



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

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ
ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΣΡ.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Δ. Παπαγεωργίου

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα Οκτώβριος 2015



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

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΕ
ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΣΡ.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Δ. Παπαγεωργίου

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την/2015

Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής ΕΜΠ

Παπαθανασίου Στάυρος
Αναπληρωτής Καθηγητής

Γεωργιλάκης Παύλος
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα Οκτώβριος 2015

.....

Μαρία Δ. Παπαγεωργίου

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

Copyright © Μαρία Παπαγεωργίου, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ευστάθειας τάσης ενός dc μικροδικτύου και η εφαρμογή σε αυτό πρωτογενούς και δευτερογενούς ελέγχου, με στόχο τη σωστή λειτουργία τάσης και την ισόποση κατανομή φορτίου.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία περιγραφή των μικροδικτύων και στη συνέχεια, πιο συγκεκριμένα των dc μικροδικτύων. Τα dc μικροδίκτυα είναι αυτά που τα τελευταία χρόνια προσελκύουν το ενδιαφέρον καθώς παρουσιάζουν μια πληθώρα από πλεονεκτήματα και υπερτερούν έναντι των ac. Τα πλεονεκτήματα αυτά αναλύονται στο πρώτο κεφάλαιο. Επιπλέον στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια περιγραφή της κατανεμημένης παραγωγής, καθώς οι πηγές ενέργειας του μικροδικτύου είναι αυτές της κατανεμημένης παραγωγής.

Στο επόμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 2^ο) γίνεται αρχικά μία περιγραφή των ειδών ευστάθειας των ΣΗΕ και στη συνέχεια διεξάγεται μελέτη για την ευστάθεια του μικροδικτύου, κάνοντας χρήση των εξισώσεων κατάστασης και συμπεραίνοντας για την ευστάθεια παρατηρώντας τους πόλους του συστήματος. Ακόμη γίνεται μελέτη της ευστάθειας μεταβάλλοντας τις τιμές των αντιστάσεων στατισμού και των φορτίων.

Στη συνέχεια, στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται η στρατηγική ελέγχου. Ο έλεγχος είναι ένα από τα βασικότερα στοιχεία ενός μικροδικτύου και είναι απαραίτητος ώστε να διατηρείται η ισορροπία ισχύος μεταξύ των πηγών και των φορτίων και μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω επίπεδα ιεραρχικού ελέγχου: τον πρωτογενή έλεγχο(primary), τον δευτερογενή (secondary) και τον τριτογενή(tertiary) πηγών και φορτίων. Στον πρωτογενή έλεγχο διακρίνουμε την παθητική μέθοδο ελέγχου ή έλεγχος στατισμού (droop control) και την ενεργητική μέθοδο ελέγχου. Έπειτα γίνεται περιγραφή της προτεινόμενης μεθόδου ελέγχου, που αποτελείται από τον πρωτογενή έλεγχο- έλεγχο στατισμού (droop control) και από έναν δευτερογενή, μικρής επικοινωνίας έλεγχο.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του προτεινόμενου ελέγχου ενός dc μικροδικτύου. Η πρώτη προσομοίωση αφορά σε ένα dc μικροδίκτυο, στο οποίο επενεργεί μόνο ο πρωτογενής έλεγχος. Στη συνέχεια επιβάλλεται και ο δευτερογενής έλεγχος. Ακολουθεί η προσομοίωση του μικροδικτύου μεταβάλλοντας τα φορτία των δύο πηγών του dc μικροδικτύου και παρατηρώντας το πως επενεργεί ο έλεγχος ξανά. Τέλος γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της ευστάθειας, όταν το μικροδίκτυο είναι στα όρια της ευστάθειας και ταυτόχρονα προκαλώντας κάποια διαταραχή.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μικροδίκτυο, dc μικροδίκτυο, κατανεμημένη παραγωγή, ευστάθεια ΣΗΕ, ευστάθεια τάσης, έλεγχος μικροδικτύου, πρωτογενής έλεγχος, έλεγχος στατισμού, δευτερογενής έλεγχος

Abstract

The aim of this thesis is to study the voltage stability of a dc microgrid and the application of primary and secondary control in this in order to ensure the correct voltage regulation and the equal load distribution.

The first chapter is a description of microgrids and then more specifically a description of dc microgrids. The dc microgrids are those, which in recent years have been attracting interest as they present plenty of advantages compared to ac microgrids. These advantages are also discussed in the first chapter. Furthermore in this chapter, the distributed generation is described, as microgrid sources are mainly of this type.

The next chapter (chapter 2) is initially a description of the type of stability of Power Systems and then a study on the stability of the dc microgrid is conducted using the state equation. The stability of the system is concluded by the observation of the poles of the system. Also there is a study of the voltage stability of the system by changing the values of the droop resistance and the loads.

Consequently, in the third chapter, the control strategy is described. The control is one of the principal elements of a microgrid and it is necessary in order to maintain the power balance between the sources and the loads. We can distinguish three levels of the hierarchical control : the primary control, the secondary control and the tertiary control. In the primary control there are two methods : the passive load sharing or the droop concept and the active load sharing. Then a description of the proposed method of control is conducted, which is consisted of the primary control and a low- bandwidth communication secondary control.

Finally, 4th chapter describes the results of the simulations of the proposed control method. In the first simulation, only the primary control is implemented in a dc microgrid. Moreover the secondary control is implemented in the same dc microgrid. Then we change the loads, observing the control and its results, on the microgrid. And finally, there is a sensitivity analysis of stability, when the microgrid is on the verge of stability and at the same time a disturbance is caused.

KEY WORDS

Microgrid, dc microgrid, distributed generation, power system stability, voltage stability, microgrid control, primary control, droop control, secondary control

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2014-2015 υπό την επόβλεψη του κ. Χατζηαργυρίου, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Χριστίνα Παπαδημητρίου για την πολύτιμη βοήθειά της.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου, τους συναδέλφους και τους φίλους μου για την στήριξη και τη βοήθειά τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: Μικροδίκτυο- DC	Μικροδίκτυο -Κατανεμημένη Παραγωγή	15
1.1. Το Μικροδίκτυο.....		15
1.1.1 Εισαγωγή.....		15
1.1.2 Πλεονεκτήματα Μικροδικτύου		15
1.1.3 Λειτουργίες “Plug and Play” και “Peer to Peer”		17
1.1.4 Αρχιτεκτονική μικροδικτύου		18
1.1.5 Μονάδες αποθήκευσης		19
1.2 DC Μικροδίκτυο.		28
1.2.1 Εισαγωγή.....		28
1.2.2 DC μικροδίκτυο και πλεονεκτήματα.		30
1.2.3 Τα dc μικροδίκτυα πλεονεκτούν έναντι των ac.		32
1.2.3 Τα DC μικροδίκτυα στο μέλλον.		33
1.3 Κατανεμημένη Παραγωγή.....		34
1.3.1 Ορισμός.....		34
1.3.2 Πλεονεκτήματα.		39
1.3.3 Μειονεκτήματα.		41
Κεφάλαιο 2: Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας		47
2.1 Εισαγωγή		47
2.2 Ορισμός		47
2.3 Κατηγοριοποίηση της ευστάθειας ΣΗΕ		49
2.3.1 Ευστάθεια γωνίας		50
2.3.2 Ευστάθεια τάσης		52
2.3.3 Ευστάθεια συχνότητας.....		55
2.4 Γραμμικοποίηση.....		56
2.5 Μελέτη δυναμικής ευστάθειας σε DC μικροδίκτυο		58
2.5.1 Δυναμική ευστάθεια		58
2.5.2 Μαθηματικό μοντέλο και μελέτη της δυναμικής ευστάθειας.		58
Κεφάλαιο 3 ^ο : Στρατηγική Ελέγχου.		64
3.1. Εισαγωγή.....		64
3.2 Πρωτογενής έλεγχος (Primary Control)		65
3.2.1. Παθητική Μέθοδος Ελέγχου ή η έννοια του ελέγχου στατισμού (droop control).		66
3.2.2 . Ενεργητική μέθοδος ελέγχου.....		68

3.3 Δευτερογενής έλεγχος (secondary control).	70
3.4. Τριτογενής έλεγχος- σύστημα διαχείρισης ενέργειας (tertiary control- energy management system).	70
3.5. Κατηγοριοποίηση ελέγχου.	71
3.6 Αρχιτεκτονικές ελέγχου.	71
3.7 Προτεινόμενη διάταξη ελέγχου dc μικροδικτύου.	76
Κεφάλαιο 4 ^ο : Διεξαγωγή αποτελεσμάτων.	81
4.1 Εισαγωγή.	81
4.2 DC-DC μετατροπείς (converters).	81
4.2.1 Έλεγχος dc-dc μετατροπέων.	81
4.2.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter).	83
4.3 PID ελεγκτής.	86
4.3.1 Λειτουργία PID ελεγκτή.	86
4.3.2 Ρύθμιση παραμέτρων PID ελεγκτή.	87
4.4 Δομή dc μικροδικτύου- Έλεγχος.	87
4.5. Διεξαγωγή Προσομοίωσης.	89
4.5.1 Προσομοίωση πρωτογενούς ελέγχου.	92
4.5.2 Προσομοίωση πρωτογενούς και δευτερογενούς ελέγχου.	94
4.5.3 Προσομοίωση πρωτογενούς και δευτερογενούς ελέγχου αυξάνοντας τη ζήτηση των δύο πηγών.	97
4.5.4. Προσομοίωση πρωτογενούς και δευτερογενούς ελέγχου καθώς μειώνεται η ζήτηση των δύο πηγών.	100
4.6. Ανάλυση ευαισθησίας ευστάθειας.	102
Συμπεράσματα	105
Βιβλιογραφία	109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: Μικροδίκτυο- DC Μικροδίκτυο - Κατανεμημένη Παραγωγή

1.1. Το Μικροδίκτυο.

1.1.1 Εισαγωγή.

Το μικροδίκτυο αποτελεί ένα νέο είδος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει είτε συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο είτε αυτόνομα. Στο μέλλον αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που είναι απόλυτα φυσιολογικό καθώς οι ενεργειακές ανάγκες του πληθυσμού αυξάνονται ολοένα και περισσότερο.

Ένα μικροδίκτυο αποτελείται από τις πηγές κατανεμημένης παραγωγής ισχύος από λίγα kW μέχρι 1-2 MW όπως είναι οι μικροτουρμπίνες, οι κυψέλες καυσίμου, τα φωτοβολταϊκά, οι ανεμογεννήτριες, γεννήτριες ντίζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού(γεννήτριες, μικροστρόβιλοι), γεωθερμικοί και ηλιοθερμικοί σταθμοί, μικρά υδροηλεκτρικά, μονάδες που χρησιμοποιούν πρώτη ύλη τη βιομάζα, βιοντίζελ ή οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας. Ακόμη από τις συσκευές αποθήκευσης όπως μπαταρίες, πυκνωτές, σφόνδυλους κ.α. και ελεγχόμενα φορτία τα οποία συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης κάποιες φορές.

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί σε μέρη που είναι διαθέσιμες οι μορφές ενέργειας τις οποίες χρησιμοποιούν οι πηγές παραγωγής, έτσι ώστε να καλύπτει τις συνολικές καταναλώσεις της περιοχής όπου εγκαθίσταται. Παραδείγματα τέτοιων μικροδικτύων είναι οικίες, όπου μπορεί να εγκατασταθεί υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και γεννήτριας ντίζελ ή βιοκαυσίμων, ώστε να καλύπτει τις ανάγκες στην κατανάλωση του σπιτιού. Ακόμη μπορεί να συναντήσουμε μικροδίκτυο σε νοσοκομείο με πηγές κατανεμημένης παραγωγής τις κυψέλες καυσίμου ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια και ζεστό νερό. Επιπλέον σε πόλεις μπορούμε να εγκαταστήσουμε σταθμούς βιομάζας, γεννήτριες ντίζελ, ακόμη και αιολικά πάρκα.

Το μέγεθος των μονάδων παραγωγής και των φορτίων είναι αυτό που καθορίζει και τον τρόπο με τον οποίο θα συνδεθεί το μικροδίκτυο με άλλα μικροδίκτυα αλλά και με το κεντρικό δίκτυο, δηλαδή αν η σύνδεση θα γίνει στη μέση ή στη χαμηλή τάση. Προφανώς η σύνδεση στη μέση τάση απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ. Επομένως εφόσον οι μονάδες παραγωγής και κατανάλωσης ενός μικροδικτύου είναι μικρής ισχύος, η παραγωγή και η διανομή θα γίνεται στη χαμηλή τάση.[1]

1.1.2 Πλεονεκτήματα Μικροδικτύου

Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι τα μικροδίκτυα θα αποτελέσουν αναπόσπαστο κομμάτι στη λειτουργία της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.

- I. Αρχικά, όπως αναφέρεται και παραπάνω, το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο αλλά και αυτόνομα όταν χρειαστεί. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν για παράδειγμα προκύψει κάποια βλάβη στο κεντρικό δίκτυο και τότε καθίσταται απαραίτητη η απομόνωση του μικροδικτύου έτσι ώστε να εξακολουθήσει να παράγεται ηλεκτρική ενέργεια στις πηγές του μικροδικτύου για κατανάλωση στα φορτία του. Η αυτόνομη λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί χωρίς να δημιουργήσει κάποια βλάβη στην ακεραιότητα του δικτύου. Η αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου δίνει τη δυνατότητα μεγαλύτερης αξιοπιστίας σ' αυτό σε σχέση με την αξιοπιστία που παρέχεται όταν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο στο κεντρικό δίκτυο.
- II. Η χρήση των μονάδων κατανεμημένης παραγωγής στη λειτουργία του μικροδικτύου καθιστά την αξιοπιστία παραγωγής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αυξημένη. Αυτό συμβαίνει διότι όσο πιο διεσπαρμένη είναι η παραγωγή, τόσο μειώνεται η πιθανότητα ταυτόχρονης αδυναμίας λειτουργίας κάποιων μονάδων παραγωγής όπως φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών κ. α.
- III. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του μικροδικτύου είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών. Όπως είναι γνωστό οι πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός μικροδικτύου είναι τοποθετημένες κοντά στο φορτίο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες κατά τη μεταφορά ενέργειας. Επομένως συγκριτικά με το κεντρικό δίκτυο, στο οποίο η ενέργεια παράγεται σε μεγάλους σταθμούς και διανύει πολλά χιλιόμετρα για να φτάσει στον καταναλωτή, η απόδοση του μικροδικτύου υπερέρχει αυτής του κεντρικού δικτύου.
- IV. Επιπλέον δεν μπορούμε, παρά να λάβουμε υπόψη μας το γεγονός ότι τα μικροδίκτυα είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω οι κύριες πηγές ενέργειας ενός μικροδικτύου είναι οι ανανεώσιμες. Επομένως συμπεραίνουμε πως η επιβάρυνση προς το περιβάλλον είναι, αν όχι μηδενική, ελάχιστη.

- V. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (Combined Heat & Power, CHP), που αποτελεί ένα ακόμη πλεονέκτημα. Το μικροδίκτυο είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει τη θερμότητα των καυσίμων για θέρμανση κατοικιών κ. α., κάτι το οποίο απαιτεί μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας και στην περίπτωση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο απαιτούνται μονάδες μεγάλης ισχύος. Η χρήση της θερμότητας αυτής είναι εφικτή στα μικροδίκτυα καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται κοντά στο φορτίο κι έτσι ελαχιστοποιούνται οι απώλειες, όπως προαναφέρεται. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι είναι πιο εύκολο και οικονομικό να γίνει χρήση της θερμότητας αυτής από το ίδιο το μικροδίκτυο που παράγεται, παρά από το κεντρικό δίκτυο όπου οι αποστάσεις παραγωγής-φορτίου είναι πολύ μεγαλύτερες. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η απόδοση του μικροδικτύου. Η απόδοση ενός δικτύου που λειτουργεί με καύσιμο είναι περίπου 28-32 %, άρα οι απώλειες γύρω στο 70%. Μπορούμε να μειώσουμε αυτές τις απώλειες κάνοντας χρήση της θερμότητας καυσίμων που παράγεται. Για παράδειγμα ένας συνδυασμένος κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει απόδοση 60%, ενώ μία μικροτουρμπίνα 60kW επειδή χρησιμοποιεί τη θερμότητα που απελευθερώνεται για να ζεσταθεί το νερό μπορεί να έχει απόδοση έως και 90%. [1]

1.1.3 Λειτουργίες “Plug and Play” και “Peer to Peer”

Είναι απαραίτητο στη λειτουργία του μικροδικτύου να διατηρείται η υψηλή αξιοπιστία και η ευελιξία στην τοποθέτηση γεννητριών. Για να επιτευχθούν αυτές οι δύο απαιτήσεις αξιοποιούνται οι λειτουργίες “peer to peer” και “plug and play”.

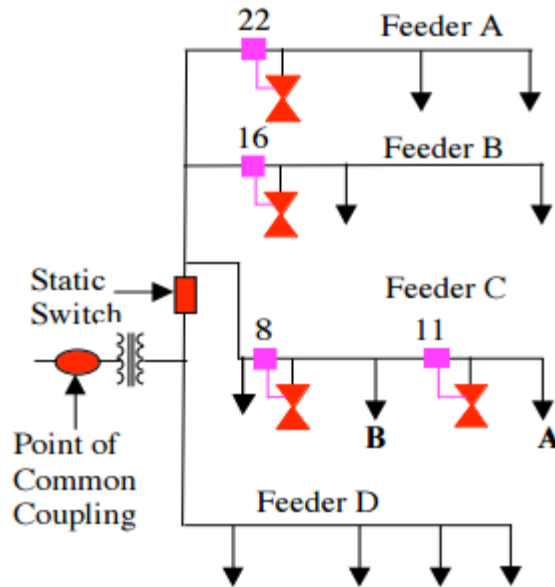
Η “peer to peer” λειτουργία εξασφαλίζει ότι δεν υπάρχουν στοιχεία στο μικροδίκτυο που να έχουν το ρόλο του κύριου ελεγκτή ή της κύριας πηγής. Αποτέλεσμα αυτού είναι να συνεχίσει το μικροδίκτυο να λειτουργεί σε περίπτωση απώλειας κάποιας συσκευής ακόμη και γεννήτριας. Προσθέτοντας μία επιπλέον πηγή εξασφαλίζουμε την απαιτούμενη ευελιξία. Ο όρος “peer to peer” χρησιμοποιείται κυρίως για ένα δίκτυο υπολογιστών στο οποίο δύο ή περισσότεροι υπολογιστές μοιράζονται τους ίδιους πόρους ισοδύναμα.

Η λειτουργία “plug and play” σημαίνει ότι μία μονάδα παραγωγής μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο, εντός του ηλεκτρικού συστήματος, χωρίς να

γίνεται ανασχεδιασμός των ελέγχων. Η παραπάνω λειτουργία παρουσιάζει παρόμοια ευελιξία μ' αυτή που παρουσιάζει η χρήση μιας οικιακής συσκευής. Αυτό μπορεί να συνδυαστεί με το ηλεκτρικό δίκτυο αν σκεφτούμε ότι τροφοδοτεί τοπικά τα φορτία όπου χρειάζεται. Το παραδοσιακό μοντέλο της λειτουργίας αυτής είναι ένα σύμπλεγμα γεννητριών σε ένα μοναδικό σημείο, κάτι που κάνει την ηλεκτρική εφαρμογή απλούστερη. Το μοντέλο "plug and play" διευκολύνει στο να τοποθετήσουμε γεννήτριες κοντά στο φορτίο θερμότητας, επιτρέποντας έτσι, πιο αποτελεσματικά, τη χρήση των απωλειών θερμότητας χωρίς τη χρήση πολύπλοκων συστημάτων κατανομής της θερμότητας .[1]

1.1.4 Αρχιτεκτονική μικροδικτύου

Η αρχιτεκτονική ενός μικροδικτύου, σε γενικές γραμμές, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 1.1. Παρατηρούμε ότι ένα μικροδίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο τροφοδοτών, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ακτινικά. Ακόμη βλέπουμε ότι υπάρχει ένα μοναδικό σημείο σύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο το οποίο ονομάζεται Σημείο Κοινής Σύνδεσης με το Δίκτυο (PCC). Κάποιοι από τους τροφοδοτές έχουν ευαίσθητα φορτία, τα οποία απαιτούν τοπική παραγωγή, ενώ άλλοι δεν διαθέτουν καμία μονάδα τοπικής παραγωγής, όπως είναι ο D (feeder D) στην εικόνα 1.1. Οι τροφοδοτές A-C, αφού έχουν τοπική παραγωγή, μπορούν να απομονωθούν από το υπόλοιπο δίκτυο χρησιμοποιώντας το στατικό διακόπτη (static switch). Στην εικόνα 1.1 υπάρχουν τέσσερις μικροπηγές στους κόμβους 8,11,16,22 , οι οποίες ελέγχουν τη λειτουργία του μικροδικτύου, μετρώντας την τάση και το ρεύμα μόνο τοπικά. Όταν προκύψει κάποιο πρόβλημα, ο διακόπτης θα ανοίξει, απομονώνοντας έτσι τα ευαίσθητα φορτία από το δίκτυο. Συνοψίζοντας, όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί συνδεδεμένο με το υπόλοιπο δίκτυο, τότε και ο τροφοδοτής D μπορεί να λειτουργήσει, παρέχοντας ισχύ στα φορτία του.[1]



Εικόνα 1.1 : Μικροδίκτυο[1]

1.1.5 Μονάδες αποθήκευσης

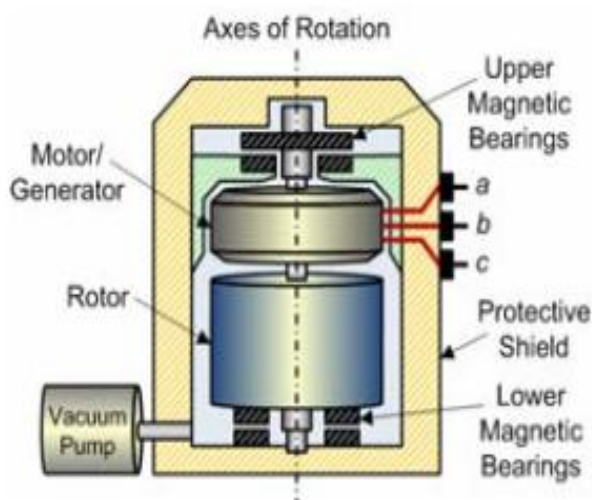
Βασικό μέρος ενός μικροδικτύου αποτελούν οι μονάδες αποθήκευσης. Αυτό οφείλεται στο ότι κάποιες φορές υποκαθιστούν τις μονάδες παραγωγής, καθώς αποθηκεύουν την ενέργεια όταν είναι διαθέσιμη κι έτσι το μικροδίκτυο μπορεί να τη χρησιμοποιήσει ανά πάσα στιγμή. Υπάρχουν δύο τρόποι αποθήκευσης ενέργειας, ο άμεσος και ο έμμεσος. Στον άμεσο τρόπο γίνεται χρήση συσκευών όπως υπεραγωγία πηνία και μεγάλης χωρητικότητας πυκνωτές. Στον έμμεσο οι συσκευές αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται είναι

1. Σφόνδυλοι (flywheels)

Οι σφόνδυλοι είναι μία από τις πιο παλιές συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία τους γίνεται ως εξής: αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μορφή κινητικής στο ρότορα, που είναι μια μάζα που περιστρέφεται με πολύ υψηλές ταχύτητες. Η φόρτιση και η εκφόρτιση ενός σφόνδουλου επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρικής μηχανής, η οποία λειτουργεί είτε ως κινητήρας ώστε να επιταχύνει το ρότορα μέχρι να φτάσει στην απαιτούμενη ταχύτητα και να παράξει συνεπώς την απαιτούμενη ισχύ(φόρτιση- charging mode), είτε ως γεννήτρια παράγοντας την ηλεκτρική ενέργεια που ζητείται, χρησιμοποιώντας αυτή που είναι αποθηκευμένη στο σφόνδυλο επιβραδύνοντας το ρότορα(εκφόρτιση- discharging mode). Η ενέργεια που αποθηκεύεται είναι ευθέως

ανάλογη με την ορμή του ρότορα του σφονδύλου και το τετράγωνο της γωνιακής του ταχύτητας, επομένως η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής αποφέρει μεγάλα οφέλη στην πυκνότητα ενέργειας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα δύο τύποι σφονδύλων να χρησιμοποιούνται ευρέως ο σφόνδυλος υψηλής ταχύτητας (HS περίπου 40000 rps) και ο σφόνδυλος χαμηλής ταχύτητας (LS περίπου 7000 rps). Οι σύγχρονοι σφόνδυλοι με υπεραγωγία μαγνητική ρουλεμάν μπορούν να επιτύχουν μεγάλες αποδόσεις μέχρι και 90%. [2]

Στην παρακάτω εικόνα(εικόνα 1.2) φαίνεται η κατασκευή του σφονδύλου.



Εικόνα 1.2 σφόνδυλος [2]

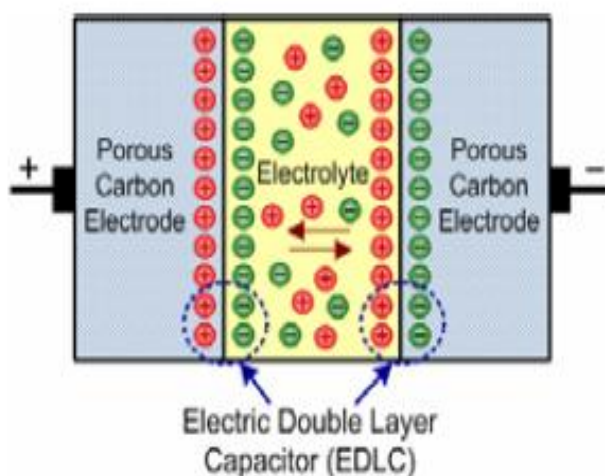
2. Πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας (super capacitors)

Οι πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που αποτελούνται από δύο συνήθως ηλεκτρόδια ενεργού άνθρακα, που είναι βυθισμένα σε κάποιον ηλεκτρολύτη, συνήθως υδροξείδιο ή θειικό οξύ και έναν διαχωριστή, ο οποίος εμποδίζει την επαφή μεταξύ των ηλεκτροδίων, επιτρέπει όμως τη μεταφορά ιόντων μεταξύ τους. Κατά συνέπεια δημιουργούνται δύο πυκνωτές, όπου ο σπλισμός του καθενός είναι το ένα ηλεκτρόδιο και ο ηλεκτρολύτης, συνδεδεμένοι σε σειρά, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

Η ενέργεια αποθηκεύεται στο διπλό στρώμα που δημιουργείται εξαιτίας της διεπαφής, μεταξύ του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου και όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στην εικόνα η ενέργεια φαίνεται σαν ένα συνεχές πεδίο. Αυτός ο τρόπος αποθήκευσης ενέργειας δίνει τη δυνατότητα πολύ υψηλής χωρητικότητας ανά μονάδα όγκου, η οποία μπορεί να γίνει από εκατοντάδες έως χιλιάδες φορές από αυτή των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών. Συγκρίνοντάς τους με τις συμβατικές

μπαταρίες έχουν επίσης πολύ πιο υψηλές τιμές χωρητικότητας. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 85%-98% σε μεγάλο εύρος θερμοκρασίας και υγρασίας. Υπάρχουν στο εμπόριο συσκευές της τάξης των 2MVA και με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας της τάξης των 400kJ.

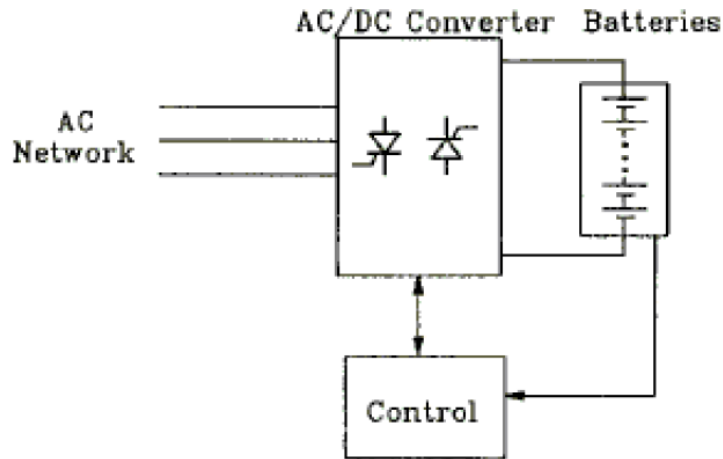
Οι πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας είναι κατάλληλη για χρήση σε συνδυασμό με κυψέλες καυσίμου κι αυτό διότι δρουν συμπληρωματικά. Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν συνεχώς παράγοντας ενέργεια, ενώ οι πυκνωτές μπορούν να λειτουργούν καλύπτοντας τις αιχμές ενέργειας.[2]



Εικόνα 1.3 πυκνωτής μεγάλης χωρητικότητας[2]

3. Συσσωρευτές

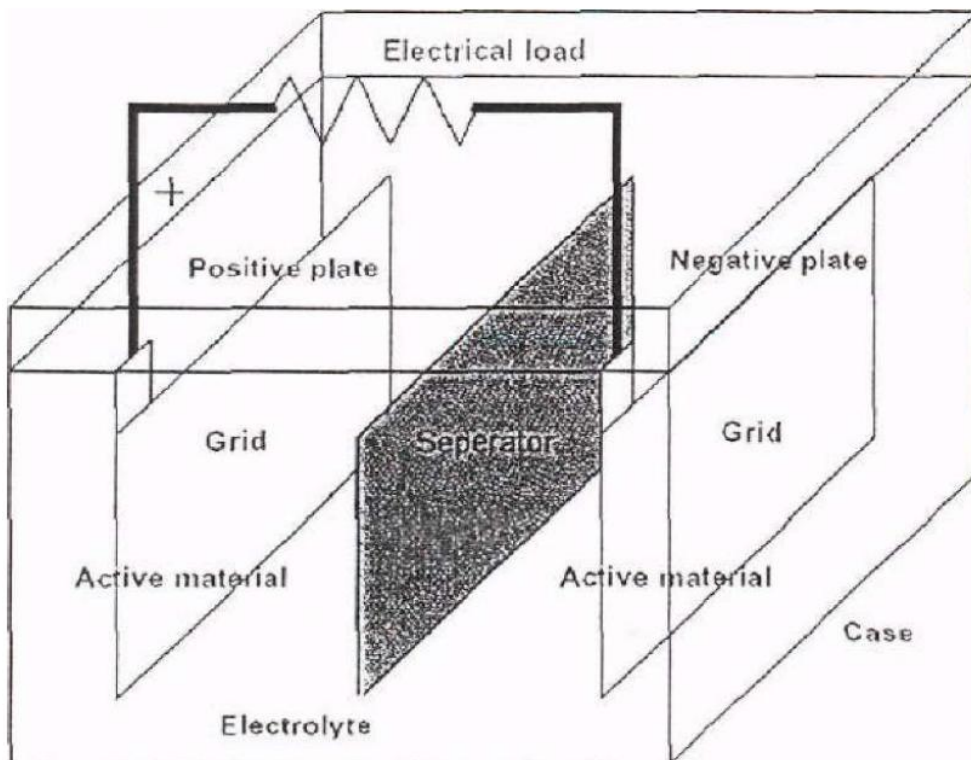
Οι συσσωρευτές ή αλλιώς μπαταρίες είναι ηλεκτροχημικές συσκευές. Έχουν δηλαδή τη δυνατότητα να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική και αντίστροφα. Τα κύρια μέρη μιας εγκατάστασης αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία είναι μια συστοιχία συσσωρευτών, ένας εξοπλισμός ρύθμισης ισχύος κι ένας ελεγκτής, όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1.4: εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρία

Λειτουργία και δομή συσσωρευτών.

Δομική μονάδα ενός συσσωρευτή είναι το στοιχείο(cell). Το στοιχείο αποτελείται από ένα ζεύγος πλακών, η μία θετική και η άλλη αρνητική κι έναν ηλεκτρολύτη στον οποίο είναι βυθισμένες οι πλάκες και περικλείονται σε ένα δοχείο. Η δομή του συσσωρευτή απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 1.5: Συσσωρευτής.

Από το παραπάνω σχήμα μπορούμε να διακρίνουμε τα συστατικά μέρη ενός συσσωρευτή τα οποία είναι το ενεργό υλικό (active material), ο ηλεκτρολύτης, το πλέγμα (grid), οι πλάκες(plates), ο διαχωριστής(separator), και οι τερματικοί πόλοι(terminal poles). Ας δούμε πιο αναλυτικά τη χρησιμότητα καθενός ξεχωριστά.

- Ενεργό υλικό

Το ενεργό υλικό υπάρχει στην θετική και στην αρνητική πλάκα. Είναι το βασικό στοιχείο της ηλεκτροχημικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στην μπαταρία. Η ποσότητα του ενεργού υλικού μιας μπαταρίας είναι ανάλογη της χωρητικότητας της. Σε μια τυπική μπαταρία μολύβδου το ενεργό υλικό της θετικής πλάκας είναι διοξείδιο του μολύβδου(PbO₂) και της αρνητικής μεταλλικός πορώδης μόλυβδος (Pb), τα οποία αντιδρούν σε διάλυμα θειικού οξέος(H₂SO₄) κατά τη λειτουργία της μπαταρίας.

- Ηλεκτρολύτης

Ο ηλεκτρολύτης είναι το αγώγιμο μέσο που επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ανταλλαγής ιόντων μεταξύ των πλακών. Στις μπαταρίες μολύβδου ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται το θειικό οξύ (H₂SO₄) είτε σε υγρή μορφή είτε σε gel, ενώ στις μπαταρίες νικελίου (Ni) χρησιμοποιείται διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH). Όταν ο ηλεκτρολύτης είναι υγρό διάλυμα απαιτείται η προσθήκη νερού ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να γίνει αναπλήρωση της ποσότητας που χάνεται εξαιτίας της εξαέρωσης.

- Πλέγμα

Το πλέγμα προορίζεται ώστε να συγκρατεί το ενεργό υλικό πάνω στις πλάκες και είναι ηλεκτρικά αγώγιμο. Στις μπαταρίες μολύβδου συνήθως είναι ένα πλαίσιο από κράμα μολύβδου. Στα υλικά του κράματος γίνεται πρόσμιξη αντιμονίου (Sb) ή ασβεστίου (Ca), τα οποία αυξάνουν τη μηχανική αντοχή των πλακών κι έχουν επίδραση στις επιδόσεις της μπαταρίας. Στη θετική πλάκα το αντιμόνιο κατέχει μικρό ποσοστό, συνήθως μικρότερο του 3% του κράματος, έτσι ώστε η λειτουργία της μπαταρίας να διατηρείται σε άριστη κατάσταση για τρία χρόνια.

- Πλάκες

Οι πλάκες αποτελούνται από το πλέγμα και το ενεργό υλικό. Συνήθως υπάρχει πλήθος αρνητικών και θετικών πλακών συνδεδεμένα παράλληλα μέσα σε μία κυψελίδα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, δηλαδή το πάχος τους και οι σχέσεις μεταξύ των επιφανειών των αρνητικών και θετικών πλακών παίζουν καθοριστικό ρόλο στα χαρακτηριστικά της μπαταρίας.

- Διαχωριστής

Ο διαχωριστής είναι ένα πορώδες απομονωτικό υλικό που αποτρέπει την αγωγή επαφή μεταξύ της θετικής και της αρνητικής πλάκας, επιτρέπει όμως τη διέλευση ιόντων μεταξύ τους. Σε πολλές περιπτώσεις ο διαχωριστής εφαρμόζεται σαν φάκελος και περικλείει ολόκληρη την πλάκα εμποδίζοντας έτσι τη δημιουργία βραχυκυκλώματος, λόγω των διαχεόμενων υλικών στο κάτω μέρος των πλακών.

- Πόλοι

Οι πόλοι είναι οι εξωτερικές θετικές ή αρνητικές συνδέσεις της μπαταρίας. Η ύπαρξή τους είναι απαραίτητη ώστε να συνδέονται τα φορτία στην μπαταρία.

Η λειτουργία των ηλεκτρικών συσσωρευτών βασίζεται στη μετατροπή χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Έχουν όμως τη δυνατότητα της αντίστροφης λειτουργίας, δηλαδή της μετατροπής της ηλεκτρικής σε χημική ενέργεια. Αυτό δίνει και τη δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την ηλεκτροχημική διαδικασία ηλεκτρόνια αφαιρούνται από το ενεργό υλικό του ενός ηλεκτροδίου και προστίθενται στο ενεργό υλικό του άλλου ηλεκτροδίου. Η διαδικασία της αφαίρεσης ονομάζεται οξείδωση (oxidation) και της προσθήκης αναγωγή (reduction).

Υπάρχουν δύο κατηγορίες συσσωρευτών, οι πρωτογενείς και οι δευτερεύοντες. Η διάκριση αυτή γίνεται με βάση τη δυνατότητά να αποταμιεύουν ενέργεια οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή όχι. Η πρώτη κατηγορία, δηλαδή αυτή των πρωτογενών συσσωρευτών, έχουν αποθηκευμένη χημική ενέργεια, την οποία αποδίδουν ως ηλεκτρική, αλλά δεν μπορούν να επαναφορτιστούν. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν οι τυπικές μπαταρίες λιθίου. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μπαταρίες που επαναφορτίζονται και φυσικά είναι καταλληλότερες σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Ο πιο συνηθισμένος τύπος τέτοιας μπαταρίας είναι η μολύβδου- οξέος.[3]

Τύποι συσσωρευτών

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιοι τύποι επαναφορτιζόμενων μπαταριών.

- Μπαταρίες Νικελίου- Καδμίου(Ni- Cd) : πλεονεκτήματα των μπαταριών αυτών είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, η υψηλή απόδοση, οι μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης και η δυνατότητα λειτουργίας σε ακραίες συνθήκες. Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα είναι αρκετά ακριβές κι αυτό περιορίζει τη χρήση τους.
- Μπαταρίες οξειδίων μολύβδου : πλεονεκτήματα των μπαταριών αυτού του τύπου είναι ότι είναι εξαιρετικά φθηνές για αυτό που προσφέρουν, επαναφορτίζονται εύκολα και έχουν υψηλή χωρητικότητα. Ακόμη είναι διαθέσιμες προς αγορά σχεδόν παντού.
- Μπαταρίες Nickel metal-Hidride (NiMH) :είναι ένα νέο είδος μπαταριών που χρησιμοποιείται ευρέως σε φορητές κατασκευές και τον τελευταίο καιρό ακόμη περισσότερο στα ηλεκτρικά οχήματα. Συγκριτικά με τις μπαταρίες νικελίου- καδμίου, οι NiMH έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα.
- Μπαταρίες θεικού νατρίου (NaS): οι μπαταρίες αυτές λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (300 βαθμοί κελσίου) και για αυτό το λόγο απαιτούν προσεκτική λειτουργία και συντήρηση. Πλεονεκτήματα των μπαταριών αυτών αποτελούν η μεγάλη διάρκεια ζωής, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η υψηλή αποδοτικότητα φόρτισης- εκφόρτισης και το ότι είναι φιλικές προς το περιβάλλον.
- Μπαταρίες λιθίου (Li-Ion) :η λειτουργία των μπαταριών αυτών ακολουθεί την εξής διαδικασία: γίνεται μεταφορά ιόντων λιθίου από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μέσω ενός οργανικού ηλεκτρολύτη. Πρέπει να επισημάνουμε ότι είναι μη υδατικοί συσσωρευτές.
- Πολυμερείς μπαταρίες λιθίου: η λειτουργία τους γίνεται όπως στις μπαταρίες λιθίου μόνο που στην ανταλλαγή ιόντων χρησιμοποιούνται μόνο τα κατιόντα λιθίου.[4]

Χαρακτηριστικά μεγέθη συσσωρευτών

Κατ' αρχάς πρέπει να αναφέρουμε ότι το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται σε μια μπαταρία μετριέται σε Watt- hours (Wh), ενώ το ποσό της χωρητικότητας των συσσωρευτών σε Ampere-hours(Ah). Στη συνέχεια αναλύουμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά των μπαταριών.

$$\checkmark \text{ ενεργειακή απόδοση} = \frac{\text{ενέργεια που προσδίδεται κατά την εκφόρτιση}}{\text{ενέργεια που απαιτείται για μια πλήρη φόρτιση}}$$

Κυμαίνεται μεταξύ 70-80%.

$$\checkmark \text{ απόδοση φόρτισης} = \frac{\text{αμπερώρια εκφόρτισης}}{\text{αμπερώρια για πλήρη φόρτιση}}$$

Κυμαίνεται περίπου στο 95% για μπαταρίες μολύβδου, ενώ είναι λίγο χαμηλότερη για μπαταρίες νικελίου- καδμίου.

$$\text{ρυθμός} = \frac{\text{χωρητικότητα (Ah)}}{\text{χρόνος φόρτισης ή εκφόρτισης (h)}}$$

DOD(depth of discharge): το μέγεθος αυτό εκφράζει το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία.

SOC(state of charge): εκφράζει το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει από τα μείνει. Τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με τον τύπο

$$\text{SOC}=100\text{-DOD}$$

Cycle of life: το μέγεθος αυτό δείχνει πόσους κύκλους μπορεί να αποδώσει η μπαταρία στη διάρκεια ζωής της. Με τον όρο κύκλο εννοούμε μια αποφόρτιση μέχρι το DOD και στη συνέχεια μια πλήρη φόρτιση.[3]

4. Υπεραγωγή πηνία.

