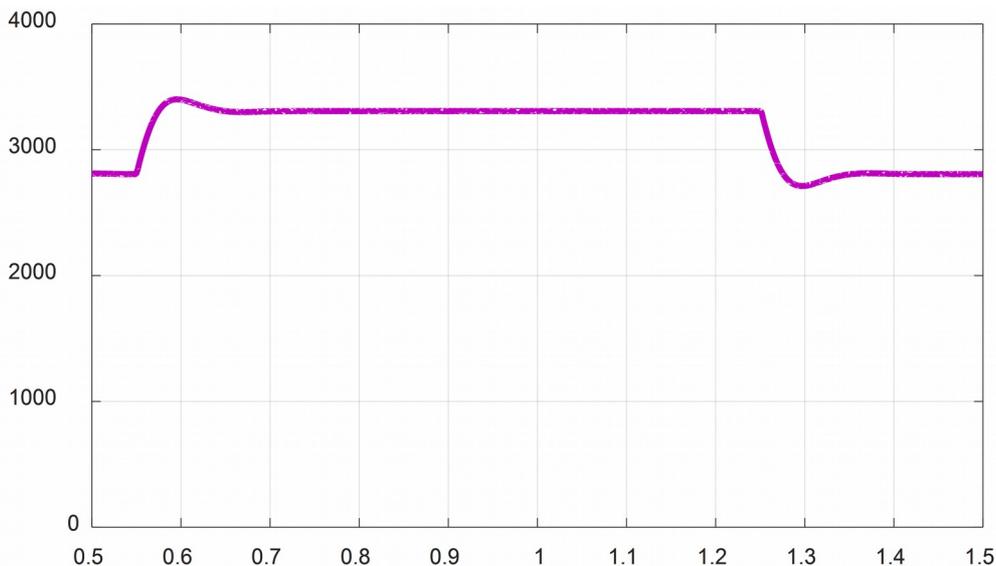
### ***P<sub>bat</sub>(Watt)***



***Εικόνα 7.6(β): Ισχύς εξόδου μετατροπέα της μπαταρίας t(sec)***

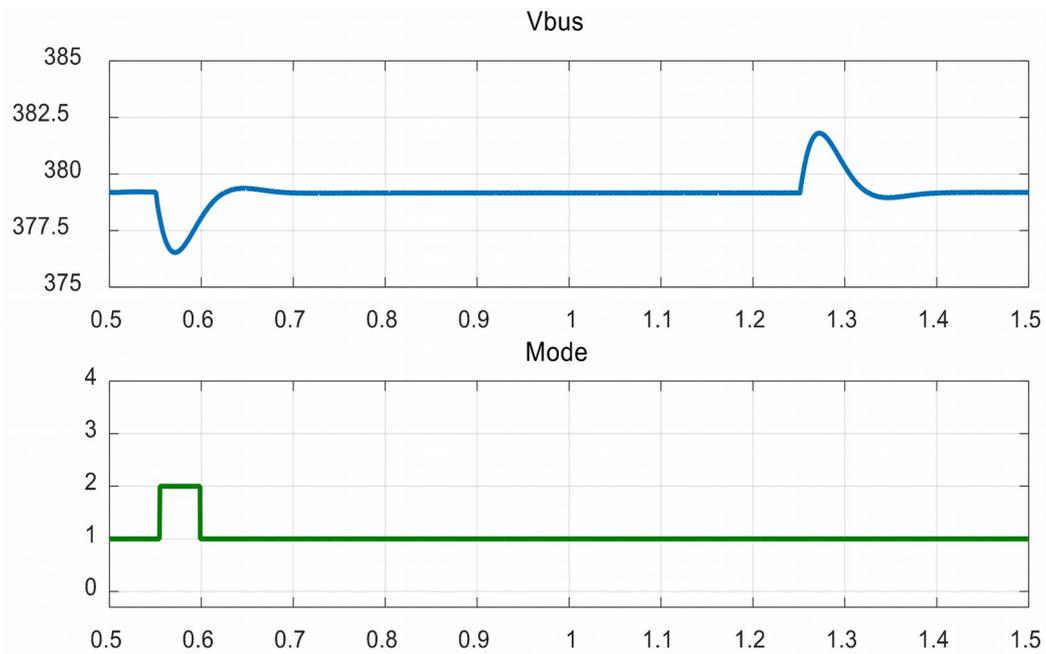
Ο ελεγκτής του fuel cell ουσιαστικά στο σενάριο αυτό είχε και πάλι να αντιμετωπίσει μία αύξηση της ζήτησης ισχύος (με την έναρξη της φόρτισης της μπαταρίας) και μία μείωση της ζήτησης ισχύος (όταν η μπαταρία ήταν και πάλι «γεμάτη» και μηδενίστηκε η ισχύς φόρτισης). Η εικόνα 7.6(γ) δείχνει την ισχύ της κυψέλης καυσίμου.

