



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

**Συγκριτική μελέτη μικροδικτύων συνεχούς και  
εναλλασσομένου ρεύματος.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Κ. Κεφαλάς

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2015





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

## Συγκριτική μελέτη μικροδικτύων συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος.

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Κ. Κεφαλάς

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... 2015.

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

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

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

**Αθήνα, Ιούλιος 2015**

.....

Νικόλαος Κ. Κεφαλάς

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

Copyright © Κεφαλάς Νικόλαος, 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.

## Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή μου ανατέθηκε από τον καθηγητή κ. Ν. Χατζηαργυρίου, τον οποίο και ευχαριστώ που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα σημαντικού ενδιαφέροντος.

Ευχαριστώ επίσης την ερευνήτρια κα Χριστίνα Παπαδημητρίου, για την καθοδήγησή της και τις εύστοχες υποδείξεις της, καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου, για τη στήριξή τους στην προσπάθειά μου.



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των μικροδικτύων DC και AC καθώς επίσης και η μεταξύ τους σύγκριση. Η έμφαση τοποθετείται στην τοπολογία, την προστασία και τον έλεγχο των μικροδικτύων. Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο, το οποίο είναι εισαγωγικό, παρουσιάζονται η έννοια του μικροδικτύου, στοιχεία σχετικά με τη λειτουργία και τις συνιστώσες του, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ενώ παρέχονται και οι ορισμοί του AC και DC μικροδικτύου.

Το 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αφορά στην τοπολογία των δύο τύπων μικροδικτύου. Δεδομένου ότι η τοπολογία των AC μικροδικτύων έχει έντονες ομοιότητες με εκείνη των παραδοσιακών δικτύων διανομής, γίνεται μια σύντομη αναφορά σε αυτήν, ενώ αναλύεται με περισσότερη λεπτομέρεια η τοπολογία των μικροδικτύων DC, με θέματα όπως τα επίπεδα τάσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, η διασύνδεση με τα υπάρχοντα δίκτυα μεταφοράς και διανομής, η γείωση και η επαναχρησιμοποίηση των καλωδίων AC για DC εφαρμογές.

Στο πρώτο μέρος του 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου, το οποίο αφορά την προστασία των AC μικροδικτύων, αναφέρονται αρχικά η νοοτροπία πίσω από την προστασία των ηλεκτρικών δικτύων, καθώς και οι μέθοδοι προστασίας των παραδοσιακών συστημάτων διανομής, προτού παρατεθούν ορισμένα παραδείγματα προστασίας AC μικροδικτύων. Στη συνέχεια, αναλύεται η προστασία των DC μικροδικτύων. Τονίζονται ιδιαίτερες οι ιδιότητες των DC ρευμάτων σφάλματος, τα οποία διαφοροποιούν τις απαιτήσεις από την προστασία, σε σχέση με τα AC δίκτυα. Έπειτα, αναφέρονται ορισμένες συσκευές προστασίας και παρέχονται κάποιες προτάσεις για την προστασία των μικροδικτύων DC.

Το 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο αφορά τον έλεγχο των μικροδικτύων. Και για τους δύο τύπους μικροδικτύου γίνεται αναφορά στον ιεραρχικό έλεγχο, τον κλασσικό έλεγχο droop και τις τροποποιήσεις του, καθώς και σε εναλλακτικές υλοποιήσεις του δευτερογενούς ελέγχου. Για τα AC μικροδίκτυα, αναφέρεται επίσης ο έλεγχος με χρήση πρακτόρων.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο, επιχειρείται να προσομοιωθεί ο ιεραρχικός έλεγχος ενός DC μικροδικτύου χρησιμοποιώντας το πακέτο Simulink.

Λέξεις κλειδιά: AC μικροδίκτυο, DC μικροδίκτυο, τοπολογία, προστασία, δίκτυο διανομής, διεσπαρμένη παραγωγή, ιεραρχικός έλεγχος, έλεγχος droop, προσομοίωση, Simulink.





## Abstract

The present thesis aims to present and compare the DC and AC microgrids. Emphasis is placed on the topology, protection and control issues of microgrids. The thesis is structured as follows:

In the 1<sup>st</sup> chapter, which is introductory, the concept of microgrid is presented, as well as elements concerning its function and its components, advantages and disadvantages, while the definitions of the AC and DC microgrids are also provided.

The 2<sup>nd</sup> chapter regards the topology of the two types of microgrid. Given that the topology of the AC microgrids bears a strong similarity with that of the traditional distribution networks, this is briefly referred to, while the topology of DC microgrids is analysed more thoroughly, making reference to issues such as the voltage levels that can be used, the interconnection with the existing transmission and distribution networks, grounding and the reutilisation of AC cables for DC applications.

In the first part of Chapter 3, which concerns the protection of AC microgrids, the mentality behind the protection of electric networks as well as the protection methods of traditional distribution networks are referred to, before exhibiting certain examples of AC microgrids protection. Further on, the protection of DC microgrids is analysed. The properties of DC fault currents, which alter the protection demands with respect to AC networks are highlighted. Moreover, some protection devices are referred to and some propositions for the protection of DC microgrids are offered.

The 4<sup>th</sup> chapter deals with the control of microgrids. Hierarchical control, classic droop control and its modifications, as well as alternative implementations of the secondary control are referred to for both types of microgrid. In the case of AC microgrids, a reference is also made to control by means of agents.

In the 5<sup>th</sup> chapter, it is attempted to simulate the hierarchical control of a DC microgrid, using the Simulink package.

Key words: AC microgrid, DC microgrid, topology, protection, distribution network, distributed generation, hierarchical control, droop control, simulation, Simulink.



## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Μικροδίκτυα.....	15
1.1 Εισαγωγή .....	15
1.2 Λειτουργικές καταστάσεις ενός μικροδικτύου. ....	16
1.3 Δυναμικές αλληλεπιδράσεις του μικροδικτύου με το κυρίως δίκτυο.....	17
1.4 Ενεργητικό σύστημα διανομής μέσω του σεναρίου του μικροδικτύου.....	17
1.5 Τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα του μικροδικτύου. ....	18
1.6 Προκλήσεις και μειονεκτήματα στην ανάπτυξη των μικροδικτύων. ....	19
1.7 Διαχείριση και λειτουργικές παράμετροι ενός μικροδικτύου.....	20
1.8 Διεσπαρμένη παραγωγή.....	21
1.9 Διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας. ....	22
1.10 Μικροδίκτυα AC.....	24
1.10.1 Ορισμός AC μικροδικτύου .....	24
1.10.2 Πλεονεκτήματα των AC μικροδικτύων. ....	24
1.10.3 Προκλήσεις που αντιμετωπίζονται όταν πρόκειται για AC μικροδίκτυα.	24
1.11 Μικροδίκτυα DC.....	25
1.11.1 Ορισμός μικροδικτύου DC. ....	25
1.11.2 Διανομή LVDC (χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος). ....	26
1.11.3 Αιτίες για την ανάπτυξη των DC μικροδικτύων. ....	27
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Συγκριτική μελέτη για την Τοπολογία των μικροδικτύων DC και AC.	31
2.1 Τοπολογία των μικροδικτύων AC. ....	31
2.2. Τοπολογία δικτύων DC.....	33
2.3 Διασυνδέοντας ένα δίκτυο LVDC με AC δίκτυα. ....	36
2.4 Τα επίπεδα τάσης ενός LVDC δικτύου. ....	37
2.5 Διατάξεις των καλωδίων LVDC.....	39
2.2.5 Συστήματα γείωσης για τα LVDC συστήματα. ....	46
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Συγκριτική μελέτη για την Προστασία των μικροδικτύων DC και AC.	49
3.1 Γενικά για την προστασία ηλεκτρικών δικτύων. ....	49
3.2 Προστασία AC μικροδικτύων.....	49
3.2.1 Εισαγωγικά για την προστασία των AC μικροδικτύων.....	49
3.2.2 Η προστασία των παραδοσιακών δικτύων διανομής.....	51
3.2.3 Είδη προστασίας των παραδοσιακών δικτύων διανομής.....	52
3.2.4 Η επίδραση της σύνδεσης μονάδων ΔΠ στην προστασία. ....	58
3.2.5 Παραδείγματα προστασίας μικροδικτύων AC. ....	60
3.2.5.α Παράδειγμα 1 <sup>ο</sup> . ....	60
3.2.5.β Παράδειγμα 2 <sup>ο</sup> . ....	65

3.2.5.γ Παράδειγμα 3 <sup>ο</sup> .....	70
3.3 Προστασία μικροδικτύων DC.....	75
3.3.1 Είδη DC σφαλμάτων.....	75
3.3.2 Γενικά για τα ρεύματα σφάλματος. ....	75
3.3.3 Χαρακτηριστικά των DC ρευμάτων βραχυκύκλωσης.....	76
3.3.4 Παραδείγματα προστασίας μικροδικτύων DC. ....	86
3.3.6 Συσκευές προστασίας. ....	90
3.3.7 Προστατευτικοί ηλεκτρονόμοι και εξοπλισμός μετρήσεων. ....	91
3.3.8 Σχεδιασμός του συστήματος προστασίας. ....	92
3.3.9 Μία μέθοδος DC προστασίας. ....	93
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : Συγκριτική μελέτη για τον Έλεγχο των μικροδικτύων AC και DC.....	99
4.1 Ποιοι είναι οι στόχοι του ελέγχου ενός μικροδικτύου.....	99
4.2 Μέθοδοι ελέγχου AC μικροδικτύων.....	100
4.2.1 Ιεραρχικός έλεγχος μικροδικτύων. ....	100
4.2.2 Τροποποιημένες τεχνικές droop. ....	110
4.2.3 Κατανεμημένος δευτερογενής έλεγχος.....	119
4.2.5 Έλεγχος βασισμένος σε πράκτορες (MAS control).....	123
4.3 Μέθοδοι ελέγχου DC μικροδικτύων.....	126
4.3.1 Ιεραρχικός έλεγχος DC μικροδικτύων.....	127
4.3.2 Περιορισμοί της συμβατικής droop μεθόδου στα DC μικροδίκτυα. ....	130
4.3.3 Εναλλακτικές μέθοδοι droop. ....	132
4.3.4 Εναλλακτικές προσεγγίσεις για τον δευτερογενή έλεγχο.....	145
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> : Προσομοίωση του Ιεραρχικού Ελέγχου ενός DC μικροδικτύου. ....	153
5.1 Εισαγωγή. ....	153
5.2 Τα μοντέλα που υλοποιήθηκαν.....	153
5.2.1 Το μικροδίκτυο προς προσομοίωση. ....	153
5.2.2 Το μοντέλο του πρωτογενούς ελέγχου. ....	154
5.2.3 Το μοντέλο του δευτερογενούς ελέγχου.....	154
5.2.4 Το μοντέλο του τριτογενούς ελέγχου. ....	155
5.3 Αποτελέσματα.....	155
5.3.1 Οι χαρακτηριστικές droop των πηγών.....	155
5.3.2 Η επίδραση του πρωτογενούς ελέγχου στο διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των πηγών.....	157
5.3.3 Η απόκριση του πρωτογενούς και του δευτερογενούς ελέγχου για διάφορες μεταβολές του φορτίου.....	160
5.3.4 Ο βρόχος συγχρονισμού. ....	162
5.3.5 Ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του μικροδικτύου και του κυρίως δικτύου. ...	163

Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις.....	167
Συμπεράσματα.....	167
Μελλοντικές κατευθύνσεις.....	168
Βιβλιογραφία.....	169



## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Μικροδίκτυα.

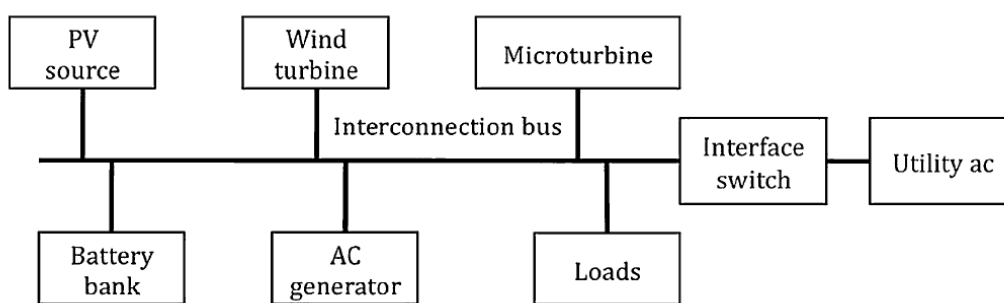
### 1.1 Εισαγωγή

Ένα μικροδίκτυο είναι ένα τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο 1) περιλαμβάνει καταναμημένες μονάδες παραγωγής ισχύος, φορτία, μονάδες προστασίας και μέσα αποθήκευσης, 2) μπορεί να λειτουργεί συνδεδεμένο στο έναντι ηλεκτρικό δίκτυο, ή 3) σε νησιδοποίηση, κατά την οποία η ζήτηση του μικροδικτύου καλύπτεται από τις μονάδες παραγωγής εντός του μικροδικτύου.

Με δεδομένη την ύπαρξη καταναμημένης παραγωγής, το μικροδίκτυο επομένως μπορεί να είναι ένα κτίριο ή ένα συγκρότημα κτιρίων, ένα τμήμα του δικτύου διανομής, ένα σύνολο δικτύων που βρίσκονται ιεραρχικά κάτω από έναν υποσταθμό διανομής, το ηλεκτρικό δίκτυο ενός οικισμού, μία συνοικία/ περιφέρεια, ένα βιομηχανικό πάρκο, ένα απομονωμένο χωριό, ένα πλοίο, ένα αεροπλάνο και ούτω καθεξής.

Η καταναμημένη παραγωγή μπορεί να είναι εναλλάκτες εσωτερικής κάυσης, μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου, εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, ανεμογεννήτριες, μηχανές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, κοκ. Το δίκτυο θα περιλαμβάνει επίσης μονάδες κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως κινητήρες, φορτία για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό, φορτία βιομηχανικής επεξεργασίας, καθώς επίσης και αναδυόμενα φορτία, όπως ηλεκτρικά οχήματα με V2G (Vehicle to Grid) δυνατότητες.

Επιπλέον, το μικροδίκτυο θα περιλαμβάνει κατάλληλα κυκλώματα τροφοδοσίας, κυκλώματα διακλάδωσης, μετασχηματιστές, γειώσεις, και στοιχεία προστασίας για να παρέχουν έναν ασφαλή και αξιόπιστο τρόπο για την παροχή ηλεκτρισμού, ενώ πιθανώς θα ανταλλάσσει (εισάγει ή εξάγει) ισχύ με ένα ηλεκτρικό δίκτυο μεγαλύτερης κλίμακας, στο οποίο θα είναι συνδεδεμένο το μικροδίκτυο.



Εικόνα 1.1 Η τυπική δομή ενός μικροδικτύου [1].

Αρχικά, η περιγραφή του τοπικού δικτύου παραγωγής και κατανάλωσης φαίνεται να μην διαφέρει από τα σύγχρονα, διασυνδεδεμένα με το δίκτυο, συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες. Παρόλα αυτά, το προσδιοριστικό στοιχείο του μικροδικτύου είναι ότι οι ελεγχόμενες πηγές συνδυάζονται μεταξύ τους, προκειμένου να στηρίξουν το τοπικό δίκτυο σε ισχύ (διασυνδεδεμένα ή μη) αλλά και να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες στο έναντι

δίκτυο (διασυνδεδεμένα). Αυτό το χαρακτηριστικό του μικροδικτύου υπάρχει χάρη στη δυνατότητα ελέγχου των πηγών που βρίσκονται σε αυτό [1].

Από την πλευρά του δικτύου, το κύριο πλεονέκτημα ενός μικροδικτύου είναι ότι μπορεί κανείς να το μεταχειριστεί σαν μία ελεγχόμενη οντότητα μέσα στο ΣΗΕ (σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας). Το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει ως ένα ενιαίο συνολικό φορτίο ή πηγή. Αυτό εξασφαλίζει την εύκολη ελεγκσιμότητά του και τη συμμόρφωσή του με τους κανόνες του δικτύου, χωρίς να υποβαθμίζει την αξιοπιστία και την ασφάλεια του κύριου δικτύου. Από την πλευρά του καταναλωτή, τα μικροδίκτυα είναι ωφέλιμα για να καλύπτονται τοπικά οι απαιτήσεις για ηλεκτρισμό και θερμότητα. Μπορούν να παρέχουν αδιάλειπτη ισχύ, να βελτιώσουν την τοπική αξιοπιστία, να μειώσουν τις απώλειες των γραμμών τροφοδοσίας και να παρέχουν τοπική υποστήριξη της τάσης. Από περιβαλλοντικής σκοπιάς, τα μικροδίκτυα μειώνουν την περιβαλλοντική ρύπανση και την υπερθέρμανση του πλανήτη μέσω της χρησιμοποίησης τεχνολογίας χαμηλών εκπομπών άνθρακα.

Παρόλα αυτά, για να επιτευχθεί μία σταθερή και ασφαλής λειτουργία, μία σειρά από τεχνικά, ρυθμιστικά και οικονομικά θέματα πρέπει αν επιλυθούν, προτού τα μικροδίκτυα γίνουν ένα συνηθισμένο φαινόμενο. Μερικές προβληματικές περιοχές που θα απαιτούσαν δέουσα προσοχή είναι η διαλείπουσα και εξαρτώμενη από το κλίμα φύση της παραγωγής των ΑΠΕ, το χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο των καυσίμων των μονάδων ΔΠ, καθώς επίσης και η απουσία προτύπων και κανονισμών για τη λειτουργία των μικροδικτύων σε συγχρονισμό με το κυρίως δίκτυο [2].

Δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου του μικροδικτύου είναι τα “peer-to-peer” και “plug-and-play”. Το πρώτο σημαίνει ότι κανένα στοιχείο δεν είναι κρίσιμο για τη λειτουργία του μικροδικτύου. Με το δεύτερο εννοείται ότι μια μονάδα είναι δυνατόν να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου και να ενταχθεί παρέχοντας ενέργεια αξιόπιστα, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα σφάλματος [3].

## **1.2 Λειτουργικές καταστάσεις ενός μικροδικτύου.**

Η υψηλού επιπέδου λειτουργικότητα του μικροδικτύου οφείλεται στην ποικιλία των λειτουργικών καταστάσεων, στις οποίες αυτό μπορεί να βρεθεί. Η κατάλληλη συνδεσμολογία και ο έλεγχος του μικροδικτύου είναι εκείνα που του επιτρέπουν να βρεθεί σε μια πλειάδα λειτουργικών καταστάσεων. Οι λειτουργικές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα μικροδίκτυο περιγράφονται παρακάτω:

Αλληλεπίδραση με το κύριο δίκτυο στη μόνιμη κατάσταση

-Διασύνδεση: Ένα μικροδίκτυο, το οποίο είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένο με το κυρίως ηλεκτρικό δίκτυο, λέγεται ότι βρίσκεται σε αλληλεπίδραση με το κυρίως δίκτυο. Σε αυτήν την λειτουργική κατάσταση, το μικροδίκτυο δεν υποχρεούται απαραίτητως να ισορροπήσει την εσωτερική παροχή και κατανάλωσή του, διότι οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ παροχής και κατανάλωσης μπορεί να απορροφηθεί από το κυρίως δίκτυο.

-Νησιδοποίηση: Ένα μικροδίκτυο, το οποίο δεν συνδέεται σε κανένα κύριο δίκτυο λέγεται ότι είναι απομονωμένο από το κύριο δίκτυο ή έχει αποσυνδεθεί από το ενάντι δίκτυο (νησιδοποίηση). Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας, το μικροδίκτυο πρέπει να ισορροπήσει την εσωτερική παροχή και κατανάλωση. Οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ αυτών των δύο θα πρέπει να απορροφηθεί από τα αποθηκευτικά μέσα ενέργειας (εντός) του μικροδικτύου ή, εναλλακτικά, θα πρέπει να περικοπεί φορτίο.



Ομαλή Μετάβαση μεταξύ των δύο καταστάσεων:

Ένα μικροδίκτυο, το οποίο είναι ικανό να μεταβαίνει μεταξύ των 2 καταστάσεων χωρίς καμμία ασυνέχεια στην παροχή υπηρεσιών προς τα φορτία στο εσωτερικό του. Αυτή η μετάβαση είναι ιδιαίτερα επιθυμητή σε εγκαταστάσεις που απαιτούν υψηλά επίπεδα ποιότητας ισχύος [1].

### **1.3 Δυναμικές αλληλεπιδράσεις του μικροδικτύου με το κυρίως δίκτυο.**

Με την χωρητικότητα του μικροδικτύου να είναι αρκετά μικρή, η ευστάθεια του κυρίως δικτύου δεν επηρεάζεται όταν είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο. Στο μέλλον, ωστόσο, οπότε τα μικροδίκτυα θα απαντώνται συχνότερα, με μεγαλύτερη διείσδυση των μονάδων ΔΠ, η ευστάθεια και η ασφάλεια του κυρίως δικτύου θα επηρεάζονται σημαντικά. Σε μια τέτοια περίπτωση, η δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του μικροδικτύου και του κυρίως δικτύου θα είναι ένα θέμα-κλειδί στην λειτουργία και την διαχείριση και των δύο αυτών δικτύων. Παρόλα αυτά, είναι ανάγκη τα μικροδίκτυα να σχεδιάζονται κατάλληλα για να ρυθμίζονται οι δυναμικές επιδράσεις τους στο κυρίως δίκτυο, έτσι ώστε η συνολική ευστάθεια και αξιοπιστία του συνολικού συστήματος να βελτιώνεται σημαντικά [1].

### **1.4 Ενεργητικό σύστημα διανομής μέσω του σεναρίου του μικροδικτύου.**

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται σε μια εποχή μεγάλης μετάβασης από σταθερά παθητικά δίκτυα διανομής με μονοκατευθυντική μεταφορά ηλεκτρισμού σε ενεργητικά δίκτυα διανομής με δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρισμού σε δύο κατευθύνσεις. Τα δίκτυα διανομής που δεν διαθέτουν μονάδες DG είναι παθητικά, δεδομένου ότι η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από το εθνικό δίκτυο στους καταναλωτές μέσω του δικτύου διανομής. Γίνεται ενεργητικό όταν προστίθενται σε αυτό μονάδες DG, γεγονός που οδηγεί στη μεταφορά ισχύος σε δύο κατευθύνσεις στα δίκτυα. Ως ένας τρόπος ενσωμάτωσης των μονάδων ΔΠ, το μικροδίκτυο αποτελεί έναν τρόπο μέσω του οποίου η μετατροπή του ηλεκτρικού δικτύου από παθητικό σε ενεργητικό θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

Η επι του παρόντος ‘fit-and-forget’ στρατηγική περίληψης στο δίκτυο των μονάδων ΔΠ θα πρέπει να αλλάξει όταν θα έχουμε να κάνουμε με ενεργητικά δίκτυα. Έχει καταδειχθεί ότι η εφαρμογή μεθόδων ενεργητικού δικτύου μπορεί να οδηγήσει στην υποστήριξη περισσότερων συνδέσεων μονάδων ΔΠ, σε σχέση με δίκτυα χωρίς ενεργητική διαχείριση.

Διάφοροι παράγοντες συντείνουν στην εξέλιξη των ενεργητικών δικτύων διανομής, όπως α) οι προσδοκίες των καταναλωτών για αξιόπιστη και υψηλής ποιότητας διανομή ηλεκτρισμού, β) η επιθυμία των διαμορφωτών πολιτικής για την ενσωμάτωση ανανεώσιμων μονάδων ΔΠ μαζί με συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, γ) οι δεσμεύσεις για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και δ) η προσπάθεια να κινητοποιηθούν οι διαχειριστές του δικτύου διανομής στην κατεύθυνση της καλύτερης αξιοποίησης και διαχείρισης του κεφαλαίου με το να αναβάλλουν την αντικατάσταση παλιών συσκευών κτλ.

## 1.5 Τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα του μικροδικτύου.

Η ανάπτυξη του μικροδικτύου είναι πολλά υποσχόμενη για την βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας των ακόλουθων πλεονεκτημάτων:

- 1) Περιβαλλοντικά θέματα – Τα μικροδίκτυα θα έχουν πολύ μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από τους μεγάλους θερμικούς συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παρά το γεγονός ότι η επιτυχημένη εφαρμογή τεχνολογιών σύλληψης και αποθήκευσης άνθρακα θα μειώσουν δραστικά τις περιβαλλοντικές επιδράσεις. Κάποια από τα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων υπό την περιβαλλοντική έννοια είναι τα ακόλουθα:
  - a. Μείωση των εκπομπών αερίων και σωματιδίων λόγω του στενού ελέγχου της διαδικασίας κάυσης.
  - b. Η φυσική εγγύτητα των καταναλωτών με τις μικροπηγές μπορεί να αυξήσει την ευσυνειδησία των καταναλωτών σχετικά με τη νουνεχή χρησιμοποίηση της ενέργειας.
- 2) Επενδυτικά και λειτουργικά θέματα – Η μείωση της φυσικής και ηλεκτρικής απόστασης μεταξύ των μικροπηγών και των φορτίων μπορεί να συνεισφέρει στην:
  - a. Βελτίωση διαχείρισης αέργου ισχύος του συνολικού συστήματος, και, με τον τρόπο αυτό, βελτίωση του προφίλ της τάσης.
  - b. Μείωση του ‘συνωστισμού ενέργειας’ στις γραμμές μεταφοράς και διανομής.
  - c. Μείωση των απωλειών των παραπάνω γραμμών περίπου κατά 3%.
  - d. Μείωση/αναβολή των επενδύσεων για την επέκταση των συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς με την κατάλληλη αξιοποίηση του υπάρχοντος υλικού.
- 3) Ποιότητα ισχύος – Η βελτίωση στην αξιοπιστία και την ποιότητα ισχύος επιτυγχάνεται χάρη:
  - a. Στην αποκεντροποίηση της παραγωγής.
  - b. Την καλύτερη αντιστοίχιση προσφοράς και ζήτησης.
  - c. Τη μείωση της επίδρασης διακοπών μεγάλης κλίμακας στην παραγωγή και τη μεταφορά.
  - d. Την ελαχιστοποίηση του χρόνου αργίας και τη βελτίωση της διαδικασίας αποκατάστασης, μέσω των λειτουργιών black start των μικροπηγών.
- 4) Εξοικονόμηση κόστους:
  - a. Μία σημαντική εξοικόνηση προκύπτει από την χρησιμοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας από τις μονάδες ΣΗΘ (συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας). Καθώς οι μονάδες ΣΗΘ βρίσκονται κοντά στα φορτία των καταναλωτών, καμμία ουσιαστική υποδομή δεν απαιτείται για την μεταφορά θερμότητας. Αυτό οδηγεί σε μια συνολική ενεργειακή αποτελεσματικότητα μεγαλύτερη από 80%, ενώ η μέγιστη τιμή της είναι 40% στο συμβατικό ηλεκτρικό σύστημα.
  - b. Η εξοικονόμηση κόστους επιτυγχάνεται επίσης και μέσω της ενσωμάτωσης διαφόρων μικροπηγών. Καθώς τοποθετούνται τοπικά με φιλοσοφία ‘plug-and-play’, τα έξοδα μεταφοράς και διανομής είτε μειώνονται δραστικά, είτε εξαλείφονται. Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός μπορεί να μοιραστεί τοπικά μεταξύ των καταναλωτών, το οποίο

επίσης μειώνει την ανάγκη να εισαχθεί/εξαχθεί ενέργεια από/προς το κεντρικό δίκτυο διαμέσου μακρών καλωδίων τροφοδοσίας.

- 5) Θέματα της αγοράς: – Τα ακόλουθα πλεονεκτήματα αποκτώνται στην περίπτωση συμμετοχής στις αγορές:
- a. Η ανάπτυξη διαδικασιών λειτουργίας καθοδηγούμενων από την αγορά θα οδηγήσει σε σημαντική μείωση της εμπορικής δύναμης που ασκείται από τις καθιερωμένες εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
  - b. Τα μικροδίκτυα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες.
  - c. Η ευρεία εφαρμογή αυτοτελών ‘plug-and-play’ μικροπηγών μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση της τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
  - d. Η κατάλληλη οικονομική ισορροπία μεταξύ της επένδυσης στο δίκτυο και της χρησιμοποίησης διεσπαρμένης παραγωγής είναι πιθανό να μειώσει την μακροπρόθεσμη τιμή αγοράς του ηλεκτρισμού κατά περίπου 10% [2].

## **1.6 Προκλήσεις και μειονεκτήματα στην ανάπτυξη των μικροδικτύων.**

Παρά τα πιθανά πλεονεκτήματα, η ανάπτυξη των μικροδικτύων υποφέρει από διάφορες προκλήσεις και μειονεκτήματα, ως ακολούθως:

- 1) Υψηλά κόστη των μονάδων ΔΠ (distributed energy resources) – Το υψηλό κόστος εγκατάστασης για τα μικροδίκτυα είναι ένα μεγάλο μειονέκτημα. Αυτό μπορεί να μειωθεί με την έκδοση ορισμένων επιδοτήσεων από κρατικούς φορείς προκειμένου να ενθαρρυνθούν οι επενδύσεις. Αυτό θα πρέπει να γίνει τουλάχιστον για μία μεταβατική περίοδο.
- 2) Τεχνικές δυσκολίες – Αυτές σχετίζονται με την έλλειψη τεχνικής εμπειρίας στον έλεγχο ενός μεγάλου αριθμού plug-and-play μικροπηγών. Απαιτείται έρευνα για την διαχείριση, προστασία και τον έλεγχο των μικροδικτύων και επίσης για την επιλογή, τη διαστασιοποίηση και την τοποθέτηση των μικροπηγών. Ειδικές τηλεπικοινωνιακές υποδομές και πρωτόκολλα επικοινωνίας πρέπει να αναπτυχθούν. Ωστόσο, η έλλειψη κατάλληλης υποδομής επικοινωνιών στις αγροτικές περιοχές είναι ένα πιθανό πρόβλημα στην εφαρμογή των αγροτικών μικροδικτύων. Εξάλλου, η οικονομική υλοποίηση για την άψογη μετάβαση μεταξύ των λειτουργικών καταστάσεων είναι ακόμα μία μείζονα πρόκληση, αφού οι διαθέσιμες λύσεις για να ξανακλείσει η προσαρμοστική προστασία με έλεγχο του συγχρονισμού είναι αρκετά ακριβές.
- 3) Απουσία προτύπων – Δεδομένου ότι τα μικροδίκτυα είναι μία σχετικά καινούρια περιοχή, δεν υπάρχουν στάνταρ που να αφορούν τα θέματα της λειτουργίας και της προστασίας τους. Θα πρέπει να εξεταστούν δεδομένα για την ποιότητα ισχύος για διαφορετικούς τύπους πηγών, και να καθοριστούν στάνταρ και πρωτόκολλα για την ενσωμάτωση των μικροπηγών και τη συμμετοχή τους στις συμβατικές και τις απελευθερωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επίσης οδηγίες για την ασφάλεια και την προστασία. Στάνταρ όπως το G59/1 και το IEEE 1547 θα πρέπει να επαναξιολογηθούν και να αναδομηθούν προκειμένου για μια επιτυχή εφαρμογή των μικροδικτύων και των ενεργητικών δικτύων διανομής.

- 4) Διαχειριστικά και νομικά εμπόδια – Στις περισσότερες χώρες, δεν υπάρχουν νομοθεσία και κανονισμοί που να ρυθμίζουν την λειτουργία των μικροδικτύων. Οι κυβερνήσεις μερικών χωρών ενθαρρύνουν την εδραίωση των οικολογικών μικροδικτύων, αλλά τυποποιημένοι κανονισμοί για εφαρμογή στο μέλλον δεν έχουν ακόμη διαμορφωθεί.
- 5) Αγοραστικό μονοπώλιο – Αν επιτραπεί στα μικροδίκτυα να τροφοδοτούν αυτόνομα ενέργεια στα φορτία προτεραιότητας κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε αστοχίας του κυρίως δικτύου, το κύριο ερώτημα που ανακύπτει είναι ποιος θα ελέγχει τότε την τιμή της παρεχόμενης ενέργειας κατά την περίοδο που το κυρίως δίκτυο δεν είναι διαθέσιμο. Αφού το κυρίως δίκτυο θα είναι αποσυνδεδεμένο και η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας θα χάσει τον έλεγχο της πάνω στην τιμή της ενέργειας, τα μικροδίκτυα μπορεί να πουλούν την ενέργεια σε πολύ υψηλή τιμή, εκμεταλλευόμενα το αγοραστικό τους μονοπώλιο. Ως εκ τούτου, κατάλληλη οργάνωση της αγοράς απαιτείται, προκειμένου να είναι βιώσιμη η ανάπτυξη των μικροδικτύων [2].

### **1.7 Διαχείριση και λειτουργικές παράμετροι ενός μικροδικτύου.**

- 1) Προκειμένου να διατηρηθεί η ποιότητα ισχύος, το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος θα πρέπει να διατηρείται σε μια βραχυπρόθεσμη βάση.
- 2) Ένα μικροδίκτυο θα πρέπει να λειτουργεί αυτόνομα σε περιοχές όπου δεν υπάρχει παροχή από το κυρίως δίκτυο ή συνδεδεμένο με ένα μεγαλύτερο δίκτυο διανομής. Ο διαχειριστής του μικροδικτύου θα πρέπει να είναι σε θέση να επιλέγει τον τρόπο λειτουργίας μέσα σε ένα κατάλληλο ρυθμιστικό πλαίσιο.
- 3) Η παραγωγή, η παροχή και η αποθήκευση ενέργειας θα πρέπει να σχεδιάζεται κατάλληλα, αναφορικά με την ζήτηση από το φορτίο του μικροδικτύου και το μακροπρόθεσμο ισοζύγιο ενέργειας.
- 4) Εποπτικός έλεγχος και σύστημα μέτρησης βασισμένο στην λήψη μετρήσεων (SCADA) θα πρέπει να ενσωματώνονται στους κεντρικούς ελεγκτές (central controllers) και στους ελεγκτές των μικροπηγών (microsource controllers) του μικροδικτύου. Θα πρέπει επίσης να γίνονται προβλέψεις για την κατάσταση του συστήματος μέσω συναρτήσεων εκτίμησης κατάστασης.
- 5) Η οικονομική λειτουργία θα πρέπει να εξασφαλίζεται μέσω του προγραμματισμού της παραγωγής, την κατανομή του φορτίου και λειτουργίες βέλτιστης ροής ισχύος.
- 6) Η ασφάλεια του συστήματος πρέπει να διατηρείται μέσω της ανάλυσης των απρόοπτων, καθώς επίσης και μέσω χειρισμών εκτάκτου ανάγκης (όπως είναι η διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης, η αποκοπή φορτίων, η νησιδοποίηση ή το σβήσιμο οποιασδήποτε μονάδας). Σε απρόοπτες καταστάσεις, θα πρέπει να γίνεται οικονομική αναδιοργάνωση της παραγωγής προκειμένου να ελεγχθούν η μη υπερφόρτωση του συστήματος και επίσης να διατηρηθούν σε αποδεκτά επίπεδα η τάση και η συχνότητα των φορτίων.
- 7) Τυχόν παροδική αναντιστοιχία μεταξύ της παραγωγής και του φορτίου θα πρέπει να εξομαλύνεται μέσω της σωστής πρόβλεψης φορτίου και του μέρους εκείνου της διαχείρισης του συστήματος, η οποία θα γίνεται από την πλευρά του φορτίου. Οι μετατοπίσεις του φορτίου θα βοηθούσαν να επιπεδοποιηθεί η

καμπύλη ζήτησης και επομένως να μειωθεί η απαιτούμενη χωρητικότητα των αποθηκευτικών συσκευών.

- 8) Κατάλληλες τηλεπικοινωνιακές υποδομές και πρωτόκολλα επικοινωνιών θα πρέπει να επιστρατευθούν για την συνολική ενεργειακή διαχείριση, την προστασία και τον έλεγχο. Υποδομές για επικοινωνίες φέροντος και επικοινωνίες IEC 61850 είναι αυτές που θα χρησιμοποιηθούν πιθανότερα [2].

### **1.8 Διεσπαρμένη παραγωγή.**

Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε ως αυτόνομα συστήματα σε μια απομονωμένη περιοχή, για παράδειγμα σε μία αγροτική περιοχή, είτε ως συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο. Όταν χρησιμοποιούνται ως αυτόνομα συστήματα, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής ελέγχονται συνήθως από άτομα και εξυπηρετούν νοικοκυριά ή μεγάλα κτίρια, μία ακαδημαϊκή ή δημόσια κοινότητα, μία βιομηχανική ζώνη ή μία δημοτική περιοχή. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι μονάδες ΔΠ παράγουν AC ή DC ισχύ, η οποία δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμη. Ως αποτέλεσμα, η επιθυμητή τάση (πλάτος και γωνία), όσο και η επιθυμητή συχνότητα λαμβάνονται συνήθως μέσω της χρήσης διεπαφών ηλεκτρονικών ισχύος. Η κάθε μονάδα ΔΠ μπορεί να συνδεθεί με το δίκτυο μέσω της κατάλληλης διεπαφής ηλεκτρονικών ισχύος. Ωστόσο, η χρησιμοποίηση μιας μοναδικής διεπαφής ηλεκτρονικών ισχύος για όλες τις μονάδες ΔΠ οδηγεί σε πλεονεκτήματα όπως μειωμένες απώλειες, ευκολότερο σχεδιασμό και έλεγχο με μειωμένο κόστος.

Μέχρι στιγμής, οι μονάδες ΔΠ που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι γενικά περισσότερο βιώσιμες και έχουν μικρό ή καθόλου αντίκτυπο στο περιβάλλον. Παραδείγματα τέτοιων πηγών είναι οι διατάξεις φωτοβολταϊκών πινάκων, η γεωθερμία και ο αέρας, τα παλιρροϊκά κύματα, τα μικρά υδροηλεκτρικά, η βιομάζα και το βιοαέριο, όπως και οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (το οποίο εξάγεται με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών). Οι πηγές αυτές μπορούν να ενσωματωθούν με κατάλληλους τρόπους στο υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είτε να συγκροτηθούν σε μικροδίκτυα. Η δεύτερη αυτή προσέγγιση παρέχει τη δυνατότητα μεγάλης διείσδυσης των διαφόρων μονάδων ΔΠ και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, χωρίς να είναι απαραίτητη η αναδιάρθρωση του συστήματος διανομής αυτού καθεαυτού [4].

### **Λόγοι που έχουν οδηγήσει στη σταδιακή ανάπτυξη και ενσωμάτωση της διανεμημένης παραγωγής.**

- 1) Λόγω της ταχείας αύξησης του φορτίου, η ανάγκη για αύξηση της συμβατικής παραγωγής επιφέρει μία συνεχή εξάντληση των αποθεμάτων των ορυκτών πόρων. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες χώρες αναζητούν μη συμβατικούς/ ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους ως εναλλακτική.
- 2) Η μείωση της περιβαλλοντικής μόλυνσης και του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την προτίμηση στις ανανεώσιμες πηγές έναντι των ορυκτών καυσίμων. Ως μέρος του πρωτοκόλου του Κιότο, η Ευρωπαϊκή Ένωση, το Ηνωμένο Βασίλειο και πολλές άλλες χώρες σχεδιάζουν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (ανθρακικά και αζωτούχα υποπροϊόντα) έτσι ώστε να αντιμετωπίσουν την κλιματική αλλαγή και την παγκόσμια υπερθέρμανση. Συνεπώς, επεξεργάζονται νέες πολιτικές παραγωγής και χρησιμοποίησης ενέργειας για να υποστηρίξουν την κατάλληλη χρησιμοποίηση αυτών των ενεργειακών

πόρων. Η εκμετάλλευση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (distributed energy resources) αναμένεται να δημιουργήσει καθαρή, φιλική προς το περιβάλλον ενέργεια με πολύ μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

- 3) Η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει καλύτερο πεδίο για τη δημιουργία μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στις οποίες επιτελείται συμπαραγωγή, τριπαραγωγή ή συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και ενέργειας για βιομηχανικές, οικιακές και εμπορικές εφαρμογές. Αυτό αυξάνει την ολική ενεργειακή αποδοτικότητα και επίσης μειώνει τη θερμική μόλυνση του περιβάλλοντος.
- 4) Λόγω της χαμηλότερης πυκνότητας ενέργειας και την εξάρτησή τους από τις γεωγραφικές συνθήκες μιας περιοχής, οι μονάδες ΔΠ είναι γενικά τυποποιημένες μονάδες μικρής ισχύος (ικανότητας). Οι μονάδες ΔΠ είναι διεσπαρμένες γεωγραφικά και συνήθως τοποθετούνται κοντά στα φορτία. Αυτό είναι απαραίτητο για την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα των μονάδων αυτών. Για παράδειγμα οι μονάδες CHP (συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού) πρέπει να είναι τοποθετημένες πολύ κοντά στα θερμικά φορτία τους, καθώς η μεταφορά της απορριπτόμενης θερμότητας σε μεγάλες αποστάσεις δεν είναι οικονομική. Αυτό διευκολύνει την εύρεση τοποθεσιών για τις μονάδες ΔΠ και βοηθά να μειωθούν ο χρόνος κατασκευής και η επένδυση κεφαλαίου. Η φυσική εγγύτητα πηγής και φορτίου μειώνει επίσης τις απώλειες μεταφοράς και διανομής. Δεδομένου ότι η ενέργεια παράγεται σε χαμηλή τάση, είναι δυνατόν οι μονάδες ΔΠ να συνδεθούν στο δίκτυο διανομής ή να διασυνδεθούν σε ένα μικροδίκτυο. Το τελευταίο μπορεί να συνδεθεί με τη σειρά του στο κυρίως δίκτυο ως μία ημιαυτόνομη μονάδα.

Οι αυτόνομες και οι διασυνδεδεμένες μονάδες ΔΠ οδηγούν σε αύξηση της παραγωγής ενέργειας, ως εκ τούτου βελτιώνοντας την συνολική ποιότητα και αξιοπιστία ισχύος. Επιπλέον, ένα ανοικτό νομοθετικό περιβάλλον σε ό,τι αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα προσέφερε περισσότερες ευκαιρίες για την ενσωμάτωση των μονάδων ΔΠ. Σε μερικές χώρες, η ποικιλία στα καύσιμα που προσφέρουν οι μονάδες ΔΠ θεωρείται πολύτιμη, ενώ σε μερικές αναπτυσσόμενες χώρες, η έλλειψη ηλεκτρικής ενέργειας είναι τόσο οξεία, έτσι ώστε οποιαδήποτε μορφή παραγωγής ενθαρρύνεται προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση του φορτίου [2].

### **1.9 Διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας.**

Οι διεσπαρμένες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν απαραίτητο στοιχείο σε ένα μικροδίκτυο για την εύρυθμη και αδιάλειπτη λειτουργία του. Αυτό που προσφέρουν αυτές οι αποθηκευτικές διατάξεις σε ένα μικροδίκτυο είναι ο ετεροχρονισμός μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, επιτρέπεται η λειτουργία του μικροδικτύου σε περίπτωση που παρατηρείται απόκλιση μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι μικροπηγές έχουν μικρές δυνατότητες παραγωγής και επίσης απαιτούν αντιστροφείς για να μετατρέψουν την έξοδό τους ώστε να είναι συμβατή με τις προδιαγραφές του συστήματος. Κατά συνέπεια, οι συνδέσεις πηγών μικρού μεγέθους που ελέγχονται από πηγές με ηλεκτρονικά ισχύος, μπορούν να θεωρηθούν ως ένα σύστημα χωρίς αδράνεια. Αυτό το χωρίς αδράνεια σύστημα δεν μπορεί να ανταποκριθεί στην αρχική ή κυμαινόμενη ενέργεια ή ισχύ χρησιμοποιώντας την αδράνεια των μηχανών, όπως γίνεται στα συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, ένα μικροδίκτυο απαιτεί

συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με κατάλληλο έλεγχο για να λύσει εν μέρει αυτά τα προβλήματα.

Σε ένα μικροδίκτυο δύνανται να συμμετέχουν ΑΠΕ των οποίων η παραγωγή είναι ένα στοχαστικό μέγεθος που διαφέρει κάθε χρονική στιγμή. Χωρίς μέσα αποθήκευσης είναι πολύ πιθανό να παρατηρηθεί έλλειμμα ή πλεόνασμα στην παραγωγή, τα οποία διαταράσσουν την εύρυθμη λειτουργία του μικροδικτύου. Αυτά τα πλεονάσματα ενέργειας εκμεταλλεύονται οι μονάδες διεσπαρμένης αποθήκευσης, οι οποίες τα αποθηκεύουν, ώστε να τα αποδώσουν σε μια μετέπειτα χρονική στιγμή που θα παρατηρηθεί έλλειμμα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη λειτουργία του μικροδικτύου.

Μία επιπλέον λειτουργία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι ο συγχρονισμός του μικροδικτύου κατά τη σύνδεσή του με το κυρίως δίκτυο. Σε αντίθεση με τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, οι μονάδες διεσπαρμένης αποθήκευσης χρησιμοποιούν μετατροπείς αμφίδρομης ροής, οι οποίοι επιτρέπουν ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις, για την φόρτιση και εκφόρτιση των αποθηκευτικών μέσων. Ακόμη, με τη βοήθεια των αποθηκευτικών μονάδων μειώνεται ο αριθμός των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που πρέπει να βρίσκονται σε εφεδρεία για τυχόν απότομη μεταβολή του φορτίου.

Οι μονάδες διεσπαρμένης αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο για την οικονομικότερη και ομαλότερη λειτουργία ενός μικροδικτύου. Η οικονομικότερη λειτουργία σε ένα διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο επιτυγχάνεται όταν, τις ώρες αιχμής, τα φορτία τροφοδοτούνται και από τα μέσα αποθήκευσης, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ζήτηση ενέργειας από το δίκτυο που την προσφέρει σε ακριβή τιμή. Ομοίως, μπορούν να μειωθούν οι διακυμάνσεις στη ζήτηση που βλέπει το δίκτυο και οφείλονται στην κυμαινόμενη παραγωγή των ΑΠΕ και το κυμαινόμενο φορτίο.

Σε ένα μικροδίκτυο μπορεί να υπάρξουν μία ή περισσότερες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Το θετικό χαρακτηριστικό με τη διείσδυση περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι η επίτευξη μεγαλύτερης ευελιξίας, μέσω του συνδυασμού διαφορετικών ιδιοτήτων μέσω των διαφορετικών τύπων αποθήκευσης ενέργειας. Προσφέρεται δηλαδή η δυνατότητα εκμετάλλευσης διαφορετικών ιδιοτήτων μέσω των διαφορετικών τύπων αποθήκευσης ενέργειας. Για παράδειγμα, οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος, δηλαδή μπορούν να τροφοδοτήσουν μεγάλα ποσά ενέργειας σε μικρό χρονικό διάστημα. Ωστόσο, οι συσσωρευτές παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας. Συνεπώς, η χρήση υπερπυκνωτών προτιμάται σε περιπτώσεις μεταβατικών φαινομένων, όπου η απαιτούμενη ισχύς είναι μεγάλη, ενώ οι συσσωρευτές σε περιπτώσεις που το μικροδίκτυο έχει μεγάλη απαίτηση ενέργειας.

Για την υλοποίηση των αποθηκευτικών διατάξεων χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες, όπως υπερπυκνωτές, συσσωρευτές, αποθήκευση ενέργειας με υπεραγωγία πηνία, καθώς και αποθήκευση κινητικής ενέργειας σε στρεφόμενες μηχανές υψηλής αδράνειας (flywheels). Ορισμένες άλλες τεχνολογίες, οι οποίες είναι υπό εξέλιξη περιλαμβάνουν την αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα, όπου η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη συμπίεση ποσότητας αέρα, η οποία στη συνέχεια κινώντας έναν στρόβιλο αναπαράγει την ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και οι διατάξεις άντλησης, όπου η ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ χρησιμοποιείται για

άντληση νερού σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη και κατόπιν η ενέργεια αναπαράγεται όταν ζητηθεί με την χρήση υδροστροβίλου. Τέλος, υπεραγώγιμες διατάξεις και εφαρμογές που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο είναι ήδη σε εμπορική εκμετάλλευση, ενώ διατάξεις υγρού αζώτου αναμένονται στο άμεσο μέλλον.

Η χωρητικότητα των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται από την απόσβεση που αναμένεται να κάνουν. Ο τύπος και η χωρητικότητα των αποθηκών ενέργειας πρέπει να επιλεγούν αναλόγως. Στην περίπτωση βραχύχρονης βύθισης τάσης που μπορεί να τραβήξει μεγάλα ρεύματα για λίγους μόνο κύκλους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια αποθήκη ενέργειας με μικρότερη χωρητικότητα. Όμως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιπλέον εφεδρική πηγή εάν η βύθιση διαρκεί για παραπάνω χρονικό διάστημα οδηγώντας σε διακοπή της τροφοδοσίας ανάλογα με το κρίσιμο φορτίο [5].

## **1.10 Μικροδίκτυα AC.**

### **1.10.1 Ορισμός AC μικροδικτύου**

Σε ένα AC μικροδίκτυο, όλες οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού με AC τάση εξόδου συνδέονται απευθείας με την AC γραμμή ή ενδεχομένως χρειάζονται μετατροπείς AC/DC/AC προκειμένου να συζευχθούν σταθερά με τα AC δίκτυα χαμηλής τάσης. Παραδείγματα μονάδων ΔΠ, οι οποίες παράγουν εναλλασσόμενη τάση εξόδου είναι οι ανεμογεννήτριες, τα μικρά υδροηλεκτρικά, το βιοαέριο, τα παλιρροϊκά και οι κυματοτουρμπίνες. Σε αυτήν την περίπτωση, το μικροδίκτυο AC μπορεί να συνδεθεί με το κυρίως δίκτυο δια μέσου ενός μετασχηματιστή ισχύος. Επιπροσθέτως, τα AC φορτία είναι απευθείας συνδεδεμένα, ενώ τα DC φορτία χρειάζονται τους AC/DC μετατροπείς για να συνδεθούν στα μικροδίκτυα AC. Από την άλλη μεριά, οι μονάδες ΔΠ, οι οποίες παράγουν DC τάση στην έξοδό τους (για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά, οι κυψέλες καυσίμου και οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας) μπορούν να συνδεθούν στην AC γραμμή ενός AC μικροδικτύου μέσω μετατροπέων DC/AC. Η εικόνα 1.2 δείχνει την τυπική συνδεσμολογία ενός AC μικροδικτύου [4].

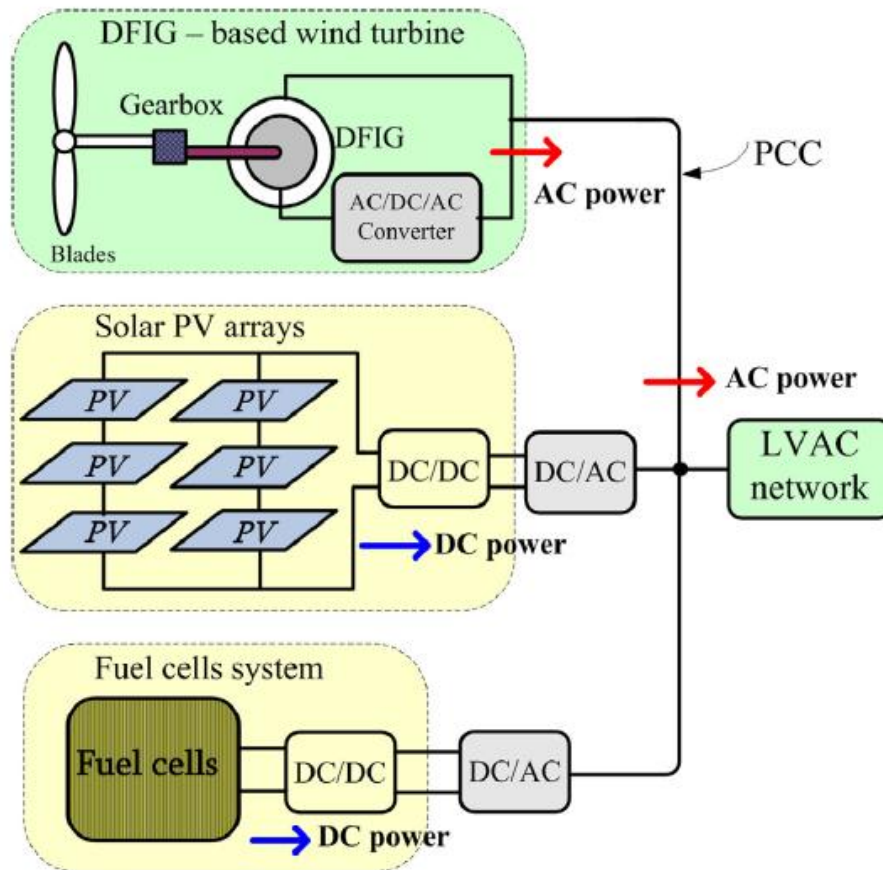
### **1.10.2 Πλεονεκτήματα των AC μικροδικτύων.**

- Plug-in προσέγγιση για όλες τις πηγές διεσπαρμένης παραγωγής.
- Πολύ ανεπτυγμένη διασύνδεση, στάνταρ και κώδικες.
- Υπάρχει ήδη εξοικείωση με το σχεδιασμό AC συστημάτων χαμηλής τάσης.
- Μετασχηματισμός της τάσης: Η AC τάση είναι εύκολο να αυξηθεί και να μειωθεί μέσω της χρήσης μετασχηματιστών. Από την άλλη πλευρά, η μετατροπή της DC τάσης γίνεται μέσω μετατροπέων DC-DC, των οποίων η υλοποίηση είναι πιο σύνθετη.
- Προστασία: Η προστασία των κυκλωμάτων AC βρίσκεται σε πιο ώριμο στάδιο σε σχέση με την αντίστοιχη για τα κυκλώματα DC, για τα οποία είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση περαιτέρω έρευνας [6].

### **1.10.3 Προκλήσεις που αντιμετωπίζονται όταν πρόκειται για AC μικροδίκτυα.**

- Αυξημένες απαιτήσεις για μετατροπή από το AC στο DC και πίσω στο AC.
- Ενεργειακές απώλειες κατά τη διαδικασία των μετατροπών.
- Απαιτούνται περισσότερες συσκευές και εξοπλισμός.



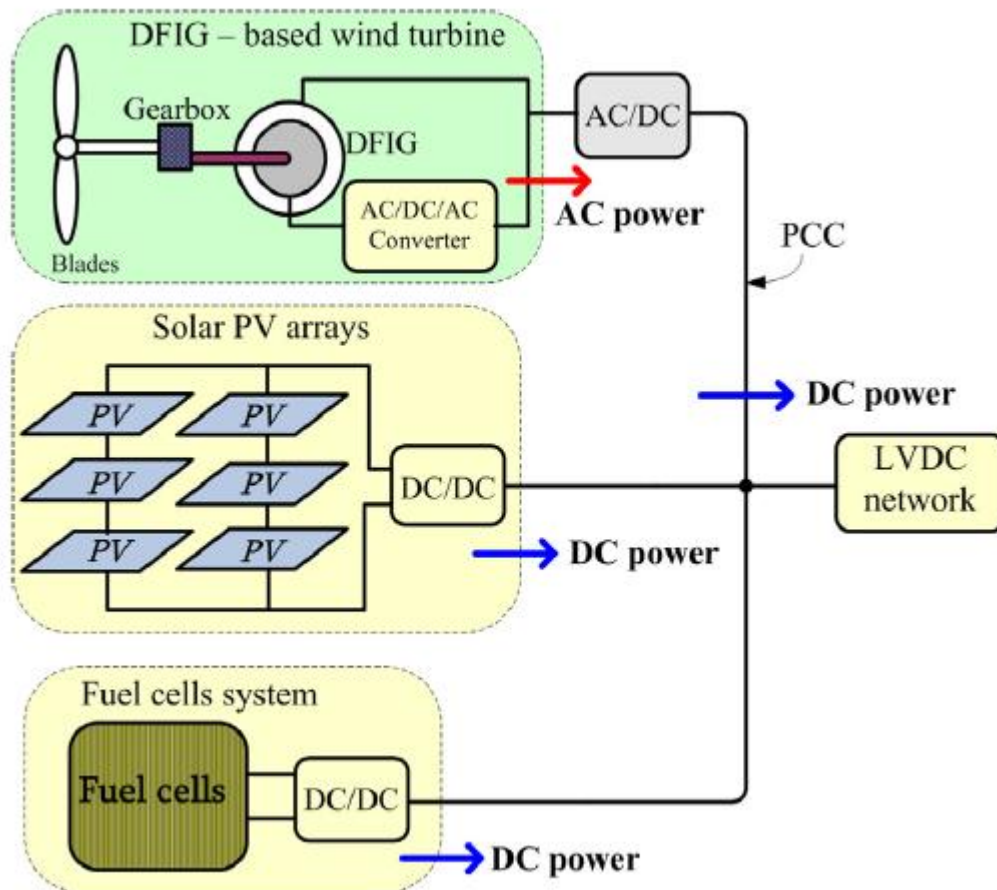


- Εικόνα 1.2 Συνδεσμολογία ενός AC μικροδικτύου [4].

## 1.11 Μικροδίκτυα DC.

### 1.11.1 Ορισμός μικροδικτύου DC.

Στην περίπτωση αυτή, οι μονάδες ΔΠ που παράγουν DC έξοδο συνδέονται απευθείας με τον DC ζυγό, ενώ εκείνες που παράγουν AC έξοδο συνδέονται μέσω μετατροπέων, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3 [4].



Εικόνα 1.3 Τοπολογία ενός DC μικροδικτύου [4].

### 1.11.2 Διανομή LVDC (χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος).

Ιστορικά, τα πρώτα δίκτυα διανομής είχαν σχεδιαστεί ως συστήματα συνεχούς ρεύματος και μετατράπηκαν σε συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος, λόγω των πλεονεκτημάτων του δευτέρου. Στη σύγχρονη εποχή, χάρη στις προηγμένες τεχνολογίες ηλεκτρονικών ισχύος, το DC χρησιμοποιείται ευρέως, κυρίως στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους (HVDC). Η χρήση HVDC συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος, καλύτερη ροή ισχύος και μικρότερες απώλειες όταν πρόκειται να μεταφερθεί ισχύς σε μεγάλες αποστάσεις (>600km). Η HVDC χρησιμοποιείται προκειμένου να συνδεθούν μεταξύ τους δύο μεγάλα AC συστήματα διαφορετικών συχνοτήτων. Στο επίπεδο της διανομής τα DC συστήματα δεν χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμα, και η εφαρμογή τους περιορίζεται σε ορισμένες εφαρμογές: σε επικουρικές εγκαταστάσεις μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και υποσταθμών, σε συστήματα ηλεκτροκίνησης λόγω της ευρείας χρήσης κινητήρων DC (σιδηρόδρομος και μετρό), στα αεροσκάφη και στα ηλεκτροκίνητα πλοία καθώς επίσης και σε κέντρα επικοινωνιών και κέντρα δεδομένων (data centers) [7].

Στην διανομή LVDC (διανομή χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος), η μέση τάση του AC δικτύου μέσης τάσης μετατρέπεται, μέσω ενός μετασχηματιστή, σε χαμηλή τάση AC, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε DC τάση μέσω ανορθωτών. Η τάση αυτή μετατρέπεται εκ νέου σε AC (ή μετασχηματίζεται σε DC τάση διαφορετικού επιπέδου) κοντά στον καταναλωτή.

Ο στόχος του LVDC δικτύου είναι να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του δικτύου χαμηλής τάσης. Η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του δικτύου χαμηλής τάσης θα πρέπει να αυξηθεί με την μετατροπή του σε σύστημα DC, διότι οι απώλειες στα DC καλώδια είναι χαμηλότερες, λόγω της χρησιμοποίησης ενός υψηλότερου επιπέδου τάσεως. Επιπλέον, όλη η μεταφερόμενη ισχύς είναι ενεργός ισχύς, άρα περισσότερη ισχύς μπορεί να μεταφερθεί με τα ίδια καλώδια. Συνεπώς, η έκταση και η πολυπλοκότητα του δικτύου μέσης τάσης μπορούν να μειωθούν, χάρη στην υψηλή ικανότητα μεταφοράς ισχύος και του χαμηλότερου κόστους του υλικού και της κατασκευής του δικτύου χαμηλής τάσης.

Ο στόχος του LVDC δικτύου είναι να εξασφαλίσει υψηλότερη ποιότητα ισχύος σε σχέση με το τρέχον AC δίκτυο διανομής. Το DC σύστημα κάνει δυνατή την αντιστάθμιση βυθίσεων τάσης και μικρών διακοπών του δικτύου μέσης τάσης, χωρίς επιπτώσεις στην τάση των καταναλωτών. Σήμερα, περισσότερες από το 90% των διακοπών τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας που βιώνουν οι καταναλωτές οφείλονται σε σφάλματα του δικτύου μέσης τάσης. Αν ένα blackout συμβεί στο δίκτυο μέσης τάσης, μια λειτουργία νησιδοποίησης θα είναι δυνατή στο LVDC δίκτυο στην περίπτωση που διεσπαρμένη παραγωγή και συσκευές αποθήκευσης είναι συνδεδεμένες σε αυτό, οπότε το LVDC σύστημα διανομής έχει χαρακτηριστικά ενός UPS, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, αυξάνει η αξιοπιστία του δικτύου μέσης τάσης, αφού το δίκτυο χαμηλής τάσης σχηματίζει τη δική του περιοχή προστασίας. Το κόστος διακοπής των εταιριών που διαχειρίζονται το δίκτυο θα μειωνόταν, αν το LVDC δίκτυο χρησιμοποιούταν [8]..

Τα LVDC συστήματα θα μπορούσαν να παρέχουν πιο ευφυή παρακολούθηση και ελέγχους και καλύτερη παραγωγή και χρήση της ενέργειας. Τα συστήματα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν την αυξημένη διείσδυση διεσπαρμένων ανανεώσιμων, ηλεκτρικών αυτοκινήτων, αντλιών θερμότητας και να διευκολύνουν περισσότερο τη σύνδεση του εκρηκτικού αριθμού συσκευών που λειτουργούν με DC ρεύμα. Αυτό με τη σειρά του θα βοηθήσει να μειωθούν περαιτέρω οι εκπομπές CO<sub>2</sub>.

Παρόλα αυτά, η εφαρμογή των LVDC μικροδικτύων εισάγει καινούργιες συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κάνουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πιο σύνθετο. Μία νέα, σύνθετη διάταξη θα ανακύψει, η οποία θα συνδυάζει DC και AC. Μία τέτοια αλλαγή παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις για τη λειτουργία και την προστασία του δικτύου, και μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν περιεκτικά στάνταρ σχετικά με τη βέλτιστη συνδεσμολόγηση, λειτουργία και προστασία των LVDC δικτύων. Προκειμένου τα LVDC συστήματα να καταστούν τεχνικώς εφικτά και να αξιολογηθεί η συμβατότητά τους με τα υπάρχοντα δίκτυα AC, είναι αναγκαία η κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Για παράδειγμα, σε μια διαταραχή, καθώς το σύστημα γίνεται πιο σύνθετο, νέοι τύποι σφαλμάτων θα παρουσιαστούν και αναμένονται διαφορετικές αποκρίσεις από το σύστημα [7].

### **1.11.3 Αιτίες για την ανάπτυξη των DC μικροδικτύων.**

Γενικά, οι λόγοι για την ανάπτυξη των DC μικροδικτύων έχουν να κάνουν με τα πλεονεκτήματα που αυτά παρουσιάζουν σε σχέση με τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής, καθώς επίσης και με τις σύγχρονες τάσεις στην διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι λόγοι αυτοί είναι οι εξής [8]:

- 1) Λόγω της αύξησης της ζήτησης, το υπάρχον σύστημα διανομής βρίσκεται κοντά στο σημείο στο οποίο αυτό δεν θα μπορεί πλέον να ανταποκριθεί στη ζήτηση αυτή. Συνεπώς, είναι επιθυμητές, η αύξηση της ποιότητας ισχύος (quality of power) και της απόδοσης (efficiency) του συστήματος.
- 2) Με τη χρήση τους, είναι δυνατή η αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος από το δίκτυο διανομής διότι:
  - a. Η χρήση συνεχούς τάσης καθιστά δυνατή την επιλογή ενός μεγαλύτερου, σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα AC επιπέδου τάσης.
  - b. Όλη η μεταφερόμενη ισχύς είναι ενεργός, έτσι περισσότερη ισχύς μπορεί να μεταφερθεί με τα ίδια καλώδια. [protecting the last mile] Στα DC συστήματα οι αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές δεν έχουν καμία επίδραση κατά την κανονική λειτουργία και έτσι η άεργος συνιστώσα του ρεύματος, η οποία αυξάνει το πλάτος του ρεύματος καταλήγοντας σε μεγαλύτερες απώλειες δεν υφίσταται.
  - c. Επιπλέον, το επιδερμικό φαινόμενο, το οποίο προκαλείται από αντιτιθέμενα ρεύματα περιδίνησης, τα οποία επάγονται από τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν τα AC ρεύματα, φαινόμενο το οποίο αυξάνει την αντίσταση των καλωδίων στα AC δίκτυα δεν έχει υφίσταται όταν γίνεται χρήση DC μεγεθών. Σύμφωνα με το IEC 60228, οι αντιστάσεις, DC και AC, για το ίδιο καλώδιο δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις, η μεν αντίσταση DC από την:

$$R_{dc} = R_{20} \times [L + a(T - 20)] \Omega$$

Όπου  $R_{dc}$  είναι η DC αντίσταση του αγωγού σε κάποια λειτουργική κατάσταση,  $R_{20}$  είναι η αντίσταση του αγωγού στους 20°C,  $L$  είναι το μήκος του καλωδίου,  $T$  είναι η θερμοκρασία λειτουργίας και  $a$  είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας-αντίστασης, ο οποίος είναι 0.00393 για τον χαλκό και 0.00403 για το αλουμίνιο.

Η AC αντίσταση δίνεται από την:

$$R_{ac} = R_{dc} \times [L + y_s + y_p]$$

Όπου  $R_{ac}$  είναι η AC αντίσταση του αγωγού σε μία κατάσταση λειτουργίας,  $y_s$  είναι ο συντελεστής του επιδερμικού φαινομένου και  $y_p$  είναι ο συντελεστής του proximity effect.

Από τις σχέσεις αυτές, φαίνεται ευκρινώς ότι η AC αντίσταση είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την αντίστοιχη DC λόγω του επιδερμικού φαινομένου.

Με τα ίδια καλώδια και την ίδια πτώση τάσης, ένα μονοπολικό 1.5kV LVDC σύστημα μπορεί να μεταφέρει μέχρι 16 , ενώ ένα διπολικό ±0.75k LVDC σύστημα μέχρι 28 φορές περισσότερη ισχύ από ένα 0.4kV AC σύστημα [7].

- 3) Τα LVDC συστήματα δίνουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν μικρότερα καλώδια με χαμηλότερα κόστη, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της παραγωγής και της μεταφοράς ενέργειας. Η διατομή των καλωδίων είναι δυνατόν να μειωθεί κατά περίπου 20% σε κάθε

αγωγό όταν το καλώδιο χρησιμοποιείται για να παράσχει ισχύ από ένα DC δίκτυο, αντί από ένα AC. Επίσης, ο αριθμός των αγωγών κάθε καλωδίου DC αναμένεται να είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο σε AC. Η ισχύς θα μεταφέρεται από δύο αγωγούς για μονοπολικό σύστημα DC και από τρεις για διπολικό σύστημα DC, αντί για τέσσερις ή πέντε αγωγούς που χρησιμοποιούνται στο χαμηλής τάσης AC (low-voltage AC, LVAC). Συνεπώς, η ίδια ικανότητα ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με χαμηλότερη επένδυση σε υλικά καλωδίων σε σύγκριση με τα AC δίκτυα [7].

4) Είναι δυνατή η μείωση της έκτασης του δικτύου μέσης τάσης, αφού το δίκτυο χαμηλής τάσης θα είναι ικανό για τη μεταφορά μεγαλύτερης ποσότητας ισχύος.

5) Καθιστούν ευκολότερη τη σύνδεση διεσπαρμένων παραγωγών και αποθηκευτικών μέσων ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα χαμηλής τάσης. Οι περισσότερες συσκευές μικροπαραγωγής, όπως τα φωτοβολταϊκά, και αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες και οι υπερπυκνωτές παράγουν DC εξόδους ή απαιτούν ένα ενδιάμεσο στάδιο DC. Αυτές οι οικολογικές πηγές ενέργειας μπορούν να συνδεθούν μέσω μετατροπών DC/DC η απευθείας στο LVDC δίκτυο, αποφεύγοντας την ενεργειακή απώλεια (η οποία είναι τυπικά 7-15% για την μετατροπή από DC σε AC) εξαιτίας της μετατροπής σε AC. Για παράδειγμα, η σύνδεση μικροπαραγωγής μεταβλητών στροφών, όπως ανεμογεννήτριες και τουρμπίνες μικροκαυσίμου σε ένα LVDC δίκτυο θα μειώσει τα στάδια μετατροπής κατά ένα. Επίσης, η σύνδεση πολλαπλών πηγών εν παραλλήλω είναι ευκολότερη στα DC παρά στα AC συστήματα, διότι δεν απαιτείται συγχρονισμός συχνότητας προκειμένου να επιτευχθεί η σύνδεση [7].

6) Επιπλέον, ένα LVDC δίκτυο είναι πιο κατάλληλο για τη σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών που καταναλώνουν DC. Τα οικιακά ηλεκτρονικά φορτία, τα οποία εσωτερικά τροφοδοτούνται από DC κυριαρχούν σήμερα περισσότερο από τα AC φορτία. Ηλεκτρονικά φορτία όπως υπολογιστές, λαμπτήρες φθορισμού, τηλεοράσεις και άλλα, χρησιμοποιούν ανορθωτές γέφυρας για να παραλάβουν DC από το AC. Η μετατροπή από το AC στο DC εισάγει αρμονικές οι οποίες δημιουργούν θέματα ποιότητας ισχύος. Επίσης, η ανάγκη χρησιμοποίησης μεγάλου αριθμού μετατροπών για τη μετατροπή των 230V AC σε χαμηλότερες τάσεις και μετά σε DC, καθώς επίσης και η ανάγκη για διόρθωση του συντέλεστή ισχύος μπορούν να αφαιρεθούν, μειώνοντας τις απώλειες και εξοικονομώντας κόστος. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται για τους αντάπτορες του καταναλωτικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού μπορούν να προκαλέσουν υπολογίσιμες απώλειες κατά την αναμονή (stand-by) των συσκευών. Διαφορετικές ηλεκτρονικές συσκευές θα έχουν διαφορετικές απώλειες, αλλά γενικά η ποσότητα της ισχύος που χάνεται κατά τις μετατροπές είναι 10-25%, και περίπου η ίδια ποσότητα ισχύος χάνεται όταν οι μετατροπές είναι σε αναμονή (stand-by). Σύμφωνα με την International Energy Agency (IEA), η συνολική κατανάλωση του οικιακού ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε αναμονή στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκτιμηθεί ότι είναι μεγαλύτερη από 36 TW το χρόνο [7].



## **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Συγκριτική μελέτη για την Τοπολογία των μικροδικτύων DC και AC.**

### **2.1 Τοπολογία των μικροδικτύων AC.**

Η τοπολογία των AC μικροδικτύων είναι ανάλογη αυτής των συμβατικών δικτύων διανομής. Οι υποσταθμοί του συμβατικού δικτύου διανομής αντιστοιχούν στις μονάδες ΔΠ του μικροδικτύου. Η ηλεκτρική ισχύς είναι δυνατόν να μεταφερθεί σε διαφορετικές περιοχές του συστήματος με ποικίλους τρόπους, ανάλογα με την πυκνότητα του φορτίου και το επίπεδο τάσης του συστήματος.

Η τοπολογία πλέγματος (mesh) παρέχει αυξημένη ασφάλεια παροχής σε κάθε υποσταθμό. Ενώ αυτή η διάταξη απαιτεί περισσότερο εξοπλισμό για κάθε υποσταθμό, είναι συνήθως πιο αποτελεσματική από την άποψη των συνολικών απωλειών του δικτύου. Η τοπολογία πλέγματος επεκτείνεται ευκολότερα και χρησιμοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τα κυκλώματα σε σχέση με την τοπολογία δακτυλίου (ring). Αυτό, όμως, είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αυξημένες απώλειες. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν τοπολογίες πλέγματος και δακτυλίου μπορούν να λειτουργούν χωρισμένα με ανοικτά σημεία, ή κλειστά, προκειμένου να βελτιωθεί η ασφάλεια. Η δεύτερη από αυτές τις επιλογές θα αυξήσει τις απαιτήσεις για διακόπτες κυκλώματος και πιο σύνθετη προστασία.

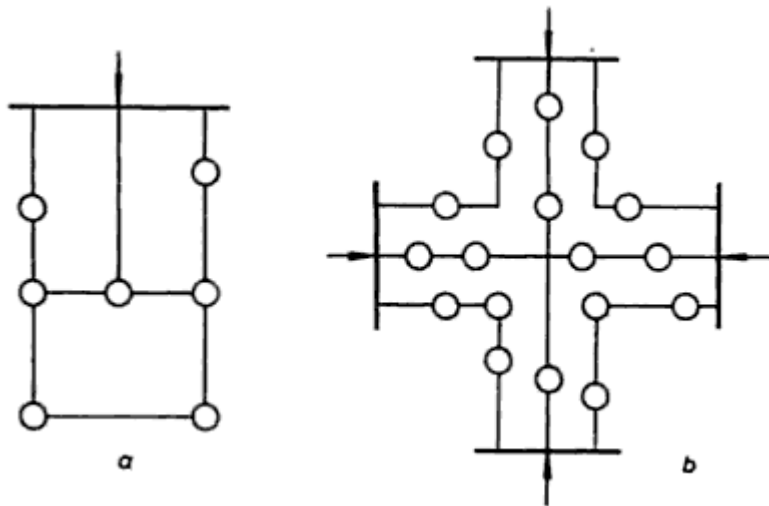
Συνδέοντας και λειτουργώντας έναν αριθμό από υποσταθμούς εν παραλλήλω, είναι δυνατόν να μειωθεί η συνολική ικανότητα των μετασχηματιστών του γκρουπ. Με την προϋπόθεση ότι η φόρτιση του δικτύου είναι ικανοποιητική, μία τέτοια τοπολογία μπορεί να αντιμετωπίσει την απώλεια μιας εισροής, χωρίς να διακόψει την παροχή ισχύος από το δίκτυο. Θα πρέπει να δοθεί προσοχή, έτσι ώστε τα σφάλματα του δικτύου να κινούνται μέσα σε αποδεκτά όρια. Τα επίπεδα τάσης και η ροή αέργου ισχύος είναι δυνατόν να αποτελέσουν πρόβλημα στα διασυνδεδεμένα συστήματα, ενώ η παράλληλη λειτουργία των σημείων έγχυσης/εισροής ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε αντίστροφη ροή ισχύος μέσω των μετασχηματιστών, κάτω από συνθήκες διακοπής τμημάτων του συστήματος, τα οποία λειτουργούν σε υψηλότερες τάσεις.

Μία παρόμοια διασύνδεση μεταξύ των σημείων έγχυσης παρέχεται και από την τοπολογία συνδέσμου (link). Ωστόσο, ανοίγοντας τους διακόπτες, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει ως ακτινικό σύστημα, με δυνατότητα κλεισίματος των ανοικτών σημείων αν ένας από τους υποσταθμούς είναι εκτός λειτουργίας. Μία συνηθισμένη επιλογή στη μέση και τη χαμηλή τάση είναι η τοπολογία ανοικτού βρόχου. Κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας, το δίκτυο λειτουργεί ως ένα σύνολο ακτινικών γραμμών τροφοδοσίας. Στην περίπτωση ενός σφάλματος μεταξύ του ζυγού και του ανοικτού σημείου τμηματοποίησης, μόλις το τμήμα που παρουσιάζει το σφάλμα απομονωθεί, ο κανονικά ανοικτός διακόπτης μπορεί να κλείσει για να συνδέσει εφεδρικές πηγές παροχής ισχύος. Επιπροσθέτως, συχνά χρησιμοποιούνται, ιδίως στα επαρχιακά δίκτυα, αμιγώς ακτινικά δίκτυα, χωρίς τη δυνατότητα εφεδρικής διασύνδεσης.

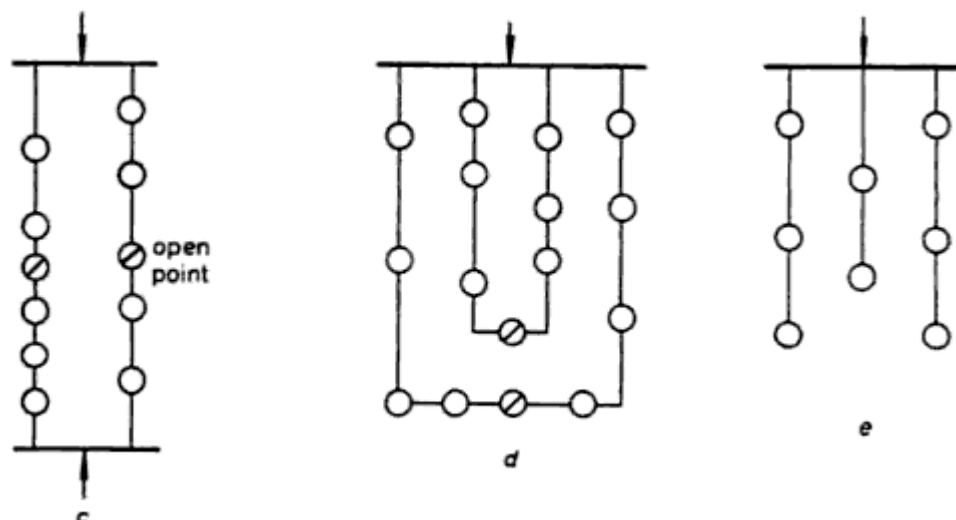
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες αυτές τις τοπολογίες, ο βέλτιστος αριθμός υποσταθμών που μπορεί να συνθεθεί σε μία γραμμή εξαρτάται από την τάση του

δικτύου, τις αποστάσεις και το μέσο φορτίο που τροφοδοτείται από τον κάθε υποσταθμό.