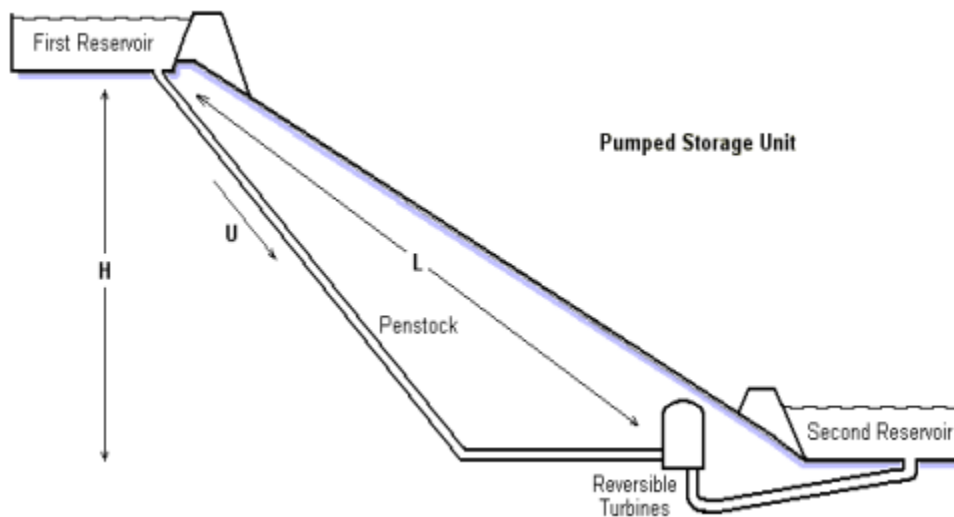
Όταν απαιτείται μεγάλη ισχύς (δηλαδή της τάξης των MW) σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, κάποιων δευτερολέπτων, τότε χρησιμοποιούμε τη μαγνητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε υπεραγωγή πηνία. Η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται σε έναν ηλεκτρομαγνήτη, ο οποίος δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα πηνίο αποτελούμενο από υπεραγωγή υλικά. Το πηνίο φορτίζεται και εκφορτίζεται με ελεγχόμενους μετατροπείς ισχύος.

Για να διατηρηθεί το πηνίο σε υπεραγωγική κατάσταση τοποθετείται σε ένα κρυογενητικό δοχείο με μόνωση κενού, που περιέχει υγρό ήλιο σε χαμηλή θερμοκρασία (4,2°K). Η τεχνική ανάπτυξη βελτίωσε τον έλεγχο της κρυογενητικής κι έκανε τα υπεραγωγή πηνία ιδιαίτερα ανταγωνιστικά στη μαζική παραγωγή, σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα πλεονεκτήματά τους. Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγεται και η δυναμική τους απόδοση, η οποία είναι εξαιρετική, καθώς έχουν μικρό χρόνο ανταπόκρισης, της τάξης των ms. [4]

5. Αντλησιοταμίευση. (Pumped-Hydro Power)

Η αντλησιοταμίευση είναι μια αρκετά διαδεδομένη ιδέα για αποθήκευση ενέργειας. Η λειτουργία της μεθόδου αυτής γίνεται με τον εξής τρόπο: σε μία δεξαμενή υπάρχει νερό, όταν ζητηθεί ισχύς το νερό πέφτει σε μια χαμηλότερη δεξαμενή, με τη βοήθεια ενός υδροστροβίλου, ενώ όταν σταματήσει η ζήτηση το νερό επιστρέφει πίσω στην υψηλότερη δεξαμενή.

Ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από μια ανώτερη δεξαμενή(first reservoir), αγωγούς νερού(penstock), μία αντλία, έναν υδροστρόβιλο και μια κατώτερη δεξαμενή (second reservoir), η οποία μπορεί να είναι ακόμα και η θάλασσα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση της αντλησιοταμίευσης.



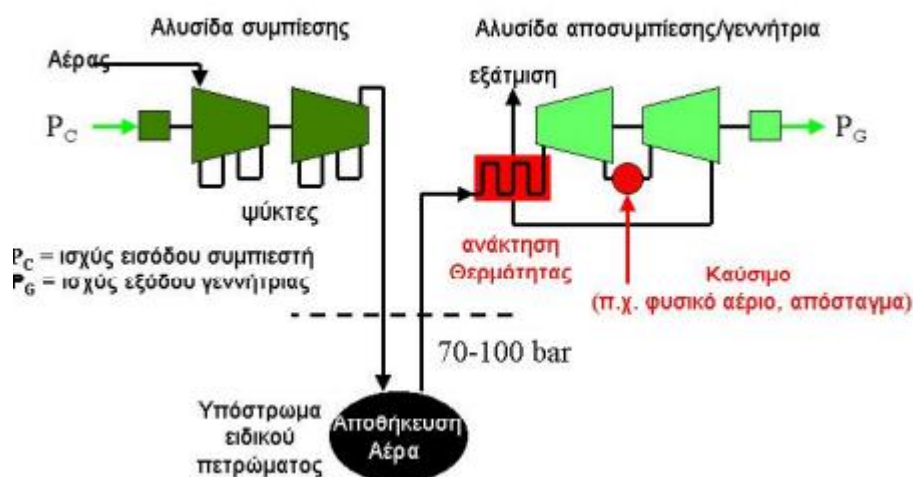
Εικόνα 1.6 : Αναπαράσταση αντλησιοταμίευσης.

Παρ' όλο που η αντλησιοταμίευση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η υψηλή χωρητικότητα ενέργειας και το χαμηλό κόστος, δε χρησιμοποιείται όσο θα ήταν αναμενόμενο. Η μειωμένη χρήση της οφείλεται πρώτον στο ότι για να πραγματοποιηθεί μια τέτοια κατασκευή απαιτείται συγκεκριμένος κι εξειδικευμένος χώρος και δεύτερον ο χρόνος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία και να απελευθερωθεί η αποθηκευμένη ενέργεια, καθώς αν η εγκατάσταση δεν έχει τεθεί σε λειτουργία από πριν, τότε χρειάζεται χρόνος ένταξης. Έτσι η αντλησιοταμίευση χρησιμοποιείται συνήθως σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας. Παγκοσμίως είναι διαθέσιμα πάνω από 90 GW

ενέργειας από αντλησιοταμίευση και σε μερικές περιπτώσεις συ συνδυασμό με φράγματα. Στην Ελλάδα υπάρχουν δύο τέτοιοι σταθμοί, στη Σφηκιά και στον ΥΗΣ Θησαυρού.[3]

6. Σύστημα συμπίεσης αέρα (CAES)

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί συμπιέζοντας αέρα στα 800 ως 1600psi σε ειδικές γεωλογικές δομές και στη συνέχεια να αποσυμπιεστεί κινώντας έναν ανεμοστρόβιλο. Η συμπίεση του αέρα μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια κοιλάδων φορτίου και η αποσυμπίεση κατά την αιχμή φορτίου. Για τη διαδικασία αυτή απαιτούνται ειδικές γεωλογικές δομές, όπου συμπεριλαμβάνουν το υπόστρωμα ορυκτού άλατος κι έτσι υπάρχουν μόνο δύο τέτοιες εγκαταστάσεις παγκοσμίως, η μία στις ΗΠΑ και η άλλη στη Γερμανία. Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται σε γενικές γραμμές στο παρακάτω σχήμα.[7]



Εικόνα 1.7 :Σύστημα συμπίεσης αέρα.

1.2 DC Μικροδίκτυο.

1.2.1 Εισαγωγή.

Παρ' όλο που η ανακάλυψη του εναλλασσόμενου ρεύματος το 1887 από το Νικόλα Τεσλα αποτέλεσε επανάσταση στον τομέα του ηλεκτρισμού, σήμερα η

χρησιμότητά του αμφισβητείται. Αυτό είναι απόρροια της εμφάνισης DC φορτίων και ψηφιακών συσκευών, που η χρήση τους αυξάνεται ολοένα και περισσότερο. Συνεπώς μπορούμε εύκολα να αντιληφθούμε το πόσα οφέλη μπορεί να προσφέρει η εφαρμογή DC μικροδικτύων.

Υπάρχουν ήδη στις μέρες μας συστήματα που χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζονται πιο αναλυτικά παρακάτω.

1. Κέντρα δεδομένων (Data centers).

Σήμερα υπάρχουν τόσο DC όσο και AC ηλεκτρικά συστήματα κέντρων δεδομένων. Πρωταρχικό μέλημα των συστημάτων αυτών είναι να μεταφέρουν και να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ψηφιακής πληροφορίας, η οποία χρησιμεύει σε σημαντικές διαδικασίες όπως οι χρηματικές συναλλαγές, οι τηλεπικοινωνίες αλλά φυσικά και η χρήση του διαδικτύου. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που πρέπει να διατηρηθεί στα κέντρα δεδομένων είναι η αξιοπιστία. Επιπλέον είναι απαραίτητο να επιτευχθεί χαμηλό κόστος για την ενέργεια, καθώς η αναμενόμενη ενεργειακή κατανάλωση των κέντρων δεδομένων αποτελεί περίπου το 20% του συνολικού κόστους. Το γεγονός λοιπόν ότι τα DC συστήματα παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία, αλλά και ότι απουσιάζουν τα στάδια μετατροπής AC/DC, καθιστά τα συστήματα αυτά πιο οικονομικά και αποδοτικά.



Εικόνα 1.8. Κέντρο δεδομένων της Google.

1. Τηλεπικοινωνίες.

Όμοια με τα κέντρα δεδομένων είναι τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Υπάρχει κι εδώ μεταφερόμενη πληροφορία, όμως σε πολύ μεγαλύτερη ποσότητα απ' αυτή των κέντρων δεδομένων. Επομένως η υψηλή απόδοση και η αξιοπιστία είναι δύο ιδιότητες που επίσης είναι απαραίτητες και σ' αυτή την περίπτωση με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος. Άρα και στον τομέα των τηλεπικοινωνιών προτιμούνται τα DC συστήματα.

2. Διαστημόπλοια.

Στην περίπτωση των διαστημόπλοιων γίνεται χρήση ηλιακών πάνελ, μπαταριών, DC/DC μετατροπέων, φορτιστών μπαταριών και DC φορτίων. Γι αυτό το λόγο η DC διανομή φαίνεται χρήσιμη στην περίπτωση αυτή. Ας δούμε για παράδειγμα το Διεθνές Διαστημικό Σταθμό (ISS) της NASA, ο οποίος χρειάζεται περισσότερα από 100 kW. Δύο σχεδόν ανεξάρτητα DC συστήματα με διαφορετικές τάσεις αποτελούν το ISS. Το ρωσικό σύστημα έχει δύο επίπεδα τάσης των 120V και των 28V. Στο σύστημα αυτό έχουν εγκαταστήσει ηλιακούς συλλέκτες των 29 kW συνολικά, ενώ στο αμερικανικό σύστημα η εγκαταστημένη ισχύς φτάνει τα 76 kW και η τάση στα 120V. Για να γίνει δυνατή η μεταφορά ισχύος μεταξύ των δύο σταθμών τα δύο συστήματα συνδέονται με αμφίδρομους DC/DC μετατροπείς.

3. Μεταφορές.

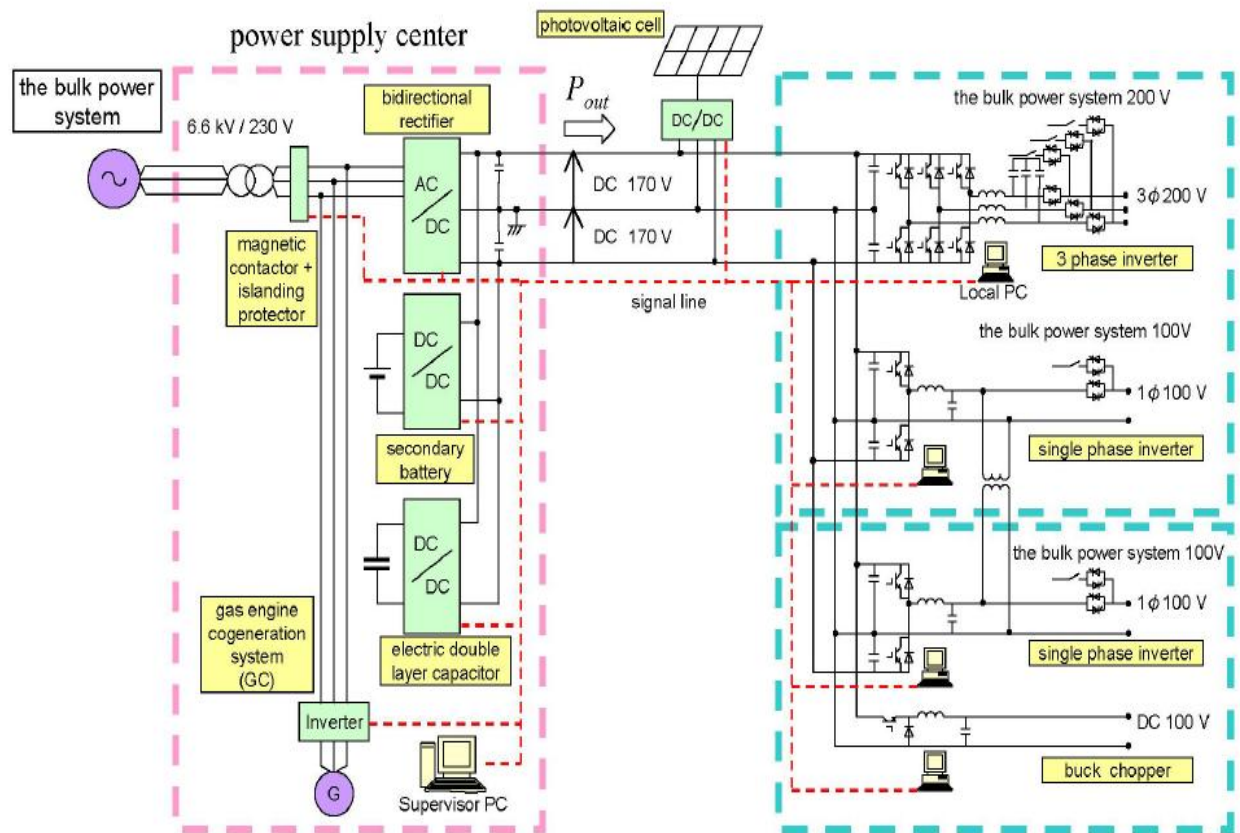
Μεταφορικά συστήματα όπως το τραμ, το μετρό και το τρόλεϊ επίσης χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα, αφού συνήθως διαθέτουν DC κινητήρες. Όσον αφορά τα μεταφορικά συστήματα που διαθέτουν κινητήρες επαγωγής, η χρήση συνεχούς ρεύματος οδηγεί στην απλοποίηση και τη μείωση των σταδίων μετατροπής. Τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα την αυξημένη απόδοση αλλά και ικανότητα ελέγχου. Εξαιτίας λοιπόν αυτών των πλεονεκτημάτων τα DC συστήματα δεν είναι κατάλληλα μόνο για τα οχήματα στις μεταφορές, αλλά και για δευτερεύοντα φορτία σ' αυτά. Η τάση που παρέχεται σ' αυτά τα συστήματα είναι από 600V έως και 1kV περίπου.[6]

1.2.2 DC μικροδίκτυο και πλεονεκτήματα.

Το dc μικροδίκτυο είναι ένα καινοτόμο σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί dc κατανομή παρέχοντας υψηλής ποιότητας ισχύ. Ένα dc μικροδίκτυο είναι για

παράδειγμα ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί μονάδες κατανεμημένης παραγωγής, όπως τα φωτοβολταϊκά, τις κυψέλες καυσίμου κλπ, αλλά και μονάδες αποθήκευσης όπως μπαταρίες και πυκνωτές που έχουν έξοδο dc. Επιπλέον το dc ρεύμα που παράγεται μπορεί να μετατραπεί σε ac, αν απαιτείται, με τη βοήθεια μετατροπών στη μεριά του φορτίου, οι οποίοι δεν απαιτούν μετασηματιστές επιλέγοντας την κατάλληλη dc τάση. Όλο αυτό το σύστημα, με τους μετατροπείς να υπάρχουν κοντά στο φορτίο, συνεισφέρει επίσης στην προσφορά υψηλής ποιότητας ισχύος. Έτσι για παράδειγμα, ακόμα και αν υπάρχει ένα μικρό κύκλωμα στη μεριά ενός φορτίου, δεν έχει επίδραση στα άλλα φορτία.

Στην εικόνα 1 βλέπουμε μια μικρογραφία ενός dc μικροδικτύου. Η ac τάση των 6,6 kV μετασηματίζεται σε 230 V και στη συνέχεια μετατρέπεται σε dc $\pm 170V$ μέσω ενός αμφίδρομου μετατροπέα (ανόρθωση). Ένας κινητήρας συμπαραγωγής εσωτερικής καύσης συνδέεται στα 230V ac μέσω ενός μετατροπέα. Ένας συσσωρευτής και ένας ηλεκτρικού διπλού σώματος πυκνωτής συνδέονται στη γραμμή dc μέσω αμφίδρομων μετατροπών. Επιπλέον μία φωτοβολταϊκή συστοιχία συνδέεται στη γραμμή dc μέσω ενός dc/dc μετατροπέα. Στη μεριά του φορτίου έχουμε μετατροπή είτε dc είτε ac τάσης, ανάλογα με τις ανάγκες του φορτίου, με τη βοήθεια μετατροπών.



Εικόνα 1.9: DC Μικροδίκτυο.

Πλεονεκτήματα DC Μικροδικτύου.

- I. Βασικό πλεονέκτημα των DC μικροδικτύων είναι η εξάλειψη των DC/AC μετατροπών στην περίπτωση όπου τα φορτία είναι ηλεκτρονικές συσκευές όπως ηλεκτρονικοί υπολογιστές, φορητοί υπολογιστές, τηλεοράσεις κ.ά. Αυτού του είδους οι συσκευές αποτελούν το 15% περίπου των συσκευών μιας οικίας . Έτσι σε περίπτωση χρήσης συνεχούς ρεύματος οι απώλειες μειώνονται από 15%-40% σε 10%-15%, καθώς η άεργος ισχύς απουσιάζει. Εκτός από τις παραπάνω ηλεκτρονικές συσκευές, που αποτελούν τα DC φορτία σε μία οικία, τα φώτα LED έρχονται κι αυτά να προστεθούν στα DC φορτία ενός σπιτιού καθώς η χρήση τους έχει γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη. Τα LED θα μπορούσαν να μειώσουν δραστικά την παγκόσμια κατανάλωση στο φωτισμό, που σήμερα φτάνει το 20%.
- II. Επιπλέον πλεονεκτήματα των DC μικροδικτύων είναι το ότι η εγκατάστασή τους είναι σχετικά απλή και η μείωση του κόστους των καυσίμων.
- III. Σήμερα στην παγκόσμια αγορά εμφανίζεται η ανάγκη καλύτερης απόδοσης, αξιοπιστίας, αλλά και ευφύστερης διανομής ηλεκτρικού ρεύματος. Τα DC μικροδίκτυα, τα οποία έχουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά, μπορούν με την εφαρμογή τους εν μέρει να συμβάλλουν στη βελτίωση των παραπάνω ζητημάτων. Η εφαρμογή τους ευνοείται καθώς η ηλιακή και η αιολική ενέργεια μπορούν να αξιοποιηθούν ακόμη και σε επίπεδο οικίας μέσω των αντίστοιχων μονάδων παραγωγής(φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες αντίστοιχα).
- IV. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα DC μικροδίκτυα είναι ότι αν συμβεί βραχυκύκλωμα σε κάποιο φορτίο, τα υπόλοιπα φορτία δε θα επηρεαστούν. Επιπλέον είναι ευκολότερο να απομονώσουμε ένα DC μικροδίκτυο απ' ότι ένα AC, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα, αποσυνδέοντάς το από το δίκτυο.[7],[8]

1.2.3 Τα dc μικροδίκτυα πλεονεκτούν έναντι των ac.

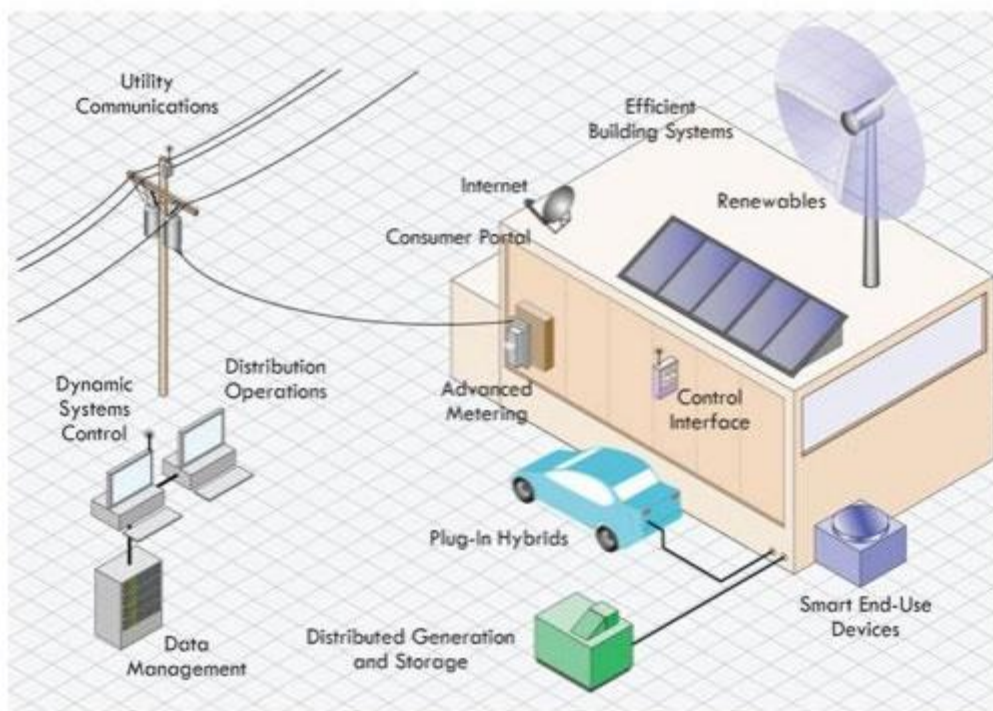
Όπως προαναφέραμε στην παραπάνω ενότητα τα dc μικροδίκτυα χαρακτηρίζονται από μια σειρά πλεονεκτήματα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση των dc σε σχέση με τα ac μικροδίκτυα.

- I. Οι μονάδες καταναλωμένης παραγωγής συντονίζονται με μεγαλύτερη ευκολία με ένα dc μικροδίκτυο απ' ότι με ένα ac, καθώς ο έλεγχος τους βασίζεται σε dc τάση.
- II. Ο πρωτογενής έλεγχος είναι λιγότερο σύνθετος σε ένα dc μικροδίκτυο, καθώς η άεργος ισχύς είναι απύσασα.

III. Επίσης αφού τα dc φορτία έχουν εδραιωθεί τελευταία, η μετατροπή ac/dc είναι περιττή, καθώς οι περισσότερες μονάδες καταναλωμένης παραγωγής έχουν έξοδο dc. Αυτό επιδρά θετικά στο κόστος του συστήματος και τις απώλειες.[7]

1.2.3 Τα DC μικροδίκτυα στο μέλλον.

Στο μέλλον οι καταναλωτές θα έχουν τη δυνατότητα να παράγουν, να αποθηκεύουν και να διαχειρίζονται ένα μέρος της καταναλισκόμενης ενέργειας λόγω της ανάπτυξης των μικροδικτύων. Υπάρχουν ενδείξεις για τα ενεργειακά συστήματα, ότι στο μέλλον θα χρησιμοποιούν έξυπνες συσκευές στις μονάδες παραγωγής, στους υποσταθμούς, στις γραμμές μεταφοράς, στα ελεγχόμενα φορτία και στο δίκτυο διανομής. Επομένως τα συστήματα στο μέλλον θα είναι ένας συνδυασμός δικτύων πληροφορικής και επικοινωνίας και συστήματος ενέργειας. Τα δύο παραπάνω δίκτυα θα είναι ενσωματωμένα σε μία προηγμένη αρχιτεκτονική στην οποία θα υπάρχει μία αμφίδρομη ροή ισχύος και πληροφορίας. Οι καταναλωτές θα έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες, όπως στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά, στη μέγιστη ζήτηση, αλλά και στο πως να ελαχιστοποιούν τους λογαριασμούς του ηλεκτρικού ρεύματος. Επομένως, θα έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας και πώλησης της πλεονάζουσας αποθηκευμένης ενέργειας στην καλύτερη δυνατή τιμή. Επομένως συμπεραίνουμε πως η βασική ιδέα ενός μοντέρνου DC μικροδικτύου είναι να συμμετέχουν οι καταναλωτές στη διαμόρφωση της αγοράς ηλεκτρισμού, όπως επίσης να ελέγχουν την ατομική τους κατανάλωση ενέργειας. Παρακάτω απεικονίζεται ένα ευφυές DC μικροδίκτυο.[6]



Εικόνα 1.10: Ευφυές DC μικροδίκτο.

1.3 Καταναεμημένη Παραγωγή.

1.3.1 Ορισμός.

Η καταναεμημένη παραγωγή(distributed generation-DG) μπορεί να οριστεί ως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, από μονάδες που είναι κοντά στο φορτίο, άμεσα συνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής, με τιμές ισχύος που κυμαίνονται από 1kW μέχρι 100MW.

Όταν ξεκίνησε η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή ήταν καταναεμημένη καθώς οι πρώτες εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος παρείχαν

ενέργεια μόνο στη γειτονική τους περιοχή. Τα πρώτα δίκτυα ήταν βασισμένα σε dc τάση κι έτσι η παροχή τάσης ήταν περιορισμένη, όπως επίσης και η απόσταση μεταξύ της παραγωγής και του καταναλωτή. Για να εξισορροπηθεί η προσφορά και η ζήτηση άρχισαν να χρησιμοποιούνται συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως μπαταρίες, οι οποίες μπορούσαν να συνδεθούν κατευθείαν στο δίκτυο dc. Αργότερα οι τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η εμφάνιση ac δικτύων, επέτρεπαν τη μεταφορά ενέργειας σε μεγαλύτερες αποστάσεις και η εφαρμογή οικονομικών κλίμακας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησαν σε μεγάλη αύξηση της ισχύος εξόδου στις μονάδες παραγωγής.

Όλα αυτά είχαν σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερες ανέσεις και μικρότερα κόστη κι έτσι μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα κατασκευάζονταν αποτελούμενα από τεράστια δίκτυα μεταφοράς και διανομής, αλλά και πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις. Τώρα η εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης γίνεται υπολογίζοντας τον μέσο όρο πολλών στιγμιαίων φορτίων. Η ασφάλεια της παροχής αυξανόταν, καθώς η αποτυχία ενός σταθμού παραγωγής αντισταθμιζόταν από τους υπόλοιπους σταθμούς του δικτύου.

Τις τελευταίες δεκαετίες η καταναλωμένη παραγωγή έχει αρχίσει να τραβάνε το ενδιαφέρον, οι λόγοι όπως τους παρουσιάζει ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας – International Energy Agency (IEA) είναι οι εξής:

- Ανάπτυξη στις τεχνολογίες καταναλωμένης παραγωγής
- Περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς
- Αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών για αξιόπιστη ενέργεια
- Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Ανησυχίες για τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές.

Παρ' όλο που παραπάνω προσπαθήσαμε να δώσουμε έναν ορισμό για την καταναλωμένη, δεν υπάρχει ένας γενικά αποδεκτός ορισμός. Κατά συνέπεια στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διάφοροι ορισμοί και όροι για την καταναλωμένη παραγωγή, όπως διεσπαρμένη παραγωγή, διάσπαρτη, επί τόπου παραγωγή, αποκεντρωμένη παραγωγή κ.ά. Ακόμη ποικίλει και το εύρος της κλίμακας παραγωγής ενέργειας, για παράδειγμα το Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας – Electric Power Research Institute (EPRI) ορίζει ως καταναλωμένη παραγωγή, την παραγωγή από λίγα kW μέχρι 50MW. Το Ινστιτούτο Έρευνας Αερίου- Gas Research Institute(GRI) ορίζει την καταναλωμένη παραγωγή αυτή μέχρι τα 25 MW και το Διεθνές Συμβούλιο Μεγάλων Ηλεκτρικών Συστημάτων –International Conference on Large High Voltage Electric Systems(CIGRE) ορίζει DG την παραγωγή που δεν ξεπερνά τα 50-100 MW.

Για να δώσουμε έναν ενιαίο ορισμό της καταναλωμένης παραγωγής πρέπει να εξετάσουμε κάποιους παράγοντες που αφορούν τον τρόπο παραγωγής δίνοντας σε κάθε έναν από αυτούς κάποιους ορισμούς.

- **Σκοπός της DG είναι να παρέχει ενεργό ισχύ, χωρίς να επιβάλλεται η παραγωγή άεργου ισχύος.**

- **Τοποθεσία** ορίζεται ως η εγκατάσταση και η λειτουργία μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδεδεμένες ευθέως στο δίκτυο διανομής ή συνδεδεμένες στο δίκτυο από την πλευρά του καταναλωτή.

Κάτι που πρέπει να τονίσουμε είναι πως οι μονάδες παραγωγής τοποθετούνται κοντά στο φορτίο. Αυτή είναι άλλωστε και η κεντρική ιδέα της κατανεμημένης παραγωγής κι αυτό δηλαδή σημαίνει ότι βρίσκεται στην πλευρά του καταναλωτή.

Ο παραπάνω ορισμός αφορά την DG στο επίπεδο της διανομής. Θα πρέπει τώρα να γίνει μία πιο λεπτομερής διάκριση ανάμεσα στο σύστημα μεταφοράς και στο σύστημα διανομής. Η διάκριση αυτή βασίζεται στα επίπεδα τάσης, για παράδειγμα 220 kV και πάνω θεωρείται ότι ανήκει στο δίκτυο μεταφοράς, ενώ για μικρότερες τιμές τάσης θεωρείται ότι ανήκει στο δίκτυο διανομής. Αυτή η διάκριση δεν είναι και πολύ εύστοχη κάποιες φορές εξαιτίας της κατοχής γραμμών 220 kV από εταιρίες διανομής και αντίστοιχα μικρότερων γραμμών από εταιρίες μεταφοράς.

Επομένως καθώς το επίπεδο τάσης δεν παρέχει καμία χρήσιμη διάκριση διεθνώς μεταξύ της μεταφοράς και της διανομής, είναι απαραίτητο να γίνει κάποια άλλη προσέγγιση, η οποία βασίζεται στη νομοθεσία. Σε ένα ανταγωνιστικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, οι νομικές διατάξεις καθορίζουν το σύστημα μετάδοσης, το οποίο συνήθως λειτουργεί από μία ανεξάρτητη εταιρία, που δεν εμπλέκεται στην παραγωγή, την διανομή ή τη λιανική πώληση.

- **Περιοχή που τροφοδοτεί:** κυρίως εντός του δικτύου διανομής. Όμως τα βράδια, τις ώρες ελάχιστου φορτίου και υψηλών ταχυτήτων ανεμογεννητριών, τα πάρκα ανεμογεννητριών συνήθως εξάγουν ενέργεια στο δίκτυο μεταφοράς.

- **Επιπτώσεις στο περιβάλλον**

Συχνά οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στην κατανεμημένη παραγωγή θεωρούνται πιο φιλικές προς το περιβάλλον από τις μονάδες παραγωγής του κεντρικού δικτύου. Για να κρίνουμε όμως αν οι τεχνολογίες DG είναι όντως φιλικές προς το περιβάλλον πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τις άμεσες και έμμεσες εκπομπές ρύπων για κάθε χρησιμοποιούμενη τεχνολογία. Οι έμμεσες εκπομπές είναι αυτές που υπάρχουν κατά τη διάρκεια της παραγωγής και της μεταφοράς της ενέργειας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι εκπομπές ρύπων για κάθε είδους τεχνολογία που εφαρμόζεται στην κατανεμημένη παραγωγή.[9]

Πίνακας I

Τεχνολογία	Απόσβεση (μήνες)	SO ₂ (kg/GWh)	NO _x (kg/GWh)	CO ₂ (t/GWh)	CO ₂ και eqCO ₂ για CH ₄ (t/GWh)
Μηχανές καύσης άνθρακα	1-1,1	630-1370	630-1560	830-920	1240
Πυρηνικές	Δ.Ε	Δ.Ε	Δ.Ε	Δ.Ε	Δ.Ε
Αεροστρόβιλος συνδυασμένου κύκλου	0,4	45-140	650-810	370-420	450
Μεγάλο υδροηλεκτρικό	5-6	18-21	34-40	7-8	5
Πολύ μικρό υδροηλεκτρικό	9-11	38-46	71-86	16-20	Δ.Ε
Μικρό υδροηλεκτρικό	8-9	24-29	45-56	10-12	2
Ανεμογεννήτρια 4,5 m/s	6-20	18-32	26-43	19-34	Δ.Ε
Ανεμογεννήτρια 5,5 m/s	4-13	13-20	18-27	13-22	Δ.Ε
Ανεμογεννήτρια 6,5 m/s	2-8	10-16	14-22	10-17	11
Φωτοβολταϊκό μονοκρυστ.	72-93	230-295	270-340	200-260	Δ.Ε
Φωτοβολταϊκό πολυκρυστ	58-74	260-330	250-310	190-250	228
Φωτοβολταϊκό άμορφο	51-66	135-175	160-200	170-220	Δ.Ε
Γεωθερμική	Δ.Ε	Δ.Ε	Δ.Ε	Δ.Ε	50-70
Κυματική	Δ.Ε	Δ.Ε	Δ.Ε	Δ.Ε	2

Μελετώντας τον παραπάνω πίνακα, βλέπουμε ξεκάθαρα ότι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην καταναμημένη παραγωγή έχουν σαφώς λιγότερες εκπομπές ρύπων από τις μηχανές που έχουν ως καύσιμη ύλη τον άνθρακα. Βλέπουμε ότι ο συνδυασμένος κύκλος –combined cycle gas turbine(CCGT) και οι μεγάλες μονάδες υδροηλεκτρικών έχουν πολύ χαμηλότερες εκπομπές CO₂ καθώς και SO₂ από τις μηχανές καύσης άνθρακα. Η βιομάζα δεν συμπεριλαμβάνεται στον παραπάνω πίνακα καθώς θεωρείται ουδέτερη στο CO₂, αφού η ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα όταν η βιομάζα καίγεται είναι ίση με την ποσότητα που απορροφάται κατά την ανάπτυξή της. Οι εκπομπές NO_x από την καύση βιοκαυσίμων είναι περίπου 20-40% λιγότερες από τις μονάδες ορυκτών καυσίμων, ενώ οι εκπομπές SO₂ θεωρούνται αμελητέες.

Οι συσσωρευτές, που είναι συσκευές αποθήκευσης, όπως και οι κυψέλες καυσίμου δεν έχουν άμεσες εκπομπές ρύπων. Εκτός από τις εκπομπές κατά την παραγωγή, το μίγμα καυσίμου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται στους συσσωρευτές συμπεριλαμβάνεται επίσης στις έμμεσες εκπομπές. Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου, οι έμμεσες εκπομπές επίσης εξαρτώνται από το μίγμα που απαιτείται για την παραγωγή υδρογόνου, καθώς το υδρογόνο δε γίνεται να εξορυχτεί. Ακόμη η μείωση των απωλειών στις γραμμές μεταφοράς ενισχύει την άποψη ότι η καταναμημένη παραγωγή είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον.

Όμως επικρατεί η άποψη ότι η διείσδυση και χρήση των σταθμών καταναμημένης παραγωγής θα οδηγήσει στην υπολειτουργία μεγάλων κεντρικών σταθμών αυξάνοντας έτσι τις εκπομπές ρύπων ανά kWh. Ακόμη η περιβαλλοντική εκτίμηση γίνεται ακόμα δυσκολότερη καθώς επικρατούν κι άλλες απόψεις που

αφορούν την επικινδυνότητα πυρηνικών σταθμών, την υψηλή στάθμη θορύβου και την οπτική ρύπανση που μπορεί να προκαλέσουν οι ανεμογεννήτριες. Επομένως δεν μπορούμε να διεξάγουμε το συμπέρασμα ότι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην DG είναι απόλυτα φιλικές προς το περιβάλλον, όμως σίγουρα με αυτές τις τεχνολογίες μειώνονται οι εκπομπές CO₂.

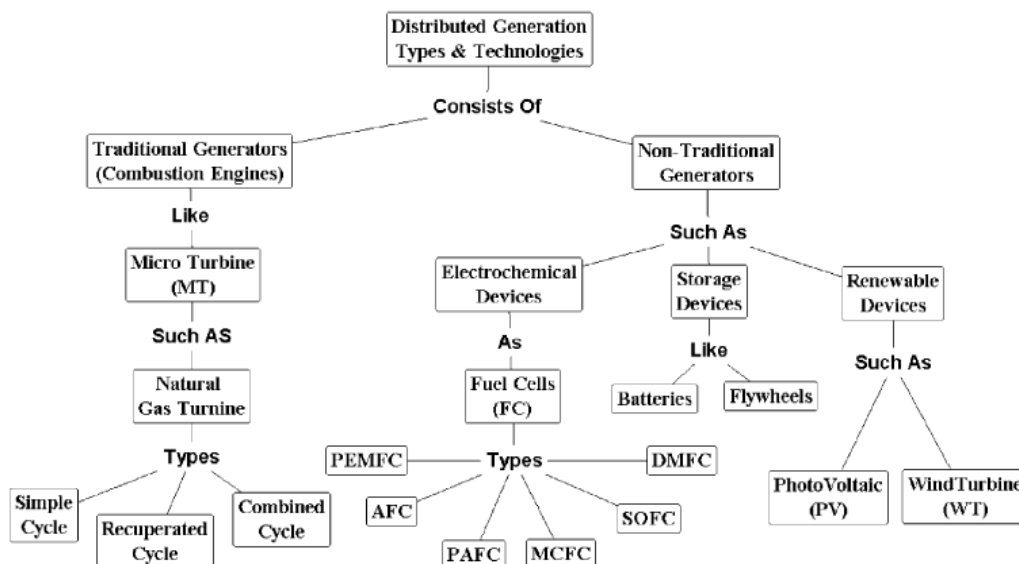
○ **Ιδιοκτησιακό καθεστώς** :το ζήτημα του ιδιοκτησίας της DG παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξή της και την εξέλιξή της. Παρ' όλα αυτά δεν υπάρχει μία κοινά αποδεκτή άποψη για το ζήτημα. Μπορεί να ανήκει είτε σε μεγάλες εταιρίες, είτε σε μικρούς παραγωγούς ή ακόμη και σε μικρούς καταναλωτές.

○ **Τεχνολογία**

Η κατανεμημένη παραγωγή χρησιμοποιεί τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αποθήκευσης που τοποθετούνται κοντά στον καταναλωτή. Περιλαμβάνει συσκευές παραγωγής όπως κυψέλες καυσίμου, μικροτουρμπίνες, εμβλοφόρους μηχανές, διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, συσκευές επικοινωνίας και ελέγχου για την αποδοτική λειτουργία των ανεξάρτητων μονάδων παραγωγής και του μικροδικτύου. Επίσης περιλαμβάνει τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά κ.α.

Η κατανεμημένη παραγωγή μπορεί να επιτευχθεί με τη συνεργασία συμβατικών πηγών με ΑΠΕ, με μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας και με ανανεώσιμες πηγές όπως ο ήλιος, η βιομάζα, ο άνεμος κ.α.

Παρακάτω φαίνονται στο διάγραμμα διάφοροι τύποι και τεχνολογίες των μονάδων κατανεμημένης παραγωγής. Εκτενέστερη ανάλυση των μονάδων παραγωγής, αλλά και αποθήκευσης γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.



Ένας διαχωρισμός που γίνεται στις μονάδες παραγωγής της κατανεμημένης παραγωγής έχει να κάνει με το μέγεθός τους, δηλαδή την παραγόμενη ισχύ που είναι σε θέση να προσφέρουν. Έχουμε τις μονάδες πολύ μικρής κλίμακας από 1-

5kW, τις μονάδες μικρής κλίμακας από 5kW-5MW, τις μονάδες μεσαίας από 5MW-50MW και τις μονάδες μεγάλης κλίμακας από 50-300MW.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποια ενδεικτικά στοιχεία ισχύος για τις διάφορες διατάξεις παραγωγής ενέργειας.[9]

Πίνακας II.

	Τεχνολογία	Τυπικά μεγέθη
Ορυκτά καύσιμα	Αεριοστρόβιλος συνδυασμένου κύκλου	35-450 MW
	Μηχανή εσωτερικής καύσης	5 kW-10MW
	Γεννήτρια καύσης	1-250MW
	Μικρο-Τουρμπίνα	35kW-1MW
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	Πολύ μικρό υδροηλεκτρικό	25-kW-1MW
	Μικρό υδροηλεκτρικό	1-100MW
	Ανεμογεννήτρια	200W-3MW
	Φωτοβολταϊκή συστοιχία	20W-100kW
	Ηλιακό θερμικό, κεντρικός δέκτης	1-10MW
	Ηλιακό θερμικό, σύστημα Lutz	10-80MW
	Βιομάζα (αεριοποίηση)	100kW-20MW
	Κυψέλη φωσφορικού οξέος	200kW-2MW
	Κυψέλη τηγμένου άνθρακα	250kW-2MW
	Κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίου	1kW-250kW
	Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου	250kW-5MW
	Γεωθερμική	5-100MW
	Ωκεανική ενέργεια	100kW-1MW
	Μηχανή Stirling	2-10kW
	Συσσωρευτές	500kW-5MW

1.3.2 Πλεονεκτήματα.

Η καταναεμημένη παραγωγή έχει αρκετά πλεονεκτήματα τα οποία μπορούμε να διαχωρίσουμε σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη είναι από οικονομικής πλευράς και η δεύτερη από πλευράς λειτουργίας. Τα πλεονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.

