



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

**Καταγραφή και Μελέτη των Διαθέσιμων Μεθόδων Ανίχνευσης  
Νησιδοποίησης στα Μικροδίκτυα Συνεχούς Ρεύματος**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΤΟΥ

**ΒΛΑΧΟΥ ΓΕΡΑΣΙΜΟΥ**

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

Αθήνα, Ιούλιος 2018





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

## Καταγραφή και Μελέτη των Διαθέσιμων Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης στα Μικροδίκτυα Συνεχούς Ρεύματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΒΛΑΧΟΥ ΓΕΡΑΣΙΜΟΥ**

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11<sup>η</sup> Ιουλίου 2018.

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

.....  
Πάυλος Γεωργιλάκης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

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

Αθήνα, Ιούλιος 2018

(Υπογραφή)

.....

**ΒΛΑΧΟΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ**

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

© 2018 – All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσης 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.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η καταγραφή και η μελέτη των βασικών μεθόδων ανίχνευσης της νησιδοποίησης στα AC Μικροδίκτυα καθώς και η καταγραφή και η μελέτη όλων των αντίστοιχων μεθόδων στα DC Μικροδίκτυα. Τα τελευταία χρόνια, επειδή η τεχνολογία DC χρησιμοποιείται ευρέως και στα φορτία και στη διεσπαρμένη παραγωγή, υπάρχει η ανάγκη να βρεθούν αποτελεσματικές μέθοδοι ανίχνευσης της νησιδοποίησης. Η πρόκληση στις συγκεκριμένες μεθόδους είναι ότι στα DC Μικροδίκτυα, λόγω της έλλειψης της συχνότητας, το μόνο μέγεθος που μπορεί να παρακολουθηθεί είναι η τάση κι αυτό περιορίζει τον αριθμό των μεθόδων σε σχέση με τις μεθόδους στα AC Μικροδίκτυα.

Στο θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας αυτής καταγράφονται και περιγράφονται οι πιο βασικές μέθοδοι αντινησιδοποίησης στα AC Μικροδίκτυα. Στη συνέχεια καταγράφονται και αναλύονται όλες οι διαθέσιμες μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης στα DC Μικροδίκτυα, δίνοντας περισσότερη βάση στη μέθοδο βασισμένη στη Θετική Ανάδραση του Συστήματος Ελέγχου του Αντιστροφέα. Σ' αυτή τη μέθοδο αποδεικνύεται με τη βοήθεια του μοντέλου μικρού σήματος καθώς και του κριτηρίου ευστάθειας Routh-Hurwitz η ευστάθεια των τεχνικών που αποτελούν τη συγκεκριμένη μέθοδο για διάφορες τιμές του κέρδους.

Στο πρακτικό μέρος της εργασίας, με τη βοήθεια του MATLAB/Simulink, αποδεικνύεται η ευστάθεια, αστάθεια κι η οριακή ευστάθεια των τεσσάρων τεχνικών. Για τις τρεις πρώτες τεχνικές γίνεται προσομοίωση στην κυκλωματική διάταξη του συστήματος, παρατηρείται η κυματομορφή της τάσης στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης και καταγράφεται το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να ανιχνευθεί η νησιδοποίηση.

Η τελευταία ενότητα αποτελείται από συμπεράσματα και συγκρίσεις, όσον αφορά τη λειτουργία των τεσσάρων τεχνικών που αποτελούν τη μέθοδο βασισμένη στη Θετική Ανάδραση του Συστήματος Ελέγχου του Αντιστροφέα. Τέλος, γίνονται προτάσεις για μεταφορά κάποιων μεθόδων από τα AC Μικροδίκτυα στα DC Μικροδίκτυα.

**Λέξεις Κλειδιά:** <<Νησιδοποίηση, AC Μέθοδοι αντινησιδοποίησης, DC Μέθοδοι αντινησιδοποίησης, Ευστάθεια>>



# ABSTRACT

---

The purpose of this thesis is to register and study the basic anti-islanding detection methods in AC Microgrids, as well as to register and study all the available anti-islanding detection methods in DC Microgrids. Nowadays, because DC technology is widely employed in both the load and the distributed generation sides, there is a need to find effective anti-islanding detection methods. The challenge in these specific methods is that in DC Microgrids, due to the lack of frequency, the only size that can be monitored is the voltage and this limits the number of methods in relation to the methods employed in the AC Microgrids.

The theoretical background of this thesis registers and describes the most basic islanding detection methods in AC Microgrids. Then, all available islanding detection in DC Microgrids are registered and analysed, giving more grounding to the method based on the Positive Feedback in the Inverter's Control System. This method demonstrates, with the help of the small signal model, as well as the Routh-Hurwitz stability criterion, the stability of the four different techniques that consist this method for different values of the feedback gain.

The practical part of this thesis demonstrates, with the help of the MATLAB/Simulink programming environment, the stability, instability and marginal stability of the four techniques. For the first three techniques the system's circuit simulation is performed, the voltage waveform in the Point of Common Coupling is observed and the amount of time to detect the islanding is calculated.

The last section consists of conclusions and comparisons regarding the operation of the four techniques consisting the method based on the Positive Feedback in the Inverter's Control System. Finally, there are suggestions for transferring some islanding detection methods from AC Microgrids to DC Microgrids.

**Keywords:** <<Islanding, AC Anti-islanding Methods, DC Anti-islanding Methods, Stability>>





# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας έγινε υπό την επίβλεψη του καθηγητή του Ε.Μ.Π. Νικόλαου Χατζηαργυρίου, τον οποίο ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δίνοντάς μου την ευκαιρία να επεκτείνω τις γνώσεις μου στο χώρο των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και να ανακαλύψω την επιθυμία μου να εξειδικευτώ στον τομέα αυτό. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου καθώς και τους φίλους μου Χρήστο, Θάνο και Βασίλη για τη στήριξή τους καθόλο το διάστημα συγγραφής αυτής της διπλωματικής εργασίας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Διεσπαρμένη Παραγωγή	10
1.1.1 Τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής	11
1.1.2 Πλεονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής	12
1.1.3 Επιπτώσεις και μειονεκτήματα διεσπαρμένης παραγωγής	13
1.2 Μικρο-δίκτυα (Microgrids)	14
1.2.1 Κατηγορίες Μικροδικτύων	15
1.2.1.1 AC Μικροδίκτυο	15
1.2.1.2 DC Μικροδίκτυο	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	18
ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ	18
2.1 Νησιδοποίηση	18
2.2 Αιτίες εμφάνισης και επιπτώσεις της μη σκόπιμης νησιδοποίησης	19
2.3 Μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης	20
2.4 Μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης για AC μικροδίκτυα	20
2.4.1 Απομακρυσμένες μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης	20
2.4.2 Τοπικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης	23
2.4.2.1 Τοπικές μέθοδοι για ΜΔΠ με Σύγχρονη Γεννήτρια	23
2.4.2.1.1 Παθητικές μέθοδοι	23
2.4.2.1.2 Ενεργητικές Μέθοδοι	31
2.4.2.2 Τοπικές μέθοδοι για ΜΔΠ με Αντιστροφή	34
2.4.2.2.1 Παθητικές Μέθοδοι	35
2.4.2.2.2 Ενεργητικές Μέθοδοι	39
2.4 Μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης για DC μικροδίκτυα	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	70
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	70

3.1 Εισαγωγή	70
3.2 Προσομοιώσεις	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	92
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	92
3.1 Συμπεράσματα	92
3.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96

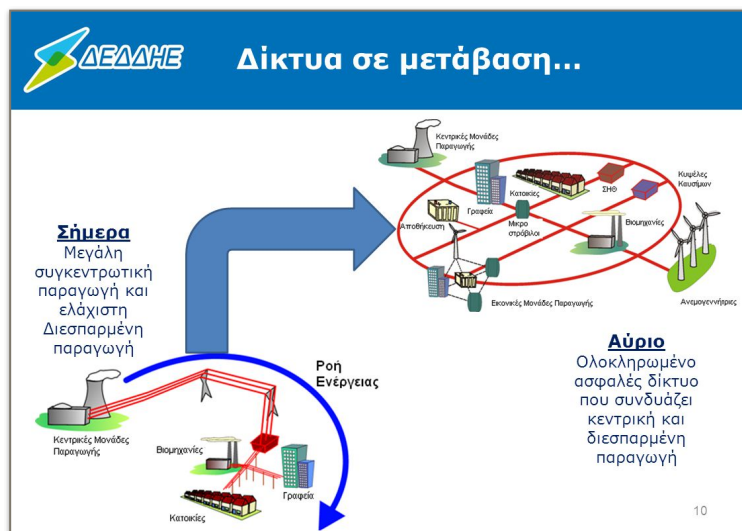
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Διεσπαρμένη Παραγωγή

Η διεσπαρμένη παραγωγή είναι μία προσέγγιση που χρησιμοποιεί τεχνολογίες μικρής κλίμακας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κοντά στα κέντρα κατανάλωσης ισχύος. Σε πολλές περιπτώσεις, η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει ηλεκτρική ενέργεια με χαμηλό κόστος και υψηλή αξιοπιστία ισχύος, καθώς και λιγότερες περιβαλλοντολογικές συνέπειες σε σχέση με τις παραδοσιακές γεννήτριες ισχύος [6].

Σε αντίθεση με τη χρήση λίγων σταθμών παραγωγής μεγάλης κλίμακας που βρίσκονται μακριά από τα καταναλωτικά κέντρα, τα συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής απασχολούν πολυάριθμες αλλά μικρές μονάδες και μπορούν να παράγουν ισχύ με ελάχιστη εξάρτηση από το δίκτυο διανομής και μεταφοράς. Η ισχύς των μονάδων που εγκαθίστανται δεν υπερβαίνει τα 50-100 MW και συνήθως είναι της τάξης λίγων εκατοντάδων kW.



Σχ. 1.1 Σημερινή παραγωγή και παραγωγή του μέλλοντος

Στις μέρες μας υπάρχει σημαντική απώλεια πρωτογενούς ενέργειας καθώς απορρίπτεται θερμότητα κατά την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Με την εγκατάσταση των τοπικών μονάδων συμπαραγωγής το καταναλισκόμενο καύσιμο χρησιμοποιείται για την κάλυψη των αναγκών των τοπικών καταναλωτών οι οποίοι μπορούν να ανταλλάσσουν ηλεκτρισμό και θερμότητα και οι απώλειες μετατροπής αλλά και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μειώνονται αισθητά. Η αύξηση της αποδοτικότητας της χρήσης της πρωτογενούς ενέργειας σε συνδυασμό με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) σε τοπικό επίπεδο μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αέριων ρύπων.