Η τοπολογία ενός δικτύου επηρεάζεται επίσης από το γεωγραφικό ανάγλυφο της περιοχής, την οποία διατρέχει το δίκτυο. Οι επίπεδες επαρχιακές περιοχές είναι πιο ευνοϊκές για διασυνδεδεμένες τοπολογίες, ενώ στις κοιλάδες χρησιμοποιούνται συνήθως ακτινικές τοπολογίες. Τα υπάρχοντα δίκτυα έχουν επηρεαστεί από τις φιλοσοφίες και τις πρακτικές προγενέστερων σχεδιαστών. Δεν είναι ασυνήθιστο ένα δίκτυο να είναι το αποτέλεσμα ενός μίγματος πρακτικών. Για λειτουργικούς σκοπούς, τα δίκτυα εξοπλίζονται με διαφόρων ειδών διακόπτες, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευελιξία που απαιτείται για την αντιμετώπιση όλων των πιθανών προβλημάτων, τα οποία μπορεί να παρουσιάσει το δίκτυο. Οποιαδήποτε τοπολογία κι αν χρησιμοποιηθεί, ο σχεδιαστής του συστήματος θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι έχει επιτευχθεί μία πρακτική διάταξη στο μικρότερο κόστος, η οποία μάλιστα θα διαθέτει κάποια ευελιξία, πρόβλεψη για τις μελλοντικές εξελίξεις στο δίκτυο. Οι τοπολογίες για τις οποίες έγινε λόγος παραπάνω, απεικονίζονται στα ακόλουθα σχήματα [9]:



Εικόνα 2.1 α) Τοπολογία πλέγματος, β) Διασυνδεδεμένη τοπολογία [9].

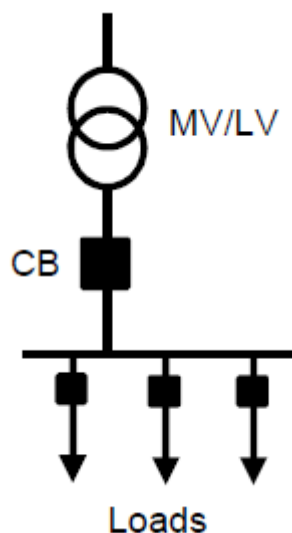


Εικόνα 2.2 γ) Τοπολογία συνδέσμου (link), δ) Τοπολογία ανοικτού βρόχου, ε) ακτινική τοπολογία [9].

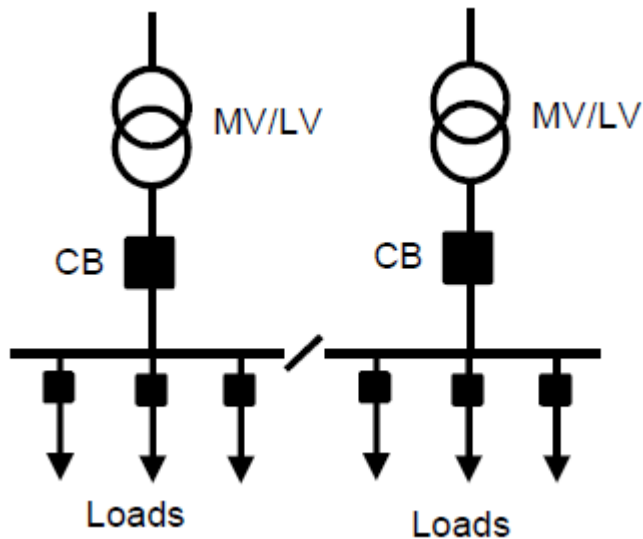


## 2.2. Τοπολογία δικτύων DC.

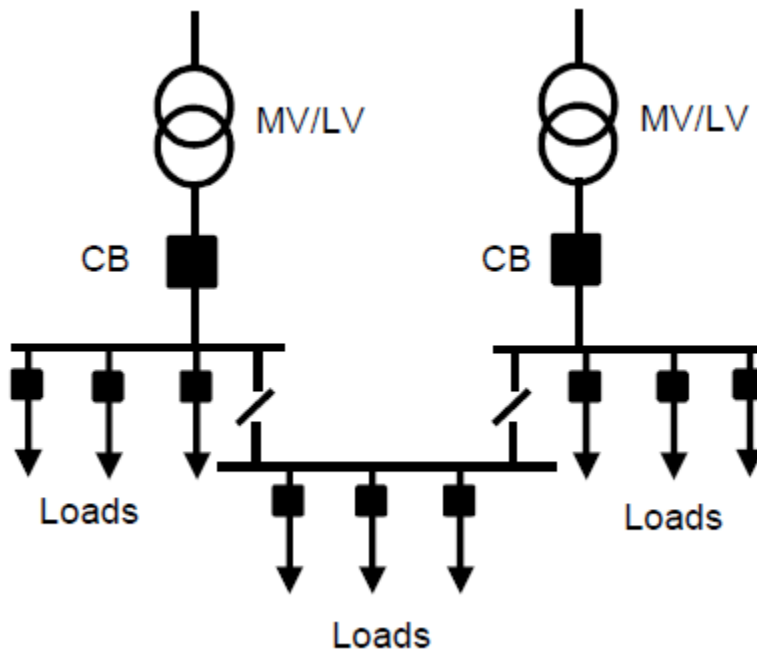
Τα παραδοσιακά δίκτυα χαμηλής τάσης έχουν διαφορετική τοπολογία, ανάλογα με την απαιτούμενη ασφάλεια της παροχής και τα αναμενόμενα επίπεδα σφάλματος. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο χαμηλής τάσης μπορεί να είναι σχετικά απλό, και τα φορτία του να τροφοδοτούνται από μία μοναδική πηγή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3. Αυτός ο τύπος δικτύου έχει ακτινική τοπολογία και χρησιμοποιείται ευρέως λόγω του χαμηλού κόστους και του χαμηλού επιπέδου σφάλματος. Όμως η τοπολογία αυτή έχει το χαμηλότερο επίπεδο ασφάλειας παροχής, χωρίς καθόλου εφεδρεία. Για να αυξηθεί η αξιοπιστία, ένα δίκτυο χαμηλής τάσης μπορεί να συνδεθεί με δύο μετασχηματιστές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Αν ο ένας μετασχηματιστής αποκοπεί, το φορτίο μπορεί να τροφοδοτηθεί από τον άλλο μετασχηματιστή. Μία τέτοια τοπολογία μπορεί επίσης να τμηματοποιηθεί περαιτέρω, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5, για να εξασφαλίσουμε τη λειτουργία περισσότερων γραμμών χωρίς σφάλμα. Ένα δίκτυο χαμηλής τάσης μπορεί να τροφοδοτήσει μεγάλη πυκνότητα σημαντικών φορτίων χρησιμοποιώντας τοπολογία δακτυλίου. Τα φορτία σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να τροφοδοτηθούν από περισσότερους του ενός μετασχηματιστές συνδέοντας τους ζυγούς. Το επίπεδο της εφεδρείας στην τοπολογία δακτυλίου είναι σχετικά υψηλό. Όταν τέτοιες τοπολογίες αντικαθίστανται από LVDC δίκτυα, οι καινούριες δομές θα είναι παρόμοιες με το AC, με την προσθήκη της AC/DC μετατροπής, αμέσως μετά τους μετασχηματιστές υψηλής σε μέση τάση. Τα φορτία και οι τοπικές γεννήτριες θα συνδέονται είτε μέσω μετατροπέων DC/AC είτε μέσω μετατροπέων DC/DC [7].



Εικόνα 2.3 Ακτινική τοπολογία με μία γραμμή τροφοδοσίας [7].



Εικόνα 2.4 Ακτινική τοπολογία δύο πόλων [7].

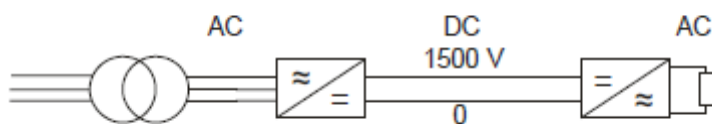


Εικόνα 2.5 Διασυνδεδεμένοι ζυγοί [7].

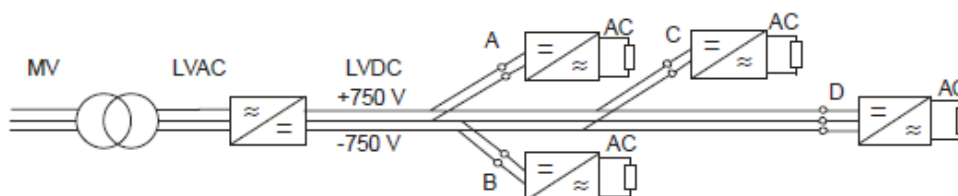
Η δομή ενός LVDC δικτύου διανομής, είναι μονοπολική ή διπολική. Στο μονοπολικό σύστημα, υπάρχει μόνο ένα επίπεδο τάσης, θετική (ή αρνητική) προς ουδέτερο. Στο διπολικό σύστημα, υπάρχουν δύο επίπεδα τάσης, και το φορτίο μπορεί να συνδεθεί είτε μεταξύ του αγωγού γραμμής και του αγωγού μηδενικής τάσης, είτε απευθείας μεταξύ των αγωγών θετικής και αρνητικής τάσης. Συνεπώς, οι διπολικές διατάξεις προσφέρουν επιλογές για σύνδεση του φορτίου σε περισσότερα επίπεδα τάσης από τις μονοπολικές.

Στο μονοπολικό σύστημα, οι μετατροπείς των γραμμών και των φορτίων συνδέονται στα 1500V DC, όπως φαίνεται στην πρώτη από τις παρακάτω εικόνες. Δύο επίπεδα τάσης,  $\pm 750V$  DC, και ο ουδέτερος χρησιμοποιούνται στο διπολικό σύστημα. Το διπολικό σύστημα είναι δυνατόν να τροφοδοτείται από έναν μετασχηματιστή δύο

τυλιγμάτων και έναν μετατροπέα γραμμής, οπότε έχουμε μια διπολική σύνδεση με το DC δίκτυο, όπως φαίνεται στην δεύτερη από τις παρακάτω εικόνες, ή από έναν μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων και δύο μετατροπείς γραμμών, που συνδέονται με μονοπολικό τρόπο μεταξύ του θετικού ή του αρνητικού πόλου και του ουδετέρου και παρέχοντας και στις δύο περιπτώσεις τάση 750V DC [8].



Εικόνα 2.6 Μονοπολικό δίκτυο LVDC [8].



Εικόνα 2.7 Διπολικό δίκτυο LVDC [8].

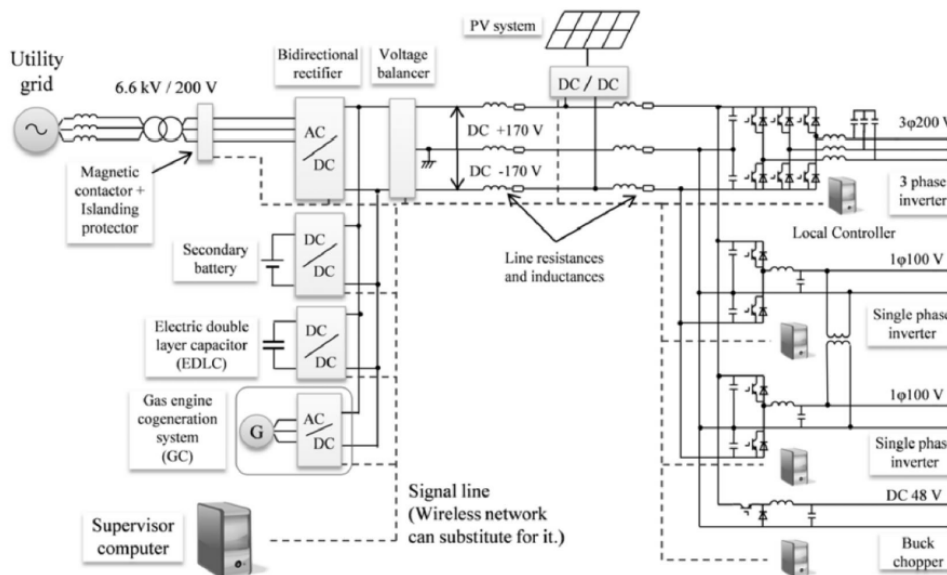
Οι πελάτες μπορούν να συνδεθούν μεταξύ του θετικού (όπως ο πελάτης A στην παραπάνω εικόνα) ή του αρνητικού (όπως ο πελάτης B) και του ουδετέρου σε μια μονοπολική σύνδεση, μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου (όπως ο πελάτης C), ή διπολικά μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου με σύνδεση ουδετέρου (πελάτης D).

Το διπολικό σύστημα κάνει χρήση μετατροπέων διαβαθμισμένων για τα 750V, οι οποίοι είναι φθηνότεροι από εκείνους που έχουν διαβαθμιστεί για τα 1500V. Το διπολικό σύστημα είναι πιο αξιόπιστο, επειδή παρέχει τη δυνατότητα να διατηρηθεί το άλλο μισό του δικτύου σε λειτουργία, στην περίπτωση που παρουσιαστεί σφάλμα στο πρώτο μισό του δικτύου. Τα στάνταρ επιτρέπουν την εφαρμογή DC τάσης στα υπάρχοντα καλώδια χαμηλής τάσης. Τα σημερινά υπόγεια καλώδια χαμηλής τάσης μπορούν να δεχτούν μέχρι 900V DC (για την ακρίβεια, μέχρι 1500V DC μεταξύ των αγωγών και μέχρι 900V DC μεταξύ αγωγού και γης, οπότε τα καλώδια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο διπολικό LVDC σύστημα σύμφωνα με τα στάνταρ. Στα στάνταρ για τα εναέρια καλώδια δεν αναφέρεται τίποτα σχετικά με την εφαρμογή DC τάσης σε αυτά.

Τα υπάρχοντα καλώδια περιέχουν συνήθως 4 ή και 5 σύρματα. Τα σύρματα αυτά είναι δυνατόν να συνδεθούν με διάφορους τρόπους, όταν τα καλώδια αυτά χρησιμοποιούνται για εφαρμογές DC τάσης.

Η δομή του LVDC δικτύου από Ιάπωνες επιστήμονες παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Διανεμημένη παραγωγή, αποθέματα ενέργειας και μονάδες συμπαραγωγής συνδέονται στο δίκτυο DC. Η σύνθεση που χρησιμοποιεί τρία καλώδια συνεισφέρει

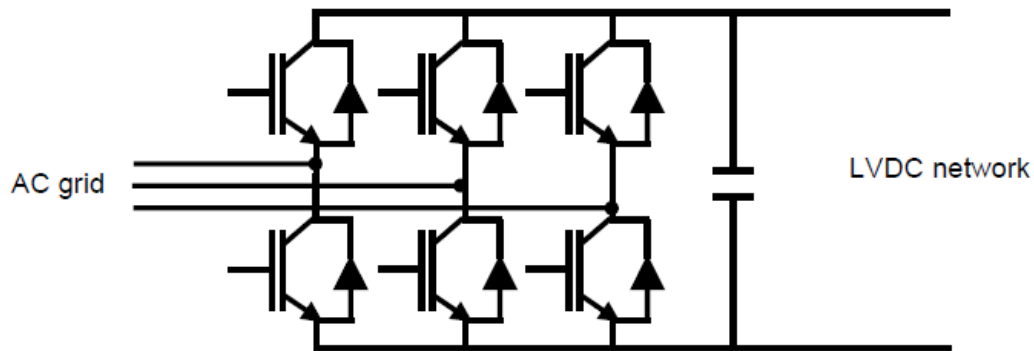
στο να είναι χαμηλή η τάση προς γη και η μία από τις μονοφασικές γραμμές χρησιμοποιείται για τον γειωμένο ουδέτερο. Οι μετατροπείς DC/DC από την πλευρά του φορτίου μπορούν να συνδεθούν στα 170 V DC είτε στα 340 V DC.



Εικόνα 2.8 Η δομή του LVDC δικτύου [8].

### 2.3 Διασυνδέοντας ένα δίκτυο LVDC με AC δίκτυα.

Η διασύνδεση μεταξύ των AC και DC συστημάτων παίζει σημαντικό ρόλο σε σχέση με την επίδοση των AC και DC συστημάτων. Διαφορετικές διεπαφές έχουν διαφορετικές δυνατότητες για τον έλεγχο των τάσεων και της ροής ισχύος μεταξύ των συστημάτων AC και DC. Γενικά, υπάρχουν διάφορες διεπαφές AC/DC, από μη ελεγχόμενες (δηλαδή η ισχύς ρέει μόνο από το AC μέρος στο DC μέρος του συστήματος) συσκευές όπως ανορθωτές διόδων, μέχρι πλήρως ελεγχόμενες, όπως οι μετατροπείς πηγής τάσης (VSCs), οι οποίοι βασίζονται στα διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBTs: Insulated Gate Bipolar Transistors). Οι VSCs μπορούν να χωριστούν σε τρεις τύπους: στους VSCs δύο επιπέδων, τριών επιπέδων και σε εκείνους που διαθέτουν buck μετατροπέα. Οι VSCs, οι οποίοι βασίζονται στα IGBT, έχουν την ικανότητα να ελέγχουν τις τάσεις στο DC μέρος του συστήματος και να επιτρέπουν τη μεταφορά ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις μεταξύ του AC και του LVDC συστήματος. Αυτό θα διευκολύνει την αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που θα απαντώνται στα LVDC δίκτυα. Η ενεργός και η άεργος ισχύς μεταξύ του AC και του DC συστήματος μπορούν να ελεγχθούν αυτόνομα όταν χρησιμοποιούνται VSCs. Επιπροσθέτως, διεπίπεδοι VSCs μπορούν να συνδυαστούν με γαλβανική απομόνωση, προκειμένου να καταστήσουν δυνατή την απόζευξη μεταξύ των AC και DC συστημάτων. Αυτό το στοιχείο βοηθά τον μετατροπέα να είναι πιο προσαρμοστικός, και βοηθά τα DC συστήματα να απορρίπτουν, σε κάποιο βαθμό, τις διαταραχές του δικτύου AC [7].



Εικόνα 2.9 VSC, ο οποίος αποτελείται από IGBTs και ο οποίος συνδέει ένα δίκτυο LVDC με ένα δίκτυο AC [7].

## 2.4 Τα επίπεδα τάσης ενός LVDC δικτύου.

Σχετικά με τα επίπεδα τάσης στα δίκτυα διανομής, η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης υπ' αριθμόν 2006/95/EC για τη χαμηλή τάση επιτρέπει τη χρήση τάσεων μέχρι 1kV για τα συστήματα LVAC και μέχρι 1.5kV για τα συστήματα LVDC, και κάθε τάση πάνω από αυτές τις τιμές δεν μπορεί να θεωρηθεί ως χαμηλή τάση. Το Φινλανδικό εθνικό πρότυπο, το οποίο εισηγήθηκε η εταιρεία ηλεκτροτεχνικής προτυποποίησης, έχει προτείνει ότι το επίπεδο της DC τάσης μεταξύ δύο αγωγών ενός καλωδίου χαμηλής τάσης δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 1.5kV, ενώ μεταξύ ενός αγωγού και της γης δεν θα πρέπει να είναι πάνω από 0.9kV. Αυτές οι εισηγήσεις έχουν προσδιορίσει τα όρια των DC τάσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα LVDC, αλλά το επίπεδο της τάσης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις λειτουργικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, η καινούρια προδιαγραφή της βιομηχανίας, η οποία ταυτόχρονα είναι και το μοναδικό στάνταρ για το επίπεδο τάσης των LVDC δικτύων τα οποία τροφοδοτούν τα κέντρα δεδομένων έχει επιλεγεί να είναι τα 380V. Αυτό το επίπεδο DC τάσης έχει υιοθετηθεί διεθνώς και έχει επαληθευθεί σε πολλά κέντρα δεδομένων σε όλο τον κόσμο. Οι κύριοι λόγοι για την επιλογή αυτού του επιπέδου τάσης λέγεται ότι είναι το χαμηλό κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας. Το ερώτημα που απομένει είναι, ποια θα είναι τα καταλληλότερα επίπεδα τάσης για τα μελλοντικά δίκτυα LVDC, αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν κατά τον βέλτιστο τρόπο τα υπάρχοντα καλώδια χαμηλής τάσης;

Τα παραδοσιακά καλώδια χαμηλής τάσης έχουν διάφορες διαβαθμίσεις τάσης, ανάλογα με το μέγεθός τους και τα μονωτικά υλικά. Τα μεγαλύτερα καλώδια χαμηλής τάσης είναι βαθμονομημένα ως 600V/1kV (φάση προς γη/ φάση προς φάση), ενώ τα μικρότερα καλώδια είναι βαθμονομημένα στην περιοχή από 450V/750V (Φ-Φ/Φ-Γ) για εγκαταστάσεις μονού καλωδίου, μέχρι 500V Φ-Φ και 300V Φ-Γ για εγκαταστάσεις πολλών καλωδίων. Αυτές οι διαβαθμίσεις συγκεκριμενοποιούνται ως λειτουργικές τιμές RMS, και αντιπροσωπεύουν το ποσό της θερμότητας που η AC τάση θα παράξει συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες DC τάσεις. Αυτό σημαίνει ότι η ίδια ισχύς μπορεί να μεταφερθεί από το εναλλασσόμενο και το συνεχές ρεύμα, στο βαθμό που η ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου είναι ίση με το αντίστοιχο συνεχές ρεύμα.

Ωστόσο, οι πραγματικές AC τάσεις που εφαρμόζονται κανονικά στα καλώδια χαμηλής τάσης είναι οι μέγιστες τιμές. Συνεπώς, αν ένα καλώδιο χαμηλής τάσης χρησιμοποιηθεί για μία DC εφαρμογή, η διαβάθμιση της DC τάσης μπορεί να είναι ίση με την μέγιστη, αντί για την ενεργό, τιμή της AC τάσης. Η χρήση μιας DC τάσης,

ίσης με την μέγιστη τιμή της AC τάσης δίνει την ευκαιρία μεταφοράς της ίδιας ισχύος με μικρότερο ρεύμα. Αυτό μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο για τη μείωση των θερμικών απωλειών στις γραμμές χαμηλής τάσης και αυξάνει σημαντικά την χωρητικότητα των καλωδίων όταν αυτά χρησιμοποιούνται στα LVDC δίκτυα. Μπορούν όμως οι εγκάρσιες τομές και οι μονώσεις των υπαρχόντων AC καλωδίων χαμηλής τάσης να αντέξουν DC τάσεις ίσες με τους χαρακτηρισμούς AC των καλωδίων πολλαπλασιασμένους επί 1.4; Η απάντηση στην ερώτηση αυτή είναι ναι.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός πραγματικού αγροτικού διπολικού LVDC δοκιμαστικού δικτύου το οποίο ανήκει στην Finnish Energy SSS Ltd και το οποίο κατασκευάστηκε ως μέρος του φινλανδικού εθνικού ερευνητικού προγράμματος για τα έξυπνα δίκτυα (Smart Grids), έχει αποδείξει ότι τα υπάρχοντα AC καλώδια χαμηλής τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή τάση ακόμα και με τάσεις ίσες με τη μέγιστη τιμή της AC διαβάθμισής τους, χωρίς καμμία βλάβη. Ένα τυπικό μονωμένο, υπόγειο AC καλώδιο του 1kV έχει επιτυχώς χρησιμοποιηθεί ως DC καλώδιο τροφοδοσίας για ένα φινλανδικό δοκιμαστικό δίκτυο χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος. Καλώδια του 1kV AC μπόρεσαν να χρησιμοποιηθούν ως καλώδια DC με τάση μέχρι και  $\pm 750$  (1.5kV μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου. ). Η δυνατότητα χρησιμοποίησης των υπαρχόντων καλωδίων χαμηλής τάσης ως καλώδια LVDC μπορεί να εξηγηθεί περαιτέρω ως εξής. Οι τάσεις λειτουργίας των καλωδίων είναι συνήθως ίσες με το ένα τρίτο της τάσης διηλεκτρικής αντοχής τους. Η τάση αυτή είναι κανονικά περίπου ίση με το 75% της τάσης διάσπασης. Συνεπώς, η RMS τάση λειτουργίας είναι ίση μόλις με το ένα τέταρτο της τάσης διάσπασης και άρα η DC τάση λειτουργίας θα είναι ίση με το 35% της τάσης διάσπασης στην περίπτωση που ως τιμή της χρησιμοποιηθείσας συνεχούς τάσης έχει επιλεγεί η μέγιστη τιμή της AC τάσης.

Ωστόσο, δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η μεγαλύτερη διαθέσιμη τιμή της DC τάσης προκειμένου να δικαιολογηθεί η υιοθέτηση του LVDC και να μειωθούν οι απώλειες του δικτύου. Άλλες επιλογές που αυξάνουν την επωφελή χρησιμοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού μπορούν να θεωρηθούν. Υπάρχουν τρεις επιλογές για το επίπεδο της τάσης ενός LVDC δικτύου. Η πρώτη επιλογή είναι η χρήση της μέγιστης DC τάσης που μπορεί να εφαρμοσθεί ανάλογα με το μέγεθος του χρησιμοποιούμενου καλωδίου. Αυτή η μέθοδος θα προσφέρει τη μέγιστη αύξηση της χωρητικότητας ισχύος. Η δεύτερη επιλογή είναι η μετατροπή του υπάρχοντος AC των 0.4kV σε DC και η τρίτη επιλογή είναι η παροχή στην πλευρά του καταναλωτή DC τάσης ίσης με την AC ενεργό (RMS) τιμή των 230V. Ακολουθούν η συλλογιστική, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε επιλογής.

Η χρήση της μέγιστης τιμής της τάσης που επιτρέπουν τα χρησιμοποιούμενα καλώδια οδηγεί στη μέγιστη ικανότητα ισχύος και στις ελάχιστες απώλειες πάνω στις γραμμές. Στον αντίποδα, περισσότερα στάδια μετατροπής απαιτούνται προκειμένου να υποβιβαστεί η τάση στα κατάλληλα επίπεδα για τη σύνδεση των τοπικών φορτίων και των παραγωγών. Αυτό μπορεί να αυξήσει το κόστος υλοποίησης του συστήματος.

Το σκεπτικό πίσω από την δεύτερη επιλογή είναι ότι πολλές ηλεκτρονικές συσκευές έχουν ανορθωτές εισόδου που λειτουργούν με τάση μέγιστης τιμής 230V AC, που ισοδυναμεί με 326V DC. Οπότε όλες αυτές οι συσκευές είναι δυνατόν να συνδεθούν απευθείας στα 326V DC αν οι ανορθωτές αφαιρεθούν. Συνεπώς, πολλά από τα υπάρχοντα φορτία θα μπορούν να τροφοδοτηθούν από αυτό το επίπεδο τάσης. Τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι τα λιγότερα στάδια μετατροπής και η

μείωση των αρμονικών. Όμως η ικανότητα μεταφοράς ισχύος είναι μικρότερη, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.

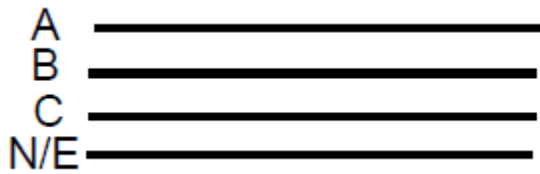
Το σκεπτικό της τρίτης επιλογής είναι ότι όλα τα φορτία σταθερής αντίστασης, όπως οι θερμάστρες, τα οποία τροφοδοτούνται από AC τάση ενεργού τιμής 230V θα μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο DC σύστημα, χωρίς μετατροπή. Το αρνητικό αυτής της προσέγγισης είναι ότι η ικανότητα μεταφοράς ισχύος των καλωδίων αξιοποιείται λιγότερο σε σχέση και με τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις.

## **2.5 Διατάξεις των καλωδίων LVDC.**

Αν χρησιμοποιηθούν τα υπάρχοντα καλώδια χαμηλής τάσης για εφαρμογές LVDC, υπάρχουν πολλές πιθανές συνδεσμολογίες προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση του φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι τα υπάρχοντα δίκτυα χαμηλής τάσης έχουν διάφορα καλώδια με διαφορετικό αριθμό αγωγών. Τυπικά, τα παραδοσιακά συστήματα χαμηλής τάσης μπορούν να τροφοδοτήσουν τα φορτία τους μέσω τετραπύρηνων καλωδίων SNE (Separate Neutral Earth). Αυτός ο τύπος καλωδίου έχει τρεις αγωγούς για τις φάσεις, έναν αγωγό για τον ουδέτερο και έναν για τη σύνδεση με τη γη. Ένας άλλος συνηθισμένος τύπος καλωδίου χαμηλής τάσης είναι το τριπύρηνιο καλώδιο CNE (Combined Neutral Earth), με τρεις αγωγούς για τις φάσεις και έναν για τον ουδέτερο και τη σύνδεση με τη γη. Ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται τα καλώδια, ο ουδέτερος και ο αγωγός γης των τετραπύρηνων καλωδίων SNE και των τριπύρηνων CNE μπορεί να είναι όμοιοι με τους αγωγούς φάσης ή διαφορετικοί σε μέγεθος και σχήμα. Τα καλώδια μπορούν να είναι σχεδιασμένα με μικρότερους ουδέτερους αγωγούς και αγωγούς γης ενισχυμένης κυματομορφής. Αυτό συμβαίνει διότι οι αγωγοί ουδέτερου και γης των AC καλωδίων δεν σχεδιάζονται για να μεταφέρουν μεγάλα ρεύματα κάτω από κανονικές συνθήκες. Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες και το κόστος των καλωδίων στα AC συστήματα, το τριφασικό σύστημα σχεδιάζεται για να φορτιστεί συμμετρικά. Αυτό επιτρέπει τη χρήση μικρότερων αγωγών για τον ουδέτερο και τη γη, και συνεπώς επιτρέπει εξοικονόμηση στο υλικό των αγωγών. Κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, ο αγωγός γης μπορεί να μεταφέρει ρεύματα σφάλματος, αλλά μόνο για ένα πολύ μικρό διάστημα και τα ρεύματα σφάλματος εκκαθαρίζονται πολύ γρήγορα από τις συσκευές προστασίας. Επιπλέον, αφού οι τάσεις της γραμμής και της φάσης δεν είναι οι ίδιες, το πάχος της μόνωσης μεταξύ του αγωγού φάσης και του μικρότερου αγωγού ουδέτερου ή γης, μπορεί να είναι μικρότερο από τη μόνωση μεταξύ δύο αγωγών φάσης.

Αυτοί οι παράγοντες οφείλουν να υπολογιστούν όταν τριφασικά AC καλώδια σκοπεύεται να χρησιμοποιηθούν για LVDC συστήματα. Θα πρέπει να αποφευχθεί η χρήση δύο αγωγών στο ίδιο κύκλωμα DC με διαφορετικές διατομές, διαφορετικές μονώσεις και διαφορετικά θερμικά όρια. Η χρήση αγωγών διαφορετικής διατομής (για παράδειγμα ενός αγωγού φάσης και ενός μικρότερου ουδέτερου αγωγού στο ίδιο κύκλωμα DC) θα μειώσει την ικανότητα ισχύος, λόγω των θερμικών ορίων των μικρότερων αγωγών. Παρακάτω περιγράφονται οι πιθανές επιλογές για τη σύνδεση διαφόρων AC καλωδίων, όταν αυτά χρησιμοποιούνται για LVDC εφαρμογές.

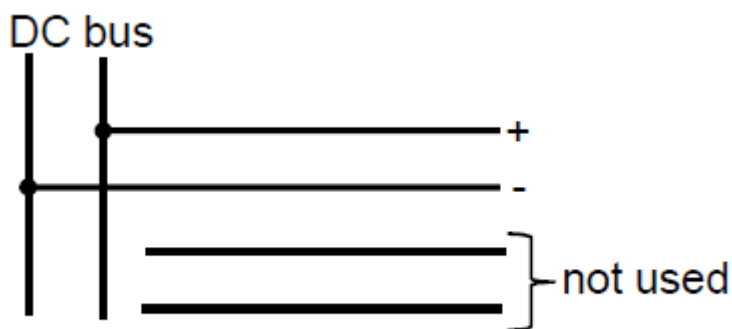
Το τριπύρηνιο καλώδιο CNE διαθέτει τρεις αγωγούς για τις φάσεις και έναν αγωγό για τον ουδέτερο και τη γη, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.10 Τετραπύρρηνο καλώδιο CNE για τριφασική AC σύνδεση [7].

Στην περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε ένα τέτοιο καλώδιο, έχουμε τις παρακάτω δυνατότητες για τη συνδεσμολόγηση των αγωγών του καλωδίου για LVDC εφαρμογές. Αν επιλέξουμε μονοπολική συνδεσμολογία έχουμε τις παρακάτω επιλογές:

Επιλογή 1<sup>η</sup>: Μονοπολική σύνδεση DC με ένα τερματικό.



Εικόνα 2.11 Μονοπολική σύνδεση DC με ένα τερματικό [7].

Εφαρμογές/ Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα:

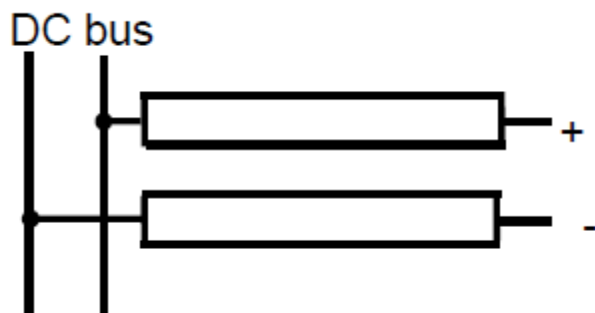
Αυτή η συνδεσμολογία είναι πιο κατάλληλη για τριπύρρηνα καλώδια με μικρότερο ουδέτερο ή με ενισχυμένη κυματομορφή, όπου το καλώδιο της γης έχει μικρότερο μέγεθος συγκρινόμενο με τους αγωγούς της γραμμής (αν ο μικρότερος ουδέτερος χρησιμοποιηθεί με τους αγωγούς γραμμής, το αποτέλεσμα θα είναι δύο καλώδια τα οποία θα μεταφέρουν το ίδιο ρεύμα με διαφορετικά θερμοκά όρια, και αυτή ενδεχομένως να μην είναι μια επιθυμητή λειτουργική κατάσταση. ).

Είναι λιγότερο αξιόπιστη σε σχέση με την μονοπολική DC σύνδεση δύο τερματικών, καθώς επίσης και από τα διπολικά συστήματα.

Δύο αγωγοί δεν χρησιμοποιούνται, γεγονός που οδηγεί σε μειωμένη αποτελεσματικότητα. Όμως μπορούν ακόμα να θεωρηθούν ως αγωγοί εν αναμονή ή να χρησιμοποιηθούν για τη γείωση.

Επιλογή 2<sup>η</sup>: Μονοπολική σύνδεση DC με ένα τερματικό και μειωμένη ισοδύναμη αντίσταση.





Εικόνα 2.12 Μονοπολική σύνδεση DC με ένα τερματικό και μειωμένη ισodύναμη αντίσταση [7].

Εφαρμογές/ Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα:

Η ισodύναμη αντίσταση είναι μικρότερη λόγω των παράλληλων συνδέσεων, και άρα μειώνονται οι συνολικές απώλειες ισχύος, καθώς επίσης και η πτώση τάσης.

Εφαρμόζεται ευκολότερα σε τριπύρηνα καλώδια χωρίς θωράκιση, τα οποία έχουν όμοιους αγωγούς.

Δεν είναι ιδανική για τριπύρηνα καλώδια με μικρότερο ουδέτερο ή ενισχυμένης κυματομορφής.

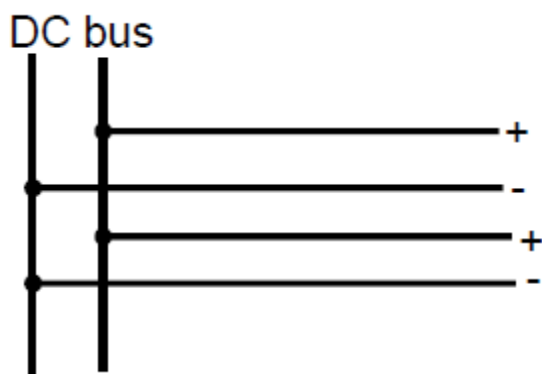
Είναι λιγότερο αξιόπιστη σε σχέση με τη διπολική συνδεσμολογία και τα μονοπολικά συστήματα με δύο τερματικά.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα είναι μεγαλύτερο.

Το ρεύμα του DC φορτίου ίσως να είναι μεγαλύτερο από το AC ρεύμα στο τριφασικό AC σύστημα, για την παροχή της ίδιας ισχύος. Αυτό συμβαίνει επειδή η ίδια ισχύς μεταφέρεται από δύο αγωγούς αντί για τρεις.

Δεν θα υπάρχει αγωγος διαθέσιμος για γείωση αν ένας τέτοιος αγωγός απαιτηθεί.

Επιλογή 3η : Μονοπολική DC σύνδεση με δύο τερματικά.



Εικόνα 2.13 Μονοπολική DC σύνδεση με δύο τερματικά [7].

Εφαρμογές/ Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα:

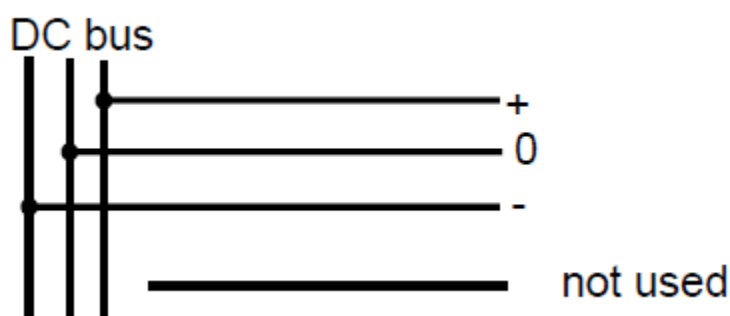
Η μεταφερόμενη ισχύς είναι διπλάσια σε σχέση με τη μονοπολική συνδεσμολογία DC με ένα τερματικό.

Είναι πιο αξιόπιστη στην περίπτωση αποτυχίας του ενός κυκλώματος.

Είναι πιο κατάλληλο για τριπύρηννα SNE καλώδια χωρίς θωράκιση, όπου όλοι οι αγωγοί είναι όμοιοι μεταξύ τους.

Δεν υπάρχει αγωγός διαθέσιμος για γείωση αν απαιτηθεί.

Ενώ αν επιλέξουμε διπολική συνδεσμολογία, έχουμε την παρακάτω δυνατότητα:



Εικόνα 2.14 Διπολική DC σύνδεση [7].

Εφαρμογές/ Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα:

Η ισχύς μεταφέρεται από δύο αγωγούς και ένα μονοπάτι επιστροφής.

Παρέχει μεγαλύτερη χωρητικότητα ισχύος σε σχέση με τις μονοπολικές συνδεσμολογίες.

Είναι πιο κατάλληλη για όλους τους τύπους καλωδίων χαμηλής τάσης (θωρακισμένα και μη).

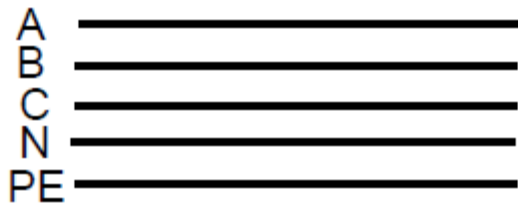
Όλοι οι αγωγοί DC είναι πανομοιότυποι, με τα ίδια θερμικά όρια.

Τα διπολικά συστήματα είναι πιο αξιόπιστα σε σχέση με τα μονοπολικά.

Αν τα συνδεδεμένα φορτία δεν είναι πανομοιότυπα, μία συνθήκη ανισορροπίας θα εισαχθεί στο σύστημα.

Αυτή η συνδεσμολογία είναι πιο ακριβή.

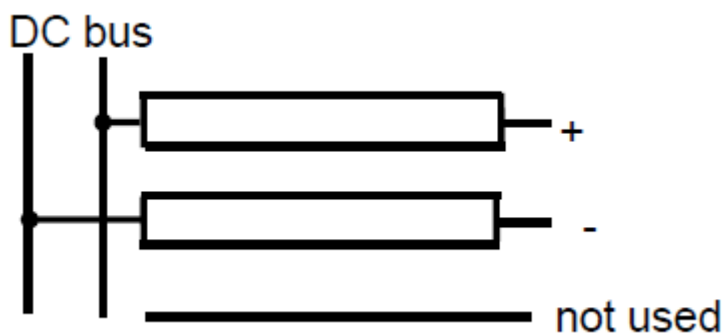
Το τετραπύρηννο καλώδιο SNE διαθέτει τρεις αγωγούς για τις φάσεις, ένα για τον ουδέτερο και ένα για τη γη, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.15 Τετραπύρρηνο καλώδιο SNE [7].

Αν χρησιμοποιήσουμε αυτό το καλώδιο, έχουμε τις εξής επιλογές για τη συνδεσμολόγηση των αγωγών του για εφαρμογές LVDC:

Επιλογή 1η: Μονοπολική σύνδεση DC με έναν αγωγό και με μειωμένη ισοδύναμη αντίσταση.



Εικόνα 2.16 Μονοπολική σύνδεση DC με έναν αγωγό και με μειωμένη ισοδύναμη αντίσταση [7].

Εφαρμογές/ Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα:

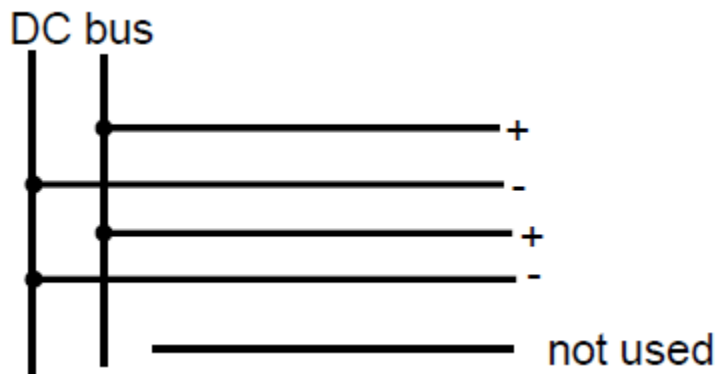
Οι συνολικές απώλειες μειώνονται.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται.

Είναι πιο κατάλληλο και για τα θωρακισμένα και για τα μη θωρακισμένα τετραπύρρηνα καλώδια χαμηλής τάσης.

Τα συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν αυτήν την συνδεσμολογία, είναι λιγότερο αξιόπιστα από τα μονοπολικά συστήματα με δύο τερματικά, καθώς και από τα διπολικά συστήματα.

Επιλογή 2η: Μονοπολική DC σύνδεση με δύο τερματικά.



Εικόνα 2.17 Μονοπολική DC σύνδεση με δύο τερματικά [7].

Εφαρμογές/ Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα:

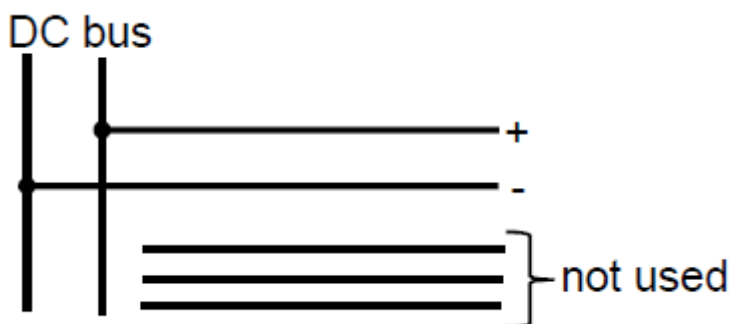
Η χωρητικότητα ισχύος είναι διπλάσια σε σχέση με την περίπτωση μονοπολικής σύνδεσης με ένα τερματικό.

Είναι πιο αξιόπιστη σε σχέση με την μονοπολική σύνδεση ενός τερματικού.

Είναι κατάλληλη για όλα τα είδη καλωδίων χαμηλής τάσης.

Τα ρεύματα μεταφέρονται από δύο κυκλώματα αντί για ένα.

Επιλογή 3η: Μονοπολική DC σύνδεση με ένα τερματικό.



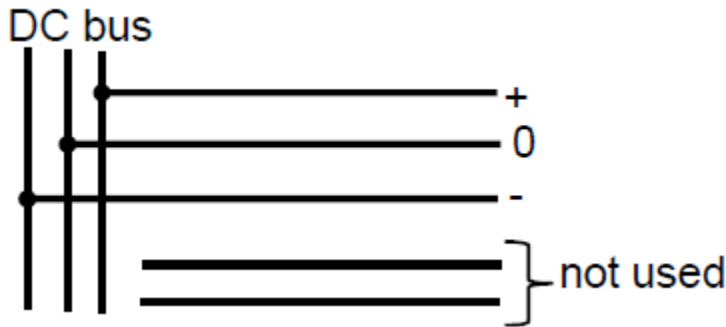
Εικόνα 2.18 Μονοπολική DC σύνδεση με ένα τερματικό [7].

Εφαρμογές/ Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα:

Ένα σύστημα, το οποίο χρησιμοποιεί τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία και συνεπώς αφήνει τρεις από τους διαθέσιμους αγωγούς αχρησιμοποίητους, είναι λιγότερο αποτελεσματικό σε σχέση τόσο με ένα μονοπολικό σύστημα με δύο τερματικά, όσο και με ένα διπολικό σύστημα.

Είναι λιγότερο αξιόπιστο από τα μονοπολικά συστήματα με δύο τερματικά, καθώς επίσης και από τα διπολικά συστήματα.

Αν επιλέξουμε διπολική συνδεσμολογία, έχουμε την παρακάτω δυνατότητα:



Εικόνα 2.19 Διπολική σύνδεση [7].

Εφαρμογές/ Πλεονεκτήματα/ Μειονεκτήματα:

Η ισχύς είναι διπλάσια σε σύγκριση με τις μονοπολικές συνδέσεις.

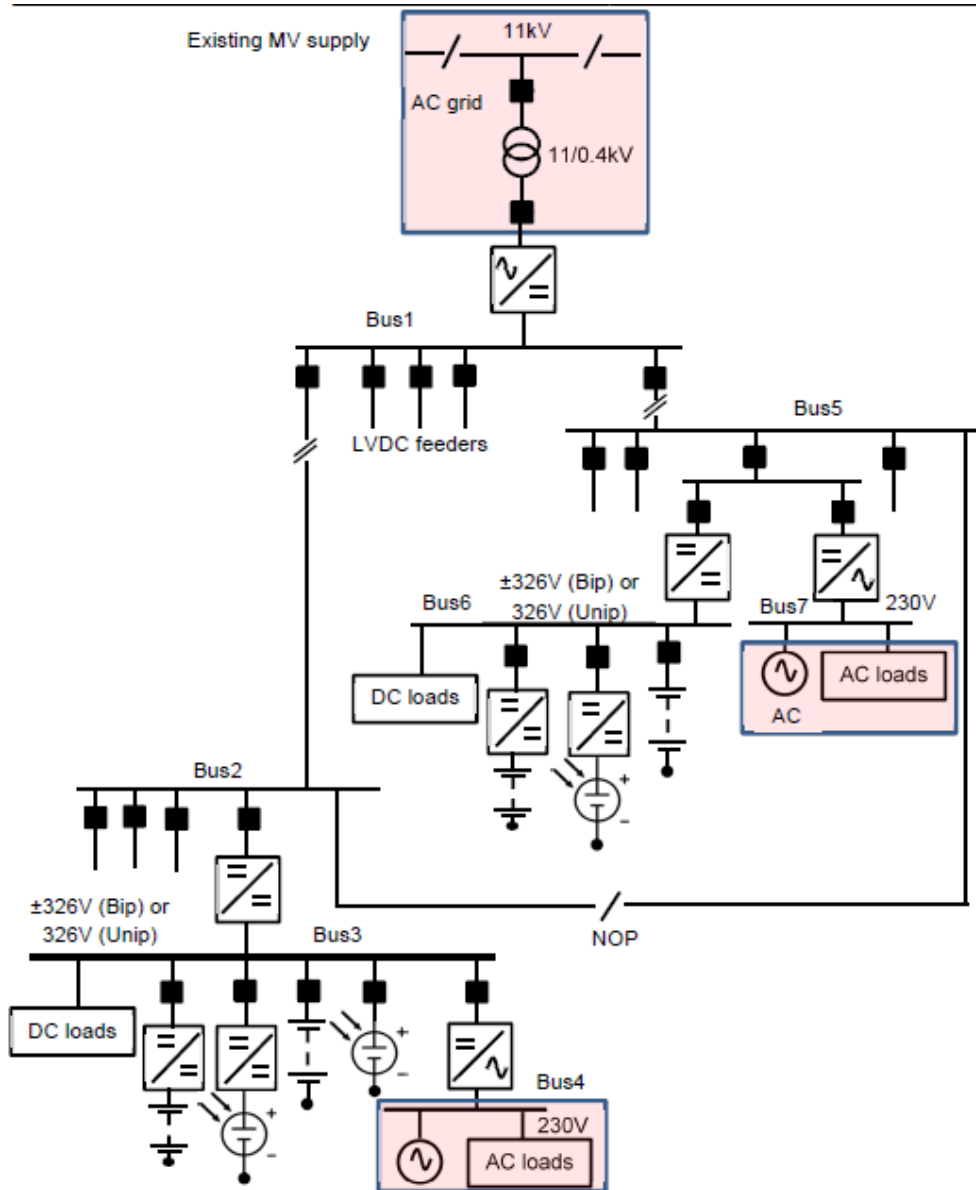
Αυτή η συνδεσμολογία είναι πιο κατάλληλη για όλους τους τύπους καλωδίων χαμηλής τάσης (θωρακισμένα και μη).

Όλοι οι DC αγωγοί είναι πανομοιότυποι με τα ίδια θερμικά όρια.

Οι διπολικές διατάξεις προσφέρουν μεγαλύτερη χωρητικότητα ισχύος, αλλά η εξισορρόπηση της τάσης κατά μήκος του φορτίου μπορεί να παρουσιάζει προβλήματα. Αυτό απαιτεί την υλοποίηση περισσότερων συναρτήσεων ελέγχου στους μετατροπείς, γεγονός το οποίο οδηγεί σε αύξηση του κόστους. Το μονοπολικό σύστημα είναι λιγότερο σύνθετο, αλλά η παρεχόμενη χωρητικότητα ισχύος είναι μικρότερη σε σχέση με το διπολικό. Τα μονοπολικά συστήματα μπορούν να έχουν ένα ή δύο τερματικά, ανάλογα με τον τύπο του καλωδίου και την απαιτούμενη λειτουργία. Η μονοπολική DC συνδεσμολογία ενός τερματικού μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση οποιουδήποτε καλωδίου χαμηλής τάσης, αλλά εκείνη με δύο τερματικά απαιτεί τριπύρηνα CNE ή τετραπύρηνα καλώδια. Οι διπολικές συνδέσεις απαιτούν τρεις αγωγούς, οπότε θωρακισμένα και μη, τρι- ή τετρα-πύρηνα καλώδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν, και οι εναπομείναντες αγωγοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη γείωση, αν το σύστημα προς υλοποίηση προορίζεται να είναι γειωμένο. Τα επίπεδα της DC τάσης που μπορούν να εφαρμοσθούν στα DC καλώδια επηρεάζονται από το μέγεθος των καλωδίων και άλλες λειτουργικές απαιτήσεις, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει το μονογραμμικό διάγραμμα ενός LVDC παραδείγματος (μονοπολικού και διπολικού). Το LVDC δίκτυο διασυνδέεται με το AC σύστημα μέσω ενός VSC, ο οποίος αποτελείται από IGBTs και τοποθετείται αμέσως μετά τον μετασχηματιστή μέσης σε χαμηλή τάση. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, υπάρχουν πολλές ηλεκτρονικές συσκευές που έχουν ανορθωτές εισόδου οι οποίοι δίνουν, κατά μέγιστη τιμή, 230V AC. Συνεπώς, το DC δίκτυο μπορεί να προμηθεύσει τα DC και AC φορτία μέσω των συνηθισμένων 326V, τα οποία παρέχονται από έναν DC/DC μετατροπέα, όπως φαίνεται στον ζυγό 3 της παρακάτω εικόνας. Όλα τα DC φορτία και η μικροπαραγωγή που παράγει DC εξόδους μπορούν να συνδεθούν είτε απευθείας, είτε μέσω DC/DC μετατροπέων στον ζυγό αυτό. Τα AC φορτία και η μικροπαραγωγή που παράγει AC εξόδους, μπορούν να συνδεθούν στον ζυγό των 326V DC μέσω AC/DC μετατροπέων. Η άλλη επιλογή για τη σύνδεση των εγκαταστάσεων των καταναλωτών είναι μέσω δύο ξεχωριστών μετατροπέων DC/DC και AC/DC όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα μεταξύ τόσο των ζυγών 5 και 6,

όσο και των 5 και 7. Η συγκεκριμένη συνδεσμολογία μπορεί να είναι χρήσιμη αν ένας από τους μετατροπείς αποσυνδεθεί ή παρουσιάσει σφάλμα. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο άλλος μετατροπέας μπορεί ακόμα να παράσχει ισχύ στις εγκαταστάσεις.



Εικόνα 2.20 Παράδειγμα τοπολογίας ενός LVDC δικτύου [7].

### 2.2.5 Συστήματα γείωσης για τα LVDC συστήματα.

Οι τεχνικές γείωσης χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανίχνευση των σφαλμάτων προς γη και για την ασφάλεια τόσο του προσωπικού, όσο και του εξοπλισμού. Τα υπάρχοντα καλώδια AC έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τις απαιτούμενες διατάξεις για τη γείωση. Γενικά, τα συστήματα χαμηλής τάσης είναι δυνατό να έχουν πέντε διαφορετικούς τύπους γείωσης: TN-S, TN-C-S, TT, TN-C, και IT. Οι πολλαπλές γειώσεις προστασίας των συστημάτων γείωσης TN-S, TN-C-S επιτρέπονται για τα βρετανικά δίκτυα χαμηλής τάσης. Οι παλιές αστικές κατοικίες στη Βρετανία έχουν TN-S παροχές και η σύνδεση με τη γη παρέχεται από το περίβλημα μολύβδου των

υπογείων καλωδίων. Το TN-C είναι πολύ ασυνήθιστο στη Βρετανία, και το σύστημα γείωσης IT (στο οποίο η πηγή δεν είναι γειωμένη απευθείας) δεν επιτρέπεται για τα δημόσια δίκτυα χαμηλής τάσης στη Βρετανία. Στη Βρετανία και στα περισσότερα σύγχρονα σπίτια ανά την Ευρώπη, το σύστημα γείωσης TN-C-S χρησιμοποιείται ευρέως. Στο σύστημα αυτό, ο κοινός αγωγός ουδέτερου και γης γειώνεται σε πολλά σημεία, έτσι ώστε να μειώσει τον κίνδυνο, σε περίπτωση που ο ουδέτερος έχει σπάσει. Σε αυτήν την περίπτωση, το ουδέτερο σημείο των δευτερευόντων τυλιγμάτων των Dyl1 μετασχηματιστών γειώνεται σταθερά, και ο ουδέτερος γειωμένος αγωγός χωρίζεται σε ουδέτερο αγωγό και σε αγωγό γης στην πλευρά του καταναλωτή.

Σχετικά με τα δίκτυα διανομής συνεχούς ρεύματος, το σύστημα γείωσης μπορεί να αποτελέσει ένα σύνθετο ζήτημα. Διαφορετικά συστήματα γείωσης οδηγούν σε διαφορετική επίδοση του συστήματος. Τα LVDC συστήματα μπορούν να έχουν ένας από τους ακόλουθους τύπους γείωσης: να είναι αγείωτα, να είναι γειωμένα μέσω αντίστασης υψηλής τιμής, ή να είναι σταθερά γειωμένα/γειωμένα μέσω μιας αντίστασης χαμηλής τιμής. Η γείωση μέσω αντίστασης χαμηλής τιμής έχει το πλεονέκτημα της ανίχνευσης ρευμάτων σφάλματος, όμως οι μεταβατικές τάσεις και τα μεταβατικά ρεύματα είναι υψηλά, γεγονός το οποίο έχει σοβαρές επιπτώσεις στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα του συστήματος. Η επίδραση των μεταβατικών τάσεων και ρευμάτων θα μειωθεί σε δίκτυα που γειώνονται μέσω υψηλής αντίστασης, και επίσης με αυτόν τον τρόπο οι μετατροπείς του συστήματος θα είναι περισσότερο προστατευμένοι. Ωστόσο, μπορεί να είναι δύσκολο να ανιχνευθούν τα σφάλματα και τα μεταλλικά μέρη στην πλευρά των φορτίων μπορεί να φορτιστούν και συνεπώς να καταστούν επικίνδυνα.

Διάφορες μελέτες έχουν υποδείξει ότι τα LVDC δίκτυα θα πρέπει να είναι αγείωτα IT συστήματα. Η γείωση είναι δυνατόν να περιοριστεί, στην DC πλευρά του συστήματος, στα μεταλλικά μέρη, και τα δίκτυα των καταναλωτών, συμπεριλαμβανομένων των AC φορτίων γειώνονται τοπικά. Ο κύριος σκοπός αυτής της επιλογής είναι η παροχή επιπλέον προστασίας στους μετατροπείς έναντι υψηλών ρευμάτων σφάλματος, μέσω της πρόληψης δημιουργίας μιας οδού βραχυκυκλώσεως ανάμεσα στο AC και το DC σύστημα μέσω της γης. Σε αυτήν την περίπτωση, το σύστημα θα χρησιμοποιεί τεχνικές γείωσης παρόμοιες με το TT σύστημα γείωσης. Επιπλέον, το δευτερεύον του μετασχηματιστή μέσης προς χαμηλή τάση μπορεί ακόμα να γειωθεί, χωρίς ένα σημείο αναφοράς για τη γείωση στην DC πλευρά, ενώ οι γειώσεις προστασίας των συσκευών των καταναλωτών παρέχονται τοπικά. Ωστόσο, επειδή οι συνδέσεις προς γη των καταναλωτών είναι ανεξάρτητες από την γείωση αναφοράς του δικτύου, περαιτέρω προστασία θα είναι απαραίτητη για την προστασία έναντι σφαλμάτων γης. Οικιακές συσκευές μέτρησης ρεύματος θα είναι απαραίτητες για την προστασία έναντι σφαλμάτων γης στην πλευρά των καταναλωτών των αγείωτων LVDC συστημάτων. Αυτό θα οδηγήσει σε επιπλέον κόστος για συσκευές προστασίας, καθώς επίσης και κόστος για την προσθήκη ηλεκτροδίων γης σε όλες τις εγκαταστάσεις. Επίσης, θα είναι πιο δύσκολο να διατηρηθεί το ρεύμα του ουδέτερου στο μηδέν στα διπολικά DC συστήματα, προκειμένου να διατηρείται η ισορροπία μεταξύ των θετικών και των αρνητικών τάσεων, αν το LVDC δίκτυο είναι αγείωτο.

Τα διπολικά LVDC δίκτυα είναι δυνατόν να γειωθούν μέσω αντίστασης χαμηλής τιμής στον ουδέτερο αγωγό, ή μέσω αντιστάσεων γείωσης μερικών Ohm για την επιπλέον προστασία των μετατροπέων και την ελαχιστοποίηση της ροής ρεύματος μέσω του ουδέτερου. Αυτό θα παράσχει ένα σημείο αναφοράς για το DC σύστημα, και στην περίπτωση ενός συστήματος με καλοσχεδιασμένο και ελεγχόμενο

μετατροπέα, θα υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης της μίας γραμμής του διπολικού LVDC για τη μεταφορά της μισής ισχύος αν η άλλη γραμμή είναι εκτός λειτουργίας. Αν απαιτείται η απόζευξη μεταξύ της AC και της DC πλευράς προκειμένου να αυξηθεί η προσαρμοστικότητα του LVDC συστήματος κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων του δικτύου AC, χρειάζονται μετασχηματιστές γαλβανικής απομόνωσης προκειμένου να σπάσουν τη σύνδεση της AC με την DC πλευρά δια μέσου της γης. Ωστόσο, η τοποθέτηση ενός μετασχηματιστή χαμηλής τάσης στην πλευρά του καταναλωτή δεν θα είναι επιθυμητή αν είναι επιθυμητή η ενεργειακή αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Η ταυτοποίηση των πλέον κατάλληλων διατάξεων για τη γείωση των LVDC δικτύων διανομής, όσον αφορά την ασφάλεια του προσωπικού και του εξοπλισμού, τη διευκόλυνση του ελέγχου της τάσης, την ανίχνευση των σφαλμάτων και την προστασία από αυτά ενδεχομένως να απαιτεί περαιτέρω μελέτη και έρευνα. Αυτό θα εξακριβώσει και αν οι υπάρχουσες τεχνικές για τη γείωση των δικτύων χαμηλής τάσης θα είναι επαρκείς για τα μελλοντικά LVDC δίκτυα ή αν αυτές οι τεχνικές θα πρέπει να μεταβληθούν για καλύτερη απόδοση.



## **Κεφάλαιο 3ο: Συγκριτική μελέτη για την Προστασία των μικροδικτύων DC και AC.**

### **3.1 Γενικά για την προστασία ηλεκτρικών δικτύων.**

Κάτα το σχεδιασμό του συστήματος προστασίας, είτε αυτό προορίζεται για σύστημα AC, είτε για DC, υπάρχουν κάποιες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για παράδειγμα η ευαισθησία, η οποία σχετίζεται με τον ορισμό ονομαστικών τιμών κατωφλίου, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα είδη του εξοπλισμού που περιλαμβάνεται στο μικροδίκτυο. Το να έχει ένα μικροδίκτυο υψηλό βαθμό ευαισθησίας σημαίνει ότι μπορεί να διακρίνει οποιαδήποτε αφύσικη κατάσταση. Ένας άλλος ρόλος του συστήματος προστασίας είναι ο καθορισμός της ζώνης σφάλματος. Στον καθορισμό αυτό, σημαντικό ρόλο έχει η επιλεκτικότητα του συστήματος προστασίας, δηλαδή η ικανότητα του συστήματος αυτού να αποσυνδέει, στα πλαίσια της προσπάθειάς του να περιορίσει τις επιπτώσεις του σφάλματος, μόνο το μέρος του δικτύου που παρουσιάζει το σφάλμα. Μία ακόμα σημαντική παράμετρος είναι ο χρόνος απόκρισης του συστήματος προστασίας, δηλαδή ο χρόνος που παρέρχεται από το συμβάν του σφάλματος μέχρι τη στιγμή που το σύστημα προστασίας επεμβαίνει. Ένας μικρός χρόνος απόκρισης αυξάνει την πιθανότητα διατήρησης της ευστάθειας του μικροδικτύου και αποφυγής πρόκλησης ζημιάς στον εξοπλισμό εξαιτίας των διαφόρων σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν. Τέλος, το επίπεδο ασφαλείας του συστήματος προστασίας σχετίζεται με την ικανότητα αυτού να επεμβαίνει μόνο στις περιπτώσεις εκείνες που είναι πραγματικά απαραίτητο και στην ικανότητά του να απορρίπτει όλες εκείνες τις εξαιρετικές περιπτώσεις που δεν οφείλονται σε σφάλματα [4].

### **3.2 Προστασία AC μικροδικτύων.**

#### **3.2.1 Εισαγωγικά για την προστασία των AC μικροδικτύων.**

Το σύστημα προστασίας ενός μικροδικτύου θα πρέπει να αποκρίνεται τόσο στα σφάλματα του μικροδικτύου, όσο και σε εκείνα του κυρίως δικτύου. Στην πρώτη περίπτωση, το σύστημα προστασίας θα πρέπει να απομονώνει το μικροδίκτυο από το κυρίως δίκτυο με την απαιτούμενη ταχύτητα. Στην δεύτερη περίπτωση, το σύστημα προστασίας πρέπει να απομονώνει το μικρότερο δυνατό μέρος του μικροδικτύου που περιέχει το σφάλμα.

Υπάρχουν δύο βασικά θέματα, σε σχέση με την προστασία των μικροδικτύων και των δικτύων διανομής, στα οποία υπάρχει μεγάλη διείδυση μονάδων ΔΠ. Το πρώτο είναι ο αριθμός των συνδεδεμένων μονάδων ΔΠ, ενώ το δεύτερο είναι η μη διαθεσιμότητα ενός επαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά την απομονωμένη λειτουργία του μικροδικτύου. Τα ρεύματα αυτά εξαρτώνται γενικά από το σημείο σύνδεσης με το κυρίως δίκτυο και από την τροφοδοτούμενη ισχύ από τις μονάδες ΔΠ. Το πλάτος και η κατεύθυνση των ρευμάτων σφάλματος σε ένα μικροδίκτυο ποικίλουν. Αυτό συμβαίνει διότι, στην πραγματικότητα, οι λειτουργικές συνθήκες σε ένα μικροδίκτυο μεταβάλλονται διαρκώς, λόγω της διαλείπουσας λειτουργίας των μονάδων ΔΠ και

της περιοδικής διακύμανσης του φορτίου. Επίσης, η τοπολογία του μικροδικτύου μπορεί και αυτή να υφίσταται μεταβολές, προκειμένου να επιτευχθούν οικονομικοί ή άλλοι στόχοι. Τελος, ελεγχόμενα νησιδοποιημένα τμήματα διαφορετικού μεγέθους και περιεχομένου είναι δυνατόν να σχηματιστούν, λόγω σφαλμάτων στο μικροδίκτυο ή στο κυρίως δίκτυο.

Σε τέτοιες συνθήκες είναι δυνατόν να χαθεί ο συντονισμός των ηλεκτρονόμων και η προστασία υπερρεύματος μπορεί να καταστεί ανεπαρκής, με την έννοια ότι δεν θα επιτυγχάνει επιλεκτική λειτουργία για όλα τα πιθανά σφάλματα. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι το σύστημα προστασίας λαμβάνει υπόψη την τοπολογία του δικτύου, καθώς επίσης και τις αλλαγές στην τοποθεσία, τον τύπο και την ποσότητα της παραγωγής. Διαφορετικά, είναι δυνατόν να συμβούν ανεπιθύμητες ή και καθόλου ενέργειες.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι δικατευθυντικές ροές ισχύος και τα χαμηλά επίπεδα του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε μικροδίκτυα που κυριαρχούνται από μικροπηγές με διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος, απαιτείται μία καινούρια φιλοσοφία για το σύστημα προστασίας, σε σχέση με εκείνη που επιστρατευόταν στα παραδοσιακά δίκτυα διανομής.

Η ύπαρξη δύο πιθανών και κανονικών καταστάσεων λειτουργίας παρουσιάζει καινούριες προκλήσεις σχετικά με τη διαχείριση του συστήματος, τη διάταξη του εξοπλισμού και τα χαρακτηριστικά του συστήματος προστασίας. Για να αποφευχθεί η μη επιλεκτική διακοπή των ηλεκτρονόμων προστασίας, το σύστημα προστασίας του μέλλοντος θα πρέπει να είναι ικανό 1) να προσδιορίζει κάθε στιγμή την κατάσταση λειτουργίας (διασυνδεδεμένη ή μη) του μικροδικτύου και 2) αυτόματα να προσδιορίζει και να εφαρμόζει τις απαιτούμενες, κάθε φορά, ρυθμίσεις του συστήματος προστασίας.

Αναμένεται να αναπτυχθούν καινούριες μέθοδοι προστασίας, ενώ, όπου αυτό είναι δυνατό, θα προσαρμοστούν οι υπάρχουσες μέθοδοι.

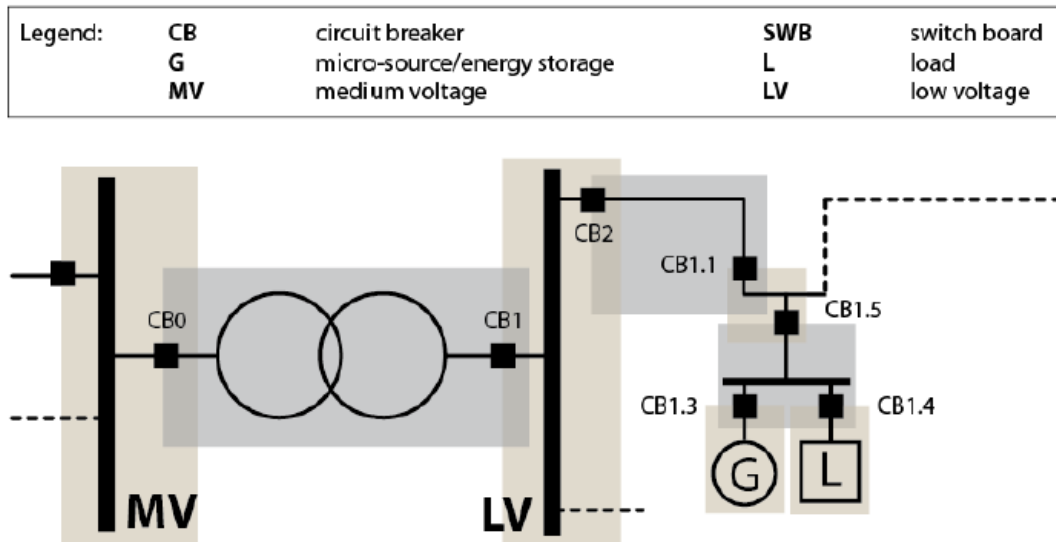
Κάποιες από τις προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα συστήματα προστασίας των μικροδικτύων είναι οι ακόλουθες:

- Αλλαγές στη λειτουργία του δικτύου, παραδείγματος χάρη, δικατευθυντικές ροές ισχύος, ταλαντούμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης, εμφάνιση καινούριων φαινομένων κάτω από συνθήκες σφάλματος (όπως αύξηση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης κατά τη διασυνδεδεμένη λειτουργία λόγω της συνεισφοράς στο ρεύμα βραχυκύκλωσης από τις μονάδες ΔΠ, μείωση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης κατά τη λειτουργία νησιδοποίησης, τύφλωση, δηλαδή μη λειτουργία της προστασίας, λόγω του ότι το ρεύμα που ανιχνεύεται στο σημείο στο οποίο λειτουργεί η συσκευή προστασίας είναι χαμηλότερο, λόγω της μείωσης του από τη συνεισφορά των μονάδων ΔΠ, του ρεύματος ενεργοποίησής της, και διακοπή εξ'αντανακλάσεως, το οποίο είναι το αντίστροφο φαινόμενο της τύφλωσης).
- Επιτάχυνση των μεταβατικών φαινομένων.

- Καταλληλότητα των συμβατικών πρακτικών προστασίας, όσον αφορά τις νέες λειτουργικές καταστάσεις του δικτύου και τα αντίστοιχα φαινόμενα [10].

### 3.2.2 Η προστασία των παραδοσιακών δικτύων διανομής.

Γενικά ένα σύστημα διανομής χαμηλής τάσης διαίρεται σε τοπικές προστατευτικές ζώνες, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.1 Ζώνες προστασίας των διαφόρων διακοπών κυκλώματος MT και XT με ηλεκτρονόμους υπερρεύματος [10].

Οι απαιτήσεις που παρέχουν μια βάση για τα κριτήρια σχεδιασμού του συστήματος προστασίας ενός δικτύου διανομής είναι γνωστές ως 3S. Η ονομασία αυτή αντιπροσωπεύει:

- Την ευαισθησία (sensitivity) – το σύστημα προστασίας θα πρέπει να είναι ικανό να ταυτοποιήσει μία ασυνήθιστη κατάσταση, η οποία υπερβαίνει κάποιο ορισμένο κατώφλι.
- Την επιλεκτικότητα (selectivity) – το σύστημα προστασίας θα πρέπει να αποσυνδέει μόνο το ελαττωματικό μέρος (ή αν όχι μόνον αυτό, τότε το μικρότερο δυνατό μέρος που περιέχει το σφάλμα) του συστήματος, προκειμένου να ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις του σφάλματος.
- Την ταχύτητα (speed) – οι ηλεκτρονόμοι προστασίας θα πρέπει να ανταποκρίνονται στις ασυνήθιστες καταστάσεις στο μικρότερο δυνατό χρόνο, έτσι ώστε να αποφευχθούν ζημιές στον εξοπλισμό και να διατηρηθεί η ευστάθεια.

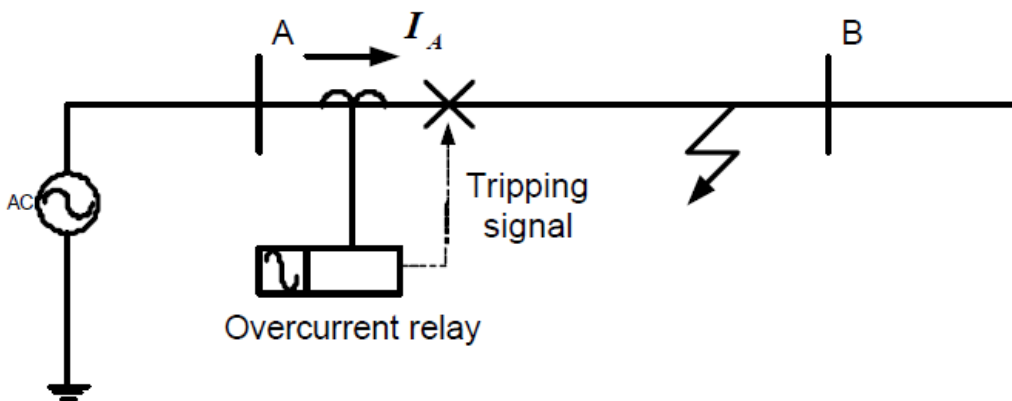
Το “3S” μπορεί να επεκταθεί ως εξής:

- Αξιοπιστία – το σύστημα προστασίας θα λειτουργεί όταν αυτό καλείται να λειτουργήσει, οπότε θα ανιχνεύει και θα αποσυνδέει όλα τα σφάλματα εντός της προστατευόμενης ζώνης.
- Ασφάλεια – το σύστημα προστασίας δεν θα λειτουργεί όταν δεν απαιτείται, δηλαδή θα απορρίπτει όλα εκείνα τα γεγονότα, μεταβατικά και άλλα, τα οποία δεν συνιστούν σφάλματα.
- Εφεδρεία – Το σύστημα προστασίας θα πρέπει να διαθέτει εφεδρεία, προκειμένου να αυξάνεται η αξιοπιστία του. Η εφεδρεία αυτή αναφέρεται ως εφεδρική προστασία. Επιπλέον, ο όρος της εφεδρείας εμπεριέχει και την ταυτόχρονη χρησιμοποίηση διαφόρων μεθόδων προστασίας, όπως η προστασία απόστασης και η διαφορική προστασία, για την υλοποίηση του συστήματος προστασίας του δικτύου.
- Κόστος – Θα πρέπει να επιτυγχάνεται η μέγιστη προστασία με το μικρότερο δυνατό κόστος [10].

### 3.2.3 Είδη προστασίας των παραδοσιακών δικτύων διανομής.

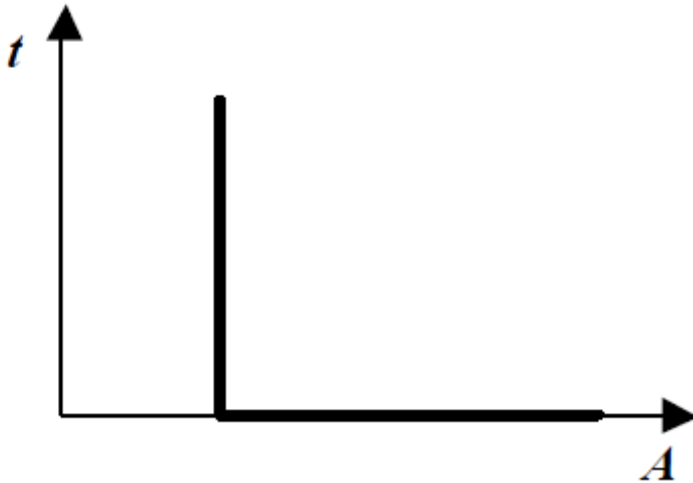
Προστασία υπερρεύματος.

Η προστασία υπερρεύματος ανιχνεύει το σφάλμα από την υψηλή τιμή του ρεύματος σφάλματος. Οι κυριότερες συσκευές με τις οποίες υλοποιείται αυτό το είδος προστασίας είναι οι θερμομαγνητικοί διακόπτες, οι moulded-case circuit breakers (MCCBs) και οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης. Ένα τυπικό σχήμα προστασίας υπερρεύματος απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



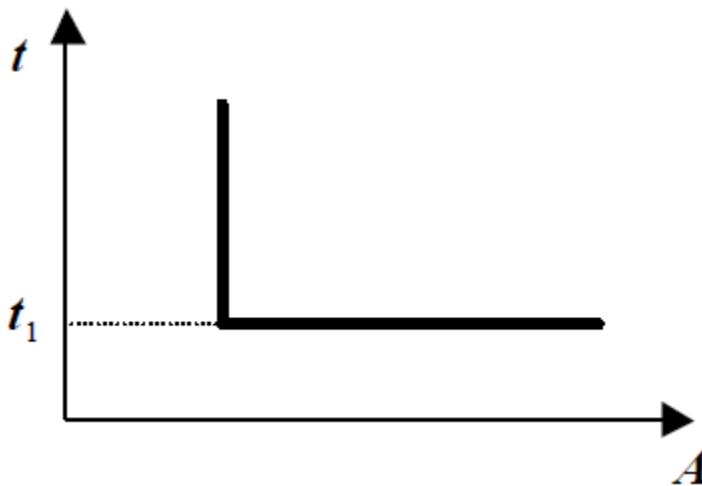
Εικόνα 3.2 Προστασία με ηλεκτρονόμο υπερέντασης [10].