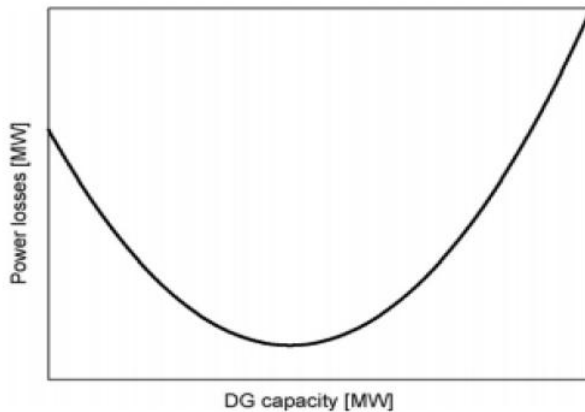
Οικονομικά οφέλη

- Η καταναεμημένη παραγωγή μπορεί να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες φορτίο, καθώς η παραγωγή γίνεται κοντά στο φορτίο, αποφεύγοντας έτσι την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς ή διανομής.
- Το γεγονός ότι η παραγωγή γίνεται κοντά στο φορτίο μπορεί να επιφέρει συνολικές μειώσεις του κόστους στη μεταφορά και τη διανομή έως και 30%.

- Οι μονάδες DG μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε και σε μικρό χρονικό διάστημα. Κάθε μονάδα μπορεί να λειτουργεί ανά πάσα ώρα και στιγμή και αυτόνομα μετά την εγκατάστασή της, ανεξάρτητα από τις άλλες μονάδες και επομένως δεν επηρεάζεται από οποιαδήποτε βλάβη σ' αυτές. Ακόμα η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις, προσθέτοντας ή αφαιρώντας μονάδες όπου είναι απαραίτητο.
- Στην κατανεμημένη παραγωγή συμπεριλαμβάνονται οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, που αποτελούν σημαντικό κομμάτι, καθώς οδηγούν στη μείωση του κόστους, χρησιμοποιώντας τη θερμότητα των καυσίμων, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση και παράγοντας περισσότερη ενέργεια, την οποία μπορούν να αποδώσουν στο κεντρικό δίκτυο.
- Οδηγεί σε μείωση του κόστους μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής σε μία εγκατάσταση και συνεπώς μειώνει τις χρεώσεις ζήτησης.

Οφέλη για τη λειτουργία του δικτύου.

- Πλεονέκτημα της κατανεμημένης παραγωγής αποτελεί η μείωση των απωλειών. Οι μονάδες κατανεμημένης παραγωγής τροφοδοτούν το φορτίο με ενεργό και άεργο ισχύ. Επομένως το ρεύμα που ρέει από την πηγή μέχρι τη θέση των μονάδων μειώνεται με αποτέλεσμα να μειώνονται και οι απώλειες. Σημαντικό ρόλο όμως παίζουν η τοποθέτηση και η διαστασιολόγηση των μονάδων παραγωγής, που αν δεν γίνουν σωστά οι απώλειες θα αυξηθούν, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η κατάλληλη διαστασιολόγηση των μονάδων κατανεμημένης παραγωγής σε ένα δίκτυο εξαρτάται από το μέγεθος και την κατανομή του φορτίου μέσα στο δίκτυο. Όσο μεγαλύτερο φορτίο υπάρχει, τόσο μεγαλύτερη διείσδυση των μονάδων μπορεί να γίνει, χωρίς να προκαλέσει αύξηση των απωλειών. Ακόμη όσο πιο κοντά στο φορτίο εγκαθίστανται οι μονάδες τόσο μειώνονται οι απώλειες, όπως είναι λογικό. Όμως αυτό προϋποθέτει να έχει οριστεί η κατάλληλη παραγόμενη ισχύς, διότι αν η ισχύς είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση του φορτίου, τότε όσο πιο κοντά στο φορτίο βρίσκονται, τόσο περισσότερο αυξάνονται οι απώλειες. Αυτό συμβαίνει διότι το φορτίο δεν είναι σε θέση να καταναλώσει όλη την παραγόμενη ισχύ, με αποτέλεσμα η εναπομένουσα ισχύς να ρέει προς την πηγή μέσω του δικτύου διανομής, αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις απώλειες. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εξάρτηση των ηλεκτρικών απωλειών του δικτύου απ' το μέγεθος των μονάδων κατανεμημένης παραγωγής.



- Ακόμη οι μονάδες καταναμημένης παραγωγής βελτιώνουν την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς υπάρχουν πολλές μονάδες παραγωγής, όχι μόνο μία μεγάλη, κεντρική. Επιπλέον παρέχουν και "τοπική" αξιοπιστία, αφού μπορεί να υπάρχουν μονάδες που να χρησιμοποιούνται μόνο σε περίπτωση ανάγκης.
- Η DG μειώνει την υπερφόρτωση γραμμών διανομής.
- Επιπλέον η DG βελτιώνει την τάση, καθώς μειώνει τις διακυμάνσεις σε ένα δίκτυο. Αυτό συμβαίνει διότι ένα μέρος του φορτίου τροφοδοτείται απ' την καταναμημένη παραγωγή, έτσι μειώνεται η ισχύς που απαιτείται από την πηγή μέχρι τη θέση των μονάδων καταναμημένης παραγωγής και άρα μειώνονται και οι πτώσεις τάσης στους ζυγούς κατά μήκος των γραμμών.

Περιβαλλοντικά οφέλη.

- Η χρήση των ΑΠΕ στην καταναμημένη παραγωγή έχει ως αποτέλεσμα τόσο τη μείωση εκπομπών ρύπων όπως CO₂ αλλά και τη μείωση χρήσης καυσίμων.
- [10]

1.3.3 Μειονεκτήματα.

Η καταναμημένη παραγωγή έχει και κάποια μειονεκτήματα, εκτός από τα πολύ σημαντικά οφέλη που αναφέραμε παραπάνω. Τα μειονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- Ένα βασικό μειονέκτημα, το οποίο μπαίνει εμπόδιο στη διάδοση της καταναμημένης παραγωγής είναι το υψηλό κόστος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Ακόμα διαφορές στο κόστος εντοπίζονται και στις διαφορετικές μονάδες καταναμημένης παραγωγής.

- Η διείσδυση των μονάδων κατανεμημένης παραγωγής έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερη ποικιλία στα βασικά καύσιμα. Δεδομένου ότι η κατανεμημένη παραγωγή βασίζεται στο φυσικό αέριο, αναμένεται να αυξηθεί η ζήτηση αυτού και να γίνει ακόμη και κατάχρηση, αντικαθιστώντας τον άνθρακα, που είναι βασικό καύσιμο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας . αυτό έχει ακόμη σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους του αρχικού καύσιμου της κατανεμημένης παραγωγής σε σχέση μ' αυτό που χρησιμοποιείται για την κεντρική παραγωγή.
- Η εγκατάσταση και λειτουργία των μονάδων κατανεμημένης παραγωγής μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στη ροή ισχύος, δηλαδή ροή από τη χαμηλή στη μέση τάση. Επομένως χρειάζεται ένα διαφορετικό σύστημα προστασίας και στα δύο επίπεδα της τάσης.
- Η κατανεμημένη παραγωγή μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα της προστασίας του εξοπλισμού. Οι καταναλωτές που θέλουν την αυτόνομη λειτουργία κάποιας μονάδας DG κατά τη διάρκεια κάποιου τεχνικού σφάλματος πρέπει να λάβουν υπόψη τους τεχνικά θέματα, αλλά και θέματα ασφαλείας. Διότι όταν το δίκτυο διανομής επανέλθει σε λειτουργία χρειάζεται ξανά συγχρονισμός των μονάδων κατανεμημένης παραγωγής με την τάση του δικτύου.
- Η ανισορροπία στην προσφορά και στη ζήτηση της ενέργειας μπορεί να προκαλέσει απόκλιση της συχνότητας από την τιμή των 50 Hz. Οι αποκλίσεις πρέπει να διατηρηθούν σε χαμηλά επίπεδα, καθώς η καλή λειτουργία των βιομηχανικών και των οικιακών συσκευών εξαρτάται από αυτό. Η συχνότητα του συστήματος μπορεί να επηρεαστεί και από την εγκατάσταση και τη σύνδεση των μονάδων κατανεμημένης παραγωγής.
- Τέλος σημαντικό πρόβλημα αποτελεί η αύξηση στα επίπεδα της τάσης εξαιτίας της διείσδυσης των μονάδων κατανεμημένης παραγωγής σε ακτινικό δίκτυο. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα μόνο σε περίπτωση που το δίκτυο αντιμετωπίζει δυσκολίες με χαμηλές τάσης, σε άλλες περιπτώσεις όμως είναι σημαντικό ζήτημα.

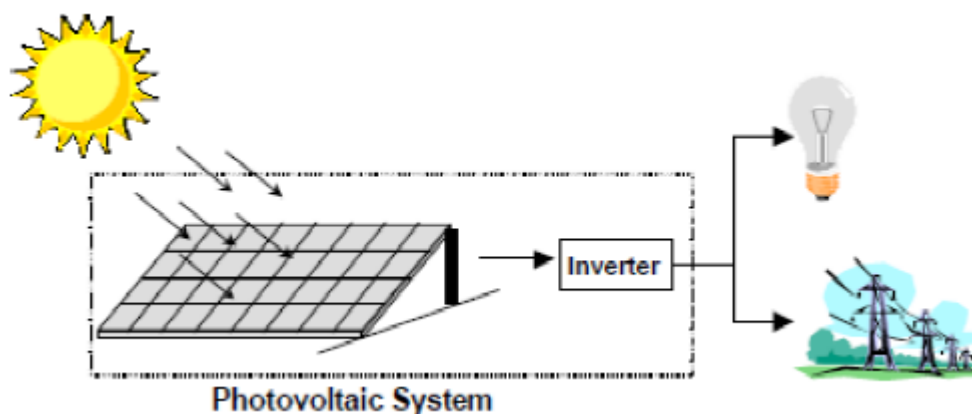
1.3.4 Μονάδες Κατανεμημένης Παραγωγής.

1.3.4.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Η βασική τους μονάδα είναι το ηλιακό κύτταρο (solar cell), του οποίου το σχήμα

μπορεί να είναι τρίγωνο ή τετράγωνο. Το ηλιακό κύτταρο είναι ένας κατάλληλα επεξεργασμένος ημιαγωγός λεπτού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Τα ηλιακά κύτταρα συνδέονται ώστε να σχηματίσουν ένα πλαίσιο. Τα πλαίσια λοιπόν αποτελούνται από κατάλληλα επεξεργασμένους δίσκους πυριτίου (ηλιακά στοιχεία), τα οποία βρίσκονται ερμητικά σφραγισμένα μέσα σε πλαστική ύλη για να προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες. Η μπροστινή όψη του πλαισίου προστατεύεται από ανθεκτικό γυαλί. Η κατασκευή αυτή, που το πάχος της είναι περίπου 4-5 χιλιοστά, τοποθετείται συνήθως σε πλαίσιο αλουμινίου. Τα εσωτερικά κύτταρα μπορεί να είναι συνδεδεμένα είτε σε σειρά, είτε παράλληλα, ανάλογα με την εφαρμογή. Τέλος τα πλαίσια με τη σειρά τους συνδέονται ώστε να σχηματίσουν συστοιχίες και να παράξουν την απαιτούμενη ενέργεια.

Για να παραχθεί ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα ηλιακά κύτταρα απορροφούν ενέργεια από τον ήλιο. Τα προσπίπτοντα ηλεκτρόνια εξαναγκάζουν τα ηλεκτρόνια των στοιχείων να κινηθούν παράγοντας έτσι ρεύμα, το οποίο μετατρέπουν σε dc. Πρακτικά κάθε κύτταρο μπορεί να παρέχει 2-4 A , ανάλογα με το μέγεθος τους και τάση εξόδου 0,5 V. Έτσι μία συστοιχία μπορεί να συνδεθεί σε σειρά, φορτίζοντας τις μπαταρίες με 12 V.



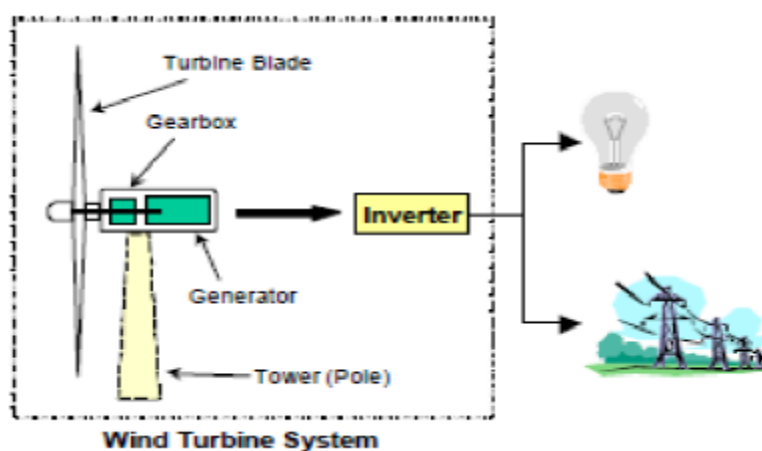
Εικόνα 1.11 : Φωτοβολταϊκό Σύστημα.

1.3.4.2 Ανεμογεννήτριες.

Οι ανεμογεννήτριες είναι κατασκευές, οι οποίες χρησιμοποιούν την αιολική ενέργεια ώστε μετατρέποντάς την να παράξουν ηλεκτρική. Μία ανεμογεννήτρια αποτελείται από έξι τμήματα, τον πύργο, τον έλικα (ή ρότορα, ή φτερωτή), το μηχανισμό περιστροφής και προσανατολισμού, το μηχανικό φρένο, τη γεννήτρια

και τους αισθητήρες ταχύτητας. Ο μηχανισμός τοποθετείται στον πύργο . Ο πύργος είναι ψηλός ούτως ώστε να εκμεταλλευόμαστε την μεγάλη ταχύτητα του ανέμου όπως και να αποφεύγονται τα εμπόδια, όπως ψηλά δέντρα, κτήρια και λόφοι. Όπως περιστρέφεται ο έλικας λοιπόν, λόγω του ανέμου, παράγεται, μέσω του μηχανισμού, ηλεκτρική ενέργεια. Το μέγεθος των ανεμογεννητριών ποικίλει από λίγα kW , σε οικιακές εφαρμογές, έως και πάνω από 5 MW.

Η βασικότερη λειτουργία των ανεμογεννητριών είναι σε σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας. Έτσι σε περιοχές, όπου το αιολικό δυναμικό προσφέρεται, στήνονται αιολικά πάρκα και συνδέονται στο δίκτυο με τη βοήθεια υποσταθμών. Έτσι προσφέρεται στο δίκτυο η συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Ακόμη οι ανεμογεννήτριες μπορούν να λειτουργήσουν σε συστήματα, τα οποία δε συνδέονται με το δίκτυο. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να γίνει χρήση συσσωρευτών, ή άλλων μονάδων αποθήκευσης, ώστε να αποθηκευτεί η πλεονάζουσα ενέργεια και να χρησιμοποιηθεί όταν είναι απαραίτητη. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι οι ανεμογεννήτριες μπορούν να εφαρμοστούν σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου δεν υπάρχει πρόσβαση στον ηλεκτρισμό, αλλά υπάρχει ποσότητα αιολικής ενέργειας κατάλληλη ώστε να παραχθεί ηλεκτρική. Συμπεραίνουμε επομένως ότι οι ανεμογεννήτριες είναι κατάλληλες, ως μονάδες παραγωγής, για τα μικροδίκτυα, καθώς έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν είτε συνδεδεμένες στο δίκτυο, προσφέροντάς του ενέργεια, είτε αυτόνομα.



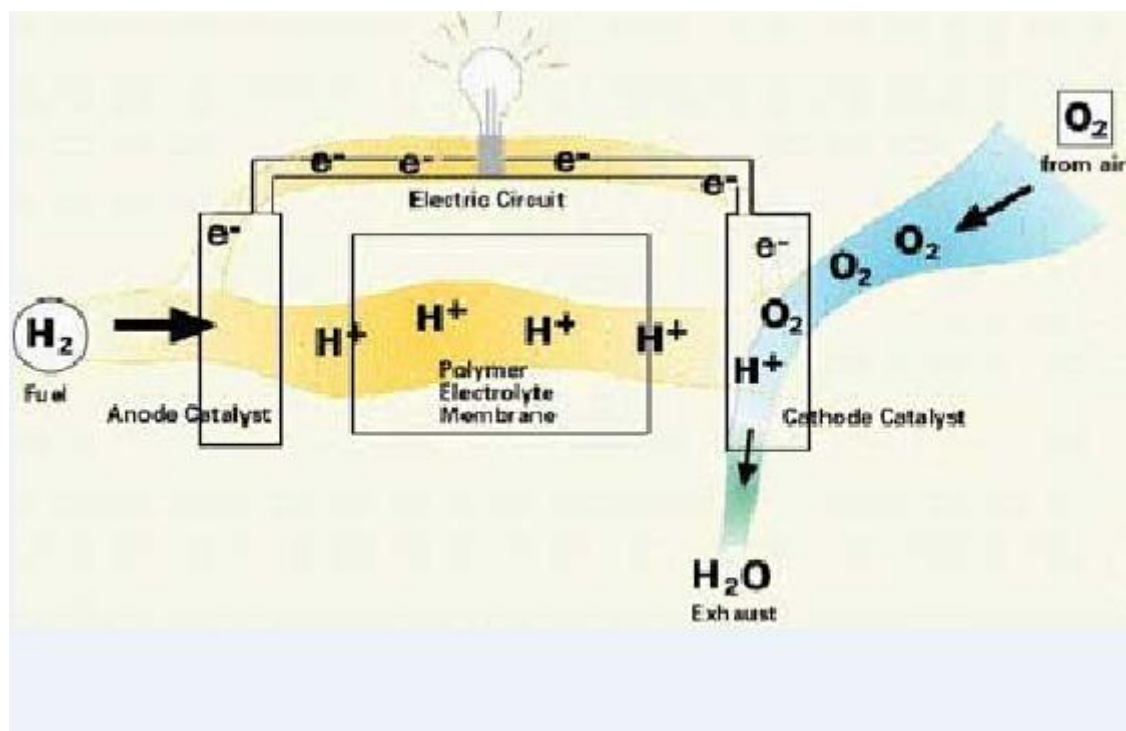
Εικόνα 1.12 : Σύστημα ανεμογεννήτριας.

1.3.4.3 Κυψέλες καυσίμου.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μία παλιά τεχνολογία που βρίσκει όμως εφαρμογή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα και σε εμπορικές εφαρμογές. Είναι μία ηλεκτροχημική συσκευή που καταναλώνει υδρογόνο και οξυγόνο και παράγει ηλεκτρική ενέργεια θερμότητα και νερό. Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια(την άνοδο και την κάθοδο)και έναν ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα πολυμερές, που επιτρέπει τη διέλευση

ίωντων, όχι όμως ηλεκτρονίων. Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν εισάγοντας στην άνοδο κάποιο καύσιμο, το οποίο όμως περιέχει υδρογόνο, όπως για παράδειγμα φυσικό αέριο, εκεί τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται και κινούνται σε ένα εξωτερικό κύκλωμα παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη και φτάνουν στην κάθοδο, όπου ενώνονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και το οξυγόνο, παράγοντας νερό. Για να επιταχύνουμε τη διαδικασία του ιονισμού του υδρογόνου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν καταλύτη υψηλής αγωγιμότητας, όπως για παράδειγμα την πλατίνα. Όταν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο, τότε τα παράγωγα της διαδικασίας αυτής είναι μόνο το ηλεκτρικό ρεύμα, το νερό και η θερμότητα.

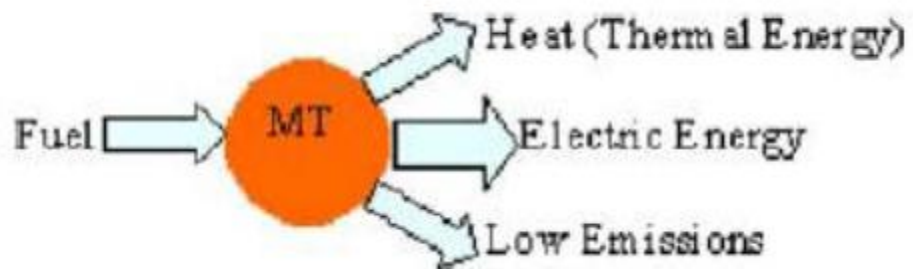
Οι κυψέλες καυσίμου έχουν ποικίλα πλεονεκτήματα, όπως υψηλή απόδοση, η οποία κυμαίνεται από 40% έως 60%. Επιπλέον έχουν χαμηλούς ρύπους, αθόρυβη λειτουργία και μεγάλη ευχέρεια στο είδος καυσίμου που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Ακόμη υπερέχουν σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές πηγές ενέργειας, καθώς δεν έχουν διακοπτόμενη λειτουργία και επιπλέον κάποιες τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν με την παραγωγή θερμότητας (Συμπααραγωγή- Combined Heat Power- CHP). Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν και τη θερμοκρασία. Έτσι υπάρχουν οι κυψέλες ανταλλαγής πρωτονίων χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας κι αυτές της υψηλής θερμοκρασίας. Όποιο είδος ηλεκτρολύτη κι αν χρησιμοποιούν, η αρχή λειτουργίας είναι κοινή.



Εικόνα 1.13 : Κυψέλη Καυσίμου.

1.3.4.4 Μικροτουρμπίνες.

Οι μικροτουρμπίνες είναι περιστροφικές μηχανές που παράγουν ενέργεια από τη ροή αερίου υπό πίεση. Αποτελούνται από ένα συμπιεστή που συνδέεται με μία τουρμπίνα μέσω ενός θαλάμου καύσης. Οι μικροτουρμπίνες μπορούν να λειτουργήσουν με τη μέθοδο του απλού κύκλου ή της ανάκτησης θερμότητας. Σε έναν στρόβιλο απλού κύκλου, χωρίς ανάκτηση, μέσα στον καυστήρα προστίθεται ενέργεια στο ρεύμα αερίου, αέρας αναμειγνύεται με το καύσιμο και αναφλέγεται. Η καύση αυξάνει τη θερμοκρασία, την πτητικότητα και τον όγκο του αερίου. Αυτό κατευθύνεται προς τις λεπίδες της τουρμπίνας, περιστρέφοντάς τη και ενεργοποιώντας τον συμπιεστή. Οι μικροτουρμπίνες απλού κύκλου έχουν χαμηλότερο κόστος, υψηλότερη αξιοπιστία και περισσότερη θερμότητα διαθέσιμη για τις εφαρμογές συμπαραγωγής, από ότι οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας. Οι μονάδες ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιούν έναν εναλλάκτη θερμότητας από φύλλα μετάλλου, που ανακτά τμήμα της θερμότητας από το ρεύμα αέρα που κατευθύνεται προς την εξάτμιση και το μεταβιβάζει στο εισερχόμενο κρύο ρεύμα αέρα. Ο προθερμασμένος αέρας χρησιμοποιείται έπειτα στη διαδικασία καύσης. Η προθέρμανση του αέρα μειώνει την ποσότητα των απαιτούμενων καυσίμων για την αύξηση της θερμοκρασίας του στο απαραίτητο επίπεδο στην είσοδο του στρόβιλου.[11],[12].



Εικόνα 1.14 : Τυπική λειτουργία μικροτουρμπίνας. [2]

Κεφάλαιο 2: Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

Η ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελεί από το 1920 μία σημαντική προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία των συστημάτων. Η σημασία του ζητήματος της ευστάθειας αποτυπώνεται σε πολλά, μεγάλης κλίμακας “blackout” των οποίων αιτία είναι η αστάθεια του συστήματος. Ιστορικά η παροδική αστάθεια ήταν το κυρίαρχο πρόβλημα ευστάθειας στα περισσότερα συστήματα και αποτέλεσε το επίκεντρο μεγάλου μέρους της βιομηχανίας που σχετιζόταν με την ευστάθεια συστημάτων. Με την πάροδο του χρόνου όμως έχουν προκύψει διαφορετικές μορφές αστάθειας καθώς μέσω της χρήσης νέων τεχνολογιών και ελέγχων, της συνεχούς ανάπτυξης διασύνδεσης και της αυξημένης λειτουργίας σε εξαιρετικά ακραίες συνθήκες, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν εξελιχθεί. Οι νέες μορφές ευστάθειας που σήμερα απασχολούν, περισσότερο απ’ ότι στο παρελθόν, είναι η ευστάθεια συχνότητας, η ευστάθεια τάσης και η ευστάθεια γωνίας. [13]

2.2 Ορισμός

Η ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι όμοια με την ευστάθεια των δυναμικών συστημάτων και έχει θεμελιώδη μαθηματικό υπόβαθρο. Παρακάτω παραθέεται ένας ποιοτικός ορισμός της ευστάθειας ΣΗΕ που είναι σύμφωνος με τον μαθηματικό ορισμό κι ένας ορισμός για την αστάθεια.

Ορισμός 1 : Ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανότητα του, για ένα δεδομένο αρχικό λειτουργικό σημείο, να επανακτά ένα αποδεκτό σημείο λειτουργίας μετά από μια διαταραχή, η οποία οδηγεί τις περισσότερες μεταβλητές του συστήματος κοντά στα όριά τους, ώστε το συνολικό σύστημα να μένει πρακτικά αμετάβλητο.[13]

Ορισμός 2 : Η αστάθεια τάσης ενός ΣΗΕ προκύπτει από την προσπάθεια του φορτίου να αποκαθιστά την κατανάλωσή του πέραν από την ικανότητα που παρέχει το δεδομένο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς.[21]

Ο ορισμός αυτός μπορεί να εφαρμοστεί για τον χαρακτηρισμό της ευστάθειας ενός διασυνδεδεμένου ΣΗΕ. Ωστόσο, το ενδιαφέρον συχνά, ως προς την ευστάθεια μπορεί να επικεντρωθεί σε μία γεννήτρια ή σε ένα σύνολο γεννητριών. Πιο συγκεκριμένα μια απομονωμένη γεννήτρια μπορεί να χάσει την ευστάθεια της (να αποσυγχρονιστεί), χωρίς να έχει προηγηθεί εμφάνιση αστάθειας στο υπόλοιπο δίκτυο. Ομοίως μπορεί να εκδηλωθεί η ίδια συμπεριφορά και από δυναμικά φορτία. Συγκεκριμένα η απεριοδική επιβράδυνση ενός κινητήρα επαγωγής μπορεί να λάβει χώρα χωρίς να προκαλέσει αστάθεια στο υπόλοιπο δίκτυο.

Τα ΣΗΕ είναι πολύπλοκα, μη γραμμικά συστήματα , που λειτουργούν σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, στο οποίο τα φορτία, οι έξοδοι των γεννητριών και άλλες λειτουργικές παράμετροι αλλάζουν συνεχώς τιμές. Η ευστάθεια ενός ΣΗΕ, κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής, εξαρτάται από τις αρχικές λειτουργικές συνθήκες, όπως επίσης και από τη φύση της διαταραχής.

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας υπόκεινται σε ένα μεγάλο πλήθος μικρών

και μεγάλων διαταραχών. Οι μικρές διαταραχές συμβαίνουν συνεχώς, αφού το φορτίο των καταναλωτών αλλάζει συνεχώς. Έτσι λοιπόν το σύστημα πρέπει να προσαρμόζεται στις αλλαγές αυτές και να λειτουργεί ικανοποιητικά. Επιπλέον είναι απαραίτητη η ικανότητα αντοχής του συστήματος σε μεγάλες διαταραχές, όπως για παράδειγμα ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μια γραμμή μεταφοράς ή η απώλεια μιας μεγάλης μονάδας παραγωγής. Μία μεγάλη διαταραχή μπορεί να προκαλέσει τεράστιες και σημαντικές αλλαγές στο σύστημα, αφού μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία δύο ή περισσότερων νησίδων.

Σε ένα σύνολο σημείων ισορροπίας, ένα ΣΗΕ μπορεί να είναι ευσταθές για μία δεδομένη μεγάλη διαταραχή και ασταθές για μια άλλη. Επομένως η σχεδίαση ευσταθών ΣΗΕ σε κάθε πιθανή διαταραχή δεν είναι συμφέρουσα ούτε από πρακτικής, αλλά ούτε από οικονομικής πλευράς. Η σχεδίαση ΣΗΕ γίνεται λοιπόν λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις διαταραχές που εμφανίζονται συχνά. Συνεπώς η ευστάθεια μεγάλων διαταραχών αναφέρεται σε συγκεκριμένο σενάριο διαταραχής. Ένα σύνολο σημείων ισορροπίας έχει μια πεπερασμένη περιοχή έλξης, η οποία όσο μεγαλύτερη είναι, τόσο πιο εύρωστο είναι το σύστημα σε μεγάλες διαταραχές. Η περιοχή έλξης των σημείων ισορροπίας αλλάζει ανάλογα με τις λειτουργικές συνθήκες του ΣΗΕ που μελετάται.

Η απόκριση ενός ΣΗΕ σε μία διαταραχή μπορεί να εμπλέξει μεγάλο μέρος του εξοπλισμού. Για παράδειγμα ένα σφάλμα σε ένα κρίσιμο στοιχείο, που έχει ως επακόλουθο την απομόνωσή του λόγω της δράσης του αντίστοιχου εξοπλισμού προστασίας, μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στις ροές ισχύος των γραμμών, στις τάσεις των ζυγών και στις ταχύτητες των δρομέων των στρεφόμενων μηχανών. Οι μεταβολές των τάσεων των ζυγών επηρεάζουν τους ρυθμιστές τάσης των γεννητριών και των δικτύων μεταφοράς. Ακόμη, οι μεταβολές στην ταχύτητα των σύγχρονων γεννητριών επιδρούν στη συμπεριφορά των στροβίλων και των ρυθμιστών των στροφών. Επιπλέον οι μεταβολές τάσης και συχνότητας επηρεάζουν είτε περισσότερο είτε λιγότερο την κατανάλωση των φορτίων, ανάλογα με την κατά περίπτωση χαρακτηριστική αυτών. Συνεπώς εξαιτίας όλων των παραπάνω είναι πιθανή η ενεργοποίηση διατάξεων προστασίας, προκαλώντας επιπλέον επιβράδυνση του δικτύου, η οποία μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια.

Αν μετά από μία διαταραχή το σύστημα εξακολουθήσει να είναι ευσταθές, τότε θα φτάσει σε μία νέα κατάσταση ισορροπίας στην οποία διατηρείται η ακεραιότητα του δικτύου, δηλαδή για παράδειγμα το σύνολο των γεννητριών και των φορτίων θα συνδέονται μεταξύ τους. Παρ' όλα αυτά ένα πλήθος γεννητριών και φορτίων είναι πιθανόν να αποσυνδεθούν από το δίκτυο εξαιτίας της απομόνωσης του εξοπλισμού που συνδέεται με το σφάλμα ή λόγω της απόρριψης ορισμένων διατάξεων προκειμένου να διατηρηθεί η συνέχεια της λειτουργίας του υπόλοιπου συστήματος. Σε πιο σοβαρές διαταραχές, που συμβαίνουν στα διασυνδεδεμένα δίκτυα, είναι πιθανόν να διασπαστούν σε δύο ή περισσότερες νησίδες (ανεξάρτητες μεταξύ τους) προκειμένου να ικανοποιηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Έπειτα η δράση των αυτόματων ελεγκτών σε συνδυασμό με πιθανούς ανθρώπινους χειρισμούς θα επαναφέρουν το σύστημα σε ομαλή κατάσταση λειτουργίας. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή στην περίπτωση που το σύστημα χάνει την ευστάθειά του και οδηγείται σε αστάθεια, θα οδηγηθεί σε διαδοχικές απώλειες των διατάξεων, με αποτέλεσμα τη σβέση ενός μεγάλου μέρους του συστήματος.

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας συχνά υπόκεινται σε διακυμάνσεις μικρού

μεγέθους. Ωστόσο, στις μελέτες ευστάθειας, όπου το σύστημα υπόκειται σε μια συγκεκριμένη διαταραχή, θεωρούμε ότι το σύστημα, πριν ξεκινήσει η συγκεκριμένη διαταραχή, βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση.

2.3 Κατηγοριοποίηση της ευστάθειας ΣΗΕ

Ένα τυπικό σύγχρονο ΣΗΕ αποτελεί ένα πολυμετάβλητο σύστημα, του οποίου η δυναμική συμπεριφορά επηρεάζεται από ένα μεγάλο σύνολο διατάξεων με διαφορετικές χαρακτηριστικές και διαφορετικούς ρυθμούς απόκρισης. Η ευστάθεια είναι μια κατάσταση ισορροπίας που επικρατεί καθώς επιδρούν στο σύστημα διάφορες δυνάμεις. Ανάλογα με τον τύπο του δικτύου, τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος και το είδος της διαταραχής, είναι πιθανόν να οδηγηθεί το σύστημα σε διαφορετικές μορφές αστάθειας.

Η ευστάθεια αποτελεί ένα ενιαίο πρόβλημα. Ωστόσο οι διάφοροι τύποι της ευστάθειας διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους και καθιστούν τη μελέτη της ευστάθειας περισσότερο εξειδικευμένη. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας των προβλημάτων ευστάθειας είναι απαραίτητο να κάνουμε κάποιες απλοποιήσεις, οι οποίες όμως διατηρούν αναλλοίωτη τη δυναμική συμπεριφορά των φαινομένων, ώστε να φτάσουμε στη λύση του προβλήματος ευστάθειας χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες τεχνικές.

Πιο συγκεκριμένα η μελέτη του προβλήματος της ευστάθειας περιλαμβάνει την ανάλυση φαινομένων που συνεισφέρουν στη διέγερση μηχανισμών αστάθειας, αλλά και μεθόδους που βελτιώνουν την ευστάθεια του συστήματος. Ανάλογα με τις επιπτώσεις της διαταραχής στο δίκτυο διακρίνουμε δύο κατηγορίες :την *ευστάθεια μικρών διαταραχών* και την *ευστάθεια μεγάλων διαταραχών*. Στη μελέτη της ευστάθειας μικρών διαταραχών απαντάται το ερώτημα αν το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας που εξετάζουμε είναι ευσταθές ,δηλαδή αν μετά από κάποια διαταραχή (οσοδήποτε μικρή) θα επανέλθει το σύστημα στο αρχικό σημείο λειτουργίας ή θα απομακρυνθεί από αυτό (εκθετικά ή με ταλαντώσεις). Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση του συστήματος πολύ κοντά στο σημείο ισορροπίας, διαδικασία την οποία θα αναφέρουμε παρακάτω. Στη μελέτη ευστάθειας μεγάλων διαταραχών μελετάται εάν μετά από σοβαρή διαταραχή ή ανωμαλία στο σύστημα (βραχυκύκλωμα ορισμένης διάρκειας, απώλεια ενός φορτίου ή μονάδας παραγωγής) θα μπορέσουν να ξαναβρεθούν οι γεννήτριες σε κατάσταση συγχρονισμού ή κάποια από αυτές θα αποσυγχρονιστεί παρασύροντας ενδεχομένως και τις υπόλοιπες. Η συγκεκριμένη μελέτη προϋποθέτει συνήθως την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του δικτύου με ένα κατάλληλο πρόγραμμα προσομοίωσης.

Η μελέτη της ευστάθειας διευκολύνεται σημαντικά αν διαχωριστούν τα φαινόμενα της ευστάθειας στις κατάλληλες κατηγορίες. Η κατηγοριοποίηση των φαινομένων θα γίνει βάσει των παρακάτω κριτηρίων.

- Η φύση του ρυθμού αστάθειας όπως υποδεικνύεται από τις κύριες μεταβλητές του συστήματος στις οποίες η αστάθεια μπορεί να παρατηρηθεί.
- Το μέγεθος της διαταραχής, το οποίο επηρεάζει τη μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την πρόβλεψη της αστάθειας.

- Τις διατάξεις, τις διαδικασίες και τη χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εκτίμηση της ευστάθειας.

Στη συνέχεια αναφέρονται και αναλύονται οι διάφοροι τύποι ευστάθειας. [1],[2].

2.3.1 Ευστάθεια γωνίας

Η *ευστάθεια γωνίας* αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου ΣΗΕ να διατηρούν το συγχρονισμό τους με το δίκτυο μετά από μία διαταραχή. Η ευστάθεια αυτή εξαρτάται από την ικανότητα κάθε σύγχρονης μηχανής να διατηρεί ή να αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής και της μηχανικής ροπής εισόδου.

Το πρόβλημα της ευστάθειας γωνίας συμπεριλαμβάνει τη μελέτη των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που λαμβάνουν χώρα μέσα στο σύστημα. Ένας βασικός παράγοντας σ' αυτό το πρόβλημα είναι ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ενεργός ισχύς εξόδου των σύγχρονων μηχανών καθώς μεταβάλλονται οι αντίστοιχες γωνίες δρομέα. Στη μόνιμη κατάσταση, η μηχανική ροπή εισόδου είναι ίση με την ηλεκτρομαγνητική ροπή εξόδου κάθε γεννήτριας, ενώ η ταχύτητα δρομέα παραμένει σταθερή. Αν συμβεί μία διαταραχή στο σύστημα, τότε η ισορροπία μεταξύ των ροπών εισόδου και εξόδου της γεννήτριας χάνεται, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση των δρομέων των μηχανών, σύμφωνα με τους νόμους κίνησης μιας στρεφόμενης μάζας. Αν μία γεννήτρια, προσωρινά, περιστρέφεται πιο γρήγορα από μία άλλη, η σχετική γωνιακή θέση της πρώτης ως προς τη δεύτερη θα αυξάνεται. Η διαφορά που προκύπτει μεταξύ των γωνιών των δρομέων των δύο μηχανών θα μεταφέρει μέρος του φορτίου της βραδύτερης προς την ταχύτερη γεννήτρια, ανάλογα με τη χαρακτηριστική ενεργού ισχύος – γωνίας δρομέα. Έτσι λοιπόν αυτή η μεταφορά ισχύος τείνει να μειώσει τη διαφορά των ταχυτήτων των δύο γεννητριών και επομένως τη σχετική γωνιακή τους θέση. Η χαρακτηριστική ενεργού ισχύος- γωνίας δρομέα είναι μη γραμμική. Επομένως εν ξεπεραστεί κάποιο όριο η αύξηση στη διαφορά των δύο γωνιών συνοδεύεται από μείωση στη μεταφερόμενη ισχύ, έτσι ώστε η διαφορά των γωνιών να αυξηθεί περαιτέρω. Κι έτσι αν το σύστημα δεν είναι σε θέση να απορροφήσει την επιπλέον κινητική ενέργεια που παράγεται, και η οποία αντιστοιχεί στη διαφορά των ταχυτήτων των δρομέων τότε οδηγείται σε αστάθεια. Για οποιαδήποτε κατάσταση η διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος εξαρτάται από ο εάν οι αποκλίσεις των σχετικών γωνιών των δρομέων οδηγούν σε ανάπτυξη επαρκών ροπών αποκατάστασης. Η απώλεια συγχρονισμού είναι πιθανό να συμβεί μεταξύ μίας σύγχρονης μηχανής και του υπόλοιπου συστήματος, ή μεταξύ διαφορετικών ομάδων μηχανών. Στην τελευταία περίπτωση κάθε ομάδα που διαχωρίζεται από τις άλλες, ή απ' όλο το σύστημα μπορεί να διατηρήσει το συγχρονισμό της.

Η μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής μιας σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες:

- *Συνιστώσα ροπής συγχρονισμού*, η οποία είναι σε φάση με την απόκλιση της γωνίας δρομέα.
- *Συνιστώσα ροπής απόσβεσης*, η οποία είναι σε φάση με την απόκλιση ταχύτητας δρομέα.

Η ευστάθεια γωνίας εξαρτάται από την ύπαρξη και των δύο συνιστωσών ροπής για κάθε σύγχρονη γεννήτρια. Η έλλειψη ροπής συγχρονισμού οδηγεί σε απεριοδική αστάθεια, ενώ η έλλειψη ροπής απόσβεσης σχετίζεται με την εμφάνιση ταλαντώσεων αυξανόμενου πλάτους.

Περαιτέρω διαχωρισμός της ευστάθειας γωνίας σε δύο υποκατηγορίες γίνεται στη συνέχεια ώστε να διευκολυνθεί η ανάλυση και να επιτευχθεί εμβάθυνση στην εσωτερική φύση των προβλημάτων αστάθειας γωνίας. Οι δύο υποκατηγορίες είναι :

- Ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών, η οποία σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί συγχρονισμό μετά από μια μικρή διαταραχή, το μέγεθος της οποίας επιτρέπει την ανάλυση ευστάθειας με τη μέθοδο της γραμμικοποίησης του συστήματος κοντά σε μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας. Η ευστάθεια μικρών διαταραχών εξαρτάται από την αρχική λειτουργική κατάσταση του δικτύου. Η αστάθεια που μπορεί να εκδηλωθεί μπορεί να είναι δύο ειδών: α) αύξηση της γωνίας δρομέα μέσω ενός απεριοδικού ρυθμού εξαιτίας της έλλειψης ροπής συγχρονισμού και β) ταλαντώσεις δρομέα αυξανόμενου πλάτους λόγω της έλλειψης ροπής απόσβεσης. Στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας τα προβλήματα ευστάθειας γωνίας μικρών διαταραχών συνδέονται με την ανεπαρκή απόσβεση των ταλαντώσεων. Το πρόβλημα απεριοδικής αστάθειας περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό όταν είναι σε λειτουργία οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης των σύγχρονων γεννητριών. Ωστόσο ο κίνδυνος εκδήλωσης αστάθειας εξακολουθεί να υπάρχει σε περιπτώσεις όπου οι γεννήτριες λειτουργούν υπό συνθήκες περιορισμού της διέγερσής τους.