### ***P<sub>fc</sub>(Watt)***



***Εικόνα 7.6(γ): Ισχύς εξόδου μετατροπέα fuel cell t(sec)***

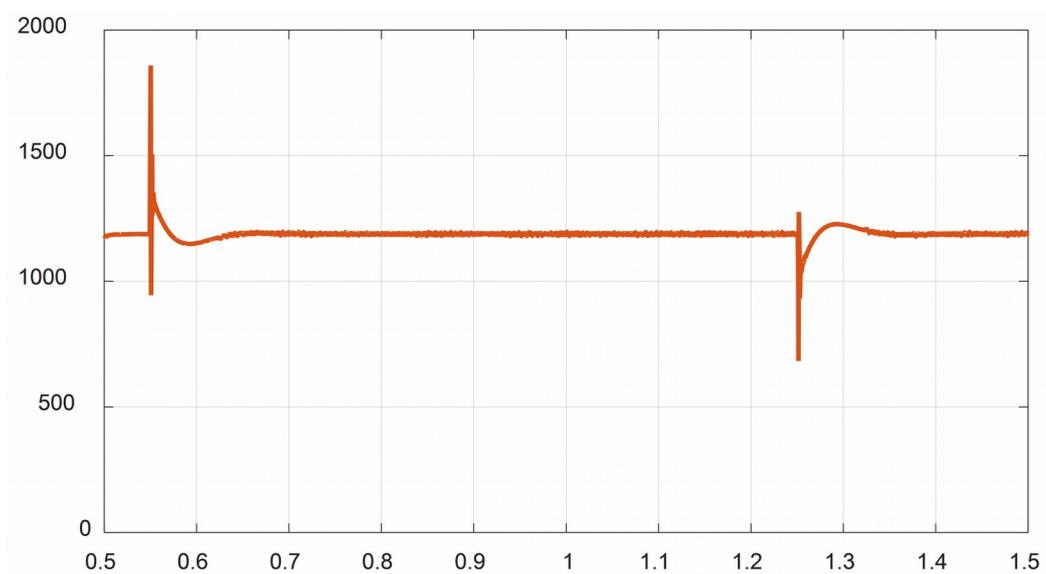
Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται η τάση του ζυγού και η κατάσταση λειτουργίας του μικροδικτύου συναρτήσει του χρόνου. Η έναρξη της φόρτισης της μπαταρίας προκάλεσε την μετάβαση **mode 1**→**mode 2**, αλλά το τέλος της φόρτισης δε διατάραξε σχεδόν καθόλου την τάση.



*Εικόνα 7.6(δ): Τάση ζυγού-κατάσταση λειτουργίας  $t(sec)$*

Στην εικόνα 7.6(ε) φαίνεται η ισχύς του Φ/Β. Όπως, παρατηρούμε δεν υπήρξε σημαντική διαταραχή καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

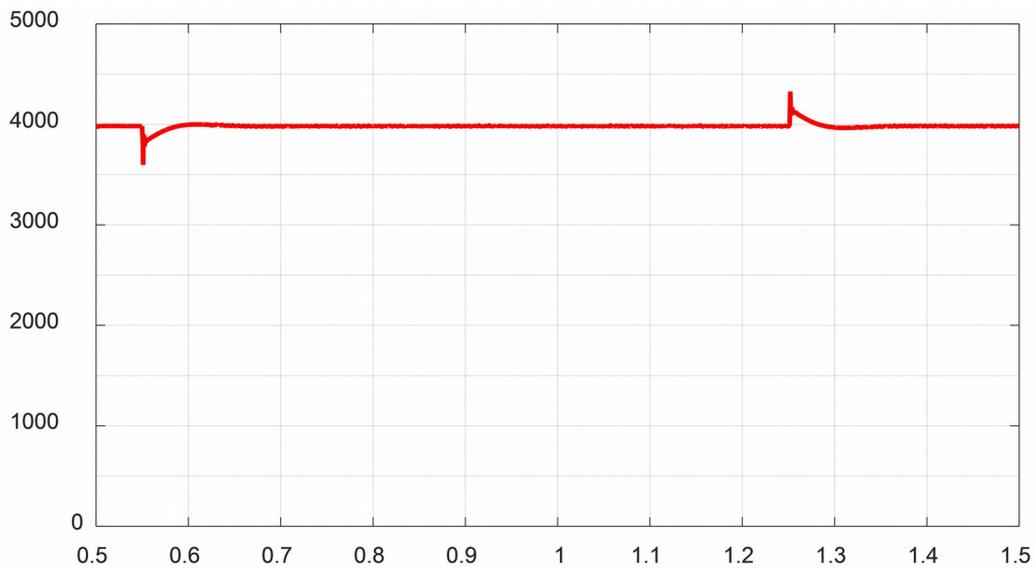
***Ppv(Watt)***



*Εικόνα 7.6(ε): Ισχύς εξόδου μετατροπέα του Φ/Β  $t(sec)$*

Τέλος, παραθέτουμε και την ισχύ του φορτίου, η οποία επίσης ήταν σταθερή.