Μία τυπική ρύθμιση ενός ρελέ υπερέντασης είναι στο 50% του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης στο σημείο σύνδεσης του ρελέ ή 6-10 φορές το μέγιστο ονομαστικό ρεύμα. Ο ηλεκτρονόμος μετρά το ρεύμα της γραμμής χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματιστή ρεύματος. Αν το ρεύμα υπερβαίνει τη ρύθμιση, ο ηλεκτρονόμος επεμβαίνει και ανοίγει τον διακόπτη κυκλώματος της γραμμής. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονόμου υπερέντασης, αυτός μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις ομάδες: οριστικός ηλεκτρονόμος ρεύματος, οριστικός ηλεκτρονόμος χρόνου και αντίστροφος ηλεκτρονόμος χρόνου, όπως περιγράφεται παρακάτω:



Εικόνα 3.3 Ηλεκτρονόμος οριστικού ρεύματος [10].

Ο ηλεκτρονόμος οριστικού ρεύματος επεμβαίνει ακαριαία όταν το ρεύμα φτάσει μία προκαθορισμένη τιμή. Αυτός ο τύπος ηλεκτρονόμου έχει μικρή επιλεκτικότητα. Αυτό συμβαίνει διότι, αν οι ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου βασίζονται στα επίπεδα του μέγιστου ρεύματος σφάλματος, τότε ο ηλεκτρονόμος ενδέχεται να μην λειτουργεί σωστά στην περίπτωση σφαλμάτων χαμηλής τιμής. Ταυτόχρονα, αν χρησιμοποιηθεί χαμηλότερη τιμή του σφάλματος για τις ρυθμίσεις, τότε είναι πιθανόν ορισμένες συσκευές προστασίας να λειτουργούν, χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο, με αποτέλεσμα το ανούσιο άνοιγμα των διακοπών.



Εικόνα 3.4 Ηλεκτρονόμος οριστικού χρόνου [10].

Ο ηλεκτρονόμος οριστικού χρόνου επεμβαίνει σε ένα συγκεκριμένο χρόνο. Ο χρόνος αυτός μπορεί να ρυθμιστεί, ούτως ώστε να αντιμετωπιστούν διαφορετικά επίπεδα ρεύματος, μέσω των διαφορετικών χρόνων λειτουργίας. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου ηλεκτρονόμου είναι ότι τα σφάλματα, τα οποία είναι κοντά σε κάποια κύρια πηγή, μπορεί να μην εκκαθαριστούν προτού παρέλθει ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα.

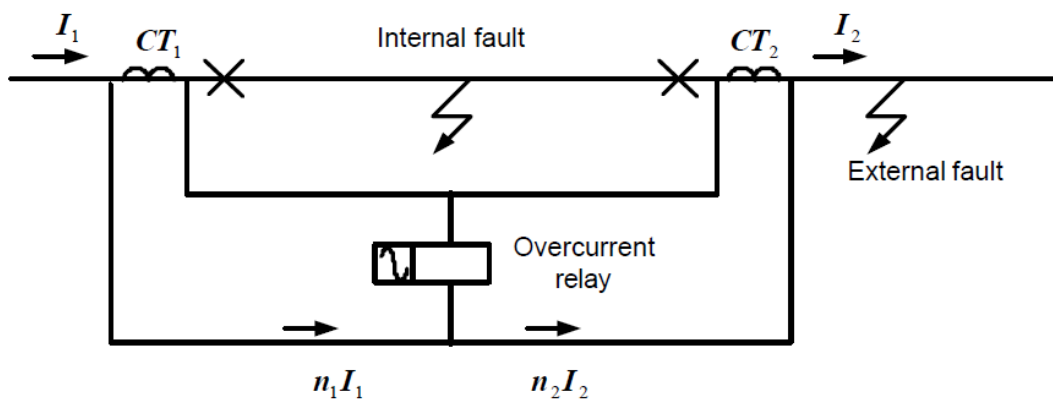


Εικόνα 3.5 Ηλεκτρονόμος αντίστροφου χρόνου [10].

Ο ηλεκτρονόμος αντίστροφου χρόνου επεμβαίνει σε χρόνο, ο οποίος είναι αντιστρόφος ανάλογος με την τιμή του ρεύματος σφάλματος. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου ηλεκτρονόμου είναι ότι, όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα σφάλματος, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος διακοπής. Ο ηλεκτρονόμος αντίστροφου χρόνου βελτιώνει επίσης την επιλεκτικότητα της προστασίας.

Διαφορική προστασία.

Η διαφορική προστασία επεμβαίνει όταν η διανυσματική διαφορά μεταξύ δύο ή περισσοτέρων ηλεκτρικών πλατών υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή (ρύθμιση). Ο πιο συχνός τύπος διαφορικής προστασίας είναι η διαφορική προστασία υπερρεύματος. Μία απλή προστασία αυτού του τύπου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.6 Μία απλή διαφορική προστασία, βασισμένη σε έναν ηλεκτρονόμο υπέρρентаσης [10].

Το σχήμα αυτό δείχνει έναν ηλεκτρονόμο προστασίας, συνδεδεμένο στα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών ρεύματος CT1 και CT2. Η ζώνη προστασίας

είναι μεταξύ των δύο αυτών μετασχηματιστών. Κάτω από κανονικές συνθήκες φορτίου ή όταν συμβαίνει κάποιο σφάλμα έξω από τη ζώνη προστασίας (εξωτερικό σφάλμα), τα ρεύματα του δευτερεύοντος  $n_1 I_1$  και  $n_2 I_2$  θα κυκλοφορούσαν μεταξύ των CT1 και CT2. Με άλλα λόγια, το ρεύμα  $n_1 I_1$  θα ήταν ίδιο με το  $n_2 I_2$ , συνεπώς κανένα ρεύμα δεν ρέει μέσω του ηλεκτρονόμου υπερέντασης. Ωστόσο, αν συμβεί ένα σφάλμα στην περιοχή μεταξύ των CT1 και CT2 (εσωτερικό σφάλμα), τα ρεύματα σφάλματος θα έρρεαν προς το σημείο σφάλματος και από τις δύο πλευρές του στοιχείου. Το ρεύμα που ρέει μέσω του ηλεκτρονόμου υπερέντασης είναι το άθροισμα των ρευμάτων των δευτερευόντων,  $n_1 I_1 + n_2 I_2$ . Σε κάθε περίπτωση, το ρεύμα στον ηλεκτρονόμο υπερέντασης είναι ανάλογο με τη διανυσματική διαφορά μεταξύ των ρευμάτων, τα οποία εισέρχονται και εξέρχονται από το υπό προστασία στοιχείο. Αν το ρεύμα που ρέει μέσω του ηλεκτρονόμου υπερέντασης ξεπεράσει τη ρύθμιση, ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης θα επέμβει και θα στείλει ένα σήμα να ανοίξουν οι διακόπτες κυκλώματος στα δύο τερματικά του στοιχείου. Ως αποτέλεσμα, η περιοχή που παρουσιάζει το σφάλμα απομονώνεται από το δίκτυο.

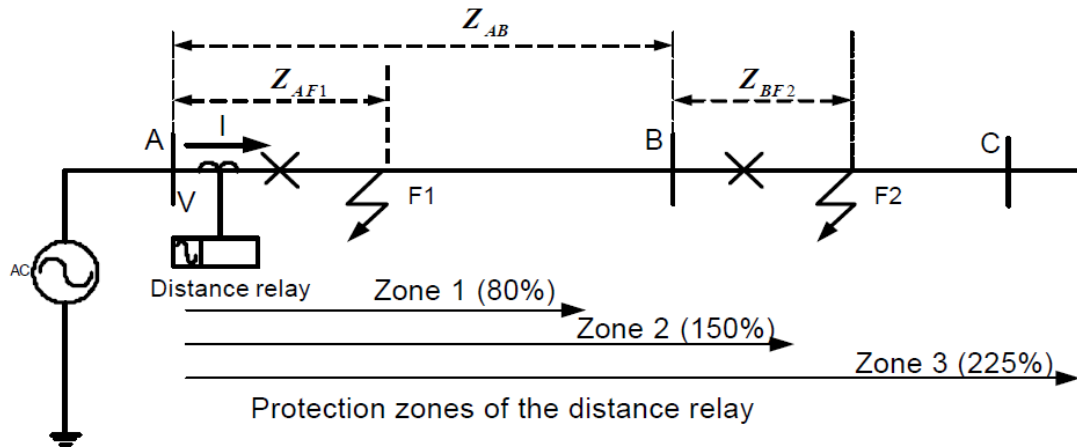
Αν αυτή η μέθοδος πρόκειται να εφαρμοστεί σε ένα εκταταμένο δίκτυο, οι ηλεκτρονόμοι θα πρέπει να τοποθετηθούν στα τερματικά του υπό προστασία στοιχείου, ούτως ώστε να παρακολουθούν τις ηλεκτρικές ποσότητες (δηλαδή τα ρεύματα γραμμής), οι οποίες απαιτούνται για την απόφαση από την προστασία να ανοίξουν οι διακόπτες. Τα δεδομένα που σχετίζονται με την κατάσταση του δικτύου πρέπει να μεταφερθούν από τα απομακρυσμένα τερματικά στο τοπικό τερματικό και κατόπιν να συγκριθούν με τα δεδομένα που λαμβάνονται στο τοπικό τερματικό. Αυτό απαιτεί τη χρήση ενός συστήματος επικοινωνίας για τη μεταφορά δεδομένων. Στην ιδανική περίπτωση, το σύστημα επικοινωνίας θα μετέφερε ακαριαία όλα τα δεδομένα που απαιτούνται για την προστασία μεταξύ των ηλεκτρονόμων. Ο δίαυλος επικοινωνίας μπορεί να είναι μεταλλικοί αγωγοί, οπτικές ίνες ή ακόμα και ο ελεύθερος χώρος, σε περίπτωση που γίνεται χρήση ραδιοκυμάτων ή μικροκυμάτων.

Το βασικό πλεονέκτημα της διαφορικής προστασίας είναι η υψηλή επιλεκτικότητά της. Το διαφορικό σχήμα προστασίας επεμβαίνει μόνο στην περίπτωση ενός εσωτερικού σφάλματος. Ωστόσο, η απαίτηση για ξεχωριστή εφεδρική προστασία και το επιπλέον κόστος του συστήματος επικοινωνίας ενδέχεται να περιορίσουν την εφαρμογή της διαφορικής προστασίας στα μικροδίκτυα.

#### Προστασία απόστασης.

Η προστασία απόστασης χρησιμοποιεί μία εμπέδηση που μετράται από τον ηλεκτρονόμο απόστασης, προκειμένου να ανιχνευθούν σφάλματα στο δίκτυο. Ο ηλεκτρονόμος απόστασης συγκρίνει το ρεύμα σφάλματος με την τάση στη θέση στην οποία βρίσκεται ο ηλεκτρονόμος για να υπολογίσει την αντίσταση από τον ηλεκτρονόμο μέχρι το σημείο του σφάλματος.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει ένα σχήμα προστασίας απόστασης. Ο ηλεκτρονόμος απόστασης τοποθετείται στον ζυγό A. Το ρεύμα γραμμής I και η τάση του ζυγού V χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί η εμπέδηση  $Z=VI$ . Η τιμή της μετρούμενης εμπέδησης του ηλεκτρονόμου απόστασης είναι  $Z_{AF1}$  για ένα σφάλμα F1 και  $(Z_{AB}+Z_{BF2})$  για ένα σφάλμα F2.

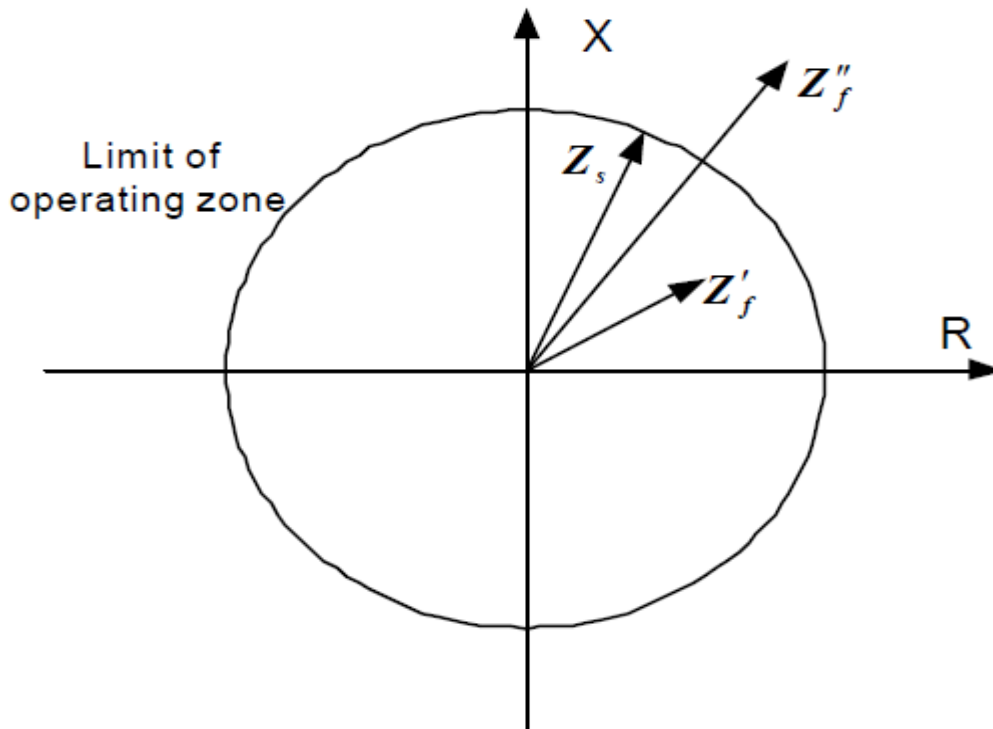


Εικόνα 3.7 Ζώνες προστασίας του ηλεκτρονόμου απόστασης [10].

Οι ζώνες της προστασίας απόστασης κανονικά αποτελούνται από τις Ζώνες 1, 2 και 3. Είθισται η Ζώνη 1 να είναι 80-85% του μήκους της υπό προστασία γραμμής. Η Ζώνη 2 είναι 150%, και καλύπτει το 100% του μήκους της υπό προστασία γραμμής συν 50% της κοντινότερης γειτονικής γραμμής. Η Ζώνη 3 είναι 225%, και καλύπτει το 100% της υπό προστασία γραμμής, συν 100% της δεύτερης μακρύτερης γραμμής, συν 25% της βραχύτερης επόμενης γραμμής.

Στο επίπεδο της αντίστασης (R) και της επαγωγικής αντίδρασης (X), ο ηλεκτρονόμος απόστασης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στον ηλεκτρονόμο εμπέδησης, τον κατευθυντικό ηλεκτρονόμο, τον ηλεκτρονόμο αντίδρασης, το ηλεκτρονόμο mho, τον πλήρως πολωμένο ηλεκτρονόμο mho, τον συνδυασμένο ηλεκτρονόμο κ.α. Ο ηλεκτρονόμος εμπέδησης είναι ένας βασικός τύπος του ηλεκτρονόμου απόστασης. Λειτουργεί σε ένα μία κυκλική χαρακτηριστική εμπέδησης με το κέντρο του στην αρχή των συντεταγμένων και ακτίνα ίση με τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου απόστασης σε Ohms. Η παρακάτω εικόνα δείχνει την τυπική χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου αντίστασης:





Εικόνα 3.8 Η χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου εμπέδησης [10].

Σε αυτήν την εικόνα, η περιοχή εντός του κύκλου είναι η ζώνη λειτουργίας του ηλεκτρονόμου εμπέδηση. Η ακτίνα  $Z_s$  του κύκλου είναι η ρύθμιση του ίδιου αυτού ηλεκτρονόμου. Αν συμβεί ένα σφάλμα στη ζώνη λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, η μετρούμενη εμπέδηση  $Z'_f$  είναι μικρότερη από τη ρύθμιση. Ο ηλεκτρονόμος επεμβαίνει για να ανοίξει τον διακόπτη κυκλώματος. Όταν ένα σφάλμα βρίσκεται εκτός της ζώνης, η μετρούμενη εμπέδηση  $Z''_f$  είναι μεγαλύτερη από τη ρύθμιση. Ο ηλεκτρονόμος παραμένει στην κανονική θέση του.

Το πλεονέκτημα της προστασίας απόστασης είναι οι ζώνες προστασίας (για παράδειγμα, εδώ, οι ζώνες 1,2 και 3). Οι ζώνες εξαρτώνται μόνο από την εμπέδηση της υπό προστασία γραμμής. Η εμπέδηση γραμμής είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τα πλάτη της τάσης και του ρεύματος. Εν αντιθέσει, οι ζώνες της προστασίας υπερέντασης ποικίλουν, ανάλογα με της συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Τα μειονεκτήματα της προστασίας απόστασης είναι:

A) Επηρεάζεται από τις εγχύσεις (τις μονάδες ΔΠ και τα φορτία). Η μετρούμενη εμπέδηση του ηλεκτρονόμου απόστασης είναι μία συνάρτηση των εγχυόμενων ρευμάτων.

B) Επηρεάζεται επίσης από την αντίσταση σφάλματος.

Γ) Είναι ευαίσθητη σε τυχόν ταλαντώσεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια μίας ταλάντωσης του ΣΗΕ, η τάση και το ρεύμα, τα οποία χρησιμοποιεί ο ηλεκτρονόμος για τους υπολογισμούς του, ποικίλουν με το χρόνο. Ως αποτέλεσμα, ο ηλεκτρονόμος απόστασης θα βλέπει μία εμπέδηση, η οποία θα μεταβάλλεται με το χρόνο. Αυτή η διακύμανση της μετρούμενης εμπέδησης μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη επέμβαση του ηλεκτρονόμου.

Προστασία μηδενικής ακολουθίας.

Η λειτουργία αυτού του τύπου προστασίας εξηγείται στον ακόλουθο πίνακα:

<b>Solid Faults</b>	<b>Detection by</b>
PH-G, PH-PH-G	$> U_0$
PH-N, PH-PH-N	$> U_0$ difficult, $< U$
PH-PH, PH-PH-PH	$< U$
<b>Resistive Faults</b>	
PH-G	$< U_0$
PH-PH-G	$> I_b$
PH-N, PH-PH-N	$> I_{0n}$

Εικόνα 3.9 Ανίχνευση σφάλματος [10].

Ο πίνακας αυτός δείχνει πώς προστασία, η οποία βασίζεται στη μηδενική ακολουθία τάσης, την βύθιση τάσης και την μηδενική ακολουθία ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσει σφάλματα στο μικροδίκτυο. Μέσω της μηδενικής ακολουθίας τάσης ανιχνεύονται τα σφάλματα φάσης προς γη, καθώς επίσης και τα σφάλματα φάσης-φάσης προς γη. Μέσω της βύθισης τάσης, ανιχνεύονται τα σφάλματα φάσης προς ουδέτερο, φάσης-φάσης προς ουδέτερο, φάσης προς φάση, όπως επίσης και τα τριφασικά σφάλματα. Μέσω της μηδενικής ακολουθίας ρεύματος ανιχνεύονται τα διφασικά σφάλματα προς γη, τα σφάλματα φάσης προς ουδέτερο, καθώς επίσης και τα διφασικά σφάλματα προς ουδέτερο.

Ωστόσο, για να ανιχνεύσει τη θέση των σφαλμάτων στο μικροδίκτυο με ακρίβεια, η τεχνική προστασίας μηδενικής ακολουθίας ίσως να χρειαστεί γρήγορη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών προστασίας που εγκαθίστανται σε διαφορετικά σημεία, οπότε το κόστος της ενδέχεται να είναι πολύ υψηλό [11].

### 3.2.4 Η επίδραση της σύνδεσης μονάδων ΔΠ στην προστασία.

Οι αλλαγές στη δομή του δικτύου λόγω της ενσωμάτωσης μονάδων ΔΠ επηρεάζουν το σύστημα προστασίας, το οποίο είχε σχεδιαστεί έχοντας υπόψη μία καθιερωμένη δομή του δικτύου, και μπορεί να οδηγήσουν το σύστημα προστασίας σε δυσλειτουργία. Η μέχρι τώρα φιλοσοφία σχετικά με την προστασία θα πρέπει να προσαρμοστεί, σύμφωνα με τις αλλαγές στη δομή του δικτύου, ενώ θα αναπτυχθούν και καινούριες ιδέες. Τα περισσότερα blackouts των τελευταίων ετών μπορούν να θεωρηθούν ως η συνέπεια πρακτικών προστασίας, οι οποίες δεν προσαρμόστηκαν επαρκώς στην καινούρια δομή των ηλεκτρικών δικτύων.

Μετά τη σύνδεση επιπρόσθετων μονάδων ΔΠ, είναι απαραίτητη μια προσαρμογή των ρυθμίσεων των συσκευών προστασίας υπερτάσης-χρόνου, προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιλεκτικότητα και η ευστάθεια, τόσο για τη διασυνδεδεμένη, όσο και για τη νησιδοποιημένη λειτουργία. Ωφέλιμη επίσης σε αυτήν την περίπτωση είναι και η χρησιμοποίηση ηλεκτρονόμων που μπορούν να προσδιορίσουν την κατεύθυνση του ρεύματος. Ωστόσο, όσο περισσότερες μονάδες ΔΠ συνδέονται, τόσο δυσκολότερη γίνεται η επιλεκτική παραμετροποίηση του συστήματος προστασίας, καθώς τα επίπεδα του ρεύματος βραχυκύκλωσης μεταβάλλονται σημαντικά. Για την αποφυγή του προβλήματος αυτού έχει προταθεί από τους Piceto και σια ότι οι συδεδεμένες μονάδες ΔΠ θα πρέπει να έχουν ελάχιστη επίδραση στα επίπεδα του ρεύματος βραχυκύκλωσης, κάτι που ωστόσο δεν συμμορφώνεται με την πραγματικότητα. Μία άλλη δυνατότητα για να λυθεί το πρόβλημα της επιλεκτικής παραμετροποίησης θα ήταν μία επαναληπτική και βελτιστοποιημένη διεργασία υπολογισμού. Βασισμένη στα πραγματικά δεδομένα του δικτύου και των μονάδων παραγωγής, αυτή η διεργασία υπολογισμού παρέχει συντονισμένες offline ρυθμίσεις στους ηλεκτρονόμους, σύμφωνα με τις τυποποιημένες καμπύλες διακοπής υπερρεύματος-χρόνου. Δεν είναι ξεκάθαρο αν αυτή η διεργασία υπολογισμού συγκλίνει σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις και αν οι χρόνοι διακοπής είναι αρκετά σύντομοι έτσι ώστε να μην χαλαρώσει η ευστάθεια του συστήματος. Επιπλέον, είναι απαραίτητες και άλλες λύσεις για αυτά τα προβλήματα. Οι Brahma και Girgis διαπίστωσαν ότι είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση ηλεκτρονόμων υπερρεύματος χρόνου, βασισμένων σε μικροεπεξεργαστές με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Δυνατότητα χρησιμοποίησης τυποποιημένων καμπυλών διακοπής για τη λειτουργία με και χωρίς τις μονάδες ΔΠ.

- Δυνατότητα χρησιμοποίησης των καμπυλών διακοπής που ορίζονται από το χρήστη.

Μία επιλογή όταν επικρατούν μεταβαλλόμενες συνθήκες στο δίκτυο είναι οι προσαρμοστικές συσκευές προστασίας. Έχει προταθεί να διαιρεθεί το δίκτυο σε ζώνες με την κάθε ζώνη να έχει κατάλληλο αριθμό μονάδων ΔΠ. Επιπλέον, η μονάδα ΔΠ με τα μεγαλύτερα ονομαστικά μεγέθη θα είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της συχνότητας. Αυτές οι ξεχωριστές ζώνες θα συνδεθούν μεταξύ τους μέσω διακοπών κυκλώματος, οι οποίοι ελέγχονται κεντρικά από έναν κεντρικό ηλεκτρονόμο στον υποσταθμό. Οι διακόπτες αυτοί κυκλώματος θα είναι επίσης ικανοί για συγχρονισμό. Ο κεντρικός ηλεκτρονόμος είναι ένας υπολογιστής, ο οποίος είναι ικανός να επεξεργάζεται και να αποθηκεύει μεγάλες ποσότητες δεδομένων και να επικοινωνεί με άλλες συσκευές, παραδείγματος χάρη με τους διακόπτες κυκλώματος και τις συσκευές προστασίας των μονάδων ΔΠ. Ο κεντρικός ηλεκτρονόμος θα ανιχνεύει το σφάλμα, θα προσδιορίζει τον τύπο και τη θέση του σφάλματος και κατόπιν θα απομονώνει την επηρεαζόμενη ζώνη, ανοίγοντας τους σχετικούς διακόπτες κυκλώματος. Επίσης, οι μονάδες ΔΠ της επηρεαζόμενης ζώνης θα πρέπει να αποσυνδεθούν. Ως εκ τούτου, όλες οι υπόλοιπες ζώνες θα μπορούν να συνεχίσουν να λειτουργούν κανονικά. Επίσης, ο κεντρικός ηλεκτρονόμος ελέγχει και το ξανακλείσιμο των διακοπών κυκλώματος. Αυτός ο αλγόριθμος προστασίας απαιτεί συνεχείς μετρήσεις πραγματικού χρόνου διαφόρων μεγεθών, καθώς επίσης και το συγχρονισμό μεταξύ όλων των τριφασικών φασιθετών (για παράδειγμα εκείνων των μονάδων ΔΠ με αυτούς του έναντι δικτύου). Ακόμα, οι κατευθύνσεις της ροής ενέργειας υπολογίζονται διαρκώς. Οι συσκευές για τη μέτρηση των φασιθετών χρησιμοποιούν τον παλμό ενός δέκτη GPS.

Όταν χρησιμοποιείται ένας κεντρικός ηλεκτρονόμος, τυχόν κατάρρευση αυτού επιφέρει την κατάρρευση ολόκληρου του συστήματος προστασίας. Για να ελαχιστοποιήσουν τους χρόνους εκκαθάρισης του σφάλματος των συσκευών προστασίας οι Zhang και σια χρησιμοποίησαν το υπάρχον πρωτογενές δίκτυο, αντί να στήσουν ένα ξεχωριστό δίκτυο για τις επικοινωνίες. Εισήγαγαν ένα στέλεχος επιτάχυνσης, το οποίο ανιχνεύει τις ενέργειες διακοπής των γρήγορων συσκευών προστασίας από αλλαγές στα επίπεδα του ρεύματος βραχυκύκλωσης και προκαλεί τις κατάλληλες αντιδράσεις. Παρόλα αυτά, δεν τροποποιείται η κλασική προσέγγιση της διαβάθισης της προστασίας. Αυτή η έννοια δεν προήλθε από το πρόβλημα του αυξανόμενου αριθμού των μονάδων ΔΠ, αλλά από τις θεμελιώδεις αλλαγές στα δευτερεύοντα δίκτυα, οι οποίες προκύπτουν από τις ενδιάμεσες εγχύσεις. Οι εγχύσεις αυτές οδηγούν σε αυξημένη πυκνότητα κόμβων και συνεπώς σε μεγαλύτερους χρόνους εκκαθάρισης σφάλματος όταν εφαρμόζεται κλασική διαβάθμιση με τυποποιημένη προστασία υπερρεύματος-χρόνου.

Οι συσκευές προστασίας απόστασης μπορούν να καθαρίσουν ένα σφάλμα με μεγάλη ταχύτητα. Σήμερα, αυτός ο τύπος συσκευών δεν εφαρμόζεται στη χαμηλή, αλλά στη μέση τάση ενώ συνηθισμένη είναι η χρήση τους και στην υψηλή τάση για την προστασία των γραμμών. Οι Chilvers και σια προτείνουν την προστασία των δευτερευόντων δικτύων με μονάδες ΔΠ χρησιμοποιώντας συσκευές προστασίας απόστασης. Επηρεάζοντας τους φασιθέτες του ρεύματος, οι ενδιάμεσες εγχύσεις των μονάδων ΔΠ επηρεάζουν τη μέτρηση της αντίστασης σφάλματος. Συνεπώς, περιορίζεται η μέγιστη δυνατή ισχύς των διασυνδεδεμένων μονάδων ΔΠ. Καθώς οι μονάδες ΔΠ που συνδέονται σε διαφορετικούς κόμβους οδηγούν σε υψηλότερη στάθμη βραχυκύκλωσης, ίσως απαιτηθούν περιοριστές του ρεύματος βραχυκύκλωσης, πράγμα το οποίο επίσης περιορίζει τη λειτουργικότητα των συσκευών προστασίας απόστασης.

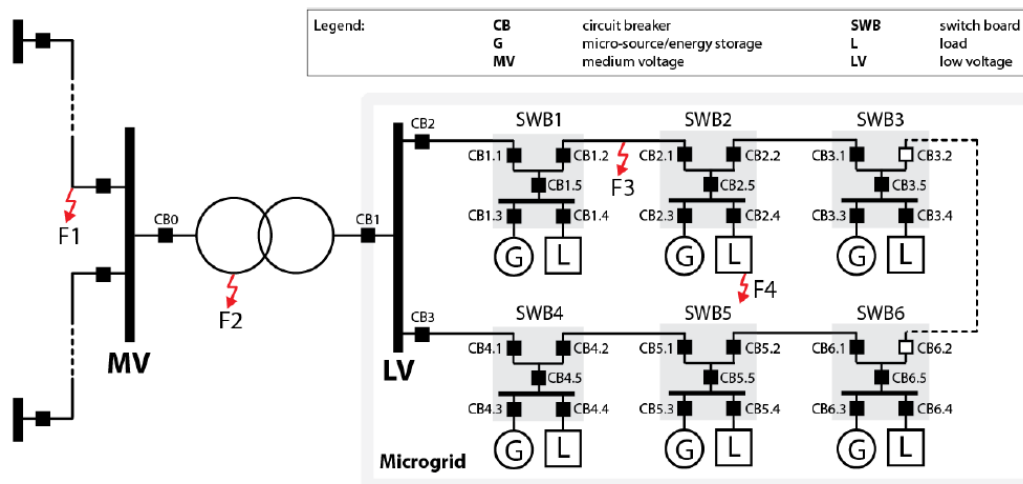
Αυτές οι παρατηρήσεις δείχνουν ότι οι ειδικοί συμφωνούν στις κύριες επιδράσεις της διεσπαρμένης παραγωγής και στην συνακόλουθη ανάγκη να ερευνηθεί ο χειρισμός προβλημάτων σε σχέση με τον συγχρονισμό της προστασίας, την ανάπτυξη μεθόδων προσαρμοστικής προστασίας, κα.

### **3.2.5 Παραδείγματα προστασίας μικροδικτύων AC.**

#### **3.2.5.α Παράδειγμα 1<sup>ο</sup>.**

Παρακάτω θα εξετάσουμε ορισμένες περιπτώσεις σφαλμάτων σε μικροδίκτυα AC, καθώς και την δράση των συστημάτων προστασίας σε κάθε περίπτωση.

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει ένα μικροδίκτυο, το οποίο διαθέτει δύο γραμμές, οι οποίες συνδέονται με το ζυγό XT και με το ζυγό MT μέσω ενός μετασχηματιστή διανομής. Κάθε γραμμή έχει τρία συμπλέγματα. Κάθε σύμπλεγμα έχει συνδεσμολογία αστέρα ή τριγώνου και συνδέει μονάδες ΔΠ και φορτία με τη γραμμή χαμηλής τάσης. Παρακάτω αναλύονται δύο εξωτερικά (τα F1, F2) και δύο εξωτερικά (τα F3, F4) σφάλματα στο μικροδίκτυο. Οι διακόπτες κυκλώματος χαμηλής τάσης ενδέχεται να έχουν διαφορετικές ενδείξεις, όμως όλοι τους χρησιμοποιούν μία συμβατική προστασία υπερρεύματος και χρησιμοποιούνται για την τμηματοποίηση του μικροδικτύου.



Εικόνα 3.10 Εξωτερικά και εσωτερικά σφάλματα σε ένα μικροδίκτυο [10].

### Διασυνδεδεμένη λειτουργία με εξωτερικά σφάλματα (F1, F2).

Σε περίπτωση του σφάλματος F1, η προστασία του κυρίως δικτύου MT καθαρίζει το σφάλμα. Αν υπάρχουν ευαίσθητα φορτία στο μικροδίκτυο, το μικροδίκτυο ενδέχεται να χρειαστεί να απομονωθεί σε χρόνο μικρότερο ακόμα και των 70ms. Επίσης, σε περίπτωση που δεν παρασχεθεί προστασία από το δίκτυο MT, το μικροδίκτυο θα πρέπει να απομονωθεί από αυτό από τον CB1. Η ανίχνευση του F1 από έναν ηλεκτρονόμο υπερέντασης μπορεί να είναι προβληματική στην περίπτωση που οι περισσότερες μονάδες ΔΠ στο μικροδίκτυο συνδέονται μέσω διεπαφών ηλεκτρονικών ισχύος, οι οποίες έχουν ενσωματωμένες λειτουργίες περιορισμού του ρεύματος σφάλματος (με αποτέλεσμα να μην αυξάνεται σημαντικά το ρεύμα που διαρρέει τον CB1). Τυπικά, οι διεπαφές αυτές είναι ικανές να παράσχουν το 1.1 με 1.2 του ονομαστικού ρεύματος στο σφάλμα, εκτός αν οι μετατροπείς είναι ειδικά σχεδιασμένοι να παρέχουν μεγάλα ρεύματα σφάλματος. Αυτά τα νούμερα είναι πολύ μικρότερα από την τιμή ενός ρεύματος βραχυκυκλώσεως, το οποίο παρέχεται από το δίκτυο. Αν χρησιμοποιείται το ρεύμα για την ανίχνευση του σφάλματος, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας κατευθυντικός ηλεκτρονόμος στη θέση του CB1. Προκειμένου να αυξηθεί η ευαισθησία του ηλεκτρονόμου, το ρεύμα που αυτός χρησιμοποιεί για τις κρίσεις του ορίζεται ως το άθροισμα των συνεισφορών στο ρεύμα σφάλματος των συνδεδεμένων μονάδων ΔΠ, ως εξής:

$$I_{kmin} = \sum_1^n k_{DER} * I_{rDER}$$

όπου το  $I_{rDER}$  είναι το ονομαστικό ρεύμα εξόδου μιας συγκεκριμένης μονάδας ΔΠ και  $k$  είναι ο συντελεστής συνεισφοράς στο ρεύμα σφάλματος της ίδιας μονάδας ΔΠ. Αυτός ο συντελεστής τίθεται στο 1.1 για τις μονάδες ΔΠ που έχουν διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος και στο 5 για σύγχρονες μονάδες ΔΠ.

Οι μονάδες ΔΠ που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι εκείνες που συνεισφέρουν στο ρεύμα βραχυκύκλωσης στην καθορισμένη κατεύθυνση.

Εναλλακτικά, αντί για το ρεύμα και τους αντίστοιχους ηλεκτρονόμους υπερέντασης, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι για την ανίχνευση του σφάλματος από τον διακόπτη CB1, όπως η βύθιση της τάσης (πλάτος και διάρκεια) ή η συχνότητα του συστήματος (στιγμιαία τιμή και ρυθμός μεταβολής). Ορισμένοι διαχειριστές του δικτύου διανομής μπορεί να απαιτήσουν να παραμείνει συνδεδεμένο το μικροδίκτυο και να παράσχει άεργο ισχύ στο σφάλμα για χρόνο μέχρι και μερικά δευτερόλεπτα.

Στην περίπτωση του σφάλματος F2, η προστασία έναντι υπερέντασης του μετασχηματιστή διανομής καθαρίζει το σφάλμα ανοίγοντας τον CB0. Ταυτόχρονα, ανοίγει ο CB1 ακολουθώντας τον CB0 (οι δύο είναι κλειδωμένοι μεταξύ τους). Στην περίπτωση που αποτύχει το κλείδωμα αυτό, είναι πιθανό να ανακύψει πρόβλημα ευαισθησίας. Τυπικές λύσεις για το πρόβλημα αυτό είναι παρόμοιες με εκείνες στις οποίες έγινε αναφορά στην περίπτωση του σφάλματος F1 (προσαρμοστική κατευθυντική προστασία υπερέντασης, προστασία βύθισης της τάσης και της συχνότητας, διάφορες μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης και άλλες).

#### ***Διασυνδεδεμένη λειτουργία με σφάλμα στο μικροδίκτυο.***

Στην περίπτωση του σφάλματος F3, η προστασία του μικροδικτύου πρέπει να αποσυνδέσει το μικρότερο δυνατό μέρος της γραμμής XT μέσω των CB1.2 και CB2.1. Ο CB1.2 ανοίγει εξαιτίας του υψηλού επιπέδου του ρεύματος σφάλματος που παρέχεται από το κυρίως δίκτυο MT. Αν ο CB1.2 αποτύχει να ανοίξει, το σφάλμα F3 πρέπει να εκκαθαριστεί από τον CB1.1, ο οποίος είναι ο εφεδρικός του CB1.2. Ωστόσο, η ευαισθησία του ηλεκτρονόμου υπερέντασης είναι πιθανό να διαταραχθεί στην περίπτωση που μια μεγάλη, σύγχρονη μονάδα ΔΠ, όπως μια γεννήτρια ντίζελ, εγκατασταθεί και ενεργοποιηθεί στο σύμπλεγμα SWB1 (δηλαδή ανάμεσα στον CB1.1 και στο σφάλμα F3). Σε αυτήν την περίπτωση, το ρεύμα σφάλματος που διέρχεται από τον CB1.1 θα είναι μικρότερο στην περίπτωση που συνδέεται μονάδα ΔΠ, σε σχέση με την περίπτωση κατά την οποία δεν συνδέεται. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως τύφλωση της προστασίας (όσο μεγαλύτερη είναι η σύγχρονη μονάδα ΔΠ, τόσο εντονότερο είναι το φαινόμενο, σε μερικές περιπτώσεις το ρεύμα σφάλματος που αντιλαμβάνεται ο CB1.1 μπορεί να μειωθεί κατά περισσότερο από 30%) και μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερημένο άνοιγμα του CB1.1, εξαιτίας της μετάβασης του ρεύματος σφάλματος από ένα τμήμα ορισμένου χρόνου σε ένα τμήμα αντιστρόφου χρόνου της χαρακτηριστικής ανοίγματος του διακόπτη. Καθυστερημένη διακοπή του ρεύματος σφάλματος θα οδηγήσει σε περιττή αποσύνδεση των τοπικών σύγχρονων μονάδων ΔΠ (συνήθως οι ντιζελογεννήτρες μικρής ισχύος διαθέτουν πού μικρή αδράνεια και βγαίνουν εκτός βήματος σε περίπτωση καθυστερημένης διακοπής του σφάλματος). Το θέμα αυτό μπορεί να επιλυθεί μέσω του κατάλληλου συγχρονισμού του μικροδικτύου και των συστημάτων προστασίας των μονάδων ΔΠ. Μία άλλη επιλογή είναι η προσαρμογή των ρυθμίσεων της προστασίας, όσον αφορά τις τρέχουσες συνθήκες λειτουργίας (το στάτους των μονάδων ΔΠ).

Αν, όπως είναι πιθανό να συμβεί, ο CB1.2 επέμβει ταχύτερα από τον CB2.1, θα νησιδοποιήσει ένα μέρος του μικροδικτύου, το οποίο θα συνδεθεί στο σφάλμα F3. Αν είναι δυνατόν να εξισορροπηθούν η παραγωγή και το φορτίο στο νησιδοποιημένο τμήμα του μικροδικτύου (οι μικροπηγές είναι ικανές να τροφοδοτήσουν τα φορτία απευθείας ή μετά από αποκοπή μέρους του φορτίου), είναι επωφελές να απομονωθεί εκείνο το γκρουπ από μικροπηγές και φορτία από το σφάλμα F3, ανοίγοντας τον CB2.1 και πιθανώς κλείνοντας τους CB3.2-6.2. Ωστόσο, ένα αντεστραμμένο και μικρό ρεύμα βραχυκύκλωσης θα προκαλέσει, στην περίπτωση παρουσίας μονάδων

ΔΠ με διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος, πρόβλημα ευαισθησίας στον CB2.1. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί είτε με προσαρμοστική, κατευθυντική προστασία υπερρεύματος, είτε με μία συνάρτηση στον CB1.2 που ανοίγει τον CB2.1.

#### ***Διασυνδεδεμένη λειτουργία με σφάλμα στην περιοχή των καταναλωτών.***

Στην περίπτωση του σφάλματος F4, ένα μεγάλο ρεύμα βραχυκύκλωσης παρέχεται στο σφάλμα από το συνδυασμό του κυρίως δικτύου και των μονάδων ΔΠ. Αυτό οδηγεί στο άνοιγμα του διακόπτη CB2.4. Συχνά, υπάρχει μία ασφάλεια, αντί για έναν CB, η οποία διαβαθμίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εγγυάται την ταχύτερη δυνατή απομόνωση του σφάλματος. Στην περίπτωση που δεν ανοίξει ο διακόπτης, το σύμπλεγμα SWB2 απομονώνεται από τον CB2.5 και οι τοπικές μονάδες ΔΠ αποκόπτονται. Δεν προβλέπονται προβλήματα ευαισθησίας ή επιλεκτικότητας σε αυτό το σενάριο.

#### ***Λειτουργία νησιδοποίησης με σφάλμα στο μικροδίκτυο (F3).***

Το μικροδίκτυο λειτουργεί νησιδοποιημένο, όταν απομονώνεται επίτηδες από το κυρίως δίκτυο MT από τον CB1 (αν πρόκειται για ολόκληρο το μικροδίκτυο) ή από κάποιον CB κατά μήκος της γραμμής XT (αν πρόκειται για ένα μέρος του μικροδικτύου). Αυτή η λειτουργική κατάσταση χαρακτηρίζεται από την απουσία του μεγάλου ρεύματος βραχυκύκλωσης που τροφοδοτείται από το κυρίως δίκτυο. Οι γενικοί ηλεκτρονόμοι υπερέντασης μπορούν να αντικατασταθούν από κατευθυντικούς, επειδή τα ρεύματα σφάλματος ρέουν και από τις δύο κατευθύνσεις προς το σφάλμα F3. Αν οι CB1.2 και CB2.1 χρησιμοποιούν ρυθμίσεις που έχουν επιλεγεί για τη διασυνδεδεμένη λειτουργία, θα έχουν πρόβλημα επιλεκτικότητας στην ανίχνευση του σφάλματος F4 και την διακοπή μέσα σε ένα αποδεκτό χρονικό πλαίσιο στην περίπτωση μονάδων ΔΠ με διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος (το ρεύμα σφάλματος θα μπορούσε να μεταβεί από ένα τμήμα ορισμένου χρόνου σε ένα τμήμα αντιστρόφου χρόνου της χαρακτηριστικής διακοπής του ηλεκτρονόμου. Ανακύπτει το ερώτημα: Γιατί θα πρέπει να ασχοληθεί κανείς με ένα σφάλμα αν δεν υπάρχει ρεύμα σφάλματος. Η απάντηση είναι ότι πρέπει να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των ανθρώπων, καθώς επίσης και ότι τα μόνιμα σφάλματα είναι δυνατόν να επεκταθούν και να καταστρέψουν περισσότερο εξοπλισμό.

Υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι προσέγγισης αυτού του προβλήματος:

- Εγκατάσταση μίας πηγής υψηλού ρεύματος βραχυκύκλωσης (παραδείγματος χάρη, ενός σφονδύλου ή ενός υπερ-πυκνωτή) για να ανοίξει τους CBs ή τις ασφάλειες με ρυθμίσεις και διαβαθμίσεις για τη διασυνδεδεμένη λειτουργία. Ωστόσο, η ικανότητα, σε ό,τι αφορά τα ρεύματα βραχυκύκλωσης, των διεπαφών ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί να αυξηθεί μόνο μέσω της αύξησης των αντίστοιχων διαβαθμίσεων ισχύος ή μέσω εντατικής ψύξης. Και οι δύο αυτές προσεγγίσεις αυξάνουν το κόστος επένδυσης.

- Εγκατάσταση μιας προσαρμοστικής προστασίας μικροδικτύου, χρησιμοποιώντας on-line δεδομένα σχετικά με την τοπολογία του μικροδικτύου και την κατάσταση των διαθέσιμων μικροπηγών και φορτίων.

### ***Λειτουργία νησιδοποίησης και σφάλμα στην περιοχή των καταναλωτών.***

Στην περίπτωση του σφάλματος F4, ένα χαμηλό ρεύμα βραχυκύκλωσης παρέχεται στο σφάλμα από τις τοπικές μονάδες ΔΠ. Δεν υπάρχει συνεισφορά στο ρεύμα σφάλματος από το δίκτυο. Ωστόσο, οι ρυθμίσεις του CB2.4 που επιλέγονται για τη διασυνδεδεμένη λειτουργία είναι μόνον ελαφρώς υψηλότερες από το διαβαθμισμένο ρεύμα του φορτίου. Αυτό εξασφαλίζει ότι η περιοχή των καταναλωτών θα αποσυνδεθεί, ακόμα και αν μόνο μονάδες ΔΠ με διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος είναι διαθέσιμες στο μικροδίκτυο. Στην περίπτωση που δεν ανοίξει ο διακόπτης αυτός, το σύμπλεγμα SWB2 πρέπει να απομονωθεί από τν CB2.5, χρησιμοποιώντας κατευθυντικό ηλεκτρονόμο υπερέντασης. Παρομοίως με την περίπτωση που έχουμε διασυνδεδεμένη λειτουργία, δεν υπάρχουν προβλήματα ευαισθησίας ή επιλεκτικότητας στην λειτουργία νησιδοποίησης κατά την οποία συμβαίνει σφάλμα στην περιοχή των καταναλωτών.

### ***Συμπερασματικά σχόλια.***

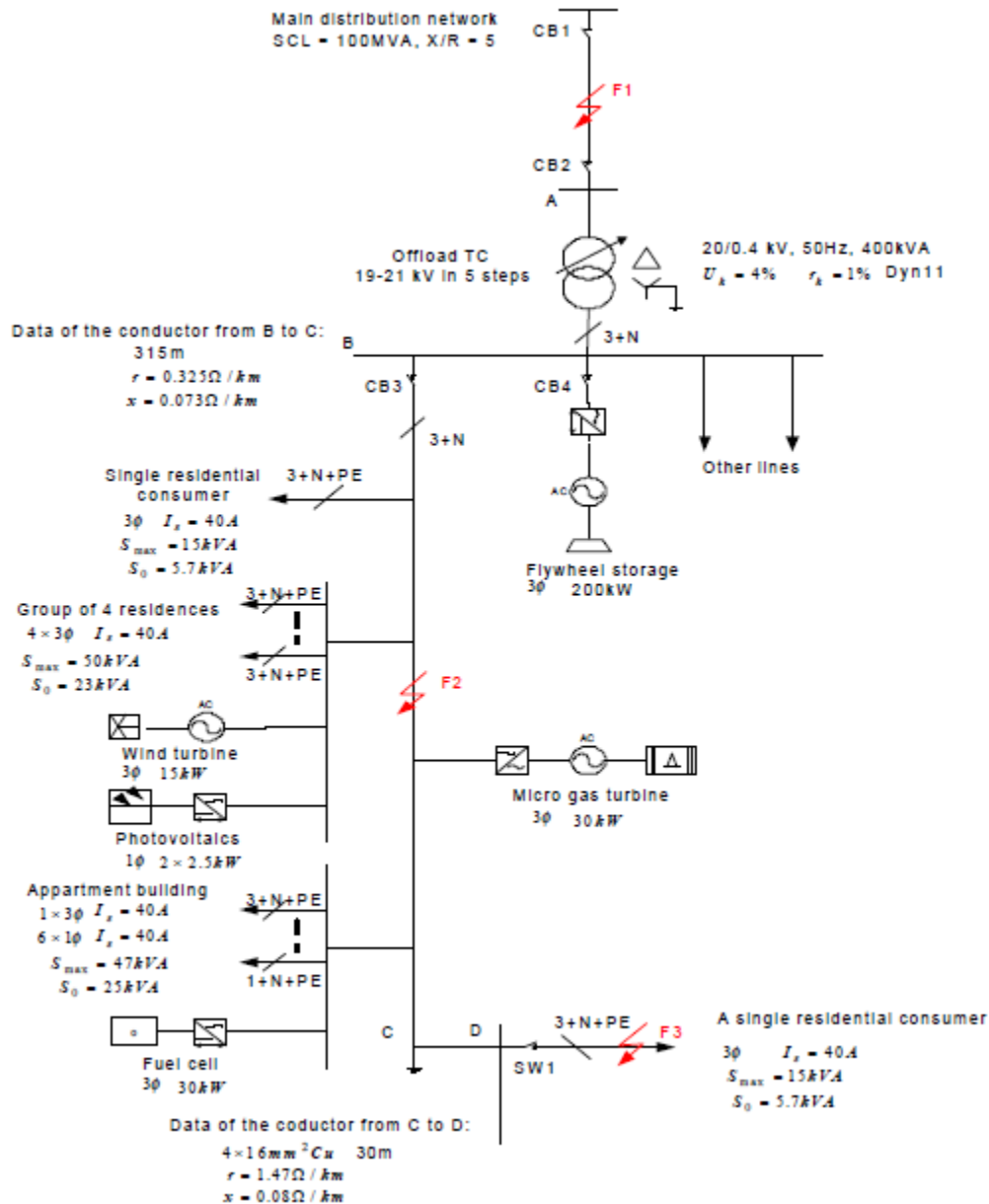
Παρατηρούμε ότι το κύριο πρόβλημα για την προστασία ενός μικροδικτύου σχετίζεται με τη μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα ρεύματα σφάλματος μεταξύ της διασυνδεδεμένης λειτουργίας και της λειτουργίας νησιδοποίησης. Το σύστημα προστασίας ενός μικροδικτύου θα πρέπει να έχει υψηλή ευαισθησία στα σφάλματα και να απομονώνει/ τμηματοποιεί επιλεκτικά το μικροδίκτυο, ειδικά στην περίπτωση μονάδων ΔΠ με διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος (στην οποία περίπτωση προκύπτουν χαμηλά επίπεδα ρεύματος σφάλματος).

Στην πραγματικότητα, μία απόφαση ανάμεσα στη νησιδοποίηση του μικροδικτύου και την απενεργοποίησή του θα εξαρτηθεί από τις ανάγκες των πελατών του μικροδικτύου και από το αν το εμπλεκόμενο κόστος (προστασία και επικοινωνία) θα μπορούσε να δικαιολογηθεί με βάση τα πλεονεκτήματα που αποφέρει η τμηματοποίηση (παραδείγματος χάρη, μειωμένο χρόνο διακοπής των τελικών καταναλωτών). Σύμφωνα με τα στατιστικά δεδομένα των δεικτών αξιοπιστίας του συστήματος, συμβαίνουν περίπου 20-40 σφάλματα (εναέριες γραμμές) και <5 (υπόγειες γραμμές) ανά 100km στα τυπικά Ευρωπαϊκά δίκτυα χαμηλής τάσης. Αυτό σημαίνει ότι, λαμβάνοντας υπόψη τα σφάλματα κατά τη σύνδεση, θα συμβούν λιγότερα από 2 σφάλματα σε 5 χρόνια (εναέριες γραμμές) και 1 σφάλμα ανά 20 χρόνια (υπόγεια καλώδια) σε ένα τυπικό μικροδίκτυο με έκταση μεγαλύτερη τους ενός km. Ωστόσο, περισσότερα σφάλματα συμβαίνουν στο δίκτυο MT, από τα οποία το μικροδίκτυο θα πρέπει να απομονωθεί [10].



### 3.2.5.β Παράδειγμα 2°.

Παρακάτω θα δούμε ένα άλλο παράδειγμα μικροδίκτυου, μαζί με ορισμένες σκέψεις για την προστασία του. Το μικροδίκτυο αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Τρία διαφορετικά σφάλματα (F1, F2 και F3) εντοπίζονται σε τρεις διαφορετικές θέσεις.



Εικόνα 3.11 Ένα μικροδίκτυο με τρία διαφορετικά σφάλματα, σε τρία διαφορετικά σημεία [11].

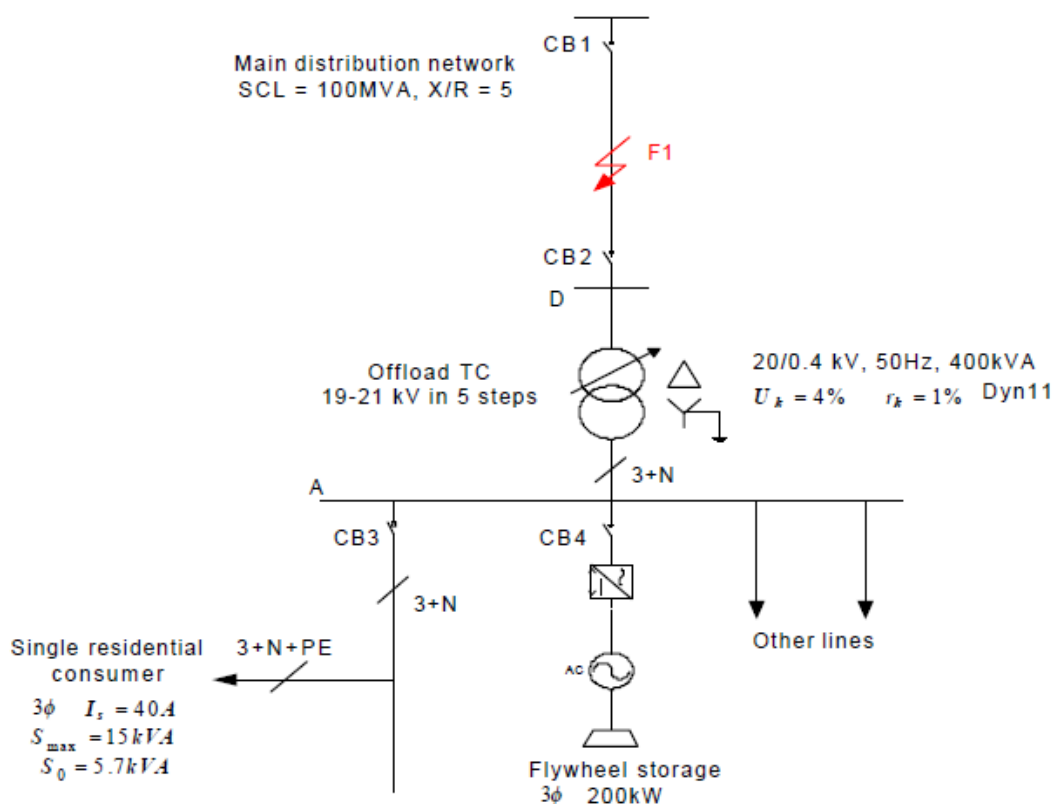
Στην εικόνα αυτή, το κυρίως δίκτυο διανομής υποτίθεται ότι έχει επίπεδο ρεύματος βραχυκύκλωσης 100MVA και λόγο X/R ίσο με 5. Το μικροδίκτυο αποτελείται από έναν σφόνδυλο με διαβάθμιση 200kW, έναν αριθμό μικροπηγών και μια ομάδα οικιακών καταναλωτών. Μία από τις γραμμές του μικροδίκτυου διασυνδέεται με το κυρίως δίκτυο διανομής μέσω του διακόπτη CB3. Ο βασικός μετασχηματιστής είναι 20/0.4kV, 200kVA.

Η γείωση του μικροδικτύου υποτίθεται ότι είναι τύπου TN-C-S. Ο ουδέτερος του μετασχηματιστή είναι απευθείας γειωμένος. Η γραμμή του μικροδικτύου είναι γειωμένη κατά TN-C, στο οποίο ο ουδέτερος αγωγός και η γείωση συνδυάζονται. Η γείωση των καταναλωτών είναι TN-S, με ξεχωριστούς αγωγούς για τον ουδέτερο και τη γη.

Δύο σενάρια (Περιπτώσεις 1 και 2) διερευνώνται. Στην Περίπτωση 1, το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο. Στην περίπτωση 2, το μικροδίκτυο λειτουργεί στην κατάσταση νησιδοποίησης. Τρία διαφορετικά σφάλματα (F1, F2 και F3) εφαρμόζονται στο μικροδίκτυο. Το σφάλμα F1 είναι στο κυρίως δίκτυο διανομής. Το F2 βρίσκεται εντός του μικροδικτύου. Τέλος, το σφάλμα F3 συμβαίνει σε έναν οικιακό καταναλωτή. Στη συνέχεια, θα ασχοληθούμε με καθένα από αυτά τα σφάλματα ξεχωριστά.

### Για ένα σφάλμα στο κυρίως δίκτυο διανομής.

Θεωρώντας ένα λάθος F1 στο κυρίως δίκτυο διανομής, ένα απλοποιημένο μικροδίκτυο φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 3.12 Σφάλμα στο κυρίως δίκτυο διανομής [11].

Το σφάλμα F1 μπορεί να είναι ένα σφάλμα φάσης προς φάση (τριφασικό ή διφασικό βραχυκύκλωμα) ή ένα σφάλμα φάσης προς γη ( μονοφασικό προς γη ή διφασικό προς γη).

Η προστασία έναντι του σφάλματος F1 θα πρέπει να ανοίξει τους διακόπτες CB1 και CB2 γρήγορα.

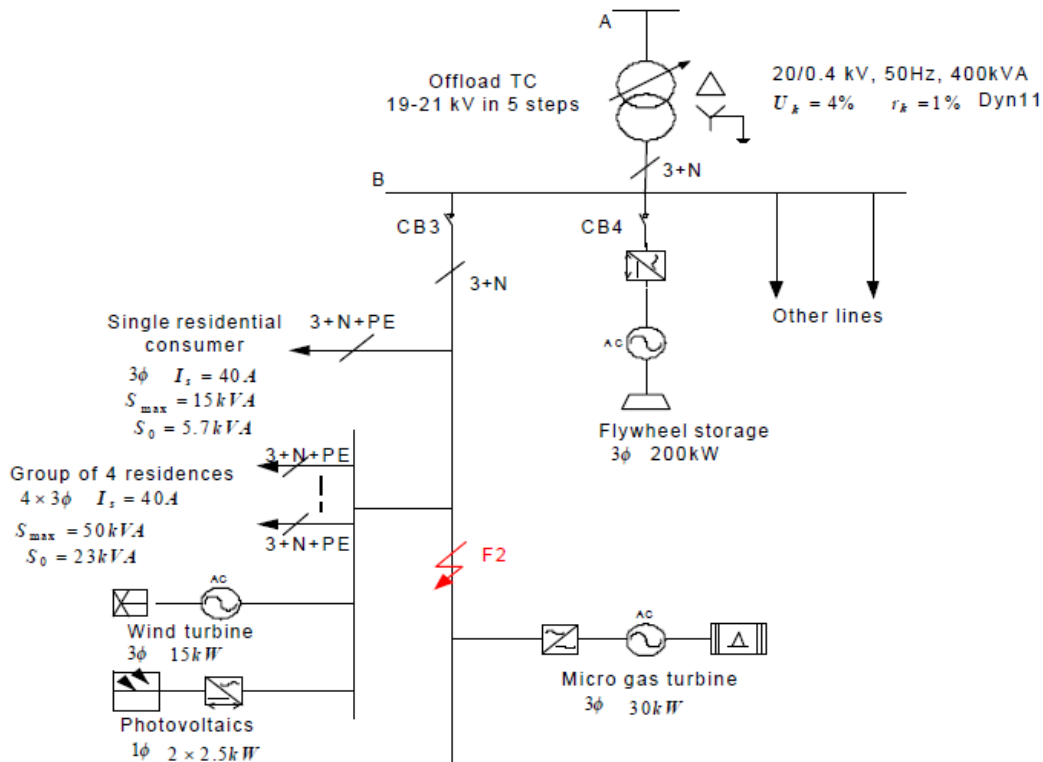
Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, το κυρίως δίκτυο διανομής παρέχει ένα μεγάλο ρεύμα στο σημείο του σφάλματος, το οποίο ρέει δια μέσου του διακόπτη CB1. Ωστόσο, η συνεισφορά του ρεύματος σφάλματος από το μικροδίκτυο που ρέει δια μέσου του διακόπτη CB2 μπορεί να είναι πολύ μικρή. Επιπλέον, η τάση και η συχνότητα είναι δυνατόν να διατηρηθούν εντός ενός αποδεκτού εύρους από τις συναρτήσεις ελέγχου του μικροδικτύου.

Συνεπώς, οι επιλογές του συστήματος προστασίας έναντι του σφάλματος F1 είναι:

- 1) Η πρώτη επιλογή είναι η εγκατάσταση ενός ηλεκτρονόμου υπερέντασης και μιας εξισορροπημένης γης στο CB1, με εσωτερική ικανότητα για διακοπή του CB2. Ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης προστατεύει τη γραμμή του κυρίως δικτύου από σφάλματα φάση προς φάση. Η εξισορροπημένη γείωση ανιχνεύει τα σφάλματα προς γη στο κυρίως δίκτυο διανομής. Αφού ανοίξει ο CB1, το εσωτερικό σήμα για άνοιγμα στέλνεται στον CB2 για να αποσυνδέσει το μικροδίκτυο από το κυρίως δίκτυο.
- 2) Η δεύτερη επιλογή είναι η εγκατάσταση ενός ηλεκτρονόμου υπερέντασης και μιας εξισορροπημένης γης στο CB1 και ενός διακόπτη απόστασης στο CB2. Ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης επεμβαίνει για να ανοίξει τον CB1, όταν το ρεύμα σφάλματος υπερβαίνει τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου. Η εξισορροπημένη προστασία προστατεύει τη γραμμή του μικροδικτύου από σφάλματα προς γη στο κυρίως δίκτυο διανομής. Η προστασία απόστασης δρα για να ανοίξει τον CB2, ανάλογα με τη μετρούμενη εμπέδηση του ηλεκτρονόμου απόστασης.
- 3) Η επιλογή 3 είναι να χρησιμοποιηθεί διαφορική προστασία μεταξύ των CB1 και CB2. Για αυτό, είναι απαραίτητο ένα σύστημα επικοινωνίας για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των δύο τερματικών. Το κόστος της διαφορικής προστασίας ενδέχεται να είναι υψηλό λόγω των επιπρόσθετων επικοινωνιακών συσκευών.

### ***Για ένα σφάλμα F2 στο μικροδίκτυο.***

Θεωρώντας ένα σφάλμα F2, ένα απλοποιημένο μικροδίκτυο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.13 Σφάλμα στο μικροδίκτυο [11].

Το σφάλμα F2 μπορεί να είναι φάσης προς φάση, φάσης προς ουδέτερο ή φάσης προς γη. Η προστασία έναντι του σφάλματος F2 θα πρέπει να ανοίξει τον διακόπτη κυκλώματος CB3 και να απενεργοποιήσει τη γραμμή σφάλματος γρήγορα. Σύμφωνα με τα βρετανικά δεδομένα σχετικά με την αξιοπιστία με το δίκτυο, συμβαίνουν περίπου 22 σφάλματα ανά 100km στα δίκτυα χαμηλής τάσης ετησίως. Αυτό σημαίνει ότι μόνο ένα σφάλμα θα λάμβανε χώρα σε ένα μικροδίκτυο που εκτείνεται σε 1km, σε 5 χρόνια. Ως εκ τούτου, δεν είναι απαραίτητο να τμηματοποιήσουμε την κάθε γραμμή.

Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, στην Περίπτωση 1, το κυρίως δίκτυο διανομής τροφοδοτεί ένα μεγάλο ρεύμα σφάλματος στο σφάλμα F2, το οποίο ρέει δια μέσου του διακόπτη CB3. Ωστόσο, στην Περίπτωση 2, η συνεισφορά του ρεύματος σφάλματος από το μικροδίκτυο ενδέχεται να είναι μικρή.

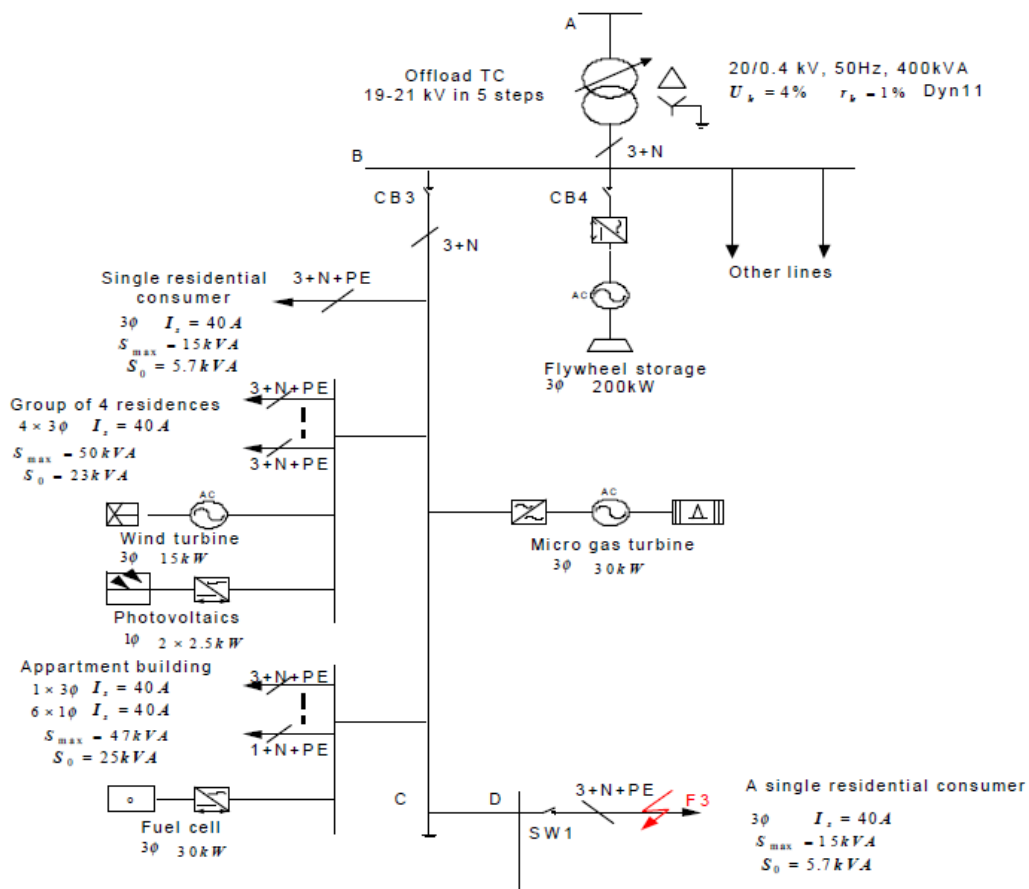
Επομένως, οι επιλογές για το σύστημα προστασίας έναντι του σφάλματος F2 είναι:

- 1) Η εγκατάσταση ενός ηλεκτρονόμου υπερέντασης και μιας οικιακής συσκευής ρεύματος στον CB3, με την ικανότητα να διακοπεί όλες τις μικροπηγές στο μικροδίκτυο. Ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης χρησιμοποιείται κυρίως για να προστατεύσει το μικροδίκτυο έναντι σφαλμάτων φάσης προς φάση και φάσης προς ουδέτερο. Στην Περίπτωση 1 (διασυνδεδεμένη λειτουργία), ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης μπορεί να λειτουργεί σωστά λόγω της μεγάλης συνεισφοράς στο ρεύμα σφάλματος από το κυρίως δίκτυο. Ωστόσο, στην Περίπτωση 2 (λειτουργία νησιδοποίησης), ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης ενδέχεται να μην λειτουργεί σωστά, εκτός κι αν το μικροδίκτυο παρέχει αρκετά υψηλό ρεύμα σφάλματος. Η οικιακή συσκευή ρεύματος χρησιμοποιείται για να ανιχνευθούν σφάλματα γης στο μικροδίκτυο. Το

κοστος της διακοπής όλων των μικροπηγών στο μικροδίκτυο, χρησιμοποιώντας το υπάρχον αργό σύστημα επικοινωνίας μεταξύ του κέντρου ελέγχου του μικροδικτύου και των μικροπηγών ή στοιχεία για τη διακύμανση της τάσης και της συχνότητας όταν οι μικροπηγές χρησιμοποιούν τον στάνταρ έλεγχο PQ, μπορεί να είναι λογικό. Η διακριτική ικανότητα του ηλεκτρονόμου υπερέντασης μπορεί να επιτευχθεί διαβαθμίζοντας την ανώτερη προστασία στον CB1, καθώς και την προστασία στον CB3 με μια χρονική καθυστέρηση.

**Για ένα σφάλμα F3 σε έναν οικιακό καταναλωτή.**

Θεωρώντας ένα σφάλμα σε έναν οικιακό καταναλωτή, ένα απλοποιημένο μικροδίκτυο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.14 Σφάλμα σε έναν οικιακό καταναλωτή [11].

Το σφάλμα F3 μπορεί επίσης να είναι ένα σφάλμα φάσης προς φάση, φάσης προς ουδέτερο, ή φάσης προς γη. Η προστασία έναντι του σφάλματος F3 θα πρέπει να αποσυνδέει αυτόματως το τμήμα του μικροδικτύου που επηρεάζεται από το σφάλμα.

Συνεπώς, η επιλογή για το σύστημα προστασίας έναντι του σφάλματος F3 είναι η εξής:

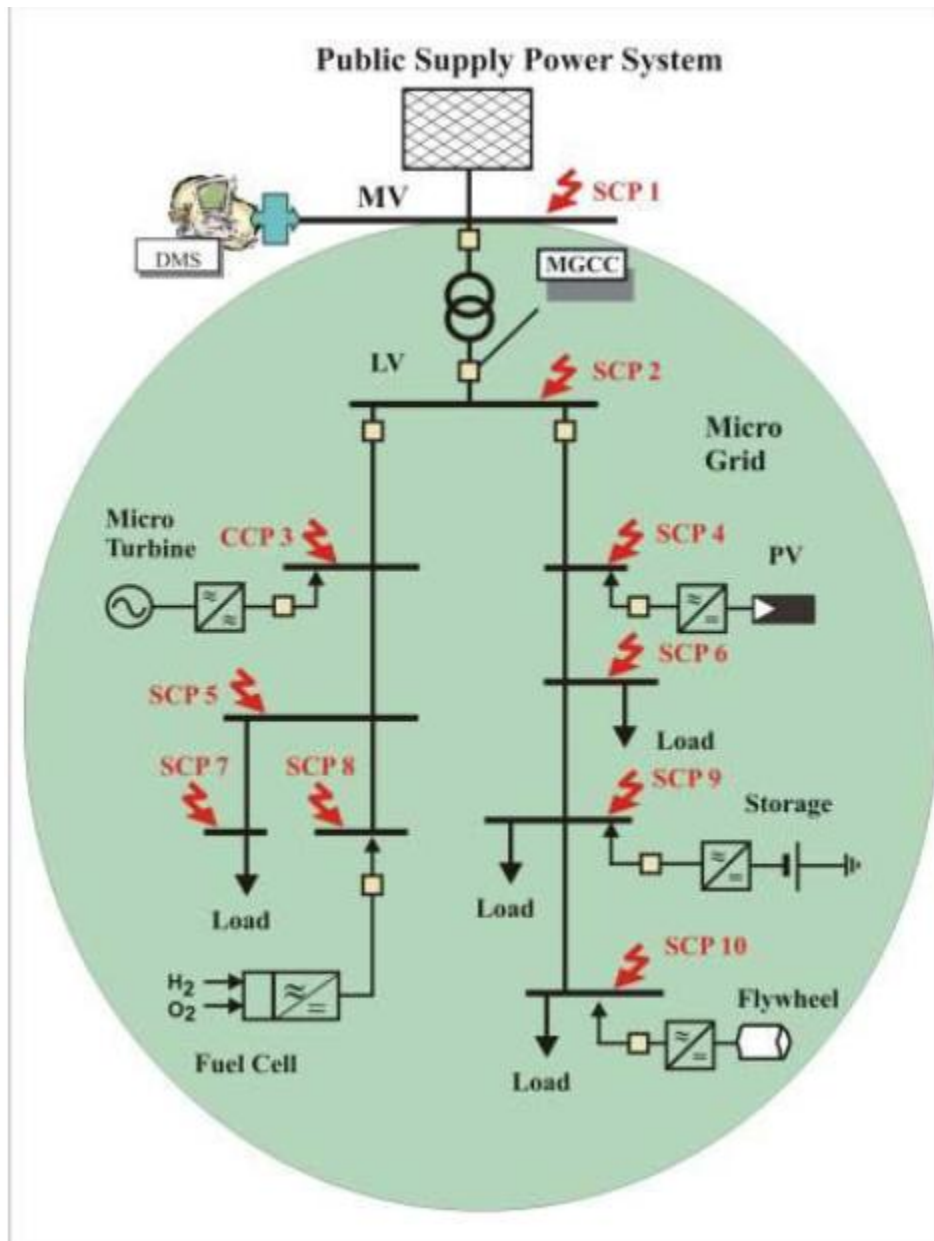
- 1) Εγκατάσταση μίας συσκευής προστασίας από βραχυκύκλωμα, π.χ. ενός μικρού διακόπτη κυκλώματος ή ασφαλειών και μία οικιακή συσκευή ρεύματος στον SW1 (πλευρά δικτύου του οικιακού καταναλωτή). Η συσκευή προστασίας από βραχυκύκλωμα χρησιμοποιείται για να προστατεύσει τον οικιακό καταναλωτή έναντι σφαλμάτων φάσης προς φάση και φάσης προς ουδέτερο. Η οικιακή συσκευή ρεύματος χρησιμοποιείται για να προστατεύσει

τον οικιακό καταναλωτή έναντι σφαλμάτων φάσης προς γη. Η διακριτική ικανότητα της προστασίας στον CB3 και τον SW1 θα επιτευχθεί χρησιμοποιώντας χρονική καθυστέρηση.

Τα σχήματα προστασίας που βασίζονται στη βύθιση της τάσης και τη συχνότητα ενδέχεται να αποτύχουν να ανοίξουν τα σφάλματα F1, F2 και F3 τόσο στη διασυνδεδεμένη λειτουργία, όσο και στη λειτουργία νησιδοποίησης. Η προστασία απόστασης ίσως αποτύχει να προστατεύσει το μικροδίκτυο από τα σφάλματα F2 και F3, εξαιτίας της επίδρασης των πολλαπλών εισροών στους ηλεκτρονόμους απόστασης. Η διαφορική προστασία, εγκατεστημένη στο κυρίως δίκτυο διανομής, έναντι του σφάλματος F1 ενδέχεται να είναι ακριβή. Η προστασία μηδενικής ακολουθίας μπορεί να είναι υπερβολικά ακριβή για να εφαρμοστεί στο μικροδίκτυο εξαιτίας του υψηλού κόστους του εξοπλισμού επικοινωνίας. Μπορεί να αποτύχει να ανιχνεύσει τα σφάλματα F2 και F3 με ακρίβεια [11].

### **3.2.5.γ Παράδειγμα 3<sup>ο</sup>.**

Στο παράδειγμα αυτό γίνεται ανάλυση της προστασίας μίας τυπικής τοπολογίας μικροδικτύου. Η τοπολογία αυτή απεικονίζεται παρακάτω. Αποτελείται από έναν υποσταθμό μέσης τάσης και δύο ακτινικούς κλάδους γραμμών χαμηλής τάσης με τις μονάδες ΔΠ να είναι συνδεδεμένες στους ζυγούς χαμηλής τάσης:



Εικόνα 3.15 Το μικροδίκτυο που θα αναλυθεί [10].

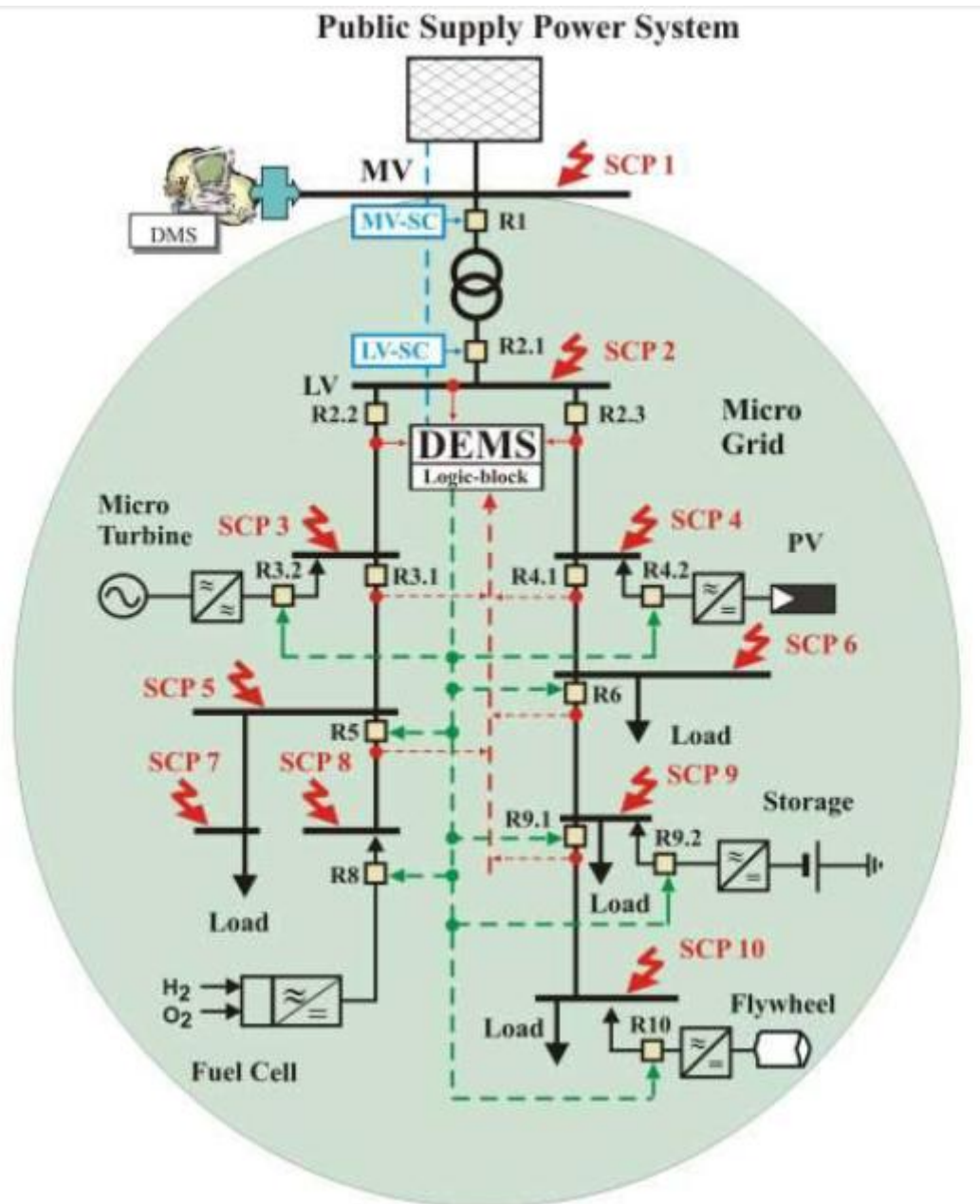
Περίπτωση 1<sup>η</sup>: Σφάλμα στην περιοχή μεταξύ του κυρίως δικτύου και των μικροδικτύων.