Τα προβλήματα ευστάθειας γωνίας μικρών διαταραχών μπορεί να είναι είτε τοπικά είτε σε όλο το δίκτυο.

Τα τοπικά προβλήματα συμπεριλαμβάνουν ένα μικρό μέρος του συστήματος και συνήθως σχετίζονται με τις ταλαντώσεις του δρομέα στις γεννήτριες ενός σταθμού παραγωγής ως προς το υπόλοιπο δίκτυο. Τέτοιου είδους ταλαντώσεις καλούνται τοπικές ταλαντώσεις. Η απόσβεση των ταλαντώσεων αυτών εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος μεταφοράς, όπως αυτό φαίνεται απ' τον τοπικό σταθμό παραγωγής, τις διατάξεις ρύθμισης της διέγερσης γεννητριών και την έξοδο του σταθμού. Τα προβλήματα ευστάθειας τα οποία λαμβάνουν χώρα σε όλο το δίκτυο «διαδίδονται» σε όλο το δίκτυο εξαιτίας της αλληλεπίδρασης μεγάλων ομάδων σύγχρονων γεννητριών. Συμπεριλαμβάνουν ταλαντώσεις μιας «ομάδας» γεννητριών, που επηρεάζουν κι άλλες γειτονικές ομάδες, όταν αυτές συνδέονται μέσω ασθενούς δικτύου μεταφοράς. Οι ταλαντώσεις αυτές ονομάζονται ταλαντώσεις διασυνδέσεων και έχουν πολύπλοκα χαρακτηριστικά, τα οποία τις κάνουν να διαφέρουν σημαντικά από τις τοπικές ταλαντώσεις. Στη μελέτη των ταλαντώσεων αυτών σημαντικό ρόλο παίζουν και οι χαρακτηριστικές φορτίων.

- Ευστάθεια γωνίας μεγάλων διαταραχών ή μεταβατική ευστάθεια γωνίας, όπως συχνά αναφέρεται σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να

παραμένει σε συγχρονισμό, όταν αυτό υπόκεινται σε σοβαρές διαταραχές, όπως για παράδειγμα ένα βραχυκύκλωμα σε μια γραμμή μεταφοράς. Η απόκριση του συστήματος σε μία τέτοια διαταραχή διακρίνεται από μεγάλες μεταβολές των γωνιών δρομέα των γεννητριών και επηρεάζεται από τη μη γραμμική χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-γωνίας δρομέα.

Η μεταβατική ευστάθεια εξαρτάται τόσο από το αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος, όσο και από το πόσο σοβαρή είναι η διαταραχή. Η μεταβατική αστάθεια συνήθως εμφανίζεται σε απεριοδική μορφή, απομακρύνοντας τα μέτρα των γωνιών, εξαιτίας ανεπαρκούς ροπής συγχρονισμού και ονομάζεται ευστάθεια πρώτης ταλάντωσης. Ωστόσο σε μεγάλα ΣΗΕ η μεταβατική ευστάθεια ίσως να μην εμφανιστεί πάντα ως ευστάθεια πρώτης ταλάντωσης, η οποία σχετίζεται με έναν μοναδικό ρυθμό, καθώς μπορεί να εκδηλωθεί σαν αποτέλεσμα της επαλληλίας μιας αργής ταλάντωσης διασύνδεσης και μιας τοπικής ταλάντωσης προκαλώντας έτσι μεγάλη μεταβολή της γωνίας δρομέα μετά την πρώτη ταλάντωση. Ακόμη η μεταβατική αστάθεια μπορεί να προκληθεί από την επίδραση μη γραμμικών φαινομένων σε έναν απλό ρυθμό πέρα από το χρονικό εύρος της πρώτης ταλάντωσης.

Το χρονικό διάστημα που παρουσιάζει ενδιαφέρον στη μεταβατική αστάθεια είναι συνήθως 3-5 sec μετά τη διαταραχή. Μπορεί να επεκταθεί στα 10-20 sec στα πολύ μεγάλα συστήματα λόγω της κυριαρχίας των ταλαντώσεων των διασυνδέσεων.[1],[2].

2.3.2 Ευστάθεια τάσης.

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτές τιμές τάσης σε όλους τους ζυγούς όταν υποβάλλεται σε μία διαταραχή από ένα αρχικό σημείο λειτουργίας. Η ευστάθεια εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να υποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ισχύος των φορτίων. Η αστάθεια που μπορεί να προκληθεί παρουσιάζεται σαν μία σταδιακή πτώση ή αύξηση τάσης στους ζυγούς του συστήματος. Μία πιθανή έκβαση της αστάθειας τάσης είναι η απώλεια φορτίου σε μία περιοχή ή η αποσύνδεση συστημάτων προστασίας από τις γραμμές μεταφοράς ή από άλλα στοιχεία οδηγώντας έτσι σε διαδοχικές απώλειες επιπρόσθετων στοιχείων του συστήματος. Οι απώλειες αυτές σε συνδυασμό με τη λειτουργία ορισμένων σύγχρονων γεννητριών υπό συνθήκες περιορισμού του ρεύματος πεδίου μπορούν να οδηγήσουν στον αποσυγχρονισμό των τελευταίων.

Η σταδιακή πτώση τάσης μπορεί να συσχετιστεί με την αστάθεια γωνίας. Για παράδειγμα αν ο αποσυγχρονισμός των γεννητριών στις γωνίες των δρομέων μεταξύ δύο «ομάδων» γεννητριών προσεγγίσει τις 180°, τότε προκαλεί απότομη πτώση τάσης σε διάφορα σημεία του συστήματος. Όταν συμβεί κάτι τέτοιο, τα συστήματα προστασίας λειτουργούν ώστε να διαχωρίσουν τις ομάδες των γεννητριών και να αποκατασταθούν οι τάσεις σε αποδεκτά επίπεδα. Αν ωστόσο ο διαχωρισμός αυτός δεν επιτευχθεί, η απώλεια συγχρονισμού θα οδηγήσει τις

μηχανές σε υπερπήδηση πόλων μεταξύ τους.

Ο όρος κατάρρευση τάσης χρησιμοποιείται συχνά όταν μελετάμε την ευστάθεια τάσης. Κατά την κατάρρευση τάσης λαμβάνει χώρα μία αλληλουχία γεγονότων, που συνοδεύεται από αστάθεια τάσης και οδηγεί το μεγαλύτερο μέρος του συστήματος σε διακοπή ρεύματος και σε ασυνήθιστα χαμηλές τιμές τάσης.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την ευστάθεια ενός συστήματος είναι η συμπεριφορά των φορτίων. Μετά από μια διαταραχή, η καταναλισκόμενη ισχύς των φορτίων τείνει να αποκατασταθεί από τη μεταβολή της ολίσθησης των κινητήρων επαγωγής, τη δράση των ρυθμιστών τάσης στο δίκτυο διανομής, την ενεργοποίηση των μηχανισμών ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών και τη δυναμική των αυτορυθμιζόμενων φορτίων.

Βασικός παράγοντας που συνεισφέρει στη διέγερση φαινομένων αστάθειας τάσης είναι η πεπερασμένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος διανομής-μεταφοράς. Η ικανότητα της μεταφοράς αυτής περιορίζεται αρχικά από τις απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος από τα παθητικά στοιχεία του συστήματος.

Αν και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η αστάθεια τάσης εκδηλώνεται σαν πτώση τάσης, είναι πιθανόν να εκδηλωθεί και απότομη αύξηση τάσης. Σε πειράματα που έχουν διεξαχθεί διαπιστώνεται ότι η αστάθεια αυτή εκδηλώνεται εξαιτίας της χωρητικής συμπεριφοράς του δικτύου σε συνδυασμό με τη δράση συστημάτων προστασίας υποδιέγερσης, τα οποία προστατεύουν τις σύγχρονες γεννήτριες από την απορρόφηση της περίσσειας άεργου ισχύος. Στην περίπτωση αυτή η αστάθεια σχετίζεται με την ανικανότητα του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς να λειτουργεί κάτω από συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης. Στην προσπάθεια του συστήματος να αποκαταστήσει τη φόρτιση, οι μηχανισμοί ΣΑΤΥΦ προκαλούν αστάθεια τάσης.

Ακόμη προβλήματα ευστάθειας τάσης μπορούν να εκδηλωθούν και στους τερματικούς ζυγούς ΣΡ, κατά τη διασύνδεση ασθενών ac συστημάτων. Τα προβλήματα αυτά συνήθως εμφανίζονται σε σταθμούς ανορθωτών ή μετατροπέων και σχετίζονται με την ανεπιθύμητη χαρακτηριστική άεργου φόρτισης των μετατροπέων. Η στρατηγική ελέγχου των τερματικών σταθμών ΣΡ παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αποφυγή αστάθειας, καθώς η ροή ενεργού και άεργου ισχύος στους συνδέσμους συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος καθορίζεται από αυτό τον έλεγχο. Αν τελικά ο έλεγχος αυτός προκαλέσει φόρτιση στο εναλλασσόμενο σύστημα πέρα από την ικανότητα μεταφοράς του, δημιουργούνται προβλήματα αστάθειας τάσης. Τέτοιου είδους φαινόμενα εξελίσσονται αρκετά γρήγορα, δηλαδή σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου ή και μικρότερο. Η αστάθεια τάσης μπορεί ακόμη να συσχετιστεί με τον έλεγχο στους μετατροπείς των μηχανισμών ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών. Το φαινόμενο αυτό βέβαια εκδηλώνεται μακροπρόθεσμα. Αξίζει να αναφέρουμε ότι οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις στις γραμμές ΣΡ (δηλαδή χρήση μετατροπέων πηγής τάσης και μετατροπέων με πυκνωτές μεταγωγής) έχουν αυξήσει σημαντικά τα όρια ευσταθούς λειτουργίας των γραμμών ΣΡ κατά τη σύνδεσή τους με ασθενή συστήματα συγκριτικά με τα όρια που προκύπτουν από τη χρήση μετατροπέων με μεταγωγή από την τάση της γραμμής.

Όπως και στην ευστάθεια γωνίας είναι χρήσιμο να διαχωρίσουμε την ευστάθεια τάσης στις εξής κατηγορίες:

- Ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών. Αυτή η κατηγορία ευστάθειας αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά

επίπεδα τάσης στους ζυγούς, όταν κάποια σοβαρή διαταραχή συμβαίνει στο σύστημα όπως η απώλεια μιας μεγάλης παραγωγικής μονάδας ή μίας γραμμής διασύνδεσης. Η ικανότητα αυτή καθορίζεται από τις χαρακτηριστικές του δικτύου και των φορτίων, όπως επίσης και από την αλληλεπίδραση των συνεχών και διακριτών συστημάτων προστασίας και ελέγχου. Για να προσδιορίσουμε την ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών απαιτείται να εξεταστεί η μη γραμμική απόκριση του συστήματος σε ένα επαρκές χρονικό διάστημα ώστε να διαπιστωθεί η συμπεριφορά και η αλληλεπίδραση διατάξεων του συστήματος, όπως οι σύγχρονες γεννήτριες, οι κινητήρες και τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής. Η χρονική περίοδος μελέτης ενός τέτοιου φαινομένου κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι δεκάδες λεπτά.

- Ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών. Η ευστάθεια αυτή αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσης σε όλους τους ζυγούς, όταν το σύστημα υπόκειται σε μικρές διαταραχές όπως μία ελάχιστη αύξηση στη ζήτηση ενός συγκεκριμένου φορτίου. Αυτού του είδους η ευστάθεια επηρεάζεται από τις χαρακτηριστικές των φορτίων, των συνεχών και των διακριτών διατάξεων ελέγχου σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η μελέτη ευστάθειας μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση των εξισώσεων του συστήματος, σε μία πολύ μικρή περιοχή που συμπεριλαμβάνει το σημείο ισορροπίας, λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο απλουστευτικών παραδοχών. Όμως η γραμμικοποίηση δε λαμβάνει υπόψη την επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων, όπως οι διατάξεις ελέγχου ΣΑΤΥΦ. Σε τέτοιες περιπτώσεις γίνεται συνδυασμός γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης.

Όπως προαναφέρεται το χρονικό διάστημα ενδιαφέροντος κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι δεκάδες λεπτών. Επομένως τα φαινόμενα ευστάθειας μπορούν να διαχωριστούν σε βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα.

Η *βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης* αναφέρεται στη δυναμική συμπεριφορά των γρήγορων συνιστωσών ενός ΣΗΕ, όπως είναι οι σύγχρονες μηχανές, οι μηχανές επαγωγής(φορτία αλλά και γεννήτριες) και οι μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται στους τερματικούς σταθμούς των γραμμών ΣΡ. Η ανάλυση της ευστάθειας πραγματοποιείται μέσω των λύσεων κατάλληλων διαφορικών εξισώσεων, όμοια με την ανάλυση ευστάθειας γωνίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βραχυπρόθεσμη ανάλυση τάσης σχετίζεται με την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων κοντά στα φορτία με αποτέλεσμα να έρχεται σε αντίθεση με την ευστάθεια γωνίας, όπου το αντίστοιχο ενδιαφέρον εστιάζεται κοντά στις μονάδες παραγωγής. Στην περίπτωση της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης η χρονική κλίμακα είναι της τάξεως μερικών δευτερολέπτων, όμοια δηλαδή με την ευστάθεια γωνίας.

Αντίθετα η *μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης* επιδρούν βραδύτερες διατάξεις ενός ΣΗΕ, όπως είναι οι διατάξεις ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, τα θερμοστατικά

φορτία και οι Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξεως- Αποζεύξεως Στατών Πυκνωτών. Η χρονική κλίμακα της μακροπρόθεσμης ευστάθειας είναι της τάξης μερικών λεπτών και για την ανάλυσή της απαιτούνται δυναμικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος. Η αστάθεια τάσης μπορεί να οφείλεται είτε στην απώλεια σημείου ισορροπίας, είτε στην επίτευξη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, το οποίο ωστόσο είναι ασταθές από πλευράς ευστάθειας μικρών διαταραχών ή τέλος στην απώλεια περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή, αν για παράδειγμα οι διορθωτικές κινήσεις εφαρμοστούν σχετικά αργά. Σε πολλές περιπτώσεις μελέτης μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης χρησιμοποιούνται στατικές μέθοδοι ανάλυσης των φαινομένων, ώστε να εκτιμηθούν τα όρια ευστάθειας και να αναγνωριστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια, όπως επίσης και να αναλυθεί ένας μεγαλύτερος αριθμός διαταραχών λαμβάνοντας υπόψη ένα μεγαλύτερο εύρος λειτουργικών συνθηκών του συστήματος. Στις περιπτώσεις αξιολόγησης μέτρων αντιμετώπισης των προβλημάτων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, όπου η χρονική στιγμή λήψης των διορθωτικών μέτρων είναι εξαιρετικά σημαντική, απαιτούνται εκτεταμένες χρονικές προσομοιώσεις του δικτύου. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τεχνικές προσομοίωσης με Οιονεί Στατικές Μεταβολές.[13],[15].

2.3.3 Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τη συχνότητά του εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών μετά από μία διαταραχή, η οποία διαταράσσει το συνολικό ισοζύγιο μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος. Η ευστάθεια αυτή εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και φορτίου, με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου. Στην περίπτωση αστάθειας, αυτή εμφανίζεται με τη μορφή ταλαντώσεων στην τιμή της συχνότητας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στην αποκοπή μονάδων παραγωγής και φορτίων, μέχρι την ολική σβέση του συστήματος.

Οι αρκετά σοβαρές διαταραχές οδηγούν σε μεγάλες αποκλίσεις στην τιμή της συχνότητας, της ροής ισχύος, της τάσης, καθώς και άλλων μεταβλητών του συστήματος, προκαλώντας έτσι την ενεργοποίηση διατάξεων προστασίας και ελέγχου, των οποίων η συνεισφορά στην ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας ή της ευστάθειας τάσης θεωρείται αμελητέα. Οι διατάξεις αυτές ανήκουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και μπορεί να είναι οι ατμοπαραγωγοί των ατμοηλεκτρικών μονάδων, ή τα συστήματα προστασίας που ενεργοποιούνται σε εξαιρετικά κρίσιμες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα τα συστήματα προστασίας μαγνητικής ροής των σύγχρονων γεννητριών. Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα, οι λειτουργικές συνθήκες είναι αυτές που επικεντρώνουν το ενδιαφέρον, κατά τη μελέτη ευστάθειας συχνότητας, οι οποίες δημιουργούνται μετά το διαχωρισμό του συστήματος σε ξεχωριστές νησίδες. Αυτό που μελετάται είναι αν κάθε νησίδα μπορεί να επιτύχει ευσταθές σημείο λειτουργίας με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη παραγωγής ή φορτίου. Η ευστάθεια συχνότητας

προσδιορίζεται από τη συνολική απόκριση συχνότητας κάθε νησίδας, παρά τη σχετική δυναμική κίνηση των στρεφόμενων μηχανών. Γενικά τα προβλήματα ευστάθειας συχνότητας σχετίζονται με τις αστοχίες του εξοπλισμού προστασίας, με την κακή συνεργασία των διατάξεων ελέγχου και προστασίας και με την έλλειψη στρεφόμενης εφεδρείας. [13].

2.4 Γραμμικοποίηση

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η μελέτη ευστάθειας μικρών διαταραχών (small signal stability analysis) πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση γύρω από ένα σημείο ισορροπίας.

Γνωρίζουμε ότι ένα χρονικά αμετάβλητο γραμμικό σύστημα με n μεταβλητές περιγράφεται από τις διαφορικές εξισώσεις:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bz \quad (2.4.1) \\ y &= Cx\end{aligned}$$

όπου:

x το $n \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή t

y το $q \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών εξόδου τη χρονική στιγμή t

z το $r \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου τη χρονική στιγμή t

A ο $n \times n$ πίνακας κατάστασης

B ο $n \times r$ πίνακας εισόδου

C ο $q \times n$ πίνακας εξόδου.

Άλλος τρόπος για να εκφράσουμε τις διαφορικές εξισώσεις ενός συστήματος είναι ο παρακάτω:

$$\dot{x} = f(x, z) \quad (2.4.2)$$

Το σημείο ισορροπίας του συστήματος δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{x} = f(x_0, z_0) = 0 \quad (2.4.3)$$

και αποτελεί ένα σύστημα n αλγεβρικών εξισώσεων με n αγνώστους.

Για να μελετήσουμε την ευστάθεια ενός γραμμικού συστήματος στο σημείο ισορροπίας (στα γραμμικά συστήματα μοναδικό σημείο ισορροπίας είναι το $x_0 = 0$) αρκεί να βρούμε τις ιδιοτιμές του πίνακα A και για να βρούμε τις ιδιοτιμές αρκεί να λύσουμε την εξίσωση

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (2.4.4)$$

Όπου I ο μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων $n \times n$.

Από την ανάπτυξη της παραπάνω ορίζουσας λοιπόν προκύπτει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του πίνακα A . Οι ρίζες της εξίσωσης αυτής είναι οι ιδιοτιμές ή αλλιώς

πόλοι του χαρακτηριστικού πολυωνύμου. Οι ιδιοτιμές μπορεί να είναι είτε μιγαδικές είτε πραγματικές. Αν ο πίνακας A είναι πραγματικός (κάτι το οποίο συμβαίνει για όλα τα ΣΗΕ) τότε αν εμφανιστούν μιγαδικές ιδιοτιμές, εμφανίζονται πάντα σε συζυγή ζεύγη.

Παρατηρώντας τη μορφή των ιδιοτιμών, βγάζουμε συμπέρασμα για την ευστάθεια του συστήματος στο σημείο ισορροπίας. Εάν όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικά πραγματικά μέρη, τότε το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Αν έστω και μία ιδιοτιμή έχει θετικό πραγματικό μέρος, τότε το σημείο είναι ασταθές.

Σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, τα μη γραμμικά μπορεί να έχουν περισσότερα από ένα σημεία ισορροπίας ή και κανένα. Επομένως ο συστηματικός τρόπος για να κάνουμε ανάλυση της ευστάθειας μονίμου καταστάσεως (ή μικρών διαταραχών) στηρίζεται στη γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από το σημείο λειτουργίας x_0 . Απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι δυνατή η γραμμικοποίηση του συστήματος είναι οι συναρτήσεις f_1 έως f_n να είναι παραγωγίσιμες στο σημείο x_0 .

Η γραμμικοποίηση μιας μη γραμμικής συνάρτησης μιας μεταβλητής $f(x)$, στηρίζεται στο ανάπτυγμα κατά Taylor γύρω από το σημείο x_0 .

$$f(x) = f(x_0) + (x - x_0)f'(x_0) + \frac{1}{2(x-x_0)^2}f''(x_0) + \dots \quad (2.4.5)$$

Παραλείποντας από την (3.4.5) τους όρους δεύτερης και ανώτερης τάξης, παίρνουμε τη γραμμικοποιημένη μορφή της $f(x)$:

$$\Delta f = f'(x_0)\Delta x \quad (2.4.6)$$

$$\text{Όπου } \Delta f = f(x) - f(x_0) = f - f_0$$

$$\Delta x = x - x_0$$

Γενικεύοντας τη διαδικασία γραμμικοποίησης για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών, η πρώτη παράγωγος $f'(x)$ αντικαθίσταται από τη μερική παράγωγο ως προς τη μεταβλητή x_i , ώστε οι n διαφορικές εξισώσεις (3.4.2) γραμμικοποιείται στο παρακάτω σύστημα που γράφεται υπό μορφή πινάκων:

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta z \quad (2.4.7)$$

όπου τα στοιχεία του n*n Ιακωβιανού πίνακα ή πίνακα κατάστασης A ορίζονται ως εξής:

$$a_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_0$$

και του n*r πίνακα εισόδου B ως:

$$b_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial z_j} \right|_0$$

Με τον τρόπο αυτό καταφέρνουμε να ανάγουμε το πρόβλημα της ευστάθειας στο σημείο ισορροπίας x_0, z_0 ενός μη γραμμικού συστήματος σε πρόβλημα ευστάθειας γραμμικού συστήματος.[14]

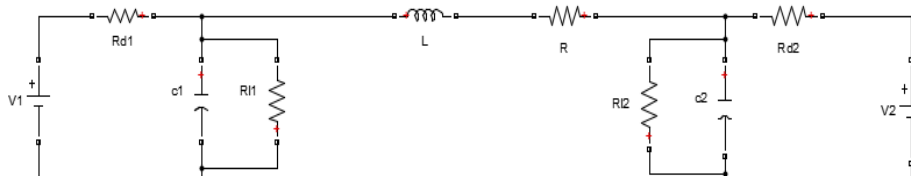
2.5 Μελέτη δυναμικής ευστάθειας σε DC μικροδίκτυο

2.5.1 Δυναμική ευστάθεια

Η αστάθεια τάσης αποτελεί ένα φαινόμενο, που απασχολεί ιδιαίτερως κατά την κατασκευή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στις περισσότερες μελέτες, η ανάλυση της ευστάθειας τάσης, προσεγγίζεται με τη μέθοδο της στατικής ευστάθειας. Όμως τα ΣΗΕ είναι μεγάλα συστήματα και η δυναμική τους συμπεριφορά έχει τεράστια επίδραση στην ευστάθεια τάσης. Βάσει των τελευταίων «black-out» που έχουν συμβεί, έχει διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι η ευστάθεια τάσης σχετίζεται αρκετά με την ευστάθεια συχνότητας και γωνίας. Επομένως για να έχουμε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, είναι απαραίτητο να λαμβάνουμε υπόψη μας το πλήρες δυναμικό μοντέλο του συστήματος. Επομένως μελετώντας τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος έχουμε καλύτερα αποτελέσματα. Το μαθηματικό μοντέλο για την ανάλυση της δυναμικής ευστάθειας τάσης βασίζεται σε ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων (2.4.1). Στην επόμενη παράγραφο πραγματοποιείται διεξοδικά η μελέτη της δυναμικής ευστάθειας.

2.5.2 Μαθηματικό μοντέλο και μελέτη της δυναμικής ευστάθειας.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η μελέτη δυναμικής ευστάθειας τάσης ενός μικροδικτύου ΣΡ, στο οποίο έχει επιβληθεί ο πρωτογενής και δευτερογενής έλεγχος. Στην παρακάτω εικόνα προσομοιώνεται ένα μικροδίκτυο ΣΡ με δύο πηγές και δύο φορτία. Ο πρωτογενής έλεγχος εκφράζεται μέσω των αντιστάσεων R_{d1} και R_{d2} . Όσον αφορά το δευτερογενή έλεγχο αμελείται, καθώς ο χρόνος δειγματοληψίας και ο ρυθμός ενημέρωσης της μετατόπισης Δu_j^0 είναι πολύ πιο αργοί συγκριτικά με το δευτερογενή έλεγχο, σύμφωνα με την αναφορά [16].



Σχ.2.1 :μικροδίκτυο ΣΡ δύο πηγών- δύο φορτίων

Οι τιμές των παραμέτρων του μικροδικτύου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας I: παράμετροι μικροδικτύου

Παράμετροι	Τιμές
Ονομαστική τάση V1	46 V
Ονομαστική τάση V2	4 V
Rd1	0.2 Ω
Rd2	0.2Ω

C1	10^{-3} F
C2	10^{-3} F
R1	15Ω
R2	15Ω
R	0.205Ω
L	$463 \cdot 10^{-6}$ H

Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.5.8)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.5.9)$$

Όπου
$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{i}_L(t) \\ u_{C1}(t) \\ u_{C2}(t) \end{bmatrix}$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} p_{L1} \\ p_{L2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{l1}} \right) & 0 \\ \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{C_2} \left(\frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{l2}} \right) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{c_1 U_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_2 U_2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R_{d1} + R_{l1}}{R_{l1}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_{d2} + R_{l2}}{R_{l2}} \end{bmatrix}$$

Οι πίνακες προκύπτουν από τις εξισώσεις κατάστασης του συστήματος. Κάνοντας εφαρμογή τους νόμους τάσεων και ρευμάτων Kirchoff έχουμε:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(u_{c1} - u_{c2} - i_L \cdot R) \quad (2.5.1)$$

$$\frac{du_{c1}}{dt} = \frac{1}{c_1} \left[\frac{u_1}{R_{d1}} - \left(\frac{1}{R_{d1}} + \frac{1}{R_{l1}} \right) u_{c1} - i_L \right] \quad (2.5.2)$$

$$\frac{du_{c2}}{dt} = \frac{1}{c_2} \left[\frac{u_2}{R_{d2}} - \left(\frac{1}{R_{d2}} + \frac{1}{R_{l2}} \right) u_{c2} + i_L \right] \quad (2.5.3)$$

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, για να διαπιστώσουμε αν το σύστημα είναι ευσταθές αρκεί να βρούμε τις ιδιοτιμές του λύνοντας την εξίσωση (2.4.4). οι ιδιοτιμές που προκύπτουν είναι:

$$\lambda_1 = -1.7421 \cdot 10^3$$

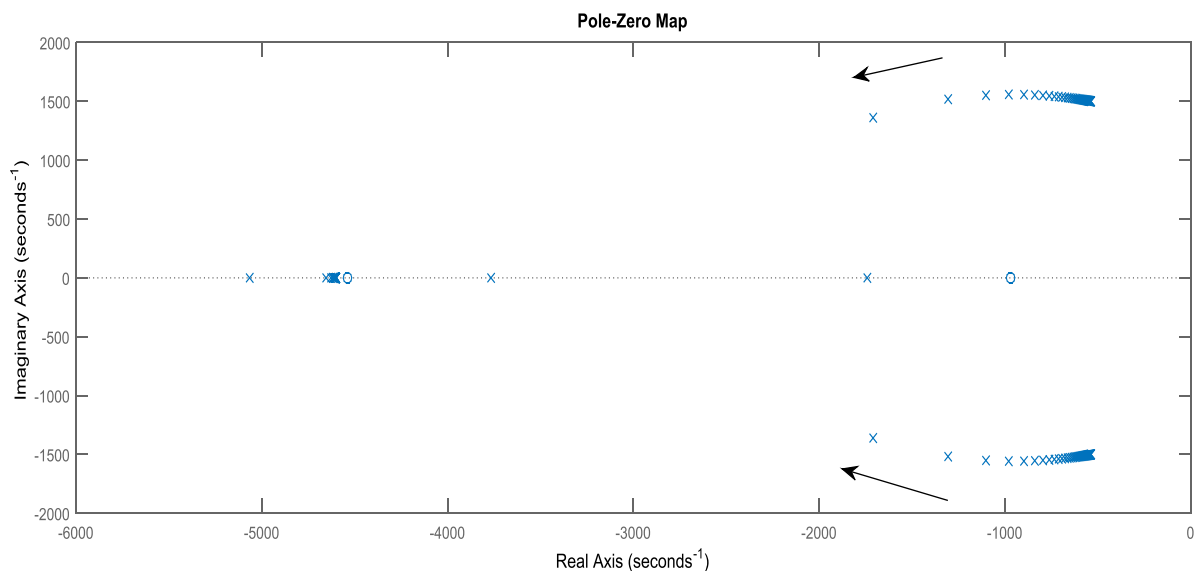
$$\lambda_2 = -3,7674 \cdot 10^3$$

$$\lambda_3 = -5.0667 \cdot 10^3$$

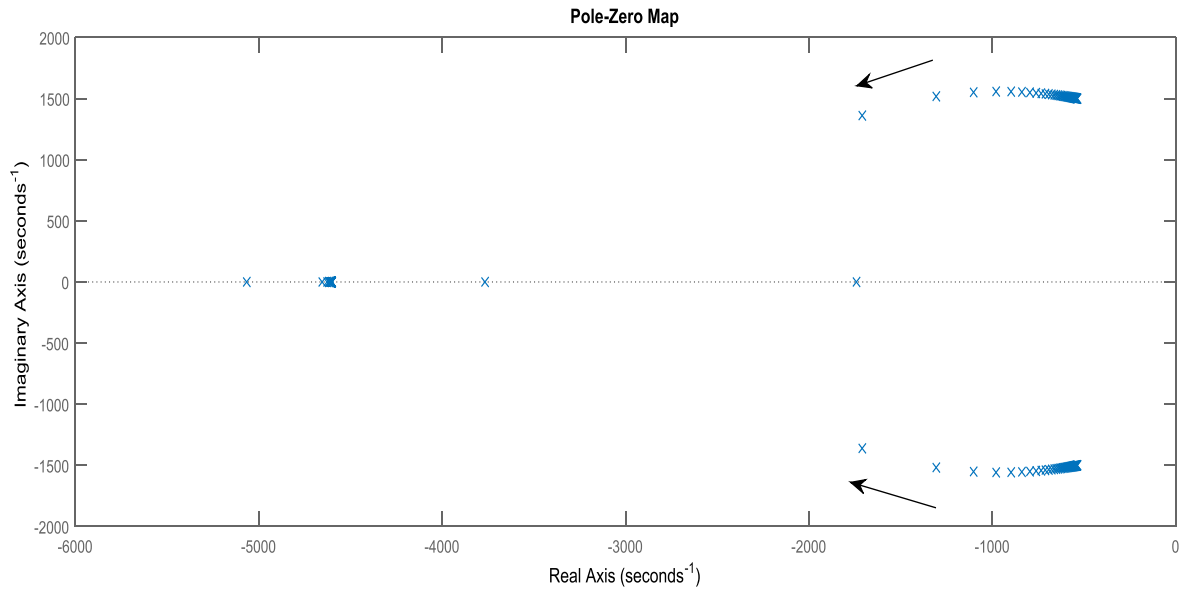
Επομένως συμπεραίνουμε ότι το σύστημα είναι ευσταθές, καθώς όλες οι ιδιοτιμές είναι πραγματικές και αρνητικές.

Παρακάτω γίνεται μία μελέτη ευαισθησίας σχετικά με την ευστάθεια του συστήματος, για κάποιες τιμές των R_{d1} και R_{d2} αρχικά, αλλά και των R_{l1} και R_{l2} στη συνέχεια.

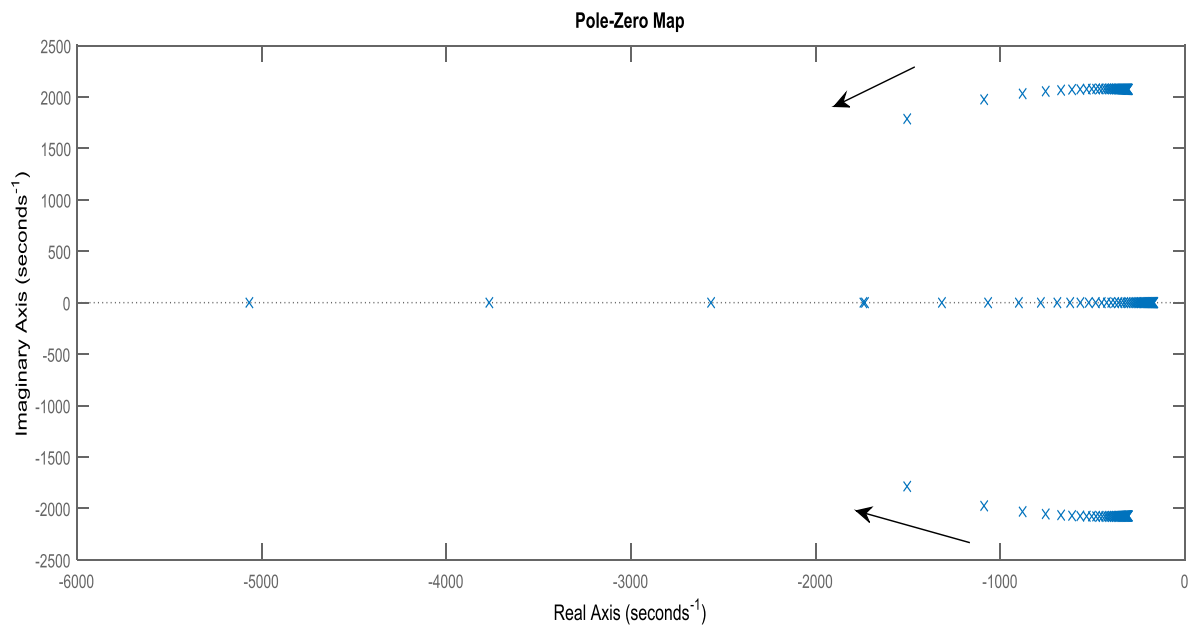
Αρχικά μεταβάλλουμε την τιμή της R_{d1} από 0.2 Ω μέχρι 50 Ω αφήνοντας σταθερές όλες τις άλλες τιμές. Το διάγραμμα πόλων και μηδενικών του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 2.2. Ακολουθούν μεταβολές της R_{d2} , R_{l1} και R_{l2} ξανά από 0.2 Ω μέχρι 50 Ω στα σχήματα 2.3, 2.4 αντίστοιχα.



Σχ. 2.2: Διάγραμμα πόλων και μηδενικών του συστήματος με μεταβολή μόνο της R_{d1} .



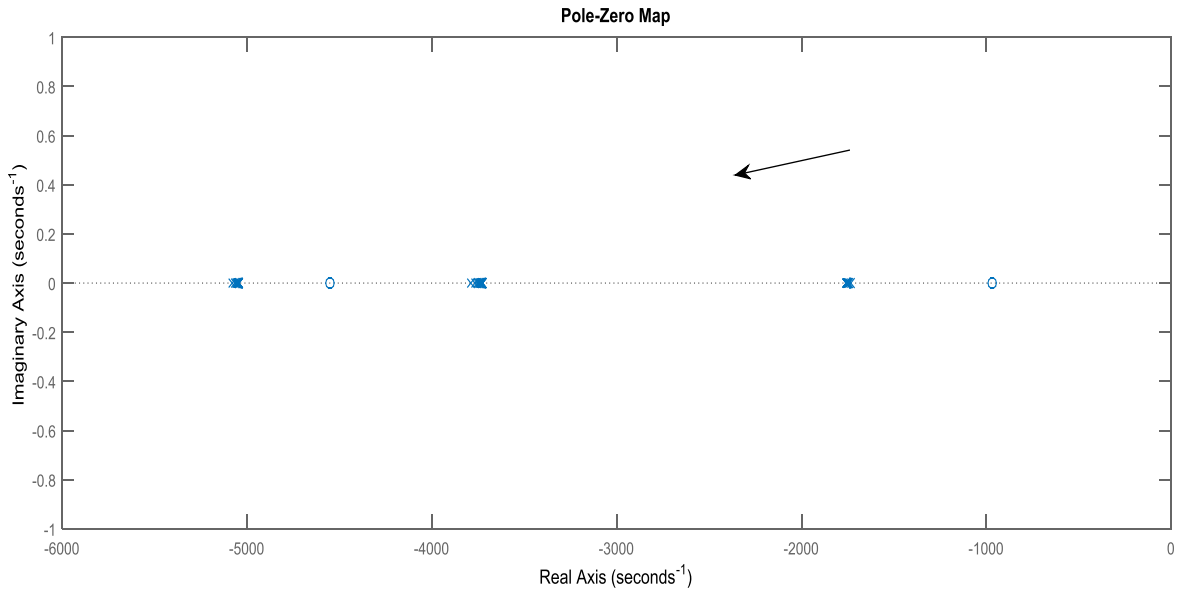
Σχ. 2.3 : Διάγραμμα πόλων και μηδενικών του συστήματος με μεταβολή μόνο της R_{d2} .



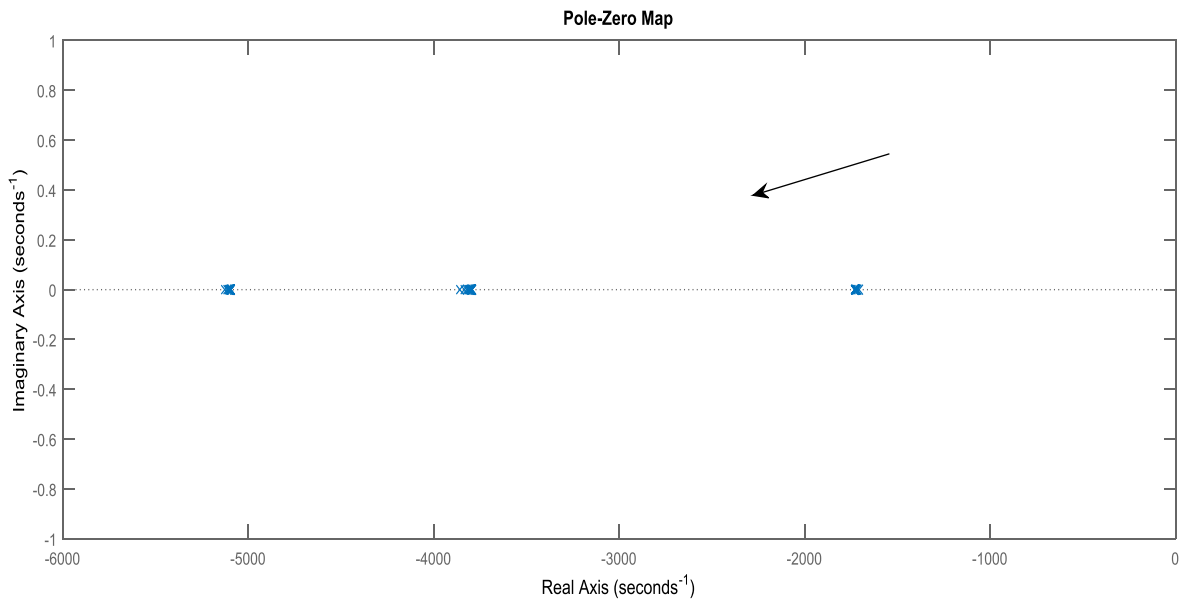
Σχ. 2.4: Διάγραμμα πόλων και μηδενικών με μεταβολή στα , R_{d1} και R_{d2} .

Το σύστημα που μελετήσαμε είναι ευσταθές για οποιοσδήποτε τιμές των R_{d1} και R_{d2} , όπως διαπιστώνουμε και από τα διαγράμματα των πόλων και των μηδενικών του συστήματος, μεταβάλλοντας διαφορετικές αντιστάσεις κάθε φορά. Όσο αυξάνονται οι αντιστάσεις τόσο περισσότερο κινείται προς την ευστάθεια το σύστημα.

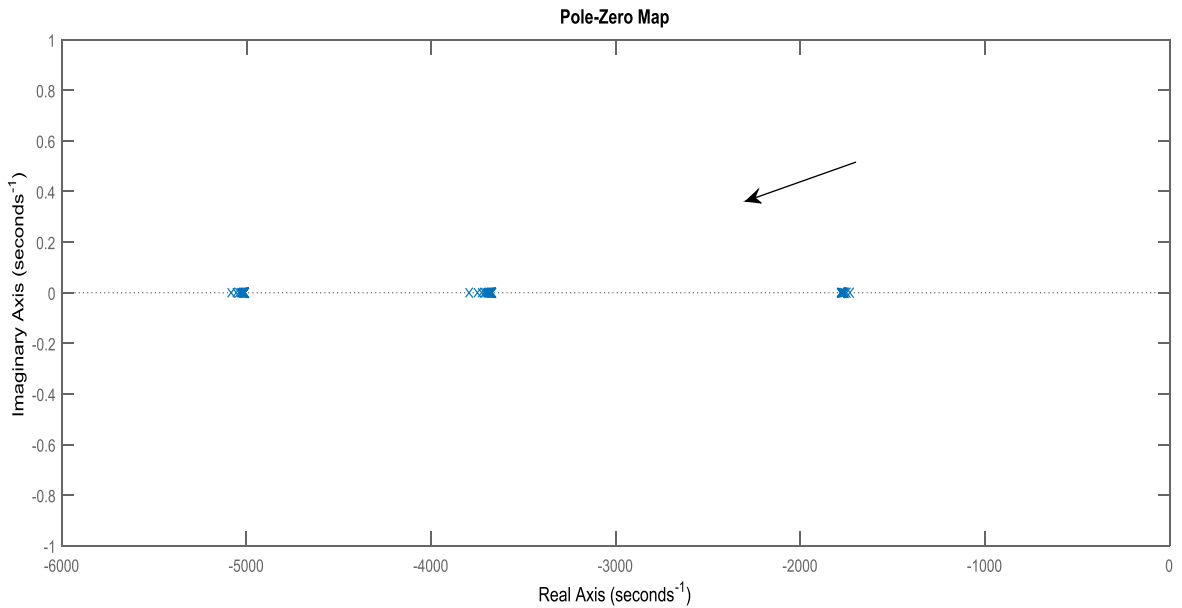
Στη συνέχεια απεικονίζονται τα διαγράμματα πόλων και μηδενικών του συστήματος με μεταβολές των R_{l1} , R_{l2} και ταυτόχρονη μεταβολή R_{l1} και R_{l2} στα σχήματα 3.5, 3.6 και 3.7 αντίστοιχα. Οι τιμές τους κυμαίνονται από 6 Ω μέχρι 120 Ω.