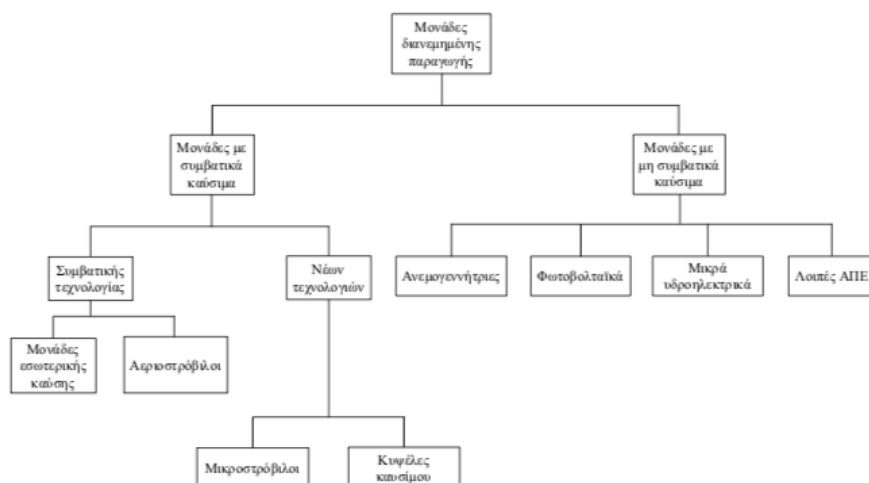
Το σημερινό μοντέλο παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας κυριαρχείται από κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Η ισχύς σε αυτούς τους σταθμούς είναι τυπικά καύση (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) ή πυρηνική ενέργεια. Τα κεντρικά μοντέλα ισχύος, όπως αυτό, απαιτούν τη διανομή από το κέντρο σε απομακρυσμένους καταναλωτές. Οι σημερινοί υποσταθμοί μπορούν να είναι οπουδήποτε από τα 10-100 km μακριά από τους πραγματικούς χρήστες της παραγόμενης ισχύος. Αυτό απαιτεί μετάδοση σε όλη την απόσταση. Αυτό το σύστημα

κεντρικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει πολλά μειονεκτήματα. Εκτός από τα ζητήματα μεταφοράς, τα συστήματα αυτά συμβάλλουν στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, στην παραγωγή πυρηνικών αποβλήτων, στην αναξιοπιστία και την απώλεια ισχύος σε μεγάλες γραμμές μεταφοράς και σε ζητήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια.

Πολλά απ' αυτά τα προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν με τη διεσπαρμένη παραγωγή. Τοποθετώντας την πηγή κοντά στον τελικό χρήστη ξεπερνιούνται τα ζητήματα που αφορούν τη μεταφορά της ενέργειας. Η διεσπαρμένη παραγωγή παράγεται συχνά από μικρές μονάδες μετατροπής ενέργειας όπως οι ηλιακοί συλλέκτες. Αυτές οι μονάδες μπορούν να είναι αυτόνομες ή να ενσωματωθούν στο υφιστάμενο ενεργειακό δίκτυο. Συχνά, οι καταναλωτές που έχουν εγκαταστήσει ηλιακούς συλλέκτες θα συμβάλουν περισσότερο στο δίκτυο απ' ό,τι αφαιρούν, με αποτέλεσμα την κερδοφόρα κατάσταση τόσο για το ηλεκτρικό δίκτυο όσο και για τον τελικό χρήστη[2], [3].

## 1.1.1 Τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Οι κυριότερες τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες. Στις μονάδες που χρησιμοποιούν συμβατικά και μη ανανεώσιμα καύσιμα και στις μονάδες οι οποίες χρησιμοποιούν ανανεώσιμα καύσιμα, ή απλά μετατρέπουν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχ. 1.2 Τεχνολογίες Μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Για τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής με συμβατικά καύσιμα το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το φυσικό αέριο όπου είναι διαθέσιμο ή πετρέλαιο diesel. Για διαφορετικό καύσιμο, άνθρακα, λιγνίτη ή πυρηνική ενέργεια τα μεγέθη εγκατάστασης είναι πολύ μεγαλύτερα, επομένως τέτοιου είδους μονάδες δεν εμπίπτουν στην διεσπαρμένη παραγωγή. Στις μονάδες νέων τεχνολογιών, που χαρακτηρίζονται έτσι επειδή χρησιμοποιούνται την τελευταία δεκαετία, το καύσιμο είναι στις περισσότερες περιπτώσεις το φυσικό αέριο. Για τις κυψέλες καυσίμου το υδρογόνο προέρχεται από κατάλληλη επεξεργασία του φυσικού αερίου (Reforming) ή από ηλεκτρόλυση του νερού. Αν το υδρογόνο παράγεται από διαδικασίες παραγωγής με τη βοήθεια ΑΠΕ τότε μπορούμε αυτές τις πηγές να τις κατατάξουμε ακόμη και στις ΑΠΕ. Αν στις Μικρο-τουρμπίνες χρησιμοποιείται ως καύσιμο το βιοαέριο, τότε επίσης μπορούμε να τις κατατάξουμε στις μονάδες ΑΠΕ.

Στην κατηγορία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με συμβατικά καύσιμα εντάσσονται οι παλινδρομικές μηχανές με κύριο εκπρόσωπο τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μ.Ε.Κ.), οι αεροστροβιλικές μονάδες, οι μικροτουρμπίνες, οι ατμολέβητες και οι κυψέλες καυσίμου. Μικροί

ατμοστρόβιλοι κυρίως από τοπικές μονάδες συμπαραγωγής και μικροί αεριοστρόβιλοι επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλλά η διείσδυσή τους αναμένεται να είναι σημαντικά μικρότερη.

Στην κατηγορία των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με μη συμβατικά καύσιμα ανήκουν οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, μικρά υδροηλεκτρικά καθώς και λοιπές μονάδες ΑΠΕ, όπως μονάδες παραγωγής ενέργειας από βιομάζα, γεωθερμία ή μονάδες που εκμεταλεύονται την παλίρροια και τα κύματα [4].

## 1.1.2 Πλεονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση στην εγκατάσταση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό συμβαίνει διότι η εγκατάσταση των μονάδων αυτών έχει πλεονεκτήματα οικονομικά, λειτουργικά, ασφάλειας, προς την κατεύθυνση της παραγωγής και της αειφόρου ανάπτυξης ακόμα και αισθητικά.

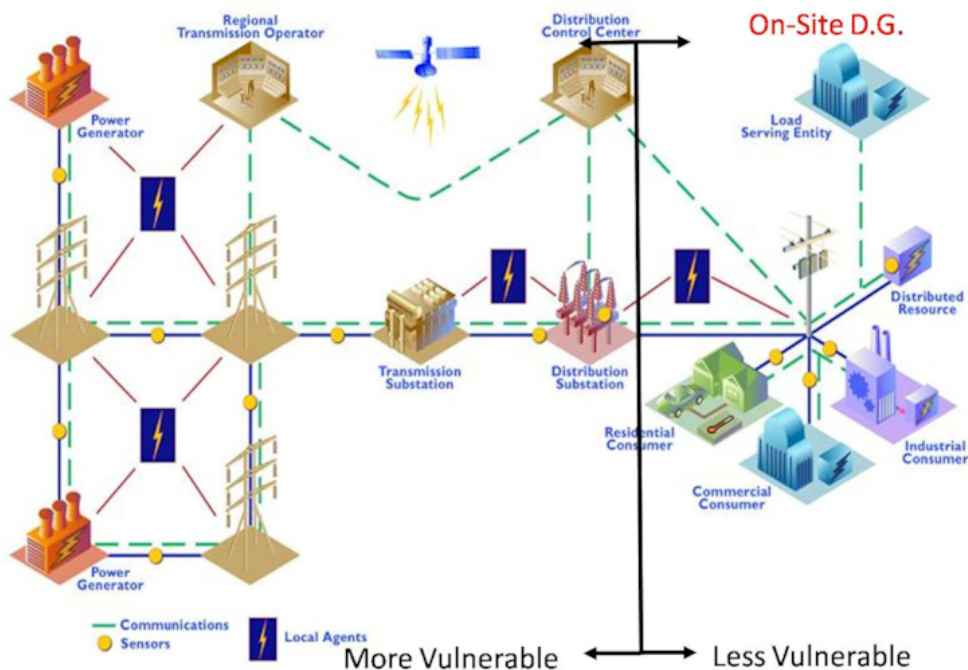
Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί την ανάγκη κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς. Η κατασκευή τους όμως είναι αβέβαιη αφενός λόγω του μεγάλου οικονομικού κόστους και αφετέρου λόγω των κοινωνικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η ευστάθεια των ΣΗΕ και να καθίσταται επισφαλής η τροφοδότηση των φορτίων. Επειδή οι ΜΔΠ εγκαθίστανται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στα φορτία, είναι δυνατόν να μειωθεί ή ακόμα και να αποφευχθεί η δημιουργία νέων γραμμών μεταφοράς και διανομής, γεγονός που συνεπάγεται μείωση του κόστους και αναβάθμιση του υπάρχοντος ΣΗΕ. Επίσης, έχουν μικρό αρχικό κόστος κεφαλαίου σε σχέση με τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Τέλος, όσον αφορά τα οικονομικά πλεονεκτήματα, η εγκατάσταση ΜΔΠ οδηγεί σε μείωση του κόστους μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής σε μια εγκατάσταση και συνεπώς μειώνει τις χρεώσεις ζήτησης και προσφέρει πιο προβλέψιμο ενεργειακό κόστος (μικρότερο ρίσκο) εισάγοντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η εγκατάσταση ΜΔΠ έχει και πολλά λειτουργικά πλεονεκτήματα. Με την εγκατάσταση ΜΔΠ έχουμε μεγαλύτερη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος, ειδικά σε περιοχές όπου οι διακυμάνσεις της τάσης είναι συχνές ή η ενέργεια που παρέχεται απ' το δίκτυο δεν είναι αξιόπιστη. Όταν οι ΜΔΠ χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με εξοπλισμό συμπαραγωγής (π.χ. θέρμανση) έχουμε βελτιώσεις στην απόδοση του εξοπλισμού. Επίσης, υπάρχουν περιοχές, όπως πύργοι κεραιών, μικρά απομακρυσμένα χωριά ή πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, όπου η επιλογή παραδοσιακών γραμμών διανομής δεν είναι δυνατή. Αυτές οι περιοχές επωφελούνται απ' τη διεσπαρμένη παράγωγη ως βασική πηγή ενέργειας. Η λήψη άδειας για τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής είναι ταχύτερη σε σχέση με την αναβάθμιση των γραμμών διανομής. Οι ΜΔΠ αυξάνουν την αξιοπιστία του δικτύου και μειώνουν την υπερφόρτωση των γραμμών διανομής. Τέλος, προσφέρουν κάποια δευτερεύοντα οφέλη όπως σταθερότητα, διασφάλιση από απρόοπτα και δυνατότητα «black start» (η δυνατότητα μιας μονάδας παραγωγής, κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης του συστήματος, να μεταβεί από απενεργοποιημένη κατάσταση σε κατάσταση λειτουργίας και να αρχίσει να παράγει ενέργεια χωρίς να υποβοηθηθεί από το ηλεκτρικό σύστημα).