### ***Pload(Watt)***



***Εικόνα 7.6(στ): Ισχύς που καταναλώνει το φορτίο t(sec)***

### **7.3.5 Σενάριο 5<sup>ο</sup>**

Σε αυτή την προσομοίωση θέλουμε να υποβάλλουμε σε ένα ακραίο σενάριο το μικροδίκτυο. Μας ενδιαφέρει να δοκιμάσουμε την απόρριψη φορτίου, επομένως θα ορίσουμε ζήτηση φορτίου μεγαλύτερη από αυτή που μπορούν να ικανοποιήσουν οι πηγές. Οι αρχικές συνθήκες των μεταβλητών που επιλέξαμε φαίνονται ακολούθως.

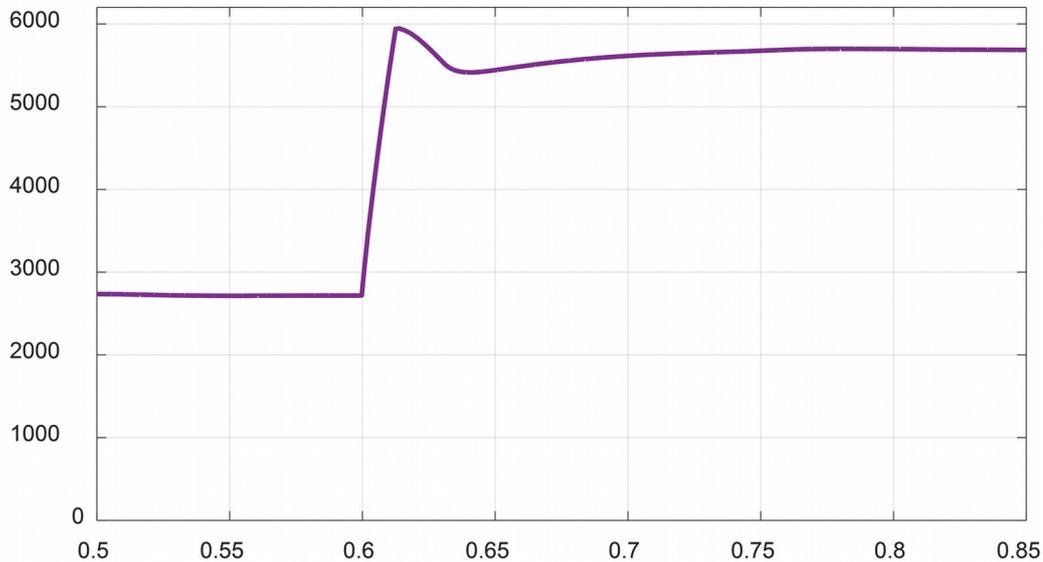
<b>Μεταβλητή Συστήματος</b>	<b>Αρχική Τιμή</b>
G-ηλιακή ακτινοβολία (W/m <sup>2</sup> )	300
T-θερμοκρασία (°C)	23
Φ/B παραγωγή (Watt)	280
Ισχύς φορτίου (Watt)	3000
SoC μπαταρίας (%)	75
grid ( 1 → ON / 0 → OFF)	1

Στον επόμενο πίνακα, παραθέτονται οι μεταβολές που έγιναν κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου σεναρίου.

<b>Χρονική στιγμή t (sec)</b>	<b>Μεταβολή στο μικροδίκτυο</b>
0	Έναρξη προσομοίωσης
0.3	grid = 0
0.6	Φορτίο = 9000W

Πρώτα, θα εξετάσουμε την αντίδραση του fuel cell. Το φορτίο που ορίστηκε δε μπορεί να εξυπηρετηθεί, καθώς  $P_{\Phi/B} = 280W$  και  $P_{FC,max} = 6100W$ . Παρατηρούμε ότι, η κυψέλη καυσίμου φτάνει στο μέγιστο προσπαθώντας να συγκρατήσει την τάση, όμως αυτό δεν είναι αρκετό και προς το τέλος σταθεροποιείται στα 5700W περίπου. Θα δούμε στη συνέχεια, για ποιο λόγο έγινε αυτό.