Στην περίπτωση αυτή, θεωρείται ένα βραχυκύκλωμα στο 1 (SCP1, Εικόνα 3.15).

Για αυτό το σενάριο σφάλματος, δεν είναι δυνατή ούτε η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των μικροδικτύων, ούτε εκείνη μεταξύ του μικροδικτύου και του κυρίως δικτύου. Θα πρέπει να εξασφαλιστεί η ακόλουθη συμπεριφορά από το σύστημα προστασίας:

- Ο ηλεκτρονόμος R1 θα πρέπει να ανοίξει, έτσι ώστε να απομονώσει το μικροδίκτυο από το σφάλμα.
- Προαιρετικά, μπορεί να ανοίξει και ο ηλεκτρονόμος R2.1. Με τον τρόπο αυτόν, ο μετασχηματιστής αποσυνδέεται από το μικροδίκτυο και η λειτουργία

του μικροδικτύου δεν επιβαρύνεται από τα επαγωγικά ρεύματα κενού φορτίου του μετασχηματιστή.



Εικόνα 3.16 Τα σφάλματα και οι ηλεκτρονόμοι του δικτύου [10].

Το μικροδίκτυο θα πρέπει στη συνέχεια να λειτουργήσει αυτόνομα.

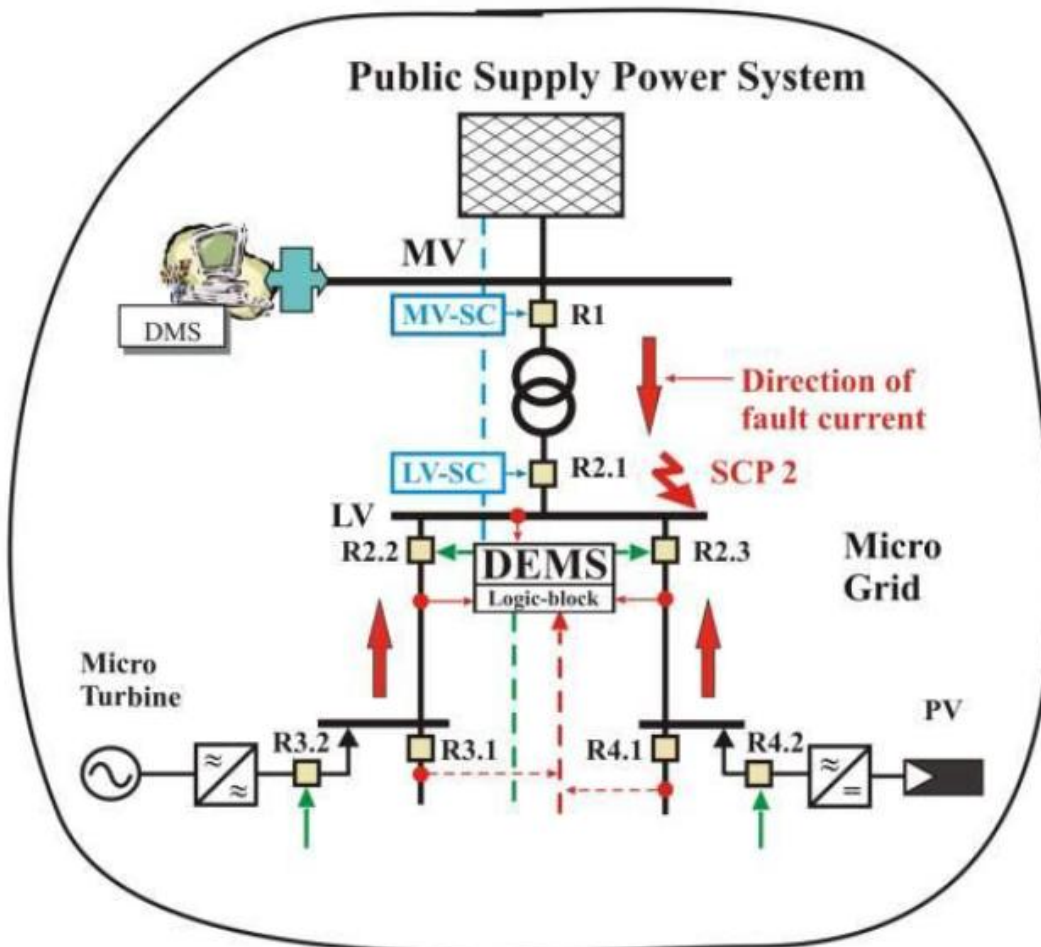
Περίπτωση 2<sup>η</sup>: Σφάλμα στο σημείο σύνδεσης χαμηλής τάσης του μικροδικτύου.

Στην περίπτωση σφάλματος στο SCP2, οι συμβατικές μέθοδοι προστασίας θα καθαρίσουν το σφάλμα ανοίγοντας τους διακόπτες R2.1, R2.2 και R2.3. Αυτό θα έχει αποτέλεσμα, μόνο στην περίπτωση που οι ηλεκτρονόμοι R2.2 και R2.3 είναι μη-κατευθυντικοί.

Προκειμένου να επιτευχθεί επιλεκτική εκκαθάριση για όλα τα πιθανά σφάλματα, ο ελεγκτής του σταθμού χαμηλής τάσης θα παρακολουθεί την κατεύθυνση των



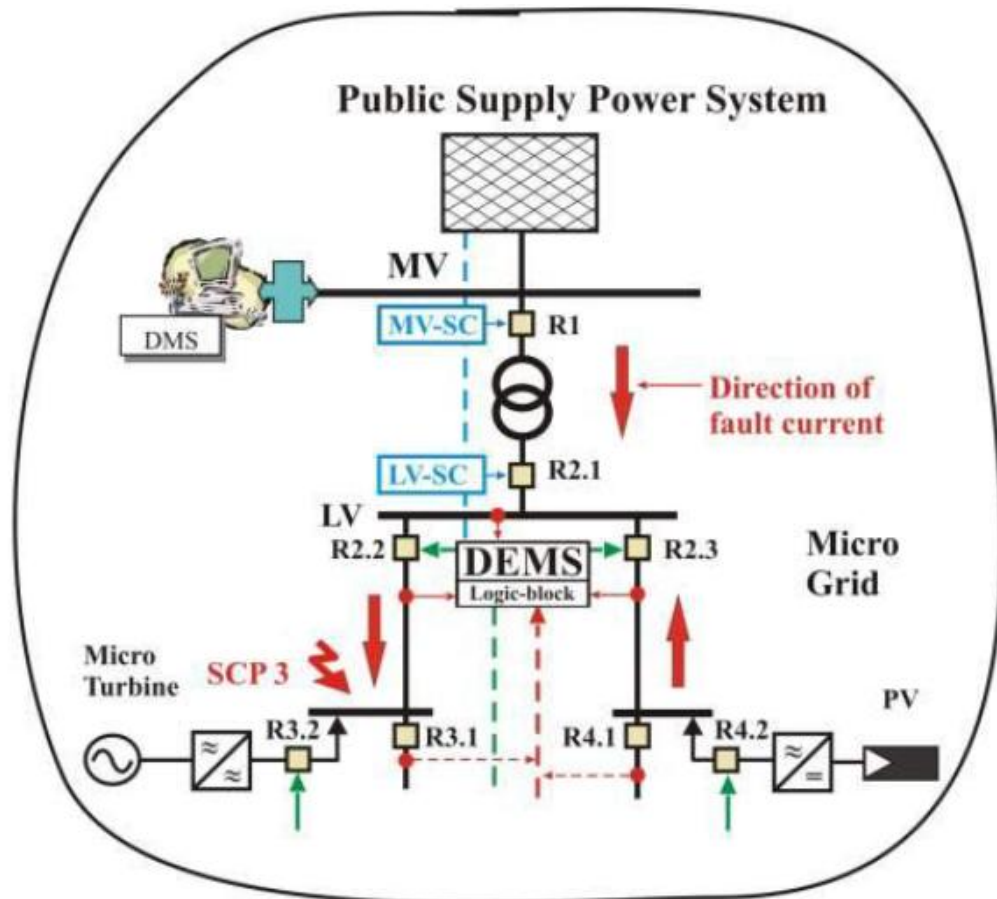
ρευμάτων βραχυκύκλωσης και στις δύο γραμμές χαμηλής τάσης. Αυτό είναι τεχνικά εφικτό, αφού όλοι οι θάλαμοι διακοπών βρίσκονται στον ίδιο χώρο μέσα σε έναν υποσταθμό διακοπών. Οι επαφές αυτοσυγκράτησης των ηλεκτρονόμων θα συνδεθούν με το λογικό μπλοκ AND-OR-AND. Το λογικό μπλοκ των DEMS πρέπει να συγκρίνει, ταυτόχρονα, τα λογικά σήματα για τις κατευθύνσεις των ρευμάτων βραχυκύκλωσης όλων των βρόχων. Έπειτα, λαμβάνονται αποφάσεις και στέλνονται αντίστοιχα σήματα διακοπής στους διακόπτες κυκλώματος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός σφάλματος στο SCP2, το λογικό μπλοκ του DEMS στέλνει σήματα διακοπής αν έχει 1-1-1 στις εισόδους του. Το «1» λαμβάνεται όταν παρατηρείται ένα ρεύμα βραχυκύκλωσης αντί για ένα ονομαστικό ρεύμα και η προκύπτουσα πτώση τάσης είναι μεγαλύτερη της επιτρεπτής. Τότε, οι ηλεκτρονόμοι R2.1, R2.2 και R2.3 θα λάβουν σήματα διακοπής.



Εικόνα 3.17 Σφάλμα στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή [10].

Περίπτωση 3<sup>η</sup>: Σφάλματα στο εσωτερικό του μικροδικτύου.

Στην περίπτωση αυτή, θεωρούνται σφάλματα στα σημεία από το SCP3 μέχρι το SCP10. Ένα τέτοιο σφάλμα αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 3.18 Σφάλμα στο εσωτερικό του μικροδικτύου [10].

Στην περίπτωση ενός σφάλματος μέσα στο μικροδίκτυο στο σημείο SCP3, αναμένεται η ακόλουθη συμπεριφορά από το συμβατικό σύστημα προστασίας:

- Ο ηλεκτρονόμος R2.2. θα ανοίξει.
- Αν ο ηλεκτρονόμος R3.1 είναι μονοκατευθυντικός (στην κατεύθυνση της συμβατικής ροής ισχύος), δεν θα ανοίξει και οι μονάδες ΔΠ που βρίσκονται πιο πάνω στην ίδια γραμμή μπορεί να τροφοδοτήσουν το σφάλμα.
- Ο μη κατευθυντικός ηλεκτρονόμος R2.3 θα ανοίξει. Αυτή η συμπεριφορά είναι μη-επιλεκτική και είναι γνωστή ως διακοπή εξ'αντανακλάσεως. Με επιλεκτική προστασία, η παροχή ισχύος στην υγιή γραμμή θα είχε διατηρηθεί.
- Η προστασία διασύνδεσης R3.2 θα αποσυνδέσει την μικροτουρμπίνα.

Για επιλεκτική εκκαθάριση του σφάλματος, απαιτείται η ακόλουθη συμπεριφορά:

- Ο ηλεκτρονόμος R2.2 μετρά την ίδια κατεύθυνση ρεύματος όπως και κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Βάσει της σύγκρισης αυτής της λειτουργικής κατάστασης και καταγεγραμμένων δεδομένων για τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας, ένα σήμα διακοπής θα μπορούσε να παραχθεί και να σταλεί στον ηλεκτρονόμο R2.2, καθώς τα λογικά δεδομένα σε συνδυασμό με μετρήσεις αποκαλύπτουν ένα βραχυκύκλωμα.

- Ο ηλεκτρονόμος R3.1 θα λάβει επίσης μία εντολή διακοπής για να αποφευχθεί οποιαδήποτε συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης από το τμήμα του δικτύου που βρίσκεται πιο πάνω από το σημείο του σφάλματος.
- Προκειμένου να αποφευχθεί η διακοπή εξ' αντανάκλασεως, ο ηλεκτρονόμος R2.3 θα πρέπει να μπλοκαρισθεί. (Στα συμβατικά συστήματα προστασίας, ο ηλεκτρονόμος R2.3 θα ανοίξει αν δεν έχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της φοράς του ρεύματος.)

Με το να παρακολουθεί συνεχώς τις λειτουργικές συνθήκες των διαφορετικών τμημάτων του μικροδικτύου, το καινούριο σύστημα προστασίας αποκτά τα χαρακτηριστικά ενός διαφορικού ηλεκτρονόμου.

Περίπτωση 4<sup>η</sup>: Σφάλματα στην περίπτωση της νησιδοποιημένης λειτουργίας του μικροδικτύου.

Όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί σε νησιδοποίηση, η προστασία του συστήματος θα πρέπει να προσαρμοστεί. Η λογική που χρησιμοποιείται για τη συμπεριφορά της προστασίας παραμένει η ίδια με τη διασυνδεδεμένη λειτουργία, αλλά οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων θα πρέπει να αλλάξουν [10].

### **3.3 Προστασία μικροδικτύων DC.**

#### **3.3.1 Είδη DC σφαλμάτων.**

Είδη DC σφαλμάτων: Γενικά, συχνές αιτίες βραχυκυκλώματος είναι η αστοχία κάποιας συνιστώσας του συστήματος, ένα σφάλμα φάσης ή γης μεγάλου πλάτους, η καταπόνηση που προκαλείται από το περιβάλλον ή η υποβάθμιση της μόνωσης, η οποία προκαλείται από τη λειτουργία κάτω από υπερβολική θερμοκρασία στην περίπτωση που το φορτίο που εξυπηρετεί το σύστημα είναι υπέρμετρο. Οι μετατροπείς των DC μικροδικτύων είναι γενικά ανθεκτικότεροι σε σφάλματα στο AC, παρά στο DC μέρος του συστήματος. Στο DC μέρος του συστήματος είναι δυνατόν να συμβούν δύο τύποι σφαλμάτων: είτε εσωτερικό σφάλμα στο κύκλωμα του μετατροπέα, είτε εξωτερικό σφάλμα, στους ακροδέκτες του μετατροπέα, η οποία είναι και η πιο σοβαρή περίπτωση εξωτερικού σφάλματος, ή σε απομονωμένα σημεία των γραμμών. [12] Τα εσωτερικά σφάλματα προκαλούν συνήθως σοβαρή ζημιά στους μετατροπείς, τέτοια ώστε να απαιτείται η πλήρης αντικατάστασή τους. Τα εξωτερικά σφάλματα κατηγοριοποιούνται ως εξής:

Σφάλμα φάσης προς γη: Αυτό το σφάλμα συμβαίνει όταν ένας θετικός ή αρνητικός πόλος βραχυκυκλώνεται προς γη. Σε μια τέτοια περίπτωση, η τάση της γραμμής που εμφανίζει το σφάλμα θα πέσει ανάλογα με την αντίσταση σφάλματος.

Σφάλμα φάσης προς φάση: Αυτός ο τύπος σφάλματος θα συμβεί αν ο θετικός και ο αρνητικός πόλος βραχυκυκλωθούν μεταξύ τους. Αυτό το σφάλμα μπορεί να προκύψει και λόγω διάσπασης της μόνωσης του DC καλωδίου [7].

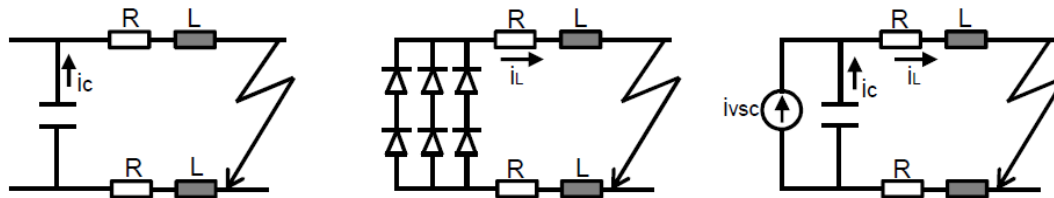
#### **3.3.2 Γενικά για τα ρεύματα σφάλματος.**

Το πλάτος του ρεύματος σφάλματος εξαρτάται από την θέση του σφάλματος και την αντίσταση της οδού που ακολουθεί το ρεύμα σφάλματος. Αν η αντίσταση της οδού αυτής είναι χαμηλή (όπως συμβαίνει, παραδείγματος χάρι, στην περίπτωση που

συμβεί σφάλμα φάσης προς γη με το έδαφος), η πολικότητα του ρεύματος είναι δυνατόν να αντιστραφεί, με αποτέλεσμα να διακοπεί ολοσχερώς η τροφοδοσία του φορτίου. Η σταθερά χρόνου του DC ρεύματος σφάλματος είναι αρκετά μικρή, διότι η αντίσταση γραμμής του DC συστήματος είναι αμελητέα σε σχέση με τα AC συστήματα, τα οποία έχουν υψηλή αντίσταση στη γραμμή. Η τάση θα πέσει, ή μπορεί και να καταρρεύσει, ανάλογα με την ικανότητα ισχύος των πηγών του μικροδικτύου, τη στάθμη ενέργειας των αποθηκευτικών διατάξεων και την αντίσταση γείωσης [12].

### 3.3.3 Χαρακτηριστικά των DC ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Όταν προκληθεί ένα εξωτερικό DC σφάλμα στο LVDC δίκτυο, ο φορτισμένος πυκνωτής που χρησιμοποιείται για εξομάλυνση θα συμπεριφερθεί ως μία σημαντική DC πηγή, και θα αρχίσει να τροφοδοτεί το σφάλμα. Όταν το ρεύμα αποφόρτισης φτάσει τη μέγιστη τιμή του, ο πυκνωτής έχει αποφορτιστεί τελείως και η τερματική DC τάση παίρνει σχεδόν μηδενική τιμή. Τότε, οι αντιπαράλληλες διόδους του μετατροπέα θα αρχίσουν να άγουν, ο VSC (Voltage Source Converter, Μετατροπέας Πηγής Τάσης) θα χάσει τον έλεγχο και οι διακόπτες IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) θα μπλοκαριστούν για λόγους αυτοπροστασίας. Έτσι οι αντιπαράλληλες διόδους ενεργούν ως ένας ανορθωτής γέφυρας και με τον τρόπο αυτό συνεχίζεται η τροφοδοσία του σφάλματος κατά τη μεταβατική περίοδο. Μετά την πάροδο του μεταβατικού ρεύματος, συνεχίζει να υφίσταται ένα DC ρεύμα σφάλματος μόνιμης κατάστασης, το οποίο τροφοδοτείται από το δίκτυο και την τοπική παραγωγή. Συνεπώς, το προφίλ ενός εξωτερικού σφάλματος DC μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιόδους: την περίοδο αποφόρτισης του πυκνωτή, την περίοδο των αντιπαράλληλων διόδων, καθώς και εκείνη της τροφοδοσίας από το δίκτυο. Οι περίοδοι αυτές απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.19 Οι περίοδοι από τις οποίες διέρχεται ένα DC σφάλμα [7].

Τα παραδοσιακά συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούνται γενικά μικρότερης σημασίας από την άποψη της συνθετότητας της προστασίας. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του κόστους και του ακτινικού χαρακτήρα των δικτύων διανομής, στα οποία η κατεύθυνση του σφάλματος είναι πάντοτε γνωστή. Επίσης, η εκκαθάριση σφαλμάτων στα συστήματα χαμηλής τάσης θα οδηγήσει στην αποσύνδεση ενός περιορισμένου αριθμού φορτίων σε σχέση με τα δίκτυα υψηλής τάσης. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την προστασία των δικτύων διανομής είναι: ηλεκτρονόμοι υπέρεντασης, reclosers, sectionalisers και ασφάλειες, και οι λειτουργικές αρχές τους βασίζονται σε μη μοναδιαία (non-unit) σχήματα προστασίας. Στο σημείο αυτό, σκόπιμη κρίνεται μια διευκρίνηση σχετικά με τη μοναδιαία και τη μη μοναδιαία προστασία:

- Τα σχήματα μοναδιαίας προστασίας προστατεύουν μία συγκεκριμένη περιοχή του συστήματος, παραδείγματος χάρη έναν μετασχηματιστή, μία γραμμή μεταφοράς, μία γεννήτρια ή έναν ζυγό. Τα σχήματα αυτά βασίζονται στον κανόνα ρευμάτων του Κίρχωφ, σύμφωνα με τον οποίο το αλγεβρικό άθροισμα

των ρευμάτων που εισέρχονται σε μία περιοχή του συστήματος πρέπει να ισούται με το μηδέν. Κάθε απόκλιση από αυτό υποδεικνύει μία κατάσταση σφάλματος. Σε αυτά τα σχήματα, κάθε γεγονός το οποίο συμβαίνει έξω από την προστατευόμενη περιοχή αγνοείται εντελώς.

- Τα μη μοναδιαία σχήματα, ενώ προορίζονται και αυτά για την προστασία συγκεκριμένων περιοχών, δεν έχουν καθορισμένα σύνορα. Εκτός από το να προστατεύουν την περιοχή για την οποία είναι αρμόδια, οι ζώνες προστασίας είναι δυνατόν να επικαλύπτονται μεταξύ τους. Αυτό είναι ωφέλιμο για λόγους εφεδρείας. Ωστόσο, μπορεί να οδηγήσει στην απομόνωση μιας υπερβολικά μεγάλης περιοχής, αν ένα σφάλμα ανιχνευθεί από διαφορετικές μη μοναδιαίες συσκευές. Το πιο απλό από αυτά τα σχήματα μετρά το ρεύμα και χρησιμοποιεί μία χαρακτηριστική αντίστροφου χρόνου, προκειμένου να επιτρέψει στην προστασία που βρίσκεται εγγύτερα στο σφάλμα να δράσει πρώτη.

Στη μη μοναδιαία προστασία, ο χρόνος δράσης της προστασίας μειώνεται, όσο το ρεύμα σφάλματος αυξάνει. Οι χρόνοι επέμβασης διαφόρων συσκευών προστασίας, οι οποίες προστατεύουν την ίδια γραμμή τροφοδοσίας, πρέπει να συντονιστούν. Η προστασία του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης δεν εμπλέκει πολύ hardware, και τυπικά χρησιμοποιούνται ασφάλειες για την προστασία των γραμμών τροφοδοσίας χαμηλής τάσης έναντι υπερέντασης. Οι ασφάλειες χαμηλής τάσης συντονίζονται με τις γραμμές τροφοδοσίας μέσης τάσης και τα σχήματα προστασίας των μετασχηματιστών, για να παράσχουν επιλεκτικότητα. Οι ασφάλειες είναι κανονικά απλές στη χρήση, διακόπτουν με ασφάλεια, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους είναι δυνατόν να διαβαθμιστούν και είναι σχετικά φθηνές σε σχέση με άλλες προστατευτικές συσκευές. Ως εκ τούτου, οι ασφάλειες χρησιμοποιούνται εκτενώς, ειδικά στα συστήματα χαμηλής τάσης με διαβαθμίσεις από 2 έως 1600A. Οι moulded-case circuit breakers (MCCBs) που βαθμονομούνται 10 με 2500A, 600V ή χαμηλότερα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την προστασία των γραμμών τροφοδοσίας χαμηλής τάσης.

Η χρήση της μη μοναδιαίας προστασίας υπερέντασης έχει επιδείξει αποτελεσματική επίδοση στην προστασία των παραδοσιακών δικτύων χαμηλής τάσης έναντι σφαλμάτων, μειώνοντας τις συνέπειες των σφαλμάτων αυτών. Ωστόσο, τέτοιοι παραδοσιακοί τύποι προστασίας ίσως να μην είναι κατάλληλοι για την προστασία των μελλοντικών LVDC δικτύων διανομής με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής. Οι συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα LVDC θα εισάγουν νέες προκλήσεις σε σχέση με τα παραδοσιακά AC δίκτυα. Νέες μορφές σφαλμάτων, όπως σφάλματα των διακοπών των μετατροπέων, μπορούν να προκύψουν. Το LVDC θα έχει επίσης διαφορετικές συνδεσμολογίες και διατάξεις σύνδεσης, και η φύση των DC βραχυκυκλωμάτων διαφέρει σημαντικά από τα αντίστοιχα AC. Επιπλέον, διαφορετικά συστήματα γείωσης, τα οποία είναι σημαντικά για τον σχεδιασμό της προστασίας, από τα παραδοσιακά ενδεχομένως να απαιτηθούν για τα μελλοντικά LVDC προκειμένου να βελτιώσουν την απόδοσή του. Όλοι αυτοί οι παράγοντες, θα έχουν επίδραση στα αναμενόμενα DC ρεύματα σφάλματος τα οποία θα ρέουν μέσα από τα DC κυκλώματα, επηρεάζοντας την επίδοση της προστασίας. Παρακάτω συζητούνται τα θέματα προστασίας που σχετίζονται με τα LVDC δίκτυα διανομής. Αναλύονται οι παρακάτω τέσσερις περιοχές: η ικανότητα των ηλεκτρονικών συσκευών που περιέχονται σε ένα LVDC δίκτυο, όσον αφορά τα

ρεύματα βραχυκύκλωσης, θέματα που σχετίζονται με τα συστήματα γείωσης, θέματα σχετικά με τη διακοπή των DC ρευμάτων σφάλματος και η απόκριση του συστήματος LVDC στο υψηλό μεταβατικό των DC σφαλμάτων. Η ανάλυση αυτή θα μας βοηθήσει να απαντήσουμε στο ερώτημα εάν τα υπάρχοντα σχήματα και συσκευές προστασίας χαμηλής τάσης μπορούν να παράσχουν αξιόπιστη, ασφαλή και ευσταθή λειτουργία στα μελλοντικά LVDC δίκτυα, ή απαιτούνται νέα σχήματα και συσκευές προστασίας.

### ***1) Η ικανότητα των ηλεκτρονικών συσκευών που περιέχονται σε ένα LVDC σύστημα, όσον αφορά τα ρεύματα βραχυκύκλωσης.***

Η λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων κάτω από συνθήκες ρεύματος βραχυκυκλώσεως είναι ένα θέμα, λόγω της περιορισμένης ικανότητας των διακοπών των μετατροπέων στις συνθήκες αυτές. Δεν θα πρέπει να υπερβούμε τις μέγιστες λειτουργικές συνθήκες της συσκευής. Για να προστατεύσουμε τους διακόπτες από το να υποστούν ζημιά από τα βραχυκυκλώματα, συνήθως προστίθεται ένα συμπληρωματικό κύκλωμα περιορισμού του ρεύματος στους μετατροπείς. Προκειμένου να μειωθεί το κόστος του σχεδιασμού ενός συστήματος με ανοχή σε μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης, οι μετατροπείς, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο και οι οποίοι έχουν δυνατότητα περιορισμού του ρεύματος, μπορούν να τροφοδοτήσουν ένα DC σφάλμα με 120%-200% του ονομαστικού ρεύματος. Μία τέτοια λειτουργική συνθήκη θα περιορίσει το LVDC σύστημα στο να υφίσταται μόνο χαμηλής τιμής ρεύματα βραχυκυκλώσεως. Τα χαμηλά επίπεδα σφάλματος μπορούν να καθυστερήσουν σημαντικά το χρόνο δράσης της προστασίας, με αποτέλεσμα την αύξηση της χρονικής διάρκειας της καταπόνησης του προστατευόμενου δικτύου. Η περιορισμένη ικανότητα για ρεύματα βραχυκύκλωσης μπορεί επίσης να οδηγήσει σε προβλήματα στην ανίχνευση σφαλμάτων, τα οποία έχουν υψηλή αντίσταση σφάλματος. Θα είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν MCCBs και ασφάλειες για την εκκαθάριση των DC σφαλμάτων, αν ο μετατροπέας είναι ανίκανος να τροφοδοτήσει το ρεύμα βραχυκύκλωσης για όσο χρόνο χρειάζονται αυτές οι συσκευές μέχρι να αντιδράσουν. Αυτό εξαρτάται από τον χρόνο για τον οποίο το ρεύμα σφάλματος θα ρέει χωρίς να προκαλέσει ζημιά στους διακόπτες του μετατροπέα, και από το αν το τροφοδοτούμενο ρεύμα σφάλματος θα είναι επαρκές για την ενεργοποίηση της προστασίας στον απαιτούμενο χρόνο ή όχι.

Το ακόλουθο παράδειγμα μπορεί να βοηθήσει στην αποσαφήνιση της επίδρασης του μειωμένου ρεύματος σφάλματος στην επίδοση της προστασίας. Αν ένας αντιστροφέας 10KVA τροφοδοτεί έναν πελάτη με 230V, τότε το ονομαστικό ρεύμα θα είναι 43.5A rms. Οι CBs που είναι κατάλληλοι για μια τέτοια εφαρμογή απαιτούν ρεύμα 3-5 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού για τύπο B και 5-10 φορές για τύπο C, προκειμένου να διακόψουν σε 0.4s. Αν χρησιμοποιούνται ασφάλειες, το απαιτούμενο ρεύμα μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερο. Αν χρησιμοποιηθεί ένας CB τύπου C των 16A, ο αντιστροφέας θα πρέπει να παράσχει 160A προκειμένου να ενεργοποιηθεί ο CB. Το απαιτούμενο ρεύμα είναι περισσότερο από 3 φορές εκείνο της διαβάθμισης του αντιστροφέα. Σε περίπτωση βραχυκλώματος, ο αντιστροφέας κανονικά επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος μόνο 1.2 με 2 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού και συνεπώς ο διακόπτης τύπου C δεν θα λειτουργήσει.

Η αύξηση του χρόνου δράσης της προστασίας λόγω του μειωμένου επιπέδου του ρεύματος βραχυκύκλωσης θα αυξήσει επίσης το εύρος των συνεπειών μετά το σφάλμα. Για παράδειγμα, μελέτες έχουν δείξει ότι όταν ένα DC σφάλμα στην πλευρά της χαμηλής τάσης εκκαθαριζόταν μετά από 1ms, το ρεύμα στο μετατροπέα άρχιζε να

ταλαντώνεται κατά τη διάρκεια του σφάλματος με μέγιστη τιμή περίπου ίση με 2 α.μ. Όταν ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος αυξανόταν σε 5ms, παρατηρήθηκε μία μεγάλη μεταβατική τάση στον DC σύνδεσμο ικανή να επιδράσει στα φορτία που συνδέονταν στις υγιείς φάσεις. Συνεπώς, η αργή ενεργοποίηση της προστασίας λόγω του περιορισμένου ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Μία λύση για να αποφύγουμε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση υψηλών διαβαθμίσεων στους μετατροπείς, αλλά αυτό θα οδηγήσει σε αυξημένο κόστος. Υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν. Οι λύσεις αυτές αναφέρονται στη συνέχεια.

#### Λύση 1:

Για την ανίχνευση και την απομόνωση σφαλμάτων με σχετικά περιορισμένο πλάτος, έχουν προταθεί συστήματα προστασίας, τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρονόμους. Η προσέγγιση βασίζεται στην μέτρηση των συνθηκών υπερρεύματος και υπότασης στη μόνιμη κατάσταση προκειμένου να ανιχνεύονται τα σφάλματα. Για παράδειγμα, ο ενσωματωμένος ηλεκτρονόμος παρακολουθεί το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα και χρησιμοποιεί ένα σχήμα προστασίας υπέρεντασης για την εκκαθάριση των σφαλμάτων. Αν το μετρούμενο ρεύμα περάσει την τιμή κατωφλίου και μείνει πάνω από αυτή για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, θεωρείται ότι έχουμε σφάλμα στην DC πλευρά. Για να αυξήσουμε το επίπεδο αξιοπιστίας, ο ηλεκτρονόμος μετρά επίσης και την DC τάση. Αν η τάση πέσει κάτω από τα επιτρεπόμενα όρια, και ικανοποιούνται οι συνθήκες υπέρεντασης και υπότασης, αποστέλλεται ένα σήμα διακοπής στους σχετικούς CBs προκειμένου να απομονωθεί το σφάλμα. Ο ενσωματωμένος ηλεκτρονόμος μπορεί επίσης να παρακολουθεί τα ρεύματα που εισέρχονται στην AC γραμμή, προκειμένου να αποφασίσει αν το σφάλμα εντοπίζεται στην AC ή στην DC πλευρά. Αν το σφάλμα είναι στην AC πλευρά, τότε το DC ρεύμα δεν θα αυξηθεί, και το AC ρεύμα σφάλματος μπορεί να εκκαθαριστεί από την AC προστασία. Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ο ενσωματωμένος ηλεκτρονόμος θα οδηγήσει σε πλήρες blackout του δικτύου αν δεν είναι καλά συντονισμένος με τις downstream συσκευές. Αυτή η μέθοδος βασίζεται επίσης μόνο στις τοπικές μετρήσεις κατά τη μόνιμη κατάσταση, και δεν λαμβάνει υπόψη τα μεταβατικά DC ρεύματα σφάλματος. Ως εκ τούτου, η μέθοδος θα επιτρέψει τη ροή ενός μεγάλου μεταβατικού ρεύματος σφάλματος μέσα από το σύστημα, προτού ενεργήσει οποιαδήποτε προστατευτική δράση, και αυτό μπορεί να προκαλέσει ζημιά στον υπό προστασία μετατροπέα ή σε άλλες ευαίσθητες συνιστώσες.

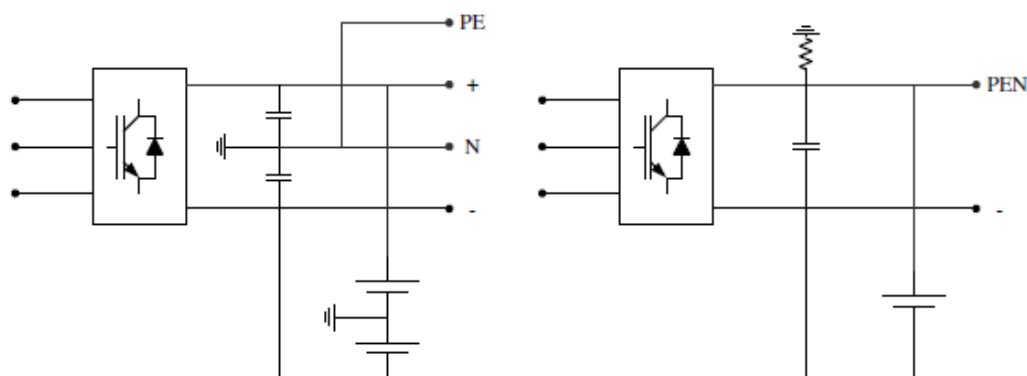
#### Λύση 2:

Μία εναλλακτική λύση είναι ένα σχήμα προστασίας που βασίζεται στην Active Impedance Estimation (AIE) για την ανίχνευση και τον εντοπισμό σφαλμάτων με περιορισμένα πλάτη για ένα σύστημα διανομής χαμηλής τάσης χωρισμένο σε ζώνες ενός πλοίου. Η τεχνική εισάγει μικρές μεταβατικές διαταραχές στο σύστημα σε ένα σημείο μέτρησης για να διεγείρει το σύστημα σε πραγματικό χρόνο και να εκτιμήσει την αντίσταση του συστήματος στο σημείο αυτό. Όταν μια βύθιση της τάσης ενός ζυγού οδηγεί στην ανίχνευση ενός σφάλματος, ένας χαμηλός παλμός ρεύματος εισάγεται στο προστατευόμενο σύστημα διανομής χαμηλής τάσης, προκειμένου να εκτιμηθεί η αρμονική αντίσταση του συστήματος από το σημείο που γίνεται αυτή η εισαγωγή. Η μέθοδος αντιστάθμισης μόνιμης κατάστασης χρησιμοποιείται για μεταβατικές μετρήσεις της τάσης και των ρευμάτων. Η τάση και το ρεύμα μπορούν να μετρηθούν πριν και μετά την εισαγωγή και ακολούθως, η μόνιμη κατάσταση μπορεί να απαλειφθεί αφαιρώντας τα δεδομένα που ελήφθησαν πριν και μετά την

εισαγωγή. Αυτό το μεταβατικό στο πεδίο του χρόνου μετασχηματίζεται στη συνέχεια στο πεδίο της συχνότητας και η αρμονική αντίσταση είναι δυνατόν να προσδιοριστεί. Αν οι μετρούμενες τιμές της αρμονικής αντίστασης συγκριθούν για διαφορετικές καταστάσεις του συστήματος, τότε είναι δυνατόν να προσδιοριστεί αν και πού έχει συμβεί ένα σφάλμα. Αυτή η τεχνική μπορεί να είναι χρήσιμη για την ανίχνευση ενός DC σφάλματος με μεγάλη αντίσταση, ωστόσο, απαιτούνται επιπλέον συσκευές για την εισαγωγή (έγχυση) προκειμένου να διενεργηθεί η ΑΙΕ για να εντοπιστούν σφάλματα.

## II) Τα συστήματα γείωσης των LVDC δικτύων.

Η γείωση είναι ένα σύνθετο ζήτημα και υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις για το σχεδιασμό της στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η γείωση χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σφαλμάτων γης και για την ασφάλεια του προσωπικού και του εξοπλισμού. Ένα DC μικροδίκτυο χαμηλής τάσης μπορεί να είναι αγείωτο, γειωμένο μέσω υψηλής αντίστασης ή γειωμένο μέσω χαμηλής αντίστασης. Επιλέον, η γη μπορεί να συνδέεται είτε στον έναν από τους πόλους, είτε στο μεσαίο σημείο μεταξύ του μετατροπέα και της μπαταρίας. Οι δύο αυτές εναλλακτικές απεικονίζονται παρακάτω:



Εικόνα 3.20 Γείωση του LVDC συστήματος: (αριστερά) TN-S DC σύστημα, (δεξιά) IT DC σύστημα [13].

Στην παραπάνω εικόνα, αριστερά, φαίνεται ένα TN-S DC σύστημα. Έχει το ενδιάμεσο σημείο μεταξύ του μετατροπέα και της μπαταρίας συνδεδεμένο στη γη (T), και ξεχωριστά (S) καλώδια χρησιμοποιούνται σε όλο το σύστημα για τον ουδέτερο (N) και τη γείωση προστασίας (PE). Η χρήση αυτής της εναλλακτικής οδηγεί σε ένα μεγάλο ρεύμα προς γη και ένα μεγάλο μεταβατικό της τάσης του DC συνδέσμου, σε περίπτωση σφάλματος προς γη χαμηλής αντίστασης. Το μεταβατικό αυτό είναι δυνατόν να επηρεάσει άλλα φορτία, τα οποία συνδέονται με τον πόλο σφάλματος, αλλά όχι φορτία συνδεδεμένα στον άλλο πόλο. Ένα TNS DC σύστημα προσφέρει μία καλώς ορισμένη τάση μεταξύ πόλου και γης, καθώς και οδούς για ρεύματα διαρροής από φίλτρα θορύβου.

Η εναλλακτική επιλογή, η οποία απεικονίζεται δεξιά, είναι ένα IT DC σύστημα. Σε αυτό, ο θετικός πόλος συνδέεται με τη γη μέσω μίας εμπέδησης (I). Προτιμάται η σύνδεση του θετικού, έναντι του αρνητικού, πόλου με τη γη, για να μειωθεί η επίδραση της διάβρωσης [13].

Ένα IT DC σύστημα παρουσιάζει μικρό μεταβατικό τάσης και ρεύματος στην περίπτωση ενός σφάλματος γης. Αυτό εγγυάται ότι τα φορτία θα παραμείνουν



ανεπηρέαστα στην περίπτωση ενός σφάλματος προς γη. Ωστόσο, μία γη στο σύστημα θα μεταβάλλει την τάση πόλου-γης, κάτι το οποίο είναι δυνατόν να επηρεάσει τυχόν ευαίσθητα φορτία. Λόγω του χαμηλού ρεύματος σφάλματος προς γη, καθίσταται δυσκολότερη η ανίχνευση και μέτρηση του σφάλματος αυτού, με αποτέλεσμα το ενδεχόμενο φόρτισης των μεταλλικών περιβλημάτων των φορτίων. Προκειμένου να βελτιωθεί η συμπεριφορά του συστήματος στην περίπτωση ενός σφάλματος προς γη, η εμπέδηση γραμμής του κάθε φορτίου είναι δυνατόν να αυξηθεί, προκειμένου να περιοριστεί το μεταβατικό της τάσης. Ωστόσο, κάτι τέτοιο οδηγεί σε αυξημένες απώλειες. Αυτή η εναλλακτική χρησιμοποιείται συχνά στα συστήματα τροφοδοσίας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Τα προβλήματα με τη γείωση ενός δικτύου LVDC είναι ότι χωρίς ένα μονοπάτι προς τη γη, δεν θα υπάρχει σημείο αναφοράς για το LVDC προκειμένου να διατηρείται η ισορροπία στο διπολικό σύστημα. Στην περίπτωση ενός σφάλματος γης με μεγάλη αντίσταση ή ενός σφάλματος μεταξύ ενός αγωγού γραμμής και μεταλλικών σωμάτων, θα είναι δύσκολο να ανιχνευθεί το σφάλμα και μέταλλα κοντά στα φορτία μπορεί να φορτιστούν και να γίνουν επικίνδυνα. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από τις λύσεις που σχετίζονται με αυτό το ζήτημα.

#### Λύση 1:

Για τα αγείωτα LVDC συστήματα διανομής, η προστασία έναντι βραχυκυκλώματος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση και την εκκαθάριση σφαλμάτων προς γη. Επιπλέον συσκευές προστασίας, όπως Insulation Monitoring (IM) συσκευές απαιτούνται για την ανίχνευση σφαλμάτων προς γη. Για παράδειγμα, το Low voltage electrical installations and safety at electrical work στάνταρ, το οποίο χρησιμοποιείται στην Φινλανδία, έχει ορίσει ότι τα αγείωτα συστήματα διανομής πρέπει να προστατεύονται από συσκευές IM έναντι σφαλμάτων γης. Στα αγείωτα LVDC συστήματα, οι συνδέσεις γης των καταναλωτών γίνονται τοπικά, και είναι ανεξάρτητες από το κύριο πλέγμα γείωσης. Σε αυτήν την περίπτωση, όλες οι γραμμές τροφοδοσίας στην πλευρά των καταναλωτών πρέπει να προστατεύονται από residual current devices (RCD). Το θέμα εδώ είναι ο επιπλέον εξοπλισμός προστασίας, ο οποίος θα οδηγήσει σε επιπλέον κόστος σχεδιασμού/υλοποίησης του συστήματος. Από τεχνικής σκοπιάς, έχει εξηγηθεί ότι το σφάλμα προς γη στα DC μέρη θα μπορούσε να επηρεάσει τους παρατηρητές της μόνωσης στις AC πλευρές του δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, οι παρατηρητές της AC μόνωσης μπορεί να επέμβουν, οπότε θα έχουμε μια περιττή διακοπή του συστήματος.

#### Λύση 2:

Μία άλλη μέθοδος για την ανίχνευση ενός σφάλματος προς γη με υψηλή αντίσταση εντός ενός γειωμένου LVDC δικτύου είναι να μετρήσουμε το ρεύμα γης (ουδετέρου) των συνδεδεμένων πηγών και τα ρεύματα προς γη του DC συστήματος και, αν είναι εκτός ορίων, έχει συμβεί σφάλμα πόλου προς γη και θα πρέπει να αποσταλούν σήματα διακοπής. Ωστόσο, η ακρίβεια αυτής της μεθόδου μπορεί να είναι ένα θέμα όταν, παραδείγματος χάρη, τα ρεύματα διαρροής στα διπολικά συστήματα θα πρέπει να συνυπολογιστούν όταν καθορίζονται τα όρια.

### **III) Διακοπή των DC ρευμάτων σφάλματος.**

Η διακοπή ενός DC ρεύματος σφάλματος είναι πιο δύσκολη από ότι ενός αντίστοιχου AC. Οι κυματομορφές των DC σφαλμάτων ρεύματος και τάσης δεν έχουν φυσικά σημεία μηδενισμού. Επομένως, οι συμβατικές ασφάλειες και οι διακόπτες κυκλώματος είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν στα DC συστήματα. Ο κίνδυνος φωτιάς και εγκαυμάτων αναμένεται στα DC συστήματα περισσότερο από ότι στα AC, λόγω προβλημάτων που σχετίζονται με τη διακοπή των DC ρευμάτων και τόξων. Αν οι ηλεκτρομηχανικοί διακόπτες κυκλώματος πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε ένα DC σύστημα, είναι αναμενόμενα ένα μεγαλύτερο μέγεθος και βάρος, καθώς επίσης και μία βραδύτερη επίδοση. Η ακόλουθη συζήτηση περιέχει κάποιες από τις τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διακοπή των DC ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

#### **Λύση 1:**

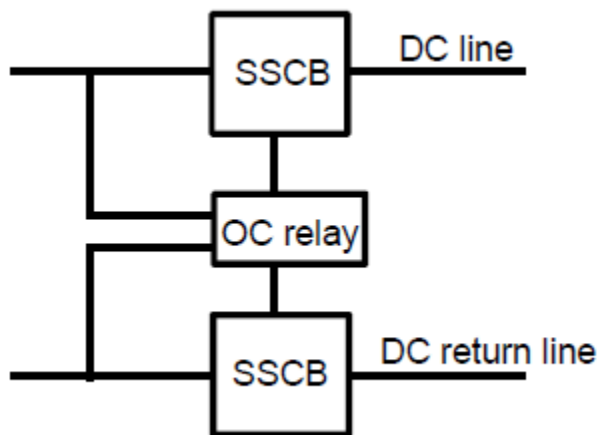
Η διακοπή ενός DC ρεύματος σφάλματος είναι δυνατή εάν χρησιμοποιηθούν ασφάλειες περιορισμού του ρεύματος ή CBs περιορισμού του ρεύματος, και οι διαβαθμίσεις τους προσαρμοστούν έτσι ώστε οι συσκευές αυτές να είναι δυνατόν να εφαρμοστούν στα DC συστήματα. Οι συσκευές αυτές δεν απαιτούν σημεία μηδενισμού προκειμένου να σβήσουν τα DC τόξα σφάλματος. Το ρεύμα σφάλματος θα διακοπεί προτού φτάσει την κορυφή. Ωστόσο, το σβήσιμο του τόξου των DC σφαλμάτων είναι πιο δύσκολο από ότι των AC. Χρειάζεται να μειωθεί η τάση κατά μήκος του τόξου μέσω της αύξησης του μήκους του τόξου (δηλαδή της απόστασης μεταξύ των αγωγών) και να χρησιμοποιηθεί διαχωριστής τόξου για να διασπάσει το τόξο.

Οι Moulded case circuit breakers (MCCBs), οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την AC προστασία υπερέντασης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και για DC εφαρμογές. Μολαταύτα, οι συσκευές θα πρέπει να διαβαθμιστούν και να ελεγχθούν για DC εφαρμογές και όχι να βασίζονται στα υπάρχοντα AC στάνταρ. Για παράδειγμα, όταν ένας MCCB χρησιμοποιείται για DC προστασία, τα χαρακτηριστικά διακοπής του πρέπει να αναθεωρηθούν. Σε κάθε περίπτωση, η επίδοση των συστημάτων αυτών αναμένεται να είναι πιο αργή, όταν αυτά χρησιμοποιούνται για AC συστήματα. Τα λάθη εκκαθαρίζονται στην μόνιμη κατάσταση, ενώ επιτρέπεται στα μεγάλα ρεύματα αποφόρτισης να περάσουν στο δίκτυο. Η βραδύτητα επέμβασης της προστασίας θα οδηγήσει σε μεγαλύτερες σε διάρκεια καταπονήσεις του συστήματος και θα αυξήσει την απαίτηση για εξοπλισμό διαβαθμισμένο για υψηλότερα ρεύματα. Γενικά, θα είναι δύσκολο να διατηρηθεί η ευστάθεια των διεσπαρμένων πηγών, οι οποίες είναι ευπαθείς σε συνθήκες βύθισης της τάσης, με τόσο αργές συσκευές προστασίας.

Λύση 2: Μία εναλλακτική επιλογή έναντι των συμβατικών CBs και των ασφαλειών είναι οι SSCBs (solid state circuit breakers, δηλαδή διακόπτες κυκλώματος στερεάς κατάστασης), οι οποίοι βασίζονται σε ημιαγωγικούς διακόπτες για να διακόψουν τα DC ρεύματα βραχυκύκλωσης. Αντίθετα από τους ηλεκτρομηχανικούς circuit breakers, οι οποίοι απαιτούν σχετικά περισσότερη ώρα για να καθαρίσουν τα DC σφάλματα, και τις ασφάλειες, οι οποίες χρειάζονται αντικατάσταση αφού χρησιμοποιηθούν, οι SSCBs μπορούν να αλλάξουν μεταξύ των καταστάσεων ON και OFF σε χρόνο μεταξύ 2 και 20μs. Το γεγονός αυτό θα βελτιώσει σημαντικά την ταχύτητα επέμβασης της προστασίας και θα μειώσει την καταπόνηση του δικτύου από το σφάλμα. Οι SSCBs έχουν επίσης την ικανότητα να μειώνουν το ρεύμα

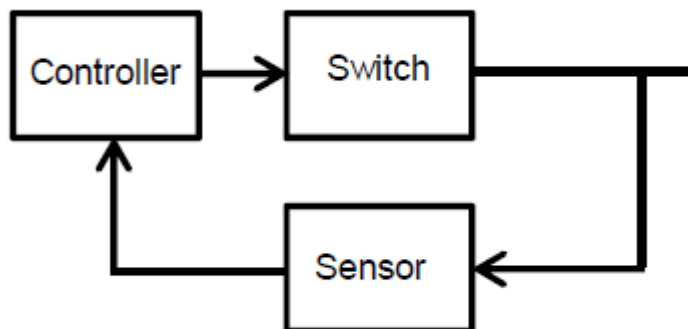
σφάλματος, και την ικανότητα να επανέρχονται αυτομάτως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος για να συνεχίσουν την κανονική λειτουργία.

Παραδείγματα SSCBs που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διακοπή DC ρευμάτων είναι τα θυρίστορ GTO (gate turn-off), καθώς και τα IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) και IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor). Ο SSCB που υλοποιείται με GTO έχουν ικανότητα διακοπής τάσεων μεγάλης τιμής και μικρή πτώση τάσης κατά το χρονικά διάστημα στο οποίο άφουν, όμως έχουν και πιο σύνθετο κύκλωμα πύλης και χαμηλότερη διακοπτική ταχύτητα σε σχέση με τα δύο άλλα είδη. Συνεπώς, δεν θα τον εξετάσουμε περαιτέρω. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένα παράδειγμα χρήσης SSCBs για την προστασία μιας DC γραμμής.



Εικόνα 3.21 Σύστημα διακοπής βασισμένο σε IGBT [7].

Κάθε DC πόλος προστατεύεται από έναν SSCB, ενώ οι δύο breakers ελέγχονται από έναν ηλεκτρονόμο υπερέντασης. Ο ηλεκτρονόμος μετρά τα ρεύματα δια μέσου των δύο γραμμών και αν ξεπεραστούν κάποιες προκαθορισμένες τιμές, στέλνεται ένα σήμα διακοπής στους σχετικούς ελεγκτές, προκειμένου αυτοί να σβήσουν τα σχετικά SSCBs και να αποσυνδέσουν και τους δύο DC πόλους από το σφάλμα. Το μπλοκ διάγραμμα ενός SSCB δίνεται στην παρακάτω εικόνα:



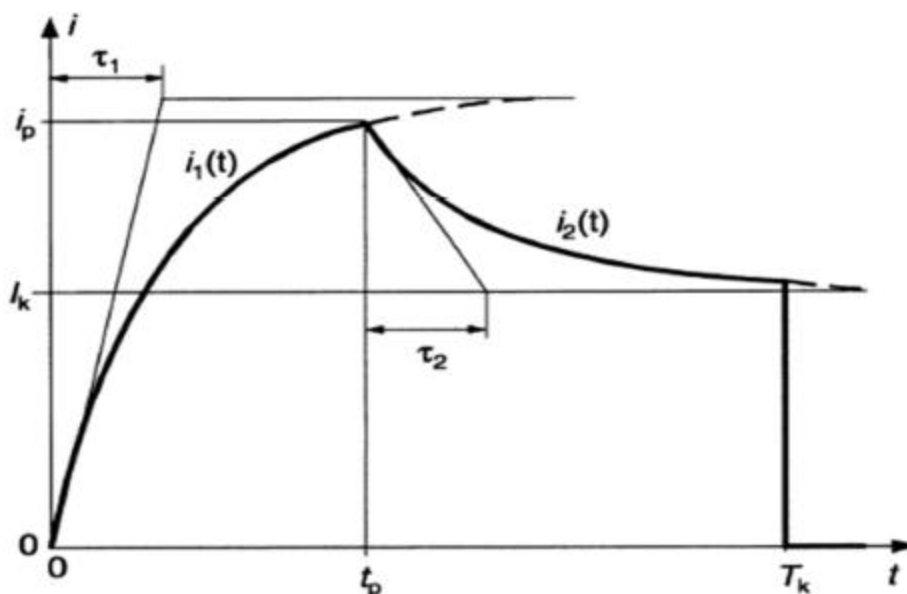
Εικόνα 3.22 Το μπλοκ διάγραμμα ενός SSCB [7].

Τα μειονεκτήματα των SSCBs είναι οι απώλειες που παρουσιάζουν κατά τη διάρκεια που άγουν και το αυξημένο κόστος. Οι SSCBs που βασίζονται αντίστοιχα στα IGBT και IGCT παρουσιάζουν πτώση τάσης 1.6V και 2.5V αντιστοίχως. Επιπλέον, οι SSCBs έχουν περιορισμένες ικανότητες σε ό,τι αφορά την τάση και το ρεύμα, σε

σχέση με τους ηλεκτρομηχανικούς circuit breakers. Οι IGBT SSCBs έχουν μικρότερη ικανότητα σε ό,τι αφορά το ρεύμα, ενώ έχουν μεγαλύτερη ικανότητα αναφορικά με την τάση, σε σχέση με τους IGCTs SSCBs. Οι IGCTs SSCBs έχουν μικρότερες απώλειες αγωγής, αλλά επίσης μικρότερη διακοπτική ταχύτητα από τους IGBT SSCBs. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός αυτών των δύο τύπων SSCBs, μαζί με ηλεκτρομηχανικούς circuit breakers, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες αγωγής και το κόστος.

#### IV) Η απόκριση ενός LVDC δικτύου στο μεταβατικό των DC σφαλμάτων.

Το προφίλ ενός DC βραχυκυκλώματος αποτελείται, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, από δύο τμήματα:



Εικόνα 3.23 Η μορφή ενός DC ρεύματος σφάλματος [7].

ένα υψηλό ρεύμα αποφόρτισης και ένα ρεύμα μόνιμης κατάστασης. Το ρεύμα αποφόρτισης δύναται να προκαλέσει, γενικά, δύο ειδών προβλήματα: να προκαλέσει βλάβη σε ευαίσθητο εξοπλισμό λόγω του μεγάλου πλάτους του και να υποβαθμίσει την επιλεκτικότητα της μη μοναδιαίας προστασίας. Τα θέματα αυτά αναλύονται περισσότερο αμέσως παρακάτω.

Κατά τη διάρκεια που ρέει το ρεύμα αποφόρτισης, οι τάσεις κοντά στο σημείο του σφάλματος παίρνουν σχεδόν μηδενικές τιμές (καμιά φορά, λόγω των ταλαντώσεων μεταξύ της χωρητικότητας των φίλτρων και της αυτεπαγωγής των γραμμών, οι τιμές αυτές μπορεί να είναι και αρνητικές). Αυτό θα κάνει τις αντιπαράλληλες διόδους να πολωθούν ορθά και να εκτεθούν σε ρεύμα υψηλής τιμής. Τα ίδια ρεύματα θα ρέουν δια μέσου των μετατροπέων και άλλων ευαίσθητων συνιστωσών του δικτύου, με σημαντικές θερμικές επιπτώσεις  $I^2t$ , οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν στην πρόκληση βλαβών. Μία επιλογή για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης είναι ο σχεδιασμός του συστήματος με υψηλότερη διαβάθμιση ρεύματος, όμως κάτι τέτοιο θα οδηγήσει σε αυξημένο κόστος. Μία άλλη επιλογή είναι η χρήση ταχείας προστασίας, η οποία επεμβαίνοντας γρήγορα θα μειώνει τον αντίκτυπο των υψηλών ρευμάτων αποφόρτισης.

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι πολύ ευαίσθητοι στις απότομες βυθίσεις τάσης, οι οποίες προκαλούνται από τις αιχμές των ρευμάτων αποφόρτισης κατά τη διάρκεια των DC σφαλμάτων. Είναι πολύ πιθανό, κάτω από τέτοιες συνθήκες, να δράσει η εσωτερική προστασία των μετατροπέων, καταλήγοντας σε μικρό βαθμό επιλεκτικότητας και διακοπή της παροχής ισχύος σε περιπτώσεις που αυτή θα μπορούσε να αποφευχθεί. Για αυτό το λόγο απαιτείται μία γρήγορη προστασία, η οποία θα επεμβαίνει προτού διακόψουν οι κύριοι μετατροπείς του συστήματος.

Μία επιλογή για να μειωθεί η καταπόνηση που προκαλείται από τα ρεύματα αποφόρτισης του πυκνωτή και να προστατευτούν οι ευαίσθητες συνιστώσες είναι η αποσύνδεση του πυκνωτή κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω της μέτρησης της τιμής του ρεύματος και της σύγκρισής της με μία προκαθορισμένη τιμή. Αν η τιμή αυτή ξεπεραστεί, τότε το ρεύμα αποφόρτισης διακόπτεται άμεσα μέσα σε 3-7μs. Με τον τρόπο αυτό, θα μειωθεί η καταπόνηση τόσο του πυκνωτή, όσο και των υπολοίπων συσιστωσών του συστήματος. Το σύστημα θα υπομένει μόνο το ρεύμα σφάλματος μόνιμης κατάστασης, το οποίο είναι λιγότερο σοβαρό από το μεταβατικό. Έτσι, θα αποφεύγεται η ανούσια διακοπή των μετατροπέων, καθώς οι υπόλοιπες συσκευές θα έχουν μεγαλύτερο περιθώριο χρόνου να αντιδράσουν, προτού αναλάβουν δράση οι μετατροπείς.

### ***Σύνοψη των προκλήσεων που υπάρχουν στην προστασία των συστημάτων DC:***

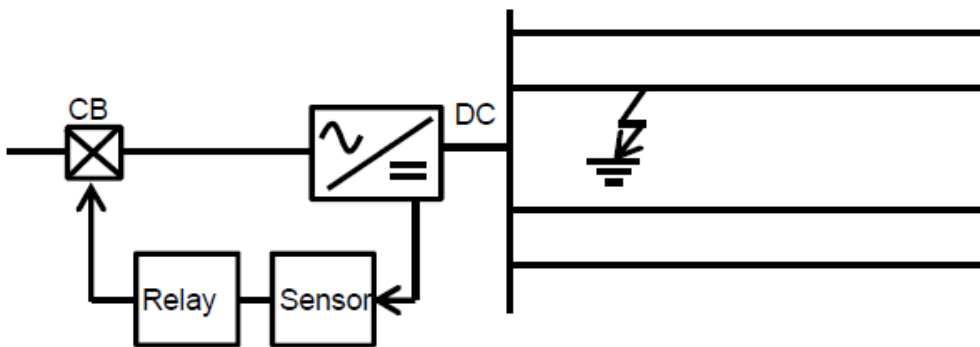
Βάσει των παραπάνω, είναι απίθανο να έχουμε αποτελεσματική λειτουργία ενός δικτύου LVDC με τη χρήση των παραδοσιακών σχημάτων προστασίας των δικτύων χαμηλής τάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή τα συστήματα αυτά δεν ενεργούν αρκετά γρήγορα, έτσι ώστε να μειώσουν τις συνέπειες των DC σφαλμάτων. Υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι για τη βραδύτητα της δράσης της προστασίας. Ο ένας είναι η χαμηλή τιμή του ρεύματος σφάλματος, για την οποία είναι ικανοί οι μετατροπείς, και ο άλλος είναι ο μεγαλύτερος χρόνος, σε σχέση με την περίπτωση των σφαλμάτων AC, που απαιτούν οι συσκευές αυτές, προκειμένου να σβήσουν τα DC τόξα. Η αργή επίδοση της προστασίας θα οδηγήσει στις ακόλουθες συνέπειες:

- Οι μετατροπείς και το δίκτυο θα είναι απροστάτευτοι έναντι των υψηλών μεταβατικών ρευμάτων βραχυκύκλωσης, και αυτό συμβαίνει διότι οι ασφάλειες και οι MCCB δύσκολα λειτουργούν κατά τη μεταβατική περίοδο. Αυτό θα οδηγήσει στην απαίτηση για ένα υψηλότερα διαβαθμισμένο σύστημα, το οποίο θα μπορεί να υπομείνει τις θερμικές επιπτώσεις των υψηλών ρευμάτων για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση του κόστους του συστήματος.
- Θα κάνει την βύθιση τάσης να διαρκέσει περισσότερο, κάτι που αυξάνει την πιθανότητα οι μετατροπείς να δράσουν πριν από τα υπόλοιπα συστήματα προστασίας. Αυτό μειώνει την επιλεκτικότητα του συστήματος προστασίας και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην αναίτια αποσύνδεση ολόκληρου του LVDC δικτύου.
- Οι μεγάλες αιχμές του ρεύματος μπορεί να προκαλέσουν ζημιές σε ορισμένες ευαίσθητες συσκευές, κάτι που ενδέχεται να υποβαθμίσει την ποιότητα ισχύος μετά την παρέλευση του σφάλματος.
- Θα είναι δύσκολο να διατηρηθεί η ευστάθεια των τοπικών μικρογεννητριών, διότι αυτές είναι πολύ ευαίσθητες σε συνθήκες βύθισης της τάσης. Η αποσύνδεση πολλών τοπικών γεννητριών ως αντίδραση στην παρουσία ενός σφάλματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε έλλειμα ισχύος στο μικροδίκτυο.

### 3.3.4 Παραδείγματα προστασίας μικροδικτύων DC.

Διάφορα σχήματα προστασίας έχουν αναπτυχθεί και υλοποιηθεί για την προστασία των LVDC συστημάτων. Στην παράγραφο αυτή, θα εξετάσουμε κάποια από αυτά, μαζί με τις δυνατότητες και τους περιορισμούς τους.

Προστασία των DC συστημάτων από την AC πλευρά: Αυτός ο τύπος προστασίας χρησιμοποιείται ευρέως στα HVDC συστήματα και θεωρείται ως ο οικονομικότερος τρόπος για την προστασία των DC γραμμών στα συστήματα αυτά. Στο σχήμα αυτό, τοποθετούνται AC CBs στην AC πλευρά των μετατροπέων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

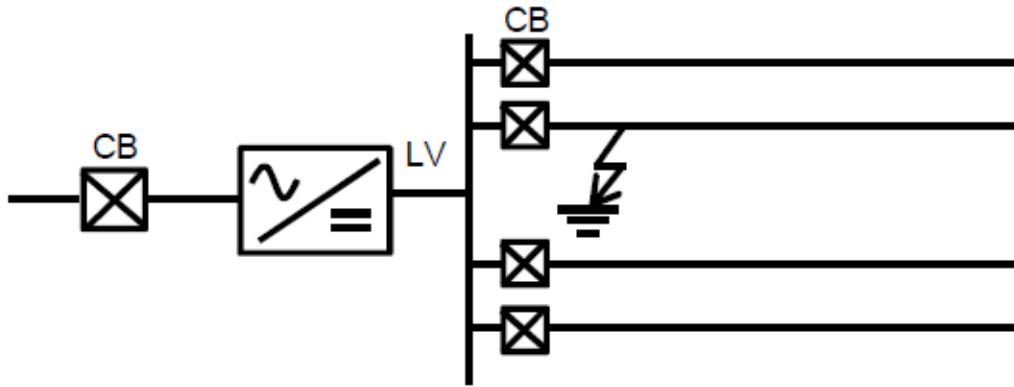


Εικόνα 3.24 Προστατεύοντας ένα DC σύστημα από την AC πλευρά [7].

Όταν συμβαίνουν σφάλματα στην DC πλευρά, οι DC τάσεις μειώνονται ραγδαία, ενώ τα ρεύματα αυξάνονται. Οι υπόταση και η υπερένταση μετρώνται από τον μετατροπέα και οι μετρήσεις αυτές παρέχονται στον ηλεκτρονόμο που είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία του CB στην AC πλευρά. Τότε ο breaker στο AC δίκτυο θα αποσυνδέσει τον μετατροπέα και τον DC σύνδεσμο εντελώς από το δίκτυο.

Το μειονέκτημα αυτής της διάταξης προστασίας είναι ότι οδηγεί στην αποσύνδεση ολόκληρου του LVDC συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των υγιών γραμμών, σε περίπτωση σφαλμάτων στην DC πλευρά του συστήματος. Επιπλέον, η απόκριση μιας τέτοιας διάταξης θα είναι σχετικά αργή. Συνεπώς, δεν αποτελεί την καλύτερη λύση για την προστασία ενός LVDC συστήματος.

Προστασία των DC συστημάτων από την AC και την DC πλευρά: Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα προστατεύεται από την AC και την DC πλευρά, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

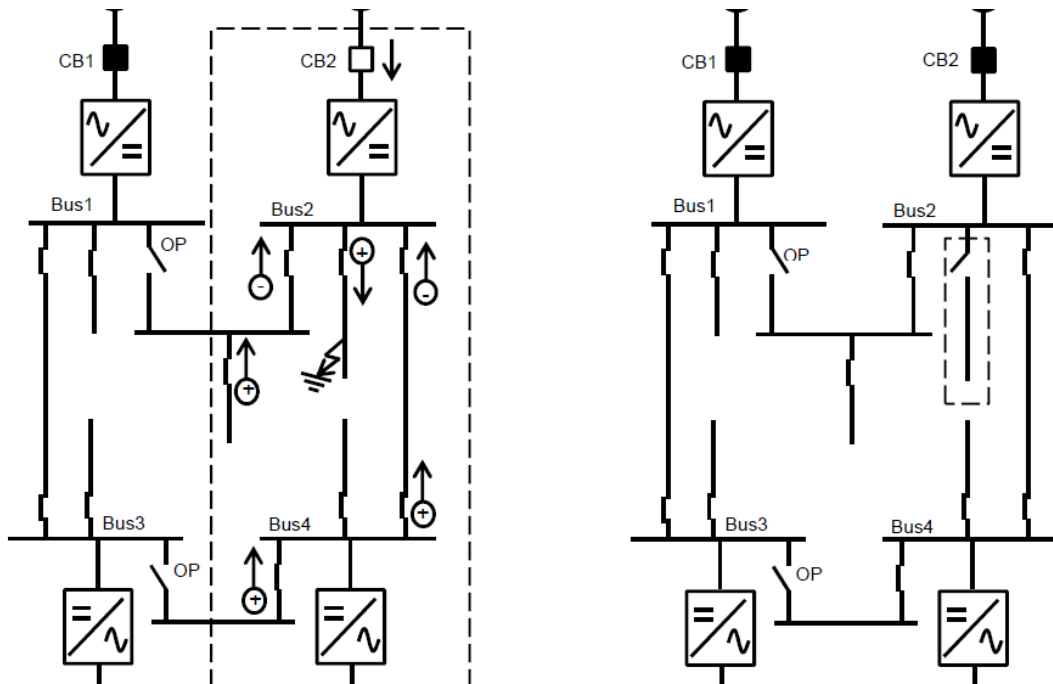


Εικόνα 3.25 Αμφίπλευρη DC προστασία [7].

Η χρήση συσκευών προστασίας στην DC πλευρά επιτρέπει στο δίκτυο να είναι πιο τμηματοποιημένο, και αυξάνει την επιλεκτικότητα του συστήματος προστασίας. Η προστασία στην DC πλευρά είναι δυνατόν να υλοποιηθεί και με AC συσκευές, όπως συζητήθηκε προηγουμένως, και είναι η κύρια προστασία του συστήματος. Η προστασία στην AC πλευρά θα λειτουργεί ως εφεδρική προστασία για το DC μέρος του συστήματος, ενώ θα προστατεύει και το DC μέρος από σφάλματα στο AC μέρος του συστήματος.

Οι SSCBs είναι ταχύτεροι και πιο ελεγχόμενοι από τους παραδοσιακούς CBs. Τα μειονεκτήματα είναι το κόστος τους και οι απώλειες που αυτοί εισάγουν στο δίκτυο. Συνεπώς, για την προστασία της DC πλευράς του δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και απλοί DC διακόπτες, οι οποίοι είναι φθηνότεροι και πιο απλοί στην κατασκευή τους. Ένα παράδειγμα τέτοιας μεθόδου προστασίας είναι η μέθοδος χειραγίας, η οποία χρησιμοποιεί AC CBs και γρήγορους διακόπτες DC για τον εντοπισμό και την απομόνωση DC σφαλμάτων σε DC συστήματα πολλών τερματικών. Οι διακόπτες δεν είναι ικανοί για τη διακοπή κανενός DC σφάλματος. Είναι μηχανικές συσκευές, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποσύνδεση και την αναδιάταξη των DC γραμμών, αφού το σφάλμα έχει εκκαθαριστεί από τους AC CBs. Η μέθοδος βασίζεται στην μέτρηση του πλάτους και στον προσδιορισμό της κατεύθυνσης των ρευμάτων από τους VSCs, έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι γραμμές DC που παρουσιάζουν σφάλμα.

Σε περίπτωση DC σφαλμάτων, όλοι οι CBs που σχετίζονται με το τμήμα στο οποίο συμβαίνει το σφάλμα και βρίσκονται στην AC πλευρά πριν από τους VSCs θα ανοίξουν. Μετά, ο κάθε VSC θα λάβει μετρήσεις του ρεύματος από τους σχετικούς διακόπτες για να ταυτοποιήσει τις γραμμές οι οποίες εμπλέκονται στο σφάλμα και τους διακόπτες οι οποίοι θα πρέπει να αντιδράσουν. Οι διακόπτες της γραμμής με το μεγαλύτερο ρεύμα θετικής φοράς (θετικό θεωρείται το ρεύμα που εξέρχεται από έναν κόμβο, ενώ αρνητικό εκείνο που εισέρχεται σε έναν κόμβο) θα επιλεγεί ως η γραμμή σφάλματος και θα ανοιχτεί από τον μετατροπέα. Οι διακόπτες με αρνητικά ρεύματα θα παραμείνουν κλειστοί. Αφού η γραμμή σφάλματος αποσυνδεθεί από τους σχετικούς διακόπτες, το υπόλοιπο σύστημα αποκαθίσταται, με τους μετατροπείς να επανασυνδέονται στην AC πλευρά τους από τους αντίστοιχους AC breakers.



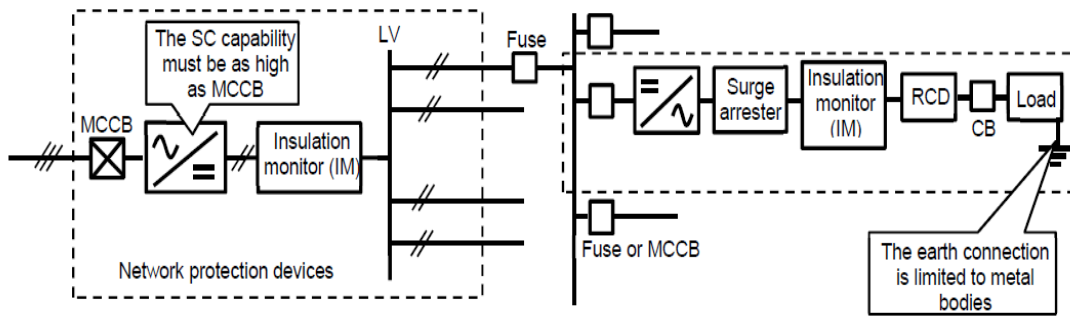
Εικόνα 3.26 Ένα δίκτυο LVDC τοπολογίας δακτυλίου, το οποίο προστατεύεται από τη μέθοδο χειραψίας.

Η μέθοδος χειραψίας έχει το πλεονέκτημα ότι περιορίζει τον αριθμό των αποσυνδεδεμένων φορτίων. Επίσης, οι διακόπτες που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο είναι φθηνοί και απλοί και δεν αυξάνουν τις απώλειες στις γραμμές DC, όπως κάνουν οι SSCBs. Ωστόσο, η πλήρης αποσύνδεση ενός μέρους του συστήματος, η οποία συνήθως περιέχει και υγιείς γραμμές εκτός από τις γραμμές σφάλματος, δεν είναι επιθυμητή, ακόμα και αν έχει προσωρινό χαρακτήρα. Η διακοπή θα επηρεάσει τόσο τα ευαίσθητα φορτία, όσο και την ευστάθεια της τοπικής μικροπαραγωγής, ίσως δε να υποβαθμιστεί και η ποιότητα ισχύος.

Ακολουθεί ένα άλλο παράδειγμα μη μοναδιαίας προστασίας στις AC και DC πλευρές του συστήματος. Στο σύστημα αυτό εμπλέκονται περισσότερες συσκευές μη μοναδιαίας προστασίας από ό,τι συνήθως, και συγκεκριμένα συσκευές προστασίας υπέρτασης, συσκευές σφάλματος προς γη και συσκευές εποπτείας της μόνωσης. Ένας MCCB χρησιμοποιείται στην πλευρά AC για την προστασία του συστήματος έναντι AC βραχυκυκλωμάτων, των μετατροπέων έναντι σφαλμάτων των διακοπών και ως εφεδρική προστασία για το DC σύστημα.

Όσο για το DC σύστημα, οι DC γραμμές προστατεύονται από DC ασφάλειες. Όταν έχουμε αγείωτο IT LVDC δίκτυο, το σύστημα προστασίας έχει τη μορφή που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

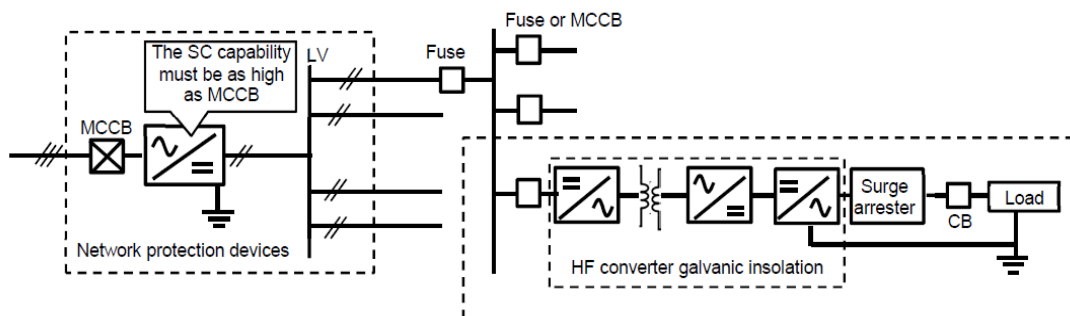




Εικόνα 3.27 Σύστημα προστασίας ενός αγείωτου LVDC δικτύου [7].

Οι ηλεκτρονόμοι Insulation Monitoring (IM) χρησιμοποιούνται για την προστασία του συστήματος έναντι σφαλμάτων γης. Μετράνε την αντίσταση της μόνωσης και, αν αυτή πέσει κάτω από το  $1\text{M}\Omega$  εξαιτίας σφάλματος στην DC πλευρά, στέλνεται ένα εξωτερικό σήμα διακοπής στον MCCB της AC πλευράς για την εξουδετέρωση του σφάλματος. Χρησιμοποιούνται επίσης συσκευές surge arrester για την προστασία έναντι των σφαλμάτων διακοπών των μετατροπέων. Για παράδειγμα, ένα διπλό σφάλμα μεταξύ διακοπών ή ένα σφάλμα στον έλεγχο του αντιστροφέα DC/AC στην AC πλευρά των καταναλωτών μπορεί να αντιμετωπιστεί από surge arresters και ασφάλειες ή DC breakers.

Η προστασία του γειωμένου TN συστήματος είναι διαφορετική από το αγείωτο δίκτυο. Οι κύριες διαφορές είναι η προστασία γης και εκείνη του μετατροπέα. Στο γειωμένο δίκτυο, δεν υπάρχουν συσκευές IM για την προστασία έναντι σφαλμάτων γης. Τα σφάλματα μεταξύ των DC πόλων, καθώς και τα σφάλματα γης αντιμετωπίζονται από DC ασφάλειες στις DC γραμμές. Προκειμένου να αποσυζευχθούν το DC σύστημα από το AC στην πλευρά του καταναλωτή, χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής γαλβανικής προστασίας. Το όλο σύστημα προστασίας ενός γειωμένου δικτύου φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 3.28 Σύστημα προστασίας ενός γειωμένου TN LVDC δικτύου [7].