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής είναι ότι οι αυξομειώσεις στην εγκατεστημένη ισχύ μπορούν να γίνουν με μικρές προσαυξήσεις, σε πλήρη συμφωνία με τη ζήτηση σε αντίθεση με την κατασκευή μεγάλων, κεντρικών εργοστασίων ενέργειας που έχουν κατασκευαστεί για την κάλυψη μελλοντικής κυρίως και όχι τρέχουσας ζήτησης. Επίσης, όσον αφορά την παραγωγή, η εγκατάσταση ΜΔΠ ανταποκρίνεται γρηγορότερα στις νέες απαιτήσεις ισχύος.

Η μείωση των υπέργειων καλωδίων λόγω της εγκατάστασης πολλών μικρών ΜΔΠ συμβάλλουν στην καλύτερη αισθητική συστημάτων ανεξαρτήτων απ' το δίκτυο. Η εγκατάσταση ΜΔΠ έχει ως πλεονέκτημα και την ύπαρξη εγκατεστημένης ισχύος για παροχή εφεδρείας σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας ή και για ψαλιδισμό αιχμών του καταναλωτή και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, με τα αντίστοιχα οικονομικά οφέλη.

Η εγκατάσταση των ΜΔΠ στην κατεύθυνση της αειφόρου ανάπτυξης προσφέρει καθαρότερη, πιο αθόρυβη λειτουργία και μειώνει τις εκπομπές για κάποιες τεχνολογίες (π.χ. τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια και τον άνεμο και κυψέλες καυσίμου), μειώνει ή αναβάλλει τις αναβαθμίσεις των έργων υποδομής (γραμμές και υποσταθμοί) και επιτρέπει την πιο αποτελεσματική οικονομική διαχείριση ενέργειας και φορτίου [2], [6].



Σχ. 1.3 Αξιοπιστία εγκατάστασης ΜΔΠ

### 1.1.3 Επιπτώσεις και μειονεκτήματα διεσπαρμένης παραγωγής

Όπως είναι λογικό, πέρα από τα πολλά πλεονεκτήματα που έχει η εγκατάσταση ΜΔΠ να υπάρχουν και πολλά μειονεκτήματα που προκύπτουν λόγω της αυξημένης διείσδυσης των ΜΔΠ καθώς και οικονομικά θέματα που πρέπει να ξεπεραστούν.

Οι ΜΔΠ έχουν σχετικά υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, σε σχέση με τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Επιπλέον, υπάρχουν διαφορές και στα κόστη κεφαλαίου των διαφορετικών τεχνολογιών ΜΔΠ, όπως τα σχετικά μικρά κόστη των μονάδων εσωτερικής καύσης σε αντιδιαστολή με τα μεγάλα κόστη των κυψελών καυσίμου. Ενδεικτικά, τα κόστη κεφαλαίων των μονάδων εσωτερικής καύσης μπορεί να είναι 1000 ευρώ/kW, ενώ στις κυψέλες καυσίμου είναι στα 20000 ευρώ/kW.

Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων ΜΔΠ, όπως, για παράδειγμα, των αιολικών πάρκων. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να γίνει μετεωρολογική πρόβλεψη, η οποία όμως δεν μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια την ποσότητα ισχύος που μπορεί να παραχθεί. Σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών, όπως, για παράδειγμα, ο άνεμος. Έτσι, υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, δηλαδή η διείσδυση των ΑΠΕ έχει ένα όριο, οπότε πρέπει να υπάρχει εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης από τις διεσπαρμένες γεννήτριες θα μπορούσε να προκαλέσει την αποσύνδεση υγιών γραμμών στις οποίες συνδέονται διεσπαρμένες γεννήτριες λόγω της γρήγορης αντίδρασης των υπέργειων γραμμών μέσης τάσης σε σφάλματα του δικτύου.

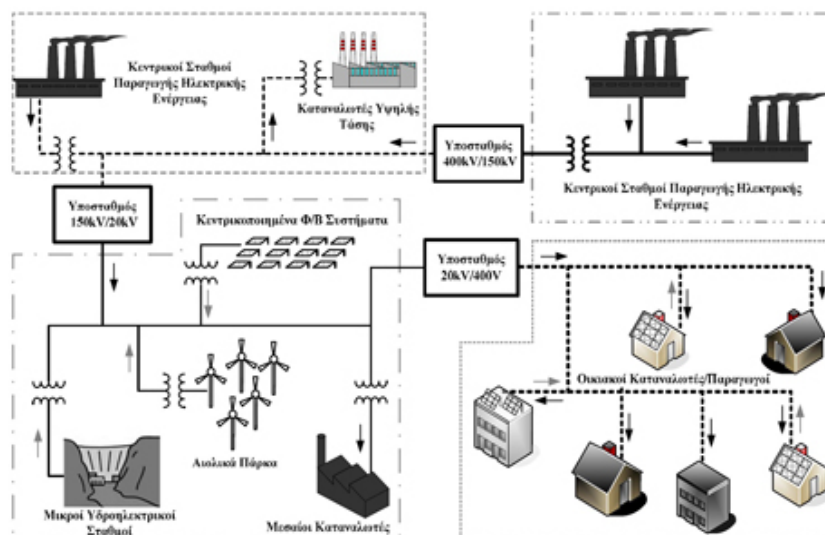
Τα συστήματα διανομής έχουν παραδοσιακά σχεδιαστεί υποθέτοντας ότι ο κύριος υποσταθμός είναι η μοναδική πηγή ισχύος και ικανότητας βραχυκύκλωσης. Οι ΜΔΠ ακυρώνουν αυτή την υπόθεση, επειδή τοποθετούνται μονάδες παραγωγής στο σύστημα διανομής. Έτσι, η σύνδεση ΜΔΠ οδηγεί σε καταστάσεις λειτουργίας που δεν συμβαίνουν σε ένα συμβατικό σύστημα χωρίς μονάδες παραγωγής απευθείας συνδεδεμένες στο σύστημα διανομής. Η αυξημένη διείσδυση ΜΔΠ μπορεί να έχει επιπτώσεις στο σύστημα διανομής, όπως έκθεση του συστήματος και του εξοπλισμού των καταναλωτών σε πιθανή ζημιά, μείωση της ποιότητας ισχύος, μείωση της

αξιοπιστίας και αυξημένος χρόνος για την αποκατάσταση της παροχής ισχύος έπειτα από διακοπή. Οι αρνητικές αυτές επιπτώσεις μπορούν να εξαιρεθούν με κατάλληλη σχεδίαση του συστήματος διανομής.

Όταν η διείσδυση των ΜΔΠ είναι μεγάλη τότε μπορεί να συμβεί υπερφόρτωση των γραμμών και των μετασχηματιστών διανομής εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων παραγωγής τις περιόδους χαμηλής ζήτησης, καθώς επίσης αυξάνει κι ο κίνδυνος υπερτάσεων εξαιτίας των ΜΔΠ που βρίσκονται σε απομακρυσμένους κόμβους του συστήματος διανομής. Το επίπεδο διατραχών της ποιότητας ισχύος μπορεί να αυξηθεί περισσότερο απ' το αποδεκτό όριο για κάποιους καταναλωτές. Τέλος, μπορεί να υπάρξουν προβλήματα στη λειτουργία των συστημάτων προστασίας, όπως και να έχουμε αμφίδρομη ροή ισχύος, δηλαδή όχι μόνο απ' τη ΜΤ προς τη ΧΤ αλλά και ανάποδα, πράγμα που απαιτεί διαφορετικά μέσα προστασίας στα δύο επίπεδα τάσης [2], [6].

## 1.2 Μικρο-δίκτυα (Microgrids)

Τα Μικροδίκτυα είναι δίκτυα διανομής κυρίως ΧΤ και δευτερευόντως, κυρίως στην Ιαπωνία, ΜΤ τα οποία περιλαμβάνουν σημαντικό αριθμό μικρών μονάδων παραγωγής (μικρό-τουρμπίνες, φωτοβολταϊκά, μικρές ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, κλπ) ισχύος από λίγα kW μέχρι 1-2 MW, συσκευών αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές, σφόνδυλοι, πυκνωτές ενέργειας, κλπ) και ελεγχόμενων φορτίων. Το βασικό γνώρισμα αυτών των δικτύων είναι ο συντονισμένος έλεγχός τους, ώστε τελικά να εμφανίζονται στο ανάντη δίκτυο ως μία ενιαία οντότητα με το δικό της αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου το οποίο δεν επιβαρύνει τα συστήματα ελέγχου του ανάντη ευρισκόμενου δικτύου με τον έλεγχο κάθε μίας μονάδας ξεχωριστά. Ένα άλλο εξίσου βασικό όσο και πρωτοποριακό γνώρισμά των Μικροδικτύων είναι η δυνατότητα τους να λειτουργούν όχι μόνο διασυνδεδεμένα με το ανάντη δίκτυο ΜΤ, συνήθης λειτουργία, αλλά και απομονωμένα (νησιδοποιημένα), όταν διακοπεί η διασύνδεση με το κύριο δίκτυο με οργανωμένο και ελεγχόμενο τρόπο παρέχοντας στους καταναλωτές αυξημένη αξιοπιστία και βελτιωμένα επίπεδα ποιότητας ισχύος. Αυτή η δυνατότητα βεβαίως απαιτεί εξελιγμένες υποδομές προστασίας, ελέγχου και τηλεπικοινωνιών, προκειμένου να είναι σε θέση να απομονώσουν το Μικροδίκτυο και να παράξουν σταθερή, αυτόνομη λειτουργία. Η διαρκής όμως πρόοδος στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και ελεγκτών των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής συμβάλλει ώστε τέτοια λειτουργία να γίνεται ολοένα και περισσότερο ευκολότερη τεχνικά και οικονομικά να επιτευχθεί.