Σχ. 2.5 :Διάγραμμα πόλων και μηδενικών με μεταβολή R_{11} .



Σχ. 2.6 :Διάγραμμα πόλων και μηδενικών με μεταβολή R_{12} .



Σχ.2.7: Διάγραμμα πόλων και μηδενικών με ταυτόχρονη μεταβολή R_{l1} και R_{l2} .

Όμοια με τη μελέτη ευστάθειας του συστήματος μεταβάλλοντας τις R_{d1} και R_{d2} , έτσι και στην παρούσα μελέτη μεταβάλλοντας τα R_{l1} και R_{l2} διαπιστώνουμε ότι το σύστημα κινείται σε όλο και μεγαλύτερη ευστάθεια όσο αυξάνονται τα φορτία.

Τελικά όποια αλλαγή και να γίνει στις αντιστάσεις και τα φορτία το σύστημα που μελετήθηκε θα είναι πάντα ευσταθές. Όμως υπάρχει κίνδυνος, σε λειτουργία οριακής ευστάθειας, όταν συμβεί κάποια μεγάλη διαταραχή, όπως για παράδειγμα η απότομη αύξηση της ζήτησης, η τάση να καταρρεύσει, ή να βρίσκεται εκτός των επιθυμητών ορίων λειτουργίας, κάτι που θα μελετήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

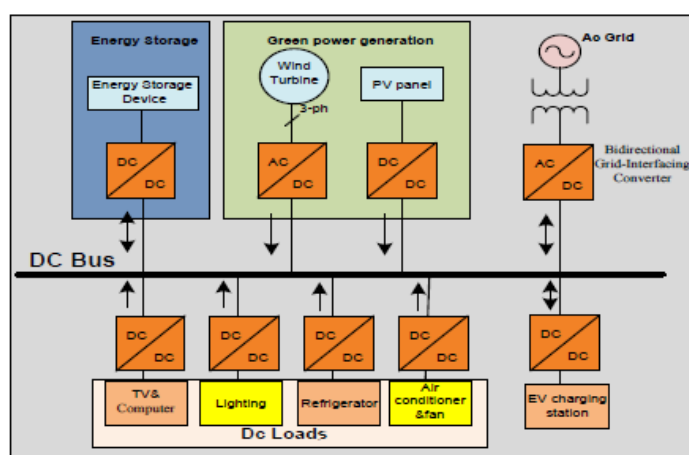
Κεφάλαιο 3^ο : Στρατηγική Ελέγχου.

3.1. Εισαγωγή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, η καταναμημένη παραγωγή, η οποία περιλαμβάνει μικρές μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης, γίνεται όλο και πιο δημοφιλής. Αιτία είναι μία πληθώρα πλεονεκτημάτων όπως οι ελάχιστες απώλειες, η αυξημένη αξιοπιστία, οι μειωμένες πιθανότητες blackout κ.α. Τα μικροδίκτυα περιλαμβάνουν τον έλεγχο και το συντονισμό των μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης της καταναμημένης παραγωγής, ούτως ώστε να διατηρείται ισορροπία ισχύος μεταξύ πηγών και φορτίων.

Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η τυπική δομή ενός μικροδικτύου. Αποτελείται από τις μονάδες παραγωγής, τις μονάδες αποθήκευσης, τα φορτία και τους μετατροπείς τάσης (Voltage –Source Converter- VSC) στα σημεία σύνδεσης με το δίκτυο. Παρακάτω αναφέρονται σημεία τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη για το σχηματισμό του μικροδικτύου:

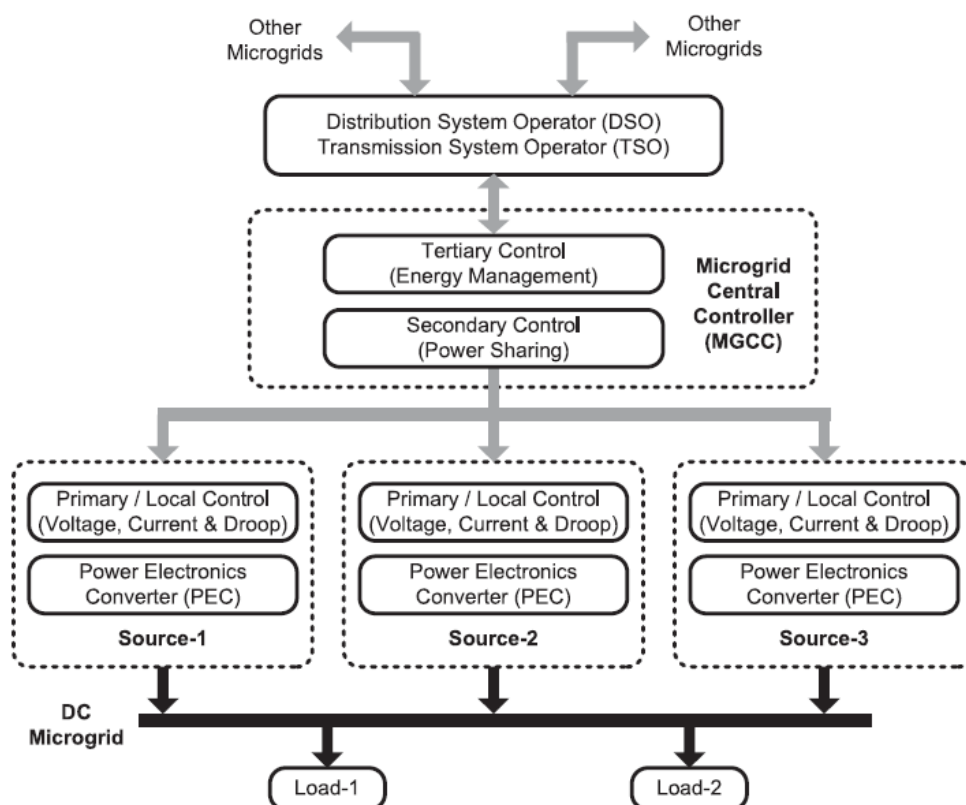
- Η παράλληλη σύνδεση DC πηγών επιφυλάσσει κινδύνους. Κατ' αρχήν απειλείται η ευστάθεια του συστήματος, όπου για την αντιμετώπιση της απειλής αυτής χρειάζεται κατάλληλος σχεδιασμός μετατροπέων. Επιπλέον ο έλεγχος τάσης αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση στη λειτουργία ενός μικροδικτύου, καθώς τα ηλεκτρονικά φορτία επιδεικνύουν μία ευαισθησία στις αποκλίσεις τάσης.
- Ακόμη έλεγχος πρέπει να επιβάλλεται μεταξύ των πηγών και για την κατανομή του φορτίου, καθώς τα φορτία πρέπει να κατανέμονται ισοδύναμα.
- Σε ένα μικροδίκτυο, με παράλληλες μονάδες παραγωγής, η αντίσταση εξόδου της πηγής παίζει σπουδαίο ρόλο στην επίδραση μεταξύ πηγής και φορτίου, γεγονός που θα αναλυθεί διεξοδικά στη συνέχεια.[7].



Εικόνα 3.1 : DC Μικροδίκτυο.[1]

Ο έλεγχος ενός μικροδικτύου διέπεται από ιεραρχία και μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω επίπεδα ιεραρχικού ελέγχου: τον πρωτογενή

έλεγχος(primary), τον δευτερογενή (secondary) και τον τριτογενή(tertiary). Ο τριτογενής έλεγχος, γνωστός και ως σύστημα διαχείρισης ενέργειας, επικοινωνεί με το σύστημα διαχείρισης διανομής(distribution system operator- DSO) ή με το σύστημα διαχείρισης μεταφοράς (transmission system operator –TSO) και με το δευτερογενή έλεγχο. Το DSO/ TSO καθορίζει την ανταλλαγή ισχύος με το μικροδίκτυο. Ο δευτερογενής έλεγχος είναι υπεύθυνος για τις διακυμάνσεις της τάσης και για το συγχρονισμό του μικροδικτύου με το υπόλοιπο δίκτυο σε περίπτωση αποκοπής και επανασύνδεσης. Τέλος, ο πρωτογενής είναι υπεύθυνος για την κατανομή του φορτίου μεταξύ των πηγών. Οι DC/DC μετατροπείς είναι υπεύθυνοι γι' αυτή τη διαδικασία. Οι δύο τελευταίοι έλεγχοι αναλύονται διεξοδικά παρακάτω. Στην εικόνα 3.2 φαίνεται ο ιεραρχικός έλεγχος, όπως διατυπώθηκε παραπάνω, ενός DC μικροδικτύου. [16].



Εικόνα 3.2 : Ιεραρχικός έλεγχος DC μικροδικτύου. [16]

3.2 Πρωτογενής έλεγχος (Primary Control)

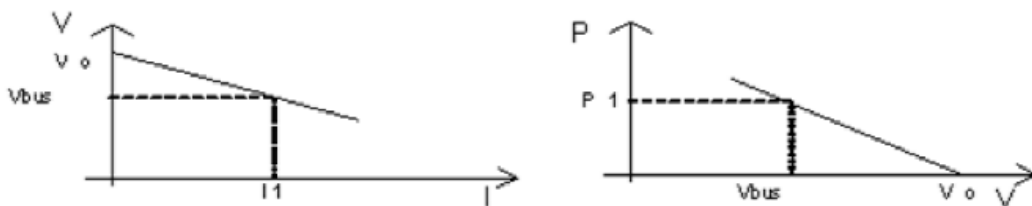
Μπορούμε να διακρίνουμε δύο μεθόδους πρωτογενούς ελέγχου ώστε να έχουμε την κατάλληλη κατανομή ισχύος αλλά και τα επιθυμητά επίπεδα τάσης, την παθητική μέθοδο ελέγχου (passive control method) και την ενεργητική κατανομή φορτίου(active load sharing). Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού αυτών των μεθόδων, κάνοντας χρήση των καλύτερων χαρακτηριστικών και των δύο.

3.2.1. Παθητική Μέθοδος Ελέγχου ή η έννοια του ελέγχου στατισμού (droop control).

Η βασική αρχή που επιτρέπει στις σύγχρονες γεννήτριες να μεταβάλλουν την έξοδό τους, ανάλογα με τη ζήτηση χωρίς επικοινωνία με το υπόλοιπο δίκτυο είναι η τάση και η συχνότητα στα άκρα της μηχανής. Η συχνότητα σχετίζεται με την ενεργό και η τάση με την άεργο ισχύ. Οι γεννήτριες έχουν την ικανότητα να συγχρονίζουν τις παραπάνω έννοιες (συχνότητα – ενεργός ισχύς, τάση- άεργος ισχύς) και όμοια οι μετατροπείς των μονάδων καταναμημένης παραγωγής (DG) ενός AC μικροδικτύου μιμούνται αυτή την ικανότητα.

Όσον αφορά τα DC μικροδίκτυα, είναι φανερό πως διακρίνονται διαφορές σε σχέση με τα AC, καθώς απουσιάζουν η συχνότητα και η άεργος ισχύς και συνεπώς η τάση σχετίζεται ευθέως με τη ενεργό ισχύ. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις (Εικόνα 3.3) υπάρχει γραμμική εξάρτηση μεταξύ τάσης και ρεύματος ή ισχύος και τάσης.

Εφαρμόζοντας τον έλεγχο στατισμού (droop control) δίνεται η δυνατότητα ελέγχου κατανομής φορτίου, χωρίς επικοινωνία ανάμεσα στις πηγές. Όσο αποτελεσματικός κι αν φαίνεται αυτός ο έλεγχος, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί, οι οποίοι οδηγούν σε όχι και τόσο καλό αποτέλεσμα και είναι προς μελέτη ώστε να υπάρξουν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Παρακάτω αναφέρονται αυτοί οι περιορισμοί και σε επόμενη ενότητα μία πρόταση, ούτως ώστε να πετύχουμε ισορροπημένη κατανομή φορτίου και την απαιτούμενη τάση στα άκρα των μετατροπέων.[7]



Εικόνα 3.3 : Γραφική παράσταση V-I και P-V ελέγχου στατισμού σε DC μικροδίκτυο.

3.2.1.1 Κακή ρύθμιση τάσης .

Κατά την εφαρμογή του ελέγχου στατισμού (droop control) γίνεται ένας συμβιβασμός μεταξύ της ρύθμισης της τάσης και της κατανομής του ρεύματος, όταν η τάση ελέγχεται από διάφορους μετατροπείς. Η κατανομή του ρεύματος μπορεί να επηρεαστεί αρκετά από το σφάλμα της DC τάσης, ειδικότερα όταν οι μετατροπείς έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.[7]

Ένα μικρό σφάλμα στις ονομαστικές τάσεις μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα σημαντική απόκλιση από τις απαιτούμενες τιμές στα ρεύματα των πηγών. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί εξαιτίας της μικρής τιμής της αντίστασης στατισμού, όπου χρησιμοποιείται ώστε να περιορίσει την απόκλιση στην τάση του συστήματος (σε συνθήκες υπό φορτίο- κενό φορτίο). Στην εικόνα 3.4 βλέπουμε τις γραφικές

παραστάσεις V-I ενός συστήματος με δύο παράλληλες dc πηγές εφαρμόζοντας μικρή και μεγάλη τιμή στην αντίσταση στατισμού. Στην περίπτωση όπου εφαρμόζουμε μικρή τιμή στην αντίσταση στατισμού, η απόκλιση των ρευμάτων των δύο πηγών($i_1 - i_2$) είναι μεγάλη. Αντίθετα όταν αυξάνεται η τιμή της αντίστασης στατισμού η απόκλιση μειώνεται. Στην δεύτερη περίπτωση, παρ' όλα αυτά, δεν έχουμε σωστή ρύθμιση της τάσης. [16]

Επομένως είναι απαραίτητος ένας συμβιβασμός της ακριβούς ρύθμισης τάσης και της κατανομής του φορτίου, όταν εφαρμόζουμε τον πρωτογενή έλεγχο – έλεγχο στατισμού (droop control). Το πρόβλημα του συμβιβασμού αυτού γίνεται μεγαλύτερο με την εμπλοκή των συσκευών αποθήκευσης που διαθέτει το μικροδίκτυο, καθώς η εξισορρόπηση των αναγκών αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. [7]

3.2.1.2. Κυκλοφορούντα ρεύματα.

Η εφαρμογή του ελέγχου στατισμού μπορεί να δημιουργήσει κυκλοφορούντα ρεύματα στις πηγές κατανεμημένης παραγωγής (DG), όταν οι μετατροπείς αντιμετωπίζονται ως πηγές τάσης. Για να κατασταλούν αυτά τα ρεύματα έχουν εφαρμοστεί δύο μέθοδοι : α) αντίσταση σε σειρά και β) εικονική αντίσταση εξόδου.

Κατά την εφαρμογή της πρώτης μεθόδου μία αντίσταση τοποθετείται σε σειρά με την έξοδο της DG, έτσι ώστε να δημιουργηθεί πτώση τάσης στην έξοδο. Η τιμή της αντίστασης καθορίζεται από ένα ποτενσιόμετρο, έτσι ώστε οι πτώσεις τάσης των παράλληλων DG να είναι σχεδόν πανομοιότυπες. Προφανώς, η μέθοδος αυτή είναι πρακτικά αδύνατη σε πραγματικά συστήματα, καθώς οδηγεί σε μεγάλες απώλειες, όταν η πτώση τάσης στην έξοδο της πηγής είναι μεγάλη.

Η δεύτερη μέθοδος είναι πιο κατάλληλη για τα DC μικροδίκτυα και έχει παρόμοια φιλοσοφία με τη μέθοδο εικονικής αντίστασης των AC μικροδικτύων. Πιο συγκεκριμένα ο έλεγχος στατισμού ενός DC μικροδικτύου βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση :

$$V_j^{ref} = V_j^0 - R_{dj} \times i_j \quad (3.1)$$

Όπου V_j^{ref} είναι η τάση αναφοράς της πηγής j, V_j^0 η τάση κενού φορτίου της j, i_j το ρεύμα εξόδου της πηγής j και τέλος R_{dj} η τιμή της αντίστασης στατισμού. Όπως βλέπουμε και από την εξίσωση (3.1) το ρεύμα εξόδου της πηγής είναι αντιστρόφως ανάλογο με την τιμή της αντίστασης στατισμού. Διεξοδικά θα μελετηθεί παρακάτω το εύρος τιμών της αντίστασης R_{dj} .

Πρακτικά σε ένα μικροδίκτυο τα φορτία βρίσκονται μακριά από την αντίσταση R_d και συνήθως είναι σταθερά φορτία ρεύματος (CPL). Τα CPL, σύμφωνα με έρευνες, επηρεάζουν σημαντικά την ευστάθεια και τη μεταβατική συμπεριφορά ενός συστήματος, ειδικά σε μεγάλης κλίμακας DC συστήματα. Επομένως, αφού υπάρχει σημαντική επιρροή στην ευστάθεια, μεγάλη ανησυχία σχετικά με την ευστάθεια ενός μικροδικτύου παρουσιάζει η συνύπαρξη ελέγχου στατισμού και φορτίων CPL. Επιπλέον πρόβλημα ενδέχεται να δημιουργηθεί κατά τη σύνδεση του DC μικροδικτύου με το AC δίκτυο, καθώς τα CPL σε συνδυασμό με τους ανορθωτές δημιουργούν αρμονικές στη DC σύνδεση. Το απλούστερο φίλτρο που μπορεί να

εφαρμοστεί, ώστε να καταστείλει τις αρμονικές θα μπορούσε να είναι ένας πυκνωτής στο DC δίκτυο.

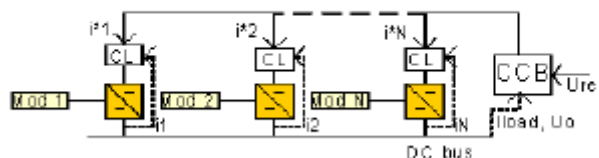
Μία παραλλαγή του ελέγχου στατισμού είναι η μέθοδος VbPV(voltage- based power voltage). Η μέθοδος αυτή παρέχει την κατάλληλη ονομαστική τάση που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία ευαίσθητων φορτίων, ανεξάρτητα από το μέγεθος και την κατασκευή του μικροδικτύου. Ακόμη διατηρεί την πτώση τάσης στα επιθυμητά επίπεδα και καταστέλλει τα κυκλοφορούντα ρεύματα.[7]

3.2.2 . Ενεργητική μέθοδος ελέγχου.

Η ενεργητική μέθοδος ελέγχου μπορεί να ταξινομηθεί σε τέσσερις κατηγορίες, μελετώντας ένα σύστημα παράλληλων DC-DC μετατροπέων. Οι κατηγορίες είναι α) κεντρικός έλεγχος, β) master- slave control (MS), γ) average load sharing και δ) circular chain control (3C). Όλες οι παραπάνω κατηγορίες ξεπερνούν τους περιορισμούς που επιβάλλει η παθητική μέθοδος ελέγχου μέσω της επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων. Παρακάτω περιγράφονται πιο αναλυτικά οι κατηγορίες.

i. Κεντρικός έλεγχος:

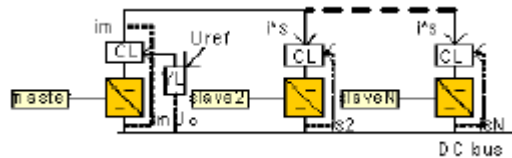
Κατά την εφαρμογή του κεντρικού ελέγχου υπάρχει ένας κεντρικός πίνακας ελέγχου (CCB) , ο οποίος θέτει τις τιμές αναφοράς των ρευμάτων κάθε μονάδας. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής: στο φορτίο κάθε μονάδας(οι μονάδες συνδέονται παράλληλα) μετρίεται το ρεύμα, η τιμή αυτή στέλνεται στον CCB και διαιρείται με τον αριθμό των μονάδων διαμορφώνοντας έτσι την τιμή αναφοράς κάθε μονάδας. Στη συνέχεια γίνεται επεξεργασία του σφάλματος μέσω ενός βρόχου ελέγχου (control loop- CL) . Ένας εξωτερικός βρόχος του κεντρικού ελέγχου ρυθμίζει την τάση. Αυτού του είδους ο έλεγχος περιορίζεται σε μικρά συστήματα διότι εκτός του κεντρικού ελέγχου, είναι απαραίτητο να γίνεται μέτρηση του συνολικού ρεύματος φορτίου, κάτι που στα μεγάλα δίκτυα δεν είναι εφικτό. Στην εικόνα 3.4 απεικονίζεται ο κεντρικός έλεγχος.



Εικόνα 3.3. Κεντρικός έλεγχος

ii. Έλεγχος master- slave.

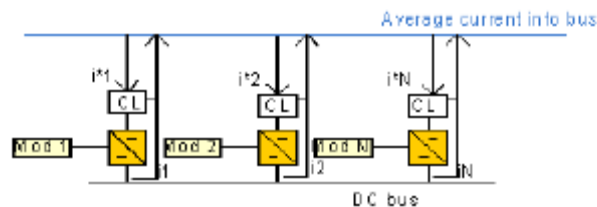
Στον έλεγχο αυτό υπάρχει ένας μετατροπέας (master), ο οποίος ρυθμίζει την τάση και θέτει τις τιμές αναφοράς των ρευμάτων των υπόλοιπων μετατροπέων (slaves). Δηλαδή ο ένας μετατροπέας – master είναι σε λειτουργία ελέγχου τάσης και οι υπόλοιποι μετατροπείς – slaves σε λειτουργία ελέγχου ρεύματος. Βασικό μειονέκτημα του ελέγχου είναι ότι υπάρχει ένα μοναδικό σημείο αποτυχίας και η ύπαρξη ενός και μόνο επιβλέποντος μετατροπέα. Ακόμη είναι δύσκολο να επεκταθεί σε συστήματα τα οποία δεν πληρούν “plug and play” λειτουργίες. Στην εικόνα 3.4 απεικονίζεται ο έλεγχος master- slave.[21]



Εικόνα 3.4. Έλεγχος master- slave.

iii. Average load sharing.

Οι μονάδες του μικροδικτύου συνδέονται σε ένα καλώδιο, στο οποίο υπάρχει η πληροφορία του μέσου όρου των ρευμάτων των φορτίων που έχει υπολογιστεί μέσω μίας αντίστασης, η οποία είναι συνδεδεμένη με τον αισθητήρα ρεύματος κάθε μονάδας. Ακόμη, ρυθμίζοντας την αντίσταση στην κατάλληλη τιμή, τοποθετούμε παράλληλα τους μετατροπείς, οι οποίοι διαφέρουν στην ονομαστική τους ισχύ, καταστέλλοντας τα κυκλοφορούντα ρεύματα. Ο μέσος όρος ρεύματος όλων των μονάδων αποτελεί την τιμή αναφοράς για κάθε μία μονάδα. Αυτή η μέθοδος είναι πιο αξιόπιστη συγκριτικά με τη μέθοδο master-slave. Στην επόμενη εικόνα (3.5) βλέπουμε την εφαρμογή του παραπάνω ελέγχου.



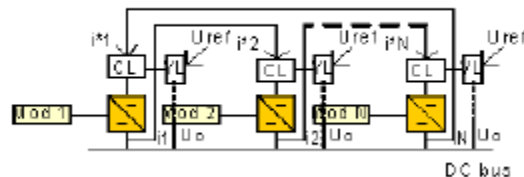
Εικόνα 3.5. Average load sharing.

iv. Circular chain control.

Στον έλεγχο αυτό η αναφορά ρεύματος κάθε μονάδας, είναι η τιμή του

ρεύματος της προηγούμενης μονάδας, δημιουργώντας έτσι μία «κυκλική αλυσίδα- circular chain». Όσον αφορά την τιμή αναφοράς της πρώτης μονάδας, είναι αυτή του ρεύματος της τελευταίας, έτσι ώστε να δημιουργηθεί και η κυκλική αλυσίδα. Μία παραλλαγή αυτού του ελέγχου είναι ο περιορισμός ελέγχου ρεύματος. Η περίπτωση αυτού του ελέγχου είναι ένας συνδυασμός master- slave ελέγχου και circular chain ελέγχου. Η τάση ελέγχεται από μια κεντρική μονάδα (master) και οι υπόλοιπες μονάδες ελέγχουν το ρεύμα (slaves). Η κυκλική αλυσίδα εμφανίζεται στις μονάδες που ελέγχουν το ρεύμα, ενώ η μονάδα master εξαιρείται από αυτή. Δηλαδή στις μονάδες slave η αναφορά παράγεται από τις προηγούμενες μονάδες. Αξιοσημείωτο αποτελεί το γεγονός ότι όλες οι μονάδες μπορούν να πάρουν το ρόλο της κεντρικής μονάδας-master. [7]

Στην εικόνα 3.6 βλέπουμε τον έλεγχο της κυκλικής αλυσίδας.



Εικόνα 3.5. Έλεγχος circular chain.

3.3 Δευτερογενής έλεγχος (secondary control).

Ο στόχος του δευτερογενή ελέγχου είναι να εξασφαλίσει ότι η ισχύς που παρέχεται από τις διάφορες πηγές είναι ανάλογη αυτής που έχει προγραμματιστεί από τον τριτογενή έλεγχο. Στην ουσία ο δευτερογενής και ο τριτογενής έλεγχος αποτελούν τον κεντρικό έλεγχο του μικροδικτύου. Ο δευτερογενής έλεγχος, σε ορισμένες εφαρμογές, θέτει τις παραμέτρους για τον πρωτογενή έλεγχο (droop), έτσι ώστε οι αποκλίσεις που δημιουργούνται από τον πρωτογενή να αποκαθίστανται και το dc μικροδίκτυο να διατηρεί την τάση σε αποδεκτές τιμές. Με λίγα λόγια, ο δευτερογενής έλεγχος είναι αυτός, που λαμβάνοντας υπόψη την τάση αναφοράς, η οποία έχει παραχθεί από τον πρωτογενή έλεγχο, επενεργεί ώστε η τάση εξόδου των μετατροπέων να είναι εντός των επιθυμητών τιμών, δηλαδή ίση με την τάση αναφοράς. [16]

3.4. Τριτογενής έλεγχος- σύστημα διαχείρισης ενέργειας (tertiary control- energy management system).

Το αντικείμενο του συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι να διατηρεί ισορροπία ισχύος μεταξύ των πηγών, των φορτίων και των συσκευών αποθήκευσης για κάθε χρονική στιγμή, κάτι που φαίνεται από τη σταθερή τάση του dc ζυγού. Έτσι λοιπόν υποδεικνύει σε ποιιά λειτουργία, διασυνδεδεμένο ή όχι στο δίκτυο, θα δουλέψει το μικροδίκτυο ώστε να αποδίδει τη βέλτιστη απόδοση. Όταν το

μικροδίκτυο συνδέεται στο κεντρικό δίκτυο υπάρχει η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας του πρώτου από το δεύτερο αν αυξηθεί η ζήτηση. Αντίστοιχα, όταν υπάρχει πλεονάζουσα ισχύς μπορεί να αποδοθεί στο κεντρικό δίκτυο.[16]

3.5. Κατηγοριοποίηση ελέγχου.

Συνήθως τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας βασίζονται στον ιεραρχικό έλεγχο. Ο έλεγχος χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με το πως εφαρμόζεται ο δευτερογενής έλεγχος. Οι κατηγορίες είναι :

- i. Κεντρικός έλεγχος: Στη μέθοδο αυτή, υπάρχει ένας κεντρικός ελεγκτής, ο οποίος βελτιώνει την τάση, που αποκλίνει από την επιθυμητή τιμή εξαιτίας του πρωτογενούς ελέγχου. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εξισορρόπηση ισχύος μεταξύ πηγών και φορτίων του dc μικροδικτύου. Η μέθοδος αυτή μπορεί να έχει εξαιρετικά αποτελέσματα, απαιτεί όμως επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο.
- ii. Αποκεντρωμένος έλεγχος: Στη μέθοδο αυτή όλες οι λειτουργίες εκτελούνται χωρίς επικοινωνία.
- iii. Υβριδικός έλεγχος: Σ' αυτή την περίπτωση ο έλεγχος παίρνει στοιχεία από τις δύο προηγούμενες μεθόδους στα διάφορα επίπεδα, ώστε να έχει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

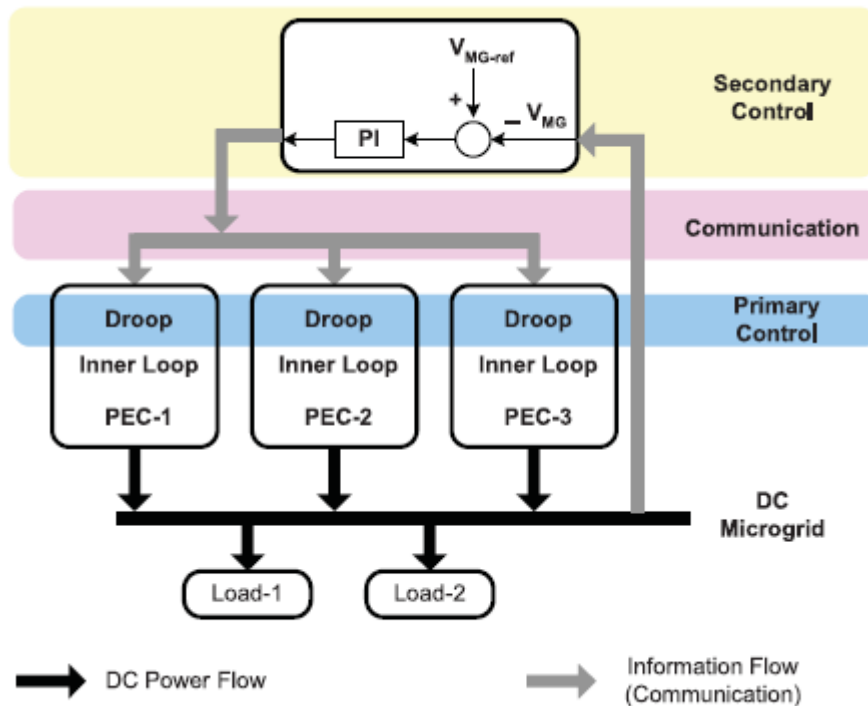


Εικόνα 3.6 : Ιεραρχικός έλεγχος.

3.6 Αρχιτεκτονικές ελέγχου.

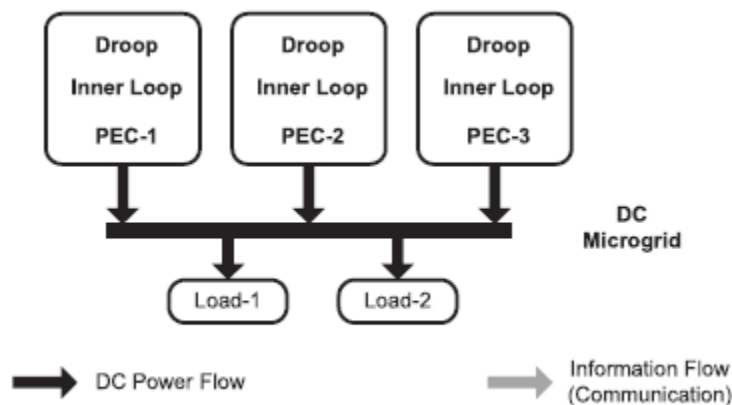
Στην ενότητα αυτή αναφέρονται κάποια παραδείγματα αρχιτεκτονικών ελέγχου. Το πρώτο παράδειγμα αφορά στον *κεντρικό έλεγχο*. Η αρχιτεκτονική ενός τέτοιου ελέγχου απεικονίζεται παρακάτω, εικόνα 3.7. Όπως βλέπουμε κάθε πηγή (PEC source) περιλαμβάνει τον πρωτογενή έλεγχο (droop control) και έναν εσωτερικό βρόχο (inner loop), που ελέγχει τάση και ρεύμα. Ο δευτερογενής έλεγχος

είναι κεντρικός και είναι υπεύθυνος για τους πρωτογενείς ελεγκτές. Ο δευτερογενής έλεγχος θέτει τις παραμέτρους του πρωτογενούς (droop) για την κάθε πηγή. Η τάση του μικροδικτύου συγκρίνεται με την τιμή αναφοράς και το σφάλμα εισέρχεται σε έναν PI ελεγκτή. Η έξοδος του PI ελεγκτή επικοινωνεί με τον πρωτογενή έλεγχο όλων των πηγών. Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει τη ρύθμιση χαμηλής τάσης. Επιπλέον κατά τον πρωτογενή έλεγχο, η δυσλειτουργία μίας πηγής δεν επηρεάζει τις υπόλοιπες. Ωστόσο σε περίπτωση αποτυχίας του δευτερογενούς ελέγχου, το σύστημα μπορεί να μην είναι σε θέση να διασφαλίσει τη ρύθμιση χαμηλής τάσης. [16]



Εικόνα 3.7 : αρχιτεκτονική κεντρικού ελέγχου.[16]

Στη συνέχεια αναλύεται το παράδειγμα *ελέγχου χωρίς επικοινωνία*. Ο έλεγχος χωρίς επικοινωνία περιλαμβάνει τον πρωτογενή έλεγχο (droop) , αλλά όχι τον δευτερογενή(εικόνα 3.8).



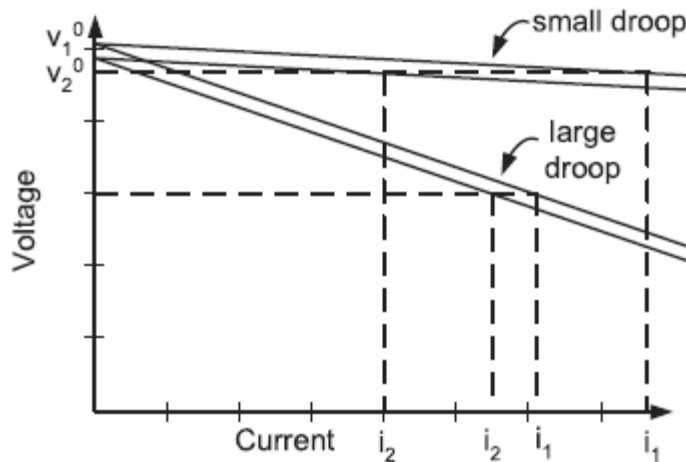
Εικόνα 3.8 :Έλεγχος χωρίς επικοινωνία [16]

Όσον αφορά τα dc συστήματα η σχέση που συνδέει την τάση και το ρεύμα, κατά την εφαρμογή του ελέγχου στατισμού είναι :

$$V_j^{ref} = V_j^0 - R_{dj} \times i_j \quad (3.1)$$

όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Καθώς ο δευτερογενής έλεγχος απουσιάζει, οι παράμετροι του πρωτογενούς (έλεγχος στατισμού – droop control) θέτονται έτσι ώστε η τάση του συστήματος να διατηρείται εντός των επιθυμητών τιμών. Στην περίπτωση του ελέγχου αυτού (χωρίς επικοινωνία) εφαρμόζεται μικρή τιμή της R_{dj} ώστε να διατηρείται η τάση σε χαμηλά επίπεδα. Πλεονέκτημα του ελέγχου αυτού αποτελεί το ότι εφαρμόζεται έλεγχος σε κάθε πηγή χωριστά-ατομικά. Όμως δεν γίνεται σωστή κατανομή ισχύος, συγκριτικά με την προηγούμενη μέθοδο- μέθοδος κεντρικού ελέγχου. Δύο είναι οι αιτίες του σφάλματος στην κατανομή ισχύος για την παραπάνω μέθοδο:

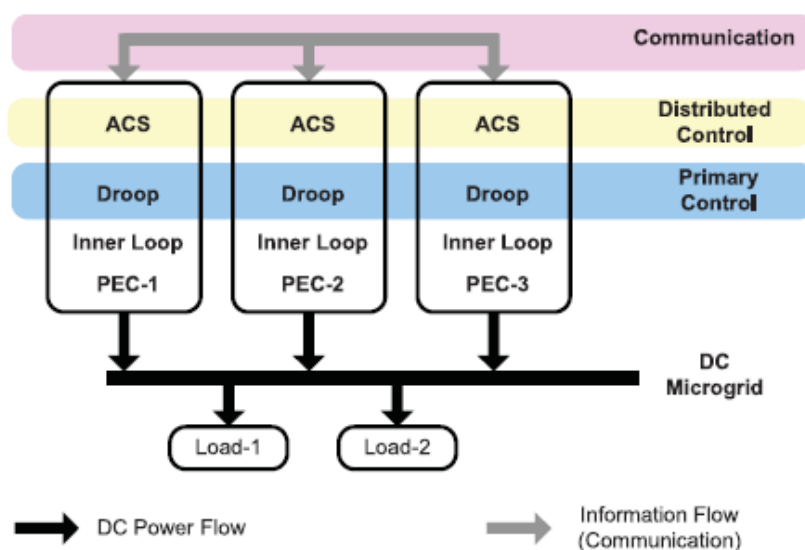
1. *Άνισες Ονομαστικές Τάσεις:* Εξαιτίας κάποιων περιορισμών στην εφαρμογή των πρωτογενών ελεγκτών, οι ονομαστικές τάσεις των διαφόρων πηγών (PEC sources) δεν είναι ακριβώς ίσες. Συνήθως αυτό οφείλεται σε κάποιο σφάλμα κατά την ανίχνευση της τάσης κατά τη λειτουργία κλειστού βρόχου. Ένα μικρό σφάλμα στις ονομαστικές τάσεις έχει σημαντική απόκλιση στα ρεύματα των πηγών από τις απαιτούμενες τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι η τιμή της R_{dj} είναι μικρή ούτως ώστε να περιοριστεί η διακύμανση της τάσης μεταξύ του κενού και του πλήρους φορτίου. Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 3.9) απεικονίζεται η γραφική παράσταση V-I δύο παράλληλα συνδεδεμένων πηγών. Το αποτέλεσμα είναι η άνιση κατανομή φορτίου εξαιτίας του μικρού σφάλματος στις ονομαστικές τάσεις. Στην περίπτωση όπου η τιμή της R_{dj} είναι μικρή η απόκλιση των ρευμάτων των πηγών (i_1-i_2) είναι μεγάλη, ενώ όταν η R_{dj} αυξάνεται η παραπάνω διαφορά μειώνεται. Ωστόσο στην περίπτωση αυτή η ρύθμιση της τάσης αυξάνεται και φτάνει σε μη αποδεκτές τιμές από τα φορτία.
2. *Κατανομή φορτίου :* Εξετάζοντας πάλι ένα dc μικροδίκτυο με δύο παράλληλες πηγές, διαπιστώνουμε ότι οι τάσεις στους δύο κόμβους ποικίλουν ανάλογα με τη ροή ισχύος στο καλώδιο διασύνδεσης. Δηλαδή η τάση σε κάθε κόμβο εξαρτάται από την κατανομή φορτίου όλου του δικτύου. Εξαιτίας της αντίστασης της στατισμού R_{dj} το ρεύμα της κάθε πηγής εξαρτάται από την τάση του κόμβου και συνεπώς εξαρτάται από την κατανομή φορτίου, λόγω του καλωδίου διασύνδεσης. Η απόκλιση, που μπορεί να προκύψει στα ρεύματα των πηγών μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας την τιμή της αντίστασης στατισμού, έχοντας όμως συνέπειες στη διακύμανση της τάσης. [16]



Εικόνα 3.9: Άνιση κατανομή φορτίου εξαιτίας σφάλματος στις ονομαστικές τάσεις.[16]

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή αυτού του είδους έλεγχου, δηλαδή πρωτογενής έλεγχος (έλεγχος στατισμού- droop control), χωρίς επικοινωνία δεν είναι αποτελεσματική σε ένα dc μικροδίκτυο χαμηλής τάσης εξαιτίας των άνισων ονομαστικών τάσεων και την κατανομή φορτίου. Εφαρμόζοντας χαμηλή τιμή στην αντίσταση στατισμού δημιουργείται πρόβλημα στην κατανομή φορτίου, ενώ για μεγαλύτερη τιμή υπάρχει μεγάλη απόκλιση στις ονομαστικές τάσεις των δύο μικροπηγών.