Η επίδοση τέτοιων διατάξεων προστασίας έχει ελεγχθεί σε απλοποιημένα αγείωτα LVDC συστήματα με εξομοιώσεις και πειραματικές μελέτες, κάτω από τις ακόλουθες συνθήκες σφάλματος: βραχυκύκλωμα και σφάλματα γης στο AC δίκτυο των καταναλωτών και ένα σφάλμα προς γη στο DC δίκτυο. Το σφάλμα βραχυκύκλωσης στο AC δίκτυο των καταναλωτών καθαρίστηκε μέσα σε  $0.04\text{s}$  από τον διακόπτη CB πριν το φορτίο. Το σφάλμα προς γη στο δίκτυο των καταναλωτών καθαρίστηκε από τη συσκευή IM του τομέα των καταναλωτών μέσα σε  $1.55\text{s}$ . Όσο για το σφάλμα γης

μιας εκ των γραμμών DC, το σφάλμα καθαρίστηκε από την DC IM και τον διακόπτη στην AC πλευρά του δικτύου μέσα σε 5.1s. Στην τελευταία αυτή περίπτωση, ολόκληρο το LVDC δίκτυο αποσυνδέθηκε από το κυρίως δίκτυο.

Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι οι συμβατικές συσκευές προστασίας, όπως οι ασφάλειες και οι MCCBs δεν θα εξουδετερώνουν τα σφάλματα αρκετά γρήγορα, προκειμένου να αποκομίσουμε το μέγιστο από τα LVDC δίκτυα. Εκτός αυτού, η υλοποίηση του συστήματος προστασίας με τέτοιες συσκευές οδηγεί σε χαμηλή επιλεκτικότητα έναντι των σφαλμάτων στις DC γραμμές, με αποτέλεσμα την αναίτια πολλές φορές αποσύνδεση ολόκληρου του συστήματος. Συνεπώς, τέτοια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ορισμένα απλά, ακτινικά LVDC δίκτυα, δεν είναι όμως ιδιαίτερα κατάλληλα για δίκτυα με μεγάλη διείσδυση τοπικής μικροπαραγωγής, καθώς η ευστάθεια ενός τέτοιου δικτύου είναι ευάλωτη, όταν χρησιμοποιείται ένα τέτοιου τύπου σύστημα προστασίας.

Η ταχύτητα επέμβασης της προστασίας είναι δυνατόν να αυξηθεί αν χρησιμοποιηθούν SSCBs και αν οι τοπικές μετρήσεις του κάθε μετατροπέα και του κάθε SSCB χρησιμοποιηθούν για την ταχεία ανίχνευση και εντοπισμό των σφαλμάτων DC, καθώς και την γρήγορη διακοπή προκειμένου να περιοριστούν οι επιπτώσεις των σφαλμάτων αυτών. Κάθε μετατροπέας θα πρέπει να είναι σε θέση να διαπιστώσει αν οι σχετικές με αυτόν γραμμές παρουσιάζουν σφάλμα ή όχι. Αυτό μπορεί να γίνει βάσει των ακόλουθων πληροφοριών: κορυφή του ρεύματος αποφόρτισης, χρόνος ανόδου του μετώπου του πρώτου κύματος και μοτίβο της ταλάντωσης.

- Ο ρυθμός μεταβολής του μεταβατικού ρεύματος της γραμμής σφάλματος θα είναι ο ταχύτερος (δηλαδή αυτός με τον μικρότερο χρόνο ανόδου) σε σύγκριση με τις υπόλοιπες γραμμές.
- Η κορυφή του μεταβατικού ρεύματος της γραμμής σφάλματος θα είναι η υψηλότερη, σε σχέση με τις άλλες γραμμές.
- Τα ρεύματα της γραμμής σφάλματος θα παρουσιάζουν μεγαλύτερα πλάτη στα μοτίβα ταλάντωσης τους.

Σε ό,τι αφορά τις τάσεις, αυτές μπορούν να μετρηθούν, ούτως ώστε οι παράμετροί τους να χρησιμοποιηθούν παράλληλα με εκείνες του ρεύματος για την ταχύτερη ανίχνευση και διακοπή των DC σφαλμάτων. Αν η τάση μειωθεί κάτω από προκαθορισμένες τιμές, ενώ παράλληλα το ρεύμα ξεπεράσει τις δικές του προκαθορισμένες τιμές, ο SSCB θα σβήσει, αποσυνδέοντας το σφάλμα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που προσφέρει η μέτρηση των τάσεων είναι ότι δίνει τη δυνατότητα διάκρισης μεταξύ των DC σφαλμάτων και των αντίστοιχων AC στην πλευρά του καταναλωτή, δεδομένου ότι τα ρεύματα και οι τάσεις εμφανίζουν ταλαντωτική συμπεριφορά όταν πρόκειται για AC σφάλματα.

### **3.3.6 Συσκευές προστασίας.**

Οι συσκευές προστασίας που είναι εμπορικά διαθέσιμες για DC συστήματα χαμηλής τάσης είναι οι ασφάλειες, οι molded case circuit breakers και οι isolated-case circuit breakers. Μερικές από αυτές είναι σχεδιασμένες για DC, αλλά οι πιο πολλές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο σε AC όσο και σε DC εφαρμογές.

Μία ασφάλεια αποτελείται από έναν σύνδεσμο και ένα υλικό που απορροφά θερμότητα μέσα σε ένα κεραμικό περίβλημα. Όταν το ρεύμα ξεπεράσει το όριο της ασφάλειας, ο σύνδεσμος της ασφάλειας λιώνει και σχηματίζεται ένα τόξο.

Προκειμένου να σβήσει το τόξο, η τάση του τόξου θα πρέπει να ξεπεράσει την τάση του συστήματος. Αυτό μπορεί να γίνει επιμηκύνοντας και ψύχοντας το τόξο. Δεν υπάρχουν στιγμές που το ρεύμα παίρνει μηδενικές τιμές αυθορμήτως σε ένα DC σύστημα, και το γεγονός αυτό δυσχεραίνει τη διακοπή των DC σφαλμάτων. Οι ενδείξεις τάσεως και ρεύματος των ασφαλειών δίνονται σε RMS τιμές, και συνεπώς ισχύουν τόσο για το AC, όσο και για το DC. Το πρόβλημα με τις ασφάλειες είναι ότι ανοίγουν μόνο τον πόλο εκείνο (δηλαδή τη γραμμή εκείνη) στον οποίο συμβαίνει το σφάλμα, ενώ αφήνουν τον άλλο πόλο κλειστό. Το πρόβλημα αυτό λύνεται αν χρησιμοποιηθούν στη θέση των ασφαλειών molded case circuit breakers (MCCBs).

Ένας molded case circuit breaker αποτελείται από τον συστολέα, έναν θάλαμο σβέσης και μία συσκευή διακοπής. Όταν ανοίγει ένας MCCB, οι επαφές αρχίζουν να χωρίζονται και σχηματίζεται ένα τόξο μεταξύ τους. Το τόξο ωθείται στον θάλαμο σβέσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται η πίεση του αέρα, καθώς επίσης και μαγνητικές δυνάμεις Lorentz. Ο θάλαμος σβέσης αποτελείται από πολλαπλούς μεταλλικούς δίσκους, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι ώστε να διαιρούν το τόξο σε πολλά μικρότερα τόξα. Αυτό θα αυξήσει την συνολική τάση του τόξου, ενώ θα μειώσει τη θερμοκρασία του και το τόξο στις περισσότερες περιπτώσεις θα σβήσει.

Οι MCCB είναι συνήθως εφοδιασμένοι με μία θερμική-μαγνητική συσκευή διακοπής, ενώ οι ενδείξεις της τάσης και του ρεύματος δίνονται σε rms τιμές. Ο μαγνητικός διακόπτης αντιλαμβάνεται τη στιγμιαία τιμή του ρεύματος, το οποίο σημαίνει ότι η διαβάθμιση του ρεύματος για DC είναι κατά  $\sqrt{2}$  φορές μεγαλύτερη από εκείνη για AC. Ωστόσο, για το θερμικό διακόπτη, οι τιμές είναι οι ίδιες. Το πρόβλημα τόσο με τους MCCBs, όσο και με τις ασφάλειες, είναι ότι καμμία από τις δύο συσκευές δεν μπορεί να ελεγχθεί αυτόνομα. Αυτό σημαίνει ότι, σε περίπτωση σφάλματος, απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση προκειμένου, μετά την αφαίρεση του σφάλματος, να επανενεργοποιηθεί το σύστημα.

Για μεγαλύτερα LVDC συστήματα, είναι διαθέσιμοι ειδικοί, ταχείς DC breakers. Ένας τέτοιος διακόπτης αρχίζει να διακόπτει το DC ρεύμα σφάλματος μέσα σε 0.01s. Χαμηλά ρεύματα είναι δυνατόν να προκαλέσουν προβλήματα στους διακόπτες αυτούς, αφού μπορεί να κάνουν τις επαφές τους να ενωθούν μεταξύ τους.

Είναι γνωστά κάποια προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση ασφαλειών και διακοπών κυκλώματος στα LVDC συστήματα, όπως οι μεγάλες σταθερές χρόνου και το μεγάλο χρονικό διάστημα που χρειάζονται για να λειτουργήσουν οι συσκευές αυτές σε ένα τέτοιο περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς διακόπτες, όπως GTOs, η ταχύτητα λειτουργίας μειώνεται και η επαγωγική ικανότητα διακοπής του ρεύματος είναι δυνατόν να αυξηθεί. Ωστόσο, οι απώλειες μιας τέτοιας λύσης είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με έναν μηχανικό διακόπτη. Συνεπώς, ίσως μια καλύτερη επιλογή να είναι η συνδυασμένη χρήση ενός μηχανικού και ενός ηλεκτρονικού διακόπτη [7].

### **3.3.7 Προστατευτικοί ηλεκτρονόμοι και εξοπλισμός μετρήσεων.**

Οι DC breakers είναι εξοπλισμένοι με μηχανικές συσκευές διακοπής, οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε να ανοίγουν τον διακόπτη αν η τιμή του ρεύματος ξεπεράσει το 1-4pu. Για το άνοιγμα του διακόπτη χρησιμοποιείται η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που δημιουργείται από το ρεύμα. Ωστόσο, απαιτείται και ένας ηλεκτρονόμος προστασίας, αν υπάρχει περίπτωση ο διακόπτης να ανοίξει και για άλλους λόγους.

Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας χρησιμοποιούν τις μετρούμενες τάσεις και ρεύματα, και σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούν και πληροφορίες που προέρχονται από την επικοινωνία με τις άλλες μονάδες. Εκτός από την υπερένταση, οι ηλεκτρονόμοι προστασίας μπορούν να υπολογίζουν χρονικές παραγωγούς και βηματικές μεταβολές των ρευμάτων για να προσδιορίσουν αν το σύστημα είναι στην κανονική λειτουργία ή αν έχει συμβεί κάποιο σφάλμα.

### **3.3.8 Σχεδιασμός του συστήματος προστασίας.**

Γενικά, η λειτουργία του συστήματος προστασίας του LVDC μικροδικτύου είναι να ανιχνεύει και να απομονώνει σφάλματα, γρήγορα και με ακρίβεια, προκειμένου να ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις των διαταραχών. Ο σχεδιασμός του συστήματος προστασίας εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων: τα σφάλματα που μπορούν να προκύψουν, τις συνέπειές τους, το είδος των συσκευών προστασίας που απαιτούνται, την ανάγκη ή μη για εφεδρική προστασία, τις μεθόδους ανίχνευσης, μέτρα για την αποφυγή σφαλμάτων και, εν τέλει, μέτρα για να αποφευχθεί η λανθασμένη λειτουργία του συστήματος προστασίας.

Οι πιθανοί τύποι σφαλμάτων σε ένα DC μικροδίκτυο είναι τα σφάλματα μεταξύ πόλων και εκείνα μεταξύ πόλων και γης. Τα σφάλματα μεταξύ πόλων έχουν συχνά χαμηλή εμπέδηση σφάλματος, ενώ τα σφάλματα μεταξύ πόλων και γης μπορεί να είναι είτε χαμηλής, είτε υψηλής αντίστασης. Σφάλματα είναι δυνατόν να συμβούν στον ζυγό ή σε μία από τις γραμμές τροφοδοσίας, στο εσωτερικό των πηγών ή στα φορτία.

Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός LVDC μικροδικτύου και άλλων υπαρχόντων δικτύων DC είναι ότι στα πρώτα υπάρχει η απαίτηση από τον μετατροπέα για αμφίδρομη ροή ισχύος, ενώ στα δεύτερα η ροή της ισχύος γίνεται αποκλειστικά από την AC προς την DC πλευρά του συστήματος. Στα δεύτερα αυτά τα συστήματα, είναι δυνατός ο χειρισμός των σφαλμάτων, τα οποία συμβαίνουν στην DC πλευρά, μέσω του περιορισμού του ρεύματος που ρέει μέσα από τον μετατροπέα. Αντιθέτως, στα πρώτα, όπου υπάρχει η απαίτηση για αμφίδρομη ροή ισχύος, ενδεχομένως να μην υπάρχει η δυνατότητα περιορισμού του ρεύματος που διαρρέει τον μετατροπέα, σε περίπτωση που εμφανιστεί κάποιο σφάλμα στο LVDC δίκτυο.

Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, όλες οι πηγές και οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας που είναι συνδεδεμένες με το μικροδίκτυο θα συνεισφέρουν στο συνολικό ρεύμα σφάλματος. Το ρεύμα σφάλματος από κάθε μονάδα ΔΠ προσδιορίζεται από τον σχεδιασμό της και τη συνολική αντίσταση σφάλματος. Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στο LVDC μικροδίκτυο έχουν περιορισμένη ικανότητα αγωγής ρεύματος, εξαιτίας των ημιαγωγικών διακοπών τους. Ωστόσο, μπορούν και αυτοί να τροφοδοτήσουν ένα ρεύμα σφάλματος, μεγάλου πλάτους και μικρής διάρκειας μέσω των πυκνωτών τους. Οι αποθηκευτικές διατάξεις, παραδείγματος χάρη οι μπαταρίες οξέος-μολύβδου, μπορούν να συνεισφέρουν ένα μεγάλο ρεύμα σφάλματος μόνιμης κατάστασης. Σε αντίθεση με τους μετατροπείς, έχουν μεγάλο χρόνο ανόδου.

Οι συνιστώσες του DC μικροδικτύου πρέπει να προστατευτούν τόσο από υπερφορτίσεις, όσο και από βραχυκυκλώματα. Ανάλογα με την ευαισθησία της συνιστώσας, υπάρχουν διάφορες λύσεις. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς είναι πολύ ευαίσθητοι στις υπερεντάσεις και, στην περίπτωση που δεν έχουν εσωτερικό κύκλωμα περιορισμού του ρεύματος, απαιτούν πολύ ταχεία προστασία. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι οι ασφάλειες, οι υβριδικοί διακόπτες κυκλώματος και οι ηλεκτρονικοί διακόπτες. Οι μπαταρίες και τα φορτία δεν απαιτούν τόσο γρήγορη προστασία, και συνεπώς είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν απλούστερες και φθηνότερες συσκευές.

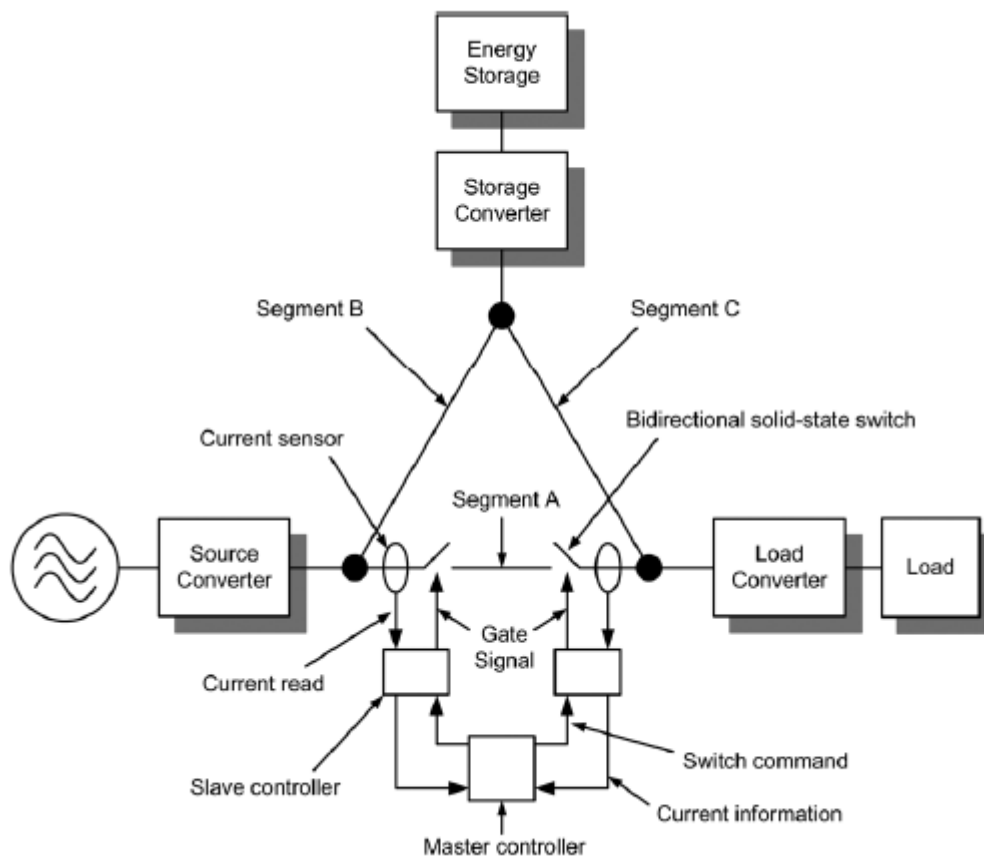
Για να επιτευχθεί επιλεκτικότητα, κατά τη λειτουργία της προστασίας, σε ένα DC μικροδίκτυο, είναι απαραίτητο να συντονιστούν οι διάφορες συσκευές προστασίας μεταξύ τους. Οι γραμμές και τα φορτία προστατεύονται συνήθως από ασφάλειες, αφού αυτές είναι απλές και φθηνές, και είναι εύκολο να πετύχουμε επιλεκτικότητα. Ωστόσο, συχνά χρησιμοποιούνται MCCBs κοντά στα φορτία, διότι έχουν την ικανότητα να διακόπτουν και τους δύο (και όχι μόνον τον έναν) πόλους. Οι συσκευές προστασίας που προστατεύουν πηγές και διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να ξεχωρίσουν ένα σφάλμα ζυγού από ένα σφάλμα γραμμής ή φορτίου, έτσι ώστε να επιτυγχάνουν επιλεκτικότητα. Διάφορες έρευνες δείχνουν ότι, για την προστασία των μετατροπέων, η καλύτερη προσέγγιση είναι η χρήση του επιπέδου τάσης του συνδέσμου DC, σε συνδυασμό με την παράγωγο του ρεύματος. Για τις μπαταρίες είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί, αντί για τα παραπάνω μεγέθη, η στιγμιαία τιμή του ρεύματος [13].

### **3.3.9 Μία μέθοδος DC προστασίας.**

Παρακάτω, θα δούμε μία συγκεκριμένη μέθοδο DC προστασίας. Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στην ανίχνευση του σφάλματος σε ένα τμήμα του ζυγού που συνδέει τις συσκευές του μικροδικτύου, και κατόπιν στην απομόνωση του σφάλματος αυτού, έτσι ώστε το σύστημα να συνεχίσει να λειτουργεί χωρίς να απενεργοποιείται εξ' ολοκλήρου. Για να πετύχει τους στόχους αυτούς, η μέθοδος προτείνει ένα μικροδίκτυο του οποίου ο ζυγός θα έχει μορφή βρόχου, ο οποίος θα έχει τόσα τμήματα, όσες θα είναι και οι συσκευές που συνδέονται στο ζυγό, και που θα ελέγχει τη σύνδεση και την αποσύνδεση των τμημάτων αυτών, προκειμένου να αντιμετωπίσει την εμφάνιση σφαλμάτων.

## A. Προτεινόμενος ελεγκτής.

Το σχήμα προστασίας, το οποίο θα εξετάσουμε, ανιχνεύει το σφάλμα και απομονώνει το τμήμα στο οποίο αυτό παρουσιάζεται, έτσι ώστε το υπόλοιπο σύστημα να συνεχίσει να λειτουργεί. Ο DC ζυγός υλοποιείται με τη μορφή βρόχου, προκειμένου η επιλεκτικότητα του συστήματος προστασίας να είναι η επιθυμητή. Ο βρόχος αυτός χωρίζεται σε διάφορα τμήματα. Το κάθε τμήμα αποτελείται από ένα μέρος του ζυγού (το οποίο περιλαμβάνει τους δύο πόλους, θετικό και αρνητικό, ή τον ένα πόλο και τη γή) και τον ελεγκτή του τμήματος. Ένα αφαιρετικό διάγραμμα αυτού του συστήματος προστασίας φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 3.29 Αφαιρετικό διάγραμμα του συστήματος προστασίας. Το σύστημα προστασίας παρουσιάζεται μόνο για το τμήμα A, ενώ παραλείπεται για τα υπόλοιπα δύο τμήματα [12].

στο οποίο το σύστημα προστασίας παρουσιάζεται μόνο για το τμήμα A, ενώ για τα υπόλοιπα δύο τμήματα παραλείπεται.

Το σύστημα προστασίας αποτελείται από έναν ελεγκτή master, δύο ελεγκτές slave και κλάδους ελεύθερης διέλευσης μεταξύ κάθε γραμμής και της γης. Οι ελεγκτές slave μετράνε το ρεύμα στα άκρα του κάθε τμήματος του ζυγού που συνδέει δύο συνιστώσες και στέλνουν τις τιμές αυτές στον ελεγκτή master. Ελέγχουν επίσης τους δικατευθυντικούς διακόπτες στερεάς κατάστασης τόσο στο τμήμα του ζυγού, όσο και

στον κλάδο ελεύθερης διέλευσης ανάλογα με τις οδηγίες του ελεγκτή master. Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, οι τιμές του ρεύματος που μετρώνται στα άκρα του κάθε τμήματος του ζυγού θα πρέπει να είναι σχεδόν ίδιες μεταξύ τους. Τότε, ο ελεγκτής master στέλνει εντολές να τοποθετηθούν οι διακόπτες του ζυγού στις κανονικές θέσεις τους.

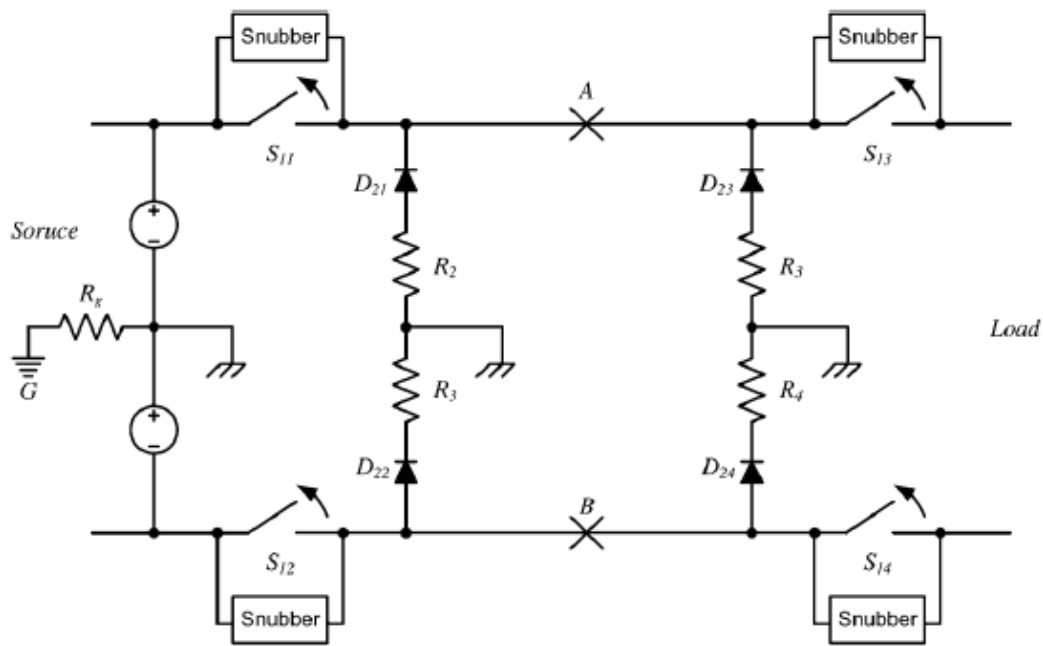
## B. Ανίχνευση και απομόνωση του σφάλματος.

Ο ελεγκτής master παρατηρεί τη διαφορά των ενδείξεων του ρεύματος σε ένα τμήμα:

$$i_{diff} = i_{in} - i_{out}$$

Όταν η διαφορά ξεπεράσει ένα κατώφλι, ο ελεγκτής master στέλνει εντολές στους ελεγκτές slave να απομονώσουν το τμήμα που παρουσιάζει το σφάλμα από το σύστημα. Λόγω του ότι, για να διαπιστωθεί αν παρουσιάζεται σφάλμα ή όχι, χρησιμοποιείται ένα σήμα διαφοράς, είναι δυνατό να ανιχνευθούν σφάλματα, ανεξαρτήτως του πλάτους του σφάλματος. Μόλις απομονωθεί το τμήμα στο οποίο παρουσιάζεται το σφάλμα, η τάση του ζυγού αποκαθίσταται και το υπόλοιπο σύστημα μπορεί να συνεχίσει τη λειτουργία του. Ακόμα και με πολλαπλά εσφαλμένα τμήματα, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει μερικώς, αν τα τμήματα από κάποιες πηγές προς κάποια φορτία παραμένουν άθικτα. Η πιθανότητα να συμβεί σφάλμα κοντά στο σημείο σύνδεσης μιας συσκευής είναι δυνατόν να ελαχιστοποιηθεί αν οι ελεγκτές τμήματος εγκατασταθούν όσο το δυνατόν εγγύτερα στο σημείο σύνδεσης.

Η υλοποίηση της μεθόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, στο οποίο απεικονίζεται η συνδεσμολογία του τμήματος A του προηγούμενου σχήματος:

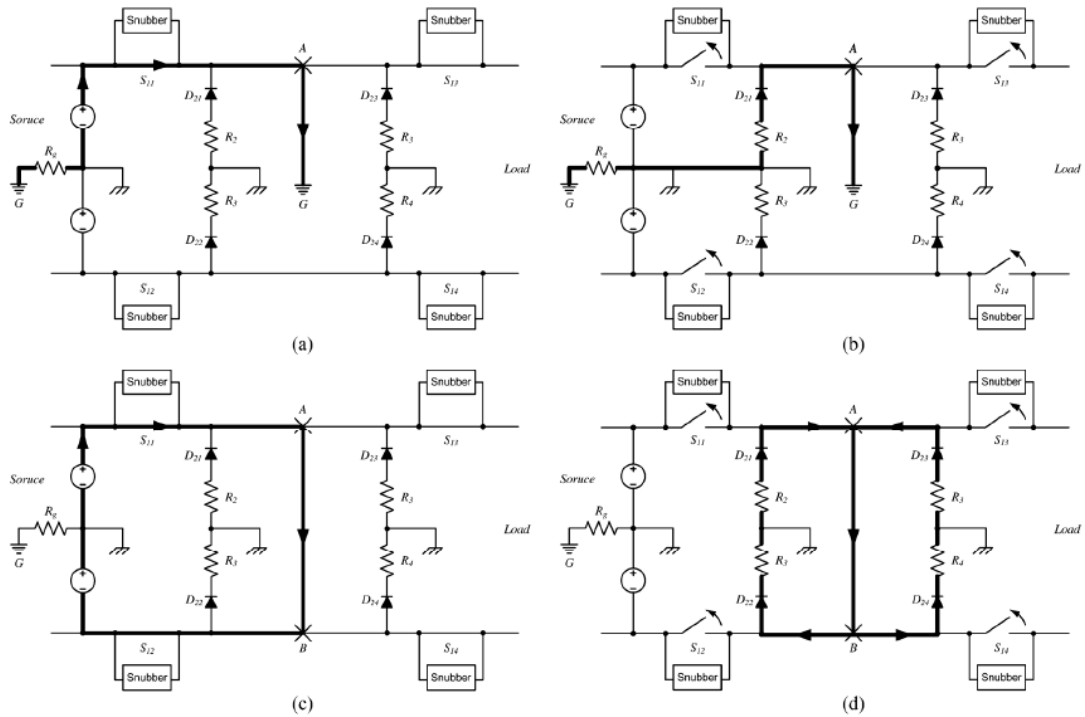


Εικόνα 3.30 Η υλοποίηση της μεθόδου προστασίας. Τα βέλη υποδεικνύουν την δράση των διακοπών, στην περίπτωση που ανιχνευθεί ένα σφάλμα [12].

Δικατευθυντικοί, ημιαγωγικοί διακόπτες και δίοδοι χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό των τμημάτων και την ελεύθερη διέλευση του ρεύματος σφάλματος, αντίστοιχα. Στην κανονική λειτουργία, οι διακόπτες είναι κλειστοί, ενώ οι δίοδοι είναι ανοικτές. Όταν συμβαίνει ένα σφάλμα, ο ελεγκτής master το ανιχνεύει χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις των ρευμάτων των ελεγκτών slave και ανοίγει τους διακόπτες. Ταυτόχρονα, οι δίοδοι άγουν, έτσι ώστε να δημιουργήσουν ένα μονοπάτι ελεύθερης διέλευσης για τα ρεύματα σφάλματος, προκειμένου να μπορούν να ανοίξουν οι διακόπτες και να μπορέσει να μηδενιστεί το ρεύμα σφάλματος, διερχόμενο μέσα από αντιστάσεις. Οι ελεγκτές των τμημάτων μπορούν να ανιχνεύσουν το ρεύμα σφάλματος είτε πρόκειται για σφάλμα φάσης προς φάση, είτε για σφάλμα φάσης προς γη. Συμπεριλαμβάνεται επίσης ένα κύκλωμα σβέσης snubber για τους διακόπτες, του οποίου ο σκοπός είναι να περιορίσει την υπερπήδηση της τάσης εξαιτίας της επαγωγής της γραμμής. Τα κυκλώματα snubber είναι απαραίτητα για την προστασία των διακοπών στερεάς κατάστασης από το μεταβατικό της τάσης, το οποίο οφείλεται στην αυτεπαγωγή του καλωδίου του ζυγού. Παρόλο που το ρεύμα σφάλματος πρέπει να διακοπεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα, ο υψηλός ρυθμός μεταβολής του ρεύματος,  $\frac{di}{dt}$ , μπορεί να κάνει την τάση καταστροφικά μεγάλη για τους διακόπτες στερεάς κατάστασης.

Τα δύο είδη σφαλμάτων απεικονίζονται στην ακόλουθη εικόνα:





Εικόνα 3.31 Το ρεύμα σφάλματος και η αντίστοιχη επέμβαση του συστήματος προστασίας. α) Σφάλμα φάσης προς γη μεταξύ των σημείων A και G. β) Απομονωμένο σφάλμα φάσης προς γη. γ) Σφάλμα γραμμής προς γραμμή μεταξύ των σημείων A και B. δ) Το ίδιο σφάλμα απομονωμένο [12].

Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι το ρεύμα σφάλματος απομονώνεται και σβήνεται στον βρόχο ελεύθερης διέλευσης. Η αντίσταση της οδού ελεύθερης διέλευσης καθορίζει τον ρυθμό σβέσης του ρεύματος σφάλματος, το οποίο μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$i_{fault}(t) = \frac{V_s}{R_{eq}} e^{-\frac{R_{fw}}{L_{fw}}t}$$

Όπου  $R_{fw}$  και  $L_{fw}$  είναι η αντίσταση και η αυτεπαγωγή της οδού ελεύθερης διέλευσης, αντίστοιχα [12].



## **Κεφάλαιο 4ο: Συγκριτική μελέτη για τον Έλεγχο των μικροδικτύων AC και DC.**

### **4.1 Ποιοι είναι οι στόχοι του ελέγχου ενός μικροδικτύου.**

Οι διεπαφές ηλεκτρονικών ισχύος (ΔΗΙ) παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο για την διασύνδεση διαφόρων συνιστωσών στα μικροδίκτυα και όλα τα τεχνικά ζητήματα, όπως το ισοζύγιο ισχύος και η ποιότητα ισχύος επιλύονται μέσω του ελέγχου αυτών των διατάξεων. Οι ΔΗΙ επιτρέπουν στα μικροδίκτυα να λειτουργούν τόσο συνδεδεμένα με το δίκτυο, όσο και αυτόνομα, ενώ παρέχουν υψηλή ποιότητα ισχύος με το ελάχιστο κόστος εξοπλισμού. Ο ρόλος των ΔΗΙ είναι: α) να ρυθμίζουν την τάση και τη συχνότητα β) να ρυθμίζουν την ενεργό και άεργο ισχύ μεταξύ των μονάδων ΔΠ, καθώς επίσης και την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του μικροδικτύου και του κυρίως δικτύου, γ) να διευκολύνουν την μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής, προκειμένου εκείνη να μπορεί να παρακολουθεί στενά τη ζήτηση του φορτίου, δ) να ενσωματώνουν μεθόδους ελέγχου για τον διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και ε) να ενσωματώνουν τις διάφορες τεχνολογίες-κλειδιά, οι οποίες διαφοροποιούν ένα σύγχρονο από το παραδοσιακό σύστημα διανομής.

Οι ελεγκτές των ΔΗΙ θα πρέπει να μπορούν α) να εισάγουν/εξάγουν ενέργεια από/προς το κυρίως δίκτυο, β) να ελέγχουν τις ροές ενεργού και αέργου ισχύος και να διαχειρίζονται τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που είναι συνδεδεμένες σε αυτό και γ) να λειτουργούν το δίκτυο στα πλαίσια των προδιαγραφών του, αυτό σημαίνει ότι η τάση και η συχνότητα θα πρέπει να διατηρηθούν στα προκαθορισμένα επίπεδα. Συνήθως, οι αποκλίσεις της τάσης και της συχνότητας είναι πολύ μικρές αν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο σε ισχυρά δίκτυα. Ωστόσο, μεγάλες αποκλίσεις μπορεί να προκύψουν σε αυτόνομα δίκτυα. Επιπλέον, στην περίπτωση μικροδικτύων που συνδέονται σε κυρίως δίκτυα, οι μετατροπείς χρησιμοποιούν το σήμα που προέρχεται από το κυρίως δίκτυο ως αναφορά προκειμένου να πετύχουν το σήμα με την κατάλληλη συχνότητα (στην περίπτωση των AC μικροδικτύων) ή τάση (στην περίπτωση τόσο των AC, όσο και των DC μικροδικτύων), το οποίο είναι απαραίτητο για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος και τον υπολογισμό της αναφοράς για το ρεύμα. Κάθε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής και μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, η οποία λειτουργεί με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να θεωρηθεί ως μία πηγή ρεύματος, η ροή ισχύος της οποίας μπορεί να ελεγχθεί μέσω της μεταβολής της αναφοράς του ρεύματος.

Το κυρίως δίκτυο είναι συνήθως εκείνο που διατηρεί την ευστάθεια του συστήματος, τόσο στην περίπτωση των AC, όσο και των DC μικροδικτύων κατά την διασυνδεδεμένη λειτουργία. Ωστόσο, στη λειτουργία νησιδοποίησης η αναφορά από το δίκτυο χάνεται και πρέπει να κατασκευαστεί μια καινούρια αναφορά για την τάση από τον ελεγκτή κάποιας από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, προκειμένου να συνεχιστεί η παραγωγή ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέονται στο δίκτυο μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ελεγχόμενες πηγές τάσης, των οποίων η έξοδοι θα πρέπει να μοιράζουν τη ζήτηση του φορτίου ανάλογα με την ικανότητά τους, έτσι ώστε να μην καταπονηθεί υπέρ του δέοντος οποιαδήποτε από τις μονάδες ΔΠ. Για τον λόγο αυτό, οι στρατηγικές διαχείρισης ισχύος είναι ζωτικής σημασίας για τα μικροδίκτυα που λειτουργούν αυτόνομα με

λίγες μικρές μονάδες ΔΠ, όπου δεν υπάρχει καμμία κυριαρχούσα πηγή ενέργειας για να ικανοποιήσει τη ζήτηση του φορτίου [4].

## **4.2 Μέθοδοι ελέγχου AC μικροδικτύων.**

### **4.2.1 Ιεραρχικός έλεγχος μικροδικτύων.**

Η ιδέα ενός ιεραρχικού ελέγχου για μικροδίκτυα προέρχεται από το ιεραρχικό μοντέλο ελέγχου που εφαρμόζεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό στα συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Βεβαίως, υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο ειδών συστημάτων, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του ελέγχου. Συγκεκριμένα, στα συμβατικά συστήματα στα οποία βρίσκεται εφαρμογή το ιεραρχικό μοντέλο ελέγχου, συμμετέχουν μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες που διαθέτουν μεγάλη αδράνεια, ενώ το ίδιο το δίκτυο έχει ως επί το πλείστον επαγωγικό χαρακτήρα. Ωστόσο, στα μικροδίκτυα, τα οποία βασίζονται στα ηλεκτρονικά ισχύος, δεν υπάρχει αδράνεια και η φύση του δικτύου είναι κυρίως ωμική. Ο ιεραρχικός έλεγχος οργανώνεται σε τρία επίπεδα, ως εξής: Ο πρωτογενής έλεγχος ασχολείται με τον εσωτερικό έλεγχο των μονάδων ΔΠ, μέσω της προσθήκης εικονικής αδράνειας και μέσω του ελέγχου της αντίστασης εξόδου τους. Ο δευτερογενής έλεγχος χρησιμοποιείται για να επαναφέρει τις αποκλίσεις της συχνότητας και του πλάτους της τάσης, οι οποίες παράγονται από την εικονική αδράνεια και τις εικονικές αντιστάσεις εξόδου του πρωτογενούς ελέγχου. Ο τριτογενής έλεγχος ρυθμίζει τη ροή ισχύος μεταξύ του δικτύου και του μικροδικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ).

#### **A. Εσωτερικοί βρόχοι ελέγχου.**

Η χρήση ευφών διεπαφών ισχύος μεταξύ των πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και του μικροδικτύου είναι υποχρεωτική. Οι διεπαφές αυτές έχουν ένα τελικό στάδιο, το οποίο αποτελείται από DC/AC αντιστροφείς, οι οποίοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες: τους αντιστροφείς πηγής ρεύματος (current-source inverters, CSIs), οι οποίοι αποτελούνται από έναν εσωτερικό βρόχο ρεύματος και από έναν βρόχο κλειδωμένης φάσης (phase locked loop, PLL), και τους αντιστροφείς πηγής τάσης (voltage-source inverters, VSIs), οι οποίοι αποτελούνται από έναν εσωτερικό βρόχο ρεύματος και έναν εξωτερικό βρόχο τάσης. Οι CSIs χρησιμοποιούνται συχνά για την έγχυση ρεύματος στο δίκτυο, ενώ οι VSIs προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η τάση στην αυτόνομη λειτουργία ή τη λειτουργία νησιδοποίησης.

Οι VSIs έχουν μεγάλο ενδιαφέρον προκειμένου για εφαρμογές μικροδικτύων, αφού δεν χρειάζονται καμμία εξωτερική αναφορά προκειμένου να παραμείνουν συγχρονισμένοι. Επιπλέον, οι VSIs μπορούν να παράσχουν στα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας δυνατότητες όπως η ικανότητα ride-through και η βελτίωση της ποιότητας ισχύος. Όταν οι αντιστροφείς αυτοί λειτουργούν συνδεδεμένοι με το δίκτυο, συχνά αλλάζουν τη συμπεριφορά τους από πηγές τάσης σε πηγές ρεύματος. Παρόλα αυτά, προκειμένου να πετύχουμε ένα ευέλικτο μικροδίκτυο, δηλαδή ένα μικροδίκτυο ικανό να λειτουργήσει τόσο συνδεδεμένο με το δίκτυο, όσο και νησιδοποιημένο, οι VSIs είναι απαραίτητοι προκειμένου να ελέγχουν την εξαγόμενη ή την εισαγόμενη ισχύ στο κυρίως δίκτυο, καθώς επίσης και για να σταθεροποιούν το μικροδίκτυο.

Οι VSIs και οι CSIs μπορούν να συνυπάρχουν σε ένα μικροδίκτυο. Οι VSIs συχνά συνδέονται στις διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας, διορθώνοντας τη συχνότητα και την τάση στο εσωτερικό του μικροδικτύου. Αντίστοιχα οι CSIs συνδέονται σε φωτοβολταϊκά, ή σε μικρές ανεμογεννήτριες που αμφότερα απαιτούν αλγορίθμους maximum power point tracker, αν και στη θέση αυτών είναι δυνατόν να έχουμε VSIs. Συνεπώς, μπορούμε να έχουμε έναν συνδυασμό VSIs και CSIs, ή μόνο VSIs, συνδεδεμένους παράλληλα για τον σχηματισμό ενός μικροδικτύου.

## B. Πρωτογενής έλεγχος.

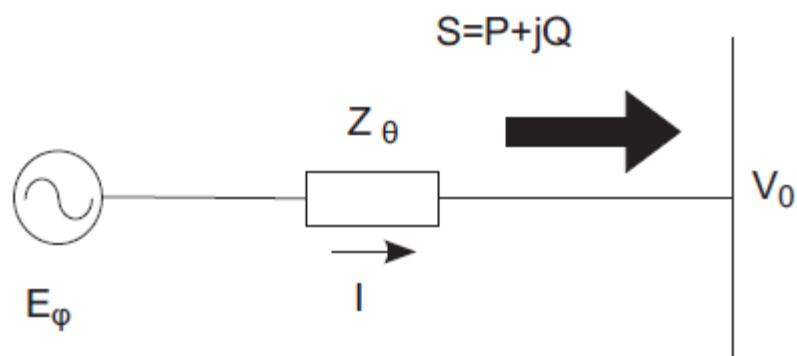
Αυτό το επίπεδο ελέγχου προσαρμόζει τη συχνότητα και το πλάτος της τάσης που παρέχεται ως αναφορά στους εσωτερικούς βρόχους τάσης και ρεύματος. Η βασική ιδέα πίσω από αυτό το επίπεδο ελέγχου είναι η μίμηση της συμπεριφοράς μιας σύγχρονης γεννήτριας, η οποία μειώνει τη συχνότητα όταν αυξάνεται η ενεργός ισχύς. Αυτή η αρχή είναι δυνατόν να ενσωματωθεί στους VSIs χρησιμοποιώντας τον γνωστό P/Q έλεγχο droop, στον οποίο σκόπιμο κρίνεται να αναφερθούμε στο σημείο αυτό [14].

### B.1 Εισαγωγικά για τον έλεγχο droop.

Ορισμένες από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον διαμοιρασμό της ισχύος στα AC δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως σε εφαρμογές που αφορούσαν παραλληλισμένα UPSs. Διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για παραλληλισμένους αντιστροφείς, όπως κεντρικοί ελεγκτές, master-slave, average-load sharing ή circular-chain controls. Ωστόσο, οι λύσεις αυτές προορίζονται για τον παραλληλισμό μετατροπέων που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους και χρησιμοποιούν κανάλια επικοινωνίας μεγάλου εύρους ζώνης. Η εφαρμογή λύσεων αυτού του τύπου είναι δυσχερής στην περίπτωση των μικροδικτύων, αφού οι μετατροπείς σε ένα μικροδίκτυο είναι δυνατόν να απέχουν μεταξύ τους αρκετά χιλιόμετρα. Οι αλγόριθμοι droop διαθέτουν το πλεονέκτημα να ελέγχουν τον διαμοιρασμό της ισχύος στα μικροδίκτυα, χωρίς τη χρήση καναλιών επικοινωνίας. Με τον τρόπο αυτό, παρακάμπτονται τα προβλήματα που σχετίζονται με τη θέση των μετατροπέων και η επίδοση του μικροδικτύου βελτιώνεται. Η βασική ιδέα του ελέγχου droop προέρχεται από την ικανότητα αυτορύθμισης της σύγχρονης γεννήτριας, η οποία μειώνει την ενεργό ισχύ όταν η συχνότητα αυξάνει, και μειώνει την άεργο ισχύ όταν αυξάνει η τάση [15].

### B2. Η μεθοδολογία του πρωτότυπου ελέγχου droop.

Οι μέθοδοι Droop βασίζονται στην συμπεριφορά της σύγχρονης γεννήτριας. Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας που συνδέεται με το δίκτυο παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας που συνδέεται με το δίκτυο [16].

Στο σχήμα αυτό αναγράφεται μία εμπέδηση μεταξύ της σύγχρονης γεννήτριας και του δικτύου. Η εμπέδηση αυτή είναι το άθροισμα της εσωτερικής αντίστασης της γεννήτριας και της αντίστασης της γραμμής που συνδέει τη γεννήτρια με το δίκτυο. Η εμπέδηση θεωρείται επαγωγική διότι αφενός η εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας έχει κυρίως επαγωγική συμπεριφορά, αφετέρου, δεδομένου ότι οι σύγχρονες γεννήτριες συνδέονται συνήθως σε γραμμές υψηλής τάσης, η αντίσταση της γραμμής είναι κυρίως επαγωγική. Αν  $P$  είναι η ενεργός και  $Q$  η άεργος ισχύς της γεννήτριας, τότε ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$P = \frac{EV}{X} \sin\varphi \quad (4.2.1.1)$$

$$Q = \frac{EV\cos\varphi - V^2}{X} \quad (4.2.1.2)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η γωνία  $\delta$  είναι συνήθως μικρή και εφαρμόζοντας την προσέγγιση μικρών γωνιών στις παραπάνω σχέσεις (σύμφωνα με την οποία είναι  $\sin\varphi \approx \varphi$  και  $\cos\varphi \approx 1$ ), παίρνουμε τις παρακάτω σχέσεις:

$$P = \frac{EV}{X} \varphi \quad (4.2.1.3)$$

$$Q = \frac{EV - V^2}{X} \quad (4.2.1.4)$$

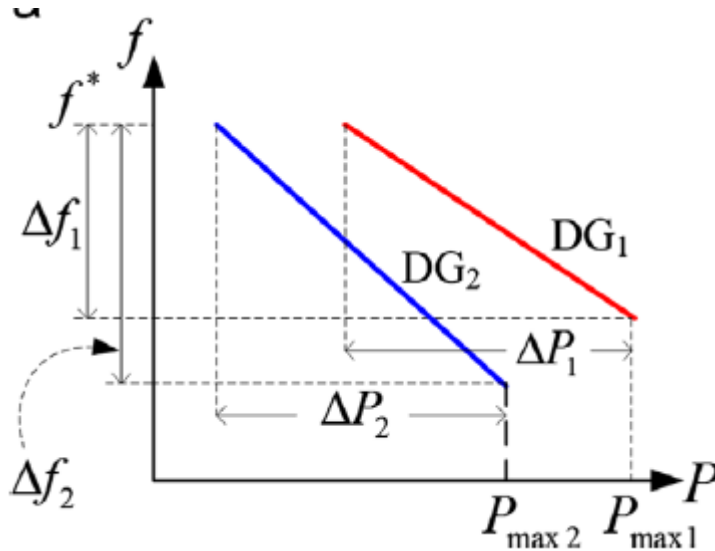
Από τις οποίες μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το  $P$  εξαρτάται κυρίως από το  $\varphi$ , ενώ το  $Q$  από τα  $E-V$  αντίστοιχα. Η συμπεριφορά αυτή ευνοεί την εν παραλλήλω σύνδεση των σύγχρονων γεννητριών προκειμένου για τον σχηματισμό ενός δικτύου.

Ερχόμενοι τώρα στην περίπτωση των μικροδικτύων, στην περίπτωση που έχουμε μικροδίκτυο συνδεδεμένο με ένα κυρίως δίκτυο, ο διαμοιρασμός της ισχύος μεταξύ των μονάδων ΔΠ είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω της μεθόδου droop ισχύος-συχνότητας P-f. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τη συχνότητα του δικτύου ως ένα κοινό σήμα για όλες τις μονάδες ΔΠ, προκειμένου να ρυθμίσει δυναμικά την παραγωγή ενεργού ισχύος του συστήματος. Η σχέση μεταξύ της συχνότητας και της ενεργού ισχύος είναι η παρακάτω:

$$f^* = f_0 - m_i(P_i - P_{0i}) \quad (4.2.1.5)$$

Όπου  $i$  είναι ο δείκτης που αντιστοιχεί σε κάθε μετατροπέα,  $f_0$  η ονομαστική συχνότητα,  $P_i$  η μετρούμενη ενεργός ισχύς, ενώ  $P_{0i}$  είναι η ονομαστική ενεργός ισχύς. Ο  $m_i$  είναι ο συντελεστής droop [16].

Η σχέση αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα για δύο μονάδες ΔΠ:



Εικόνα 4.2 Έλεγχος droop P-f [4].

Σε κάθε μονάδα ΔΠ είναι δυνατόν να αντιστοιχηθεί διαφορετική τιμή του συντελεστή droop. Οι διαφορετικοί συντελεστές droop επιτρέπουν τον διαμερισμό της συνολικής απαίτησης για ισχύ του φορτίου ανάλογα με κάποιο κριτήριο. Για παράδειγμα, η συνολική ισχύς που απαιτείται από το μικροδίκτυο είναι δυνατόν να διαμοιραστεί ανάλογα με το εύρος ενεργού ισχύος κάθε μονάδας ΔΠ, όπως καταδεικνύεται από την παρακάτω σχέση:

$$m_1 P_{range1} = m_2 P_{range2} = \dots m_n P_{rangen} \quad (4.2.1.6)$$

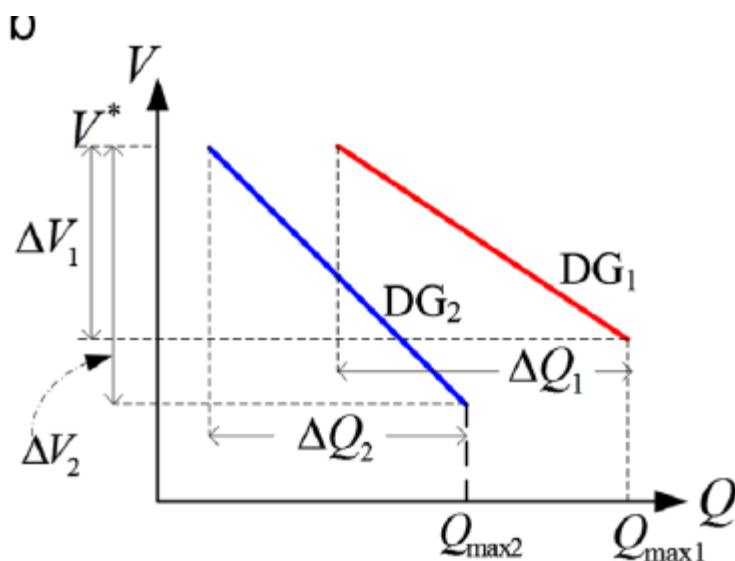
Όπου  $P_{range1,2,\dots,n}$  είναι το εύρος της ενεργού ισχύος στο οποίο λειτουργούν οι μονάδες ΔΠ, ενώ  $m_i$  είναι οι συντελεστές droop.

Οι ρυθμίσεις της τάσης και της συχνότητας είναι απαραίτητες για την αξιοπιστία και την ευστάθεια του συστήματος σε τοπικό επίπεδο. Χωρίς έλεγχο της τάσης σε τοπικό επίπεδο, είναι δυνατόν να εμφανιστούν προβλήματα υπερτάσεων ή ταλαντώσεων της αέργου ισχύος σε συστήματα με μεγάλη διεύθυνση διεσπαρμένης παραγωγής. Μικρά σφάλματα στα προκαθορισμένα επίπεδα της τάσης μπορούν να προκαλέσουν κυκλοφορούντα ρεύματα, τα οποία ενδεχομένως να υπερβαίνουν τις προδιαγραφές των μονάδων ΔΠ. Για τους λόγους αυτούς είναι απαραίτητος ένας ελεγκτής τάσης-αέργου ισχύος, έτσι ώστε καθώς η άεργος ισχύς που παράγεται από τις μονάδες ΔΠ γίνεται περισσότερο επαγωγική ή χωρητική, η αναφορά της τάσης ακολουθεί την χαρακτηριστική Q-V, η οποία περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$V^* = V_0 - n_i(Q_i - Q_{0i}) \quad (4.2.1.7)$$

Όπου  $i$  είναι ο δείκτης που αντιστοιχεί σε κάθε μετατροπέα,  $V_0$  είναι η ονομαστική τάση,  $Q_i$  είναι η μετρούμενη άεργος ισχύς, ενώ  $Q_{0i}$  είναι η ονομαστική άεργος ισχύς.

$n_i$ . Ο  $n_i$  είναι ο συντελεστής droop. Η σχέση αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα για δύο μονάδες ΔΠ:



Εικόνα 2.3 Έλεγχος droop Q-V [4].

Όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί αυτόνομα, οδηγούμαστε στην αναδιάρθρωση των στρατηγικών ελέγχου λόγω 1) των προβλημάτων που δημιουργούνται από μικρά λάθη στη διαμόρφωση της συχνότητας σε κάθε αντιστροφέα σύζευξης και την ανάγκη να μεταβληθούν τα σημεία λειτουργίας, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση του φορτίου. Ο P-f droop έλεγχος (ενεργού ισχύος-συχνότητας) είναι σε θέση να λύσει τέτοιου είδους προβλήματα, χωρίς την παρουσία ενός δικτύου επικοινωνίας. Προκειμένου να διατηρηθούν η τάση και η συχνότητα εντός του προκαθορισμένου εύρους, οι συντελεστές droop τόσο της τάσης, όσο και της συχνότητας, προσαρμόζονται ώστε να είναι λιγότερο βαθμιαίοι (δηλαδή περισσότερο απότομοι). Ωστόσο, η αναπροσαρμογή αυτή υποβαθμίζει τον διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των μονάδων ΔΠ. Εναλλακτικά, οι χαρακτηριστικές droop που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω, μέσω της προσθήκης ενεργητικών χαρακτηριστικών, όπως βελτιωμένη δυναμική, επιπρόσθετη απόσβεση και ελαχιστοποίηση της επίδρασης της εμπέδησης της γραμμής.

Τα πλεονεκτήματα του ελέγχου droop είναι η αποφυγή της χρησιμοποίησης επικοινωνίας μεταξύ των μετατροπέων, η μεγάλη ευελιξία, η υψηλή αξιοπιστία και η δυνατότητα διασύνδεσης μετατροπέων οι οποίοι έχουν διαφορετικές διαβαθμίσεις ισχύος.

Επιπλέον, τα κυριότερα μειονεκτήματα του ελέγχου droop και οι αντίστοιχες προσεγγίσεις για την αποφυγή τους δίνονται παρακάτω:

- Συμβιβασμός μεταξύ του διαμοιρασμού του φορτίου και της ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας: Ένα μειονέκτημα της μεθόδου droop είναι ο εγγενής συμβιβασμός μεταξύ της ρύθμισης της τάσης και του διαμοιρασμού του φορτίου. Οι βασικές λύσεις που προτείνονται μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: έλεγχοι αποκατάστασης, δυναμικές κλίσεις και υψηλού κέρδους έλεγχος γωνίας, αντί για έλεγχο συχνότητας.



- Διαμοιρασμός των αρμονικών του φορτίου: Ο πρωτότυπος έλεγχος droop εγγυάται καλό διαμοιρασμό της ενεργού και αέργου ισχύος, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη τον διαμοιρασμό των αρμονικών του φορτίου στην περίπτωση που έχουμε μη γραμμικά φορτία. Οι κυριότερες προτάσεις που απαντώνται στην βιβλιογραφία για την επίλυση αυτού του ζητήματος είναι: προσθήκη ενός βρόχου, ο οποίος μειώνει το κέρδος και το εύρος ζώνης της τάσης αναφοράς παρουσία παραμορφωμένων συνιστωσών στον έλεγχο droop, εισαγωγή ενός σήματος AC, εικονική αντίσταση, συντελεστές droop οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τους τις αρμονικές και στρατηγική συνεργατικού φιλτραρίσματος των αρμονικών.
- Αυτεπαγωγές σύζευξης: Αυτές οι συνιστώσες αυξάνουν το μέγεθος και το βάρος του συστήματος. Αυτές οι φυσικές αυτεπαγωγές είναι δυνατόν να αντικατασταθούν από μία εικονική αντίσταση ή από παραλλαγές της τελευταίας.
- Εμπέδηση γραμμής: Η τιμή της αντίστασης της γραμμής μεταξύ των παραλληλισμένων μετατροπέων επηρεάζει επίσης την επίδοση της πρωτότυπης droop μεθόδου. Διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση αυτού του μειονεκτήματος: επιπρόσθετος βρόχος για την εκτίμηση των παραμέτρων του δικτύου, συντελεστής droop για την τάση ο οποίος να σχετίζεται με την ενεργό και άεργο ισχύ εξόδου, αποσύζευξη μεταξύ των P και Q, προσθήκη του αέργου ρεύματος στον βρόχο του ελέγχου droop, καθώς επίσης και εκτίμηση της πτώσης τάσης πάνω στην αντίσταση της γραμμής.
- Δυναμική απόκριση: Η πρωτότυπη μέθοδος droop παρουσιάζει μία αργή, ταλαντωτική δυναμική συμπεριφορά, η οποία είναι δυνατόν να ξεπεραστεί μέσω διαφόρων λύσεων: υλοποίηση του droop για τη γωνία αντί για την συχνότητα, προσαρμοστικός αποκεντρωμένος έλεγχος, droop το οποίο να βασίζεται στις παραμέτρους του φίλτρου σύζευξης, καθώς επίσης και προσθήκη όρων παραγώγου.
- Ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: Τέλος, το τελευταίο μειονέκτημα της πρωτότυπης μεθόδου droop είναι η κακή επίδοσή της με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Προκειμένου να μετριαστεί το μειονέκτημα αυτό είναι δυνατή η χρήση μη γραμμικού ελέγχου droop, καθώς και η χρήση της πρωτότυπης μεθόδου droop, σε συνδυασμό με έναν maximum power point tracker (MPPT) [4].

Στην συμβατική droop μέθοδο, η οποία χρησιμοποιείται από μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται η υπόθεση ότι η αντίσταση εξόδου της γεννήτριας, καθώς και αντίσταση της γραμμής είναι κυρίως επαγωγικές. Ωστόσο, όταν γίνεται χρήση ηλεκτρονικών ισχύος, η αντίσταση εξόδου θα εξαρτάται από τη στρατηγική έλεγχου που χρησιμοποιείται από τους εσωτερικούς βρόχους ελέγχου. Επιπλέον, η αντίσταση της γραμμής στις εφαρμογές χαμηλής τάσης είναι σχεδόν αμιγώς ωμική. Επομένως, η εξισώσεις droop που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορούν να τροποποιηθούν βάσει του μετασχηματισμού Park ο οποίος προσδιορίζεται από την γωνία  $\theta$  της αντίστασης:

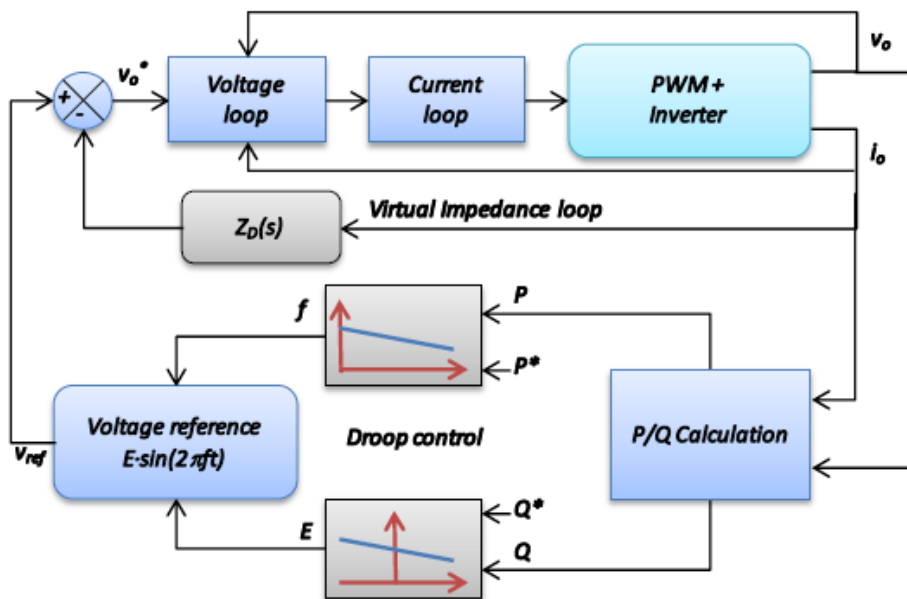
$$f = f^* - G_p(s)[(P - P^*)\sin\theta - (Q - Q^*)\cos\theta] \quad (4.2.3.5)$$

$$E = E^* - G_Q(s)[(P - P^*)\cos\theta + (Q - Q^*)\sin\theta] \quad (4.2.3.6)$$

Ο πρωτογενής έλεγχος μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τον βρόχο εικονικής αντίστασης εξόδου, στον οποίο η τάση εξόδου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$v_o^* = v_{ref} - Z_D(s) \cdot i_o \quad (4.2.3.7)$$

Όπου  $v_{ref}$  είναι η αναφορά της τάσης που παράγεται από τις εξισώσεις (4.2.3.5)-(4.2.3.6) και είναι  $v_{ref} = E\sin(2\pi f t)$ , και  $Z_D$  είναι η συνάρτηση μεταφοράς της εικονικής αντίστασης εξόδου, η οποία κανονικά εξασφαλίζει επαγωγική συμπεριφορά στην συχνότητα της γραμμής. Η παρακάτω εικόνα δείχνει πως συνεργάζεται ο βρόχος εικονικής αντίστασης με τους άλλους βρόχους ελέγχου: τους εσωτερικούς βρόχους τάσης και ρεύματος και τον έλεγχο droop:



Εικόνα 4.4 Έλεγχος droop με εικονική αντίσταση και εσωτερικούς βρόχους ελέγχου να εφαρμόζονται στον αντιστροφέα [14].

Η εικονική αντίσταση  $Z_D$  σχεδιάζεται συνήθως ώστε να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα της αντίστασης εξόδου του αντιστροφέα και την αντίσταση της γραμμής. Με τον τρόπο αυτό, η συνολική ισοδύναμη αντίσταση εξόδου κυριαρχείται από την  $Z_D$ . Η εικονική αντίσταση εξόδου  $Z_D$  έχει αντίστοιχο ρόλο με την αντίσταση σειράς μιας σύγχρονης γεννήτριας. Ωστόσο, ενώ η αντίσταση σειράς μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι κυρίως επαγωγική, η εικονική αντίσταση μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα. Σε αντίθεση με μια φυσική αντίσταση, η εικονική αντίσταση εξόδου δεν έχει καθόλου απώλειες ισχύος, κατ' αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να υλοποιούμε αντίσταση χωρίς να υποβαθμίζουμε την επίδοση.

Μέσω της χρήσης της εικονικής αντίστασης, η αντίσταση εξόδου του αντιστροφέα γίνεται μία νέα μεταβλητή ελέγχου. Έτσι, μπορούμε να ρυθμίζουμε την γωνία των εξισώσεων (4.2.3.6) - (4.2.3.7) ανάλογα με τον αναμενόμενο λόγο  $R/X$  της αντίστασης της γραμμής,  $\theta = \tan^{-1}(X/R)$ , και τη γωνία της αντίστασης εξόδου στη συχνότητα της γραμμής. Επίσης, η εικονική αντίσταση εξόδου μπορεί να προσδώσει επιπρόσθετα χαρακτηριστικά στον αντιστροφέα, όπως λειτουργία hot-swap και διαμοιρασμό των αρμονικών του ρεύματος. Αυτοί οι βρόχοι ελέγχου επιτρέπουν την

παράλληλη λειτουργία των αντιστροφών, από την άλλη μεριά, ωστόσο, πραγματοποιούν έναν συμβιβασμό μεταξύ του διαμοιρασμού των P και Q και της ρύθμισης του πλάτους και της συχνότητας της τάσης.

Γ. Δευτερογενής έλεγχος.

Προκειμένου να αντισταθμιστούν οι αποκλίσεις στη συχνότητα και το πλάτος της τάσης, είναι δυνατή η χρήση ενός δευτερογενούς ελέγχου. Ο δευτερογενής έλεγχος εξασφαλίζει ότι οι αποκλίσεις στην συχνότητα και την τάση επαναφέρονται προς το μηδέν μετά από κάθε αλλαγή στην παραγωγή ή το φορτίο στο μικροδίκτυο. Ο δευτερογενής έλεγχος λειτουργεί ως εξής: Αφού προσδιοριστούν τα επίπεδα της συχνότητας και του πλάτους της τάσης  $f_{MG}$  και  $E_{MG}$  στο μικροδίκτυο, αυτά συγκρίνονται με τις αναφορές  $f^*_{MG}$  και  $E^*_{MG}$  και τα σφάλματα  $\delta f$  και  $\delta E$  αφού περάσουν από αντισταθμιστές, στέλνονται σε όλες τις μονάδες προκειμένου να αποκαταστήσουν το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης εξόδου.

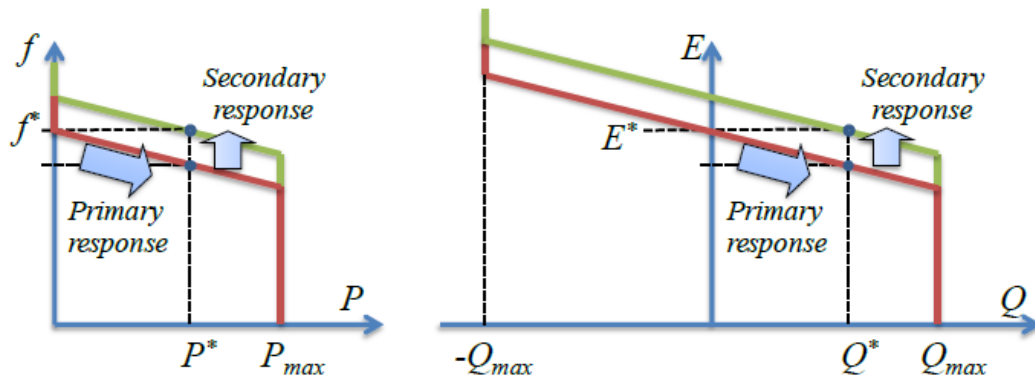
Ο δευτερογενής έλεγχος χρησιμοποιείται στα συστήματα ηλεκτρικής ενεέργειας για να περιορίσει την απόκλιση της συχνότητας σε αυτά μέχρι ενός επιτρεπτού ορίου, παραδείγματος χάρη  $\pm 0.1\text{Hz}$ . Αποτελείται από έναν ελεγκτή τύπου PI, ο οποίος ονομάζεται έλεγχος φορτίου-συχνότητας στην Ευρώπη και αυτόματος ελεγκτής κέρδους στην Αμερική. Στην περίπτωση ενός AC μικροδικτύου, οι ελεγκτές που αποκαθιστούν τη συχνότητα και το πλάτος,  $G_f$  και  $G_E$ , δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\delta f = k_{pf}(f^*_{MG} - f_{MG}) + k_{if} \int (f^*_{MG} - f_{MG}) dt + \Delta f_s \quad (4.2.3.8)$$

$$\delta E = k_{pE}(E^*_{MG} - E_{MG}) + k_{iE} \int (E^*_{MG} - E_{MG}) dt \quad (4.2.3.9)$$

Όπου  $k_{pf}$ ,  $k_{if}$ ,  $k_{pE}$ ,  $k_{iE}$  είναι οι παράμετροι ελέγχου του αντισταθμιστή του δευτερογενούς ελέγχου, και  $\Delta f_s$  είναι ένας όρος συγχρονισμού, ο οποίος παραμένει ίσος με το μηδέν όταν το μικροδίκτυο δεν συνδέεται στο δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση, τα  $\delta f$  και  $\delta E$  θα πρέπει να περιοριστούν, έτσι ώστε να μην υπερβούν τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές για τις αποκλίσεις της τάσης και της συχνότητας.

Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει την επενέργεια του πρωτογενούς και του δευτερογενούς ελέγχου στις P-f και Q-E χαρακτηριστικές. Με τον τρόπο αυτό, η διαδικασία της αποκατάστασης της συχνότητας και του πλάτους πραγματοποιείται από τον δευτερογενή έλεγχο όταν απαιτείται η αύξηση των P και Q. Χωρίς αυτή την παρέμβαση (του δευτερογενούς ελέγχου), τόσο το πλάτος, όσο και η συχνότητα της τάσης στο μικροδίκτυο θα εξαρτώνταν από το φορτίο.



Εικόνα 4.5 Οι ενέργειες του πρωτογενούς και του δευτερογενούς ελέγχου στις καμπύλες P-f και Q-E [14].

#### Δ. Τριτογενής έλεγχος.

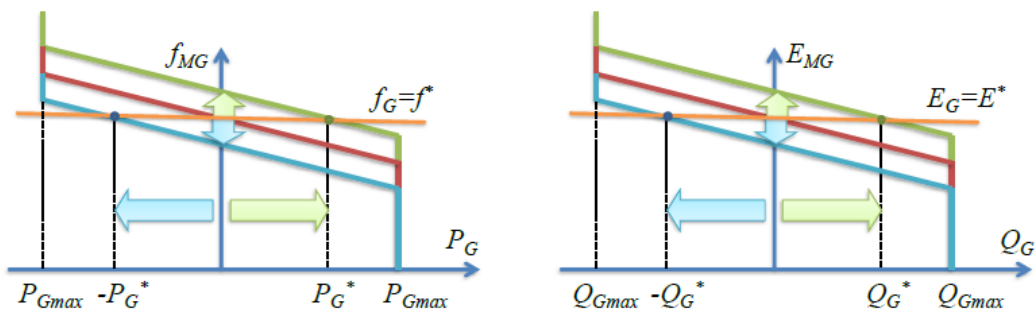
Όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί σε σύνδεση με το δίκτυο, η ροή της ισχύος είναι δυνατόν να ελεγχθεί ρυθμίζοντας το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης εντός του μικροδικτύου. Αφού μετρήσουμε τα P και Q στο ΣΚΣ, τα οποία ας ονομάσουμε  $P_G$  και  $Q_G$ , μπορούμε να τα συγκρίνουμε με τα επιθυμητά  $P_G^*$  και  $Q_G^*$  και να τα ελέγξουμε, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$f_{MG}^* = k_{pP}(P_G^* - P_G) + k_{iP} \int (P_G^* - P_G) dt \quad (4.2.3.10)$$

$$E_{MG}^* = k_{pQ}(Q_G^* - Q_G) + k_{iQ} \int (Q_G^* - Q_G) dt \quad (4.2.3.11)$$

Όπου τα  $k_{pP}$ ,  $k_{iP}$ ,  $k_{pQ}$  και  $k_{iQ}$  είναι οι παράμετροι του τριτογενούς ελεγκτή/αντισταθμιστή. Τα  $f_{MG}^*$  και  $E_{MG}^*$  περνάνε από ένα κύκλωμα ψαλιδισμού, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν θα είναι εκτός ορίων. Όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί απομονωμένο, οι μεταβλητές αυτές δημιουργούνται από το ίδιο το μικροδίκτυο (οπότε είναι  $f_{MG}^* = f_i^*$  και  $E_{MG}^* = E_{MG}^*$ ). Όταν το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο, στα  $f_{MG}^*$  και  $E_{MG}^*$  μπορούν να δοθούν οι τιμές που έχουν αυτές οι ποσότητες και στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό, οι αναφορές για την τάση και την συχνότητα του μικροδικτύου θα είναι οι τιμές που θα έχουν η τάση και η συχνότητα του δικτύου. Μετά τον συγχρονισμό, αυτά τα σήματα μπορούν να δοθούν από τον τριτογενή έλεγχο.

Ανάλογα με το πρόσημο των  $P_G^*$  και  $Q_G^*$ , η ενεργός και η άεργος ισχύς είναι δυνατόν να εισαχθούν και να εξαχθούν, ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Το ακόλουθο σχήμα δείχνει τη δράση του τριτογενούς ελέγχου, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αναταλλαγή των P και Q στο ΣΚΣ:



Εικόνα 4.6 Η επενέργεια του τριτογενούς ελέγχου στις καμπύλες f-P και E-Q [14].

Από το σχήμα αυτό είναι εύκολο να παρατηρηθεί η δικατευθυντικότητα της ροής ισχύος. Η τάση του δικτύου έχει σταθερό πλάτος και συχνότητα, οπότε τα μεγέθη αυτά μπορούν να παρασταθούν με οριζόντιες γραμμές στο παραπάνω σχήμα. Ως εκ τούτου, το ποσό των P και Q που ανταλλάσσεται μεταξύ του μικροδικτύου και του δικτύου (δηλαδή τα  $P_G$  και  $Q_G$ ) καθορίζεται από την τομή των χαρακτηριστικών droop με τις οριζόντιες γραμμές του δικτύου. Συνεπώς, το  $P_G$  μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας την αναφορά της συχνότητας του μικροδικτύου ως εξής: Αν είναι  $f_{MG}^* > f_G$ , τότε είναι  $P_G > 0$  και το μικροδίκτυο εγχύει ενεργό ισχύ στο δίκτυο, ενώ αν είναι  $f_{MG}^* < f_G$ , τότε είναι  $P_G < 0$  και το μικροδίκτυο απορροφά ενεργό ισχύ από το δίκτυο. Η συχνότητα του μικροδικτύου θα καθοριστεί από το δίκτυο, οπότε αυτή η ενέργεια θα οδηγήσει στη μεταβολή της γωνίας ισχύος. Αντίστοιχα ισχύουν και για την άεργο ισχύ  $Q_G$ .

Επιλέον, αν στις (8) και (9) μηδενίσουμε τα κέρδη  $k_{iP}$  και  $k_{iQ}$ , τότε ο τριτογενής έλεγχος θα δρα ως ένας πρωτογενής έλεγχος για το σύνολο του μικροδικτύου, επιτρέποντας ως εκ τούτου την διασύνδεση μεταξύ διαφόρων μικροδικτύων, τα οποία κατ' αυτόν τον τρόπο θα συνθέτουν ένα σύμπλεγμα μικροδικτύων. Επομένως, αυτός ο βρόχος ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την ποιότητα ισχύος στο ΣΚΣ. Προκειμένου να επιτύχει ride-through μέσα από βυθίσεις τάσης, το μικροδίκτυο εισάγει άεργο ισχύ στο δίκτυο, και με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνει ευστάθεια της τάσης στο εσωτερικό του. Συγκεκριμένα, αν θέσουμε  $k_{iQ}=0$ , το μικροδίκτυο θα εγχύει αυτομάτως Q όταν υπάρχει βύθιση τάσης ή θα απορροφά Q, σε περίπτωση υπέρτασης στο δίκτυο. Αυτό μπορεί να προσδώσει στο μικροδίκτυο ικανότητες ride-through.

Η ανίχνευση νησιδοποίησης είναι επίσης απαραίτητη προκειμένου να αποσυνδέεται το μικροδίκτυο από το δίκτυο και για να απενεργοποιούνται τόσο οι αναφορές που προέρχονται από το επίπεδο του τριτογενούς ελέγχου, όσο και οι ολοκληρωτικοί όροι των ελεγκτών PI της άεργου ισχύος, προς αποφυγήν των ασταθειών στην τάση. Όταν συμβαίνει μη προγραμματισμένη νησιδοποίηση, ο τριτογενής έλεγχος προσπαθεί να απορροφήσει P από το δίκτυο και, με το δίκτυο να μην είναι διαθέσιμο, η συχνότητα θα αρχίσει να μειώνεται. Όταν βγαίνει εκτός των αναμενόμενων τιμών, το μικροδίκτυο αποσυνδέεται από το κυρίως δίκτυο για λόγους ασφαλείας και ο τριτογενής έλεγχος απενεργοποιείται.

### Μελλοντικές τάσεις στον ιεραρχικό έλεγχο μικροδικτύων.

Οι μελλοντικές τάσεις στα μικροδίκτυα σχετίζονται ασφαλώς με τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας, τα οποία θα ανταλλάσσουν αναφορές με τον τριτογενή έλεγχο,

προκειμένου να βελτιστοποιήσουν την επίδοση των μικροδικτύων. Επίσης σημαντικό θέμα θα είναι τα συμπλέγματα μικροδικτύων που θα προκύψουν από τη διασύνδεση ευφυών μικροδικτύων και αναμένεται να αναπτυχθούν στο άμεσο μέλλον. Κάθε μικροδίκτυο θα είναι ικανό για συγκεκριμένες ενεργειακές υπηρεσίες, όπως παραγωγή ή ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος, ικανότητα αποθήκευσης και ούτω καθεξής, ενώ θα μπορεί να παρέχει και να χρησιμοποιεί υπηρεσίες από άλλα μικροδίκτυα. Έτσι, συστήματα πρακτόρων θα μπορούν να διαπραγματεύονται την συναλλαγή ενέργειας μεταξύ μικροδικτύων ή μεταξύ συμπλεγμάτων μικροδικτύων. Λόγω του ότι ο ιεραρχικός έλεγχος και τα συστήματα πρακτόρων είναι διαμορφωμένες τάσεις στον τομέα των μικροδικτύων, τεχνολογίες όπως εκείνες των συστημάτων επικοινωνιών καθίστανται σημαντικές, προκειμένου να γίνουν εφικτές αυτές οι εφαρμογές [14].