Σχ. 1.4 Δομή ενός Μικροδικτύου

Μέχρι σήμερα οι ΜΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο διανομής, εκτός λίγων εξαιρέσεων, περιορίζονται μόνο στην παροχή ενέργειας στο σύστημα και δε συνεισφέρουν σε άλλες λειτουργικές ανάγκες όπως είναι η παροχή εφεδρείας, η υποστήριξη της τάσης και η βελτίωση της αξιοπιστίας στην τροφοδοσία του φορτίου. Για να εξασφαλιστεί ο σημερινός τρόπος λειτουργίας



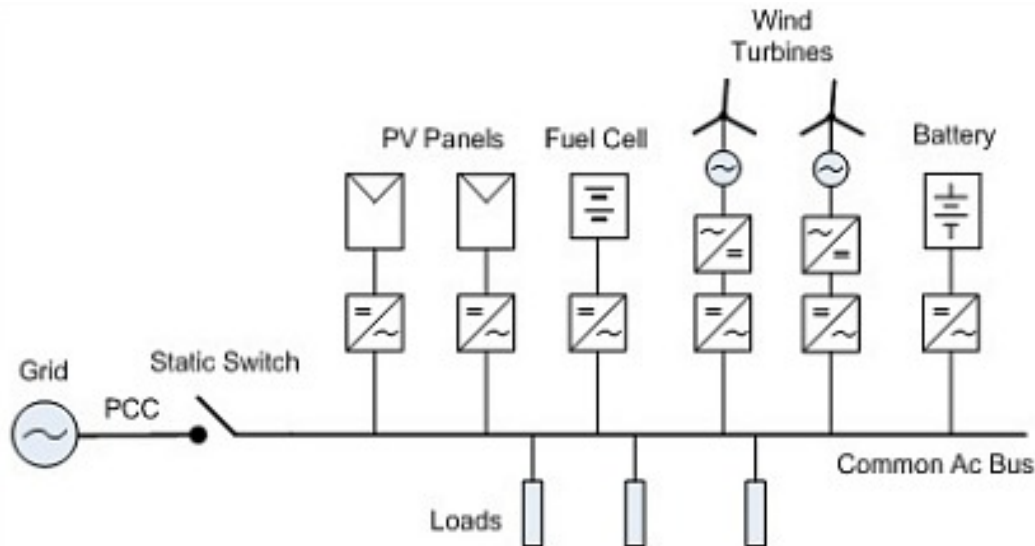
των ΣΗΕ και να αποφευχθεί η νησιδοποίηση τμημάτων του δικτύου, οι ΜΔΠ αποσυνδέονται από το δίκτυο όταν υπάρχουν μεγάλες διαταραχές και επανασυνδέονται όταν αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία. Όμως η αντιμετώπιση αυτή δεν είναι δυνατόν να συνεχιστεί όταν η διείσδυσή τους αυξηθεί σημαντικά διότι θα δημιουργεί πρόβλημα στην ευστάθεια των ΣΗΕ. Είναι επομένως απαραίτητο οι ΜΔΠ να παραμένουν στο δίκτυο και να προσφέρουν υπηρεσίες στήριξης της τάσης και της συχνότητας. Προκειμένου οι ΜΔΠ να προσφέρουν βοηθητικές υπηρεσίες (ancillary services) στο δίκτυο και ταυτόχρονα, όπως προαναφέρθηκε, να επιλυθούν τα προβλήματα που δημιουργεί η εγκατάσταση μεγάλου αριθμού ΜΔΠ στο δίκτυο, είναι απαραίτητο να οργανωθούν σε μικροδίκτυα.

Τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παραδοσιακά δίκτυα. Η συνολική απόδοση της ενέργειας αυξάνεται με τις εφαρμογές συμπαραγωγής, που αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων. Έτσι, ενώ μέχρι τη δημιουργία των μικροδικτύων είχαμε μεγάλη κεντρική παραγωγή ισχύος και τοπική παραγωγή θερμότητας, με την δημιουργία των μικροδικτύων τόσο η παραγωγή ισχύος όσο και θερμότητας γίνεται τοπικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κατανάλωση της ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα να μειώνεται κατά το 1/3. Ελαχιστοποιείται η συνολική κατανάλωση ενέργειας και έχουμε βελτιωμένες περιβαλλοντικές επιδράσεις. Τέλος, τα μικροδίκτυα έχουν αυξημένη προσαρμοστικότητα και αξιοπιστία, καθώς και τοπικό έλεγχο τάσης και συχνότητας [2], [3].

## 1.2.1 Κατηγορίες Μικροδικτύων

### 1.2.1.1 AC Μικροδίκτυο

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός AC Μικροδικτύου. Όλες οι μονάδες, παραγωγής και αποθήκευσης, συνδέονται στο ζυγό AC με ανάλογες συσκευές. Στις μονάδες παραγωγής με συνεχή τάση και ρεύμα χρειαζόμαστε μετατροπείς ισχύος, ενώ αν υπάρχουν συσσωρευτές είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν αυτόνομοι μετατροπείς με ενσωματωμένους ρυθμιστές φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η αμφίδρομη ροή ισχύος, αφού οι μετατροπείς αυτοί επιτρέπουν το βέλτιστο συντονισμό των μονάδων παραγωγής και χρησιμοποιούν τις μπαταρίες σαν ενδιάμεση μονάδα προσωρινής αποθήκευσης, ενώ παρατείνεται ο χρόνος ζωής των μπαταριών. Επιπλέον κάποιες μικροπηγές, όπως οι μικρές ανεμογεννήτριες, παρόλο που παράγουν ισχύ σε AC είναι απαραίτητο να συνδέονται στο μικροδίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων, διότι η τάση εξόδου και η συχνότητα είναι διαφορετική από αυτή του μικροδικτύου. Αυτού του είδους η σύνδεση προτιμάται και φαίνεται επικρατέστερη στα σημερινά μικροδίκτυα εξαιτίας των πολλαπλών οφελών. Τα κυριότερα από αυτά είναι ότι η δυνατότητα επέκτασης είναι αρκετά καλή όπως και η σύνδεση νέων μονάδων, ενώ τα διάφορα μέρη μπορούν να συνδυαστούν ώστε να είναι αποδοτικότερα οικονομικά. Υπάρχουν βέβαια και κάποια μειονεκτήματα, όπως η δυσκολία ελέγχου και το μεγάλο κόστος που προκύπτει στα μικτά συστήματα. Επιπλέον υπάρχουν απώλειες από την μετατροπή ισχύος από το συνεχές στο εναλλασσόμενο. Η σύνδεση στον AC ζυγό ενός μικροδικτύου γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα. Το βασικό πλεονέκτημα της σύνδεσης αυτής είναι ότι στον ίδιο ζυγό μπορούν να συνδεθούν πολλές διαφορετικές πηγές που μπορεί να βρίσκονται και σε απομακρυσμένες περιοχές. Αυτό σημαίνει ότι η σύνδεση αυτή είναι κατάλληλη για ένα μεγάλο μικροδίκτυο, για παράδειγμα έναν οικισμό και όχι για μια μεμονωμένη οικία.



Σχ. 1.5 AC Μικροδίκτυο

Ο στατικός διακόπτης είναι υπεύθυνος για τη σύνδεση του μικροδικτύου με το ανάντη δίκτυο. Έτσι στην περίπτωση που συμβεί κάποιο σφάλμα στο ανάντη δίκτυο, η γραμμή μπορεί να νησιδοποιηθεί (απομόνωση από το κεντρικό δίκτυο) με τη χρήση του στατικού διακόπτη, έτσι ώστε να απομονωθούν τα ευαίσθητα φορτία από το ισχυρό δίκτυο και να ελαχιστοποιηθεί η διαταραχή σε αυτά. Κατά τη νησιδοποιημένη λειτουργία, το μικροδίκτυο θα λειτουργεί αυτόνομα.

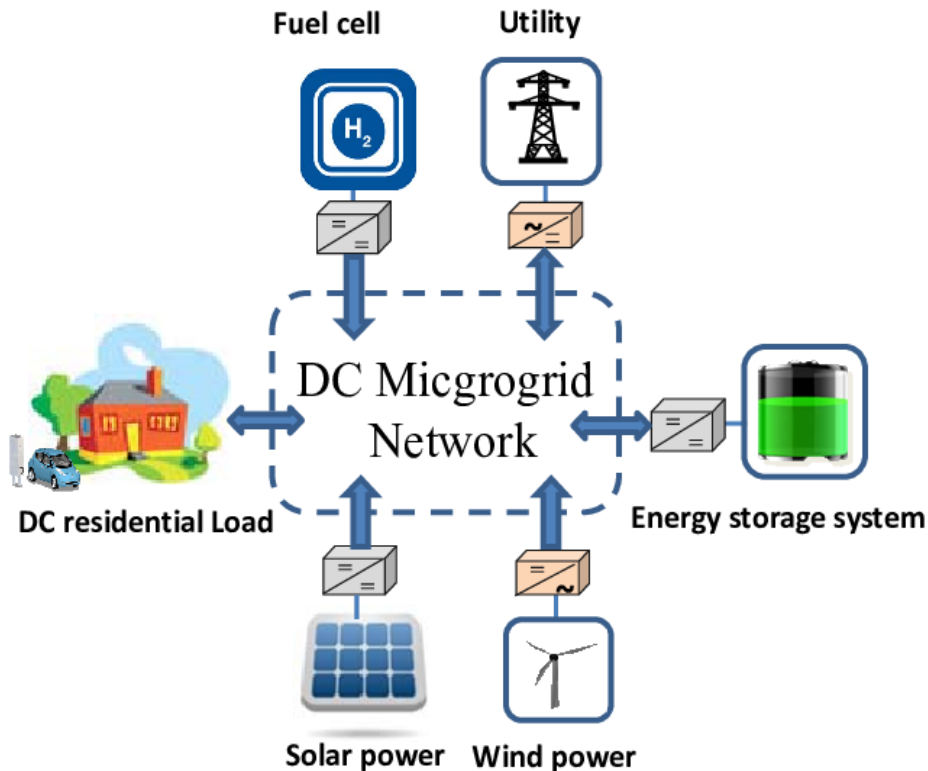
Η αποσύνδεση ή η επανασύνδεση του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο πρέπει να καθορισθεί από το Σημείο Κοινής Σύνδεσης - ΣΚΣ (Point of Common Coupling - PCC), ένας ζυγός σύνδεσης με το ανάντη δίκτυο, τοποθετημένος στο πρωτεύον του μετασχηματιστή. Σε αυτό το σημείο το μικροδίκτυο πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις σύνδεσης. Επιπλέον η επιτυχής αποσύνδεση ή επανασύνδεση εξαρτάται από το σύστημα ελέγχου του μικροδικτύου. Οι ελεγκτές πρέπει να διασφαλίσουν την εκτέλεση των διεργασιών και ότι τα σημεία λειτουργίας ικανοποιούνται μετά από κατάλληλες ενέργειες [5].

### 1.2.1.2 DC Μικροδίκτυο

Το DC Μικροδίκτυο είναι ένα σύστημα ισχύος το οποίο έχει αναθερμανθεί το τελευταίο διάστημα μέσα στα πλαίσια της διανομής με συνεχές ρεύμα. Το DC Μικροδίκτυο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να υποστηρίζει DC ρεύμα και περιλαμβάνει ένα ζυγό συνεχούς τάσης (DC Bus) με ρυθμιζόμενη τάση. Για το λόγο αυτό είναι κατάλληλο για κατανομημένες μικρές πηγές ενέργειας που παράγουν ισχύ σε DC όπως είναι τα φωτοβολταϊκά και οι κυψέλες καυσίμου, καθώς και για συσκευές αποθήκευσης ενέργειας όπως δευτερεύουσες μπαταρίες (secondary batteries) και για υπερπυκνωτές διπλού στρώματος EDLCs (Electric Double Layer Capacitors). Οι μικροπηγές αυτές καθώς και οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας συνδέονται στο μικροδίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων DC/DC προκειμένου να ρυθμίζουν την τάση στα κατάλληλα επίπεδα. Παρόλα αυτά στο DC Μικροδίκτυο είναι δυνατόν να συνδεθούν και μικροπηγές που παράγουν ισχύ σε DC. Οι μικροπηγές αυτές συνδέονται στο μικροδίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων AC/DC έτσι ώστε να μετατρέπουν την ενέργεια εναλλασσόμενης μορφής σε συνεχή.