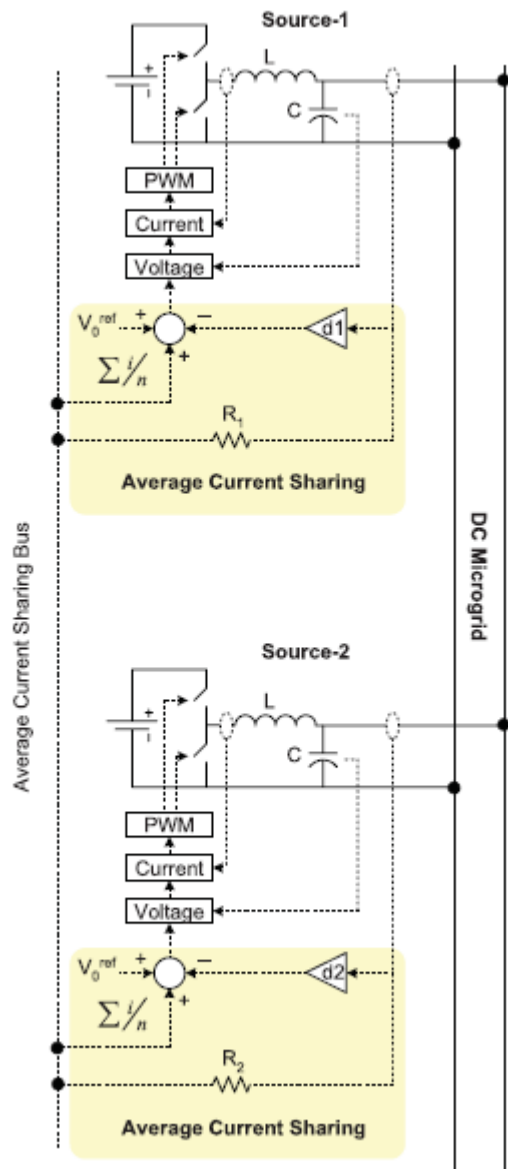
Το επόμενο παράδειγμα ελέγχου που είναι υπό μελέτη είναι ο *κατανεμημένος έλεγχος* παράλληλων DC-DC μετατροπέων. Κατά τη διαδικασία αυτού του είδους ελέγχου γίνεται υπολογισμός και χρήση του μέσου όρου ρεύματος καταμερισμού (ACS- average current sharing), όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10 : Κατανεμημένος έλεγχος dc μικροδικτύου.[16]

Βλέπουμε πως εκτός από τον δευτερογενή έλεγχο, εδώ ενσωματώνεται και ο καταναμημένος έλεγχος (distributed control) σε κάθε πηγή (PEC source). Ο καταναμημένος έλεγχος διαθέτει ελεγκτές, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός κοινού ζυγού. Η διάταξη του ελέγχου ACS απεικονίζεται παρακάτω (εικόνα 3.11). Η διαφορά της τάσης αναφοράς και της R_{d1} (αντίσταση στατισμού) αποτελούν τον πρωτογενή έλεγχο. Εδώ έρχεται να προστεθεί ο μέσος όρος των ρευμάτων. Ο μέσος όρος υπολογίζεται μετρώντας το ρεύμα κάθε πηγής και μετασχηματίζοντάς το σε σήμα τάσης. Έπειτα το σήμα αυτό προωθείται στο ζυγό ACS μέσω μίας αντίστασης R_1 . Ο έλεγχος αυτός έχει τα πλεονεκτήματα της ισοκατανομής φορτίου μεταξύ των πηγών και τη χαμηλή ρύθμιση τάσης στο σύστημα παράλληλων dc-dc μετατροπών. Σε ένα dc μικροδίκτυο οι πηγές είναι καταναμημένες σε μία περιοχή. Ο ζυγός ACS κατανέμεται εντός της περιοχής αυτής μαζί με τις γραμμές ισχύος. Οι γραμμές ενδέχεται να δημιουργήσουν θόρυβο στο ζυγό. Επομένως ο καταναμημένος έλεγχος δεν είναι κατάλληλος για dc μικροδίκτυα.

Συνοψίζοντας, γίνεται σύγκριση των παραπάνω αρχιτεκτονικών ελέγχου σε dc μικροδίκτυα. Ο κεντρικός έλεγχος προσφέρει ακριβή ρύθμιση τάσης αλλά έχει περιορισμένη αξιοπιστία λόγω των επικοινωνιών. Ο έλεγχος χωρίς επικοινωνία έχει τη δυνατότητα εφαρμογής σε κάθε πηγή χωριστά, όμως δεν αποδίδει στον καταμερισμό φορτίου. Ο καταναμημένος έλεγχος προσφέρει σωστή ρύθμιση τάσης και κατανομή φορτίου. Επιπλέον μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε πηγή χωριστά, συγκριτικά με τον κεντρικό έλεγχο.



Εικόνα 3.11 : Διάταξη ελέγχου ACS

3.7 Προτεινόμενη διάταξη ελέγχου dc μικροδικτύου.

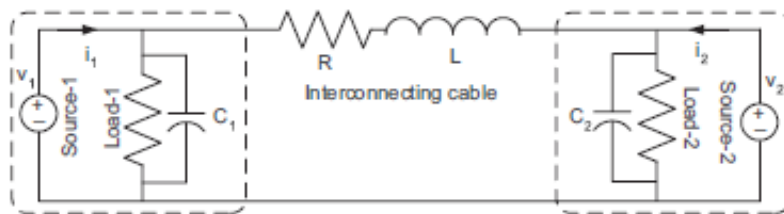
Όπως έχει προαναφερθεί η χαμηλή τιμή της αντίστασης στατισμού εξασφαλίζει τη σωστή ρύθμιση τάσης, κατά την εφαρμογή πρωτογενούς ελέγχου (droop-χωρίς επικοινωνία). Όμως τα ρεύματα των πηγών αποκλίνουν σημαντικά από τις επιθυμητές τιμές κι έτσι δεν είναι εφικτή η ισόποση κατανομή φορτίου. Αιτίες αυτού του γεγονότος, όπως προαναφέραμε, είναι οι άνισες ονομαστικές τάσεις και η κατανομή φορτίου. Αυξάνοντας την τιμή της αντίστασης του ελέγχου στατισμού αρκετά πάνω από την τιμή της αντίστασης του καλωδίου βελτιώνεται η κατανομή του φορτίου, όμως η τάση του συστήματος διαφέρει μεταξύ των λειτουργιών κενού και πλήρους φορτίου.

Για να βελτιωθεί αυτή η διακύμανση της τάσης προσθέτουμε τον όρο ΔV_j^0 στην εξίσωση 3.1, δηλαδή γίνεται:

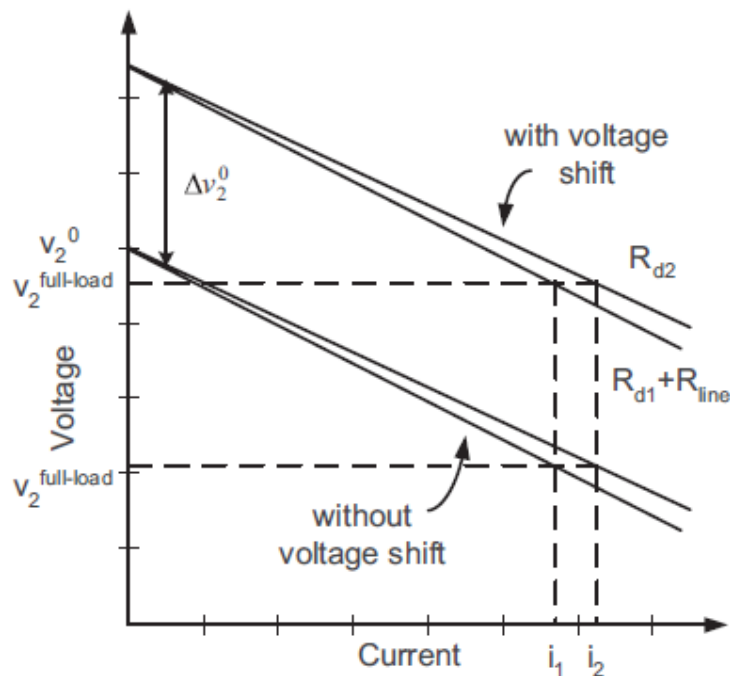
$$V_j^{ref} = V_j^0 + \Delta V_j^0 - R_{dj} \times i_j \quad (3.2)$$

Η χαρακτηριστική V-I μεταβάλλεται κατά μήκος του άξονα της τάσης, αφού προστίθεται ο όρος ΔV_j^0 . Η μετατόπιση της τάσης εξαρτάται από το συνολικό φορτίο του συστήματος. Με την αύξηση του φορτίου, αυξάνεται η μετατόπιση, δηλαδή ο όρος ΔV_j^0 , καθιστώντας τη στιγμιαία τάση αναφοράς V_j^{ref} κοντά στην ονομαστική V_j^0 .

Για το απλοποιημένο dc μικροδίκτυο που απεικονίζεται παρακάτω (εικόνα 3.11), οι χαρακτηριστικές V-I και των δύο πηγών μετατοπίζονται. Στην εικόνα 3.12 φαίνονται οι χαρακτηριστικές του πρώτου φορτίου πριν και μετά τη μετατόπιση. Παρατηρούμε ότι αν και η τιμή της αντίστασης ελέγχου στατισμού (droop) είναι μεγάλη (αρκετά μεγαλύτερη από την αντίσταση καλωδίου), ώστε να εξασφαλιστεί η ισόποση κατανομή φορτίου, η τάση είναι κοντά στην ονομαστική τιμή.



3.11 : DC μικροδίκτυο.



Εικόνα 3.12 : Χαρακτηριστική V-I με μετατόπιση τάσης (ΔV_j^0).

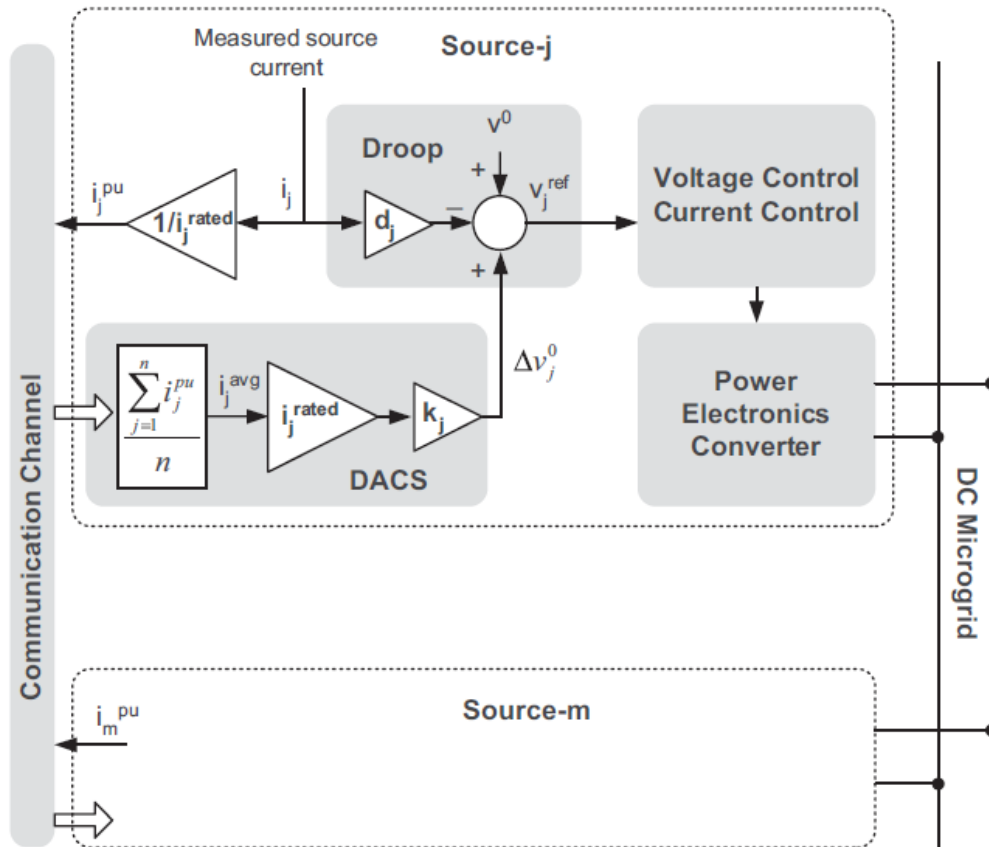
Για να καθοριστεί η τιμή της μετατόπισης, ΔV_j^0 , εφαρμόζεται μία επικοινωνία μικρού εύρους. Ο ελεγκτής κάθε πηγής επικοινωνεί με τους ελεγκτές των υπόλοιπων πηγών και στέλνει την τιμή του ρεύματος (ανά μονάδα) που παρέχεται από την πηγή. Χρησιμοποιώντας αυτή την πληροφορία ο ελεγκτής κάθε πηγής υπολογίζει το μέσο όρο των ρευμάτων ως εξής :

$$i_j^{avg} = \frac{\sum_{m=1}^n i_m}{n} \quad (3.3)$$

όπου i_m είναι το ρεύμα κάθε πηγής ανά μονάδα. Έπειτα υπολογίζεται η μετατόπιση κάθε πηγής σύμφωνα με τον τύπο :

$$\Delta V_j^0 = k_j i_j^{avg} i_j^{rated} \quad (3.4)$$

Όπου k_j είναι ο συντελεστής μετατόπισης και i_j^{rated} το ονομαστικό ρεύμα της j -πηγής. Όταν γίνεται αλλαγή φορτίου, η απαιτούμενη ισχύς εξακολουθεί να κατανέμεται και από τις δύο πηγές, δηλαδή η ζήτηση μοιράζεται στις πηγές, εξαιτίας της μεγάλης τιμής της αντίστασης στατισμού. Στιγμιαία η τάση του συστήματος, όπως δίνεται από την 3.2 μπορεί να αποκλίνει από την ονομαστική τιμή εξαιτίας της αλλαγής στο ρεύμα της πηγής. Η τιμή της τάσης αποκαθίσταται όταν υπάρξει επικοινωνία μεταξύ των πηγών, στέλνοντας τις τιμές των ρευμάτων και υπολογίζοντας τη μετατόπιση της τάσης, ΔV_j^0 . Ο έλεγχος της μετατόπισης ορίζεται ως “digital average current sharing” (DACS). Το διάγραμμα ελέγχου, το οποίο περιλαμβάνει και τον έλεγχο στατισμού αλλά και τη μετατόπιση (DACS) απεικονίζεται παρακάτω (εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.11 : Έλεγχος με εφαρμογή αντίστασης στατισμού και μετατόπισης τάσης

1. Επιλογή του R_{dj} .

Οι αποκλίσεις των ρευμάτων των πηγών από τις ιδανικές τιμές, εξαιτίας του σφάλματος στις ονομαστικές τιμές και της κατανομής φορτίου, δίνεται από την εξίσωση:

$$(M^T R^{-1} M D + E_{n \times n}) \Delta I = M^T R^{-1} M V^0 + \Delta I_L \quad (3.5)$$

Όπου M η μήτρα πρόσπτωσης του δικτύου, R η μήτρα της αντίστασης, D η μήτρα της αντίστασης στατισμού και $E_{n \times n}$ η ταυτοτική μήτρα. Τα διανύσματα V^0 και ΔI_L εκφράζουν την ονομαστική τάση και την απόκλιση του ρεύματος στο φορτίο αντίστοιχα. Το ΔI εκφράζει την συνολική απόκλιση του ρεύματος της πηγής από την ιδανική τιμή.

Όπως έχει προαναφερθεί, η εφαρμογή μεγάλης τιμής της αντίστασης στατισμού είναι απαραίτητη, ώστε να εξαιρεθούν οι αποκλίσεις των ρευμάτων της πηγής. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη απόκλιση της τάσης, το οποίο αντιμετωπίζεται με την κατάλληλη μετατόπιση τάσης, δηλαδή γίνεται κατάλληλη επιλογή του συντελεστή k_j .

2. Επιλογή του συντελεστή k_j .

Η τιμή του συντελεστή k_j καθορίζεται βάσει των παρακάτω κριτηρίων:

- Η τιμή της μετατόπισης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή του αποτελέσματος $R_{d_j} i_j$. Αυτό εξασφαλίζει την αντιστάθμιση της πτώσης τάσης εξαιτίας της αντίστασης στατισμού, με την κατάλληλη μετατόπιση της ονομαστικής τιμής. Επομένως η τάση λειτουργίας πλησιάζει την ονομαστική τάση του συστήματος.

- Η χαρακτηριστική V-I του ελέγχου στατισμού όλων των πηγών θα πρέπει να μετατοπίζεται ομοίως, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται ότι η μετατόπιση δεν επηρεάζει την κατανομή φορτίου. Ως εκ τούτου το γινόμενο του συντελεστή k_j με το ονομαστικό ρεύμα πρέπει να είσαι ίσο μεταξύ όλων των πηγών :

$$k_1 i_1^{rated} = \dots = k_j i_j^{rated} = \dots = k_n i_n^{rated} \quad (3.6)$$

- Όταν μόνο μία πηγή λειτουργεί, τότε ο μέσος όρος των ρευμάτων ισούται με το ρεύμα της πηγής, δηλαδή $i_j^{avg} = i_j^{pu}$. Αντικαθιστώντας τη σχέση αυτή στην εξίσωση 3.4, βλέπουμε πως η μετατόπιση Δv_j^0 ισούται με το γινόμενο $k_j i_j$. Επομένως η εξίσωση 3.2 γίνεται :

$$v_j^{ref} = v_j^0 - (d_j - k_j) i_j \quad (3.7)$$

Στη μόνιμη κατάσταση, η διαφορά $(d_j - k_j)$ πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός. Επομένως ο συντελεστής k_j πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος του d_j . Δηλαδή

$$k_j \leq d_j, \forall 1 \leq j \leq n \quad (3.8)$$

Κεφάλαιο 4^ο : Διεξαγωγή αποτελεσμάτων.

4.1 Εισαγωγή.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε. Αρχικά θα γίνει μία σύντομη περιγραφή κάποιων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του dc μικροδικτύου στο Simulink / MATLAB. Αυτά είναι ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης και ο PI ελεγκτής.

Στη συνέχεια(ενότητα 4.5) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του ελέγχου του μικροδικτύου. Στην ενότητα 4.5.1 γίνεται μία παρουσίαση του ελέγχου που επιβάλλεται σε ένα dc μικροδίκτυο που αποτελείται από δύο παράλληλες πηγές και δύο ίσα φορτία. Έπειτα στην ενότητα 4.5.2 τα φορτία των πηγών μεταβάλλονται σε διάφορες χρονικές στιγμές. Παρουσιάζεται η προσομοίωση του πρωτογενούς και δευτερογενούς ελέγχου, που σωστά έχει επιβληθεί και καταφέρνει να διατηρήσει την τάση στα επιθυμητά επίπεδα και να κατανέμει το φορτίο κατά τον ίδιο τρόπο στις δύο πηγές.

Τέλος στην ενότητα 4.5.3 γίνεται προσομοίωση του ελέγχου στην οριακή ευστάθεια του μικροδικτύου και με επιβολή πολύ μεγάλου φορτίου.

4.2 DC-DC μετατροπείς (converters).

Οι dc-dc μετατροπείς χρησιμοποιούνται ώστε να μετατρέπουν την τάση εισόδου ενός συστήματος, η οποία μπορεί να πάρει ανεξέλεγκτες τιμές, σε τάση με συγκεκριμένη, ελεγχόμενη τιμή. Συναντάμε πέντε είδη μετατροπέων :

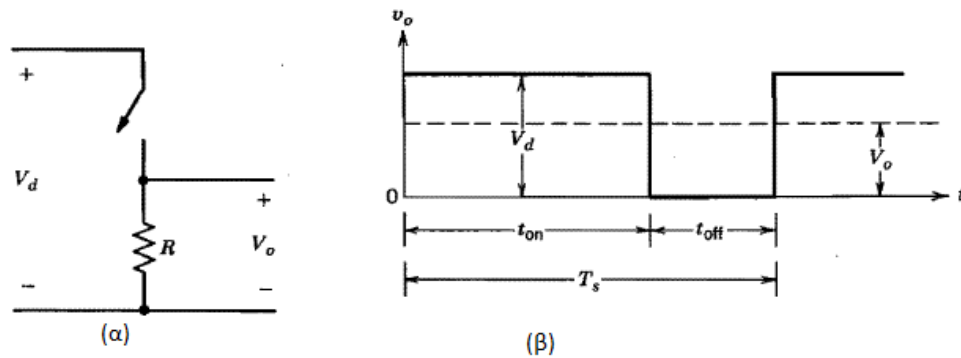
- ✓ Step-down (buck) converter (μετατροπέας υποβιβασμού).
- ✓ Step- up (boost) converter(μετατροπέας ανύψωσης).
- ✓ Step-down/step-up(buck/boost) converter.
- ✓ Cuk converter.
- ✓ Full-bridge converter.

4.2.1 Έλεγχος dc-dc μετατροπέων.

Στους dc- dc μετατροπείς, η μέση τάση εξόδου πρέπει να ελέγχεται ώστε να ισούται με την επιθυμητή τιμή. Η διακοπτική λειτουργία των μετατροπέων εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας έναν ή περισσότερους διακόπτες, ώστε να μεταφερθεί η τάση από το ένα επίπεδο στο άλλο. Σε έναν dc-dc μετατροπέα, με μία δεδομένη τάση εισόδου, η τάση εξόδου μπορεί να ελεγχθεί, αν ελέγξουμε τους χρόνους αγωγής και σβέσης του διακόπτη , δηλαδή τους χρόνους t_{on} και t_{off} αντίστοιχα. Με σκοπό να γίνει πιο κατανοητή η διακοπτική λειτουργία, ας θεωρήσουμε έναν μετατροπέα όπως αυτός απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4.1(α)). Η μέση τάση V_0 της τάσης εξόδου v_0 εξαρτάται από τους χρόνους t_{on} και t_{off} . Μία από τις μεθόδους ελέγχου της τάσης εξόδου συμπεριλαμβάνει τη διακοπτική λειτουργία σε μία σταθερή συχνότητα (ως εκ τούτου σταθερή περίοδο διακοπής $T_s = t_{on} + t_{off}$) και ρυθμίζει τη διάρκεια, όπου ο διακόπτης παραμένει

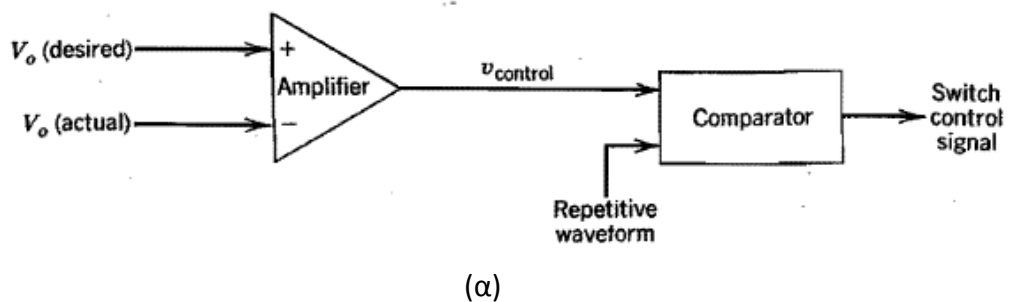
κλειστός (on), ώστε να γίνεται έλεγχος στη μέση τάση εξόδου. Σε αυτή τη μέθοδο, η οποία ονομάζεται *διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)*, συναντάμε τον όρο $D = \frac{t_{on}}{T_s}$, δηλαδή ο λόγος του χρόνου αγωγής του διακόπτη προς την διακοπτική περίοδο, ο οποίος ποικίλει.

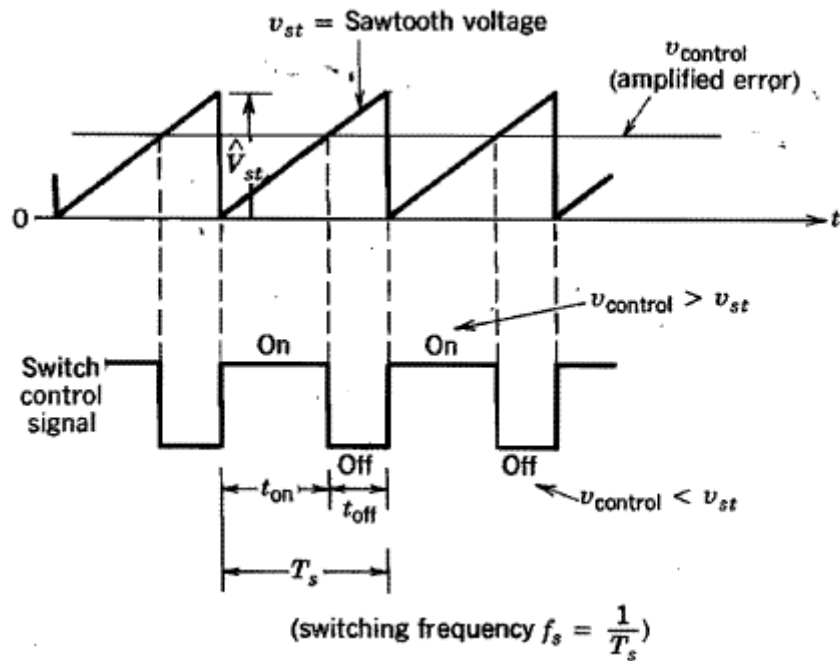
Στην άλλη μέθοδο ελέγχου, η οποία είναι πιο γενική, ο χρόνος αγωγής του διακόπτη, αλλά και η συχνότητα ποικίλουν. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο στους dc-dc μετατροπείς με θυρίστορ.



Εικόνα 4.1: (α): dc-dc converter, (β) : γραφική παράσταση v_o, t .

Κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης εύρους παλμών σε μία σταθερή διακοπτική συχνότητα, το σήμα ελέγχου του διακόπτη, το οποίο ελέγχει την κατάσταση (on ή off), παράγεται από τη σύγκριση της τάσης ελέγχου και μίας κυματομορφής, όπως παρατηρείται και στις εικόνες 4.2(α),(β). Το σήμα της τάσης ελέγχου λαμβάνεται από την ενίσχυση του σφάλματος, ή αλλιώς της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής τιμής της τάσης εξόδου και της επιθυμητής. Η συχνότητα της κυματομορφής, η οποία έχει σταθερό μέγιστο (peak), και είναι τριγωνική (εικόνα 4.2(β)), καθορίζει τη διακοπτική συχνότητα. Η διακοπτική συχνότητα διατηρείται σταθερή και κυμαίνεται από λίγα kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz. Όταν το ενισχυμένο σήμα του σφάλματος, το οποίο μεταβάλλεται πολύ αργά σε σχέση με τη συχνότητα αγωγής του διακόπτη, γίνει μεγαλύτερο από την τριγωνική κυματομορφή, το σήμα ελέγχου του διακόπτη αυξάνεται με αποτέλεσμα να κλείσει ο διακόπτης. [17]





(β)

Εικόνα 4.2. PWM.

4.2.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter).

Στην εικόνα 4.3(α) παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος ενός μετατροπέα ανύψωσης. Η τάση εξόδου του μετατροπέα, η οποία είναι συνεχής, μπορεί να πάρει τιμές έως και τέσσερις φορές μεγαλύτερη από την τάση τροφοδοσίας ανάλογα με την τιμή του πηνίου εισόδου και του βαθμού χρησιμοποίησης του διακόπτη, όπως φαίνεται και από την εξίσωση 4.1:

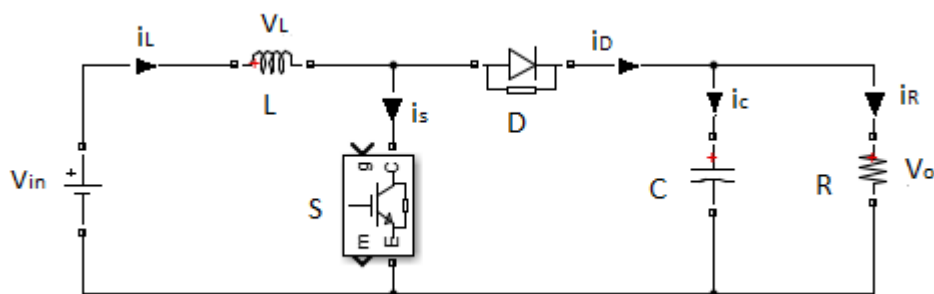
$$V_{in}t_{on} + (V_{in} - V_0)t_{off} = 0 \quad (4.1)$$

Η ελάχιστη τιμή, την οποία μπορεί να πάρει η τάση εξόδου, είναι ίση με αυτή της τάσης εισόδου. Η λειτουργία ενός μετατροπέα ανύψωσης συνεχούς τάσης χωρίζεται σε τρεις φάσεις:

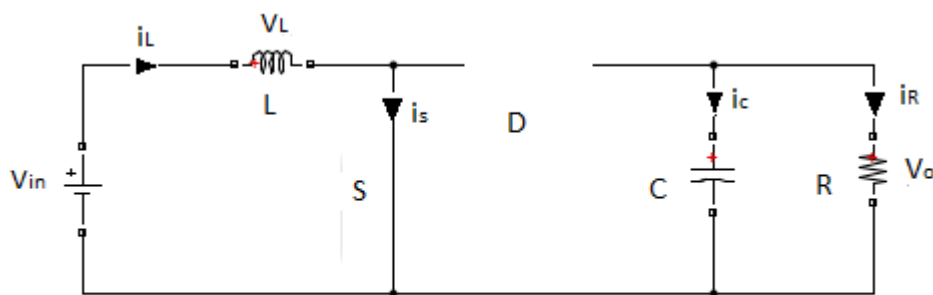
- I. **Φόρτιση πηνίου:** Είναι η πρώτη φάση του μετατροπέα όπου παλμός οδήγησης εφαρμόζεται στην πύλη του διακόπτη S, με αποτέλεσμα η τάση εισόδου να εφαρμόζεται στο πηνίο εισόδου, ή αλλιώς πηνίο ανύψωσης όπως ονομάζεται και να το φορτίζει. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα κατά τη φάση αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3(β). Κατά τη φάση αυτή ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής, ο οποίος είχε φορτιστεί από την προηγούμενη φάση λειτουργίας, τροφοδοτεί την αντίσταση του φορτίου. Η φάση αυτή παίρνει τέλος όταν αφαιρεθεί ο παλμός οδήγησης από τον διακόπτη S.
- II. **Εκφόρτιση πηνίου :** Κατά τη δεύτερη φάση ο διακόπτης S δεν άγει, άγει όμως η δίοδος D, με αποτέλεσμα να τροφοδοτεί την ενέργεια της πηγής εισόδου και την αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου στον πυκνωτή εξόδου και

κατά συνέπεια στο φορτίο. Το ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δεύτερη φάση παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3(γ). Η φάση αυτή τελειώνει όταν το πηνίο αποφορτιστεί και το ρεύμα του πάει στο μηδέν, με αποτέλεσμα και η δίοδος D να σταματήσει να άγει.

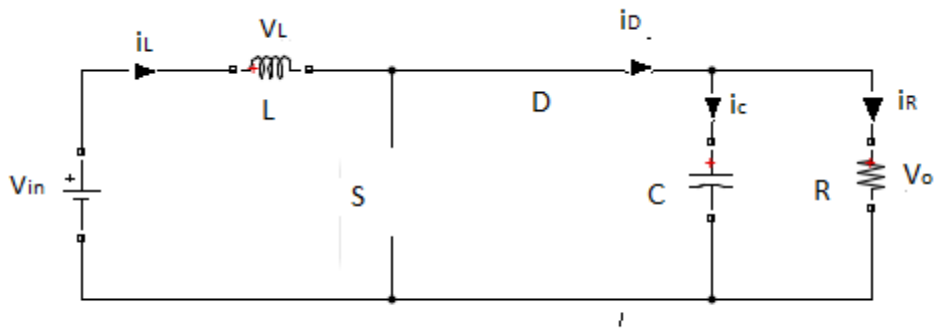
III. Ασυνεχή λειτουργία : Αυτή η φάση λειτουργίας δημιουργείται μόνο όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με ασυνεχές ρεύμα πηνίου. Αφού κατά τη φάση αυτή το ρεύμα έχει μηδενικές τιμές τότε δεν άγει κανένα ημιαγωγικό στοιχείο. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα κατά τη φάση αυτή παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3(δ). Το φορτίο κατά τη φάση αυτή τροφοδοτείται από τον ηλεκτρολυτικό πυκνωτή εξόδου. Ο μετατροπέας ανάψωσης ανάλογα με την τιμή του πηνίου, το χρόνο αγωγής του διακόπτη t_{ON} και τη διακοπτική συχνότητα f_s μπορεί να λειτουργεί με συνεχές ή ασυνεχές ρεύμα πηνίου. Αν το ρεύμα πηνίου είναι ασυνεχές, τότε ο μετατροπέας λειτουργεί και στις τρεις παραπάνω φάσεις, ενώ αν είναι συνεχές, (χωρίς μηδενικές τιμές) τότε ο μετατροπέας λειτουργεί μόνο στις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης πηνίου.[18]



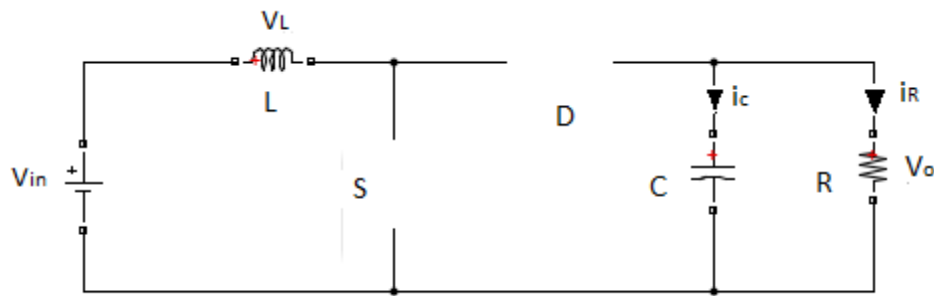
(α)



(β)



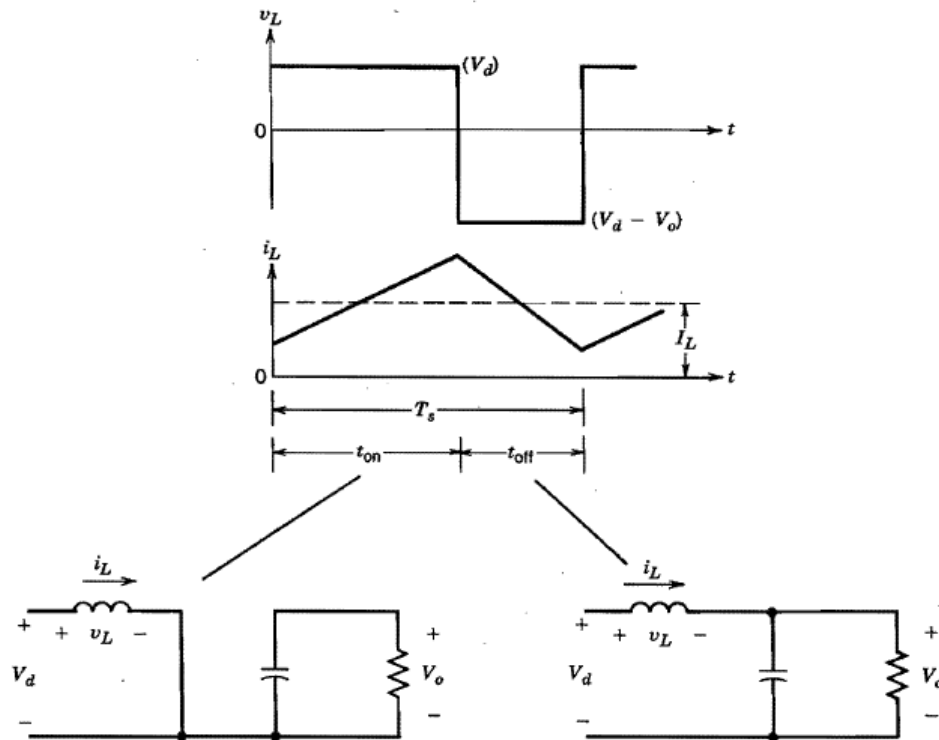
(γ)



(δ)

Εικόνα 4.3 : μετατροπέας ανύψωσης

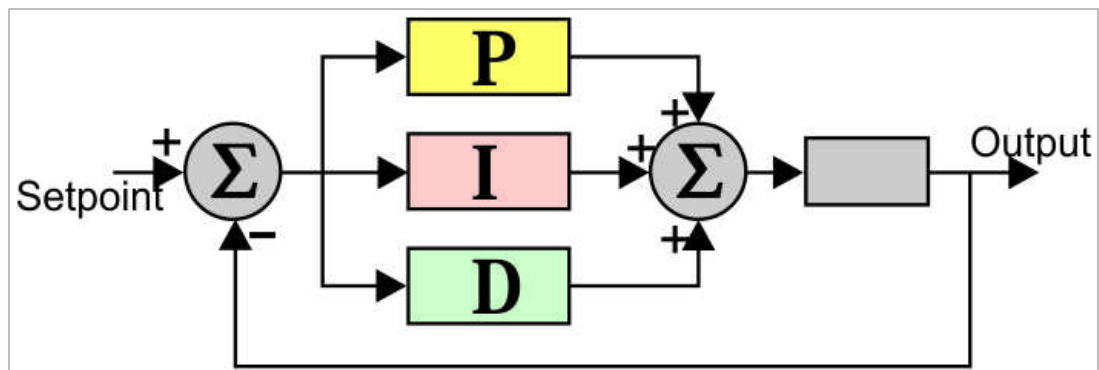
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η επίδραση του παλμού PWM στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Ο διακόπτης κλείνει όταν το σήμα του σφάλματος είναι μικρότερο από τον τριγωνικό παλμό (t_{on}). Ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος αγωγής του διακόπτη και κατά το χρονικό αυτό διάστημα η δίοδος δεν άγει. Όταν το σήμα ξεπεράσει την τιμή του τριγωνικού παλμού ο διακόπτης ανοίγει και άγει η δίοδος. Το χρονικό αυτό διάστημα καλείται χρόνος σβέσης ή αποκοπής του διακόπτη (t_{off}).



Εικόνα 4.4 : Χρόνος αγωγής και απόσβεσης του διακόπτη.

4.3 PID ελεγκτής.

Ο PID ελεγκτής είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου, όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στην παρακάτω εικόνα(4.2).



Εικόνα 4.2 PID ελεγκτής [19].

4.3.1 Λειτουργία PID ελεγκτή.

Η λειτουργία του βασίζεται στη συνάρτηση (4.1)

$$u(t) = k_p(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de}{dt} \quad (4.2)$$

όπου $u(t)$ είναι η έξοδος του ελεγκτή, $e(t)$ είναι το σφάλμα και k_p , k_i , k_d είναι ο αναλογικός, ο ολοκληρωτικός και ο διαφορικός συντελεστής αντίστοιχα. Η μετρούμενη τιμή που μας ενδιαφέρει αφαιρείται από την επιθυμητή, παράγοντας

έτσι μία καινούρια τιμή , το σφάλμα ($e=r-y$). Το σφάλμα είναι η είσοδος του PID ελεγκτή , όπου στο σύστημα του ελεγκτή γίνεται η διεργασία βάσει της εξίσωσης (4.1). [3]

Ας δούμε πιο αναλυτικά το ρόλο του κάθε όρου του ελεγκτή:

- Αναλογικός όρος P: Αυξάνοντας τον αναλογικό όρο, το σύστημα προσπαθεί να φτάσει στην επιθυμητή τιμή ταχύτερα. Το σφάλμα μειώνεται αλλά δεν εξαλείφεται.
- Ολοκληρωτικός όρος I : Ο ολοκληρωτικός όρος εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα , αλλά δημιουργεί ταλαντώσεις γύρω από την επιθυμητή τιμή μέχρι να έρθει το σύστημα σε ισορροπία.
- Διαφορικός όρος D : Ο διαφορικός όρος συντελεί στην αύξηση της σταθερότητας του συστήματος.

Ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος μπορούμε να έχουμε είτε έναν όρο, είτε δύο όρους είτε και τους τρεις του ελεγκτή(P-PI,PD-PID).

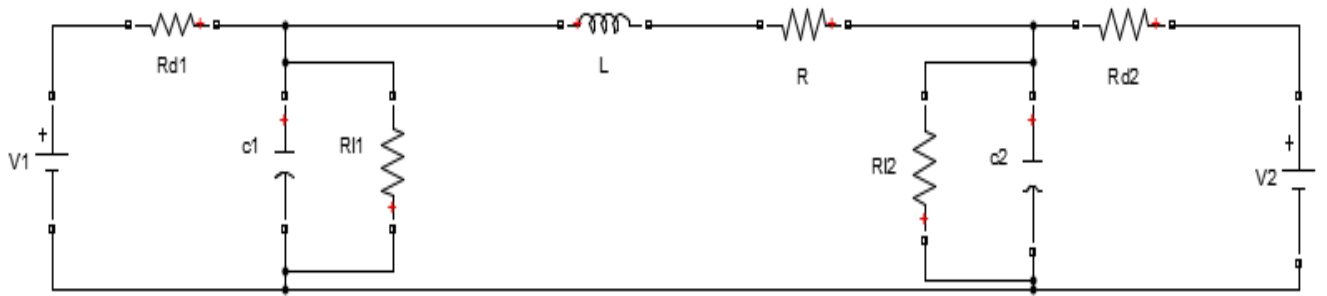
4.3.2 Ρύθμιση παραμέτρων PID ελεγκτή.