#### 4.2.2 Τροποποιημένες τεχνικές droop.

Παρακάτω θα εξετάσουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια ορισμένες από τις τροποποιημένες τεχνικές droop. Σκοπός αυτών των τεχνικών είναι η αντιμετώπιση κάποιων, ορισμένων κάθε φορά, από τα μειονεκτήματα της κλασσικής droop μεθόδου, στα οποία έγινε αναφορά προηγουμένως.

##### 4.2.2.1 Αποσυζευγμένες τεχνικές droop.

Όταν η κλασσική μέθοδος ελέγχου droop εφαρμόζεται σε αντιστροφείς που ελέγχονται ως AC πηγές τάσης, όπως συμβαίνει συχνά στα μικροδίκτυα χαμηλής τάσης, οι διακυμάνσεις της συχνότητας επηρεάζουν τόσο την ενεργό, όσο και την άεργο τάση. Αυτή η σύζευξη μεταξύ της συχνότητας και της αέργου ισχύος μπορεί να είναι ανεκτή όταν ο έλεγχος droop εφαρμόζεται για τον διαμοιρασμό του φορτίου σε ένα σύμπλεγμα παράλληλα συνδεδεμένων αντιστροφέων, δεν απαιτείται ευέλικτη διοχέτευση ισχύος και οι εμπεδήσεις σύζευξης είναι σωστά ισοσταθμισμένες. Σε άλλη περίπτωση, είναι επιθυμητή η αποσύζευξη των σχέσεων της συχνότητας με την ενεργό ισχύ και της τάσης με την άεργο ισχύ. Εκτος των άλλων, ένας αποσυζευγμένος droop έλεγχος έχει το πλεονέκτημα ότι ο ίδιος έλεγχος (δηλαδή οι ίδιοι συντελεστές droop) μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στην περίπτωση ενός διασυνδεδεμένου, όσο και ενός απομονωμένου μικροδικτύου.

Θεωρούμε ένα μικροδίκτυο, το οποίο αποτελείται από παράλληλα συνδεδεμένους τριφασικούς VSIs (Voltage Source Inverters, αντιστροφείς πηγής τάσης), οι οποίοι ελέγχονται ως πηγές τάσης AC. Ο εσωτερικός ελεγκτής του αντιστροφέα λαμβάνει την αναφορά του με τη μορφή ενός φασιθέτη  $\vec{E} = E e^{j\delta} = E_d + jE_q$ . Ο φασιθέτης αυτός παρέχεται από έναν ελεγκτή droop, ο οποίος κατασκευάζει τον φασιθέτη αυτό χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ενεργού και της αέργου ισχύος. Ο ελεγκτής droop έχει δύο αναφορές, μία για την τάση ( $e_{ref}$ ) και μία για τη συχνότητα ( $f_{ref}$ ). Το αντικείμενο του ελέγχου droop είναι να πετύχει, στην μόνιμη κατάσταση, μία πτώση στην συχνότητα ανάλογη της ενεργού ισχύος και μία πτώση στην τάση ανάλογη της αέργου ισχύος, όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$f = f_{ref} - k_p * p, \quad E = e_{ref} - k_q * q \quad (4.2.2.1)$$

Όπου  $k_p$ ,  $k_q$  οι συντελεστές droop και  $f_{ref}$ ,  $e_{ref}$  τα σημεία αναφοράς για τη συχνότητα και την τάση, αντίστοιχα. Για τους αντιστροφείς που λειτουργούν στην λειτουργία PQ, μεταβολές στις αναφορές  $f_{ref}$  και  $e_{ref}$  προκαλούν μεταβολές στην ενεργό ή την

άεργο ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$p = \frac{f_{ref} - f_g}{k_p} \quad \text{και} \quad q = \frac{e_{ref} - V_g}{k_q} \quad (4.2.2.2)$$

Όπου  $f_g$  είναι η συχνότητα και  $V_g$  η τάση του δικτύου στο σημείο ζεύξης. Για αντιστροφείς που ελέγχονται με droop και λειτουργούν παράλληλα στην fV λειτουργία στο απομονωμένο δίκτυο, η συχνότητα του μικροδικτύου και ο διαμοιρασμός της ενεργού ισχύος μεταξύ των αντιστροφέων εξαρτάται από τα σημεία αναφοράς της συχνότητας και την παρεχόμενη ενεργό ισχύ:

$$f_i = f_{0i} - k_p p_i, i = 1 \dots n \quad (4.2.2.3)$$

$$f = f_1 = f_2 = \dots = f_n \quad (4.2.2.4)$$

$$\sum_{i=1}^N p_i = p \quad (4.2.2.5)$$

Από τις οποίες προκύπτει ότι:

$$p_i = \frac{\sum_{k=1, k \neq i}^n (f_{0i} - f_{0k})}{n * k_p} + \frac{p}{n} \quad (4.2.2.6)$$

$$f = \frac{\sum_1^n f_{0i}}{n} - \frac{k_p * p}{n} \quad (4.2.2.7)$$

Όπου  $f_{0i}$  είναι η αναφορά της συχνότητας του αντιστροφέα  $i$ ,  $p_i$  η αντίστοιχη παραγωγή ενεργού ισχύος και  $p$  η συνολική ενεργός ισχύς που καταναλώνεται από τα φορτία. Ανάλογες εξισώσεις προκύπτουν για τη μέση τάση του μικροδικτύου, με τη διαφορά ότι οι τάσεις στα σημεία σύνδεσης των αντιστροφέων είναι δυνατόν να διαφέρουν μεταξύ τους, λόγω των πτώσεων τάσης πάνω στις γραμμές.

Από τις παραπάνω εξισώσεις συμπεραίνεται ότι η μεταβολή της ενεργού ισχύος επενεργεί στην αναφορά της συχνότητας και στις δύο λειτουργικές καταστάσεις του μικροδικτύου. Ανάλογα είναι τα συμπεράσματα σε σχέση με την άεργο ισχύ και την αναφορά της τάσης.

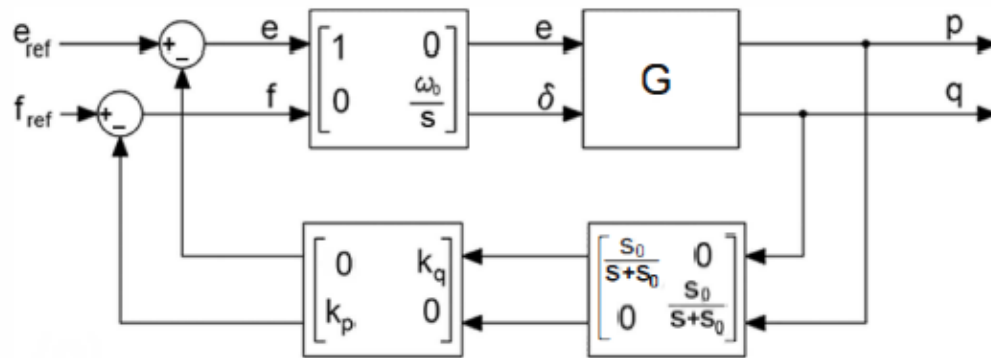
Η παραπάνω ανάλυση αφορούσε τη στατική συμπεριφορά του συστήματος. Η δυναμική της απόκρισης των droop ελεγχόμενων αντιστροφέων σε αλλαγές στις αναφορές  $f_{ref}$  και  $e_{ref}$  ή σε αλλαγές στην τάση και τη συχνότητα του μικροδικτύου πρέπει επίσης να ελεγχθεί, καθώς είναι πιθανό να προκύπτουν απaráδεκτα μεταβατικά φαινόμενα στη συχνότητα ή την τάση, ενώ θα πρέπει να είναι εγγυημένη η ευστάθεια του συστήματος. Αυτό που μας ενδιαφέρει εδώ είναι η αλληλεπίδραση της πηγής (δηλαδή του αντιστροφέα) με το μικροδίκτυο μέσω της αντίστασης σύζευξης, για το λόγο αυτό, εφαρμόζοντας την τεχνική dynamic phasor και θεωρώντας ότι ο αντιστροφέας αλληλεπιδρά με ένα ισχυρό δίκτυο, λαμβάνουμε το παρακάτω μοντέλο, το οποίο συσχετίζει μεταβολές στην ενεργό ισχύ  $p$  και την άεργο ισχύ  $q$  με αλλαγές στον φασιθέτη αναφοράς  $\vec{E} = E e^{j\delta} = E_d + jE_q$  γύρω από ένα σημείο  $E_0$ , καθώς επίσης και με αλλαγές της τάσης του μικροδικτύου  $v_d + jv_q$  γύρω από ένα σημείο  $V$ .

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_o \\ -\omega_o & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Z_b}{L} & 0 \\ 0 & \frac{Z_b}{L} \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{E_o}{V_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dE \\ \delta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \right) \quad (4.2.2.8)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \frac{V_o I_b}{S_b} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4.2.2.9)$$

Στο μοντέλο αυτό  $i_d + ji_q$  είναι το ρεύμα εξόδου. Η τάση του μικροδικτύου θεωρείται ως διαταραχή που ενεργεί με αντίθετο πρόσημο από την τάση αναφοράς, ενώ η ενεργός (p) και η άεργος (q) ισχύς θεωρούνται μικρές ποσότητες γύρω από το 0.

Ο κλασικός έλεγχος droop βασίζεται στην ανατροφοδότηση των μετρήσεων της ενεργού και της άεργου ισχύος μέσω των συντελεστών droop  $k_p$  και  $k_q$  αντίστοιχα. Το διάγραμμα κλειστού βρόχου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.7 Διάγραμμα ελέγχου για την κλασική μέθοδο droop [17].

Στο σχήμα αυτό, G είναι το υπό έλεγχο σύστημα το οποίο μοντελοποιείται, όπως προαναφέραμε, μέσω των εξισώσεων (4.2.2.8) και (4.2.2.9). Στο ίδιο αυτό σχήμα αναφέρεται επίσης ότι οι μετρήσεις της ενεργού και άεργου ισχύος φιλτράρονται από ένα βαθυπερατό φίλτρο.

Η δυναμική απόκριση του συστήματος αυτού κλειστού βρόχου μπορεί να αναλυθεί μέσω της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου  $M(s)$ , η οποία σχετίζει μεταβολές της τάσης και της συχνότητας με μεταβολές της ενεργού και της άεργου ισχύος:

$$\begin{bmatrix} p(s) \\ q(s) \end{bmatrix} = M(s) \begin{bmatrix} f_{ref}(s) \\ e_{ref}(s) \end{bmatrix} \quad (4.2.2.10)$$

Όπου η  $M(s)$  δίνεται από την:

$$M(s) = \frac{b_{10}(s+s_0) \begin{bmatrix} b_{11} \cdot s \cdot (s+s_0) \cdot (s+\frac{R}{L}) & (s \cdot \omega_o + b_{12}) \\ b_{13} \cdot (s^2 + s_0 \cdot s + b_{14}) & -(s+s_0) \cdot (s+\frac{R}{L}) \end{bmatrix}}{s^5 + a_{14} \cdot s^4 + a_{13} \cdot s^3 + a_{12} \cdot s^2 + a_{11} \cdot s + a_{10}} \quad (4.2.2.11)$$



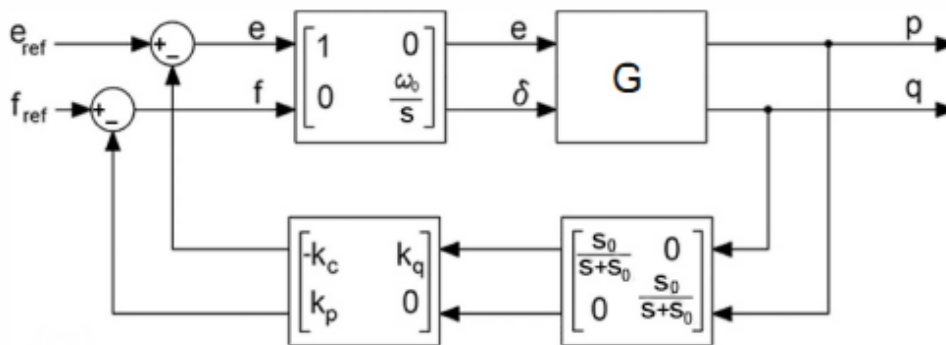
Το στατικό κέρδος της  $M(s)$  δίνεται από την:

$$M_0 = \frac{b_{10}}{a_0} \cdot \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ b_{13} \cdot b_{14} & s_0 \cdot \frac{R}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{k_p} \\ \frac{1}{\frac{V_b \cdot X_L}{V_o \cdot Z_b} + k_q} & \frac{\frac{R}{X_L}}{k_p \cdot \left(1 + \frac{V_o \cdot Z_b}{V_b \cdot X_L} k_q\right)} \end{bmatrix} \quad (4.2.2.12)$$

Οι εξισώσεις (4.2.2.11) και (4.2.2.12) δείχνουν ότι όταν το  $R/X_L$  δεν είναι μηδενικό, οι δυναμικές και στατικές μεταβολές στην άεργο ισχύ σχετίζονται όχι μόνο με μεταβολές στην αναφορά της τάσης, αλλά επίσης με μεταβολές στην συχνότητα. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να καταδειχθεί σχεδιάζοντας την βηματική απόκριση της  $M(s)$  και να επαληθευτεί από προσομοιώσεις του μικροδικτύου με αναλυτικά μοντέλα Simulink/SimpowerSystems των αντιστροφών και του εσωτερικού τους ελέγχου. Είναι συνεπώς προφανές ότι η απευθείας εφαρμογή του κλασικού ελέγχου droop σε αντιστροφείς που συνδέονται μέσω σύνθετης αντίστασης RL με το μικροδίκτυο εμποδίζει την ανεξάρτητη επίδραση της ενεργού ισχύος στη συχνότητα και της άεργου ισχύος στην τάση.

Έλεγχος droop με στατική αποσυζευμένη επενέργεια.

Ένας απλός τρόπος για να διαχωρίσουμε την επενέργεια της ενεργού ισχύος στη συχνότητα και της άεργου στην τάση είναι η προσθήκη ενός διαγωνίου όρου  $k_c$  στον πίνακα ανατροφοδότησης της κλασικής droop μεθόδου ελέγχου. Το σύστημα που προκύπτει παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.8 Έλεγχος droop με όρο αποσύζευξης  $k_c$  στον πίνακα ανάδρασης [17].

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του συστήματος αυτού έχει τη μορφή:

$$M_{kc} = \frac{b_{20} \cdot (s+s_0) \begin{bmatrix} b_{21} \cdot s \cdot (s+s_0) \left(s + \frac{R}{L}\right) & (s \cdot \omega_0 + b_{22}) \\ b_{23} (s^2 + s_0 \cdot s + b_{22}) & -s \cdot (s + b_{24}) \end{bmatrix}}{s^5 + a_{24} \cdot s^4 + a_{23} \cdot s^3 + a_{22} \cdot s^2 + a_{21} \cdot s + a_{20}} \quad (4.2.2.13)$$

Ο πίνακας του στατικού κέρδους είναι:

$$M_{kc0} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{k_p} \\ 1 + \frac{V_o \cdot Z_b}{V_b \cdot X_L} \cdot K_q & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2.2.14)$$

Οπότε έχουμε πετύχει τον επιθυμητό διαχωρισμό της επενέργειας της ενεργού και της αέργου ισχύος πάνω στη συχνότητα και την τάση. Αν  $\Delta f$  και  $\Delta e$  είναι η επιθυμητές ρυ αυξήσεις στις αναφορές της τάσης και της συχνότητας, τότε για μία μεταβολή της ενεργού ή αέργου ισχύος κατά 1 μονάδα στο ανά μονάδα σύστημα, οι τιμές των συντελεστών droop που πρέπει να εφαρμοστούν είναι:

$$k_p = \Delta f, k_q = \Delta e - \frac{X_L V_b}{Z_b V_o} \quad (4.2.2.15)$$

Μία εναλλακτική μέθοδος που οδηγεί στο ίδιο αποτέλεσμα είναι η εφαρμογή μιας περιστροφής γωνίας στον φασιθέτη αναφοράς της τάσης πριν αυτός οδηγηθεί στην είσοδο του αντιστροφέα. Το νέο μοντέλο του συστήματος, χωρίς αυτή τη φορά να συμπεριλάβουμε την διαταραχή, όπως είχαμε κάνει προηγουμένως είναι:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_o \\ -\omega_o & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Z_b}{L} & 0 \\ 0 & \frac{Z_b}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{X_L}{Z} & \frac{R}{Z} \\ -\frac{R}{Z} & \frac{X_L}{Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{E_o}{V_b} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dE \\ \delta \end{bmatrix} \quad (4.2.2.16)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{3 V_o \cdot I_b}{2 s_b} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4.2.2.17)$$

Με την εφαρμογή του κλασικού droop ελέγχου σε αυτό το τροποποιημένο σύστημα πετυχαίνουμε και πάλι διαχωρισμό της επενέργειας της ενεργού και της αέργου ισχύος πάνω στη συχνότητα και την τάση, όπως φαίνεται από τον πίνακα κέρδους του συστήματος κλειστού βρόχου:

$$M_{rot0} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{k_p} \\ \frac{1}{\frac{V_b \cdot Z}{V_o \cdot Z_b} + k_q} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2.2.17)$$

Οι συντελεστές droop για μια μεταβολή κατά μία μονάδα στο ανα μονάδα σύστημα της ενεργού ή της αέργου ισχύος δίνονται τώρα από τις σχέσεις:

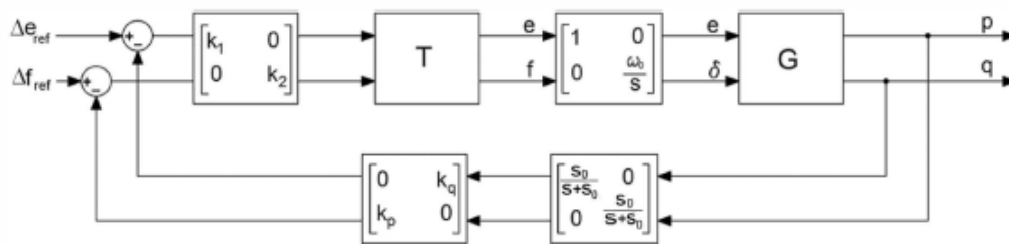
$$k_p = \Delta f, k_q = \Delta e - \frac{Z \cdot V_b}{Z_b V_o} \quad (4.2.2.18)$$

Έλεγχος droop με δυναμικά αποσυζευγμένη επενέργεια.

Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν προηγουμένως δίνουν στατική και όχι δυναμική αποσυζευγμένη επενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι τόσο η ενεργός, όσο και η αέργος ισχύς μπορούν να επηρεαστούν κατά τη μεταβατική κατάσταση από αλλαγές στην

αναφορά της τάσης ή της συχνότητας. Ακόμα, η ευστάθεια και η δυναμική απόκριση του συστήματος κλειστού βρόχου εξαρτώνται από τις παραμέτρους του συστήματος ( $R, X_L, \dots$ ) και από την τιμή των συντελεστών droop που εφαρμόζονται. Η αποσυζευγμένη επένεργεια είναι επιθυμητή όταν μιλάμε για έλεγχο droop, αλλά επίσης επιθυμητό είναι να μπορούμε να ρυθμίσουμε τη δυναμική απόκριση του συστήματος, χωρίς να χρειάζεται να μεταβάλλουμε τους συντελεστές droop, οι οποίοι μπορούν τότε να επιλεγούν πιο αυθαίρετα, λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επιθυμητή απόκριση της συχνότητας και της τάσης για αντίστοιχες μεταβολές της ενεργού και της αέργου ισχύος.

Το block διάγραμμα για την εν λόγω τεχνική ελέγχου droop παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.9 Μπλοκ διάγραμμα του droop ελέγχου με δυναμική αποσυζευγμένη επένεργεια [17].

Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου T που εφαρμόζεται στην περίπτωση αυτή είναι η εξής:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{E_0 \cdot \omega_0^2}{V_b \cdot (s + \frac{R}{L})} & \frac{E_0 \cdot (s + \frac{R}{L})}{V_b \cdot s} \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.2.19)$$

Σε συνδυασμό με το φίλτρο αυτό εφαρμόζεται και ένας διαγώνιος πίνακας κερδών. Ο πίνακας της συνάρτησης μεταφοράς του συνολικού συστήματος έχει τη μορφή:

$$M_{DCDD}(s) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{k_p} \cdot \frac{d \cdot (s + s_0)}{s^2 + s \cdot s_0 + d \cdot s_0} \\ \frac{1}{k_q} \cdot \frac{c_0 \cdot (s + s_0)}{s^3 + c_2 \cdot s^2 + c_1 \cdot s + c_0 \cdot s_0} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2.2.20)$$

Συνεπώς, έχουμε πετύχει δυναμική αποσυζευγμένη επένεργεια και το σύστημα κλειστού βρόχου είναι πράγματι ένα ζεύγος ανεξαρτήτων συστημάτων μονής εισόδου μονής εξόδου. Ο πίνακας του στατικού κέρδους είναι ο:

$$M_{DCDD}(0) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{k_q} \\ \frac{1}{k_p} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2.2.21)$$

Οπότε καταλήγουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα, η στατική απόκριση είναι ακριβώς μία αναλογική απόκριση της ενεργού και της αέργου ισχύος σε απειροστές μεταβολές των αναφορών της συχνότητας και της τάσης. Επιλέον, είναι πλέον εύκολο να ρυθμιστεί η δυναμική απόκριση ρυθμίζοντας τα κέρδη  $k_1$  και  $k_2$ , χωρίς να μεταβάλουμε τους συντελεστές droop [17].

#### 4.2.2.2 Έλεγχος droop βασισμένος στο κόστος.

Συνήθως, το κύριο μέλημα των μεθόδων droop είναι ο αναλογικός διαμοιρασμός της ισχύος μεταξύ των μονάδων ΔΠ, ο οποίος βασίζεται στα ονομαστικά kVA της καθεμιάς από αυτές. Αυτή η επιδίωξη είναι εύστοχη όταν οι ΔΠ είναι του ίδιου τύπου, όπως συνέβαινε στον έλεγχο παραλληλισμένων σύγχρονων γεννητριών, UPSs και διασυνδεδεμένων AC μικροδικτύων. Όμως δεν ισχύει το ίδιο για τα μεμονωμένα μικροδίκτυα, όπου συνήθως συνυπάρχουν διαφορετικές πηγές, οι οποίες διέπονται από διαφορετικές συναρτήσεις κόστους, καθώς επίσης και από διαφορετικές εκπομπές. Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις, άλλοι παράγοντες, όπως τα κόστη, οι επιδόσεις, η τιμολογιακή πολιτική και οι ποινές που σχετίζονται με τις εκπομπές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, όπως συμβαίνει και στις περισσότερες περιπτώσεις κεντρικού ελέγχου, όπου οι εντολές που σχετίζονται με τη διοχέτευση της ισχύος επηρεάζονται από έναν συνδυασμό παραγόντων και όχι αποκλειστικά από την ικανότητα ισχύος των επιμέρους μονάδων. Παρακάτω, θα εξεταστεί μία τροποποίηση της κλασικής droop μεθόδου, η οποία λαμβάνει υπόψη το συνολικό κόστος παραγωγής των μονάδων του μικροδικτύου. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, ο συγκεκριμένος έλεγχος κάνει χρήση μιας μη γραμμικής droop καμπύλης.

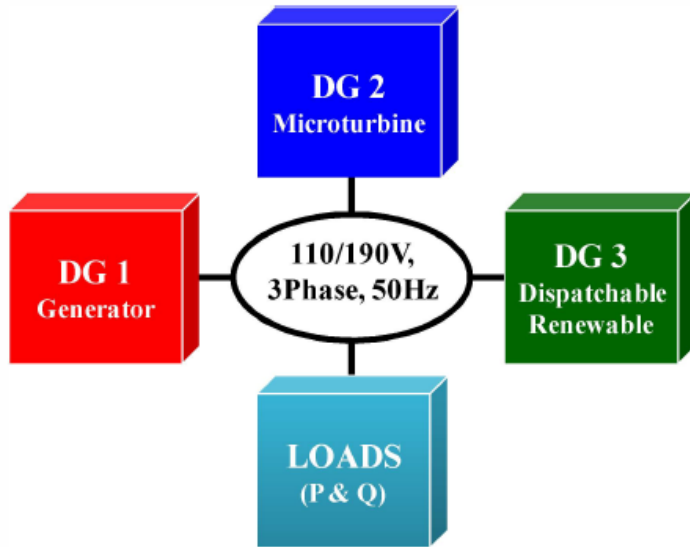
##### A. Καμπύλες του κόστους παραγωγής.

Τα κόστη παραγωγής μιας συμβατικής μονάδας ΔΠ επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι ωστόσο εμπίπτουν σε μία από τις εξής δύο κατηγορίες: λειτουργικό κόστος,  $C_{x,o}(P_x)$ , και κόστος σχετικό με ποινές ή επιβραβεύσεις,  $C_{x,\xi}(P_x)$ , που σχετίζονται με τις εκπομπές των μονάδων. Συνεπώς το συνολικό κόστος δίνεται από τη σχέση:

$$C_x(P_x) = C_{x,o}(P_x) + C_{x,\xi}(P_x) \quad (4.2.2.22)$$

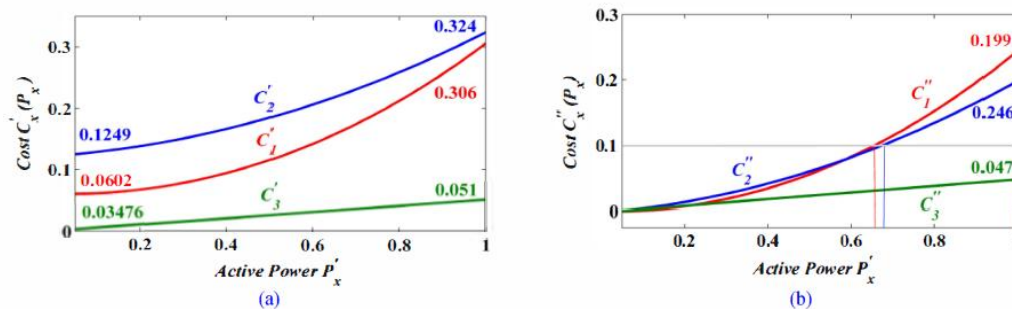
Στην περίπτωση μιας μονάδας ΔΠ ανανεώσιμης ενέργειας, καταλήγουμε σε μια όμοια σχέση, με τη διαφορά ότι εκεί, μετά την άθροιση των  $C_{x,o}(P_x)$  και  $C_{x,\xi}(P_x)$ , διαιρούμε το αποτέλεσμα διά του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα.

Έστω ότι έχουμε το μικροδίκτυο που περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.10 Μικροδίκτυο το οποίο περιλαμβάνει τρεις μονάδες ΔΠ [18].

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το εν λόγω μικροδίκτυο αποτελείται από δύο συμβατικές και μία ανανεώσιμη πηγή. Οι συναρτήσεις κόστους δίνονται στο πρώτο από τα παρακάτω σχήματα:



Εικόνα 4.11 Συναρτήσεις κόστους των ΔΠ του μικροδικτύου [18].

Στο σχήμα αυτό, η συνάρτηση κόστους στον άξονα y έχει κανονικοποιηθεί και σχεδιαστεί έναντι της κανονικοποιημένης ισχύος στο άξονα x. Τα μεγέθη αυτά ορίστηκαν σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$C'_x(P_x) = \frac{C_x(P_x)}{P_{x,max}} = \frac{C_x(P_x)}{P_{x,rated}} \quad (4.2.2.23)$$

$$P'_x = \frac{P_x}{P_{x,max}} = \frac{P_x}{P_{x,rated}} \quad (4.2.2.24)$$

Η κανονικοποίηση αυτή διευκολύνει τη σύγκριση του κόστους παραγωγής μεταξύ των διαφόρων μονάδων ΔΠ, ανεξάρτητα από τα kVA της καθεμιάς από αυτές.

Όπως παρατηρείται από τις καμπύλες που απεικονίζονται στο πρώτο από τα παραπάνω σχήματα, για μηδενική τιμή της κανονικοποιημένης ισχύος, τα κόστη είναι

μη μηδενικά. Αφαιρώντας τα κόστη αυτά, τα οποία είναι ανεξάρτητα από την παραγόμενη ισχύ, καταλήγουμε στις καμπύλες που παρουσιάζονται στο δεύτερο από τα παραπάνω σχήματα. Τα τροποποιημένα αυτά κόστη εκφράζονται από την σχέση:

$$C''_x(P_x) = C'_x(P_x) - C'_x(P_x = 0) \quad (4.2.2.25)$$

Β. Μεθοδολογία του ελέγχου που βασίζεται στο κόστος.

Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση κόστους που ορίστηκε στην (4.2.2.25), ο έλεγχος droop εκφράζεται από τη σχέση:

$$f_x = f_{max} - k_x C''_x(P_x), \quad k_x = \frac{f_{max} - f_{min}}{\max(C''_{x,max})} \quad (4.2.2.26)$$

Όπου  $\max(C''_{x,max})$  είναι το κόστος της μονάδας ΔΠ εκείνης, η οποία παρουσιάζει το υψηλότερο κόστος από όλες τις μονάδες ΔΠ, όταν  $P'_x=1$ . Εφαρμόζοντας την (4.2.2.26) στο παράδειγμά μας, θα είχαμε:

$$k_1 = k_2 = k_3 = \frac{f_{max} - f_{min}}{\max(C''_{x,max})} = \frac{f_{max} - f_{min}}{C''_{1,max}} \quad (4.2.2.27)$$

$$C''_1(P_1) = C''_2(P_2) = C''_3(P_3) \quad (4.2.2.28)$$

Προκειμένου να ικανοποιηθεί η ισότητα που παρουσιάζεται στην (4.2.2.28), η μονάδα ΔΠ με το χαμηλότερο συνολικό κόστος παραγωγής θα παρήγαγε περισσότερο από τις άλλες μονάδες και ούτω καθεξής. Αυτό φαίνεται και γραφικά στο δεύτερο από τα σχήματα της εικόνας 7 από τις τομές τις οριζόντιας γραμμής με τις καμπύλες κόστους.

Γ. Όρια των παραμέτρων.

Αντικαθιστώντας την (4.2.2.27) στην (4.2.2.26) για το μικροδίκτυο του παραδείγματός μας, οδηγούμαστε στην ακόλουθη σχέση:

$$f_{min} = f_{max} - \frac{C''_x(P_x)}{C''_{1,max}} (f_{max} - f_{min}), x = 1, 2 \text{ ή } 3 \quad (4.2.2.29)$$

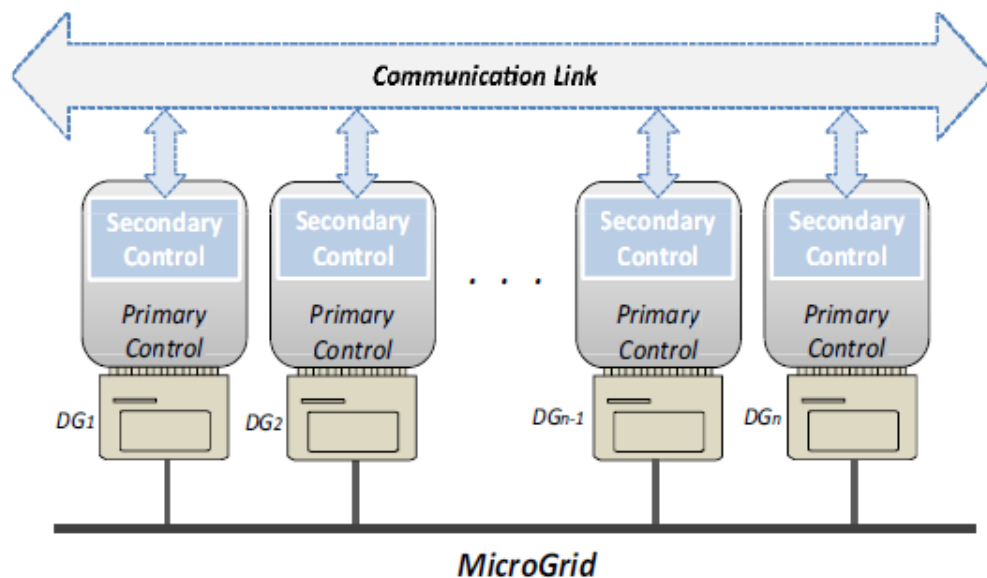
Από την σχέση αυτή, παρατηρούμε τα εξής: Η μέγιστη συχνότητα  $f_{max}$  προκύπτει όταν  $P'_x=0$  και άρα  $C''_x(P_x)=0$ . Από την άλλη μεριά, η ελάχιστη συχνότητα  $f_{min}$  προκύπτει όταν η πιο κοστοβόρος μονάδα ΔΠ λειτουργεί στο πλήρες φορτίο της ( $P'_1=1$ ). Για το μικροδίκτυο που χρησιμοποιούμε ως παράδειγμα, αυτό συμβαίνει όταν  $C''_x(P_x)=C''_{1,max}$ , γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει ότι ο εν λόγω έλεγχος μπορεί να λειτουργήσει στη καθορισμένη περιοχή συχνοτήτων από  $f_{min}$  μέχρι  $f_{max}$ . Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η συχνότητα των υπολοίπων δύο μονάδων ΔΠ είναι μεγαλύτερη από την  $f_{min}$ , αφού τα δικά τους μέγιστα κόστη στο πλήρες φορτίο είναι μικρότερα από το  $C''_{1,max}$ . Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί μία συχνότητα μόνιμης κατάστασης με τιμή κοντά στην  $f_{min}$  για τις δύο αυτές μονάδες ΔΠ, οι ενεργοί ισχείς αυτών θα πρέπει να περιοριστούν στην τιμή  $P'_{x,max}$  (ή σε κάποια άλλη χαμηλότερη από αυτή), το οποίο στην πράξη μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προσθήκης ενός απλού PI ελεγκτή:

$$f_x = (P'_{x,max} - P'_x) \times \left( k_p + \frac{k_i}{s} \right), P'_x \geq P'_{x,max} \quad (4.2.2.30)$$

Όπου  $k_p$  και  $k_i$  είναι το αναλογικό και το ολοκληρωτικό κέρδος, αντίστοιχα [18].

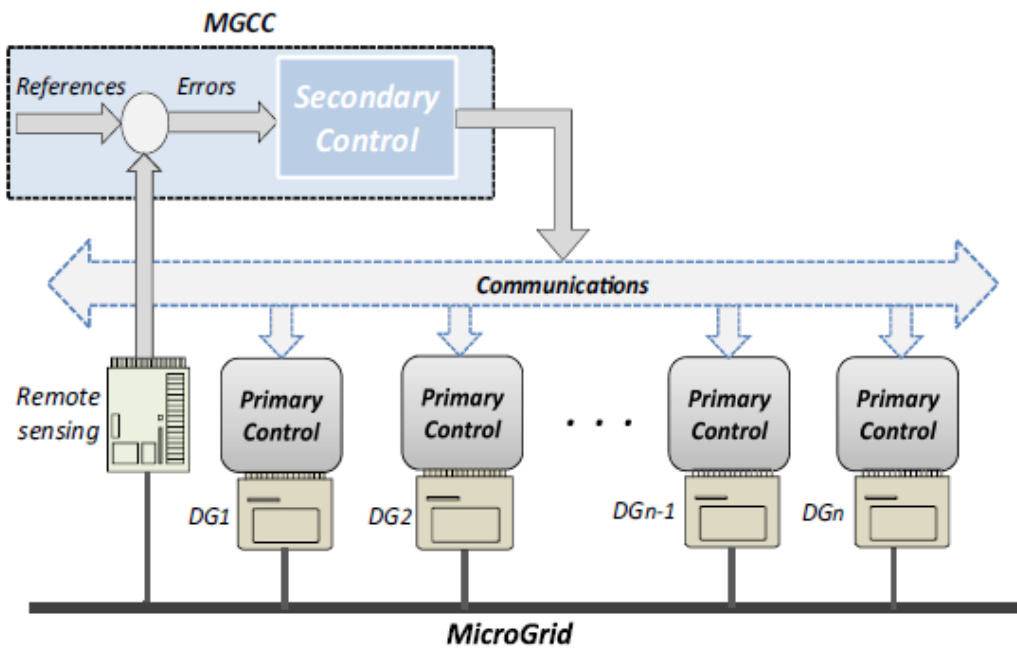
### 4.2.3 Κατανεμημένος δευτερογενής έλεγχος.

Ο συμβατικός δευτερογενής έλεγχος βασίζεται στη χρήση ενός κεντρικού ελεγκτή, ο οποίος περιλαμβάνει αργούς βρόχους ελέγχου και συστήματα επικοινωνιών χαμηλού εύρους ζώνης, προκειμένου να μετρήσει ορισμένες παραμέτρους σε διάφορα σημεία του μικροδικτύου και στη συνέχεια να αποστείλει σε κάθε μονάδα ΔΠ τις αντίστοιχες οδηγίες ελέγχου. Το πρόβλημα με τη χρήση ενός κεντρικού ελεγκτή είναι ότι μία αστοχία σε αυτόν θα οδηγήσει σε αστοχία ολόκληρου του συστήματος. Παρακάτω, θα εξετάσουμε μία διανεμημένη στρατηγική δευτερογενούς ελέγχου. Παρακάτω απεικονίζεται ένα αφαιρετικό διάγραμμα αυτού του τύπου ελέγχου:



Εικόνα 4.12 Διανεμημένος δευτερογενής έλεγχος [19].

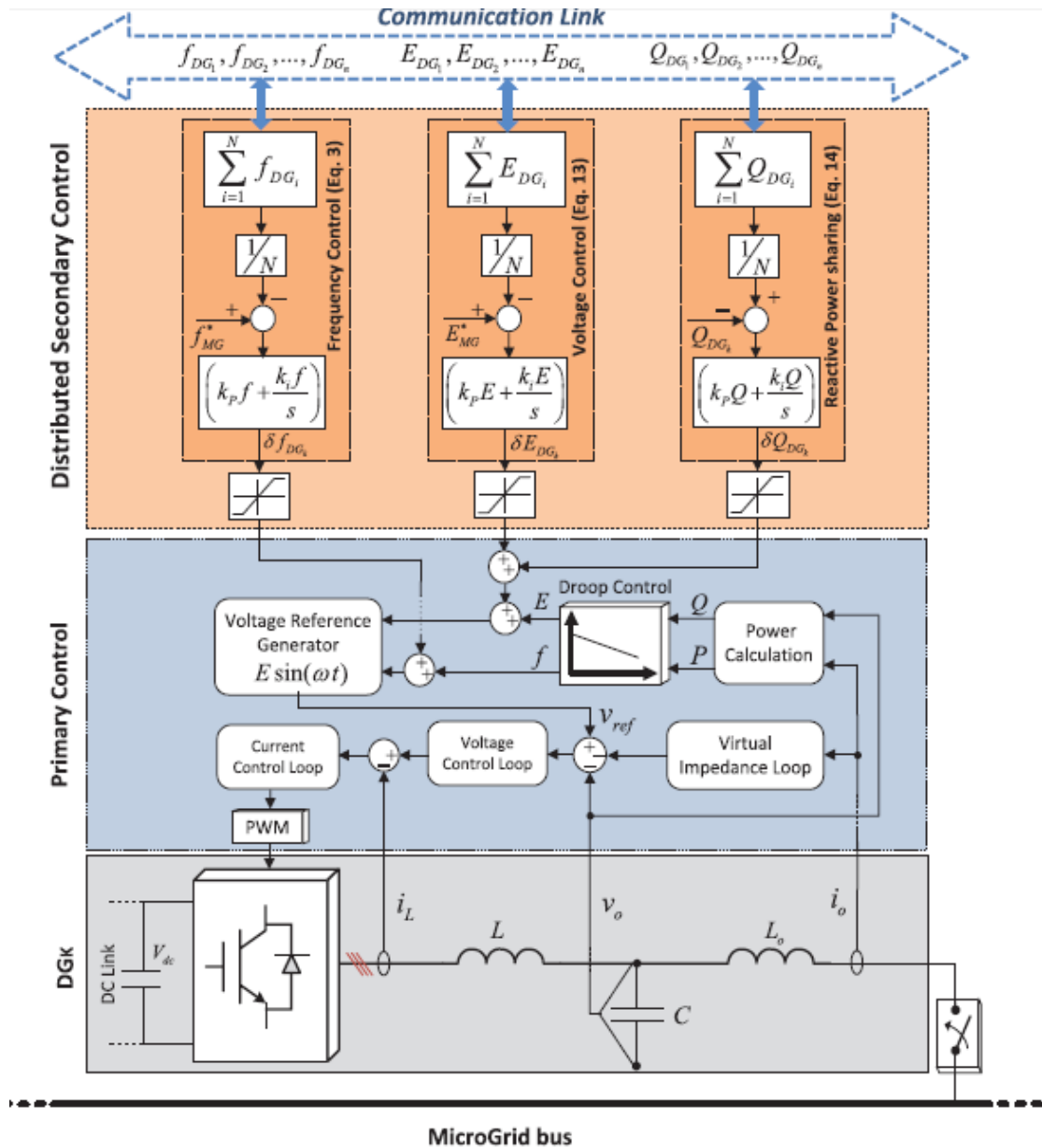
Για λόγους αντιπαραβολής, παραθέτουμε και το αντίστοιχο διάγραμμα για τον κεντρικό δευτερογενή έλεγχο:



Εικόνα 4.13 Κεντρικός δευτερογενής έλεγχος [19].

Όπως είναι σαφές και από τα παραπάνω σχήματα, η βασική διαφορά είναι ότι, στην διανεμημένη εκδοχή του, ο δευτερογενής έλεγχος υλοποιείται σε καθεμιά από τις μονάδες ΔΠ και τοποθετείται μεταξύ του επιπέδου επικοινωνίας και του πρωτογενούς ελέγχου. Ο διανεμημένος δευτερογενής έλεγχος συλλέγει όλες τις μετρήσεις (συχνότητα, πλάτος της τάσης και άεργο ισχύ) των υπολοίπων μονάδων ΔΠ μέσω του συστήματος επικοινωνίας, εξάγει τον μέσο όρο αυτών και παράγει το κατάλληλο σήμα ελέγχου, το οποίο και στέλνει στον πρωτογενή έλεγχο, προκειμένου να αφαιρέσει τα σφάλματα της μόνιμης κατάστασης. Η ακόλουθη εικόνα απεικονίζει τις λεπτομέρειες του εν λόγω ελέγχου για μία μονάδα ΔΠ:





Εικόνα 4.14 Διάγραμμα του διανεμημένου δευτερογενούς ελέγχου για μία μονάδα ΔΠ ενός μικροδικτύου [19].

### Α. Έλεγχος της συχνότητας.

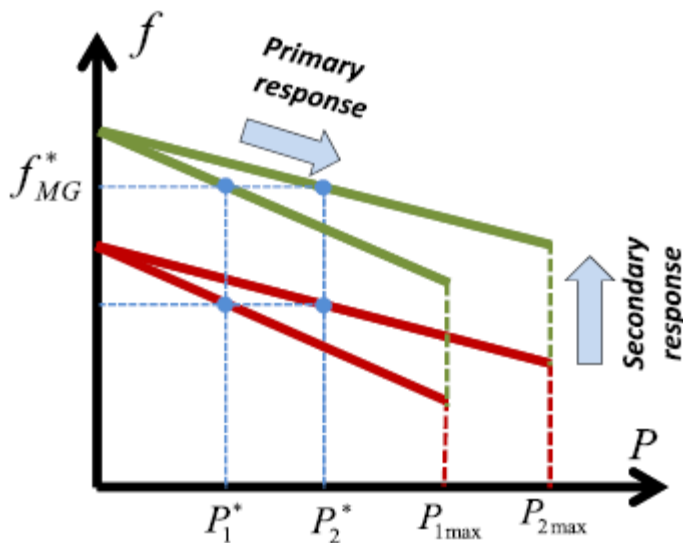
Στην εν λόγω στρατηγική ελέγχου, η κάθε μονάδα ΔΠ μετράει το επίπεδο της συχνότητας σε κάθε δείγμα του χρόνου, στέλνει αυτήν την μέτρηση στις άλλες μονάδες, εξάγει το μέσο όρο των μετρήσεων της συχνότητας που προέρχονται από τις υπόλοιπες μονάδες και μετά αποκαθιστά τη συχνότητά της, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\delta f_{DGk} = k_{pf}(f_{MG}^* - \bar{f}_{DGk}) + k_{if} \int (f_{MG}^* - \bar{f}_{DGk}) dt \quad (4.2.4.1)$$

$$\bar{f}_{DGk} = \frac{\sum_{i=1}^N f_{DGi}}{N} \quad (4.2.4.2)$$

Όπου  $k_{PF}$   $k_{iF}$  είναι οι παράμετροι του PI ελεγκτή,  $f^*_{MG}$  είναι η αναφορά της συχνότητας του μικροδικτύου,  $\bar{f}_{DGk}$  είναι ο μέσος όρος της συχνότητας όλων των μονάδων ΔΠ και  $\delta_{EDGk}$  είναι το σήμα ελέγχου, το οποίο παράγεται από τον δευτερογενή έλεγχο της μονάδας ΔΠ για κάθε δείγμα του χρόνου. Τα  $i = 1, 2, \dots, N$  και  $k = 1, 2, \dots, N$  αντιστοιχούν, με αυτήν τη σειρά, στον αριθμό των μετρήσεων της συχνότητας που καταφθάνουν μέσω του συστήματος επικοινωνίας και στον αριθμό της μονάδας ΔΠ που εξετάζουμε.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει πώς ενεργεί ο εν λόγω δευτερογενής έλεγχος, προκειμένου να αφαιρέσει τις αποκλίσεις στην τάση και τη συχνότητα που εισάγονται στις μονάδες ΔΠ από το επίπεδο του πρωτογενούς ελέγχου:



Εικόνα 4.15 Η απόκριση του δευτερογενούς ελέγχου, έναντι εκείνης του πρωτογενούς. Αποκατάσταση της συχνότητας [19].

Η εικόνα δείχνει ότι ο δευτερογενής έλεγχος απλά σηκώνει την απόκριση του πρωτογενούς, με αποτέλεσμα η συχνότητα να φτάνει την ονομαστική τιμή της, ακόμα και για μονάδες ΔΠ με διαφορετικές διαβαθμίσεις ισχύος.

## Β. Έλεγχος της τάσης.

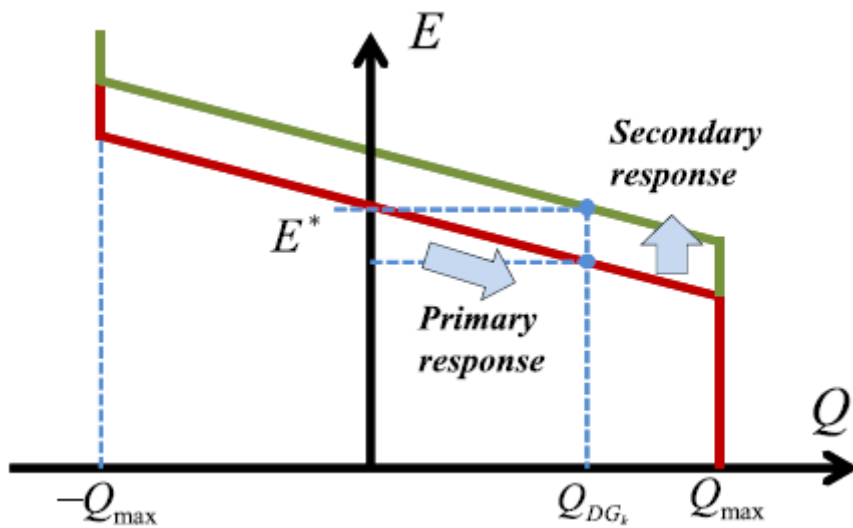
Σε αυτήν την περίπτωση, η αποκατάσταση της τάσης επιτυγχάνεται ως εξής:

$$\delta E_{DGk} = k_{PE}(E^*_{MG} - \bar{E}_{DGk}) + k_{iE} \int (E^*_{MG} - \bar{E}_{DGk}) dt \quad (4.2.4.3)$$

$$\bar{E}_{DGk} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{DGi}}{N} \quad (4.2.4.4)$$

Όπου  $\delta_{EDGk}$  είναι η τάση αποκατάστασης της  $k$ -οστής μονάδας ΔΠ, η οποία παράγεται από τον PI ελεγκτή από το σφάλμα μεταξύ της τάσης αναφοράς του μικροδικτύου,  $E^*_{MG}$ , και τη μέση τάση των μονάδων ΔΠ,  $\bar{E}_{DGk}$ , σε κάθε δείγμα του χρόνου.

Η ενέργειες του δευτερογενούς ελέγχου προκειμένου να αποκατασταθεί η τάση στη μόνιμη κατάσταση απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.16 Η απόκριση του δευτερογενούς ελέγχου, έναντι εκείνης του πρωτογενούς. Αποκατάσταση της τάσης [19].

### Γ. Έλεγχος της αέργου ισχύος.

Είναι γνωστό ότι σε ένα επαγωγικό μικροδίκτυο, δηλαδή σε ένα μικροδίκτυο, στο οποίο το επαγωγικό μέρος της σύνθετης αντίστασης,  $X$ , υπερिशύχει του ωμικού,  $R$ , είναι δύσκολο να επιτευχθεί ο ακριβής διαμοιρασμός της αέργου ισχύος, ενώ κάτι αντίστοιχο συμβαίνει με την ενεργό ισχύ σε ένα μικροδίκτυο, στο οποίο υπερिशύχει το ωμικό στοιχείο. Ο λόγος είναι ότι, σε αντίθεση με τη συχνότητα, η τάση δεν είναι κοινή για όλο το μικροδίκτυο, καθώς η αντίσταση μεταξύ των μονάδων ΔΠ και του ΣΚΣ δεν είναι η ίδια. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας την τάση ως μεταβλητή, είναι δύσκολο να ελέγξουμε με ακρίβεια την ροή της αέργου ισχύος.

Ο διανεμημένος δευτερογενής έλεγχος παρέχει μία λύση και για αυτό το πρόβλημα, ως εξής: στον έλεγχο αυτό, κάθε μονάδα ΔΠ μετράει την τιμή της  $Q$  και την στέλνει στις υπόλοιπες μονάδες ΔΠ, προκειμένου να εξαχθεί ένας μέσος όρος. Με τον τρόπο αυτό, καθώς οι πληροφορίες είναι κοινές, όλες τους θα έχουν την ίδια αναφορά. Επομένως, ο διαμοιρασμός της αέργου ισχύος από τον δευτερογενή έλεγχο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\delta Q_{DGk} = k_{PQ}(\overline{Q_{DGk}} - Q_{DGk}) + k_{iQ} \int (\overline{Q_{DGk}} - Q_{DGk}) dt \quad (4.2.4.5)$$

$$\overline{Q_{DGk}} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{DGi}}{N} \quad (4.2.4.6)$$

Όπου  $k_{PQ}$  είναι ο αναλογικός και  $k_{iQ}$  ο ολοκληρωτικός όρος,  $Q_{DGk}$  η αέργος ισχύς της  $k$ -οστής μονάδας ΔΠ,  $\overline{Q_{DGk}}$  ο μέσος όρος της αέργου ισχύος όλων των μονάδων ΔΠ που δρα ως αέργος ισχύς αναφοράς και  $\delta Q_{DGk}$  είναι το σήμα ελέγχου που παράγεται από τον δευτερογενή έλεγχο σε κάθε δείγμα του χρόνου, προκειμένου να επιτευχθεί ο διαμοιρασμός της αέργου ισχύος μεταξύ των μονάδων ΔΠ [19].

### 4.2.5 Έλεγχος βασισμένος σε πράκτορες (MAS control).

Αυτός ο τύπος ελέγχου αποσκοπεί να παράσχει τη μέγιστη αυτονομία στις διεσπαρμένες γεννήτριες και στα φορτία εντός του μικροδικτύου, προσδίδοντας έναν

συγκεκριμένο βαθμό ευφυΐας στους μετατροπείς. Οι μετατροπείς είναι δυνατόν να επικοινωνούν μεταξύ τους, σχηματίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο μία μεγαλύτερη ευφυή οντότητα. Αυτός ο τύπος ελέγχου χρησιμοποιείται επίσης για τη βελτιστοποίηση της ρύθμισης της τάσης στα έξυπνα δίκτυα. Οι πράκτορες θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι λογισμικά τα οποία έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους σε γλώσσες προγραμματισμού υψηλού επιπέδου και να ανακοινώνουν τις υπηρεσίες που παρέχουν με δυναμικό τρόπο. Ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι τα εξής:

- Φυσικοί ή ψηφιακοί: Μπορούν να ελέγξουν μία διεσπαρμένη ενεργειακή πηγή απευθείας ή μπορούν να είναι ένα λογισμικό που κάνει προσφορές στην αγορά ενέργειας ή αποθηκεύει δεδομένα σε μία βάση δεδομένων.
- Επίδραση στο περιβάλλον: Οι πράκτορες αλλάζουν το περιβάλλον τους ως αποτέλεσμα της δράσης τους, αφού κάποια αλλαγή σε έναν πράκτορα μπορεί να επιφέρει αλλαγές στους υπόλοιπους πράκτορες.
- Ενδοεπικοινωνία: Οι πράκτορες μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους και να εργαστούν με συνεργατικό τρόπο.
- Ένα ορισμένο επίπεδο αυτονομίας: Οι πράκτορες μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις χωρίς έναν κεντρικό ελεγκτή και οδηγούνται από ένα σύνολο τάσεων.
- Μερική ή καθόλου αναπαράσταση του περιβάλλοντος: Οι πράκτορες γνωρίζουν μερικώς τι συμβαίνει στο σύστημα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι απαιτήσεις για ανταλλαγή δεδομένων και οι υπολογιστικές απαιτήσεις μειώνονται στο ελάχιστο.
- Διαφορετικοί στόχοι για κάθε πράκτορα: Κάθε πράκτορας έχει συγκεκριμένους στόχους, τους οποίους επιτυγχάνει βάσει των πόρων, των ικανοτήτων και των υπηρεσιών του.

Η γενική αρχιτεκτονική ενός συστήματος ελέγχου βασισμένου σε πράκτορες για μικροδίκτυα περιλαμβάνει τις ακόλουθες βασικές υπηρεσίες:

- Έγγραφή και ανεύρεση των πρακτόρων: Οι υπηρεσίες που παρέχουν οι πράκτορες διατηρούνται σε ένα κεντρικό αρχείο. Οι πράκτορες μπορούν να εγγραφούν στο αρχείο αυτό, προκειμένου να λαμβάνουν ειδοποιήσεις για καινούριους ή αποσυνδεδεμένους πράκτορες και τα λοιπά.
- Σύστημα ανταλλαγής μηνυμάτων: Η αρχιτεκτονική είναι κατανοητή σε διαφορετικούς ξενιστές, χάρη στην ανταλλαγή μηνυμάτων, η οποία βασίζεται στις ιντερνετικές υπηρεσίες.
- Σύστημα διαχείρισης των πρακτόρων: Το πλαίσιο αυτό διαχειρίζεται βασικές υπηρεσίες, όπως είναι η δημιουργία και η διαγραφή πρακτόρων.

Ο αποκεντρωμένος έλεγχος που βασίζεται στα συστήματα πρακτόρων έχει διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με τον κεντρικό έλεγχο:

- Η ποσότητα των πληροφοριών: Η τεχνολογία MAS παρέχει σε κάθε μετατροπέα πληροφορίες για το άμεσο περιβάλλον του. Από την άλλη μεριά, στους κεντρικούς ελέγχους, είναι πολύ δύσκολο για τον κεντρικό ελεγκτή να προσπελάσει όλη τη διαθέσιμη πληροφορία.
- Ανταλλαγή δεδομένων: Τα συστήματα MAS χρησιμοποιούν ένα τοπικό δίκτυο, μέσω του οποίου ανταλλάσσονται μόνο οι απαραίτητες πληροφορίες. Προκειμένου να επιτευχθούν παρόμοια αποτελέσματα από

έναν κεντρικό έλεγχο, απαιτείται μία σημαντική ροή δεδομένων προς ένα κεντρικό σημείο. Συνεπώς, στην περίπτωση που θα απαιτούνταν λειτουργίες πραγματικού χρόνου, η υλοποίηση του συστήματος θα γινόταν πιο δύσκολη και πιο ακριβή.

- Ανοικτό σύστημα: Μέσω του αποκεντρωμένου ελέγχου υπάρχει η δυνατότητα plug and play. Στην περίπτωση που μια νέα διεσπαρμένη πηγή συνδεθεί στο μικροδίκτυο, παρέχεται ένας προγραμματιζόμενος πράκτορας για τον έλεγχό της, χωρίς να τροποποιηθεί ο υπόλοιπος έλεγχος. Ωστόσο, στους κεντρικούς ελέγχους, ο κεντρικός ελεγκτής πρέπει να επαναπρογραμματίζεται κάθε φορά που συνδέεται στο μικροδίκτυο μια καινούρια διεσπαρμένη πηγή.

Παρόλα αυτά, η επιστημονική κοινότητα παραμένει εστιασμένη στους κεντρικούς ελέγχους. Υπάρχουν δύο λόγοι για αυτό:

- Πανοραμική εποπτεία του συστήματος: Η λήψη αποφάσεων είναι ευκολότερη όταν οι πληροφορίες συλλέγονται σε ένα κεντρικό σημείο.
- Ευκολία υλοποίησης: Η διαβάθμιση της προτεραιότητας και η συνεργασία επιτυγχάνονται ευκολότερα από έναν κεντρικό ελεγκτή.

Ακολουθεί μία σύγκριση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας μεταξύ του αποκεντρωμένου ελέγχου MAS και του κεντρικού ελέγχου:

Πολυπλοκότητα του ελέγχου: Στη βασική λειτουργία του κεντρικού ελέγχου, οι τοπικοί ελεγκτές εγγυώνται μόνο τον διαμοιρασμό του φορτίου και την ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας. Παρομοίως, ο κεντρικός ελεγκτής του μικροδικτύου εξασφαλίζει ότι η τάση και η συχνότητα θα παίρνουν τις ονομαστικές τους τιμές, καθώς επίσης και τον συγχρονισμό του μικροδικτύου με το κυρίως δίκτυο μέσω επικοινωνιών χαμηλού εύρους ζώνης με τους τοπικούς ελεγκτές. Ωστόσο, το κόστος αυξάνεται στην περίπτωση που προστεθούν περισσότερες λειτουργίες.

Στην περίπτωση του ελέγχου MAS, εκτός από τις προαναφερθείσες βασικές λειτουργίες, οι τοπικοί πράκτορες γνωρίζουν επίσης τη συγκεκριμένη συσκευή την οποία ελέγχουν, λαμβάνουν αποφάσεις για τη συμπεριφορά τους και στέλνουν τις ανάλογες πληροφορίες στον κεντρικό ελεγκτή. Επιπλέον, λαμβάνουν σήματα ελέγχου από τους πράκτορες του κεντρικού ελεγκτή, αλλά διατηρούν την αυτονομία τους σε σχέση με την επίτευξη των ζητούμενων λειτουργικών σημείων. Επιπλέον, οι πράκτορες που βρίσκονται στον κεντρικό ελεγκτή, εκτός από τις βασικές λειτουργίες, διαχειρίζονται επίσης όλες τις πληροφορίες που προέρχονται από τους τοπικούς πράκτορες και αποφασίζουν σχετικά με τα βέλτιστα λειτουργικά σημεία για εκείνους, βελτιστοποιώντας την λειτουργία ολόκληρου του μικροδικτύου. Όλες αυτές οι επιπρόσθετες λειτουργίες αυξάνουν κατά πολύ την πολυπλοκότητα του ελέγχου MAS, η οποία δημιουργεί μεγαλύτερες απαιτήσεις από το σύστημα που υλοποιεί τον έλεγχο, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους.

Επικοινωνίες: Στον κεντρικό έλεγχο, οι τοπικοί ελεγκτές δρουν αυτόνομα, χωρίς επικοινωνίες μεταξύ τους και λαμβάνουν τα λειτουργικά σημεία τους από τον κεντρικό ελεγκτή μέσω επικοινωνιών χαμηλού εύρους ζώνης. Η πολυπλοκότητα του συστήματος επικοινωνιών αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό των λειτουργιών που επιτελούνται από το σύστημα ελέγχου.

Η αρχιτεκτονική MAS από την άλλη, προϋποθέτει ένα αρκετά προηγμένο σύστημα επικοινωνίας, το οποίο είναι δυνατόν να περιλαμβάνει συνδέσεις Ίντερνετ μεταξύ όλων των πρακτόρων.

Ανοχή στα σφάλματα: Ο κεντρικός έλεγχος εγγυάται τον διαμοιρασμό του φορτίου κατά την αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου, ακόμα κι αν καταρρεύσει η επικοινωνία με τον κεντρικό ελεγκτή ή ακόμα κι αν ορισμένοι μετατροπείς ή ο κεντρικός ελεγκτής δεν λειτουργούν κανονικά. Ο λόγος για αυτό είναι ότι η μέθοδος droop εξασφαλίζει τον διαμοιρασμό του φορτίου, χωρίς καμμία σύνδεση μεταξύ των διεσπαρμένων πηγών. Έτσι, αν ο κεντρικός ελεγκτής καταρρεύσει, οι μετατροπείς συνεχίζουν να λειτουργούν αυτόνομα, αλλά χωρίς την ικανότητα της σύνδεσης με το δίκτυο και της αποκατάστασης των ονομαστικών τιμών της συχνότητας και της τάσης στο μικροδίκτυο. Ομοίως, αν οι επικοινωνίες καταρρεύσουν, το μικροδίκτυο παραμένει ικανό να λειτουργήσει τόσο συνδεδεμένο με, όσο και αποσυνδεδεμένο από το δίκτυο, αλλά χωρίς την ικανότητα να λαμβάνει υπόψη στον έλεγχο του θέματα της αγοράς ή την παρουσία άλλων μικροδικτύων, τα οποία συνδέονται με αυτό.

Στην περίπτωση του ελέγχου MAS, η ανοχή στα σφάλματα εξαρτάται από το βαθμό της ευφυΐας που έχει ενσωματωθεί στους πράκτορες. Ένας καλοσχεδιασμένος έλεγχος MAS είναι σε θέση να ελαχιστοποιήσει τις συνέπειες της αποτυχίας των επικοινωνιών ή στοιχείων όπως το κεντρικό αρχείο των πρακτόρων.

Ευελιξία: Όταν καινούριες διεσπαρμένες πηγές συνδέονται σε ένα μικροδίκτυο με κεντρικό έλεγχο, απαιτούνται καινούριες συνδέσεις μεταξύ αυτών των πηγών και του κεντρικού ελεγκτή του μικροδικτύου, ενώ οι αλγόριθμοι του κεντρικού ελεγκτή χρειάζονται προσαρμογή.

Από την άλλη μεριά, ο έλεγχος MAS παρέχει μεγάλες δυνατότητες plug and play, κάτι που επιτρέπει σε αυτά τα συστήματα ελέγχου να προσαρμόζονται εύκολα και γρήγορα στα διαφορετικά μικροδίκτυα από άποψη μεγέθους, εγκατεστημένων συσκευών και λειτουργιών ελέγχου. Συνεπώς, τα κόστη που σχετίζονται με τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική του μικροδικτύου μειώνονται όταν επιλέγεται σύστημα ελέγχου MAS.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω είναι ότι ο κεντρικός έλεγχος προσφέρει τη δυνατότητα να υλοποιηθεί ένα στοιχειώδες σύστημα για τον έλεγχο των μικροδικτύων με χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Ωστόσο, αν απαιτούνται πιο προηγμένες λειτουργίες ή εργασίες που θα πρέπει να εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο, η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού αυξάνεται και ο έλεγχος MAS αρχίζει να γίνεται πιο οικονομικός [16].

### **4.3 Μέθοδοι ελέγχου DC μικροδικτύων.**

Ο έλεγχος των dc μικροδικτύων έχει ως στόχο: α) τον έλεγχο της ροής του ρεύματος από/ προς μία εξωτερική ισχυρή DC πηγή, που στην πράξη μπορεί να είναι ένα σύστημα DC μέσης τάσης ή ένας DC/AC μετατροπέας συνδεδεμένος με το AC δίκτυο, β) την επίτευξη ομαλής μετάβασης μεταξύ της απομονωμένης και της διασυνδεδεμένης λειτουργίας και γ) την επανόρθωση των αποκλίσεων της τάσης στο εσωτερικό του μικροδικτύου [4].

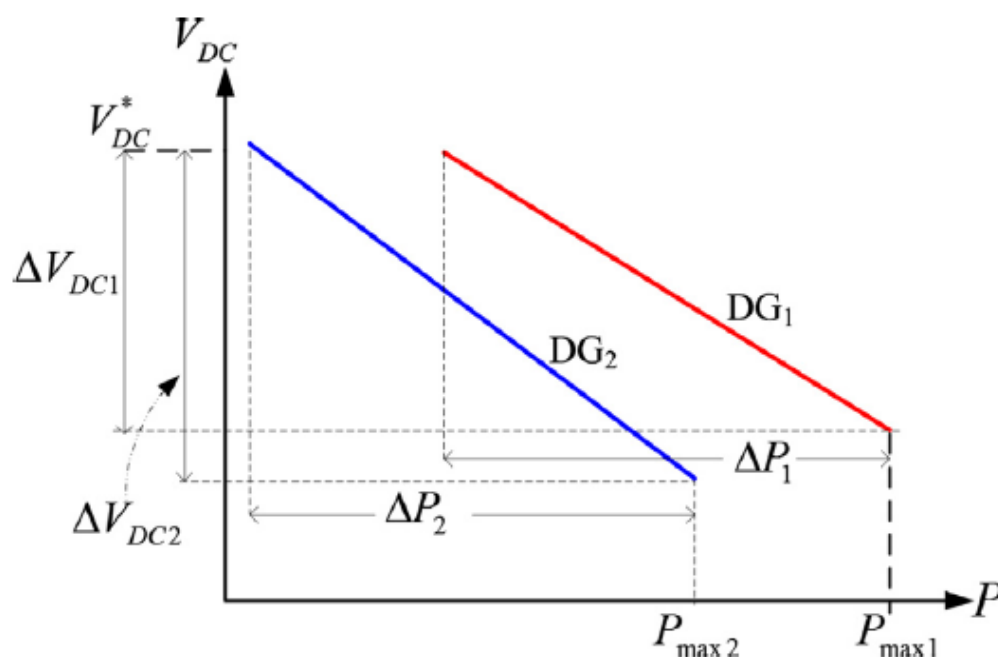
### 4.3.1 Ιεραρχικός έλεγχος DC μικροδικτύων.

Η υλοποίηση ενός ιεραρχικού ελέγχου έχει ιδιαίτερο νόημα στην περίπτωση των DC μικροδικτύων, όπου διασυνδέονται διάφορες πηγές παραγωγής ενέργειας, οι οποίες βασίζονται σε διαφορετικές τεχνολογίες. Σκοπός του ιεραρχικού ελέγχου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, και παράλληλα η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας, της αξιοπιστίας και της ελεγχιμότητας.

#### Πρωτογενής έλεγχος.

Στα DC δίκτυα, ο πρωτογενής έλεγχος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της DC τάσης των πυκνωτών στα σημεία σύνδεσης των μετατροπέων με τον κοινό DC ζυγό. Η δημοφιλέστερη μέθοδος ελέγχου σε αυτό το επίπεδο ελέγχου είναι η μέθοδος droop. Στα DC δίκτυα, η μέθοδος droop υλοποιείται εικονικά στους βρόχους ελέγχου των μετατροπέων.

Τα DC μικροδίκτυα είναι πολύ απλούστερα των AC, με την έννοια ότι δεν υπάρχει άεργος ισχύς και η μόνη παράμετρος της τάσης που είναι διαθέσιμη προς έλεγχο είναι το πλάτος της. Συνεπώς, η ενεργός ισχύς δεν εξαρτάται πλέον από τη συχνότητα, αλλά από την διαφορά της τάσης. Ο διαμοιρασμός της ενεργού ισχύος μεταξύ των μονάδων ΔΠ είναι δυνατόν να επιτευχθεί από τις χαρακτηριστικές droop που απεικονίζονται στη συνέχεια:



Εικόνα 4.17 Χαρακτηριστικές droop για τον έλεγχο ενός DC μικροδικτύου [4].

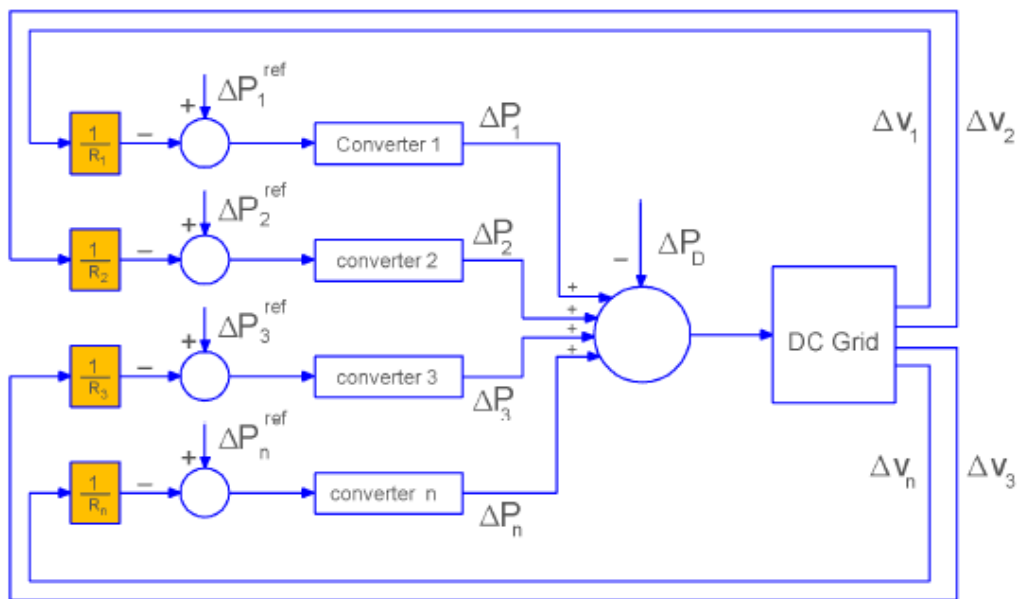
Η σχέση που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη χαρακτηριστική είναι η εξής:

$$V_{DCi} = V_{DC}^* - \beta_{vi} P_i \quad (4.3.1.1)$$

Όπου  $\beta_{vi}$  είναι ο συντελεστής droop, ενώ  $P_i$  είναι η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής της ισχύος του  $i$ -οστού μετατροπέα και της τιμής αναφοράς της. Με  $V_{DCi}$  και  $V_{DC}^*$  συμβολίζονται η μετρούμενη τιμή της τάσης ενός μετατροπέα και η τιμή αναφοράς της, αντίστοιχα.

Ο συντελεστής  $\beta_{vi}$  πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα, ανάλογα με τις δοσμένες διαβαθμίσεις ισχύος των μονάδων ΔΠ και των λειτουργικών συνθηκών. Μία πιο απότομη κλίση θα οδηγήσει σε καλύτερο διαμοιρασμό της ισχύος. Ωστόσο, θα οδηγήσει επίσης και σε μεγαλύτερες αποκλίσεις της τάσης, οι οποίες ενδέχεται να παραβιάζουν τα προκαθορισμένα όρια [4].

Ο έλεγχος της τάσης αποσκοπεί στη διατήρηση αυτής εντός συγκεκριμένων ορίων. Ο ελεγκτής της τάσης υλοποιείται σε κάθε μετατροπέα πηγής τάσης (voltage source converter, VSC). Πρακτικά, αυτό το οποίο συμβαίνει είναι μια αλλαγή των set points σε ορισμένους ελεγκτές VSC. Τα καινούρια set points προέρχονται από το επίπεδο του δευτερογενούς ελέγχου. Παρακάτω, απεικονίζεται ένα block διάγραμμα για τον πρωτογενή έλεγχο σε ένα τυπικό DC δίκτυο:



Εικόνα 4.18 Λειτουργικό διάγραμμα του πρωτογενούς ελέγχου ενός τυπικού DC δικτύου [20].

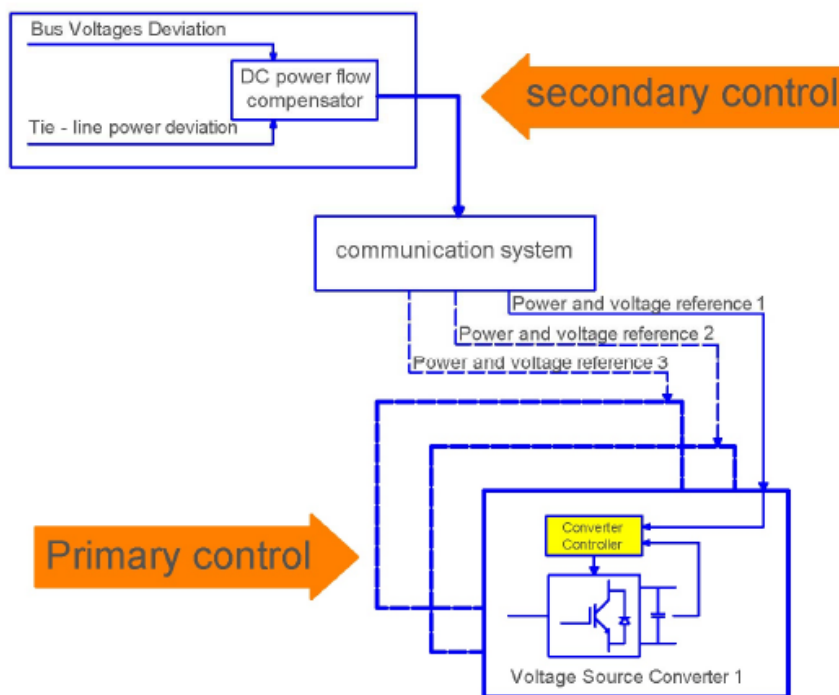
Τα  $\Delta P_i^{\text{ref}}$  που αναφέρονται στο σχήμα αυτό προέρχονται από το επίπεδο του δευτερογενούς ελέγχου.

### Δευτερογενής έλεγχος.

Οι κυριότεροι στόχοι του δευτερογενούς ελέγχου στα DC μικροδίκτυα είναι η διόρθωση και η διατήρηση της ροής ισχύος και του επιπέδου της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα. Ο δευτερογενής έλεγχος λειτουργεί ως εξής: λαμβάνει τις αποκλίσεις της τάσης και της ισχύος και στέλνει διορθωτικά σήματα στο επίπεδο του πρωτογενούς ελέγχου.



Ο δευτερογενής έλεγχος δρα πιο αργά από τον πρωτογενή. Το λειτουργικό διάγραμμα για την αλληλεπίδραση του πρωτογενούς με τον δευτερογενή έλεγχο φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 4.19 Ο πρωτογενής και ο δευτερογενής έλεγχος σε ένα DC μικροδίκτυο [20].

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα DC μικροδίκτυα πρέπει να παρακολουθούμε την τάση όλων των ζυγών, τη στιγμή που στα AC δίκτυα έχουμε την συχνότητα ως καθολική παράμετρο, οπότε παρακολουθούμε μόνον αυτή.

### Τριτογενής έλεγχος.

Ο τριτογενής έλεγχος προγραμματίζει τις εγχύσεις ισχύος βάσει μίας αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία συνυπολογίζει οικονομικές και τεχνικές απόψεις, καθώς και τους περιορισμούς τους. Η απώλειες μπορούν να ληφθούν υπόψη σε αυτό το τμήμα του συστήματος.

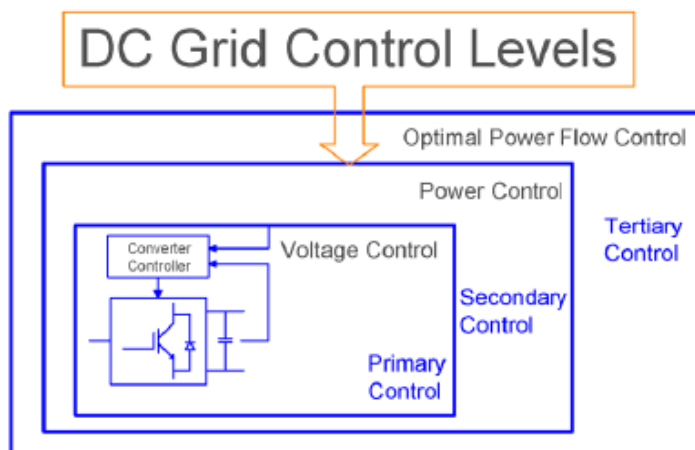
Ο τριτογενής έλεγχος προσδιορίζει την αναφορά της ισχύος, προκειμένου να πετύχει τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος σε σχέση με την αγορά, την ασφάλεια, τις απώλειες, και τα λοιπά. Ο τριτογενής έλεγχος είναι δυνατόν να βασιστεί σε αλγόριθμους βέλτιστης ροής ισχύος (Optimal Power Flow, OPF).

Ο τριτογενής έλεγχος ενεργεί πιο αργά σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο επίπεδα ελέγχου. Η σταθερά χρόνου για τον πρωτογενή έλεγχο είναι της τάξης των μερικών δευτερολέπτων. Για το δευτερογενή έλεγχο, η σταθερά χρόνου ισούται με μερικά δευτερόλεπτα. Ο χρόνος αντίδρασης του τριτογενούς ελέγχου είναι μεταξύ των είκοσι λεπτών και της μιας ώρας.

Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα DC μικροδίκτυα σχεδιάζονται προκειμένου να περιληφθεί μία μεγαλύτερη γκάμα από στοχαστικές, ανανεώσιμες πηγές υπάρχουν διάφορα θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο επίπεδο του τριτογενούς ελέγχου. Για παράδειγμα, οι αλγόριθμοι πρόβλεψης για την ταχύτητα του ανέμου και την

ηλιακή ακτινοβολία είναι λιγότερο ανεπτυγμένοι και ακριβείς σε σχέση με εκείνους για την πρόβλεψη του φορτίου στα AC δίκτυα. Επομένως, η υλοποίηση του τριτογενούς ελέγχου δεν πρόκειται για τετριμμένη διαδικασία και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

Παρακάτω, απεικονίζεται το διάγραμμα του ιεραρχικού ελέγχου για ένα DC μικροδίκτυο [20]:



Εικόνα 4.20 Διάγραμμα του ιεραρχικού ελέγχου ενός DC μικροδικτύου [20].

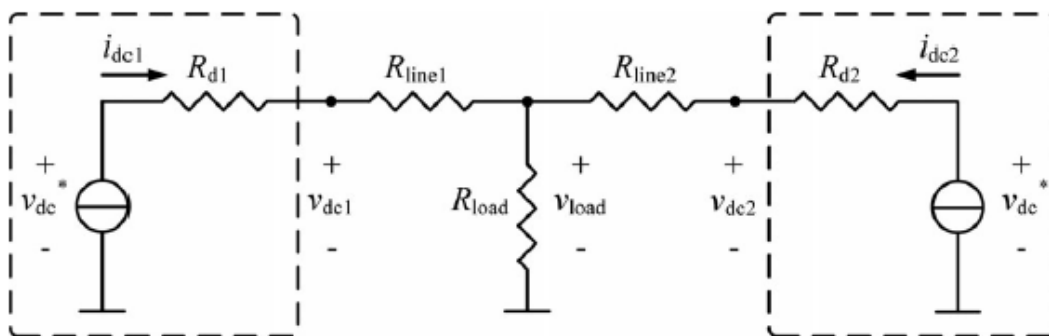
#### 4.3.2 Περιορισμοί της συμβατικής droop μεθόδου στα DC μικροδίκτυα.

Η συμβατική μέθοδος ελέγχου droop στα DC μικροδίκτυα συνίσταται στη γραμμική μείωση της αναφοράς της τάσης, καθώς το ρεύμα εξόδου αυξάνει. Ο πρώτος περιορισμός αυτής της μεθόδου είναι η υποβάθμιση της ακρίβειας του διαμοιρασμού του ρεύματος. Αφού η τάση εξόδου δεν είναι δυνατόν να είναι ακριβώς η ίδια λόγω της επιπρόσθετης πτώσης τάσης πάνω στις γραμμές, η ακρίβεια του διαμοιρασμού του ρεύματος στα φορτία μειώνεται. Κατά δεύτερον, προκαλείται μία απόκλιση της τάσης λόγω της δράσης του ελέγχου droop. Οι δύο αυτοί περιορισμοί αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια.

A. Υποβάθμιση της ακρίβειας διαμοιρασμού του ρεύματος.

Ο διαμοιρασμός του ρεύματος στο φορτίο πραγματοποιείται από έναν ελεγκτή droop I-V. Αυτός ο ελεγκτής μπορεί να υλοποιηθεί μέσω μιας εικονικής αντίστασης: αυτή η μέθοδος ονομάζεται επίσης προσαρμοστική τοποθέτηση της τάσης. Αν ληφθεί υπόψη η αντίσταση της γραμμής, οι dc τάσεις εξόδου των τοπικών μετατροπέων δεν είναι ακριβώς ίσες. Συνεπώς, η ακρίβεια του διαμοιρασμού του ρεύματος υποβαθμίζεται. Ο τρόπος με τον οποίο συμβαίνει αυτό αναλύεται στη συνέχεια.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένα dc μικροδίκτυο με δύο κόμβους, όπου κάθε μετατροπέας απλοποιείται χρησιμοποιώντας το ισοδύναμό του μοντέλο Thevenin:



Εικόνα 4.21 Απλοποιημένο μοντέλο ενός dc μικροδικτύου δύο κόμβων [21].

Η μέθοδος droop δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$u_{dci} = u^*_{dc} - i_{dci}R_{di} \quad (4.3.2.1)$$

Όπου  $u_{dci}$  είναι η τάση εξόδου του κάθε μετατροπέα,  $u^*_{dc}$  είναι η τιμή αναφοράς της τάσης εξόδου,  $i_{dci}$  είναι το ρεύμα εξόδου,  $R_{di}$  είναι η εικονική αντίσταση και  $i=1, 2$ .

Από την παραπάνω εικόνα μπορούν να εξαχθούν οι σχέσεις:

$$u_{load} = u^*_{dc} - i_{dc1}R_{d1} - i_{dc1}R_{line1} \quad (4.3.2.2)$$

$$u_{load} = u^*_{dc} - i_{dc2}R_{d2} - i_{dc2}R_{line2} \quad (4.1.2.3)$$

Από τις οποίες προκύπτει η ακόλουθη:

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{R_{d2}}{R_{d1}} + \frac{R_{line2} - \frac{R_{d2} \cdot R_{line1}}{R_{d1}}}{R_{d1} + R_{line1}} \quad (4.3.2.4)$$

Στη συμβατική μέθοδο droop, το dc ρεύμα εξόδου του κάθε μετατροπέα τίθεται αντιστρόφως ανάλογο με την εικονική αντίστασή του. Συνεπώς, συνάγεται από την παραπάνω σχέση ότι το λάθος στον διαμοιρασμό του ρεύματος δεν μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς, εκτός αν ικανοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$\frac{R_{d1}}{R_{d2}} = \frac{R_{line1}}{R_{line2}} \quad (4.3.2.5)$$

Συνήθως στα μικροδίκτυα, υποτίθεται ότι το σύστημα δεν είναι και τόσο μεγάλο, ως εκ τούτου η αντίσταση γραμμής έχει μόλις μία μικρή τιμή. Συνεπώς, μπορεί να επιλεγεί μία μεγαλύτερη εικονική αντίσταση  $R_{d1}$ . Αφού  $R_{d1} \gg R_{line1}$  και  $R_{d2} \gg R_{line2}$ , προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{R_{d2} + R_{line2}}{R_{d1} + R_{line1}} \approx \frac{R_{d2}}{R_{d1}} \quad (4.3.2.6)$$

Ωστόσο, η παραπάνω υπόθεση είναι κατάλληλη μόνο για μικρά συστήματα. Αν το dc μικροδίκτυο είναι μεγαλύτερο, δεν μπορεί να ισχύσει η τελευταία από τις παραπάνω σχέσεις. Εν τω μεταξύ, σε περίπτωση που επιλεγεί μία μεγάλη εικονική αντίσταση, η ευστάθεια του συστήματος απειλείται. Αυτός είναι ο πρώτος περιορισμός της συμβατικής μεθόδου ελέγχου droop.

Β. Απόκλιση της DC τάσης.

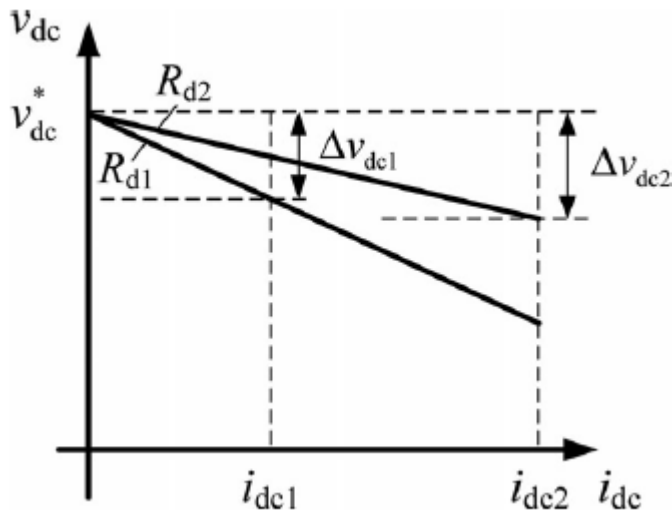
Όπως προκύπτει από την (4.3.2.1), η απόκλιση της dc τάσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta u_{dci} = i_{dci} R_{di} \quad (i = 1, 2) \quad (4.3.2.7)$$

Συνεπώς, όταν ο μετατροπέας λειτουργεί σε συνθήκες ανοικτοκυκλώματος, η απόκλιση της dc τάσης είναι μηδενική. Όταν το dc ρεύμα εξόδου είναι μη μηδενικό, υπάρχει απόκλιση της dc τάσης και η τιμή της μεταβάλλεται με το ρεύμα του φορτίου. Προκειμένου να εγγυηθούμε ότι η απόκλιση της τάσης δεν ξεπερνά τη μέγιστη αποδεκτή τιμή της, η τιμή του συντελεστή droop, θα πρέπει να περιορίζεται ως εξής:

$$R_{di} \leq \frac{\Delta u_{dcmax}}{i_{dcfli}} \quad (4.3.2.8)$$

Όπου  $i_{dcfli}$  είναι το ρεύμα του i-οστού μετατροπέα στο πλήρες φορτίο. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα. Η απόκλιση της τάσης εξόδου είναι ο δεύτερος περιορισμός της συμβατικής droop μεθόδου ελέγχου [21].



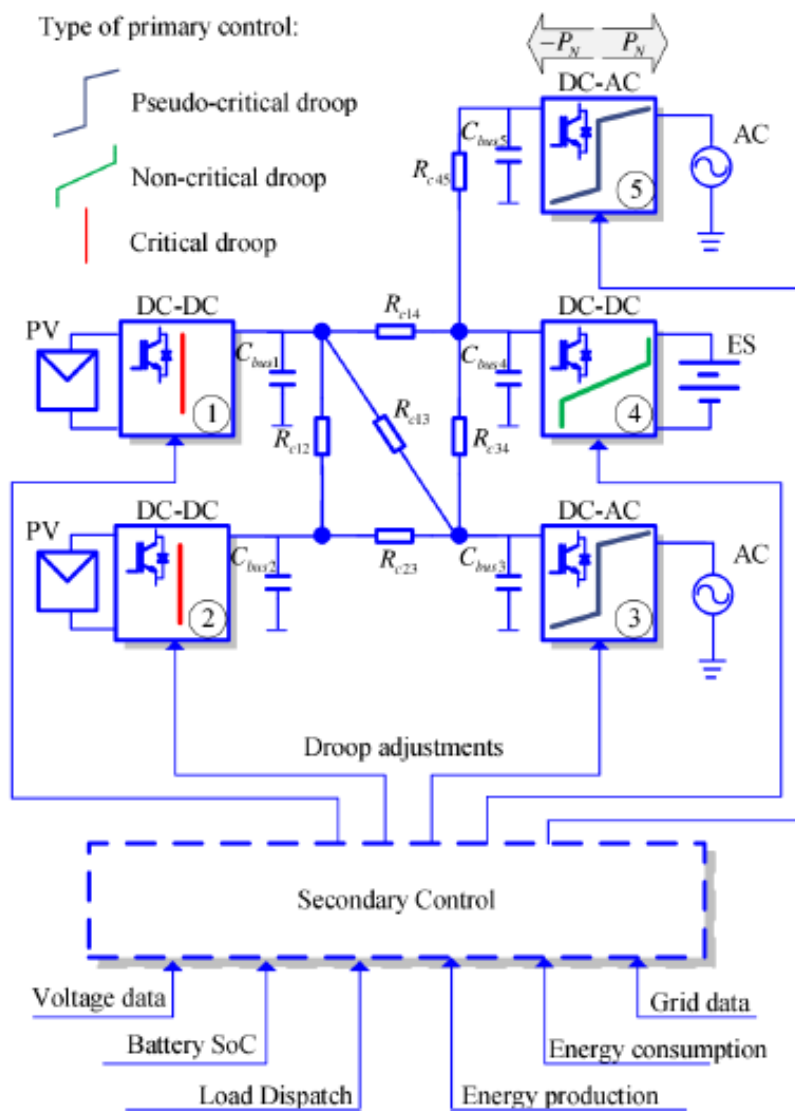
Εικόνα 4.22 Η καμπύλη droop σε ένα μικροδίκτυο με διαφορετικές εικονικές αντιστάσεις [21].

### 4.3.3 Εναλλακτικές μέθοδοι droop.

Παρακάτω, θα δούμε ορισμένες παραλλαγές της πρωτότυπης μεθόδου droop, οι οποίες αποσκοπούν στη βελτίωση της αποτελεσματικότητάς της.

#### 4.3.3.1 Έλεγχος μικροδικτύων DC με αποθήκευση ενέργειας και διανεμημένη παραγωγή.

Συνήθως στη βιβλιογραφία, ο έλεγχος droop αντιμετωπίζεται ως μια απλή εικονική αντίσταση. Χρησιμοποιώντας αυτήν την προσέγγιση, συνήθως αγνοούνται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προς έλεγχο στοιχείου. Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα το παρακάτω μικροδίκτυο:



Εικόνα 4.23 Ένα DC μικροδίκτυο, στο οποίο συνδέονται διαφόρων ειδών συσκευές [22].

Στο μικροδίκτυο αυτό οι μετατροπείς 1 και 2 συνδέουν φωτοβολταϊκές γεννήτριες με το μικροδίκτυο. Οι μετατροπείς αυτοί λειτουργούν συνήθως χρησιμοποιώντας μεθόδους εντοπισμού του σημείου μεγίστης ισχύος (maximum power point tracking methods), προκειμένου να εγχύουν όσο το δυνατόν περισσότερη ισχύ ανά μονάδα χρόνου. Ο έλεγχος droop που επιστρατεύεται για τον έλεγχο τέτοιων συσκευών θα πρέπει να επιτρέπει αυτή την λειτουργική κατάσταση. Οι μετατροπείς 3 και 5 συνδέουν το dc μικροδίκτυο με το ac δίκτυο. Αν αυτοί οι μετατροπείς μπορούν να κυκλοφορούν ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις και κυρίως αν έχουν τη δυνατότητα να συμμετέχουν στη διαμόρφωση της τάσης του dc ζυγού, τότε η χαρακτηριστική droop που χρησιμοποιείται για τον έλεγχό τους θα πρέπει να λαμβάνει τις παραμέτρους αυτές υπόψη. Τέλος, ο μετατροπέας υπ' αριθμόν 4 συνδέει το μικροδίκτυο με ένα στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας. Και πάλι, ο έλεγχος θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες λειτουργίας αυτής της περίπτωσης.

Στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε μία μέθοδο, σύμφωνα με την οποία, ο έλεγχος droop υλοποιείται ως μια ευέλικτη χαρακτηριστική καμπύλη, η μορφή της οποίας εξαρτάται

από την κατάσταση του δικτύου, καθώς και από τον τύπο του στοιχείου που πρέπει να συνδεθεί στο δίκτυο. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση μιας μεγαλύτερης ποικιλίας συμβάντων.

### Ο προτεινόμενος έλεγχος.

Κατ' αρχάς, ορίζονται πέντε περιοχές περί την ονομαστική τάση, οι οποίες ανήκουν σε μία από τρεις κατηγορίες: κανονική, ασφαλής και κρίσιμη λειτουργία.

Η ζώνη κανονικής λειτουργίας είναι το διάστημα εκείνο της τάσης, για το οποίο το σύστημα θεωρείται ότι λειτουργεί κανονικά, ενώ τηρείται η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου. Σε ένα σύστημα dc, αν ρέει ισχύς μεταξύ δύο στοιχείων, τότε τα στοιχεία αυτά λειτουργούν υπό διαφορετικές τάσεις, λόγω της αντίστασης που παρεμβάλλεται μεταξύ τους. Επιπλέον, αν τα στοιχεία αυτά ελέγχονται με μέθοδο droop, η εικονική αντίσταση της μεθόδου μπορεί να προστεθεί στην υπάρχουσα πραγματική αντίσταση. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η ζώνη κανονικής λειτουργίας θα πρέπει να περιλαμβάνει οποιοδήποτε προφίλ τάσης μπορεί να εμφανιστεί στο δίκτυο κατά την κανονική ροή φορτίου.

Η ζώνη κανονικής λειτουργίας περιβάλλεται από δύο ζώνες ασφαλείας: μία στο κατώτερο μέρος της, που ονομάζεται κατώτερη ζώνη ασφαλείας και μία στο ανώτερο, που ονομάζεται ανώτερη ζώνη ασφαλείας. Αυτές οι ζώνες περιλαμβάνονται για περιπτώσεις μεταβατικών φαινομένων και άλλα αιφνίδια περιστατικά, τα οποία απομακρύνουν την τάση του dc ζυγού από την ζώνη κανονικής λειτουργίας για σύντομα χρονικά διαστήματα. Ιδανικά, το σύστημα δεν θα πρέπει να λειτουργεί σε αυτή τη ζώνη τάσεων για μεγάλες χρονικές περιόδους. Στην περίπτωση που συμβεί κάτι τέτοιο, θα αποτελεί ένδειξη κάποιου σφάλματος στο δίκτυο, ή της εξάντλησης της ενέργειας των αποθηκευτικών διατάξεων.

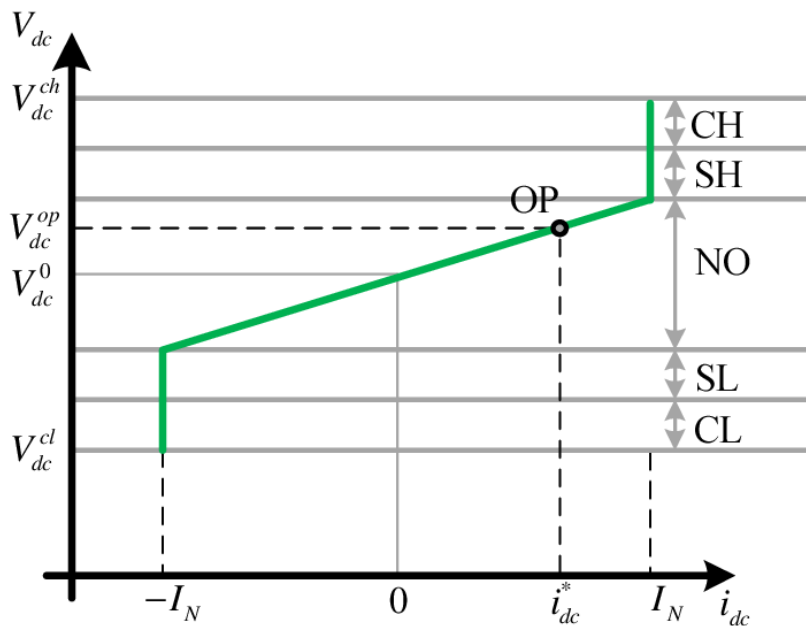
Τέλος, θεωρούνται επίσης μία ανώτερη και μία κατώτερη κρίσιμη ζώνη. Όταν η τιμή της τάσης εμπίπτει σε αυτές ζώνες, υπάρχει σοβαρή διαφορά μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας στο μικροδίκτυο, η οποία δεν είναι δυνατόν να καλυφθεί από τα στοιχεία αποθήκευσης. Στο σημείο αυτό, τα μη κρίσιμα φορτία και οι αντίστοιχες γεννήτριες θα πρέπει να αρχίσουν να τροποποιούν την αναφορά τους, προκειμένου να αποφευχθεί η κατάρρευση του συστήματος.

Στη συνέχεια, θα πρέπει να οριστεί η συμπεριφορά κάθε είδους στοιχείου που μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο για κάθε μία από τις προαναφερθείσες ζώνες. Μέσω της διαδικασίας αυτής, θα προκύψουν προηγμένες χαρακτηριστικές droop, οι οποίες θα παραμένουν λειτουργικές ακόμα και σε έκτακτα περιστατικά, όπως αποσύνδεση ενός μετατροπέα, κορεσμός ενός στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας, εξάντληση των αποθεμάτων ενέργειας και άλλα.

Παρακάτω, θα δούμε τους ορισμούς των χαρακτηριστικών droop για κάθε είδος στοιχείου. Σχετικά με το πρόσημο του ρεύματος, χρησιμοποιείται η εξής σύμβαση: θετικό θεωρείται το ρεύμα που αποφορτίζει τον ζυγό dc, ενώ αρνητικό εκείνο που τον φορτίζει.

#### A. Δικατευθυντική χαρακτηριστική droop.

Η ακόλουθη χαρακτηριστική droop προτείνεται για δικατευθυντικά, μη κρίσιμα στοιχεία.



Εικόνα 4.24 Χαρακτηριστική droop για ένα δικατευθυντικό, μη κρίσιμο στοιχείο [22].

Το να είναι ένα στοιχείο δικατευθυντικό σημαίνει ότι μπορεί να δράσει τόσο ως φορτίο, όσο και ως γεννήτρια. Το να είναι μη κρίσιμο σημαίνει ότι η αναφορά της ισχύος είναι δυνατόν να αλλάξει ανά πάσα στιγμή χωρίς περιορισμούς. Τέτοιο στοιχείο θα μπορούσε να είναι μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτή είναι η κατηγορία των στοιχείων που είναι κυρίως υπεύθυνα για τη ρύθμιση της τάσης του dc ζυγού.

Ορισμένες ιδιαιτερότητες της καμπύλης αυτής είναι οι εξής:

- Στην ονομαστική dc τάση, το ρεύμα που απορροφάται ή εγχύεται είναι ίσο με το μηδέν.
- Επιδεικνύεται αναλογική συμπεριφορά στην ζώνη κανονικής λειτουργίας, εξομοιώνοντας μία εικονική αντίσταση, δηλαδή ισχύει ότι:

$$i_{dc}^* = \frac{V_{dc}^{OP} - V_{dc}^0}{r_d} \quad (4.3.3.1)$$

$$r_d = \frac{NO/2}{I_N} \quad (4.3.3.2)$$

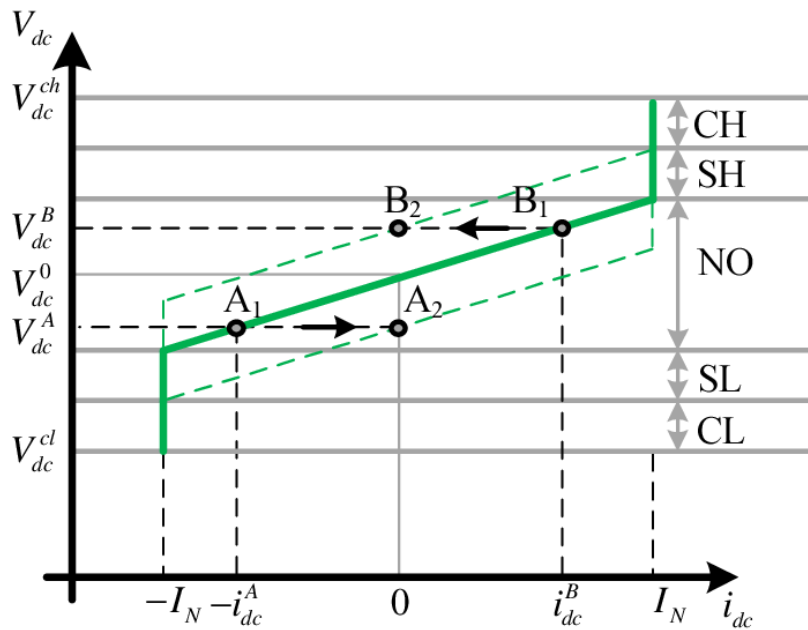
- Στις ασφαλείς και στις κρίσιμες ζώνες, το ρεύμα σταθεροποιείται στο ονομαστικό του μετατροπέα.

Ένας μετατροπέας που ελέγχεται από αυτόν το τύπο χαρακτηριστικής droop θα προσπαθήσει να αντισταθμίσει οποιαδήποτε μεταβολή της τάσης εγχύοντας ή απορροφώντας ρεύμα. Τη στιγμή που η τάση αγγίζει τις ασφαλείς ζώνες, ο μετατροπέας έχει κάνει ό,τι ήταν δυνατό για να σταθεροποιήσει την τάση, και λειτουργεί με την πλήρη ισχύ του.

Ένας παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, όταν εφαρμόζεται αυτή η στρατηγική ελέγχου σε μπαταρίες είναι ότι η ποσότητα της ισχύος που είναι σε θέση να απορροφήσει ή να αποδώσει μία μπαταρία εξαρτάται από την στάθμη φόρτισής της. Μία μπαταρία που είναι κοντά στην πλήρη αποφόρτιση μπορεί να αποδώσει μόνο μία μικρή ποσότητα ισχύος, αλλά μπορεί να απορροφήσει ονομαστικό ρεύμα.

Παρομοίως, σε μια μπαταρία που είναι σχεδόν πλήρως φορτισμένη, δεν μπορεί να εισαχθεί ρεύμα στην μπαταρία, αλλά μπορεί να εξαχθεί.

Για το λόγο αυτό θεωρούμε δύο διαστήματα, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για να αποτυπώσουν αυτή τη συμπεριφορά. Το διάστημα  $[SoC_{h1}, SoC_{h2}]$  είναι το διάστημα στο οποίο η μπαταρία είναι σχεδόν πλήρως φορτισμένη και το  $I_N$  είναι περιορισμένο. Το  $[SoC_{l1}, SoC_{l2}]$  είναι το αντίστοιχο διάστημα για τη χαμηλή φόρτιση. Θεωρείται ότι, εκτός των διαστημάτων αυτών, η μπαταρία μπορεί να κυκλοφορεί ονομαστικό ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Χρησιμοποιούμε επίσης την στάθμη φόρτισης (state of charge, SoC) για να ελέγξουμε την κατακόρυφη μετατόπιση της χαρακτηριστικής droop. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



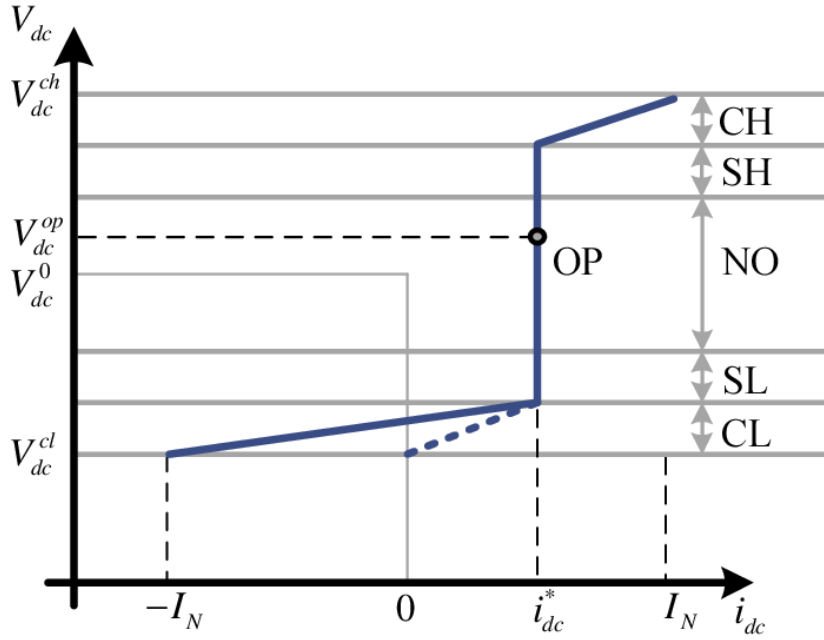
Εικόνα 4.25 Χαρακτηριστική droop για ένα στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας [22].

Στο σχήμα αυτό απεικονίζονται δύο περιπτώσεις, οι οποίες αποσαφηνίζουν τη λειτουργία της συγκεκριμένης χαρακτηριστικής droop. Στην πρώτη περίπτωση, ο μετατροπέας υποτίθεται ότι λειτουργεί σε ένα λειτουργικό σημείο,  $A_1$ , αποφορτίζοντας τη μπαταρία με ρεύμα  $-i_{dc}^A$ . Καθώς συνεχίζεται η αποφόρτιση, η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας θα φτάσει τελικά το όριο  $SoC_{l2}$ . Στο σημείο αυτό, ο μετατροπέας θα αρχίσει να μετατοπίζει γραμμικά και προς τα κάτω την droop χαρακτηριστική του καθώς η στάθμη φόρτισης μειώνεται. Καθώς αυτή η διαδικασία εξακολουθεί, η χαρακτηριστική droop φτάνει σε ένα σημείο, στο οποίο η ίδια τάση,  $V_{dc}^A$  θα καθορίσει ένα λειτουργικό σημείο,  $A_2$ , στο οποίο το ρεύμα αποφόρτισης θα είναι μηδενικό. Ανάλογα λειτουργεί ο έλεγχος και στο υψηλό άκρο της στάθμης φόρτισης.

## B. Ψευδο-κρίσιμη χαρακτηριστική droop.

Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει τη χαρακτηριστική για τα ψευδο-κρίσιμα στοιχεία:





Εικόνα 4.26 Χαρακτηριστική droop για τα μονοκατευθυντικά (συμπαγής γραμμή) και τα δικάτευθυντικά (διακεκομμένη γραμμή) ψευδο-κρίσιμα στοιχεία [22].

Ένα τέτοιο στοιχείο παρουσιάζει ψευδο-κρίσιμη συμπεριφορά όταν η τάση του dc ζυγού εμπίπτει στη ζώνη κανονικής λειτουργίας, ή σε μία από τις ασφαλείς ζώνες. Κρίσιμη συμπεριφορά σημαίνει ότι τα στοιχεία αυτά δρουν σαν μια σταθερή πηγή ισχύος και δεν λαμβάνουν υπόψη τους την τιμή της τάσης, όταν προσδιορίζουν την αναφορά της ισχύος τους. Χαρακτηρίζονται ψευδο-κρίσιμα, διότι, όταν η dc τάση περάσει στις κρίσιμες ζώνες, τα στοιχεία αυτά εγκαταλείπουν την κρίσιμη συμπεριφορά τους και αρχίζουν να ρυθμίζουν τη συμπεριφορά τους με παρόμοιο τρόπο με τα στοιχεία στα οποία έγινε αναφορά στο προηγούμενο τμήμα της παρούσας ανάλυσης. Η καινούρια αναφορά της ισχύος (ισοδύναμα, του ρεύματος) υπολογίζεται ως μία απόκλιση από την αρχική αναφορά του ρεύματος,  $i_{dc}^*$ , που είχε τεθεί στον μετατροπέα, προτού η τάση φτάσει την κρίσιμη ζώνη.

$$i_{dc}^c = \begin{cases} i_{dc}^* - \frac{V_{dc}^c - V_{dc}^{cl}}{r_d}, & V_{dc}^c \in [V_{dc}^{cl}, V_{dc}^{cl} + CL] \\ i_{dc}^* + \frac{V_{dc}^{ch} - V_{dc}^c}{r_d}, & V_{dc}^c \in [V_{dc}^{ch}, -CH, V_{dc}^{ch}] \end{cases} \quad (4.3.3.3)$$

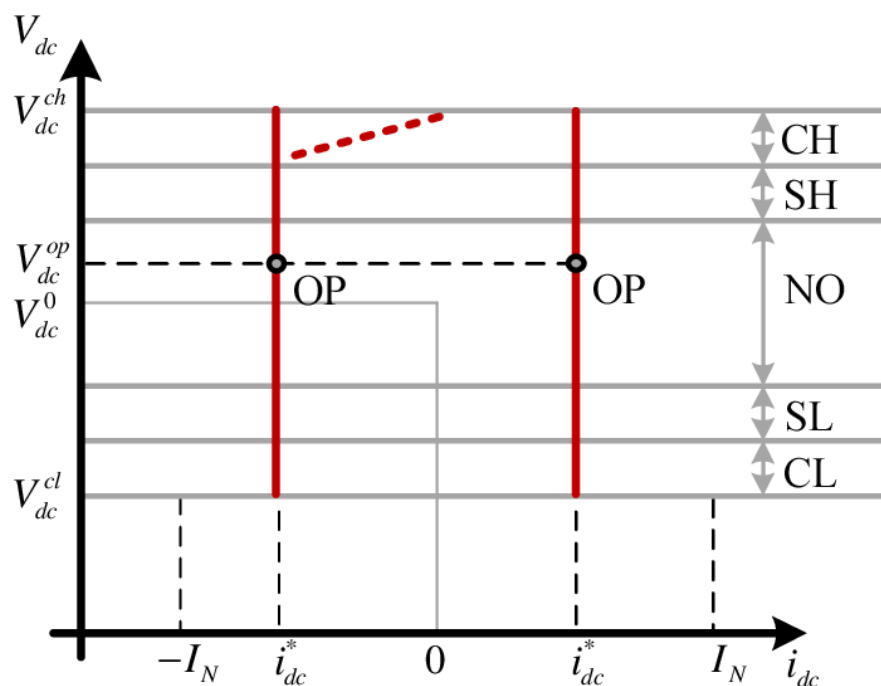
$$r_d = \begin{cases} \frac{CL}{i_{dc}^* + I_N}, & \text{για την CL ζώνη.} \\ \frac{CH}{I_N - i_{dc}^*}, & \text{για την CH ζώνη.} \end{cases} \quad (4.3.3.4)$$

Δύο χαρακτηριστικές απεικονίζονται στην παραπάνω εικόνα. Η δικάτευθυντική επιτρέπει κάτω από κρίσιμες συνθήκες τη ροή της ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αυτός ο τύπος συμπεριφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν μετατροπέα, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη σύνδεση με ένα AC δίκτυο, με το οποίο ισχύει κάποια ρήτρα. Αν το dc μικροδίκτυο λειτουργεί κανονικά, παρέχεται η απαιτούμενη ισχύς, όπως προβλέπεται από τη ρήτρα. Ωστόσο, αν η τάση στο μικροδίκτυο φτάσει τις κρίσιμες ζώνες, τότε η ρήτρα παραβλέπεται, καθώς η ασφάλεια του μικροδικτύου αποτελεί μέγιστη προτεραιότητα.

Η μονοκατευθυντική χαρακτηριστική θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από γεννήτριες ή φορτία τα οποία μπορούν να αυξομειώσουν την παραγωγή/ κατανάλωση ισχύος τους, όταν η τάση φτάσει τα κρίσιμα επίπεδα. Σε αυτή την κατηγορία, θα μπορούσαμε να συμπεριλάβουμε τις γεννήτριες ντίζελ, τις κυψέλες καυσίμου, ακόμα και ορισμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ελεγχόμενες από MPPT, καθώς επίσης και φορτία, όπως έξυπνες συσκευές θέρμανσης ή ψύξης.

### Γ. Κρίσιμη χαρακτηριστική droop.

Αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.27 Χαρακτηριστική droop για κρίσιμα φορτία και γεννήτριες [22].

Ένα κρίσιμο φορτίο ή μία κρίσιμη πηγή δεν θα μειώσει την παραγωγή του ακόμα κι αν η dc τάση βρίσκεται στις κρίσιμες ζώνες. Αφού οι περισσότερες γεννήτριες μπορούν να μειώσουν με ασφάλεια την ισχύ τους αν χρειαστεί, μία μικρή παραλλαγή, η οποία απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή, έχει προστεθεί για τις κρίσιμες γεννήτριες. Ανανεώσιμες πηγές, όπως φωτοβολταϊκά ή αιολική ενέργεια, θα συνδέονταν με το σύστημα μέσω μιας τέτοιας σύνδεσης [22].

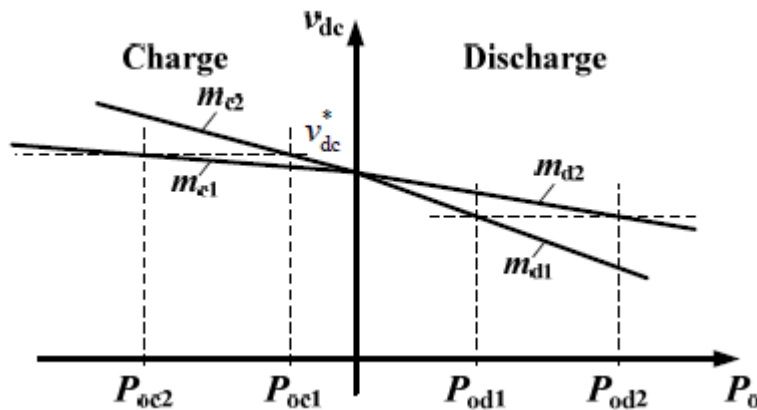
#### 4.3.3.2 Τεχνική droop με εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης των αποθηκευτικών διατάξεων.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα, παρόλα αυτά η έξοδος τους είναι στοχαστική και διαλείπουσα. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, επιστρατεύονται διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας, προκειμένου να μειώσουν τη διακύμανση της τάσης. Οι διατάξεις αυτές είναι συνήθως διεσπαρμένες, όπως είναι και οι πηγές. Μία διάταξη αποθήκευσης ενέργειας σχηματίζεται συνήθως από μονάδες μπαταρίας συνδεδεμένες σε σειρά. Το σύμπλεγμα αυτό συνδέεται με τη σειρά του στον κοινό ζυγό. Το σύστημα ελέγχου των διατάξεων αυτών αποτελείται από δύο μέρη: το σύστημα διαχείρισης της

μπαταρίας και το σύστημα του μετατροπέα ισχύος. Από αυτά, το αντικείμενο του πρώτου είναι η παρακολούθηση της κατάστασης της κάθε μονάδας μπαταρίας της διάταξης αποθήκευσης ενέργειας και η εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης της κάθε διάταξης, ενώ ο δεύτερος ασχολείται με τον έλεγχο της τάσης και του ρεύματος εξόδου, καθώς και με την επίτευξη του κατάλληλου διαμοιρασμού του φορτίου. Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε σωστά τις διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας και να επιμηκύνουμε τον χρόνο ζωής τους θα πρέπει 1) να εξισορροπείται η στάθμη κάθε μονάδας μπαταρίας μιας αποθηκευτικής διάταξης και 2) να εξισορροπούνται οι στάθμες φόρτισης όλων των αποθηκευτικών διατάξεων του μικροδικτύου μεταξύ τους. Στο σημείο αυτό, θα ασχοληθούμε με μια τροποποίηση του ελέγχου droop που αποσκοπεί στην επίτευξη του δεύτερου από τους παραπάνω στόχους.

Αρχή της προτεινόμενης μεθόδου.

Η συμβατική καμπύλη droop του πρώτου τεταρτημορίου επεκτείνεται, οπότε προκύπτει η καμπύλη droop δύο τεταρτημορίων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.28 Καμπύλη droop δύο τεταρτημορίων [23].

Το τμήμα της καμπύλης που ανήκει στο πρώτο τεταρτημόριο σχετίζεται με την αποφόρτιση, ενώ εκείνο στο δεύτερο με τη φόρτιση.

Η έκφραση του ελέγχου droop στα dc μικροδίκτυα δίνεται από την:

$$v_{dci}^* = v_{dc}^* - m_i P_{oi} \quad (4.3.3.5)$$

Όπου  $v_{dci}^*$ ,  $m_i$  και  $P_{oi}$  είναι η αναφορά της dc τάσης εξόδου, ο συντελεστής droop και η ισχύς του μετατροπέα υπ' αριθμόν  $i$ , αντίστοιχα, ενώ  $v_{dc}^*$  είναι η αναφορά της dc τάσης στο κενό φορτίο. Το  $i$  είναι ένας αριθμός, ο οποίος αντιστοιχίζεται σε κάθε αποθηκευτική διάταξη.

Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι το  $P_{oi}$  είναι θετικό κατά την αποφόρτιση και αρνητικό κατά τη φόρτιση.

Προκειμένου να εξισορροπηθούν οι στάθμες φόρτισης των διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας που είναι συνδεδεμένες στο μικροδίκτυο, ο συντελεστής droop τίθεται ίσος με:

$$m_i = m_c \text{SoC}_i^n \quad (4.3.3.6)$$

Όπου  $m_c$  είναι ο συντελεστής droop όταν η αποθηκευτική διάταξη είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ  $n$  είναι ο εκθέτης που ρυθμίζει την ταχύτητα της εξισορρόπησης.

Θεωρώντας ότι 1) οι πτώσεις τάσης πάνω στις γραμμές είναι αμελητέες και 2) ότι χρησιμοποιείται ένας ιδανικός ελεγκτής για την τάση, οπότε η πραγματική τάση του κάθε μετατροπέα ισούται με την τάση αναφοράς του, προκύπτει από τις παραπάνω σχέσεις ότι:

$$P_{o1}: P_{o2}: \dots: P_{ok} = \frac{1}{\text{SoC}_1^n}: \frac{1}{\text{SoC}_2^n}: \dots: \frac{1}{\text{SoC}_k^n} \quad (4.3.3.7)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι κατά τη φόρτιση, αν  $\text{SoC}_i > \text{SoC}_j$ , τότε  $|P_{oi}| < |P_{oj}|$ , το οποίο σημαίνει ότι η ταχύτητα αύξησης της  $\text{SoC}_i$  είναι μικρότερη από εκείνη της  $\text{SoC}_j$ . Συνεπώς οι  $\text{SoC}_i$  και  $\text{SoC}_j$  σταδιακά εξισορροπούνται και οι εγχυόμενες ισχύεις  $P_i$  και  $P_j$  εξισώνονται.

Κατά την αποφόρτιση, ο συντελεστής droop τίθεται ίσος με:

$$m_i = \frac{m_d}{\text{SoC}_i^n} \quad (4.3.3.8)$$

Όπου  $m_d$  είναι ο συντελεστής droop στην αποφόρτιση όταν η αποθηκευτική διάταξη είναι πλήρως φορτισμένη.

Ακολουθώντας το ίδιο σκεπτικό, το οποίο αναπτύξαμε για τη φόρτιση, λαμβάνουμε την παρακάτω σχέση:

$$P_{o1}: P_{o2}: \dots: P_{ok} = \text{SoC}_1^m: \text{SoC}_2^m: \text{SoC}_3^m \quad (4.3.3.9)$$

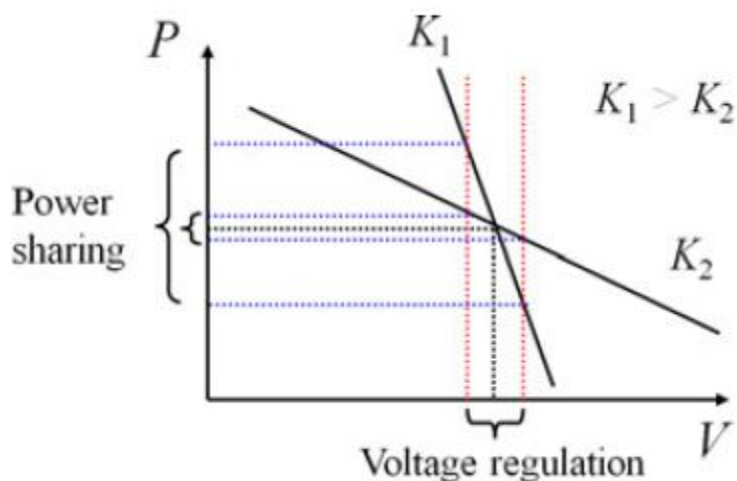
Από τη σχέση αυτή συνάγεται ότι κατά την αποφόρτιση, αν  $\text{SoC}_i > \text{SoC}_j$ , τότε  $|P_{oi}| > |P_{oj}|$ , το οποίο σημαίνει ότι η ταχύτητα μείωσης της  $\text{SoC}_i$  είναι υψηλότερη από εκείνη της  $\text{SoC}_j$ . Συνεπώς οι  $\text{SoC}_i$  και  $\text{SoC}_j$  σταδιακά εξισορροπούνται και οι ισχύεις εξόδου των δύο αποθηκευτικών διατάξεων εξισώνονται [23].

### **4.3.3.3 Έλεγχος της τάσης DC μικροδικτύων, με ασαφή έλεγχο και προγραμματισμό του κέρδους.**

Ο έλεγχος που θα εξετάσουμε στο σημείο αυτό χρησιμοποιείται για αποθηκευτικές διατάξεις ενέργειας και πετυχαίνει ταυτόχρονα: τον έλεγχο της dc τάσης του μικροδικτύου, τον σωστό διαμοιρασμό της ισχύος ανάμεσα στις αποθηκευτικές διατάξεις και την εξισορρόπηση των αποθηκευμένων ενεργειών μεταξύ των αποθηκευτικών διατάξεων. Οι αποθηκευτικές διατάξεις που θεωρούνται στην περίπτωση αυτή είναι ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλής στρώσης. Στη συνέχεια, εξετάζουμε τη μέθοδο του εν λόγω ελέγχου:

A. Προγραμματισμός του κέρδους του droop για την επίτευξη καλύτερου διαμοιρασμού της ισχύος μεταξύ των αποθηκευτικών διατάξεων.

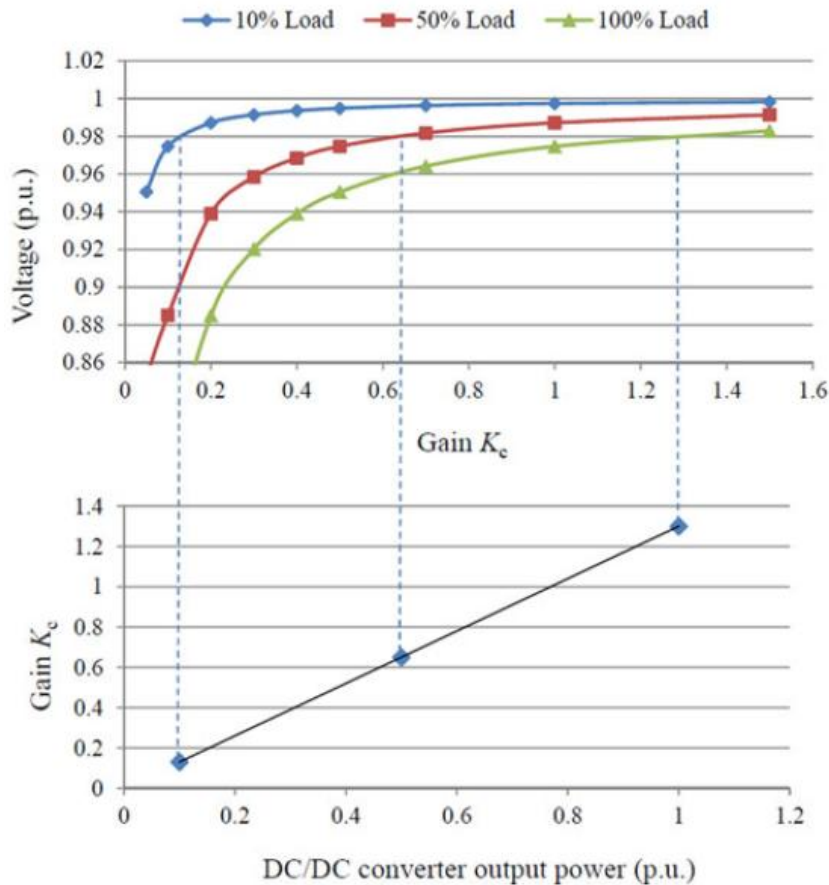
Όταν η DC τάση ελέγχεται από διάφορους μετατροπείς, είναι δύσκολο να επιτευχθούν ταυτόχρονα η σωστή ρύθμιση της τάσης και ο κατάλληλος διαμοιρασμός της ισχύος. Το γεγονός αυτό καταδεικνύεται ευκρινώς στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 4.29 Το ασυμβίβαστο μεταξύ της σωστής ρύθμισης της τάσης και του κατάλληλου διαμοιρασμού της ισχύος [24].

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η ρύθμιση της τάσης είναι καλύτερη με ένα μεγαλύτερο DC κέρδος, όμως η επιλογή ενός μεγάλου DC κέρδους υποβαθμίζει τον διαμοιρασμό της ισχύος. Το ασυμβίβαστο αυτό, μεταξύ της ρύθμισης της τάσης και του διαμοιρασμού της ισχύος, είναι δυνατόν να αμβλυνθεί μέσω του προγραμματισμού του κέρδους της μεθόδου droop.

Εξετάστηκε το σφάλμα της DC τάσης στη μόνιμη κατάσταση συναρτήσει του κέρδους του droop, έστω  $k_c$ , και της τάσης εξόδου του μετατροπέα, και προέκυψε η ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 3.30 Επάνω: Η επιρροή του κέρδους της μεθόδου droop και της ισχύος εξόδου του μετατροπέα στο σφάλμα μόνιμης κατάστασης της DC τάσης. Κάτω: Η εξαγωγή της σχέσης προγραμματισμού του κέρδους της μεθόδου droop [24].

Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό, το σφάλμα μόνιμης κατάστασης της DC τάσης αυξάνεται, όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο ή το κέρδος  $k_c$  είναι μικρότερο. Υποθέτοντας ότι η διακύμανση της DC τάσης δεν επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερη από 2%, μπορούμε να οδηγηθούμε στην ακόλουθη σχέση, η οποία συνδέει το κέρδος  $k_c$  με την ισχύ εξόδου  $P_{out}$ .

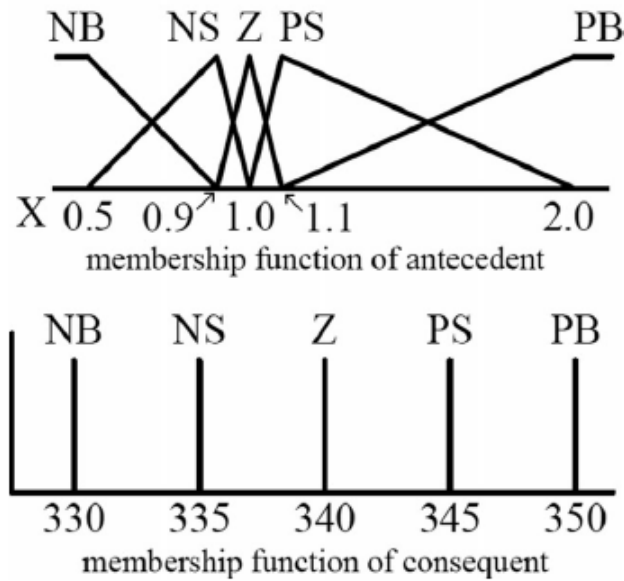
$$k_c = \max(1.3|P_{out}|, 0.1) \quad (4.3.3.18)$$

Όπου υποτίθεται ότι η ελάχιστη τιμή του  $k_c$  είναι 0.1. Αυτός ο έλεγχος επιτυγχάνει έναν καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ της ρύθμισης της DC τάσης και του διαμοιρασμού της ισχύος στους μετατροπείς. Ωστόσο, χρειάζεται επίσης έλεγχος της αποθηκευμένης ενέργειας των πηγών οι οποίες συνδέονται στους μετατροπείς, προκειμένου να αποφευχθούν τα πλεονάσματα και τα ελλείματα ενέργειας.

## Β. Έλεγχος για την εξισορρόπηση της αποθηκευμένης ενέργειας.

Για τον έλεγχο της αποθηκευμένης ενέργειας των διατάξεων οι οποίες συνδέονται στους μετατροπείς, προτείνεται ένας ασαφής έλεγχος, ο οποίος αλλάζει την αναφορά της DC τάσης, προκειμένου να εξισορροπήσει την αποθηκευμένη ενέργεια. Η ακόλουθη εικόνα δείχνει τις συναρτήσεις συμμετοχής του ασαφούς ελέγχου:

NB : Negative Big, NS : Negative Small Z : Zero,  
PS : Positive Small, PB : Positive Big



Εικόνα 4.31 Κανόνας ελέγχου του ασαφούς ελέγχου [24].

Η είσοδος  $X_k$  είναι ο λόγος της αποθηκευμένης ενέργειας μιας αποθηκευτικής διάταξης προς την συνολική αποθηκευμένη ενέργεια του μικροδικτύου, όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$X_k = \frac{W_k}{\left\{ \frac{1}{n-1} \times (\sum_{i=1}^n W_i - W_k) \right\}} \quad (4.3.3.19)$$

Η  $W_k$  που αναφέρεται σε αυτήν δίνεται από τον τύπο:

$$W_k = \frac{\frac{1}{2}C_k u^2_k - \frac{1}{2}C_k u^2_{min}}{\frac{1}{2}C_k V^2_{max} - \frac{1}{2}C_k V^2_{min}} = \frac{u^2_k - V^2_{min}}{V^2_{max} - V^2_{min}} \quad (4.3.3.20)$$

Όπου: με  $n$  αναφέρεται ο συνολικός αριθμός των αποθηκευτικών διατάξεων,  $C_k$  και  $u_k$  είναι η χωρητικότητα και η τάση της  $k$ -οστής αποθηκευτικής διάταξης, αντίστοιχα. Οι  $V_{max}$  και  $V_{min}$  είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τάση λειτουργίας των αποθηκευτικών διατάξεων αντίστοιχα.

Προκειμένου να ληφθεί η αναφορά της τάσης, αρχικά υπολογίζεται το  $X_k$  από τις παραπάνω σχέσεις. Έπειτα, σχηματίζεται μία συνάρτηση συμμετοχής από τις συναρτήσεις συμμετοχής PB, PS, Z, NS και NB, από την οποία λαμβάνεται τελικά η αναφορά της DC τάσης. Για παράδειγμα, αν το  $X_1$  για μία αποθηκευτική διάταξη είναι ίσο με 1.7, οι τιμές των προγενέστερων (antecedent) συναρτήσεων συμμετοχής PS και PB είναι 0.4 και 0.6, αντιστοίχως. Η δε  $V^*_{DC}$  της αποθηκευτικής αυτής διάταξης προσδιορίζεται ως ακολούθως:

$$V^*_{DC} = 345 \times 0.4 + 350 \times 0.6 = 348 [V] \quad (4.3.3.21)$$

Υποθέτοντας ότι η DC τάση έχει μία ανοχή του  $\pm 5\%$ , η ανώτατη και κατώτερη αναφορά της τάσης θα πρέπει να είναι εντός του 3%, καθότι ο έλεγχος

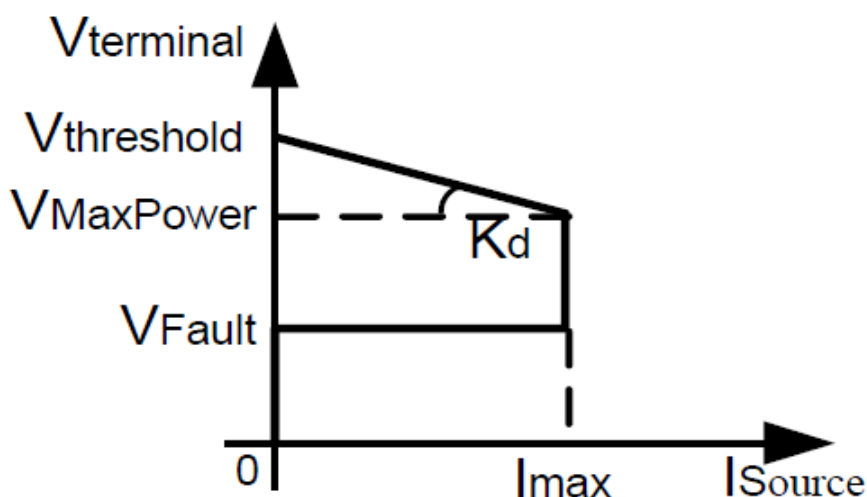
προγραμματισμού του droop κέρδους περιελάμβανε ήδη μία ανοχή του 3%. Συνεπώς, ως ανώτερο και κατώτερο όριο επιλέχθηκαν τα 350 και τα 330V, αντίστοιχα. Ισοσκελή τρίγωνα χρησιμοποιούνται συνήθως ως συναρτήσεις συμμετοχής. Ωστόσο, προκειμένου να πετύχουμε καλή ρύθμιση της τάσης, οι κορυφές των προγενέστερων συναρτήσεων PS και NS μεταφέρθηκαν στο 1.1 και το 0.9, αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις συμμετοχής ελήφθησαν από αριθμητική εξομοίωση στον υπολογιστή. Η σύλληψη του ασαφούς αυτού ελέγχου έγινε με βάση την εμπειρία [24].

#### 4.3.3.4 Έλεγχος τάσεως- ισχύος βασισμένος στην τάση.

Οι μέθοδοι droop που εξετάσαμε προηγουμένως ανήκουν σε μία κατηγορία μεθόδων που ονομάζονται παθητικές.

Μία καινούρια παραλλαγή του ελέγχου droop είναι ο έλεγχος τάσεως-ισχύος που βασίζεται στην τάση. Η μέθοδος αυτή παρέχει το πιο επίπεδο και σχεδόν ονομαστικό προφίλ τάσης, το οποίο είναι απαραίτητο για τη λειτουργία ευαίσθητων φορτίων. Η μέθοδος αυτή εμποδίζει επίσης την πτώση τάσης να πάρει μεγάλες τιμές στην περίπτωση που έχουμε μακριές γραμμές και επιπλέον ακυρώνει τα κυκλοφορούντα ρεύματα.

Η παρακάτω χαρακτηριστική τάσεως – ρεύματος ανατίθεται σε κάθε πηγή:



Εικόνα 4.32 Η χαρακτηριστική τάσεως - ρεύματος της μεθόδου [25].

Στο σχήμα αυτό,  $V_{Terminal}$  είναι η τερματική τάση της μονάδας ΔΠ, ενώ  $I_{source}$  είναι το ρεύμα που αυτή εγχύει.  $K_d$  είναι ο συντελεστής droop της χαρακτηριστικής.

Η μέθοδος λειτουργεί ως εξής: Η μονάδα ΔΠ παράγει ισχύ όταν η τερματική της τάση είναι μικρότερη από  $V_{Threshold}$ . Καθώς η τερματική τάση μειώνεται, η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ,  $P_{max}$  στην τάση  $V_{MaxPower}$ . Το εγχυόμενο ρεύμα,  $I_{source}$ , υπολογίζεται από την:

$$I_{source} = \frac{(V_{terminal} - V_{threshold})}{k_d} \quad (4.3.5.1)$$

Η εγχυόμενη ισχύς παραμένει σταθερή και ίση με  $I_{max}$ , για όσο χρόνο η τερματική τάση είναι μεταξύ των τιμών  $V_{MaxPower}$  και  $V_{Fault}$ . Όταν η τερματική τάση γίνει μικρότερη από την  $V_{Fault}$ , η μονάδα ΔΠ απενεργοποιείται. Η τιμή της  $V_{Fault}$  εξαρτάται

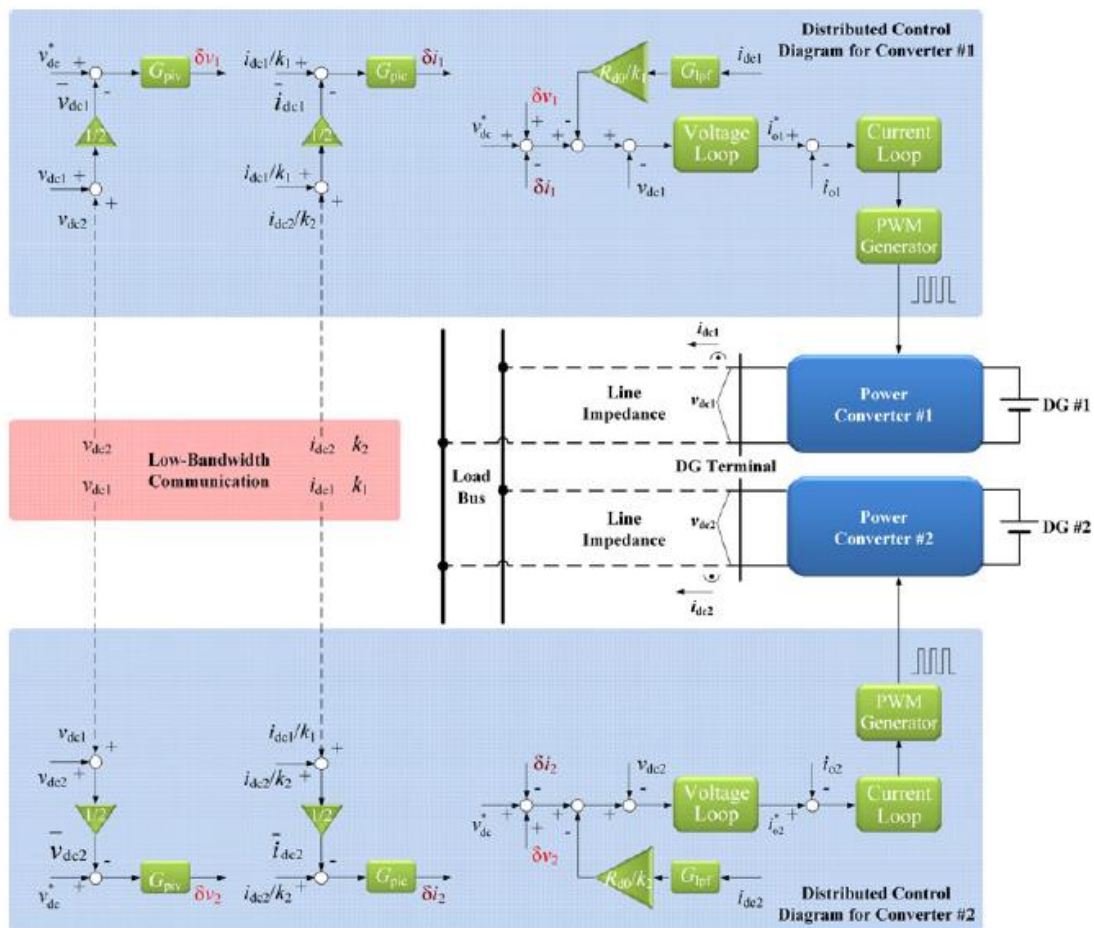


από τα χαρακτηριστικά της μονάδας ΔΠ, όπως το κατώτερο όριο της επιτρεπόμενης τάσης και η τιμή της τάσης στην οποία η τάση αρχίζει να καταρρέει. Η  $V_{\text{Fault}}$  για όλες τις μονάδες ΔΠ του μικροδικτύου είναι η ίδια [25].

#### 4.3.4 Εναλλακτικές προσεγγίσεις για τον δευτερογενή έλεγχο.

##### 4.3.4.1 Μέθοδος ελέγχου droop βασισμένη σε επικοινωνία μικρού εύρους ζώνης με ρύθμιση της τάσης του ζυγού DC και βελτιωμένη ακρίβεια διαμοιρασμού του ρεύματος.

Στη μέθοδο αυτή, η βελτίωση της ακρίβειας του διαμοιρασμού του ρεύματος και η επαναφορά της τάσης του ζυγού dc πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Ένα σύστημα επικοινωνίας μικρού εύρους ζώνης χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των τάσεων και των ρευμάτων εξόδου των διαφόρων μετατροπέων του μικροδικτύου. Η τοπολογία της προτεινόμενης μεθόδου δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 4.33 Η τοπολογία της προτεινόμενης μεθόδου [21].

Ο συμβατικός έλεγχος droop χρησιμοποιείται προκειμένου να επιτευχθεί προσεγγιστικά ο αναλογικός διαμοιρασμός του ρεύματος στο φορτίο. Έπειτα, οι τάσεις και τα ρεύματα εξόδου στην DC πλευρά των μετατροπέων μεταφέρονται, μέσω του συστήματος επικοινωνίας, στους άλλους μετατροπείς. Οι PI ελεγκτές για τη μέση τάση και το μέσο ρεύμα χρησιμοποιούνται σε κάθε ένα από τα τοπικά

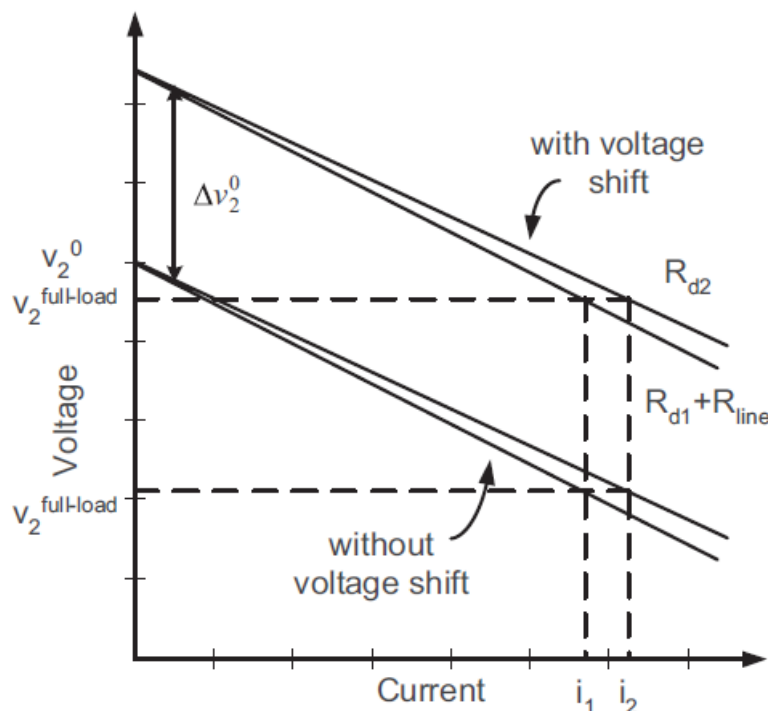
συστήματα ελέγχου. Για κάθε ελεγκτή μέσης τάσης, η τιμή αναφοράς είναι  $u^*_{dc}$  και ελέγχεται η μεση τιμή της DC τάσης. Ως αποτέλεσμα, κάθε μία από τις τάσεις εξόδου μπορεί να επανέλθει στην τιμή αναφοράς. Ταυτόχρονα, η τιμή αναφοράς για κάθε έναν από τους ελεγκτές μέσου ρεύματος είναι  $i_{dc1}/k_1$  ή  $i_{dc2}/k_2$ , όπου τα  $k_1$  και  $k_2$  είναι οι αναλογίες διαμοιρασμού του ρεύματος. Η μέση τιμή των  $i_{dc1}/k_1$  και  $i_{dc2}/k_2$  είναι η μεταβλητή ανάδρασης. Συνεπώς, εξασφαλίζεται ο αναλογικός διαμοιρασμός του ρεύματος εξόδου. Όλοι οι υπολογισμοί και οι ελεγκτές υλοποιούνται τοπικά. Έτσι, η προτεινόμενη μέθοδος είναι αποκεντρωμένη, κάτι που συνάδει με την αποκεντρωμένη τοπολογία ενός DC μικροδίκτυου [21].

#### 4.3.4.2 Διανεμημένος έλεγχος για DC μικροδίκτυα, ο οποίος εξασφαλίζει αναλογικό διαμοιρασμό του φορτίου και βελτιωμένη ρύθμιση της τάσης.

Στη μέθοδο αυτή, οι συμβατικές χαρακτηριστικές droop όλων των μετατροπέων του μικροδίκτυου μετατοπίζονται κατά μήκος του άξονα της τάσης κατά  $\Delta u_j^0$ , σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$u^{ref}_j = u^0_j + \Delta u_j^0 - d_j i_j \quad (4.3.3.10)$$

Η μετατόπιση της τάσης,  $\Delta u_j^0$  εξαρτάται από το συνολικό φορτίο του συστήματος. Με αύξηση του φορτίου, το  $\Delta u_j^0$  αυξάνεται, φέρνοντας την στιγμιαία αναφορά της τάσης,  $u^{ref}_j$ , κοντά στην ονομαστική τάση,  $u^0_j$ . Η επίδραση της εν λόγω μεθόδου στις συμβατικές χαρακτηριστικές droop φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 4.34 Η κατακόρυφη μετατόπιση των χαρακτηριστικών droop στα πλαίσια της εν λόγω μεθόδου [26].

Στο σχήμα αυτό, παρατηρείται ότι, παρά τη χρήση υψηλής τιμής για το κέρδος droop, προκειμένου να εξασφαλιστεί ο ισοσκελισμένος διαμοιρασμός του φορτίου, η τάση λειτουργίας είναι κοντά στην ονομαστική τάση  $u^0_j$ . Για να καθοριστεί η τιμή της

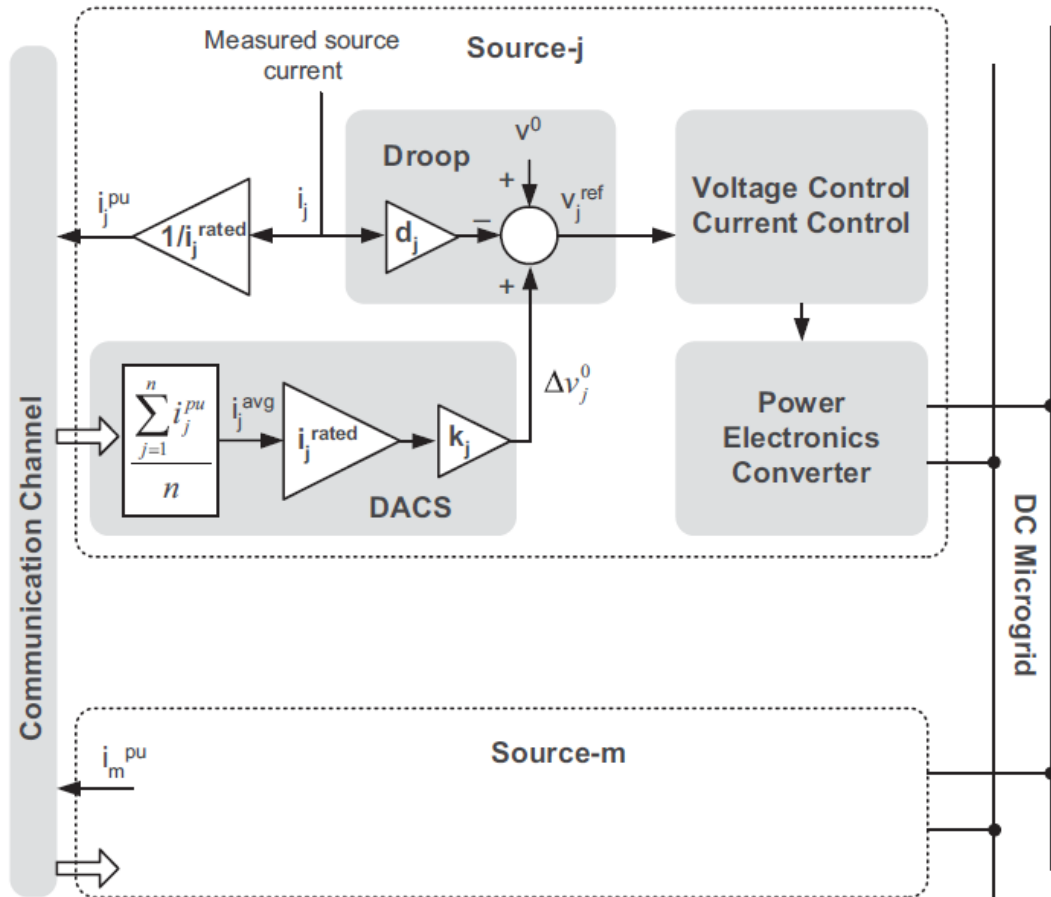
μετατόπισης της τάσης,  $\Delta u_j^0$  χρησιμοποιείται μία επικοινωνία χαμηλού εύρους ζώνης, ως εξής: Ο ελεγκτής κάθε πηγής επικοινωνεί με εκείνους των άλλων πηγών και στέλνει το πλάτος του ρεύματος ανά μονάδα, το οποίο παρέχει. Χρησιμοποιώντας αυτήν την πληροφορία, ο ελεγκτής της κάθε μικροπηγής προσδιορίζει τη μέση τιμή του ρεύματος που παρέχουν όλες οι πηγές. Είναι:

$$i_j^{avg} = \frac{\sum_{m=1}^n i_m^{pu}}{n} \quad (4.3.3.11)$$

Όπου  $i_m^{pu}$  είναι το ρεύμα ανά μονάδα της m-οστής πηγής. Η μετατόπιση στο droop της κάθε πηγής τίθεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta u_j^0 = k_j i_j^{avg} i_j^{rated} \quad (4.3.3.12)$$

Όπου  $k_j$  και  $i_j^{rated}$  είναι το κέρδος της μετατόπισης και το ονομαστικό ρεύμα της j-οστής πηγής αντίστοιχα. Σε περίπτωση που το φορτίο αλλάξει, οι πηγές εξακολουθούν να μοιράζονται το φορτίο ισομερώς, χάρη στα μεγάλα κέρδη droop (δηλαδή χάρη στην απότομη κλίση των χαρακτηριστικών droop). Ακαριαία, η τάση του συστήματος, όπως αυτή δίνεται από την πρώτη από τις σχέσεις που αναφέραμε στην παράγραφο αυτή, είναι δυνατόν να αλλάξει από την ονομαστική της τιμή εξαιτίας μιας αλλαγής στο ρεύμα της πηγής. Αποκαθίσταται μόλις οι νέες τιμές των ρευμάτων κοινοποιούνται μεταξύ των πηγών και αφού υπολογιστούν νέες τιμές για τις μετατοπίσεις  $\Delta u_j^0$  της τάσης. Αυτός ο έλεγχος ονομάζεται ψηφιακός διαμερισμός μέσου ρεύματος. Το λειτουργικό διάγραμμα του ελέγχου φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 4.35 Το λειτουργικό διάγραμμα του εν λόγω ελέγχου [26].

### Επιλογή του κέρδους του droop, $d_j$ .

Η απόκλιση των ρευμάτων πηγών από τις ιδανικές τιμές τους δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$(\mathbf{M}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{M} \mathbf{D} + \mathbf{E}_{n \times n}) \Delta \mathbf{I} = \mathbf{M}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{M} \mathbf{V}^0 + \Delta \mathbf{I}_L \quad (4.3.3.13)$$

Όπου τα  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{D}$  και  $\mathbf{E}_{n \times n}$  είναι οι πίνακες πρόσπτωσης, αντίστασης, droop και ταυτότητας του δικτύου, αντίστοιχα. Τα  $\mathbf{V}^0$  και  $\Delta \mathbf{I}_L$  είναι διανύσματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις ονομαστικές τάσεις και την απόκλιση των ρευμάτων φορτίου. Η συνολική απόκλιση των ρευμάτων των πηγών από τις ιδανικές τιμές τους είναι  $\Delta \mathbf{I}$ . Οι κατάλληλες τιμές για τα κέρδη droop προσδιορίζονται αντικαθιστώντας τις παραμέτρους του συστήματος και τις απαιτούμενες αποκλίσεις των ρευμάτων των πηγών στην παραπάνω εξίσωση. Μεγάλα κέρδη droop απαιτούνται, προκειμένου να περιοριστούν σε μια μικρή τιμή οι αποκλίσεις των ρευμάτων. Όμως, αυτή η τακτική οδηγεί σε χαλαρή ρύθμιση της τάσης στην πλευρά του φορτίου. Αυτό το πρόβλημα επιλύεται μέσω της κατάλληλης επιλογής των κερδών μετατόπισης, όπως πρόκειται να δούμε αμέσως παρακάτω.

### Επιλογή του κέρδους μετατόπισης, $k_j$ .

Η τιμή του κέρδους μετατόπισης  $k_j$  προσδιορίζεται βάσει των ακόλουθων κριτηρίων:

- 1) Η τιμή της μετατόπισης  $\Delta u_j^0$  θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο γινόμενο του κέρδους droop και του ρεύματος πηγής,  $d_j i_j$ . Με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται ότι η πτώση τάσης εξαιτίας του droop αντισταθμίζεται από μία αντίστοιχη μετατόπιση της ονομαστικής τάσης. Έτσι, η τάση λειτουργίας είναι κοντά στην ονομαστική τάση του συστήματος.
- 2) Η χαρακτηριστικές droop όλων των πηγών θα πρέπει να μετατοπίζονται κατά την ίδια ποσότητα. Με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται ότι η μετατόπιση δεν θα επηρεάσει τον διαμοιρασμό του φορτίου. Συνεπώς, το γινόμενο του κέρδους μετατόπισης  $k_j$  και του ονομαστικού ρεύματος της πηγής  $i_j^{rated}$  θα πρέπει να είναι το ίδιο για όλες τις πηγές.
- 3) Στην περίπτωση που μόνο μία πηγή είναι σε λειτουργία, η:

$$i_j^{avg} = \frac{\sum_{m=1}^n i_m^{pu}}{n} \quad (4.3.3.14)$$

δείχνει ότι το μέσο ρεύμα  $i_j^{avg}$  ισούται με το ρεύμα πηγής  $i_j^{pu}$ .

Αντικαθιστώντας αυτό στην:

$$\Delta u_j^0 = k_j i_j^{avg} i_j^{rated} \quad (4.3.3.15)$$

Παίρνουμε ότι η μετατόπιση της τάσης είναι ίση με  $k_j i_j$ . Επομένως, η εξίσωση ελέγχου στην οποία καταλήγουμε απλοποιείται στην:

$$u^{ref}_j = u^0_j - (d_j - k_j) i_j \quad (4.3.3.16)$$

Για να έχουμε ευσταθή λειτουργία, η κλίση  $(d_j - k_j)$  θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός. Συνεπώς, το κέρδος μετατόπισης θα πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από το κέρδος droop, δηλαδή:

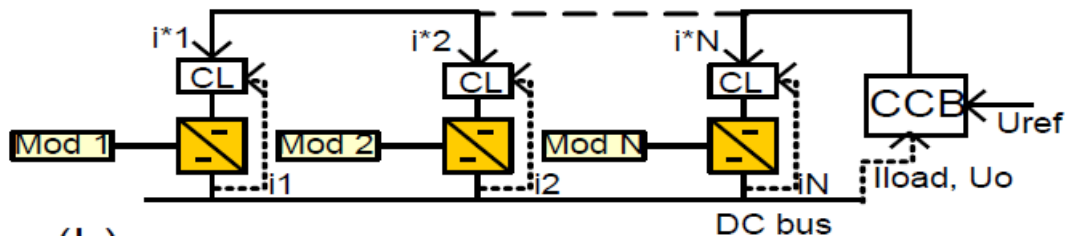
$$k_j \leq d_j \quad \forall 1 \leq j \leq n. \quad (4.3.3.17)$$

Στο σημείο αυτό, θα δούμε ορισμένους άλλους ελέγχους που έχουν αναπτυχθεί για DC μικροδίκτυα [26].