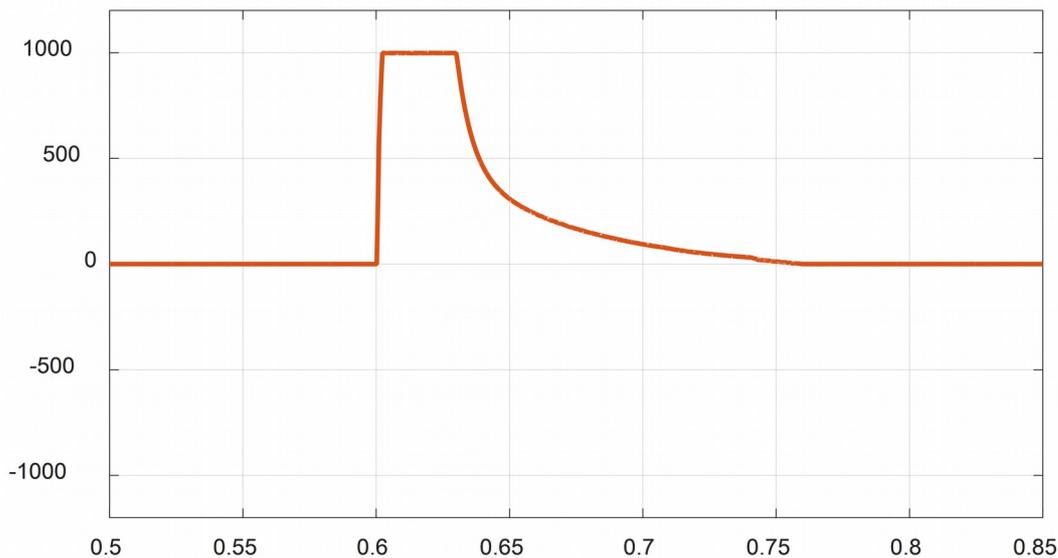
***P<sub>fc</sub>(Watt)***



***Εικόνα 7.7(α): Ισχύς εξόδου μετατροπέα fuel cell t(sec)***

Η ισχύς της μπαταρίας παρουσιάζει παρόμοια μη φυσιολογική συμπεριφορά. Αρχικά, τη στιγμή που παρουσιάζεται η αύξηση του φορτίου, δίνει το μέγιστο της ισχύος της για μεγάλο χρονικό διάστημα (όχι όπως στα προηγούμενα σενάρια). Στη συνέχεια, περίπου τη χρονική στιγμή  $t = 0.64 \text{ sec}$ , η ισχύς αρχίζει και μειώνεται μέχρι που μηδενίζεται, το οποίο μεταφράζεται σε σταθεροποίηση της τάσης του ζυγού στα 380 volt. Η ισχύς της μπαταρίας παραθέτεται στην επόμενη εικόνα.