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων του PID ελεγκτή είναι από τα πιο σπουδαία προβλήματα στην πράξη και μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους :

- Απευθείας σύνθεση (Direct Synthesis) , λαμβάνοντας υπόψη τις επιθυμητές προδιαγραφές του τελικού συστήματος.
- Μέθοδος Internal Model Control , για ελεγκτές τύπου PI, PID.
- Πειραματικές μεθόδους μετά την εγκατάσταση του ελεγκτή στο σύστημα.
- Μέθοδος απόκρισης συχνότητας (frequency response).
- Ρύθμιση σε πραγματικό χρόνο, μετά την εγκατάσταση του συστήματος και κατά τη λειτουργία του(self tuning/ adaptive control).[20]

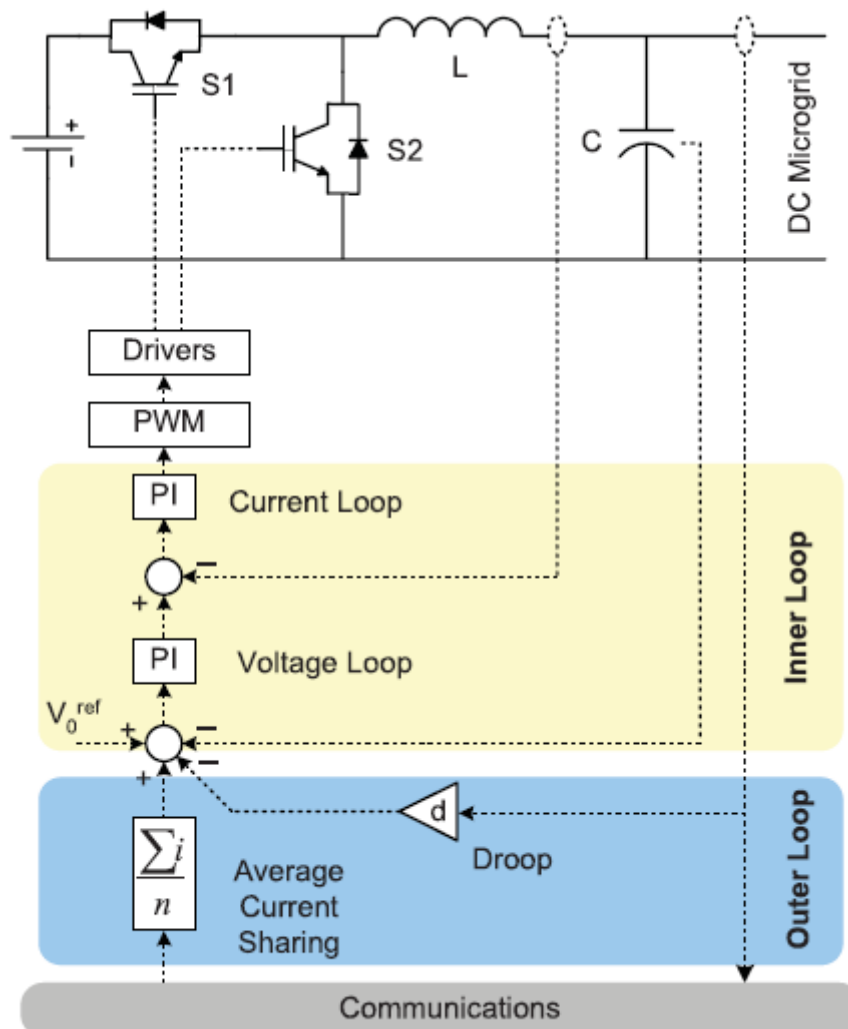
4.4 Δομή dc μικροδικτύου- Έλεγχος.

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια σύντομη παρουσίαση και περιγραφή του dc μικροδικτύου. Όπως διαπιστώνουμε από την εικόνα 4.1, στην οποία απεικονίζεται το μικροδίκτυο πάνω στο οποίο βασίστηκε η μελέτη, αυτό αποτελείται από δύο παράλληλα συνδεδεμένες πηγές. Η κάθε πηγή είναι ένας boost converter- μετατροπέας ανύψωσης τάσης, η λειτουργία του οποίου θα μελετηθεί παρακάτω. Οι δύο πηγές διαθέτουν φορτίο και είναι συνδεδεμένες με μία γραμμή.



Εικόνα 4.5 : Δομή dc μικροδικτύου με δύο πηγές- δύο φορτία.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το πως εφαρμόστηκε ο προτεινόμενος έλεγχος στο παραπάνω μικροδίκτυο. Προσομοίωση του ελέγχου πραγματοποιήθηκε στο MATLAB/Simulink. Η προσομοίωση βασίστηκε στο σχεδιασμό που φαίνεται στην εικόνα 4.2.

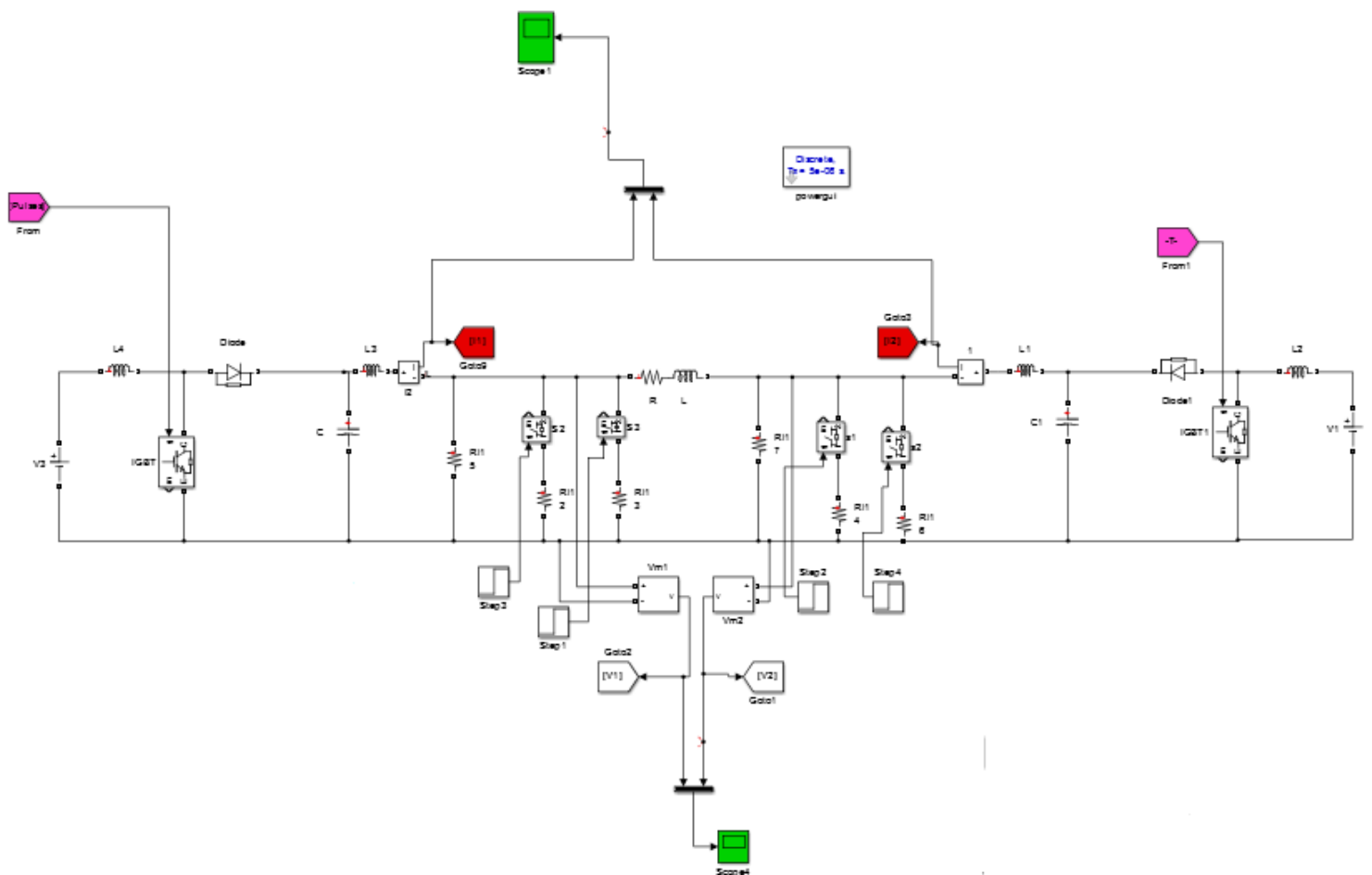


Εικόνα 4.6 : dc boost converter με εσωτερικό έλεγχο τάσης και εξωτερικό έλεγχο

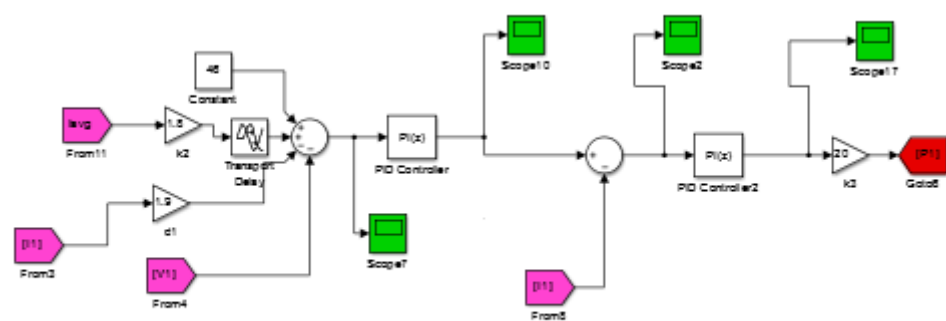
Στο MATLAB/Simulink πραγματοποιήθηκε η εξομοίωση του παραπάνω κυκλώματος, η οποία απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες (εικόνα 4.3-4.5).

4.5. Διεξαγωγή Προσομοίωσης.

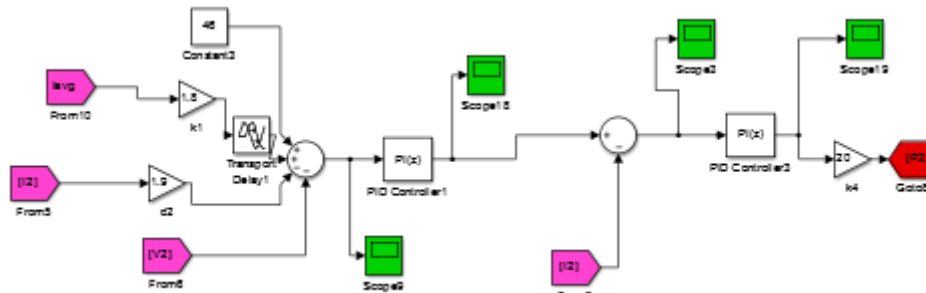
Κάνοντας χρήση του προγράμματος MATLAB/ Simulink πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση του παραπάνω ελέγχου , όπως παρουσιάζεται και στις εικόνες 4.3-4.5. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω κάθε πηγή είναι ένας μετατροπέας ανύψωσης τάσης με εσωτερικό έλεγχο τάσης, όπως μπορούμε να διακρίνουμε και στην εικόνα 4.2. Ο προτεινόμενος έλεγχος πραγματοποιείται ώστε να παραχθεί η τάση αναφοράς, δηλαδή η απαιτούμενη τάση των φορτίων από τις δύο πηγές. Δηλαδή αυτό που θέλουμε να πετύχουμε με τον έλεγχο αυτό είναι ανεξάρτητα από τη ζήτηση, οι τιμές των τάσεων των δύο πηγών να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τάση αναφοράς. Η αντίσταση στατισμού κάθε πηγής, παίρνει την τιμή $R_{a1} = R_{a2} = 1.9 \Omega$, τιμή αρκετά μεγαλύτερη από την αντίσταση καλωδίου. Σύμφωνα με τα κριτήρια επιλογής της τιμής του συντελεστή k_j , όπως αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 3.7, θα είναι $k_1 = k_2 = 1.8$. Η μεταφορά της πληροφορίας της μετατόπισης Δu_j^0 έχει καθύστερηση 5 sec. Οι ονομαστικές τάσεις των δύο πηγών είναι στα 46 V. Οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση είναι αυτές που αναγράφονται στου πίνακες I-II. Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια απεικονίζεται η τάση εξόδου και των δύο πηγών, το ρεύμα εξόδου και η μετατόπιση Δu_1^0 της πρώτης πηγής και Δu_2^0 της δεύτερης πηγής, κατά την προσομοίωση του πρωτογενούς και του δευτερογενούς ελέγχου .



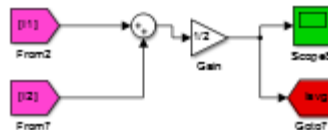
Εικόνα 4.7 :DC μικροδίκτυο- προσομοίωση MATLAB/ Simulink.



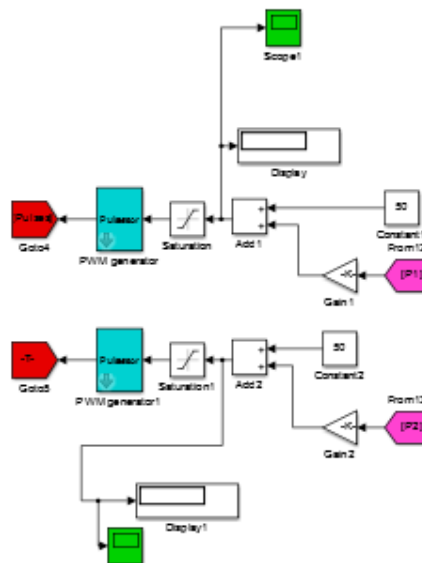
Εικόνα 4.8 : Πρωτογενής και δευτερογενής έλεγχος της πρώτης μικροπηγής.



Εικόνα 4.9 : Πρωτογενής και δευτερογενής έλεγχος της δεύτερης μικροτηνής.



Εικόνα 4.10 : Υπολογισμός μέσου όρου ρεύματος.



Εικόνα 4.11 : Δύο PWM για κάθε έναν converter.

Στους δύο παρακάτω πίνακες (πίνακας I και πίνακας II) παρατίθενται οι τιμές των στοιχείων του κυκλώματος και του ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομίωση :

Πίνακας I.

Ονομαστική τάση $V_1 = V_2$	46 V
$L_1 = L_2$	10^{-2} H

$C_1 = C_2$	10^{-3} F
$L_3 = L_4$	$0.5 * 10^{-5} \text{ H}$
R	0.2Ω
L	$463 * 10^{-6}$
R_{i1}	15Ω
R_{i2}	15Ω

Πίνακας II.

$d_1 = d_2$	1.9
$k_1 = k_2$	1.8

Οι τιμές των C_1 , L_3 και C_2 , L_4 που αποτελούν τα φίλτρα των δύο μετατροπέων ανύψωσης τάσης καθορίστηκαν βάσει των τύπων :

$$C > \frac{D}{Rf_s(\Delta V_c/\bar{V}_0)} \quad (4.3)$$

$$L > \frac{D(1-D)^2 R}{2f_s} \quad (4.4)$$

όπου

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

$f_s =$ διακοπτική συχνότητα $= (1/T_s) = (1/(t_{on} + t_{off}))$

Όπως παρατηρούμε οι τιμές του πυκνωτή και του πηνίου, δηλαδή του φίλτρου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης, είναι αντιστρόφως ανάλογες με τη διακοπτική συχνότητα, η οποία είναι της τάξης των kHz.[17][18]

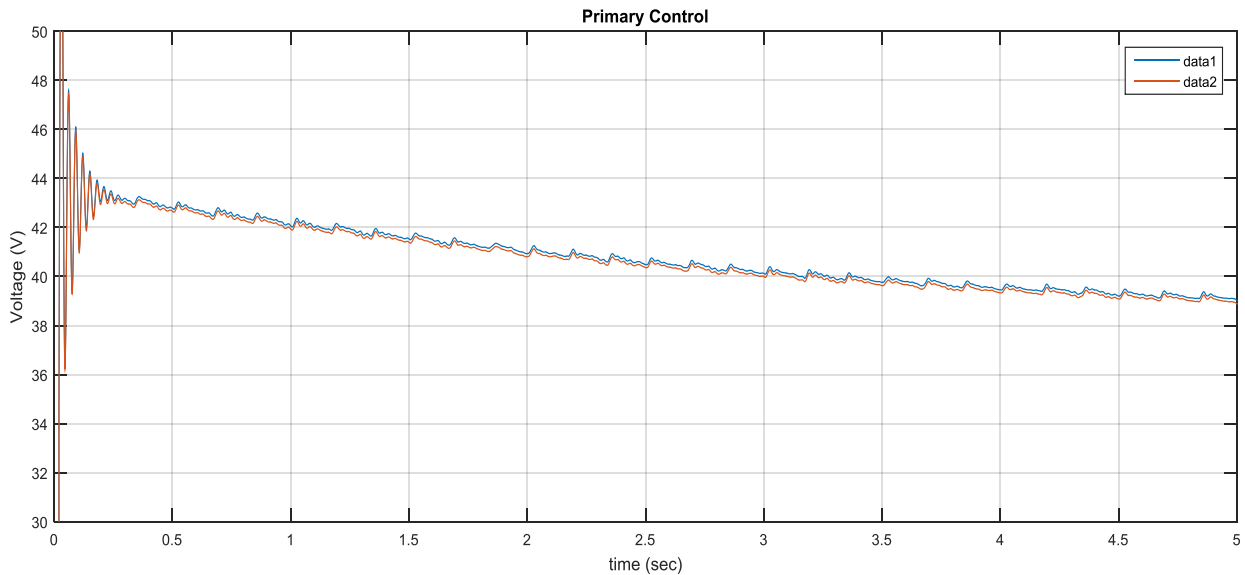
Για να προσδιορίσουμε τις τιμές των συντελεστών των PI ελεγκτών κάναμε χρήση της πειραματικής μεθόδου μετά την εγκατάσταση των ελεγκτών στο σύστημα και καταλήξαμε στις παρακάτω τιμές :

- ✓ Έλεγχος πρώτης πηγής : $k_{p1} = 3, k_{i1} = 1.5, k_{p2} = 1, k_{i2} = 0.5$
- ✓ Έλεγχος δεύτερης πηγής : $k_{p1} = 3, k_{i1} = 1.5, k_{p2} = 1, k_{i2} = 0.5$

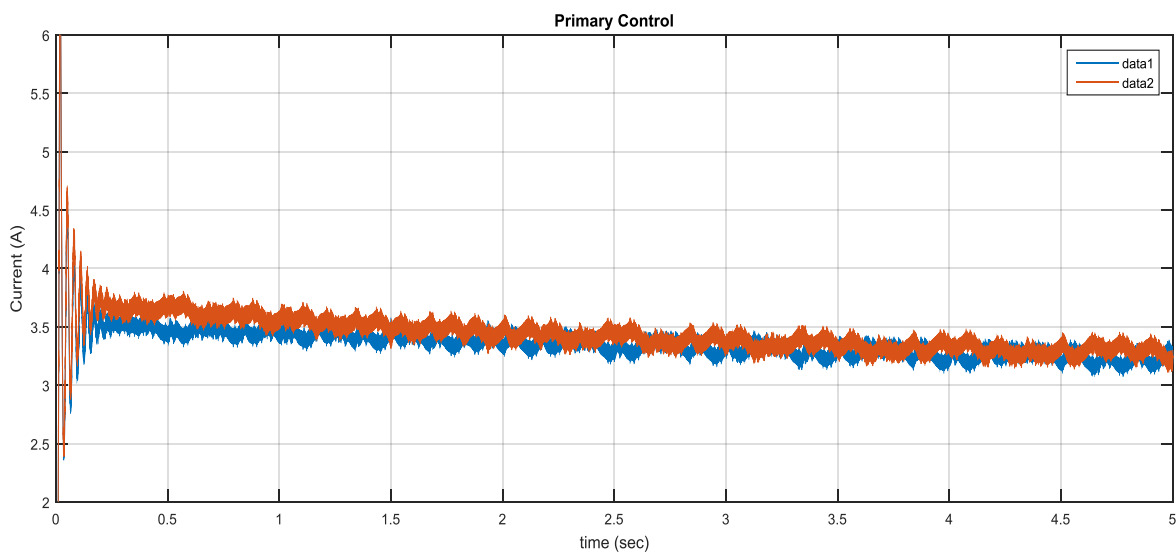
4.5.1 Προσομοίωση πρωτογενούς ελέγχου.

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται προσομοίωση μόνο του πρωτογενούς ελέγχου του dc μικροδικτύου, καθώς ο δευτερογενής έλεγχος απουσιάζει. Όπως παρατηρούμε και στις παρακάτω εικόνες οι τιμές των ρευμάτων των δύο μετατροπέων είναι αποδεκτές, με τα ρεύματα εξόδου και των δύο μετατροπέων να φτάνουν τα 3.1 A, παρουσιάζοντας μια μικρή απόκλιση, περίπου 1% από τις ονομαστικές τιμές.. Οι τιμές των ονομαστικών ρευμάτων είναι εντός των επιτρεπτών ορίων. Όμως, όπως διαπιστώνουμε και από τα παρακάτω διαγράμματα οι τιμές των τάσεων αποκλίνουν αρκετά από την τάση αναφοράς. Οι τάσεις εξόδου και των δύο μετατροπέων αγγίζει τα 39.3 V , δηλαδή παρουσιάζει μια απόκλιση 14.56% από την

τάση αναφοράς. Η απόκλιση αυτή είναι αρκετά μεγάλη και η τάση παίρνει τιμές εκτός των επιτρεπτών ορίων. Συνεπώς είναι απαραίτητη η εφαρμογή του δευτερογενούς ελέγχου, ώστε να βελτιωθεί οι τιμές των τάσεων εξόδου των μετατροπέων.

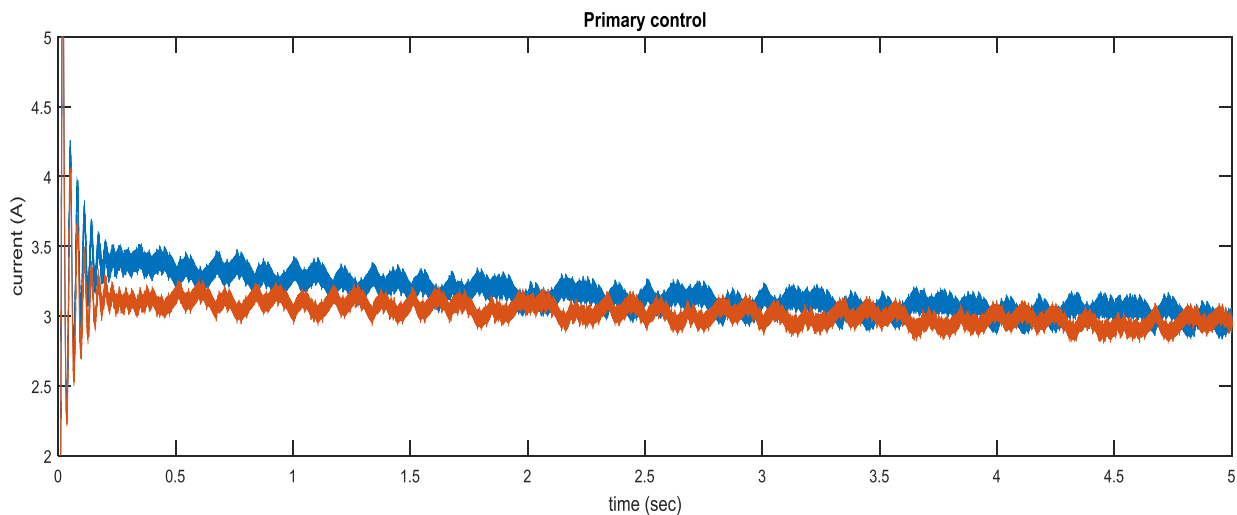


Εικόνα 4.12 : Τάσεις εξόδου (V_1 - V_2) των δύο μετατροπέων.



Εικόνα 4.13 : Ρεύματα εξόδου (i_1 - i_2) των δύο μετατροπέων.

Ακόμη παρακάτω παρουσιάζεται προσομοίωση του πρωτογενούς ελέγχου όταν η ζήτηση των δύο πηγών διαφέρει. Το φορτίο της πρώτης πηγής είναι 10 Ω και της δεύτερης είναι 15 Ω. Ο πρωτογενής έλεγχος δίνει τη δυνατότητα ίσης κατανομής φπρτίου στις δύο πηγές.



Εικόνα 4.14: Ρεύματα εξόδου των δύο μετατροπέων με διαφορετική ζήτηση.

4.5.2 Προσομοίωση πρωτογενούς και δευτερογενούς ελέγχου.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η προσομοίωση του ελέγχου του κυκλώματος των εικόνων 4.2-4.5. Οι τιμές που παίρνουν τα στοιχεία του κυκλώματος είναι αυτές που αναγράφονται παραπάνω. Αυτό που αξίζει να αναδειχτεί σ' αυτή την ενότητα είναι η λειτουργία του δευτερογενούς ελέγχου, καθώς και μια μικρή μελέτη σχετικά με την απόκλιση της τάσης και του ρεύματος από τις ονομαστικές τους τιμές.

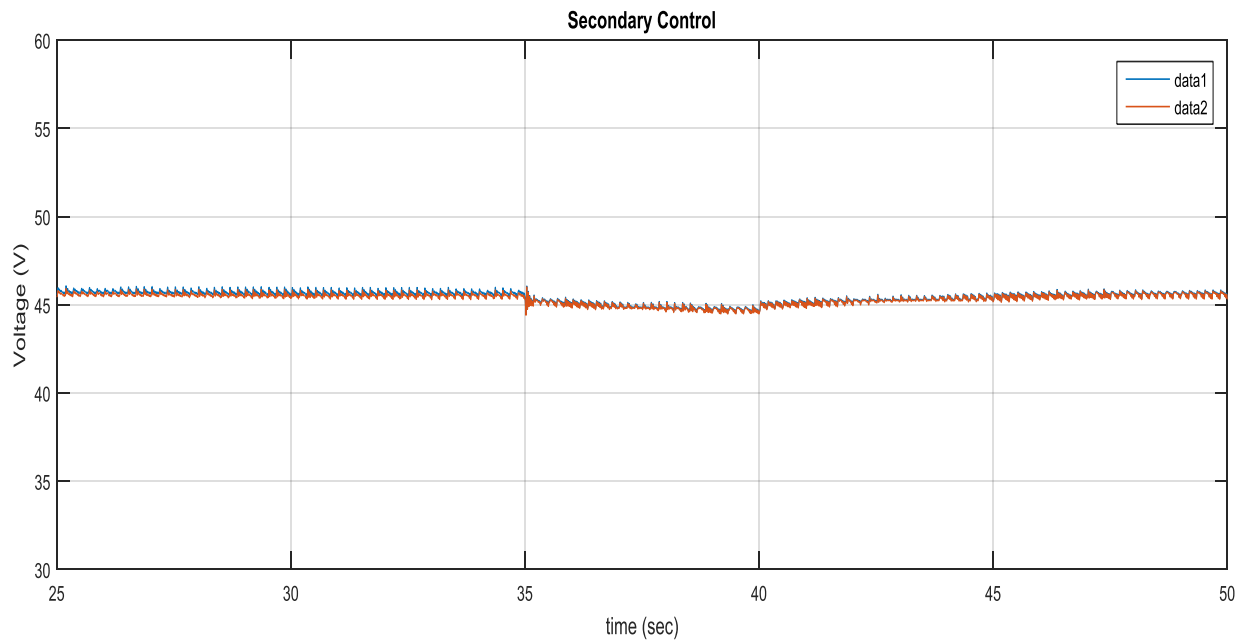
Όπως έχουμε αναλύσει και σε προηγούμενο κεφάλαιο ο πρωτογενής έλεγχος –έλεγχος στατισμού(droop control) είναι αυτός που δίνει τη δυνατότητα να γίνεται ίση κατανομή φορτίου των δύο πηγών στο συγκεκριμένο πείραμα. Όμως η εφαρμογή της αντίστασης στατισμού προκαλεί πτώση τάσης. Για να βελτιώσουμε την τάση εξόδου εφαρμόζουμε τον δευτερεύων έλεγχο, ο οποίος απαιτεί μικρού εύρους επικοινωνία μεταξύ των δύο πηγών.

Όπως αναφέρεται και στην προηγούμενη παράγραφο, η τάσεις εξόδου των δύο μετατροπέων με την εφαρμογή μόνο του πρωτογενούς ελέγχου αγγίζει τα 39,5 V, παρουσιάζοντας έτσι αρκετά μεγάλη απόκλιση από την τάση αναφοράς. Την χρονική στιγμή $t=5$ sec εφαρμόζεται και ο δευτερογενής έλεγχος, ο οποίος καταφέρνει να επαναφέρει την τάση πολύ κοντά στην τιμή της τάσης αναφοράς, δηλαδή στα 45,7 V, παρουσιάζοντας έτσι μία πολύ μικρή απόκλιση 0,7 %. Έπειτα τη χρονική στιγμή $t=35$ sec, προκαλείται μία μικρή διαταραχή στο σύστημα, με τη ζήτηση του πρώτου φορτίου να μειώνεται στα 10 A. Ο δευτερογενής έλεγχος επιδρά και εκεί επαναφέροντας την τάση στα 45,5 V, παρουσιάζοντας μία πολύ μικρή απόκλιση 1% από την τάση αναφοράς.

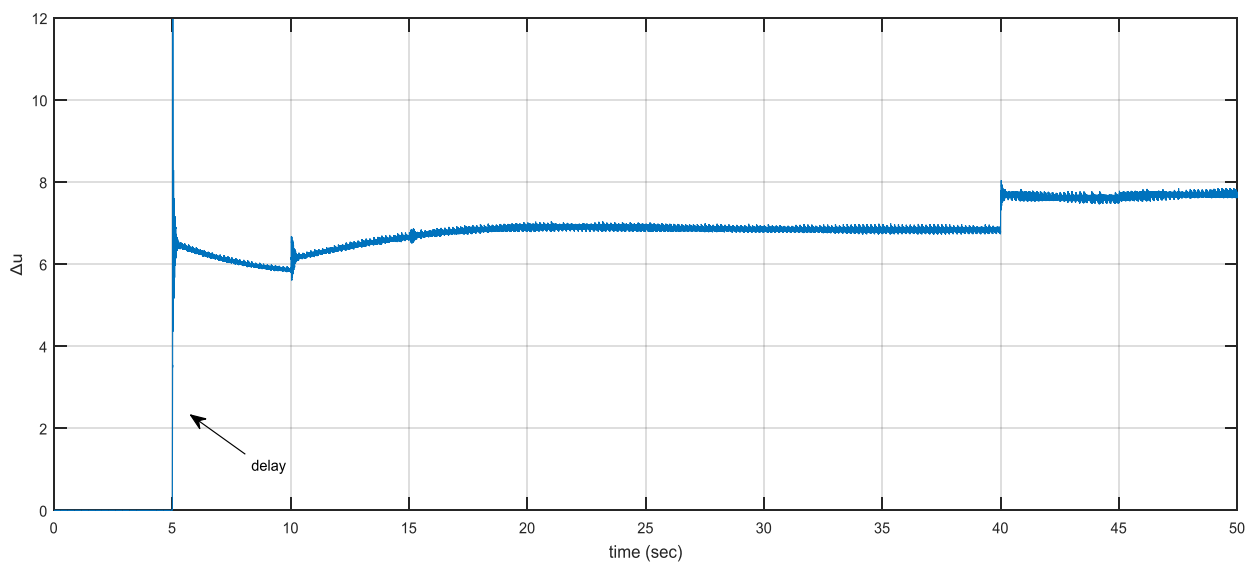
Οι τάσεις εξόδου των δύο μετατροπέων αναμενόταν να γίνουν ίσες με 46 V, εξαιτίας του δευτερογενούς ελέγχου. Όμως, όπως αναφέρεται και στην παραπάνω παράγραφο παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις, περίπου 1% από την αναφορά, φτάνοντας τα 45.5V, τιμή που βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων. Η απόκλιση αυτή είναι απόρροια της λειτουργίας των PI ελεγκτών καθώς δεν κατάφεραν να περιορίσουν άλλο το σφάλμα(static error). Επίσης τα ρεύματα των δύο

μετατροπέων φτάνουν τα 3,055 A, σημειώνοντας μία πολύ μικρή απόκλιση της τάξης του 0,38%.

Στην εικόνα 4.15 παρουσιάζεται η έξοδος των δύο μετατροπέων, η οποία με τη βοήθεια του δευτερογενούς ελέγχου πλησιάζει την τάση αναφοράς που είναι τα 46 V. Στην επόμενη εικόνα (4.16) παρουσιάζεται η μετατόπιση Δu , η οποία είναι υπεύθυνη για τη βελτίωση τάσης κατά το δευτερογενή έλεγχο και επιδρά με χρονική καθυστέρηση 5 sec.



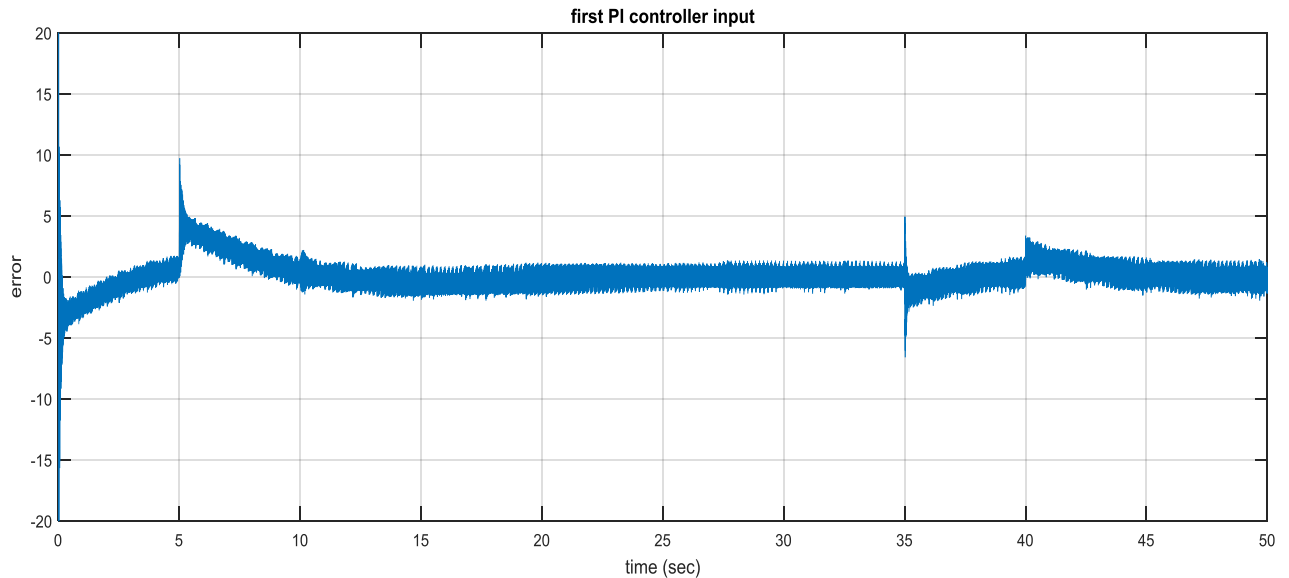
Εικόνα 4.15 : Τάσεις εξόδου(V_1-V_2) των δύο μετατροπέων.



Εικόνα 4.16 : Μετατόπιση Δu με καθυστέρηση 5 sec.

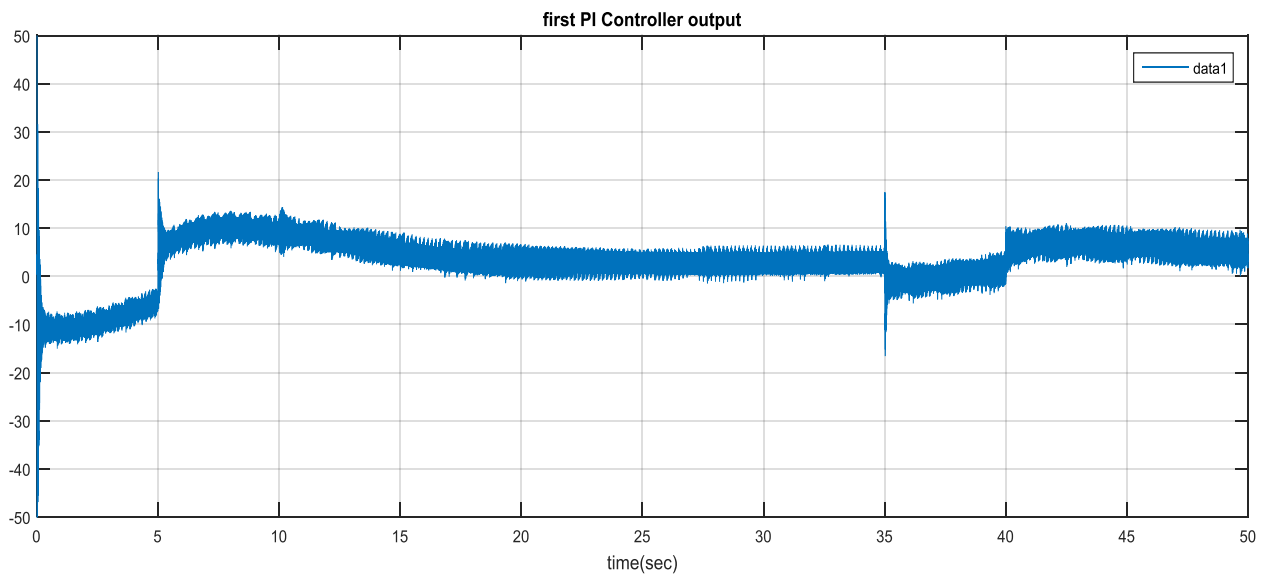
Παρακάτω απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις των εισόδων και των εξόδων των PI ελεγκτών. Στον πρώτο PI ελεγκτή, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε και από τις εικόνες 4.8-4.9, όπου φαίνεται ο έλεγχος, έρχεται ως είσοδος το σφάλμα που διαμορφώνεται από τη σχέση:

$$V_j^{ref} - V_j^0 + \Delta V_j^0 - R_{aj} \times i_{j=} \text{ error}$$



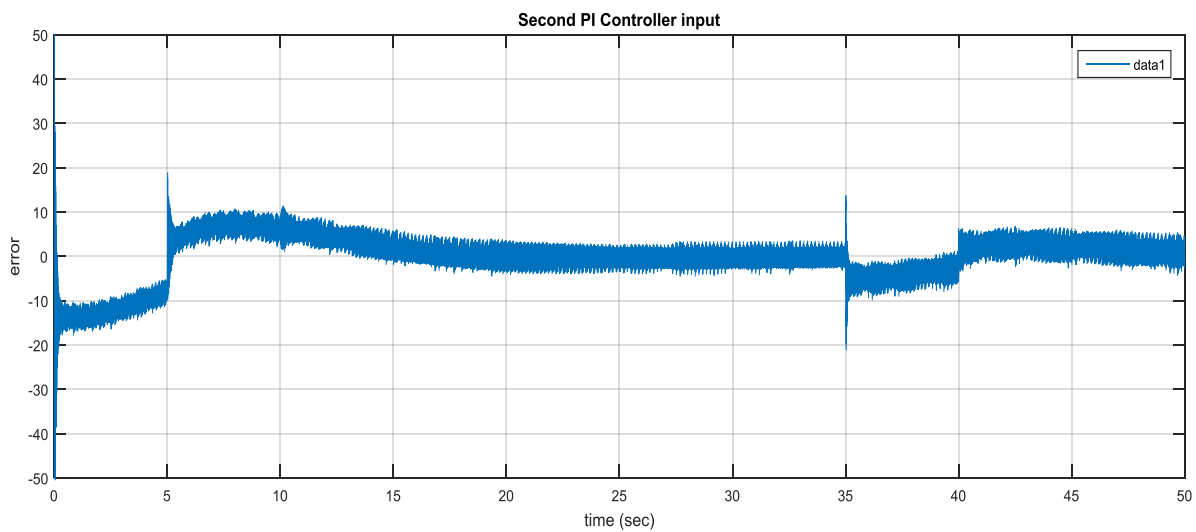
Εικόνα 4.17 : Είσοδος πρώτου PI ελεγκτή.

Ο πρώτος PI ελεγκτής λοιπόν διορθώνει το παραπάνω σφάλμα κι έχει ως έξοδο τη γραφική παράσταση που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



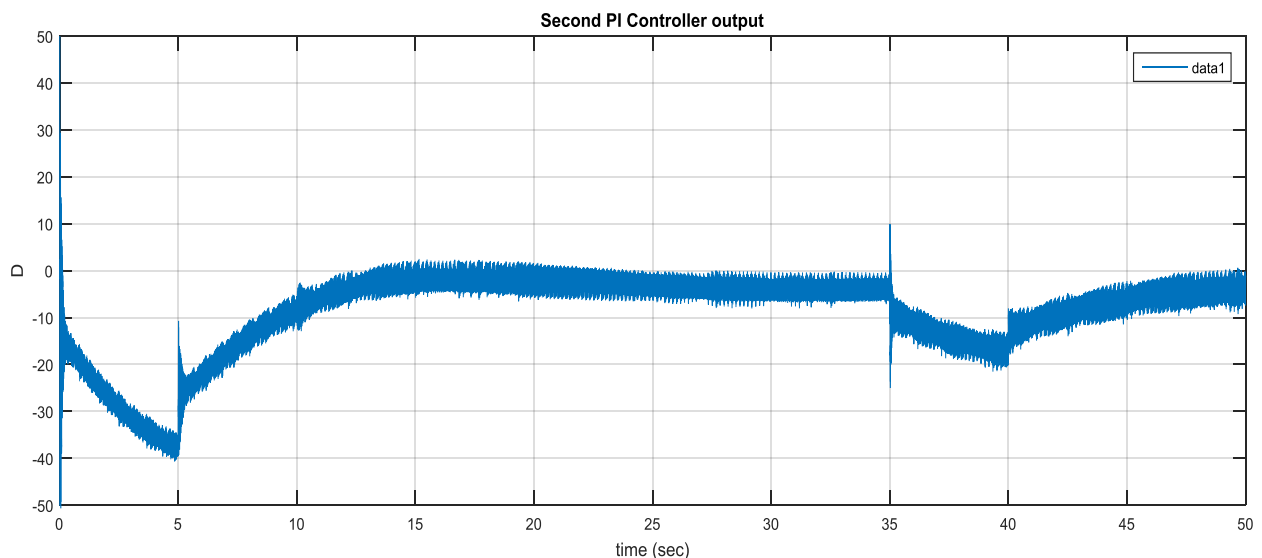
Εικόνα 4.18 : Έξοδος πρώτου PI ελεγκτή.