Το DC Μικροδίκτυο συνδέεται με το ανάντη δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα AC/DC. Αν είναι επιθυμητό το μικροδίκτυο να εξαγει το πλεόνασμα της ενέργειας στο ανάντη δίκτυο, τότε αυτός ο μετατροπέας είναι αμφίδρομης ροής ισχύος. Επειδή η τάση του DC ζυγού ρυθμίζεται από το μετατροπέα AC/DC, έχει υψηλή ποιότητα ακόμα και όταν το Μικροδίκτυο συνδέεται με χαμηλής ποιότητας δίκτυα διανομής. Στην περίπτωση που συμβεί κάποιο σφάλμα στο ανάντη δίκτυο, το Μικροδίκτυο μπορεί να αποσυνδεθεί πολύ γρήγορα και να συνεχίσει να λειτουργεί αυτόνομα σε κατάσταση νησιδοποίησης, παρέχοντας την απαιτούμενη ισχύ στα φορτία από τις δικές του μονάδες. Αν η κατανάλωση ισχύος από τα φορτία είναι μεγαλύτερη από την ισχύ που παράγουν οι

μικροπηγές του Μικροδικτύου κατά τη διάρκεια απομονωμένης λειτουργίας, το DC Μικροδίκτυο έχει τη δυνατότητα να σταματήσει σκόπιμα την παροχή ισχύος σε κάποια από αυτά, προκειμένου να συνεχίσει να τροφοδοτεί τα κρίσιμα φορτία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των ηλεκτρονικών μετατροπέων με τους οποίους τα φορτία αυτά συνδέονται στο μικροδίκτυο.



Σχ. 1.6 DC Μικροδίκτυο

Τα DC Μικροδίκτυα έχουν αποκτήσει αρκετό ενδιαφέρον σε σχέση με τα AC Μικροδίκτυα τα τελευταία χρόνια, λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Επειδή σήμερα κυριαρχούν τα οικιακά DC φορτία, αποφεύγονται οι αχρείαστες AC/DC ή DC/AC μετατροπές, αφού οι περισσότερες μικροπηγές παράγουν ισχύ σε DC. Αυτό έχει άμεση επίδραση στο κόστος και τις απώλειες του συστήματος. Επιπλέον οι μετατροπές που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των μικροπηγών που παράγουν ισχύ σε DC συνήθως δεν περιέχουν μετασχηματιστές, μειώνοντας επιπλέον το μέγεθος και το κόστος του συνολικού συστήματος. Ακόμα είναι πιο εύκολος ο έλεγχος του δικτύου και το σύστημα είναι σθεναρό. Το DC Μικροδίκτυο είναι κατάλληλο για να ενσωματώσει ΜΔΠ που χρησιμοποιούν ΑΠΕ όπως είναι τα φωτοβολταϊκά, τα οποία αποτελούν την πιο πολλά υποσχόμενη πηγή ενέργειας του μέλλοντος. Στο DC Μικροδίκτυο δεν υπάρχει ανάγκη για ρύθμιση της φάσης και της συχνότητας της τάσης αφού η τάση είναι συνεχής, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της αξιοπιστίας και καθιστά ευκολότερο τον έλεγχο του συστήματος. Έτσι το DC Μικροδίκτυο είναι καταλληλότερο για να ενσωματώσει ΜΔΠ. Τέλος, η απουσία αρμονικών και ροής αέργου ισχύος στη DC διασύνδεση, κάνει τον έλεγχο ακόμα ευκολότερο και μειώνει τις απώλειες του συστήματος [5].

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΝΗΣΙΔΟΠΟΙΗΣΗ

### 2.1 Νησιδοποίηση



Σχ. 2.1 Νησιδοποίηση

Νησιδοποίηση ορίζεται ως η κατάσταση στην οποία τουλάχιστον μία μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτεί τοπικά φορτία όντας απομονωμένη από οποιοδήποτε μεγαλύτερο ηλεκτρικό σύστημα, όπως είναι το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Η νησιδοποίηση μπορεί να είναι είτε σκόπιμη, είτε μη σκόπιμη. Με βάση αυτό, υπάρχουν δύο απόψεις σχετικά με την αξιολόγηση της επίδρασης της νησιδοποίησης ως κατάσταση στο ΣΗΕ.

Από τη μία πλευρά, η σκόπιμη νησιδοποίηση συνδέεται με την ιδέα του Μικροδικτύου και έτσι, δίνεται η δυνατότητα συνέχισης της λειτουργίας ενός τμήματος της ηλεκτρικής νησίδας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η δυνατότητα σκόπιμης νησιδοποίησης προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκούς ελέγχου τάσης και συχνότητας μέσα στην ηλεκτρική νησίδα προκειμένου να διατηρείται ευσταθής η λειτουργία της. Τα πλεονεκτήματα αυτής της οπτικής γωνίας για τις ΜΔΠ είναι ότι η σκόπιμη νησιδοποίηση μπορεί να βελτιώσει τη γενικότερη αξιοπιστία και την ασφάλεια της παροχής ισχύος, καθώς επίσης και ότι λόγω των βελτιωμένων δεικτών παροχής ισχύος, αυξάνονται τα έσοδα.

Από την άλλη πλευρά, η μη σκόπιμη νησιδοποίηση έχει συνήθως μικρή διάρκεια ζωής, λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει μεγάλη επίδραση στο ισοζύγιο ισχύος παραγωγής-κατανάλωσης. Η ανισορροπία αυτή προκαλεί μεγάλες αλλαγές στο μέτρο και τη συχνότητα της τάσης με

αποτέλεσμα να ξεπερνώνται τα προκαθορισμένα επιτρεπόμενα όρια. Έτσι, διακόπτεται η λειτουργία των συμμετεχόντων ΜΔΠ. Όμως, υπάρχει η περίπτωση σχετικής ισορροπίας του ενεργειακού ισοζυγίου με αποτέλεσμα η αλλαγή του μέτρου των προαναφερθέντων μεταβλητών της τάσης να είναι τόσο μικρή, ώστε να μην ξεπεραστούν τα επιτρεπόμενα όρια και συνεπώς η ηλεκτρική νησίδα να παραμείνει διασυνδεδεμένη για μεγάλο χρονικό διάστημα [12].

## 2.2 Αιτίες εμφάνισης και επιπτώσεις της μη σκόπιμης νησιδοποίησης

Η πιθανή εμφάνιση της μη σκόπιμης νησιδοποίησης σε δίκτυα διανομής με ΜΔΠ είναι ένα απ' τα μεγάλα θέματα σε σχέση με την ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής. Επίσης, η συνεχής διείσδυση των ΜΔΠ τα τελευταία χρόνια έχει αυξήσει την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου καθώς και τις ανησυχίες που συνδέονται με το φαινόμενο αυτό.

Οι αιτίες εμφάνισης της μη σκόπιμης νησιδοποίησης είναι οι εξής:

- Ανίχνευση σφάλματος από τον προστατευτικό εξοπλισμό του δικτύου, με αποτέλεσμα την απομόνωση του τμήματος του δικτύου το οποίο περιέχει το σφάλμα, χωρίς όμως να ανιχνεύεται από τις ΜΔΠ του τμήματος αυτού.
- Κατά λάθος απενεργοποίηση της παροχής του δικτύου λόγω προβληματικού εξοπλισμού.
- Πρόκληση σφάλματος από τον ανθρώπινο παράγοντα.
- Πρόκληση σφάλματος λόγω κάποιου φυσικού φαινομένου.

Αν και δεν είναι εγγενές πρόβλημα, η μη σκόπιμη δημιουργία μίας νησίδας έχει ορισμένες συνέπειες για την ασφαλή λειτουργία του νησιδοποιημένου τμήματος του δικτύου. Οι κύριοι κίνδυνοι και τα προβλήματα που σχετίζονται με την ακούσια νησιωτική δραστηριότητα είναι:

- Ύπαρξη θανάσιμου κινδύνου για το προσωπικό που εργάζεται σε κάποιο τμήμα του δικτύου το οποίο είναι σε κατάσταση νησιδοποίησης. Το προσωπικό διατρέχει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας, διότι εργάζεται με την προϋπόθεση ότι το συγκεκριμένο τμήμα έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο (άρα, θεωρείται ανενεργό), αλλά στην πραγματικότητα συνεχίζει να τροφοδοτείται από τις ΜΔΠ της νησίδας.
- Ύπαρξη κινδύνου διαταραχών της συχνότητας και της τάσης και διακύμανση αυτών εκτός των προκαθορισμένων ορίων, καθώς τα μεγέθη αυτά δεν επιβάλλονται από το δίκτυο. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφική βλάβη ορισμένων συσκευών που εξακολουθούν να λειτουργούν στο νησιδοποιημένο τμήμα του δικτύου.
- Πολλοί πάροχοι χρησιμοποιούν πρακτικές στιγμιαίας επανασύνδεσης. Αν η ΜΔΠ επανασυνδεθεί με το σύστημα διανομής, μπορεί η επανασύνδεση αυτή να γίνει εκτός φάσης, με αποτέλεσμα να προκληθεί μεγάλη αύξηση στις τιμές μηχανικής ροπής και ρευμάτων, γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει βλάβες στις γεννήτριες και στις κινητήριες μηχανές.
- Σε περίπτωση σφάλματος εντός της ηλεκτρικής νησίδας, οι ΜΔΠ δεν έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης, διότι τα υφιστάμενα μέσα προστασίας είναι επιλεγμένα με βάση τα μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης που προέρχονται από το δίκτυο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα μέσα προστασίας να μη διεγερθούν από τα χαμηλά ρεύματα των ΜΔΠ και συνεπώς να διατηρηθούν τα σφάλματα εντός της ηλεκτρικής νησίδας.

Για τους παραπάνω λόγους, καθίσταται αναγκαίο η νησιδοποίηση να ανιχνεύεται και να διακόπτεται η λειτουργία των μονάδων παραγωγής έγκαιρα. Γι αυτό το σκοπό έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι ανίχνευσης της νησιδοποίησης και για τα AC μικροδίκτυα και για τα αντίστοιχα DC [12].

## 2.3 Μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης

Οι μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις απομακρυσμένες τεχνικές και τις τοπικές τεχνικές. Οι τελευταίες, με τη σειρά τους, χωρίζονται σε παθητικές, και ενεργητικές. Στα AC δίκτυα έχει γίνει μια εκτενής μελέτη όσον αφορά την αντιμετώπιση της νησιδοποίησης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν ανακαλυφθεί αρκετές μέθοδοι που ανιχνεύουν έγκαιρα τη νησιδοποίηση, με μικρό κόστος και μικρή μη ανιχνεύσιμη ζώνη. Αντιθέτως, στα DC δίκτυα υπάρχουν λιγότερες μέθοδοι, καθώς υπάρχουν δυσκολίες οι οποίες δεν εμφανίζονται στα AC.