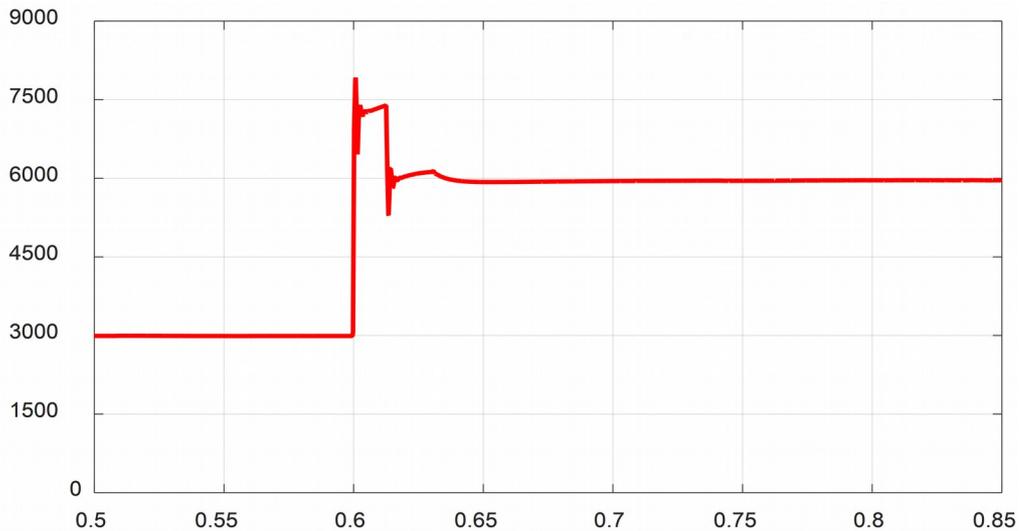
***P<sub>bat</sub>(Watt)***



***Εικόνα 7.7(β): Ισχύς εξόδου μετατροπέα μπαταρίας t(sec)***

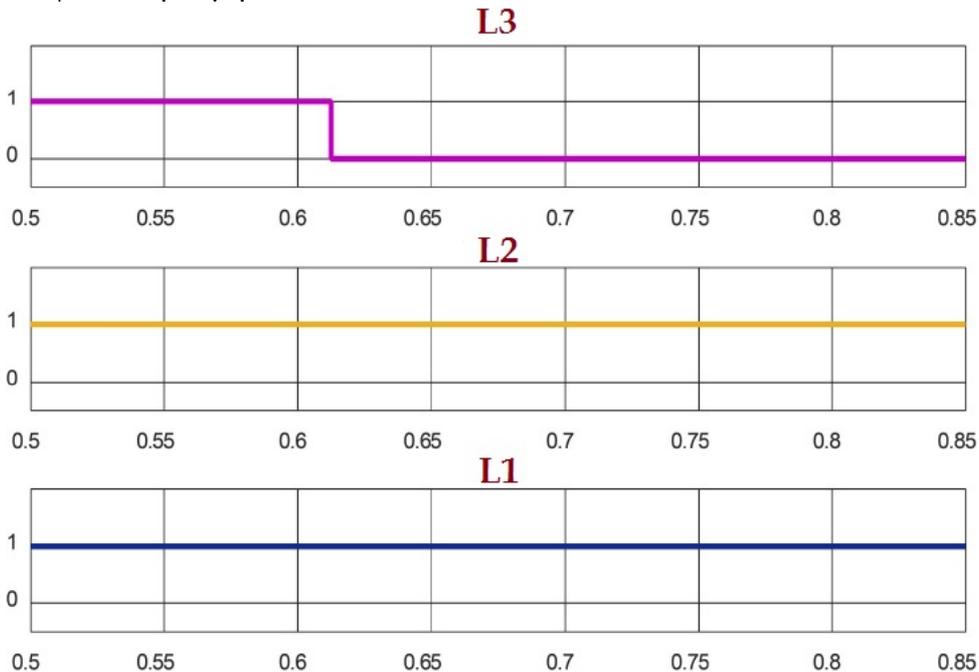
Η συμπεριφορά αυτή του μικροδικτύου προκλήθηκε από τον ελεγκτή του φορτίου. Επειδή, η ισχύς που ζητήθηκε ήταν μεγαλύτερη από αυτή που μπορούσαν να δώσουν και οι 3 γεννήτριες μαζί η τάση άρχισε να «γονατίζει» και ξεπέρασε το κατώφλι των 342 volt. Επομένως, ενεργοποιήθηκε η απόρριψη φορτίου που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 6, και αποκόπηκε το φορτίο χαμηλότερης προτεραιότητας, το οποίο ήταν 3kW. Οι άλλες δύο ομάδες που έμειναν είχαν συνολική ζήτηση 6kW, άρα το φορτίο μπορεί πλέον να εξυπηρετηθεί. Έτσι, σταδιακά το fuel cell σταθεροποιεί την ισχύ του στα 6000W και η τάση επανέρχεται στην ονομαστική τιμή. Παρακάτω φαίνεται η ισχύς του φορτίου, όπως εξελίχθηκε στο σενάριο.

***Pload(Watt)***



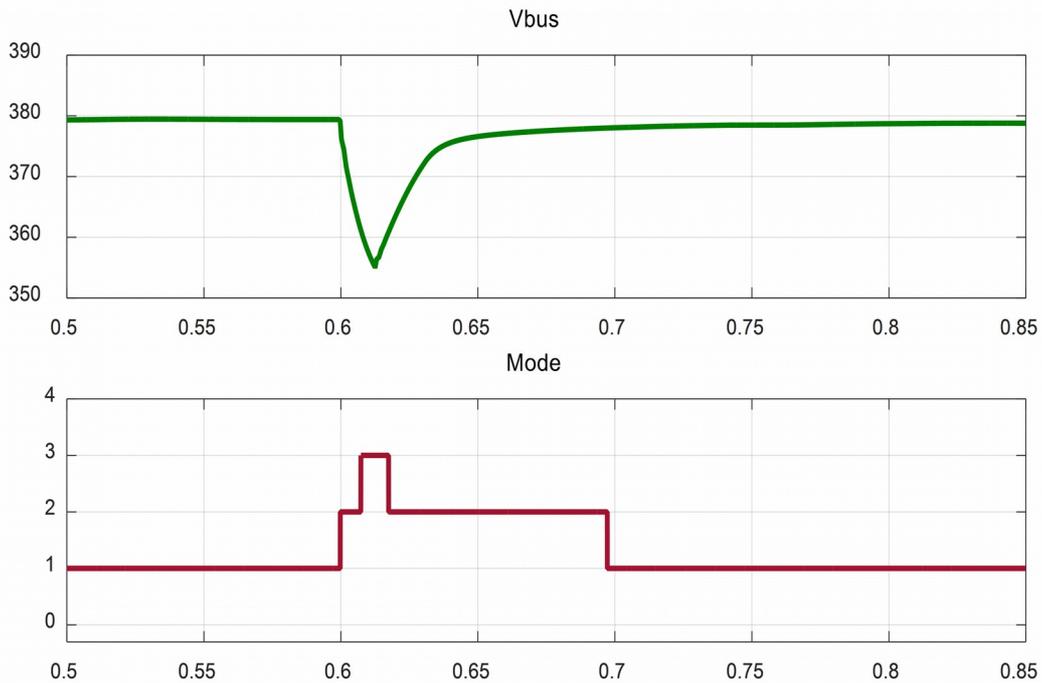
***Εικόνα 7.7(γ): Ισχύς που κατανάλωσε το φορτίο t(sec)***

Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται οι τιμές των διακοπών για τις 3 ομάδες φορτίων. Η στιγμή που ο διακόπτης της μίας ομάδας μηδενίστηκε είναι όταν η τάση του φορτίου έφτασε την τιμή 342 volt.



***Εικόνα 7.7(δ): Λογικές τιμές διακοπών για τις ομάδες φορτίων t(sec)***

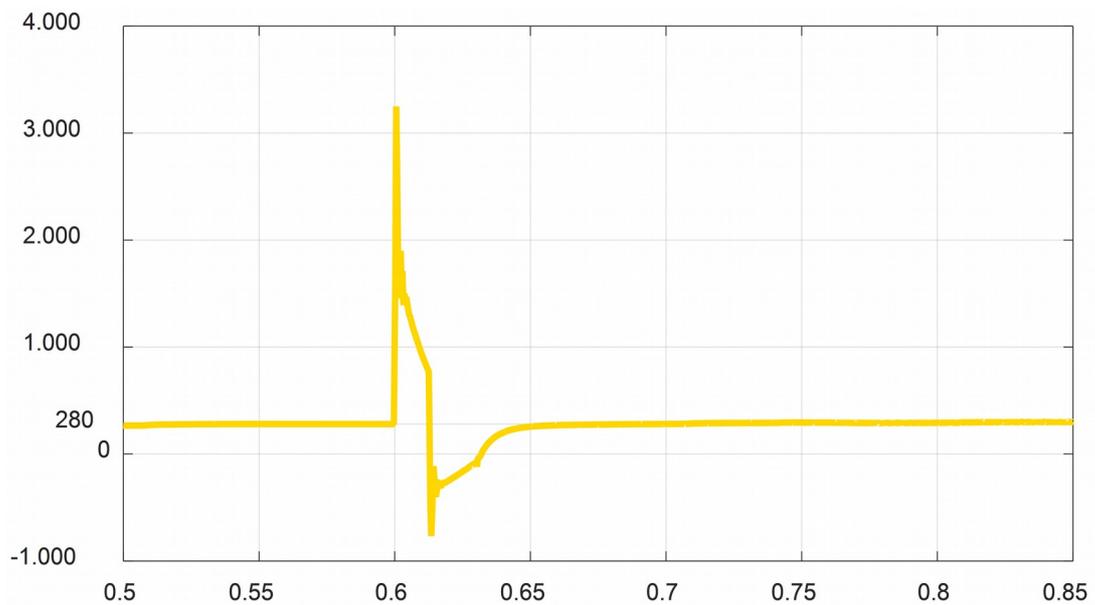
Παρακάτω δίνεται η τάση του ζυγού και η κατάσταση λειτουργίας του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι, σε αυτό το σενάριο λόγω της αδυναμίας των πηγών είχαμε μετάβαση όχι μόνο σε mode 2, αλλά και στο mode 3.



*Εικόνα 7.7(ε): Τάση ζυγού-κατάσταση λειτουργίας  $t(sec)$*

Η Φ/Β συστοιχία, όπως δείχνει και η εικόνα 7.7(στ) ακολούθως, διαταράχθηκε μέχρι να γίνει η απόρριψη φορτίου, αλλά είχε σταθερή ισχύ γενικά κατά τη διάρκεια του σεναρίου.