#### **4.3.4.3 Ενεργητικές μέθοδοι διαμοιρασμού του φορτίου.**

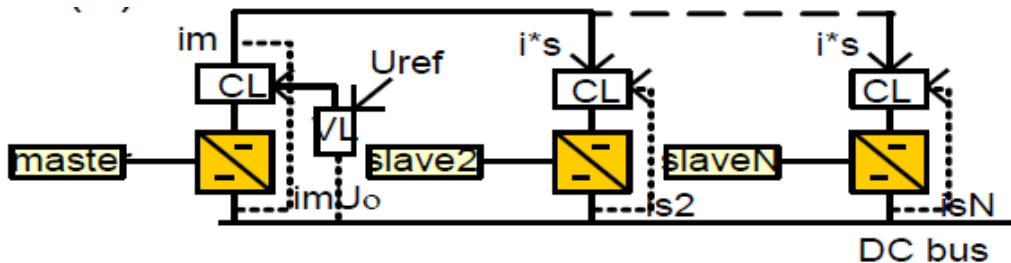
Οι μέθοδοι αυτές επιτυγχάνουν ταυτόχρονα καλή τάση εξόδου και ισορροπημένο διαμοιρασμό του ρεύματος, αλλά απαιτούν επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων. Μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες, στις οποίες γίνεται μια σύντομη αναφορά στη συνέχεια:

**Κεντρικός έλεγχος:** Ένας κεντρικός ελεγκτής είναι απαραίτητος σε αυτό το σχήμα, προκειμένου να θέτει το ρεύμα αναφοράς για κάθε μονάδα του δικτύου. Μετράται το ρεύμα του φορτίου και η τιμή αυτή αποστέλλεται στον κεντρικό ελεγκτή, όπου διαιρείται με τον αριθμό των μονάδων του δικτύου, οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται το ρεύμα αναφοράς της κάθε μονάδας. Έπειτα, η αναφορά αυτή αφαιρείται από το ρεύμα της κάθε μονάδας. Το σφάλμα περνάει από έναν βροχο ρεύματος. Ένας εξωτερικός βρόχος στον κεντρικό ελεγκτή ρυθμίζει την τάση του φορτίου. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η ανάγκη να μετρηθεί το συνολικό ρεύμα του φορτίου, οπότε καθίσταται δύσκολη η εφαρμογή του σχήματος αυτού σε μεγάλα συστήματα διανομής. Επίσης, η ύπαρξη ενός κεντρικού ελεγκτή αποτελεί μειονέκτημα για τη μέθοδο.



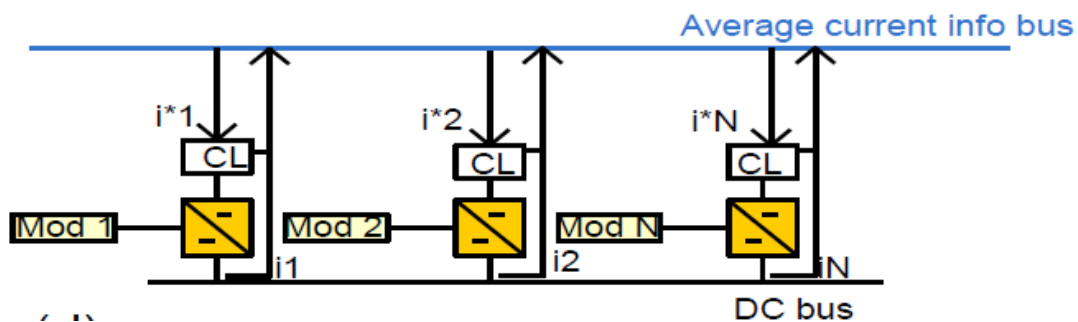
Εικόνα 4.36 Κεντρικός έλεγχος [25].

Έλεγχος Master-Slave: Ένας μετατροπέας (ο master) ρυθμίζει την τάση και θέτει τις αναφορές για το ρεύμα των υπολοίπων μονάδων (που αποτελούν τους slaves). Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι αν ο μετατροπέας master καταρρέψει, τότε καταρρέει όλο το σύστημα. Ένα άλλο μειονέκτημα αποτελεί η δυσχέρεια επέκτασης του συστήματος, και άρα η μη παροχή ιδιοτήτων plug and play. Η απαίτηση για έναν επιβλέποντα έλεγχο είναι επίσης ένα μειονέκτημα της μεθόδου.



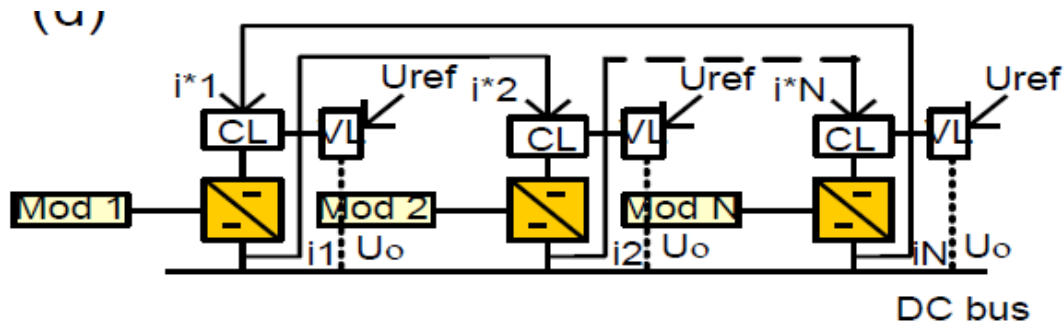
Εικόνα 4.37 Έλεγχος master-slave [25].

Average load sharing: Εδώ, η αναφορά του ρεύματος της κάθε μονάδας είναι το μέσο ρεύμα όλων των μονάδων του μικροδικτύου. Το σχήμα αυτό είναι πιο αξιόπιστο, αφού δεν διέπεται από φιλοσοφία Master-Slave. Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση είναι σε μεγάλο βαθμό βαθμωτή και επεκτάσιμη.



Εικόνα 4.38 Έλεγχος average load sharing [25].

Circular Chain Control: Σε αυτό το σχήμα, η αναφορά του ρεύματος κάθε μονάδας λαμβάνεται από την προηγούμενή της μονάδα, σχηματίζοντας έναν δακτύλιο ελέγχου. Στα πλαίσια αυτής της λογικής, η αναφορά του ρεύματος της πρώτης μονάδας λαμβάνεται από την τελευταία μονάδα.



Εικόνα 4.39 Έλεγχος circular chain control [25].

Μία ενδιαφέρουσα παραλλαγή του ελέγχου αυτού είναι ο έλεγχος περιορισμού του ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει λογική Master-Slave. Η τάση ελέγχεται από τη μονάδα master (voltage source inverter), ενώ οι μονάδες slave μοιράζονται το ρεύμα του φορτίου (current source inverters). Η κυκλική αλυσίδα σχηματίζεται μόνο από τις μονάδες slave, ενώ η μονάδα master εξαιρείται. Η αναφορά του ρεύματος του κάθε slave δημιουργείται από την προηγούμενη της μονάδα και περιορίζεται σε πλάτος, σχηματίζοντας την κυκλική αλυσίδα. Οποιαδήποτε μονάδα μπορεί να οριστεί ως master.

#### 4.3.4.4 Power-line signaling.

Στην περίπτωση αυτή το ίδιο το ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμεύει ως διάυλος επικοινωνίας. Τα μηνύματα εισάγονται απευθείας ως PLS σήματα από τους πρωτογενείς βρόχους των μετατροπέων. Ο τοπικός ελεγκτής κάθε πηγής λαμβάνει το σήμα PLS, εξάγει την απαιτούμενη πληροφορία και τροποποιεί αναλόγως την αναφορά της τάσης του πρωτογενούς ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό οι πηγές αλλάζουν κατάσταση λειτουργίας, ενώ η DC τάση έχει τη δυνατότητα να αποκλίνει από την ονομαστική τιμή της, όμως μέσα σε ένα ορισμένο εύρος. Η απόκλιση αυτή είναι δυνατόν να ακυρωθεί από τον δευτερογενή έλεγχο χωρίς να επηρεαστεί η σωστή λειτουργία του συστήματος. Τα κυριότερα μειονεκτήματα αυτού του σχήματος είναι η αργή επικοινωνία μέσω PLS και η πιθανή ασυμφωνία στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα με τις ηλεκτρονικές συσκευές στο μικροδίκτυο.

#### 4.3.4.5 Έλεγχος DBS (DC Bus Signaling).

Η μέθοδος αυτή αποκλίνει από τη λογική του ακριβούς διαμοιρασμού της ισχύος με ελάχιστες αποκλίσεις της τάσης του ζυγού. Επιτρέπονται σημαντικές αποκλίσεις της τάσης από την ονομαστική τιμή της, αφού θεωρείται ότι το σύστημα βασίζεται στα ηλεκτρονικά ισχύος, με τις διεπαφές των πηγών και των φορτίων να έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο που να επιτρέπει την ικανοποιητική λειτουργία σε ένα μεγαλύτερο εύρος τάσεων. Η τάση του DC ζυγού χρησιμοποιείται για τη διάκριση των διαφορετικών λειτουργικών καταστάσεων του μικροδικτύου. Συγκεκριμένα, τίθενται κατώφλια της τάσης, μέσω των οποίων καθορίζονται οι διάφορες λειτουργικές καταστάσεις, καθώς επίσης και η προτεραιότητα των συσκευών και των φορτίων. Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι η μετάβαση μεταξύ διαφορετικών καταστάσεων και οι αντίστοιχες αλλαγές των μεθόδων ελέγχου για τους μετατροπείς μπορούν να επιτευχθούν χωρίς επιπλέον επικοινωνιακές συνδέσεις. Τα πλεονεκτήματα είναι η μείωση του κόστους και η βελτίωση της αξιοπιστίας.

Τα κατώφλια της τάσης οφείλουν να είναι διακριτά μεταξύ τους, αλλά επίσης αρκετά σφιχτά, έτσι ώστε να μην αποσταθεροποιούν το σύστημα. Αν ληφθεί υπόψη ότι

ορισμένα δίκτυα DC περιέχουν μακρύτερα καλώδια, καθώς επίσης και τα σφάλματα τα οποία υπαισέρχονται στις μετρήσεις των τάσεων, τα κατώφλια της τάσης θα πρέπει να επιλεγούν προσεκτικά, έτσι ώστε κανονικές συνθήκες παραγωγής και φόρτισης να μην προκαλούν λανθασμένες μεταβάσεις. Πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικοί έλεγχοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των διαφόρων τερματικών.

Τα κατώφλια για τους μετατροπείς των μονάδων ΔΠ υπολογίζονται ξεκινώντας από το υψηλότερο κατώφλι. Κάθε διαδοχικό κατώφλι υπολογίζεται για να εξασφαλιστεί ότι, όταν οι πηγές που αντιστοιχούν στο προηγούμενο κατώφλι είναι εντός λειτουργίας, η πτώση τάσης στο σύστημα, η οποία προκαλείται από την αντίσταση της γραμμής και το droop της τάσης, δεν ενεργοποιούν πρώιμα πηγές οι οποίες έχουν ανατεθεί στο επόμενο κατώφλι. Γενικά, το πρώτο κατώφλι της τάσης,  $V_0$ , τίθεται στην ονομαστική τάση του συστήματος. Κάθε διαδοχικό κατώφλι,  $V_n$ , υπολογίζεται αφαιρώντας την πτώση τάσης και ένα περιθώριο σφάλματος από το προηγούμενο κατώφλι. Προκειμένου για την αποκοπή φορτίων, τα κατώφλια σβησίματος θα πρέπει να υπολογίζονται, έτσι ώστε η προτεραιότητα σβησίματος των φορτίων να παραμένει ανεπηρέαστη από την άνιση διάδοση της DC τάσης, λόγω μακριών καλωδίων κατά μήκος του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, το κατώφλι σβησίματος για το φορτίο χαμηλότερης προτεραιότητας υπολογίζεται πρώτο.

Τα κύρια μειονεκτήματα των μεθόδων DBS είναι ότι ο αριθμός των πηγών και των αποθηκευτικών διατάξεων του συστήματος περιορίζεται από τον αριθμό των επιπέδων τάσης, τα οποία δεν μπορούν να είναι άπειρα. Επίσης, η προσθήκη πηγών με μεγαλύτερη προτεραιότητα απαιτεί την αλλαγή των καταστάσεων όλων των πηγών με χαμηλότερη προτεραιότητα, κάτι το οποίο περιορίζει τις δυνατότητες plug and play. Τέλος, το επίπεδο της τάσης διαφέρει σε διαφορετικές τοποθεσίες λόγω της πτώσης τάσης πάνω στην ωμική αντίσταση των καλωδίων, κάτι το οποίο προκαλεί λανθασμένες μεταβάσεις των μονάδων ΔΠ. Για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού, εισάγεται ένα μικρό AC σήμα, η συχνότητα του οποίου δρα ως μέσο επικοινωνίας. Όμως η μέθοδος αυτή είναι ευάλωτη στο θόρυβο των καλωδίων του δικτύου. Επιπλέον, απαιτεί κυκλώματα για την ακριβή εισαγωγή και ανίχνευση του AC σήματος. Αυτό περιορίζει τη βιωσιμότητα της μεθόδου [25].



## Κεφάλαιο 5ο: Προσομοίωση του Ιεραρχικού Ελέγχου ενός DC μικροδίκτυου.

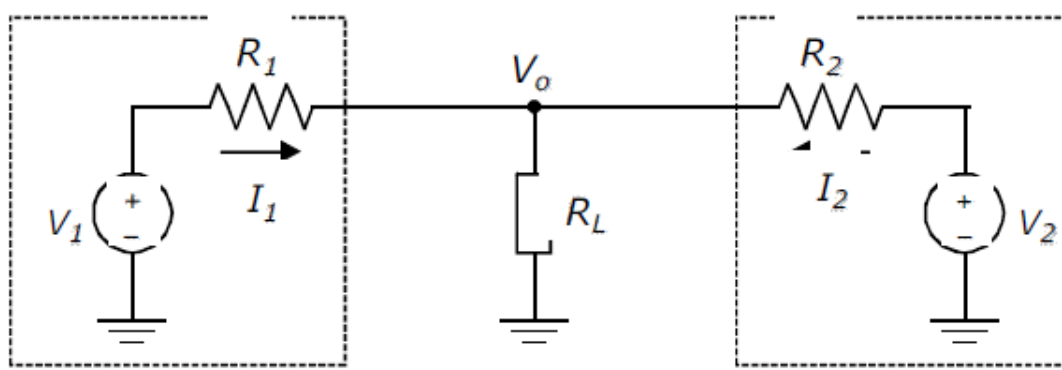
### 5.1 Εισαγωγή.

Στην ενότητα αυτή, επιχειρείται, βάσει αυτών που αναφέρονται στο [27], να προσομοιωθεί ο ιεραρχικός έλεγχος ενός DC μικροδίκτυου. Για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιείται το πακέτο Simulink.

### 5.2 Τα μοντέλα που υλοποιήθηκαν.

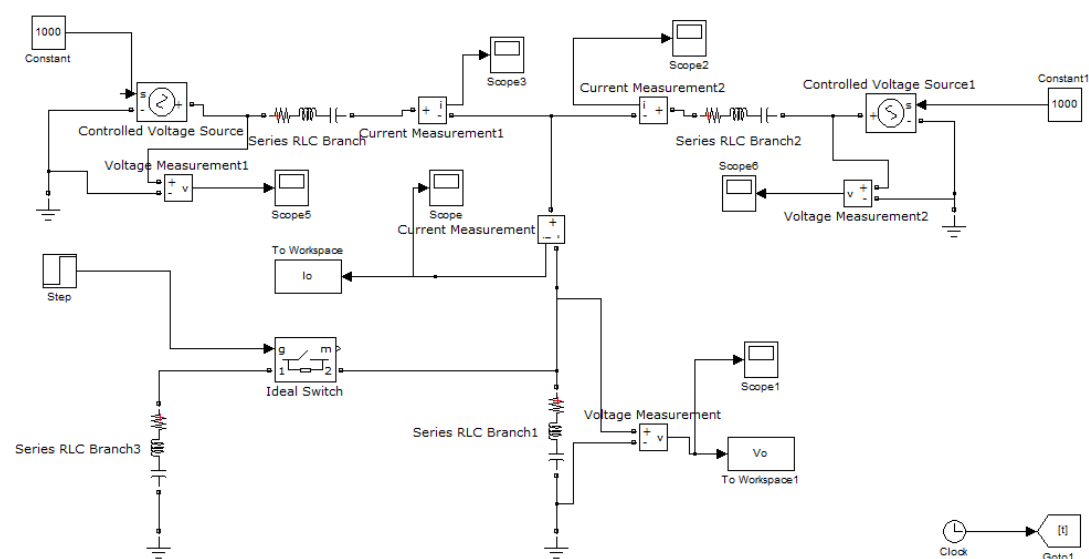
#### 5.2.1 Το μικροδίκτυο προς προσομοίωση.

Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο [27], το μικροδίκτυο προς προσομοίωση είναι το εξής:



Εικόνα 4.1 Το μικροδίκτυο προς προσομοίωση [27].

Για την προσομοίωση αυτού του μικροδίκτυου, χρησιμοποιείται το ακόλουθο μοντέλο στο Simulink:



Εικόνα 5.2 Το μοντέλο του μικροδίκτυου.

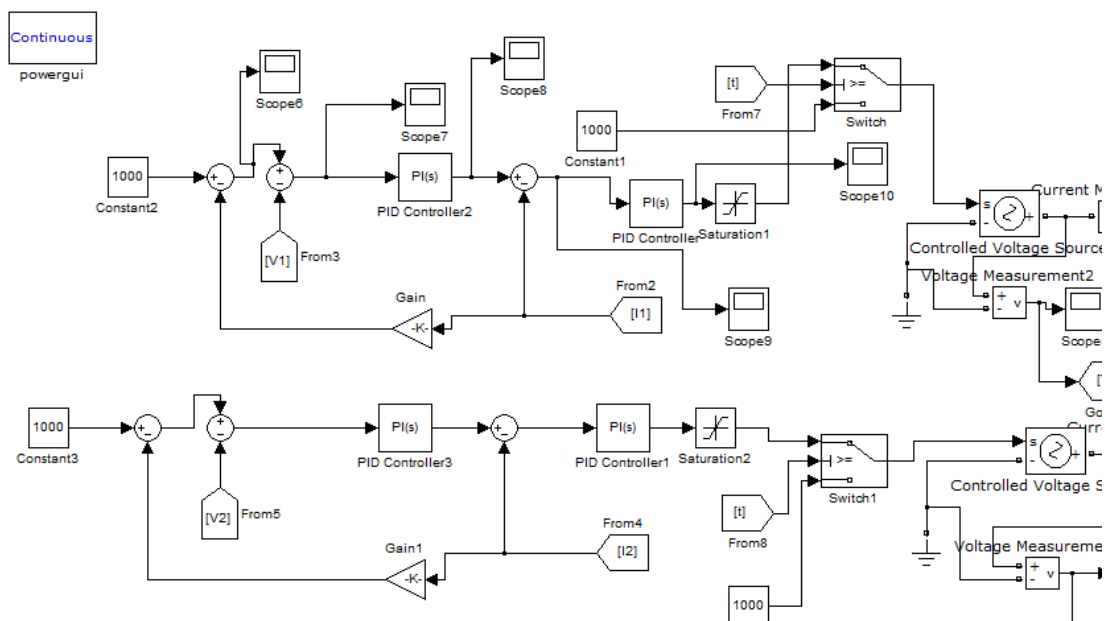
Ως επίπεδο τάσης του μικροδικτύου επιλέχθηκαν τα 1000V. Τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου παρατίθενται στον επόμενο πίνακα:

Series RLC branch	$R=0.2\Omega$
Series RLC branch 2	$R=0.2\Omega$
Series RLC branch 1	$R=100\Omega$
Gain	0.01 (αρχική τιμή)
Gain 1	0.01 (αρχική τιμή)
Step	Από το 0 στο 1 την $t=4s$
Series RLC branch 3	Μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Πίνακας 5.1 Οι παράμετροι του μοντέλου που υλοποιήθηκε.

### 5.2.2 Το μοντέλο του πρωτογενούς ελέγχου.

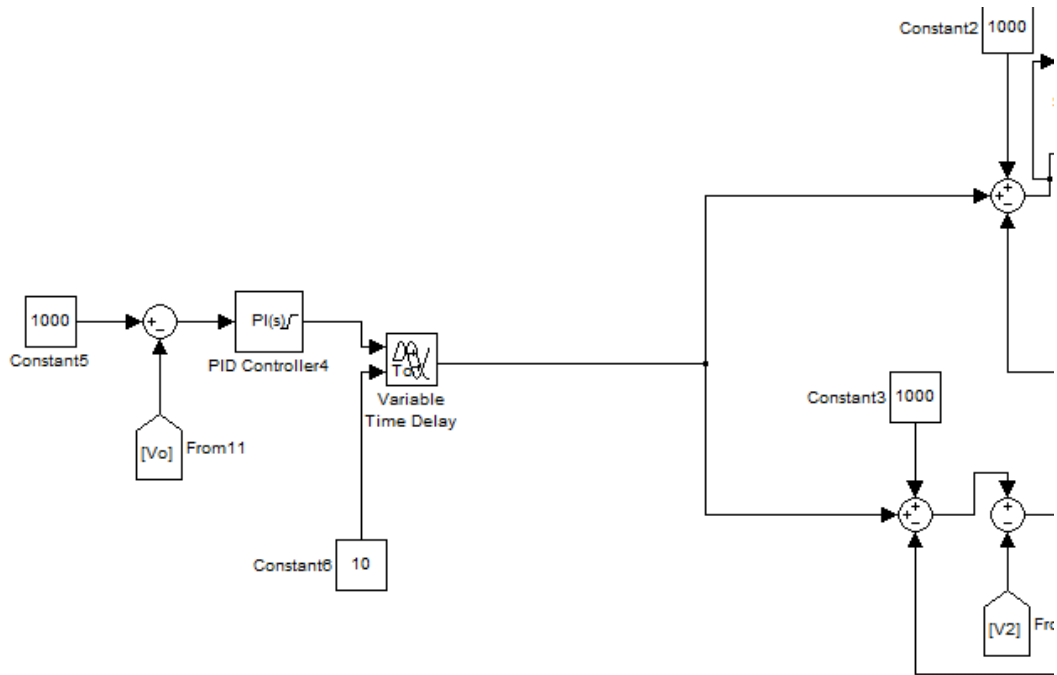
Το μοντέλο του πρωτογενούς ελέγχου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 5.3 Το μοντέλο του πρωτογενούς ελέγχου.

Πρόκειται για V-I έλεγχο droop, στον οποίο εμπλέκονται οι τάσεις και τα ρεύματα εξόδου των πηγών. Οι ελεγκτές PI έχουν όλοι κέρδος  $k_p=20$  και  $k_i=0$ . Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον πρωτογενή έλεγχο, καθώς και με τα υπόλοιπα επίπεδα ελέγχου μπορούν να βρεθούν στο [27].

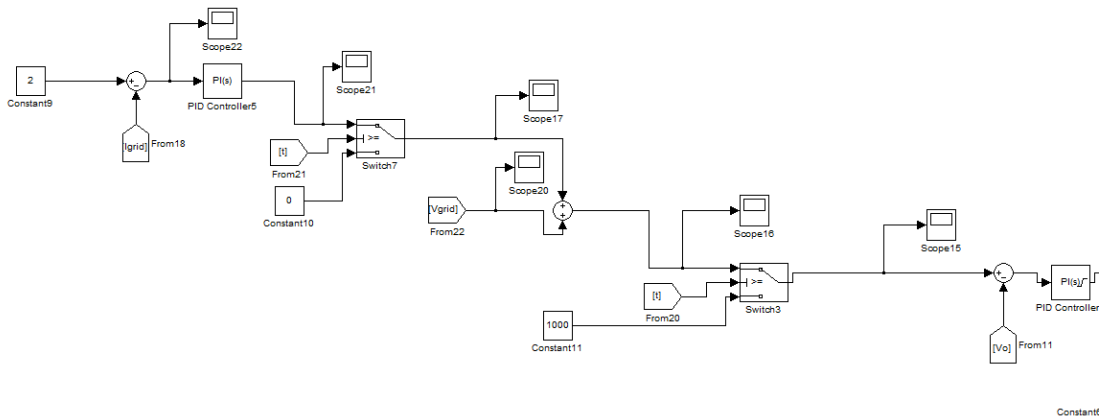
### 5.2.3 Το μοντέλο του δευτερογενούς ελέγχου.



Εικόνα 5.4 Το μοντέλο του δευτερογενούς ελέγχου.

Ο ελεγκτής PI του επιπέδου αυτού έχει  $k_p=0.3$  και  $k_i=0.1$ . Το μπλοκ “Variable Time Delay” προσομοιώνει την καθυστέρηση με την οποία υποτίθεται ότι επεμβαίνει ο δευτερογενής έλεγχος. Η καθυστέρηση αυτή τέθηκε στην προσομοίωσή μας ίση με 10s.

### 5.2.4 Το μοντέλο του τριτογενούς ελέγχου.

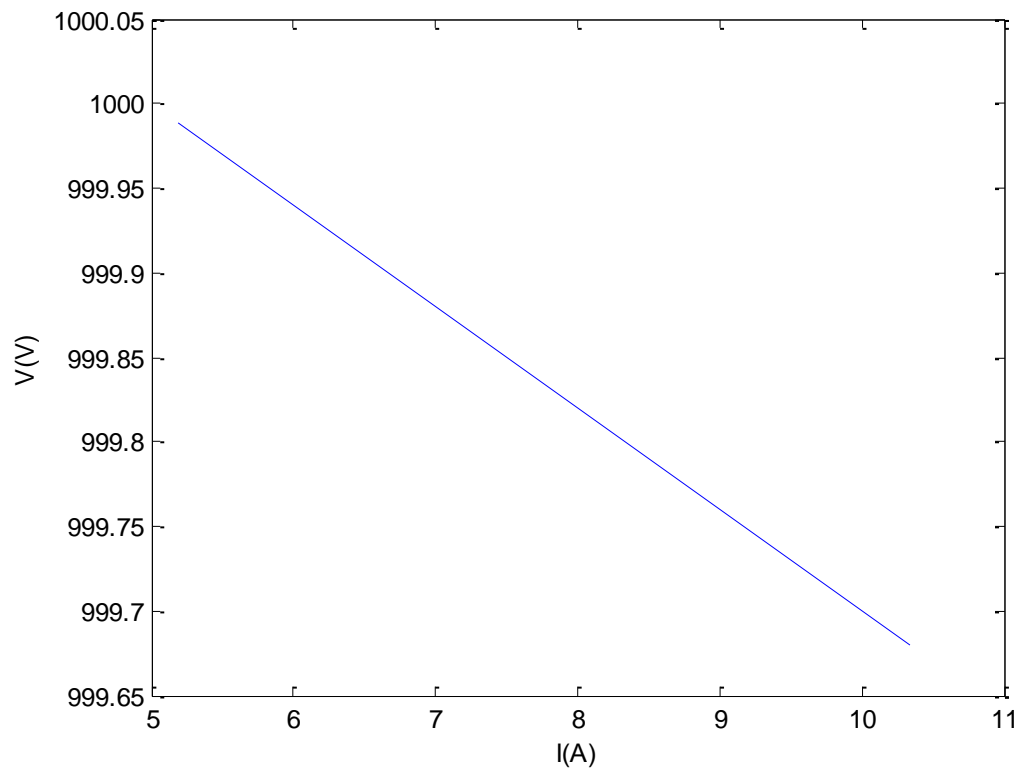


Εικόνα 5.5 Το μοντέλο του τριτογενούς ελέγχου.

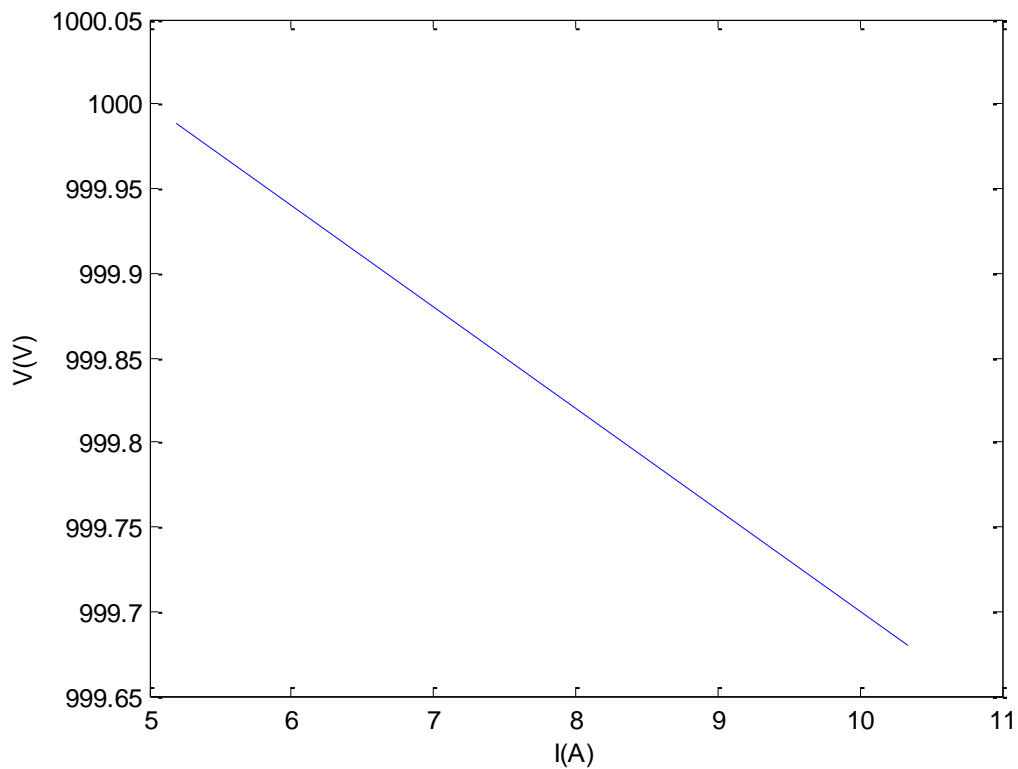
## 5.3 Αποτελέσματα.

### 5.3.1 Οι χαρακτηριστικές droop των πηγών.

Πακάτω, απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές droop των πηγών στην περίπτωση που ο συντελεστής droop τεθεί ίσος με 0.01.



Εικόνα 5.6 Η χαρακτηριστική droop της πηγής 1.

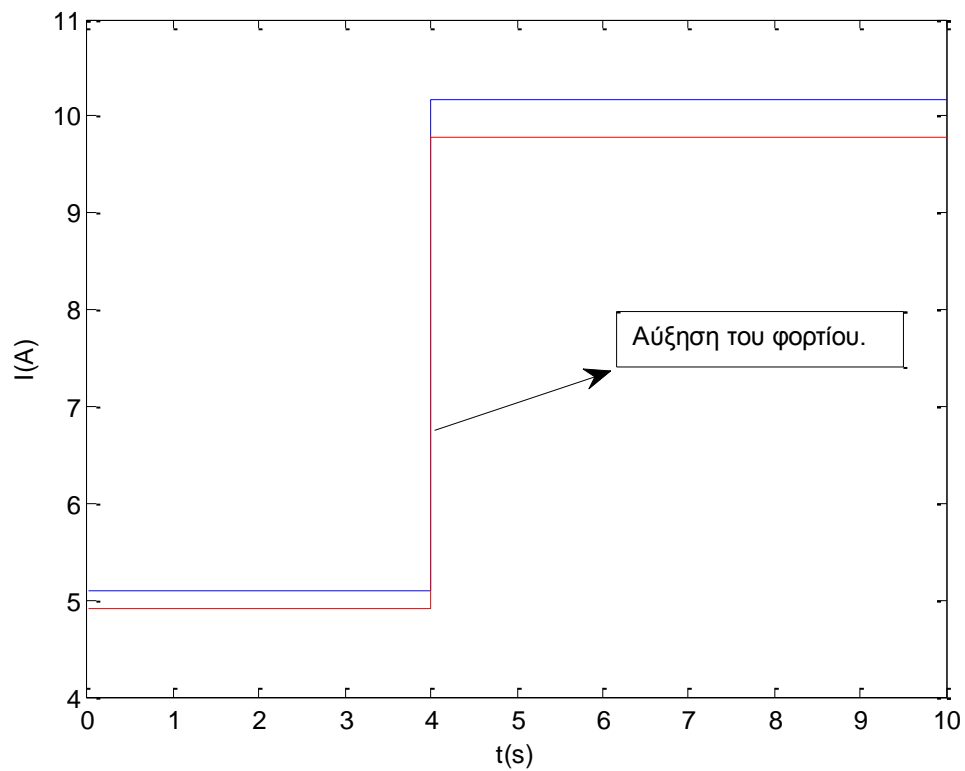


**Εικόνα 5.7 Η χαρακτηριστική droop της πηγής 2.**

Οι χαρακτηριστικές αυτές droop έχουν την αναμενόμενη μορφή, δηλαδή αυξανόμενου του ρεύματος, η τάση μειώνεται.

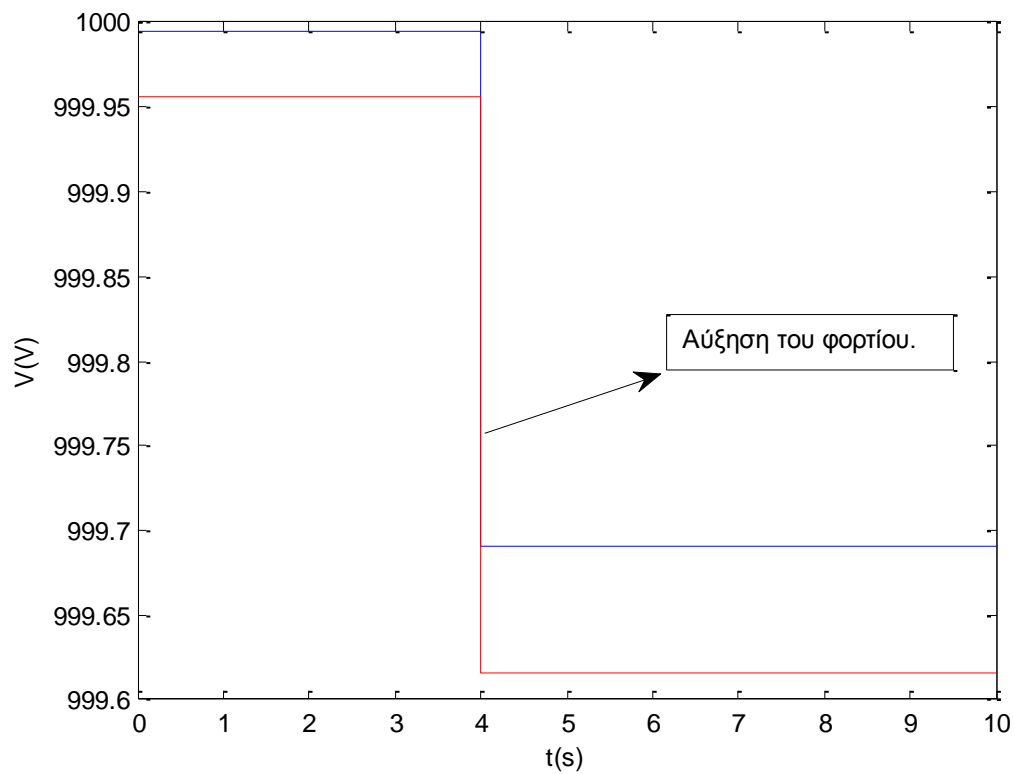
### **5.3.2 Η επίδραση του πρωτογενούς ελέγχου στο διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των πηγών.**

Μεταβάλλοντας τα droop gains του πρωτογενούς ελέγχου των πηγών, μπορούμε να επηρεάσουμε τον διαμοιρασμό του φορτίου μεταξύ των πηγών. Ακολουθούν δύο παραδείγματα της δυνατότητας αυτής:

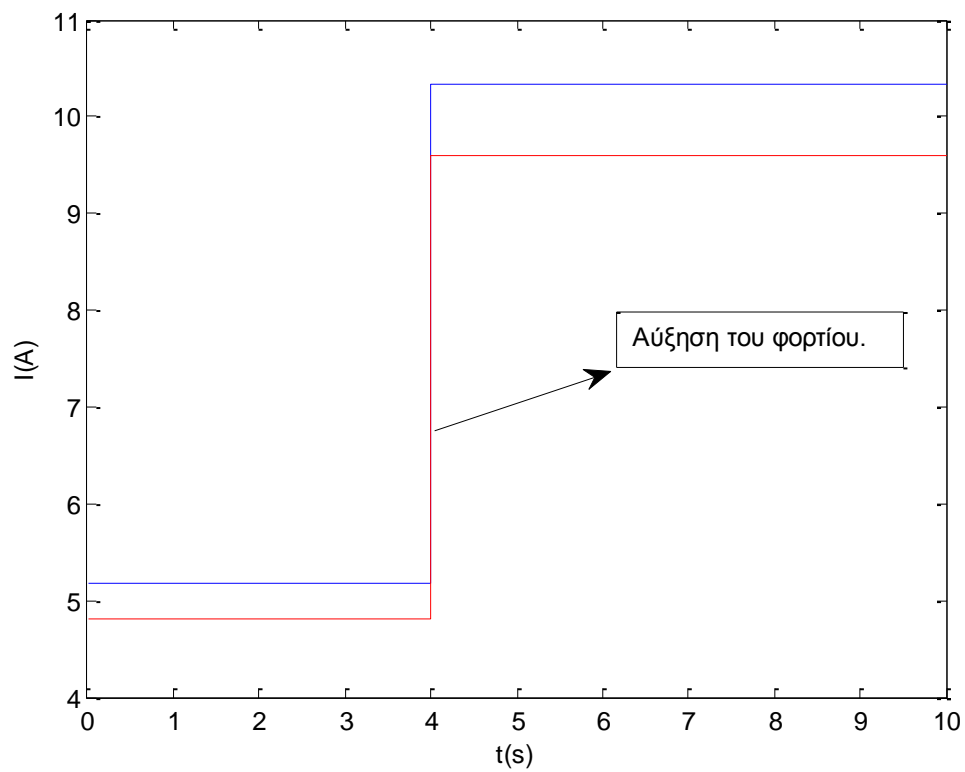


Εικόνα 5.8 Τα ρεύματα  $I_1$  (με μπλε) και  $I_2$  (με κόκκινο), όταν οι συντελεστές  $d_{loop}$  είναι  $d_1=0.01$  και  $d_2=0.02$ , και το φορτίο διπλασιάζεται.

Παρατηρούμε ότι η πηγή με το μικρότερο κέρδος  $d_{loop}$  αναλαμβάνει μεγαλύτερο μέρος του φορτίου, ενώ εκείνη με το μεγαλύτερο κέρδος  $d_{loop}$  μικρότερο.

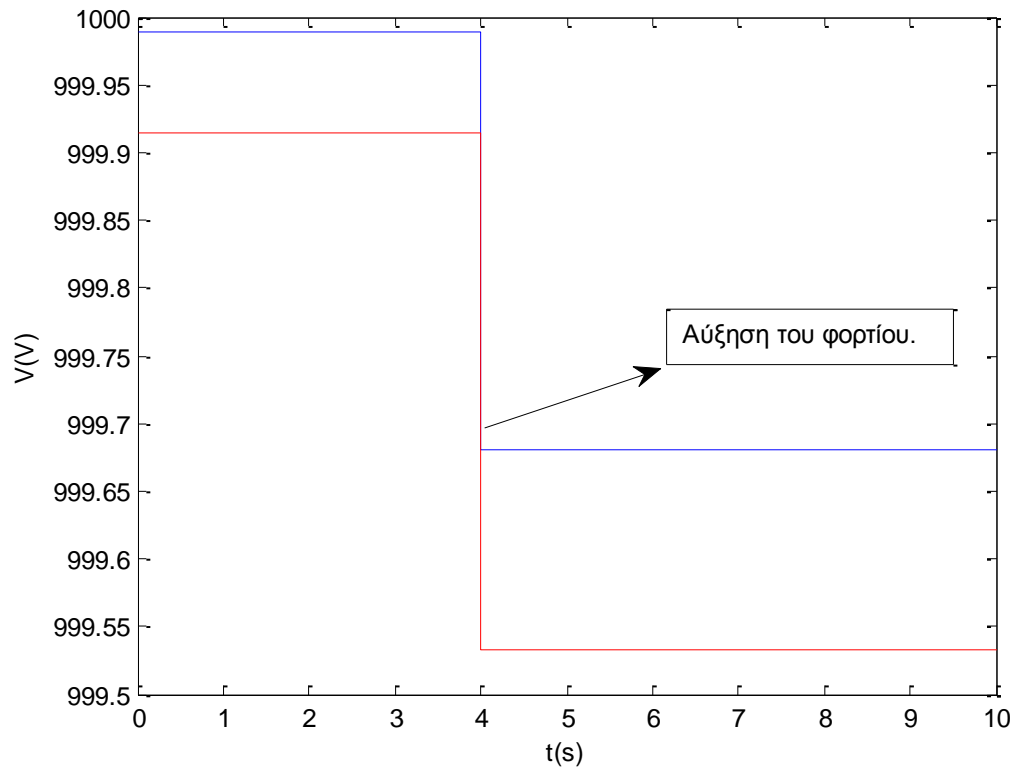


Εικόνα 5.9 Οι αντίστοιχες τάσεις των πηγών 1 (με μπλε) και 2 (με κόκκινο).



Εικόνα 5.10 Τα ρεύματα  $I_1$  (με μπλε) και  $I_2$  (με κόκκινο), όταν οι συντελεστές  $d_{roop}$  είναι  $d_1=0.01$  και  $d_2=0.03$ , και το φορτίο διπλασιάζεται.

Όπου ισχύουν τα ίδια με παραπάνω. Δηλαδή η πηγή εκείνη που έχει μικρότερο συντελεστή droop, θα αναλάβει μεγαλύτερο μέρος του φορτίου.



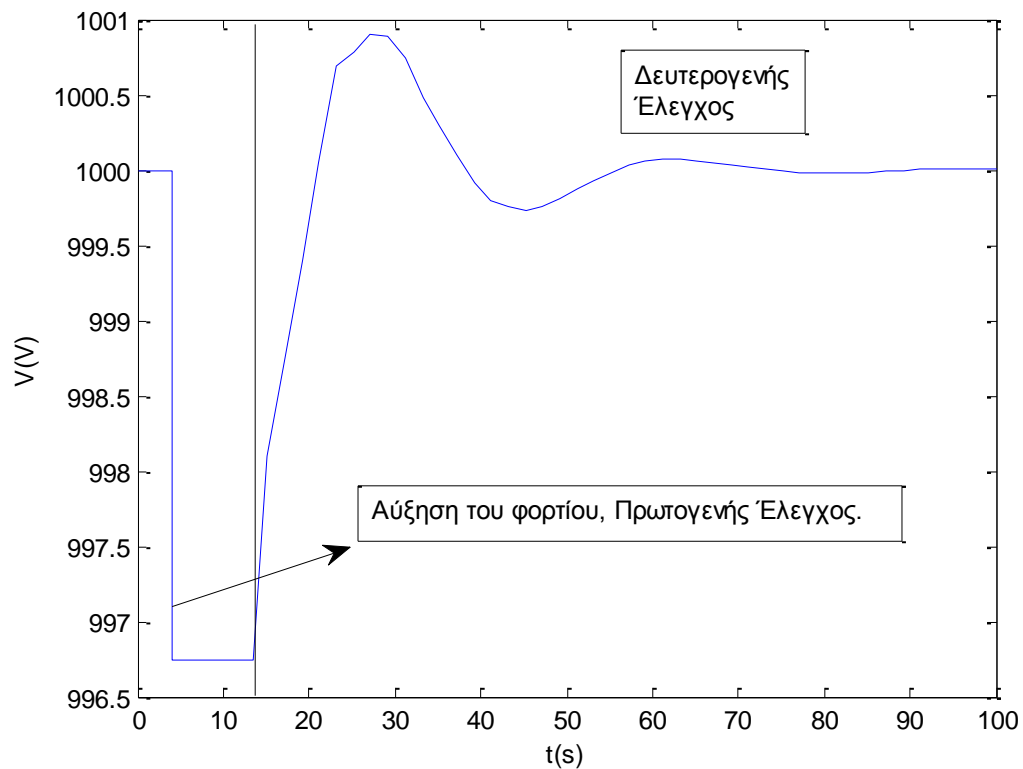
Εικόνα 5.11 Οι αντίστοιχες τάσεις των πηγών 1 (με μπλε) και 2 (με κόκκινο).

### 5.3.3 Η απόκριση του πρωτογενούς και του δευτερογενούς ελέγχου για διάφορες μεταβολές του φορτίου.

Τα παρακάτω σχήματα παρουσιάζουν την τάση του μικροδικτύου, όταν έχουμε αύξηση του φορτίου κατά 50% και 100%.

- Αύξηση του φορτίου κατά 50%:

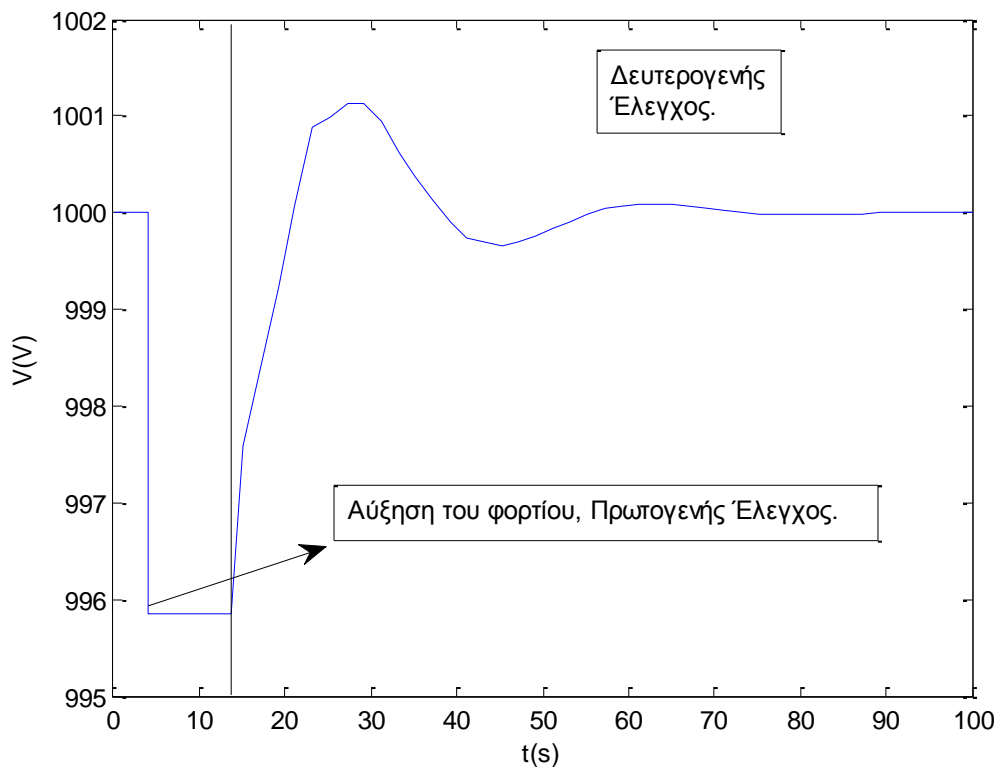




Εικόνα 5.12 Η τάση του μικροδικτύου, όταν το φορτίο αυξάνεται κατά 50%.

Τη χρονική στιγμή  $t=4s$ , αυξάνουμε το φορτίο κατά 50%. Παρατηρούμε ότι ο πρωτογενής έλεγχος droop μειώνει την τάση, αντιδρώντας με αυτόν τον τρόπο στην αύξηση του ρεύματος. Μετά την παρέλευση μερικών seconds, ο δευτερογενής έλεγχος αναλαμβάνει να επαναφέρει την τάση στην ονομαστική τιμή της.

- Αύξηση του φορτίου κατά 100%:

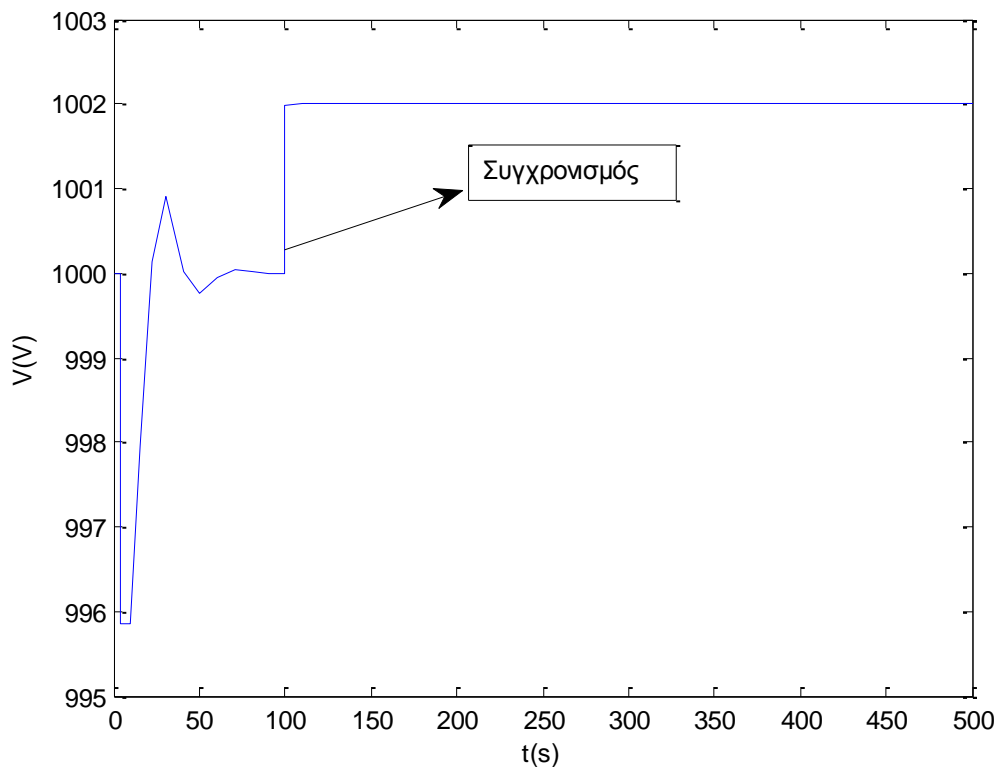


Εικόνα 5.13 Η τάση του μικροδικτύου, όταν το φορτίο αυξάνεται κατά 100%.

Τα αποτελέσματα εδώ είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση. Η μόνη διαφορά είναι ότι η μείωση της τάσης από το droop είναι μεγαλύτερη, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, αφού μεγαλύτερη είναι και η αύξηση του φορτίου (100%, αντί για 50%) σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση.

#### 5.3.4 Ο βρόχος συγχρονισμού.

Συνδέουμε, τη χρονική στιγμή  $t=100s$ , το μικροδίκτυο σε κυρίως δίκτυο ονομαστικής τάσης 1002V. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η τάση του μικροδικτύου. Παρατηρούμε ότι, χάρη στη λειτουργία του βρόχου συγχρονισμού, η τάση του μικροδικτύου εναρμονίζεται, μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα, με εκείνη του κυρίως δικτύου:



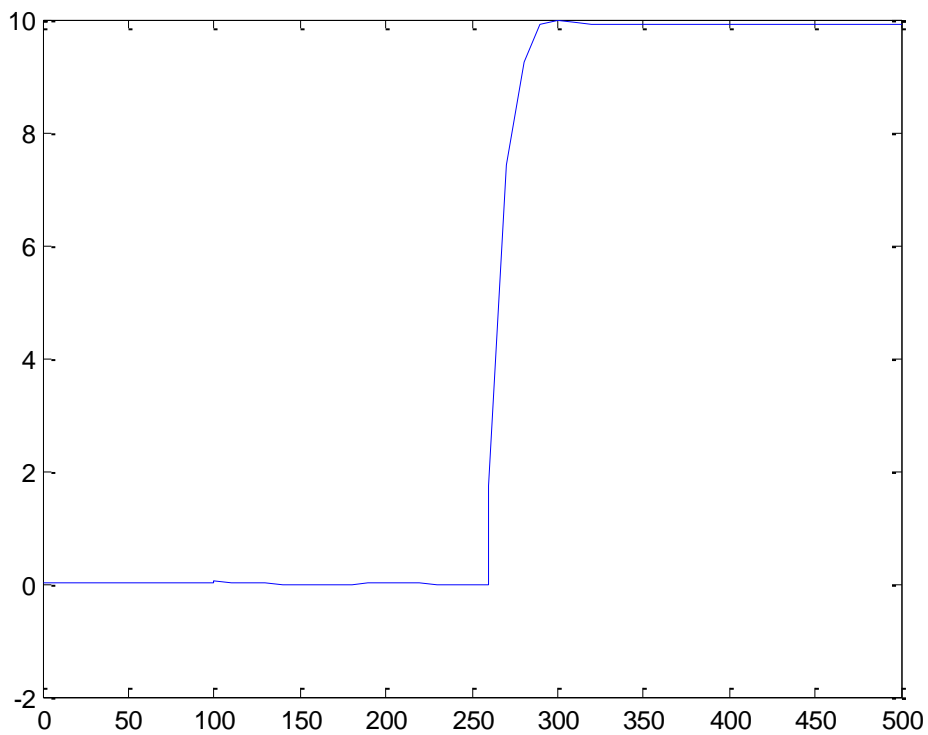
Εικόνα 5.16 Η λειτουργία του βρόχου συγχρονισμού.

### 5.3.5 Ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του μικροδικτύου και του κυρίως δικτύου.

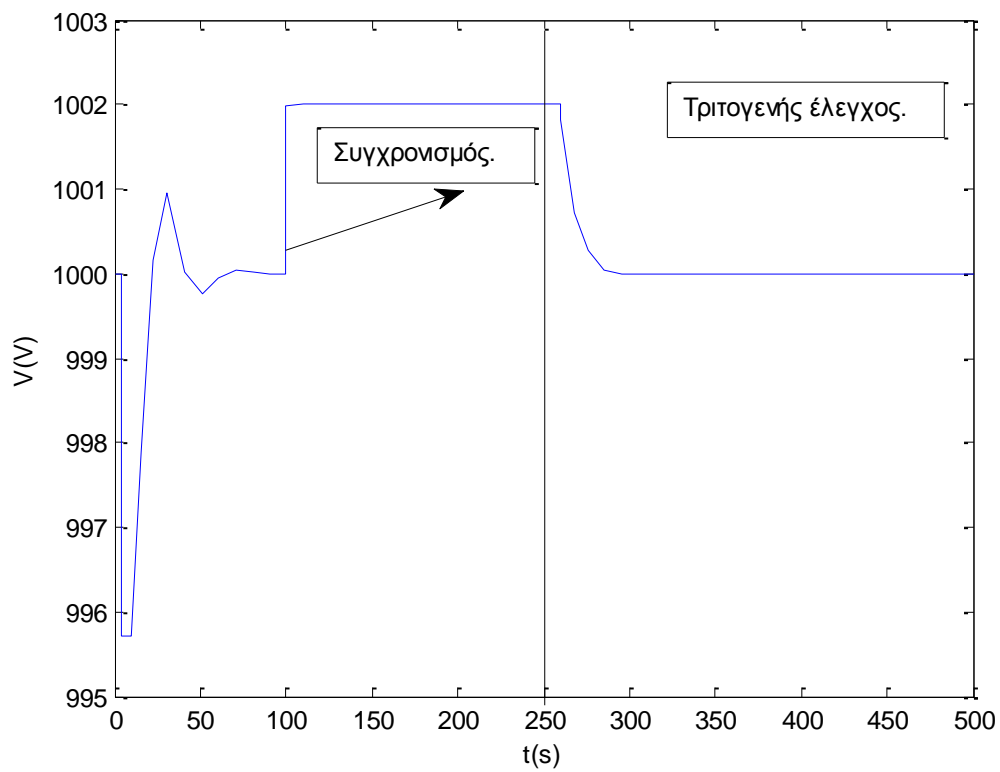
Παρακάτω εξετάζουμε τις δύο περιπτώσεις, δηλαδή έγχυση ισχύος από το δίκτυο στο μικροδίκτυο και το αντίθετο.

#### 5.3.5.1 Έγχυση ισχύος στο μικροδίκτυο.

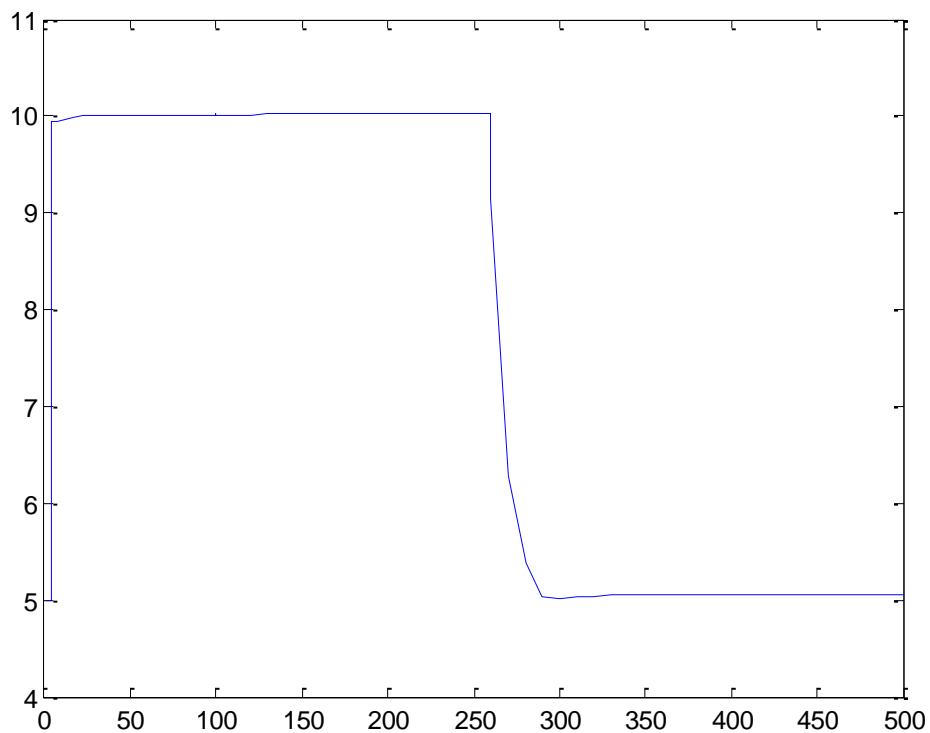
Τη χρονική στιγμή  $t=250s$ , δίνουμε εντολή για έγχυση ρεύματος 10A από το μικροδίκτυο στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης της τάσης του μικροδικτύου, σε σχέση με εκείνη του δικτύου (όπως θυμόμαστε ο βρόχος συγχρονισμού είχε εξισώσει τις δύο τάσεις, και τα δύο δίκτυα βρίσκονταν σε ισορροπία). Το ρεύμα του φορτίου παραμένει σταθερό, άρα αφού ένα μέρος του παρέχεται πλέον από το δίκτυο, οι πηγές του μικροδικτύου θα μειώσουν την παραγωγή τους. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 5.17 Το ρεύμα του δικτύου. Έχουμε έγχυση ρεύματος 10Α από το δίκτυο στο μικροδίκτυο.



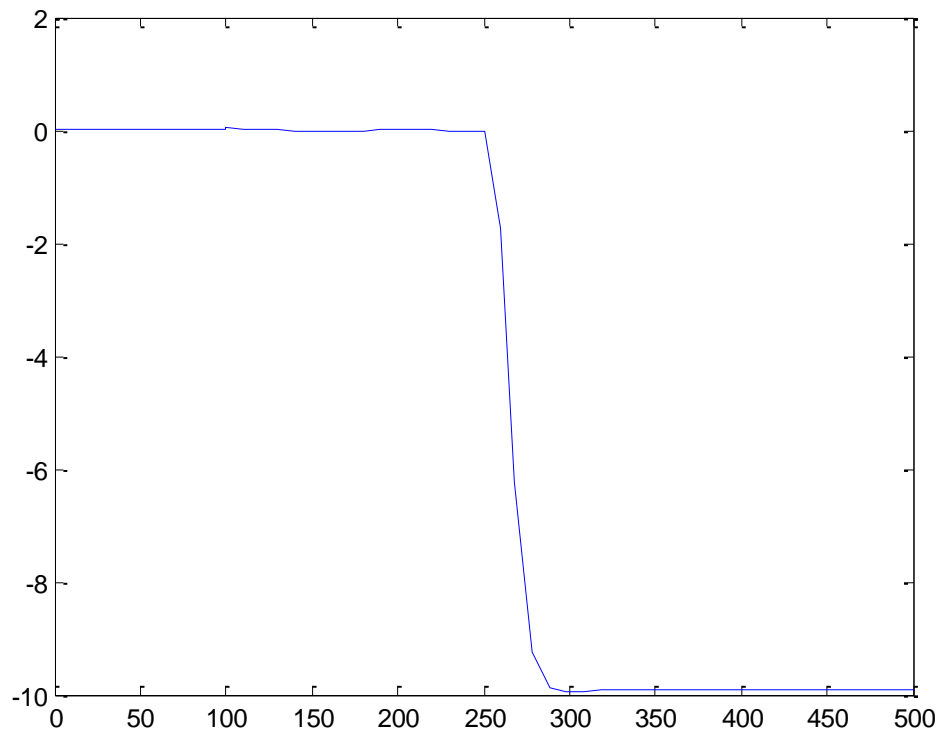
Εικόνα 5.18 Η τάση του μικροδικτύου, κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας.



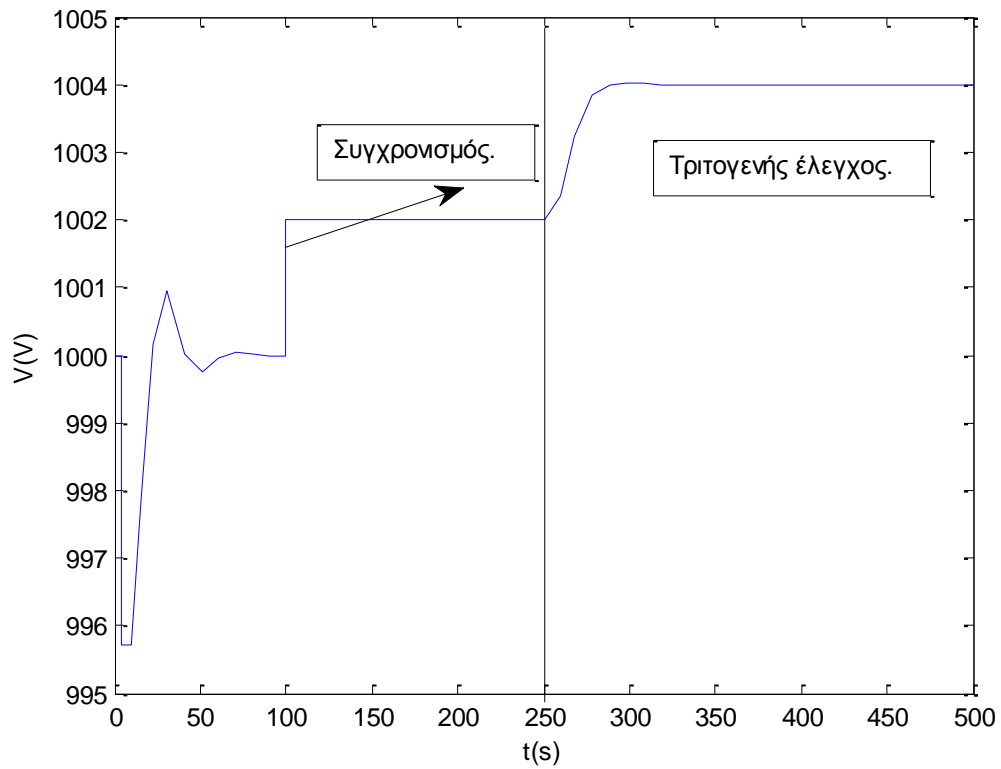
Εικόνα 5.19 Οι πηγές του μικροδικτύου μειώνουν ανάλογα το ρεύμα τους.

### 5.3.5.2 Απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο.

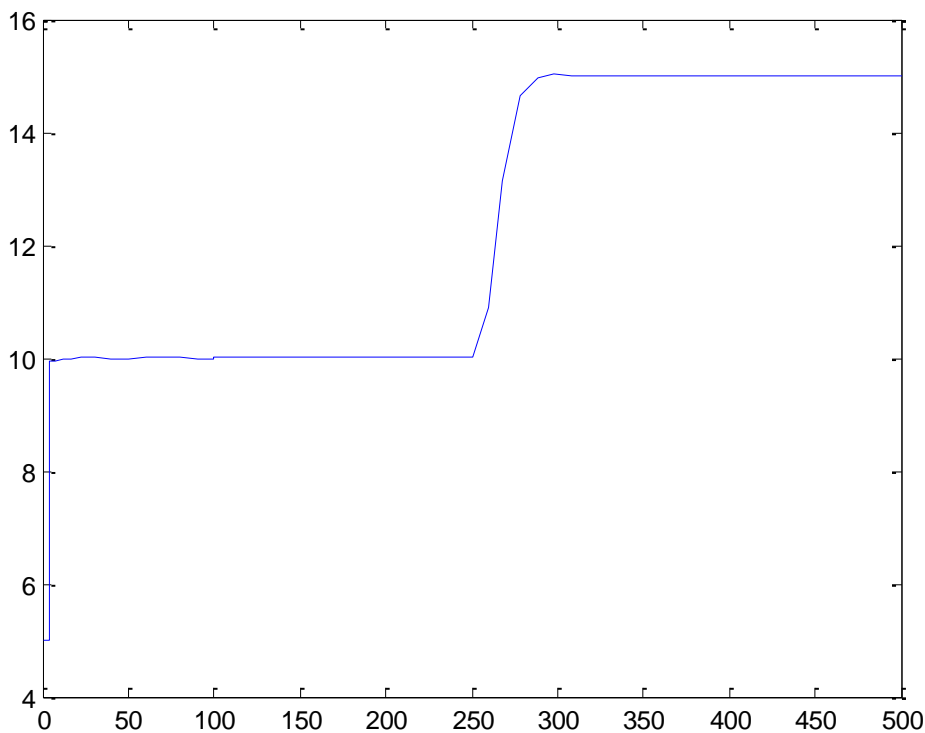
Εδώ εξετάζουμε την αντίστροφη διαδικασία. Δηλαδή έχουμε μεταφορά ισχύος από το μικροδίκτυο στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της τάσης του μικροδικτύου, σε σχέση με εκείνη του δικτύου (όπως θυμόμαστε ο βρόχος συγχρονισμού είχε εξισώσει τις δύο τάσεις, και τα δύο δίκτυα βρίσκονταν σε ισορροπία). Το ρεύμα του φορτίου παραμένει σταθερό, συνεπώς, προκειμένου οι πηγές του μικροδικτύου να το τροφοδοτήσουν και ταυτόχρονα να παράσχουν ισχύ στο κυρίως δίκτυο, αυξάνουν την παραγωγή τους. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 5.20 Απορρόφηση ρεύματος 10Α από το μικροδίκτυο.



Εικόνα 5.21 Η τάση του μικροδικτύου, κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας.



Εικόνα 5.22 Οι πηγές αυξάνουν ανάλογα το ρεύμα τους.

## Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις.

### Συμπεράσματα.

Σε ό,τι αφορά την τοπολογία, εκείνη των AC μικροδικτύων είναι εντελώς ανάλογη των κλασικών δικτύων διανομής. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μας απασχόλησε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας. Τα DC μικροδίκτυα πλεονεκτούν στον τομέα αυτό, καθώς η τοπολογία τους είναι απλούστερη (είναι συστήματα δύο ή τριών αγωγών, σε αντίθεση με τα AC συστήματα, τα οποία είναι πολυφασικά). Επίσης, τα DC συστήματα δίνουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης υψηλότερων επιπέδων τάσης, γεγονός που επιτρέπει τη μεταφορά δεδομένης ισχύος με μικρότερο ρεύμα και άρα μειώνει τις απώλειες του δικτύου διανομής, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει να χρησιμοποιηθούν μικρότερες διατομές για τους αγωγούς, εξοικονομώντας από το κόστος τους. Τέλος, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση των υπάρχοντων AC καλωδίων για DC εφαρμογές.

Σχετικά με την προστασία, τα AC μικροδίκτυα έχουν ένα πλεονέκτημα, δεδομένου ότι η διακοπή των σφαλμάτων AC είναι ευκολότερη από εκείνη των αντίστοιχων DC. Αυτό συμβαίνει διότι τα DC ρεύματα σφάλματος δεν έχουν σημεία μηδενισμού, στα οποία η επέμβαση της προστασίας είναι ευκολότερη. Επιπλέον, οι περισσότερες εμπορικές συσκευές προστασίας έχουν αναπτυχθεί για AC συστήματα, για το λόγο ότι και τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής ήταν τέτοια συστήματα. Οι ίδιες αυτές συσκευές είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και σε DC εφαρμογές, όμως η επίδοσή τους είναι υποβαθμισμένη, σε σχέση με τη χρήση τους σε εφαρμογές AC. Συνεπώς,

αναμένεται οι συσκευές αυτές να λειτουργούν με μεγαλύτερη επιτυχία στα AC, παρά στα DC μικροδίκτυα. Κατά τα άλλα, η προστασία και των δύο τύπων μικροδικτύου παρουσιάζει τις ίδιες προκλήσεις σε σχέση με εκείνη των παραδοσιακών δικτύων διανομής. Δηλαδή και στις δύο περιπτώσεις, η προστασία καλείται να λάβει υπόψη της τόσο την λειτουργική κατάσταση του μικροδικτύου (διασύνδεση ή νησιδοποίηση), όσο και την τοπολογία του (η οποία γενικά μπορεί να μεταβάλλεται), κατά τη χρονική στιγμή του σφάλματος. Επιπλέον, και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούνται ρεύματα σφάλματος, τα οποία δεν είναι απαραίτητως μονοκατευθυντικά, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής. Ακόμα, τόσο στα AC όσο και στα DC μικροδίκτυα, τα φαινόμενα τύφλωσης της προστασίας ή ενεργοποίησής της εξ' αντανακλάσεως αναμένονται με μεγαλύτερη συχνότητα, σε σχέση με τα συμβατικά δίκτυα διανομής, λόγω της παρουσίας σε αυτά μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε μεγαλύτερη ποσότητα.

Αναφορικά με τον έλεγχο, τα DC μικροδίκτυα έχουν το πλεονέκτημα μίας μεταβλητής ελέγχου (του πλάτους της τάσης), έναντι δύο (του πλάτους και της συχνότητας της τάσης) στα AC μικροδίκτυα, ενώ η μη ύπαρξη αέργου ισχύος στα μικροδίκτυα DC συνεπάγεται ότι δεν υπάρχει και ανάγκη για τον έλεγχό της στα δίκτυα αυτά. Παράλληλα στα DC μικροδίκτυα δεν υπάρχει και η ανάγκη για συγχρονισμό, σε αντίθεση με τα AC. Από την άλλη μεριά, η ύπαρξη της συχνότητας αποτελεί και ένα πλεονέκτημα για τον έλεγχο, διότι αποτελεί καθολική μεταβλητή για ολόκληρο το AC μικροδίκτυο. Στο DC μικροδίκτυο δεν απαντάται αντίστοιχη καθολική μεταβλητή, καθώς η DC τάση μπορεί, ασφαλώς, να ποικίλει μεταξύ των συνιστωσών ενός DC μικροδικτύου, λόγω των πτώσεων τάσης στις γραμμές του. Κατά τα άλλα, όπως είδαμε, μία πλειάδα μεθόδων ελέγχου έχει αναπτυχθεί και για τα δύο είδη μικροδικτύων.

### **Μελλοντικές κατευθύνσεις.**

Στο μοντέλο του DC μικροδικτύου που αναπτύχθηκε για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μοντελοποιήθηκαν ως ιδανικές ελεγχόμενες πηγές τάσης. Προκειμένου να επιτευχθούν ρεαλιστικότερα αποτελέσματα, μπορούν, στη θέση αυτών, να υλοποιηθούν μοντέλα πραγματικών πηγών διεσπαρμένης παραγωγής, όπως φωτοβολταϊκών ή ανεμογεννητριών. Ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η υλοποίηση ενός αντίστοιχου AC μικροδικτύου. Κατόπιν αυτής, τα δύο μικροδίκτυα θα μπορούσαν να ελεγχθούν για την απόκρισή τους σε παρόμοιες συνθήκες, παραδείγματος χάρη, σύνδεση στα ίδια φορτία ή μελέτη της απόκρισης σε παρόμοια σενάρια απρόοπτων συμβάντων.



## Βιβλιογραφία.

1. Giri Venkataramanan and Sandeep Bala, “Resource Aggregation Using Microgrids”.
2. S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley, “Microgrids and Active Distribution Networks”, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2009.
3. Niraj Kumar Choudhary, Soumya Ranjan Mohanty and Ravindra Kumar Singh, “A Review on Microgrid Protection”, Proceedings of the International Electrical Engineering Congress, 2014.
4. JacksonJohnJusto , FrancisMwasilu , JuLee and Jin-WooJung, “AC-microgrids vs DC-microgrids with distributed energy resources: A review”.
5. Φώτιος Ε. Κοκκαλίδης, «Μελέτη μικροδικτύου με τη βοήθεια του εξομοιωτικού προγράμματος HOMER», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Ιούλιος 2014.
6. [www.arup.com](http://www.arup.com), Five minute guide Microgrids (μG).
7. Abdullah S. Emhemed and Graeme M. Burt, “Protecting the last mile”, University of Strathclyde Engineering, 2013.
8. Jenni Rekola, “DC distribution and power electronics applications in Smart Grids”.
9. [google books, [https://books.google.gr/books?id=HMLBEXay1DUC&pg=PA15&lpg=PA15&dq=distribution+network+configurations&source=bl&ots=x3xMVAdmQO&sig=eW\\_0wP8n0CdSbl2wS2WKj-7hVy4&hl=el&sa=X&ei=l8gnVdOkJaXW7gaZ74DIDA&ved=0CF4Q6AEwBg#v=onepage&q=distribution%20network%20configurations&f=false](https://books.google.gr/books?id=HMLBEXay1DUC&pg=PA15&lpg=PA15&dq=distribution+network+configurations&source=bl&ots=x3xMVAdmQO&sig=eW_0wP8n0CdSbl2wS2WKj-7hVy4&hl=el&sa=X&ei=l8gnVdOkJaXW7gaZ74DIDA&ved=0CF4Q6AEwBg#v=onepage&q=distribution%20network%20configurations&f=false) ]
10. Alexandre Oudalov, Antonio Fidigatti, Thomas Degner, Boris Valov, Christian Hardt, Jose Miguel Yarza, Rachel Li, Nick Jenkins, Bieshoy Awad, Frank van Overbeeke, Nikos Hatzargyriou and Maria Lorentzoy, “Novel protection systems for microgrids”, November 2009.
11. Xueguang Wu, Nilanga Jayawarna, Yibin Zhang, Joao Pecas Lopez, Carlos Moreira, Andre Madureira and Jose Pereira da Silva, “Protection Guidelines for a Microgrid”, June 2005.
12. Jae-Do Park and Jared Candelaria, “Fault Detection And Isolation in Low-Voltage DC-Bus Microgrid System”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no.2, April 2013.
13. Daniel Salomonsson, “ Modeling, Control and Protection of Low-Voltage DC microgrids”, Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electric Power Systems, Stockholm, Sweeden, 2008.
14. Josep M. Guerrero, Mukul Chandorkar, Tzung-Lin Lee and Poh Chiang, “Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids Part I”, IEEE Transactions on Power Electronics, 2013.
15. Joan Rocabert, Alvaro Luna, Frede Blaabjerg and Pedro Rodriguez, “Control of Power Converters in AC Microgrids”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol.27, no.11, November 2012.

16. Estefania Planas, Asier Gil-de-Muro, Jon Andreu, Inigo Kontrabarría and Inigo Martínez de Alegria, "General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review", Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews 17, 147-159, 2013.
17. Jeronimo Quesada, Jose Antonio Sainz, Rafael Sebastian and Manuel Castro, "Decoupled Droop Control Techniques for Inverters in Low-Voltage AC Microgrids", IEEE.
18. Inam Ullah Nutkani, Poh Chiang Loh and Frede Blaabjerg, "Cost-Based Droop Scheme with Lower Generation Costs for Microgrids", IEEE.
19. Qobad Shafiee, Josep M. Guerrero and Juan C. Vasquez, "Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids – A Novel Approach", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no.2, February 2014.
20. Kumars Rouzbehi, Catalin Gavriluta, Jose Ignacio Candela, Alvaro Luna and Pedro Rodriguez, "Comprehensive Analogy between Conventional AC Grids and DC grids Characteristics", IEEE.
21. Xiaonan Lu, Josep M. Guerrero, Kai Sun and Juan C. Vasquez, "An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.29, no. 4, April 2014.
22. Catalin Gavriluta, Ignacio Candela, Constantino Citro, Joan Rocabert and Pedro Rodriguez, "Decentralized Primary Control of MTDC Networks with Energy Storage and Distributed Generation", IEEE.
23. Xiaonan Lu, Kai Sun, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez and Lipei Huang, "Droop-Control-Based State-of-Charge Balancing Method for Charging and Discharging Process in Autonomous DC Microgrids", IEEE.
24. Hiroaki Kakigano, Yushi Miura and Toshifumi Ise, "Distribution Voltage Control for DC Microgrids Using Fuzzy Control and Gain-Scheduling Technique", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 5, May 2013.
25. Christina Papadimitriou, Erietta Zountouridou and Nikos Hatziargyriou, "Review of Primary and Secondary Control in DC Microgrids", Elsevier, March 2014.
26. Sandeep Anand, Baylon G. Fernandes and Josep M. Guerrero, "Distributed Control to Ensure Proportional Load Sharing and Improve Voltage Regulation in Low-Voltage DC Microgrids", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.28, no.4, April 2013.
27. Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquez and Remus Teodorescu, "Hierarchical Control of Droop-Controlled DC and AC Microgrids – A General Approach Towards Standardization", IEEE.