Όλες οι μέθοδοι για την ανίχνευση της νησιδοποίησης αξιολογούνται με βάση κάποια πολύ βασικά κριτήρια και καμία δεν τα πληρεί όλα. Αυτά τα κριτήρια είναι τα εξής:

- Η Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη (MAZ)
- Η ποιότητα ισχύος και το επίπεδο ευστάθειας του συστήματος
- Η λειτουργία σε περίπτωση πολλών αντιστροφών
- Η εσφαλμένη ανίχνευση νησιδοποίησης
- Το κόστος

## 2.4 Μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης για AC μικροδίκτυα

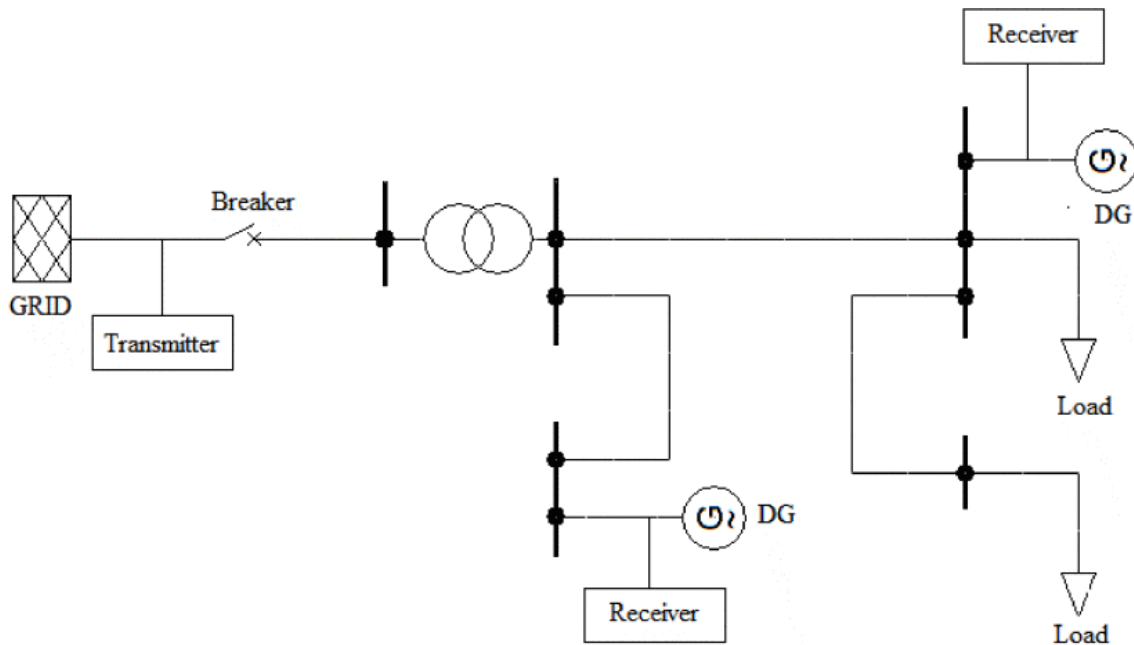
Η βασική φιλοσοφία της ανίχνευσης της κατάστασης νησιδοποίησης είναι αφενός η παρακολούθηση των παραμέτρων εξόδου της ΜΔΠ και των παραμέτρων του συστήματος και αφετέρου η λήψη απόφασης για το αν η ΜΔΠ βρίσκεται σε κατάσταση νησιδοποίησης ή όχι, με βάση την αλλαγή των παραμέτρων αυτών. Οι μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, χωρίζονται σε τοπικές μεθόδους, όταν η ανίχνευση βασίζεται στην πλευρά της ΜΔΠ, και στις απομακρυσμένες μεθόδους, όταν η ανίχνευση βασίζεται στον πάροχο.

### 2.4.1 Απομακρυσμένες μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης

Οι απομακρυσμένες τεχνικές επιτρέπουν την απόφαση αποσύνδεσης στον πάροχο. Οι περισσότερες τεχνικές βασίζονται στην επικοινωνία μεταξύ του παρόχου και της ΜΔΠ. Παρόλο που αυτές οι τεχνικές έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία από τις τοπικές τεχνικές, συνήθως έχουν υψηλό κόστος υλοποίησης και οι χρόνοι ενεργοποίησης της νησιδοποιημένης γεννήτριας ποικίλουν. Παρακάτω καταγράφονται οι πιο αντιπροσωπευτικές απομακρυσμένες μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης.

## I. Σύστημα Σηματοδότησης Γραμμών Ισχύος (Power Line Carrier Communication - PLCC)

Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιείται μια γεννήτρια σημάτων στο σύστημα μεταφοράς και μεταδίδει συνεχώς ένα σήμα χρησιμοποιώντας τη γραμμή ισχύος ως μονοπάτι για να μεταδοθεί το σήμα. Οι ΜΔΠ είναι εξοπλισμένες με ανιχνευτές σημάτων. Αν ο δέκτης δε λάβει το σήμα, σημαίνει ότι ο διακόπτης μεταξύ του συστήματος μεταφοράς και του συστήματος διανομής έχει ανοίξει, άρα κατ' επέκταση το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση νησίδας.

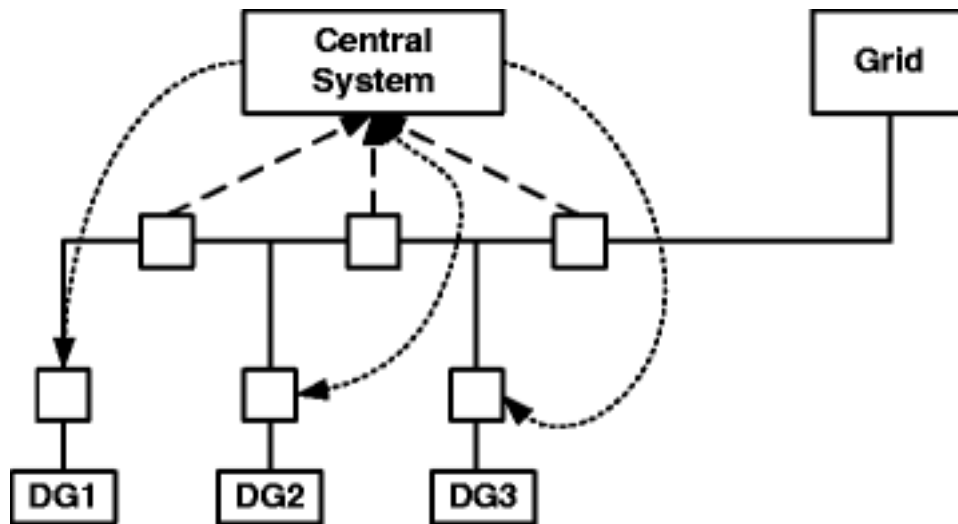


Σχ 2.2 Power Line Carrier Communication Method

Η μέθοδος αυτή έχει μηδενική Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη, καμία επίδραση στην ποιότητα ισχύος και λειτουργεί με πολύ υψηλή απόδοση στην περίπτωση πολλών εγκατεστημένων ΜΔΠ. Το ποσοστό εσφαλμένης ανίχνευσης είναι μηδενικό, καθώς το σήμα σταματά να μεταδίδεται όταν ανοίξει ο διακόπτης μεταξύ του συστήματος μεταφοράς και του συστήματος διανομής. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος για την αγορά της γεννήτριας σημάτων (Transmitter), των αποδεκτών σημάτων (Receivers) και για τη διάταξη ζεύξης (Coupling Device). Τέλος, αν η απόσταση που ταξιδεύει το σήμα είναι μεγαλύτερη από 15km αυτό εξασθενεί και γι αυτό το λόγο απαιτούνται Repeaters, οι οποίοι αυξάνουν περαιτέρω το κόστος [18].

## II. Σύστημα Μεταφοράς του Σήματος Απόζευξης (Transfer Trip)

Η βασική ιδέα του Συστήματος Μεταφοράς του Σήματος Απόζευξης είναι ότι όλοι οι ασφαλειοαποζεύκτες και οι διακόπτες επαναφοράς, που μπορούν να θέσουν το σύστημα σε κατάσταση νησιδοποίησης, παρακολουθούνται και συνδέονται με μία κεντρική μονάδα ελέγχου. Μόλις ανιχνευθεί κάποια αποσύνδεση στον υποσταθμό, ο κεντρικός αλγόριθμος αποφασίζει ποιες περιοχές είναι νησιδοποιημένες και στέλνει τα κατάλληλα σήματα στις γεννήτριες έτσι ώστε είτε να συνεχίσουν να λειτουργούν είτε όχι. Γι αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται Συστήματα Ελέγχου-Εποπτείας και Μεταφοράς Δεδομένων Λειτουργίας από απόσταση (Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA).



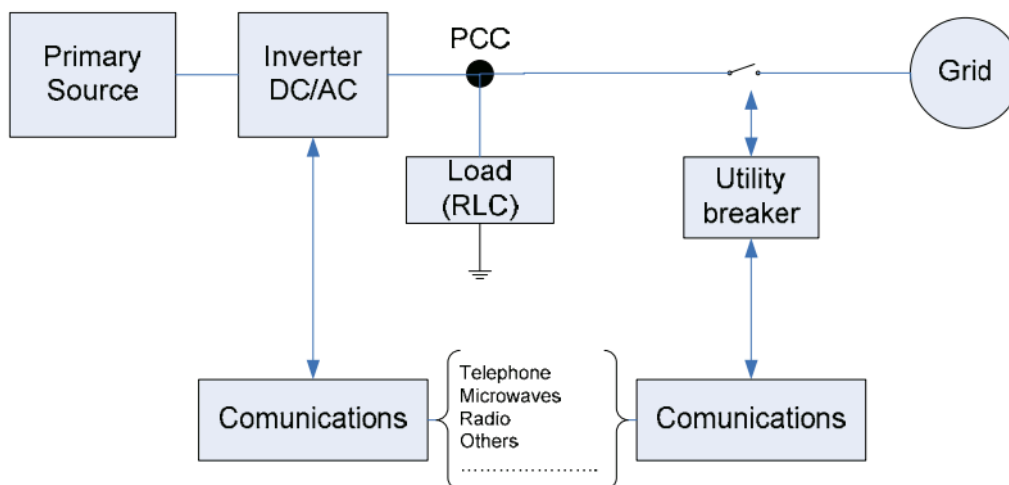
Σχ. 2.3 Transfer Trip Method

Προφανώς, η μέθοδος αυτή απαιτεί εκτενή μέσα επικοινωνίας. Παραδοσιακά, τα ραδιακύματα ή οι τηλεφωνικές γραμμές υπήρξαν τα πιο συχνά μέσα επικοινωνίας. Όμως, στις μέρες μας έχουν εισαχθεί κι άλλες τεχνολογίες επικοινωνίας, όπως το Internet broadband, η ασύρματη επικοινωνία, η οπτική ίνα Ethernet και η δορυφορική επικοινωνία.

Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο έτσι κι εδώ το υψηλό κόστος είναι ένα μεγάλο μειονέκτημα και επιπλέον υπάρχει και πολύπλοκος σχεδιασμός του δικτύου οδηγώντας πολλές φορές στον επανασχεδιασμό του [21].

### III. Παραγωγή Σήματος κατά την Αποσύνδεση (Signal Produced by Disconnect - SPD)

Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με τη μέθοδο που βασίζεται στο Σύστημα Σηματοδότησης Γραμμών Ισχύος (PLCC). Η μέθοδος SPD βασίζεται στην επικοινωνία μεταξύ του δικτύου και των αντιστροφέν για την αποφυγή της νησιδοποίησης. Η μέθοδος SPD διαφέρει από την PLCC στον τύπο μετάδοσης που χρησιμοποιείται (μικροκύματα, τηλεφωνικές γραμμές, κλπ). Με αυτόν τον τρόπο η κατάσταση του διακόπτη είναι μόνιμα γνωστή στον αντιστροφέα.



Σχ. 2.4 Signal Produced by Disconnect Method



Από την οπτική της διαχείρισης ενέργειας αυτή η μέθοδος έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως την επιπλέον εποπτεία και τον έλεγχο και της ΜΔΠ αλλά και του δικτύου. Δυστυχώς όμως, αυτή η μέθοδος έχει το μειονέκτημα του μεγάλου κόστους, το οποίο αυξάνεται με κάθε ΜΔΠ που συνδέεται στο δίκτυο. Επίσης, όταν η επικοινωνία γίνεται μέσω τηλεφώνου, αυξάνεται η καλωδίωση και πρέπει να τεθούν πρωτόκολλα επικοινωνίας. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με τη χρήση ραδιοσυχνοτήτων, αλλά για να καλυφθούν οι τεράστιες αποστάσεις χρειάζονται repeaters και επίσης πρέπει να τεθεί ένα φάσμα λειτουργικών συχνοτήτων, το οποίο μπορεί να χρειάζεται ειδική άδεια [14].

## 2.4.2 Τοπικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης

Οι τοπικές τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης είναι εγκατεστημένες, παραδοσιακά, στη μεριά της ΜΔΠ, ώστε να χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται αυτόνομα για να ληφθεί απόφαση αποσύνδεσης. Οι εν λόγω τεχνικές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Οι παθητικές μέθοδοι** λειτουργούν μετρώντας τις παραμέτρους του συστήματος, όπως οι διακυμάνσεις στην τάση, τη συχνότητα, την αρμονική παραμόρφωση, κ.α. Αυτές οι παράμετροι μεταβάλλονται πολύ σε κατάσταση νησιδοποίησης. Η διαφοροποίηση μεταξύ της κατάστασης νησιδοποίησης ή μη βασίζεται στην υπέρβαση τιμών κατωφλίου που τίθενται για αυτές τις παραμέτρους. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των τιμών κατωφλίου έτσι ώστε να γίνεται διάκριση μεταξύ της κατάστασης νησιδοποίησης και άλλων μεταβολών του συστήματος.
- **Οι ενεργητικές μέθοδοι** επιδρούν άμεσα στη λειτουργία του συστήματος ισχύος εισάγοντας κάποια διαταραχή. Η ιδέα στην οποία βασίζεται κάποια ενεργητική μέθοδος είναι ότι εισάγεται κάποια μικρή διαταραχή η οποία θα οδηγήσει σε σημαντική αλλαγή στις παραμέτρους του συστήματος όταν η ΜΔΠ βρίσκεται σε κατάσταση νησιδοποίησης, ενώ αντίθετα η αλλαγή αυτή θα είναι αμελητέα όταν η ΜΔΠ είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο [12].

### 2.4.2.1 Τοπικές μέθοδοι για ΜΔΠ με Σύγχρονη Γεννήτρια

Οι ΜΠΔ με Σύγχρονη Γεννήτρια λειτουργούν παράγοντας σταθερή ενεργή ισχύ, δηλαδή δεν υπάρχει έλεγχος της παραγωγής μέσω της συχνότητας, όπως συμβαίνει στις Σύγχρονες Γεννήτριες των κεντρικών ΣΠΗΕ. Αυτό συμβαίνει γιατί ο διαχειριστής του ΣΗΕ επιβάλλει οι ΜΔΠ να μην συμμετέχουν στη διαμόρφωση της συχνότητας του δικτύου διανομής. Σε κάθε περίπτωση, για το χρονικό διάστημα που διαρκεί το φαινόμενο και η ανίχνευσή του, θεωρούμε ότι τα συστήματα ελέγχου των Σύγχρονων Γεννητριών δεν προλαβαίνουν να αντιδράσουν και άρα η μηχανική ισχύς στον άξονα θεωρείται σταθερή. Οι τοπικές μέθοδοι σε ΜΔΠ με Σύγχρονη Γεννήτρια είναι κατά κύριο λόγο παθητικές.

#### 2.4.2.1.1 Παθητικές μέθοδοι

Οι βασικές παθητικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης για ΜΠΔ με Σύγχρονη Γεννήτρια είναι οι εξής:

- Υπερ/Υπο-συχνότητας (Over/Under Frequency Relays - OUF)

- Υπερ/Υπο-τάσης (Over/Under Voltage Relays - OUV)
- Ρυθμού μεταβολής συχνότητας (Rate of Change of Frequency - RoCoF)
- Ρυθμού μεταβολής συχνότητας ως προς την ενεργό ισχύ (Rate of Change of Frequency over Power - RoCoFP)
- Ρυθμού μεταβολής της ενεργού ισχύος εξόδου (Rate of Change of Output Power - RoCoP)
- Ρυθμού μεταβολής της συχνότητας ως προς την ενεργό ισχύ και Ρυθμού μεταβολής της αέργου ισχύος (Rate of Change of Frequency over Power and Rate of Change of Reactive Power)
- Άλματος Φάσης (Vector Shift Relays)
- Εισαγωγής Χωρητικότητας (Capacitor Insertion)

### I. Μέθοδος Υπερ/Υπο-συχνότητας (Over/Under Frequency Relays - OUF)

Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι μετρούν απευθείας τη συχνότητα της τάσης στην έξοδο της Σύγχρονης Γεννήτριας. Τέτοιου είδους προστασία υπάρχει υποχρεωτικά ούτως ή άλλως ώστε να αποσυνδέεται η ΜΔΠ σε περίπτωση που από το δίκτυο επιβάλλεται (ενδεχομένως λόγω σφάλματος) υπερ/υπο-συχνότητα.

Για παραγωγούς με Σύγχρονη Γεννήτρια, τα όρια αυτά συνιστάται να είναι 49,5 – 50,5Hz. Όταν η μετρούμενη συχνότητα ξεπεράσει αυτά τα όρια, ο διακόπτης που συνδέει τη ΜΔΠ με το δίκτυο θα πρέπει να διεγερθεί ώστε να διακόψει τη σύνδεση. Η προστασία που προσφέρουν αυτοί οι ηλεκτρονόμοι έναντι της νησιδοποίησης πηγάζει από την άμεση αλληλεξάρτηση μεταξύ μηχανικής ισχύος, ηλεκτρικής ισχύος και συχνότητας σε μια Σύγχρονη Γεννήτρια.

Έστω μια Σύγχρονη Γεννήτρια που τροφοδοτεί στην έξοδό της, μέσω μετασχηματιστή, ένα φορτίο ενεργής ισχύος από κοινού με το δίκτυο (άπειρος ζυγός). Το ισοζύγιο ενεργής ισχύος ορίζει:

$$P_L = P_G + P_N$$

όπου:  $P_L$  είναι η ενεργός ισχύς που ζητάει το φορτίο (pu),

$P_G$  η ενεργός ισχύς που παρέχεται από τη Γεννήτρια (pu),

$P_N$  η υπόλοιπη ισχύς που παρέχεται από το δίκτυο (pu).

Σ' αυτήν τη στάσιμη κατάσταση, από το μοντέλο της Σύγχρονης Γεννήτριας είναι γνωστό ότι:

$$P_{sh} = P_G = \frac{e'v}{x} \sin \delta_1 = \widehat{p}_e \sin \delta_1$$

όπου:  $P_{sh}$  η μηχανική ισχύς στον άξονα (pu),

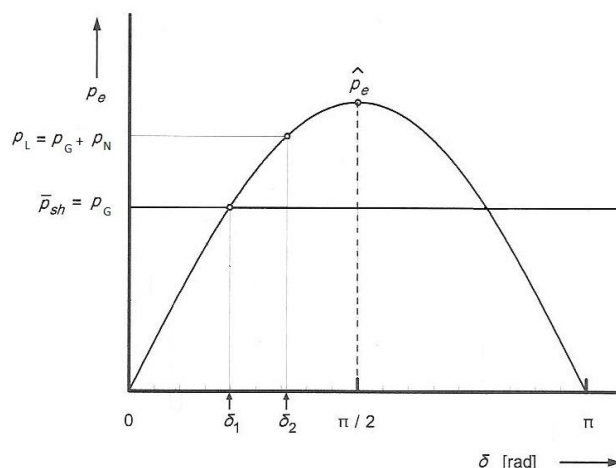
$e'$  η επαγόμενη τάση πίσω από την μεταβατική αντίδραση της Σύγχρονης Γεννήτριας  $x'$  (pu),

$v$  η τάση του φορτίου η οποία ισούται και με την τάση του άπειρου ζυγού (pu),

$\delta$  η γωνία μεταξύ  $e'$  και  $v$  η οποία είναι ίση με τη γωνία φόρτισης της στάσιμης κατάστασης,

$x$  το άθροισμα της αντίδρασης του ΜΣ  $x_T$  και της μεταβατικής αντίδρασης της Σύγχρονης Γεννήτριας  $x'_d$  (pu),

$\widehat{p}_e$  το όριο ευστάθειας στάσιμης κατάστασης.



Σχ. 2.5 Ηλεκτρική ισχύς εξόδου Σύγχρονης Γεννήτριας ως συνάρτηση της γωνίας φόρτισης  $\delta$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι αρχικά υπάρχει ισορροπία μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος της Σύγχρονης Γεννήτριας σε μια γωνία  $\delta_1$  μεταξύ  $e'$  και  $v$ .