***Ppv(Watt)***



*Εικόνα 7.7(στ): Ισχύς εξόδου του μετατροπέα του Φ/Β  $t(sec)$*

## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>

### Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μοντελοποιήθηκε ένα DC μικροδίκτυο, το οποίο απαρτίζεται από μία Φ/Β συστοιχία, μία κυψέλη καυσίμου, ένα σύστημα συσσωρευτών και 3 γραμμές φορτίου. Για να ελέγξουμε τη λειτουργία του συστήματος υλοποιήσαμε τη φιλοσοφία ελέγχου DBS. Όταν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κύριο δίκτυο, την τάση διαμορφώνει το δίκτυο μέσω ενός inverter. Αντίθετα, τις χρονικές περιόδους που το μικροδίκτυο είναι απομονωμένο, την τάση κρατάει σταθερή το fuel cell μέσω του ελέγχου droop, και οι μπαταρίες βοηθάνε στην εξομάλυνση μεταβατικών φαινομένων από τις απότομες μεταβολές φορτίου.

Καταφέραμε να συμπεριλάβουμε στο σχεδιασμό μας και ακραία σενάρια, όπως τη σύνδεση φορτίων μεγαλύτερης κατανάλωσης ισχύος από το τεχνικό μέγιστο των γεννητριών μας, όπως επίσης και την περίπτωση που οι μπαταρίες είναι αποφορτισμένες κάτω από το όριο προστασίας τους. Σε κάθε κατάσταση που προσομοιώσαμε, πετύχαμε το σύστημα να διατηρεί σταθερή τάση και να τροφοδοτεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης. Σε καμία περίπτωση, το μικροδίκτυο δεν κατέρρευσε, ούτε τροφοδότησε με μη ανεκτή τάση τα φορτία. Να σημειώσουμε ότι λήφθηκε υπόψιν και η προστασία του χρόνου ζωής των συσσωρευτών.

Το μεγαλύτερο προτέρημα της μεθόδου ελέγχου που εφαρμόσαμε είναι η μεγάλη αξιοπιστία, καθώς οι ελεγκτές των διάφορων μονάδων δεν επικοινωνούν καθόλου μεταξύ τους. Ακόμη, και σε περίπτωση που αλλάξει η τοπολογία του μικροδικτύου, αν δεν αποτύχει η κυρίαρχη μονάδα (master unit), που στην δική μας διάταξη είναι το fuel cell, το σύστημα θα συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η μέθοδος DBS έχει πολλά θετικά στοιχεία και ότι μπορεί να πετύχει ικανοποιητική συμπεριφορά. Αυτό ενισχύει την υπεροχή της DC τάσης έναντι της AC τάσης για μικροδίκτυα, σε συνδυασμό, με την απλότητα της διάταξης και την καλύτερη απόδοση (λόγω της μη ανάγκης μετατροπής dc σε ac).

Η μελέτη που διεξήγαμε, θα μπορούσε να εξελιχθεί με την εισαγωγή και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με διαφορετικές συμπεριφορές, όπως ανεμογεννήτριες και καυστήρες βιομάζας. Είναι απαραίτητος ένας σχεδιασμός σε βάθος ολόκληρου έτους, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές που παρουσιάζει η Φ/Β παραγωγή και τα φορτία, ώστε να είναι αυτόνομο το μικροδίκτυο όλο το χρόνο. Τέλος, θα μπορούσε να αναπτυχθεί μία στρατηγική ελεγχόμενης σύνδεσης και αποσύνδεσης στο δίκτυο κοινής ωφελείας για την οικονομική βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος.