Η έξοδος του πρώτου ελεγκτή συγκρίνεται με το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα και το σφάλμα μπαίνει σαν είσοδο σε έναν δεύτερο PI ελεγκτή.



Εικόνα 4.19 : Είσοδος δεύτερου PI ελεγκτή.

Τέλος από τον δεύτερο ελεγκτή εξέρχεται το διορθωμένο σήμα, το οποίο οδηγείται στην είσοδο του μετατροπέα μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).



Εικόνα 4.20 : Έξοδος PI ελεγκτή

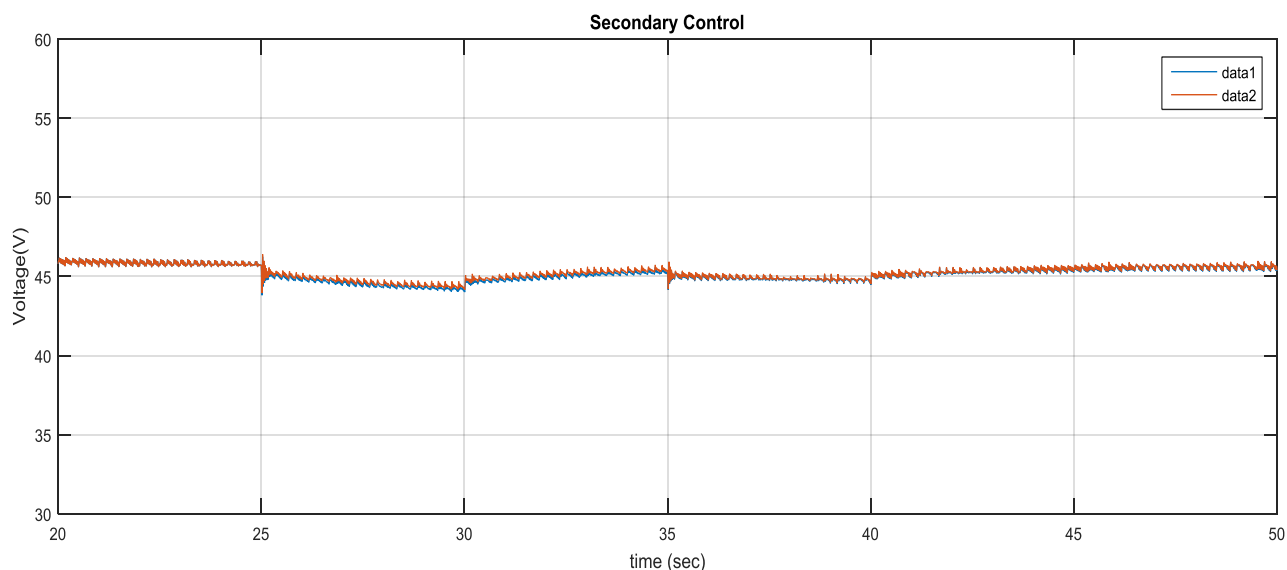
4.5.3 Προσομοίωση πρωτογενούς και δευτερογενούς ελέγχου αυξάνοντας τη ζήτηση των δύο πηγών.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μικροδικτύου αυξάνοντας τη ζήτηση. Οι τιμές των δύο φορτίων είναι ίσες, στα 15 Ω. Ο δευτερογενής έλεγχος επιδρά τη χρονική στιγμή $t=5\text{sec}$.

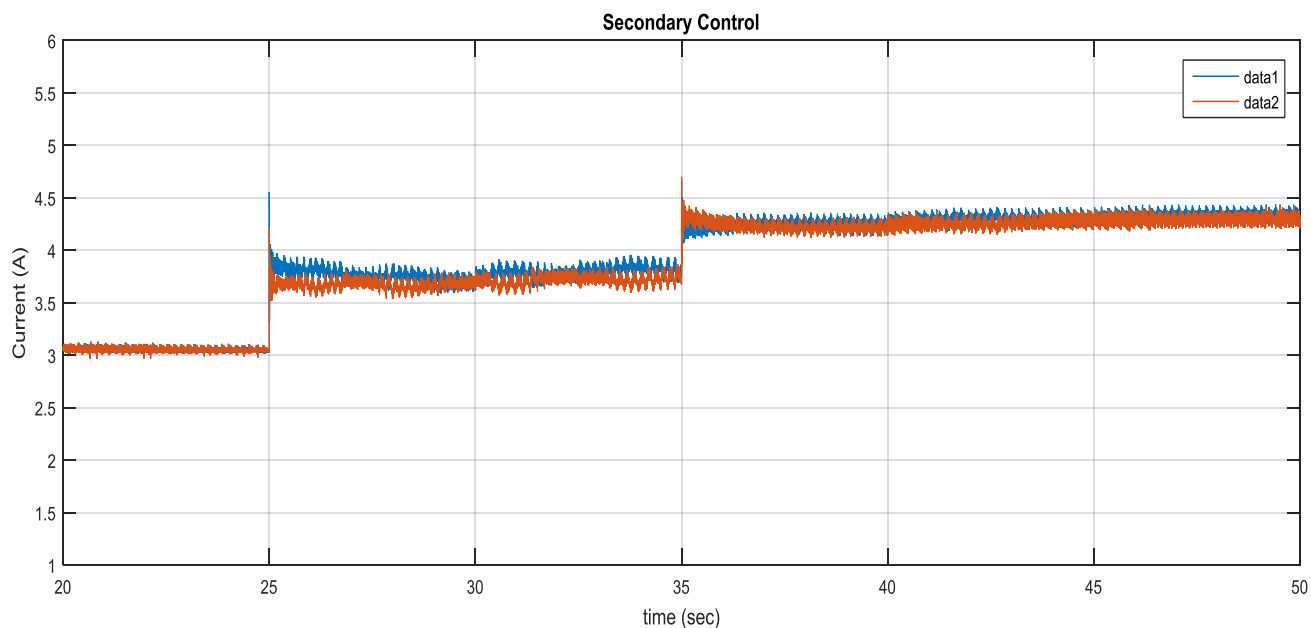
Τη χρονική στιγμή $t=25\text{sec}$ στο φορτίο του πρώτου μετατροπέα προστίθεται παράλληλα ένα ακόμη φορτίο 30Ω μειώνοντας το συνολικό φορτίο του από 15Ω σε 10Ω και τη χρονική στιγμή $t=35\text{sec}$ προστίθεται στο φορτίο του δεύτερου μετατροπέα παράλληλα φορτίο 45Ω μειώνοντας το συνολικό φορτίο του από 15Ω σε 11.25Ω .

Με την επίδραση μόνο του πρωτογενούς ελέγχου οι τάσεις εξόδου των δύο μετατροπέων φτάνουν στα 40.1V παρουσιάζοντας απόκλιση 12.8% από την ονομαστική τιμή. Γι αυτό το λόγο την $t=5\text{sec}$ επιδρά ο δευτερογενής έλεγχος ανυψώνοντας την τάση στα άκρα και των δύο μετατροπέων στα 45.7V παρουσιάζοντας τώρα πολύ μικρή απόκλιση 0.65% από την τάση αναφοράς. Στη συνέχεια αυξάνεται αρχικά η ζήτηση στον πρώτο μετατροπέα με αποτέλεσμα την πτώση τάσης. Όμως επιδρά με επιτυχία και εδώ ο δευτερογενής έλεγχος ανυψώνοντας την τάση εξόδου του πρώτου μετατροπέα στα 45.3V , παρουσιάζοντας απόκλιση μόλις 1.5% και του δεύτερου μετατροπέα στα 45.5V παρουσιάζοντας απόκλιση 1% . Η τάση βρίσκεται στα αποδεκτά επίπεδα. Έπειτα συμβαίνει ακόμη μία αύξηση στη ζήτηση, στο δεύτερο μετατροπέα αυτή τη φορά. Ο δευτερογενής έλεγχος ανυψώνει ξανά την τάση στα 45.4V για τον πρώτο μετατροπέα και 45.6V για τον δεύτερο παρουσιάζοντας αποκλίσεις 1.3% και 0.87% αντίστοιχα από την τάση αναφοράς.

Όπως παρατηρούμε και στις παρακάτω εικόνες λοιπόν, διαπιστώνουμε ότι τόσο ο πρωτογενής (droop), όσο και ο δευτερογενής έλεγχος επιδρούν θετικά στο μικροδίκτυο καταφέροντας ίση κατανομή φορτίου, αλλά και τη διατήρηση της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα αντίστοιχα.

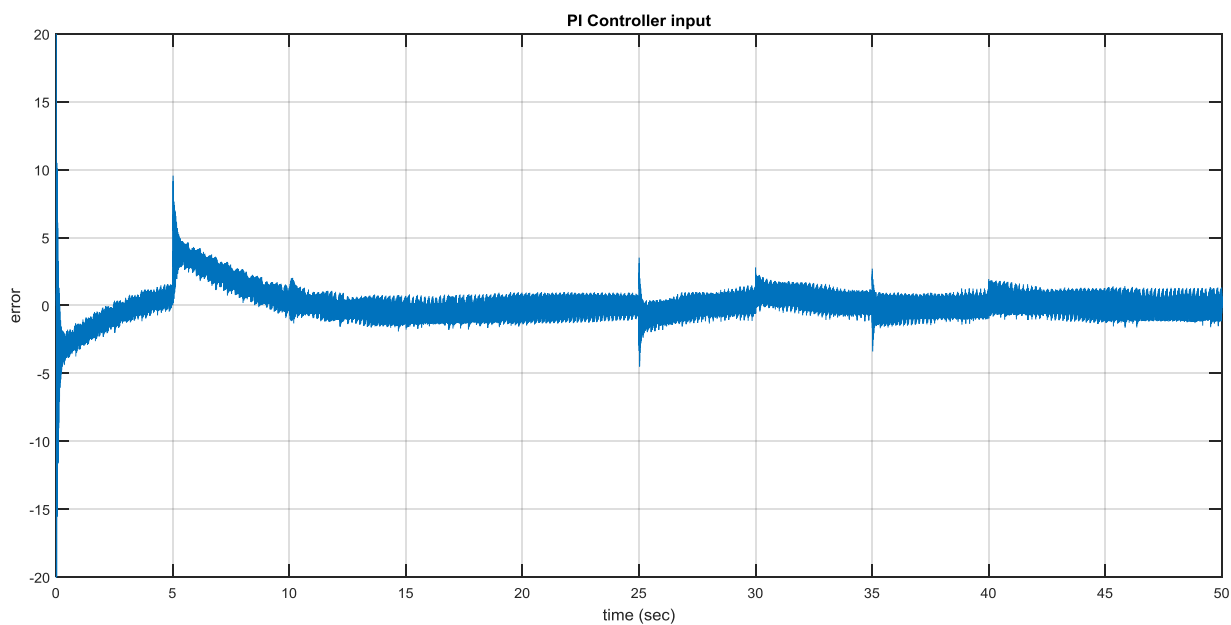


Εικόνα 4.21 : Τάσεις εξόδου (V_1-V_2) των δύο πηγών καθώς αυξάνεται η ζήτηση.

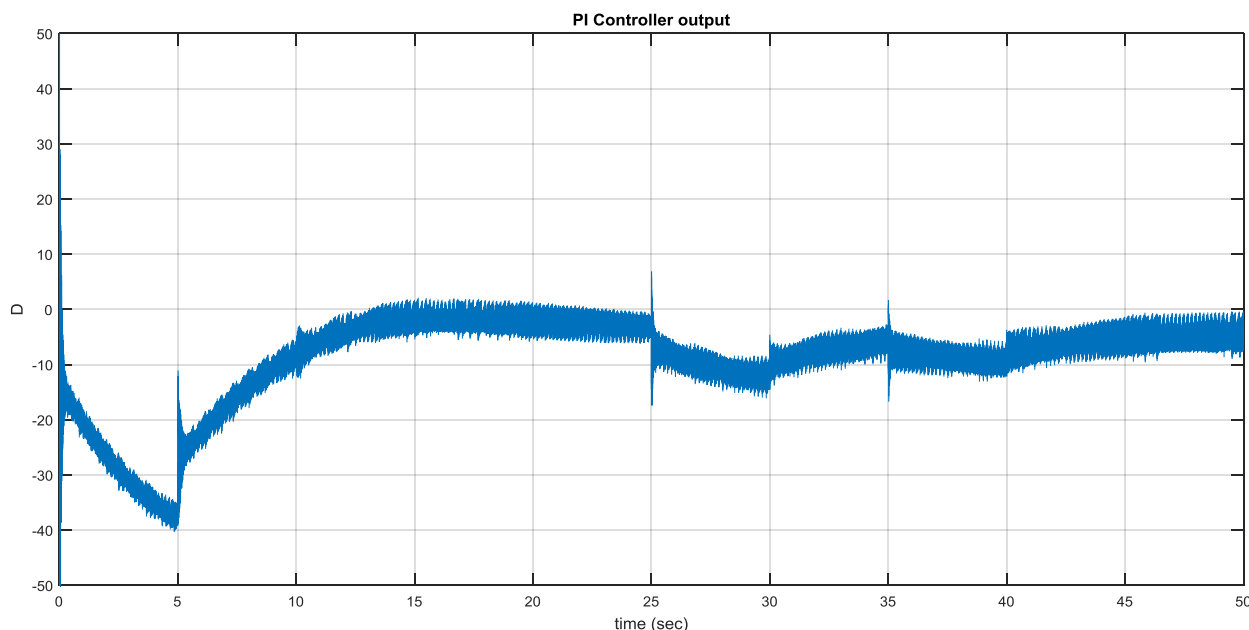


Εικόνα 4.22 : Ρεύματα εξόδου (i_1-i_2) των δύο πηγών.

Ο έλεγχος γίνεται κατά τον ίδιο τρόπο με την παραπάνω προσομοίωση. Στη συνέχεια παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις της εισόδου του πρώτου ελεγκτή και της εξόδου του δεύτερου, ώστε να αναδειχτεί η διορθωμένη τιμή του σήματος που εισέρχεται στον μετατροπέα μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών.



Εικόνα 4.23 : Είσοδος PI ελεγκτή.



Εικόνα 4.24 :Έξοδος PI ελεγκτή.

4.5.4. Προσομοίωση πρωτογενούς και δευτερογενούς ελέγχου καθώς μειώνεται η ζήτηση των δύο πηγών.

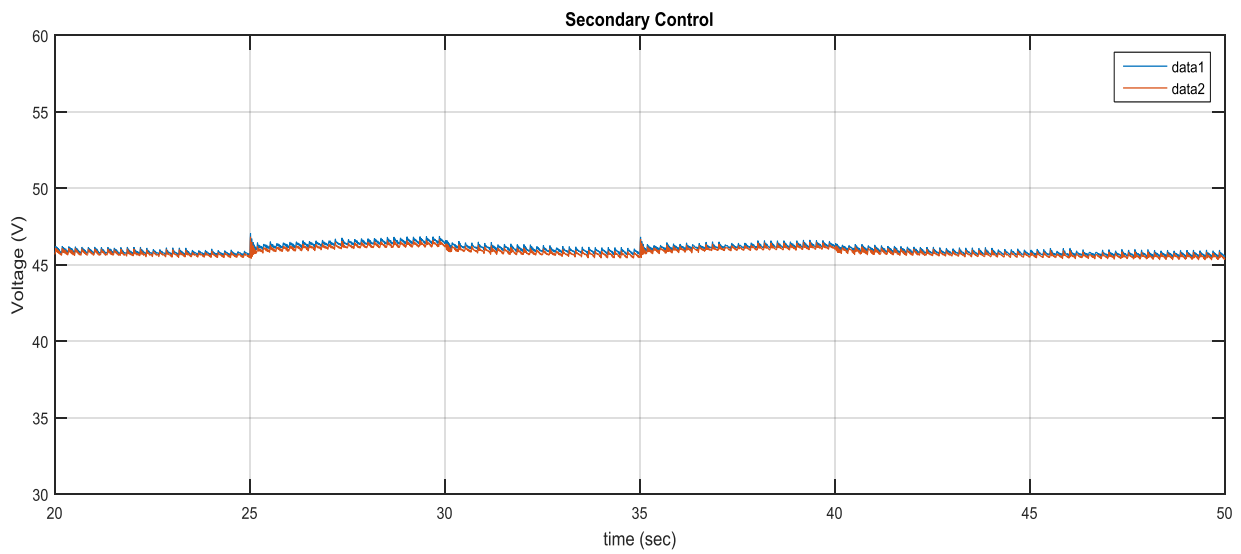
Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται προσομοίωση του πρωτογενούς και του δευτερογενούς ελέγχου του dc μικροδικτύου, καθώς όμως η ζήτηση των δύο πηγών μειώνεται.

Η πρώτη πηγή τροφοδοτεί αρχικά φορτίο 11.25Ω, ενώ η δεύτερη τροφοδοτεί φορτίο 12Ω. Ο δευτερογενής έλεγχος επενεργεί στο σύστημα με καθυστέρηση 5 sec, όπως και στις παραπάνω προσομοιώσεις.

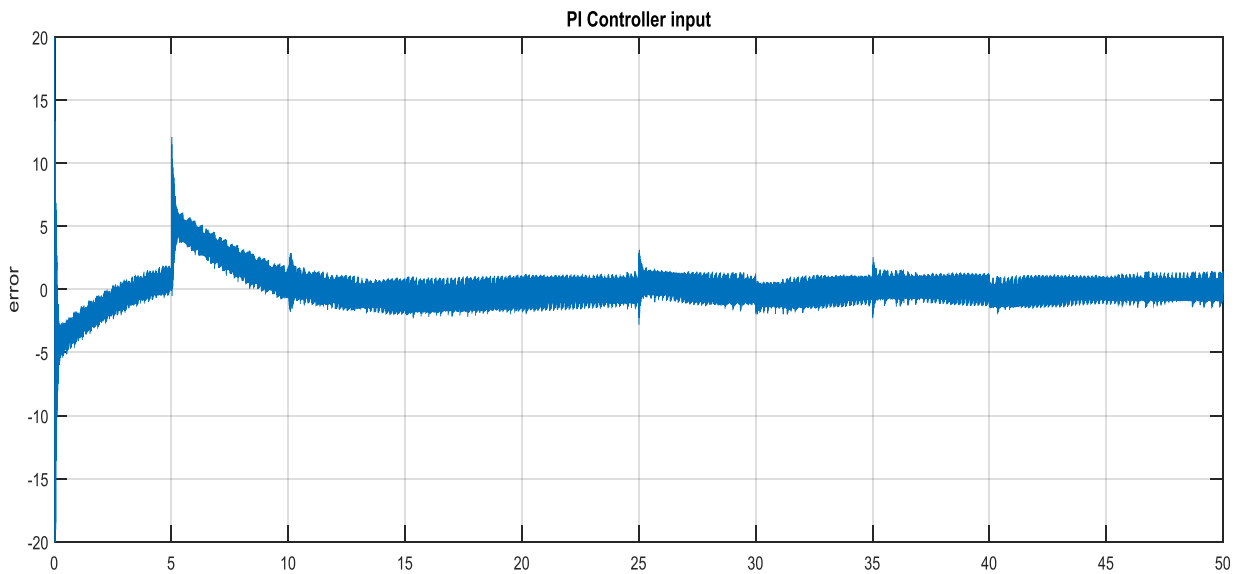
Αρχικά επενεργεί μόνο ο πρωτογενής έλεγχος και η τάσεις εξόδου των δύο μετατροπέων φτάνει τα 37.5V, παρουσιάζοντας έτσι πολύ σημαντική απόκλιση από την αναφορά που αγγίζει το 18.5%, μέχρι τη χρονική στιγμή $t=5\text{sec}$, όπου ο δευτερογενής έλεγχος αρχίζει να βελτιώνει την τάση εξόδου. Ο δευτερογενής έλεγχος καταφέρνει να φτάσει την τάση στα επιθυμητά επίπεδα, δηλαδή η τάση εξόδου του πρώτου μετατροπέα παίρνει την τιμή 45.7 V και του δεύτερου 45.8V παρουσιάζοντας πολύ μικρές αποκλίσεις 0.65% και 0.43% αντίστοιχα από την τάση αναφοράς.

Έπειτα τα φορτία των δύο πηγών αρχίζουν διαδοχικά να αυξάνονται. Αρχικά την $t=25\text{sec}$ αποσυνδέεται από το φορτίο της πρώτης πηγής, φορτίο 45Ω, αυξάνοντας έτσι το συνολικό φορτίο της πρώτης πηγής στα 15 Ω. Όπως παρατηρούμε και από την γραφική παράσταση της τάσης, οι τιμές εξόδου των δύο πηγών τείνουν να ξεπεράσουν τα 46 V με την πρώτη να φτάνει στα 46.4V και η δεύτερη στα 46.5V. Έπειτα επιδρά ο δευτερογενής έλεγχος και φτάνει την τάση στα επιθυμητά επίπεδα, δηλαδή $V_1=45.8\text{V}$ και $V_2=45.9\text{V}$. Στη συνέχεια αυξάνεται ξανά το φορτίο, του δεύτερου μετατροπέα αυτή τη φορά τη χρονική στιγμή $t=35\text{sec}$, καθώς αποσυνδέεται φορτίο 60 Ω και τελικά το συνολικό φορτίο φτάνει τα 15Ω. Οι τάσεις εξόδου των δύο μετατροπέων τείνουν πάλι να αυξηθούν φτάνοντας τα 46,1 V για

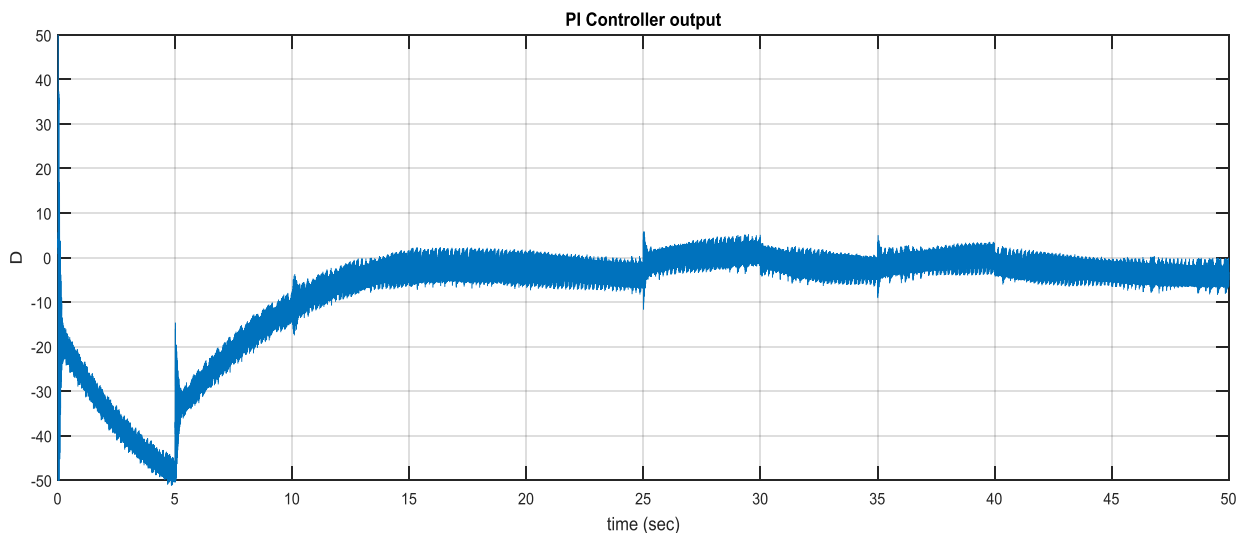
την πρώτη πηγή και τα 46,4V για τη δεύτερη, μέχρι όμως που επενεργεί ο δευτερεύον έλεγχος και επαναφέρει τις τάσεις φτάνοντας τα 45,6V για την πρώτη πηγή και τα 45,8 V για τη δεύτερη.



Εικόνα 4.25 : Τάσεις εξόδου (V_1 - V_2) των δύο πηγών καθώς μειώνεται η ζήτηση.



Εικόνα 4.26: Είσοδος PI ελεγκτή.



Εικόνα 4.27 : Έξοδος PI ελεγκτή.

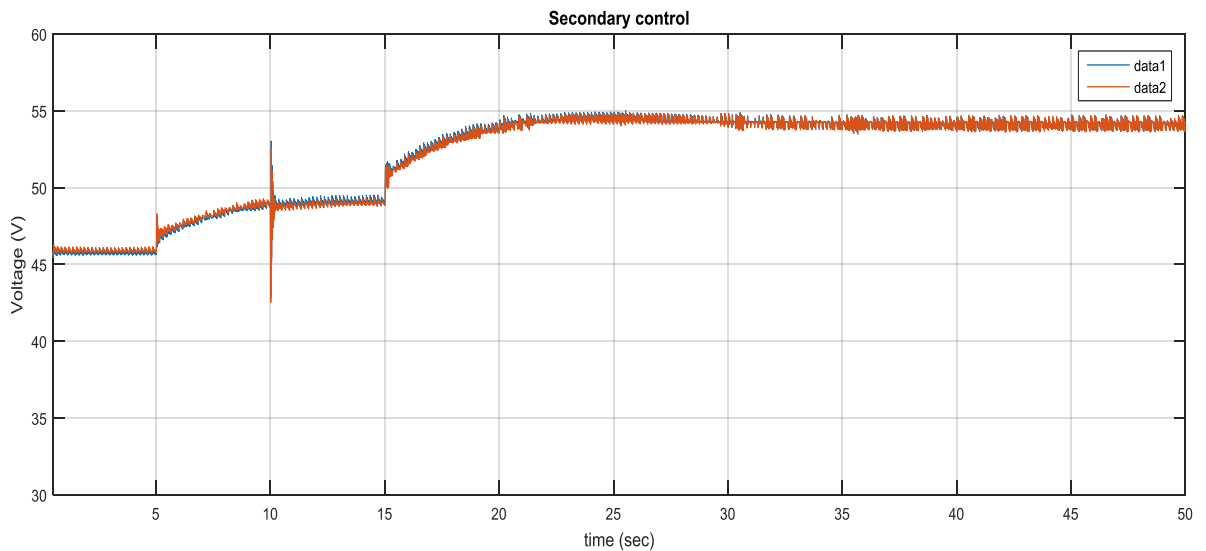
4.6. Ανάλυση ευαισθησίας ευστάθειας.

Η ευστάθεια τάσης ενός ΣΗΕ, αναφέρεται στην ικανότητα του να διατηρεί τα αποδεκτά επίπεδα τάσης υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας και αφού το σύστημα έχει υποστεί κάποια διαταραχή. Στην περίπτωση ενός ευσταθούς συστήματος, που όμως λειτουργεί κοντά στη όρια της ευστάθειας, είναι πιθανόν να δημιουργηθεί αστάθεια-είτε κατάρρευση τάσης, είτε ανύψωση- όταν συμβεί μια μεγάλη διαταραχή, για παράδειγμα με την αύξηση της ζήτησης.[4]

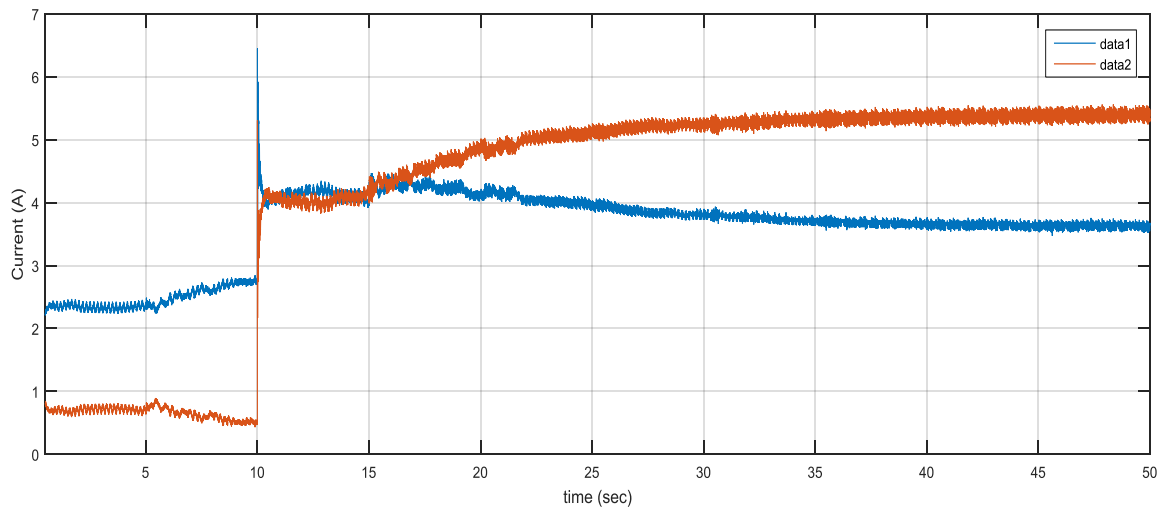
Στην παρούσα ενότητα θα μελετήσουμε την συμπεριφορά του μικροδικτύου, που έχουμε αναλύσει παραπάνω, όταν η ζήτησή του αυξάνεται υπερβολικά και ταυτόχρονα η λειτουργία του είναι οριακά ευσταθής.

Το μικροδίκτυο, όπως έχει μελετηθεί στο κεφάλαιο 2 είναι ευσταθές. Όμως βάσει της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώσαμε ότι με την αλλαγή της αντίστασης του ελέγχου στατισμού και πιο συγκεκριμένα μειώνοντας αυτή την αντίσταση, το σύστημά μας είναι οριακά ευσταθές. Θέτοντας την αντίσταση στατισμού ίση με $1,9 * 10^{-10}$ καταλήγουμε στις εξής ιδιοτιμές του συστήματος: $\lambda_1 = 0$, $\lambda_{2,3} = -5.2632 * 10^{12}$. Συνεπώς το σύστημα εξακολουθεί να είναι ευσταθές, όμως το γεγονός ότι η μία ιδιοτιμή ισούται με το μηδέν, καθιστά το σύστημα οριακά ευσταθές, με κίνδυνο την αστάθεια.

Για να μελετηθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η ευστάθεια, πραγματοποιήσαμε προσομοίωση θέτοντας τις προαναφερθείσες τιμές στις αντιστάσεις στατισμού. Ακόμη προκαλέσαμε διαταραχή στο σύστημα μεταβάλλοντας το φορτίο της δεύτερης μικροπηγής από $10^{10} \Omega$ σε 10Ω . Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι τα παρακάτω :



Εικόνα 4.28 : Τάσεις εξόδου μετά από διαταραχή.



Εικόνα 4.29 : Ρεύματα εξόδου μετατροπέων.

Ο δευτερογενής έλεγχος επενεργεί τη χρονική στιγμή $t=5$ sec. Η διαταραχή-μεταβολή του φορτίου συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t=10$ sec. Μέχρι να επιβληθεί ο δευτερεύον έλεγχος οι τάσεις εξόδου των μετατροπέων πλησιάζουν την τάση αναφοράς, όμως δεν γίνεται ίση κατανομή φορτίου εξαιτίας της μικρής τιμής της αντίστασης στατισμού. Στη συνέχεια επιβάλλεται ο δευτερογενής έλεγχος, ο οποίος ανυψώνει την τάση εξόδου και στους δύο μετατροπείς, διατηρώντας την όμως σε αποδεκτά επίπεδα, δηλαδή φτάνοντάς την στα 49 V παρουσιάζοντας απόκλιση από την τάση αναφοράς 6.5%. Μετά τη διαταραχή η τάση εξόδου της δεύτερης μικροπηγής μειώνεται ελαφρώς, εντός των επιθυμητών ορίων. Η επίδραση του δευτερογενούς ελέγχου, είναι αυτή που ανυψώνει την τάση, εκτός των επιθυμητών ορίων, δηλαδή οι τάσεις εξόδου των δύο μετατροπέων φτάνουν στα 54 V παρουσιάζοντας απόκλιση 17.4%

Τα επιτρεπτά όρια σε ένα ac μικροδίκτυο είναι $\pm 10\%$ της τάσης αναφοράς. Σε ένα dc μικροδίκτυο δεν έχουν καθοριστεί ακόμη τα όρια λειτουργίας της τάσης

εξόδου των μετατροπέων, καθώς τα dc μικροδίκτυα είναι σε στάδιο πιλοτικής λειτουργίας. Όμως χρησιμοποιώντας ως δεδομένο τα όρια ενός ac μικροδικτύου, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα 54 V είναι εκτός των ορίων αφού η τάση αποκλίνει κατά 17.4%. Συνεπώς το μικροδίκτυο αν και ευσταθές, είναι πιθανόν να λειτουργήσει εκτός των επιθυμητών ορίων.

Στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν μπορεί να συμβεί, καθώς οι μετατροπείς αποτελούνται από ηλεκτρονικά στοιχεία, στους συγκεκριμένους μετατροπείς από ένα τρανζίστορ IGBT και μία δίοδο και σε περίπτωση υπέρτασης θα ενεργοποιηθούν τα μέσα προστασίας τους αποκόπτοντας τις μικροπηγές από το σύστημα.

Επιπλέον, είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι, στην πραγματικότητα η τιμή αυτή της αντίστασης στατισμού, $1,9 \cdot 10^{-10}$ δεν υπάρχει περίπτωση να εφαρμοστεί, καθώς είναι πολύ μικρή και δημιουργεί πρόβλημα στην κατανομή φορτίου, με αποτέλεσμα να μην γίνεται ισόποσα η κατανομή.

Συμπεράσματα

Το μικροδίκτυο αποτελεί ένα νέο είδος Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Αποτελείται από τις μονάδες κατανεμημένης παραγωγής ισχύος από λίγα kW μέχρι 1-2 MW, από συσκευές αποθήκευσης και από τα φορτία. Τα μικροδίκτυα αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον, καθώς χαρακτηρίζονται από μία σειρά πλεονεκτημάτων. Αυτά είναι τα εξής:

- Δυνατότητα λειτουργίας μικροδικτύου είτε συνδεδεμένο στο δίκτυο, είτε αυτόνομα.
- Αξιοπιστία.
- Ελαχιστοποίηση απωλειών, καθώς η παραγωγή βρίσκεται πολύ κοντά στο φορτίο.
- Φιλικά προς το περιβάλλον, αφού συνήθως χρησιμοποιούνται Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.
- Χρήση μονάδων συμπαραγωγής.

Ως μονάδες αποθήκευσης ενέργειας των μικροδικτύων μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι σφόνδυλοι, οι πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας, οι συσσωρευτές, τα υπεραγωγία πηνία, η μέθοδος της αντλησιοταμίευσης και το σύστημα συμπίεσης αέρα. Οι μονάδες παραγωγής θα μπορούσαν να είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι ανεμογεννήτριες, οι κυψέλες καυσίμου, ή οι μικροτουρμπίνες.

Τα μικροδίκτυα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στα dc μικροδίκτυα και στα ac. Τα ac μικροδίκτυα είναι αρκετά διαδεδομένα, όμως τα dc είναι αυτά, τα οποία τελευταία κερδίζουν το ενδιαφέρον αφού διέπονται από επιπλέον πλεονεκτήματα. Αυτά είναι η εξάλειψη των ac/dc μετατροπών στην περίπτωση όπου τα φορτία είναι ηλεκτρονικές συσκευές, η απλή και με χαμηλό κόστος εγκατάσταση, ο ευκολότερος συντονισμός τους με τις μονάδες κατανεμημένης παραγωγής, ο απλούστερος πρωτογενής έλεγχος και οι λιγότερες απώλειες.

Βασικό αντικείμενο μελέτης των μικροδικτύων αποτελεί η ευστάθεια. Αυτό συμβαίνει αφού όταν το σύστημα λειτουργεί σε αστάθεια υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης τάσης, «black-out», ή άλλων διαταραχών. Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες ευστάθειας: α) την ευστάθεια τάσης, β) την ευστάθεια συχνότητας και γ) την ευστάθεια γωνίας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχοληθήκαμε με την ευστάθεια τάσης. Με τον όρο ευστάθεια τάσης εννοούμε την ικανότητα που έχει το σύστημα να λειτουργεί σε αποδεκτά επίπεδα τάσης ύστερα από μία διαταραχή. Βάσει της μελέτης που διεξήχθη, συμπεράναμε ότι για οποιεσδήποτε τιμές των αντιστάσεων στατισμού, των φορτίων του πηνίου και της αντίστασης της γραμμής το μικροδίκτυο θα είναι ευσταθές. Παρ' όλα αυτά για κάποιες τιμές των αντιστάσεων ή των φορτίων το σύστημα είναι στα όρια της ευστάθειας κάτι που, σε συνδυασμό με κάποια διαταραχή, θα μπορούσε να προκαλέσει είτε κατάρρευση τάσης είτε λειτουργία σε μη αποδεκτά όρια τάσης, παρ' όλο που το μικροδίκτυο είναι

ευσταθές. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε δοκιμή για πολύ μικρή τιμή της αντίστασης στατισμού, που οδηγεί σε οριακή ευστάθεια. Η διαταραχή, που τελικά οδήγησε σε αστάθεια καθώς η τάση υπερέβη το 10% της τάσης αναφοράς, ήταν η απότομη μείωση του φορτίου της μίας πηγής.

Τέλος παρουσιάστηκε ένα είδος ελέγχου, κατάλληλο να εφαρμοστεί σε dc μικροδίκτυο. Ο έλεγχος αυτός, εν αντιθέσει με το πρότυπο του ιεραρχικού ελέγχου, δεν απαιτεί έναν κεντρικό ελεγκτή. Βασίζεται στη μέθοδο ελέγχου στατισμού σε συνδυασμό με έναν αποκεντρωμένο ελεγκτή του μέσου όρου του ρεύματος (average current sharing- ACS). Κατά τη διαδικασία του ελέγχου στατισμού, τοπικοί ελεγκτές τοποθετούνται σε κάθε πηγή, συνεπώς δεν απαιτείται επικοινωνία στο σύστημα. Εάν η τιμή της αντίστασης στατισμού είναι χαμηλή, τότε η τάση κυμαίνεται στα επιθυμητά επίπεδα. Όμως τα ρεύματα των πηγών αποκλίνουν σημαντικά από τις επιθυμητές τιμές κι έτσι δεν είναι εφικτή η ισόποση κατανομή φορτίου. Εάν αυξηθεί η τιμή της αντίστασης στατισμού επιτυγχάνεται η ισόποση κατανομή φορτίου, όμως η τάση δεν παίρνει τις επιθυμητές τιμές. Γι αυτό το λόγο εφαρμόζεται ένας δευτερογενής έλεγχος, που απαιτεί μικρού εύρους επικοινωνία. Ο ελεγκτής κάθε πηγής επικοινωνεί με τους ελεγκτές των υπόλοιπων πηγών και στέλνει την τιμή του ρεύματος (ανά μονάδα) που παρέχεται από την πηγή. Χρησιμοποιώντας αυτή την πληροφορία ο ελεγκτής κάθε πηγής υπολογίζει το μέσο όρο των ρευμάτων. Στη συνέχεια υπολογίζεται η μετατόπιση, που είναι ο όρος που προστίθεται στην εξίσωση στατισμού και βελτιώνει την κατανομή φορτίου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις ενός dc μικροδικτύου, δύο παράλληλων πηγών όπου αρχικά οι δύο πηγές τροφοδοτούν ίσα φορτία, όπου διαπιστώθηκε η ορθή λειτουργία του δευτερεύοντος ελέγχου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με εναλλαγές στη ζήτηση, όπου ο πρωτογενής έλεγχος πέτυχε την ισόποση κατανομή φορτίου και ο δευτερογενής κατάφερε να φέρει την τάση στα επιθυμητά επίπεδα.

Βιβλιογραφία

- [1]. Microgrid: A conceptual solution. Robert H. Lasseter, Paolo Piagi, University of Wisconsin-Madison.
- [2]. Improving the performance of grid-tied ac microgrids including renewable generation by distributed energy storage. Molina M.G. and Zoba A.F.
- [3]. Γιώργος Κατσαρός :Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση μικροδικτύου.
- [4]. http://www.microplanet.gr/tutorials/batteries#lead_acid
- [5]. Γ. Χατζηβασιλειάδης, Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας για τα Νησιωτικά Συστήματα, Ρόδος: ΤΕΕ, 2009. [Online]. Διαθέσιμο: http://library.tee.gr/digital/m2385/m2385_hatzivasiliadis.pdf.
- [6] <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:762922/FULLTEXT01.pdf>
- [7] Review of Hierarchical Control in DC Microgrids. Dr. Christina Papadimitriou.
- [8] Analysis of Voltage Droop Control Method for dc Microgrids with Simulink: Modelling and Simulation.
- [9]. Distributed Generation: definition, benefits and issues. G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, W. D'haeseleer and R. Belmans.
- [10]. Distributed generation: a definition. Thomas Ackermann, Goran Andersson, Lennart Soder
- [11]. Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis.
- [12]. DC microgrids: Review and applications. Bronson Richard Blasi.
- [13]. Definition and Classification of Power System Stability. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions.
- [14]. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος, Βουρνάς Κωνσταντίνος, Παπαδιάς Β., Ντελκής Κ.
- [15]. Προσομοίωση και γραμμικοποίηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας για την ανάλυση βραχυπρόθεσμης ανάλυσης τάσης. Διδακτορική Διατριβή, Εμμανουήλ Ποταμιανάκης.
- [16] Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids. Sandeep Anand, Member, IEEE, Baylon G. Fernandes, Member, IEEE, and Josep M. Guerrero, Senior Member, IEEE.
- [17] Mohan :Power Electronics Converters Applications .

- [18] Ηλεκτρονικά ισχύος. Στέφανος Ν. Μανιάς Καθηγητής ΕΜΠ Εκδόσεις Συμewν Αθήνα 2014.
- [19] http://pcbheaven.com/wikipages/PID_Theory/?p=0
- [20]. http://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM08/pdf/am06-pid_16Sep06.pdf
- [21]. T. Van Cutsem, C. D. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Springer, 2008