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1]National Research Council (NRC), 2006. Surface Temperature Reconstructions For the Last 2,000 Years. National Academy Press, Washington DC ISBN: 0-309-66144-7
- [2]<http://climate.nasa.gov>
- [3]"A Review of Distributed Energy Resources" DNV GL Energy Arlington, VA September 2014
- [4]DOE:The Potential Benefits of Distributed Generation and Rate-Related Issues that May Impede Their Expansion; 2007.
- [5]Takahashi, et al; Policy Options to Support Distributed Resources; U. of Del., Ctr. for Energy & Env. Policy; 2005.
- [6]"Using Distributed Energy Resources". <http://www.nrel.gov>. NREL. 2002. p. 1. Archived from the original (PDF) on 8 September 2014
- [7]"Photovoltaics Report" (PDF). Fraunhofer ISE. 28 July 2014. Archived from the original on 31 August 2014. Retrieved 31 August 2014.
- [8]Parkinson, Giles (7 January 2014). "Deutsche Bank predicts second solar "gold-rush"". RENEWEconomy. Archived from the original on 14 September 2014. Retrieved 14 September 2014.
- [9]Fthenakis, V.; Kim, H. C. (2009). "Land use and electricity generation: A life-cycle analysis"Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (6-7):1465. doi:10.1016/j.rser.2008.09.017
- [10] Walwyn, David Richard; Brent, Alan Colin (2015). "Renewable energy gathers steam in South Africa". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 41: 390. doi:10.1016/j.rser.2014.08.049
- [11]"NREL: Energy Analysis - Distributed Generation Energy Technology Capital Costs". [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov).
- [12]"The facilitation of mini and small hydropower in Switzerland: shaping the institutional framework. With a particular focus on storage and pumped-storage schemes" Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL). PhD Thesis N° 5356. [Infoscience.epfl.ch](http://infoscience.epfl.ch).
- [13]Nice, Karim and Strickland, Jonathan. "How Fuel Cells Work: Polymer Exchange Membrane Fuel Cells"
- [14] Waste to Energy in Denmark by Ramboll Consult
- [15]WASTE GASIFICATION IMPACTS ON THE ENVIRONMENT AND PUBLIC HEALTH A TECHNICAL REPORT PUBLISHED BY The Blue Ridge Environmental Defense League February 2009
- [16]<https://www.wbdg.org/resources/der.php>
- [17]Crompton, T. R. (2000-03-20). Battery Reference Book (third ed.). Newnes. p. Glossary 3. ISBN 0080499953. Retrieved 2016-03-18
- [18]Gyuk I, Kulkarni P, Sayer JH, et al. (2005). "The United States of storage". IEEE Power and Energy Magazine. 3 (2): 31–9. doi:10.1109/MPAE.2005.1405868
- [19][http://www.electricitystorage.org/technology/storage\\_technologies/pumped\\_hydro](http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/pumped_hydro)
- [20]Anscombe, Nadya (4 June 2012). "Energy storage: Could hydrogen be the answer?"
- [21] Storing energy from the wind in compressed-air reservoirs Daniel Pendicka, The New Scientist Volume 195, Issue 2623, 29 September 2007, Pages 44-47 . Accessed December 2007
- [22]"Joint European Torus facility - Flywheel details"Retrieved 18 January 2014.
- [23]"Isentropic's PHES Technology"

- [24] Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective Tixador, P. Jan 2008
- [25]"Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications" Berlin: Springer. pp. 1–8. ISBN 978-1-4757-3058-6.
- [26]Decision Making Tool for Virtual Power Plants Considering Midterm Bilateral Contracts
- [27]"What the Duck Curve Tells Us About Managing A Green Grid" caiso.com. California ISO. Retrieved 29 April 2015.
- [28]Lazarewicz, Matthew; Rojas, Alex (10 June 2004)"Grid Frequency Regulation by Recycling Electrical Energy in Flywheels"DOI: 10.1109/PES.2004.1373235
- [29]Purchala K., Belmans R., KULeuven Exarchakos L., Hawkes A.D.Distributed generation and the grid integration issues. Imperial College London.
- [30]"General aspects,hierarchical controls and droop methods in microgrids:A review" Estefan?a Planas, AsierGil-de-Muro, Jon Andreu, Inigo Kortabarria, Inigo Mart?nez de Alegria
- [31]Trends in Microgrid Control IEEE-PES Task Force on Microgrid Control Chairman: Claudio A. Canizares Secretary: Rodrigo Palma-Behnke
- [32]"A DC-MICROGRID CONTROL STRATEGY USING DC- BUS SIGNALING" C. N. Papadimitriou, V. A. Kleftakis, A. Rigas and N. D.Hatziargyriou
- [33]DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid John Schonberger, Student Member, IEEE, Richard Duke, Member, IEEE, and Simon D. Round, Senior Member, IEEE
- [34]Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, Φωτοβολταϊκά Συστήματα – από τη Θεωρία στην Πράξη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π, 2013.
- [35]M. G. Villalva and E. R. Filho, "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays," Brazilian Journal of Power Electronics, vol. 14, no. 1, pp. 35 – 45, May, 2009.
- [36]Μελέτη Αλγορίθμων Ελέγχου σε Φωτοβολταϊκό Αντιστροφέα ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Χαρίλαος Σ. Παπαϊωάννου Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π. Αθήνα, Οκτώβριος 2014
- [37]Στέφανος Ν. Μανιάς, Καθηγητής ΕΜΠ, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2012
- [38]Bratt Jordana, "Grid connected PV inverters: Modeling and Simulation", San Diego 2011
- [39]"Fuel Cell Systems Explained" Second Edition 2003 James Larminie Oxford Brookes University, UK Andrew Dicks University of Queensland, Australia
- [40]"Control Systems, Robotics and Automation"- Vol II Araki M. Kyoto University Japan
- [41]Bennett, Stuart (1992). "A history of control engineering, 1930-1955" IET.p.p.48. ISBN 978-0-86341-299-8
- [42]"Battery Capacity" techlib.com
- [43] A Guide to Understanding Battery Specifications, MIT Electric Vehicle Team, December 2008