Τη στιγμή που αποσυνδέεται το δίκτυο, η Σύγχρονη Γεννήτρια λειτουργεί πλέον απομονωμένη, άρα η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της ταυτίζεται με την απαιτούμενη ισχύ από το φορτίο:

$$p_G = p_L = \frac{e'v}{x} \sin \delta_2$$

Ο επωμισμός του φορτίου από τη Γεννήτρια εκφράζεται από την μεταβολή της γωνίας  $\delta_1$  σε  $\delta_2$  όπου θα ισχύει  $p_G = p_L$ . Η μεταβολή αυτή της γωνίας εμφανίζεται ως άλμα στην φάση της τάσης του φορτίου. Αυτό συμβαίνει γιατί η τάση αυτή ελέγχεται πια από τη Γεννήτρια και όχι από το δίκτυο, άρα η αναφορά της είναι τώρα η  $e'$ .

Σ' αυτήν τη μεταβατική κατάσταση, η ηλεκτρική ισχύς δεν αρκεί για να καλύψει το ηλεκτρικό φορτίο. Το έλλειμα αυτό δίνεται από την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια στον άξονα με άμεση συνέπεια τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της Γεννήτριας. Καθώς δεν υπάρχει το δίκτυο, η πτώση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της Γεννήτριας δε θα μειώσει τη  $\delta$  (και κατά συνέπεια και την ενεργή ισχύ εξόδου της Γεννήτριας) αλλά θα οδηγήσει σε μείωση της ηλεκτρικής συχνότητας.

Αν το φορτίο είναι παθητικό στη συχνότητα (όπως είναι π.χ. μία αντίσταση), η  $p_G$  θα παραμένει σταθερή, όπως και η  $\delta = \delta_2$ , με συνέπεια την πτώση της συχνότητας μέχρι τον μηδενισμό της. Αν το φορτίο είναι ευαίσθητο στη συχνότητα, η μείωση της συχνότητας οδηγεί σε μείωση του  $p_G$  και άρα της  $\delta$ , με νέα στάσιμη κατάσταση και πάλι αυτήν με  $\delta_1$  όπου  $p_L = p_{sh}$ , σε χαμηλότερη όμως συχνότητα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι φορτία ευαίσθητα στη συχνότητα θεωρούνται οι κινητήρες, όπου η ενεργή τους ισχύς  $p_L$  μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της συχνότητας  $f$ .

Αντίστοιχο συμπέρασμα για αύξηση της συχνότητας προκύπτει στην περίπτωση που στη νησίδα η παραγωγή είναι αυξημένη σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο. Συνεπώς, αν υπάρχει διαφορά της παραγόμενης και της ζητούμενης ενεργής ισχύος σε μια νησίδα με Σύγχρονη Γεννήτρια, η συχνότητα της νησίδας θα μεταβληθεί, πιθανώς εκτός αποδεκτών ορίων, οπότε και η εμφάνιση νησίδας ανιχνεύεται από τον ηλεκτρονόμο συχνότητας.

Το βασικό συμπέρασμα, πως η συχνότητα μεταβάλλεται αν υπάρχει διαφορά παραγωγής - κατανάλωσης ενεργής ισχύος είναι γενικό, δηλαδή ισχύει ακόμα κι αν υποτεθούν περισσότερες Γεννήτριες στη νησίδα.

Όπως γίνεται προφανές το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, όπως και όλων των παθητικών μεθόδων, είναι η εξάρτηση τους από τα χαρακτηριστικά της νησίδας που δημιουργείται. Συγκεκριμένα, ο ηλεκτρονόμος συχνότητας δε θα διακόψει την παραγωγή της ΜΔΠ αν στη δημιουργούμενη νησίδα το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο και η συνολική παραγωγή (μηχανική

ισχύς) είναι σχεδόν ίσα. Αυτό συμβαίνει γιατί η νέα συχνότητα ισορροπίας πιθανώς να είναι εντός των ορίων του ηλεκτρονόμου συχνότητας. Άρα για να λειτουργήσει η μέθοδος, θα πρέπει η διαφορά παραγωγής - φορτίου να είναι μεγαλύτερη από κάποια τιμή. Η υπόλοιπη περιοχή ορίζεται ως Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη (MAZ) [23].

## II. Μέθοδος Υπερ/Υπο-τάσης (Over/Under Voltage Relays - OUV)

Κατ' αντιστοιχία με τους ηλεκτρονόμους υπερ/υπο-συχνότητας, αυτοί οι ηλεκτρονόμοι μετρούν το μέγεθος της τάσης ακροδεκτών της Σύγχρονης Γεννήτριας. Τέτοιου είδους προστασία υπάρχει υποχρεωτικά ούτως ή άλλως ώστε να αποσυνδέεται η ΜΔΠ σε περίπτωση που από το δίκτυο επιβάλεται υπερ/υπο-τάση.

Για παραγωγούς με Σύγχρονη Γεννήτρια, τα όρια αυτά συνιστάται να είναι  $(0.8 - 1.15)U_N$ . Όταν η μετρούμενη τάση ξεπεράσει αυτά τα όρια, ο διακόπτης που συνδέει τη ΜΔΠ με το δίκτυο διανομής θα πρέπει να διεγερθεί ώστε να διακόψει τη σύνδεση.

Η προστασία που προσφέρεται έναντι της νησιδοποίησης προέρχεται από την εξάρτηση μεταξύ άεργης ισχύος και τάσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό από το μοντέλο της Σύγχρονης Γεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα, η άεργη ισχύς που προσφέρει η γεννήτρια δίνεται από τη σχέση:

$$Q_G = \frac{EV_T}{X} \cos\delta - \frac{V_T^2}{X},$$

όπου:  $E$  είναι η επαγόμενη τάση (τάση διέγερσης) της Γεννήτριας,

$V_T$  η τάση ακροδεκτών,

$X$  η σύγχρονη αντίδραση,

$\delta$  η γωνία μεταξύ  $E$  και  $V_T$  (γωνία φόρτισης).

Το πλάτος της επαγόμενης τάσης  $E$  έχει ρυθμιστεί ώστε να οριστεί η άεργη ισχύς της Γεννήτριας κατά τη λειτουργία της παράλληλα με το δίκτυο. Συνήθως, όπως γίνεται στην Ελλάδα, η άεργη ισχύς των ΜΔΠ ελέγχεται να είναι μηδενική.

Αν δημιουργηθεί νησίδα, η άεργη ισχύς της Σύγχρονης Γεννήτριας θα μεταβληθεί τόσο ώστε να ικανοποιήσει την απαίτηση που υπάρχει από το φορτίο της νησίδας (καθώς και την άεργη ισχύ που καταναλώνεται πάνω στη Γραμμή Μεταφοράς). Στην αρχική διάρκεια του χρόνου μετά τη νησιδοποίηση, ο AVR της Γεννήτριας δεν προλαβαίνει να δράσει οπότε η  $E$  θεωρείται σταθερή. Για μικρή γωνία φόρτισης  $\delta$ , κάτι που ισχύει γενικά, μπορεί να θεωρηθεί  $\cos\delta \approx 1$ .

Με βάση τις προηγούμενες παραδοχές, η μεταβολή της άεργης ισχύος της Γεννήτριας οδηγεί στη μεταβολή της τάσης των ακροδεκτών της,  $V_T$ . Γενικά για μεγαλύτερη απαίτηση άεργης ισχύος η τάση  $V_T$  μειώνεται, ενώ για μικρότερη απαίτηση αυξάνεται.

Συνεπώς, αν η άεργη ισχύς που απαιτείται από τη νησίδα είναι διαφορετική απ' αυτήν που προσέφερε η Σύγχρονη Γεννήτρια πριν τη νησιδοποίηση, θα μεταβληθεί η τάση ακροδεκτών της. Αν αυτή η μεταβολή είναι αρκετά μεγάλη, ο ηλεκτρονόμος υπερ/υπο-τάσης θα διεγερθεί και θα αποσυνδέσει τη ΜΔΠ.

Το προφανές μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη (MAZ). Αν η διαφορά αρχικής παραγωγής-κατανάλωσης άεργης ισχύος δεν είναι αρκετά μεγάλη, η νησίδα θα ισορροπήσει σε μια νέα τάση εντός των αποδεκτών ορίων, με αποτέλεσμα να μην ανιχνευτεί [23].

## III. Μέθοδος Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας (Rate of Change of Frequency - RoCoF)

Ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας,  $df/dt$ , θα είναι πολύ μεγάλος όταν η ΜΔΠ έχει νησιδοποιηθεί. Ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας, RoCoF, δίνεται από τη σχέση:

$$RoCoF = \frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{f\Delta P}{2HS}$$

όπου:  $\Delta P$  η μεταβολή ισχύος εξόδου της Γεννήτριας,  
 $f$  η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος,  
 $H$  η σταθερά αδράνειας της Γεννήτριας και  
 $S$  η ονομαστική ισχύς της Γεννήτριας.

Τα μεγάλα συστήματα έχουν μεγάλες τιμές  $H$  και  $S$ , ενώ τα μικρά συστήματα έχουν μικρές τιμές  $H$  και  $S$ , δίνοντας μεγαλύτερες τιμές στο  $\Delta f/\Delta t$ . Οι ηλεκτρονόμοι RoCoF παρακολουθούν τη κυματομορφή της τάσης και θα τεθούν σε λειτουργία αν η τιμή της RoCoF είναι μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή αναφοράς για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η τιμή αναφοράς πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε οι ηλεκτρονόμοι να διεγερθούν σε περίπτωση νησιδοποίησης, αλλά όχι για μεταβολές στο φορτίο. Αυτή η μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη όταν υπάρχει μεγάλη αναντιστοιχία στην ισχύ, αλλά αποτυγχάνει όταν η χωρητικότητα της ΜΔΠ είναι ίση με αυτή των τοπικών φορτίων [19].

#### IV. Μέθοδος Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας ως προς την Ενεργό Ισχύ (Rate of Change of Frequency over Power - RoCoFP)

Ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας ως προς την ισχύ,  $df/dP$ , σε ένα μικρό σύστημα παραγωγής είναι μεγαλύτερος από αυτόν ενός συστήματος ισχύος με μεγαλύτερη χωρητικότητα. Η RoCoFP χρησιμοποιεί αυτή την ιδέα για να ανιχνεύσει την κατάσταση νησιδοποίησης. Επίσης, για μικρή αναντιστοιχία ισχύος μεταξύ της ΜΔΠ και των τοπικών φορτίων, η RoCoFP είναι πολύ πιο ευαίσθητη σε σχέση με τη RoCoF [19].

#### V. Μέθοδος Ρυθμού Μεταβολής της Ενεργού Ισχύος Εξόδου (Rate of Change of Output Power - RoCoP)

Ο ρυθμός μεταβολής της ισχύος εξόδου,  $dP/dt$ , στην πλευρά της ΜΔΠ, όταν συμβεί νησιδοποίηση, θα είναι πολύ μεγαλύτερος απ' το ρυθμό μεταβολής της ισχύος εξόδου πριν νησιδοποιηθεί η ΜΔΠ για τον ίδιο ρυθμό μεταβολής του φορτίου. Έχει βρεθεί πως αυτή η μέθοδος είναι πολύ πιο αποτελεσματική όταν το σύστημα διανομής με ΜΔΠ έχει μη ισορροπημένο φορτίο παρά ισορροπημένο φορτίο.

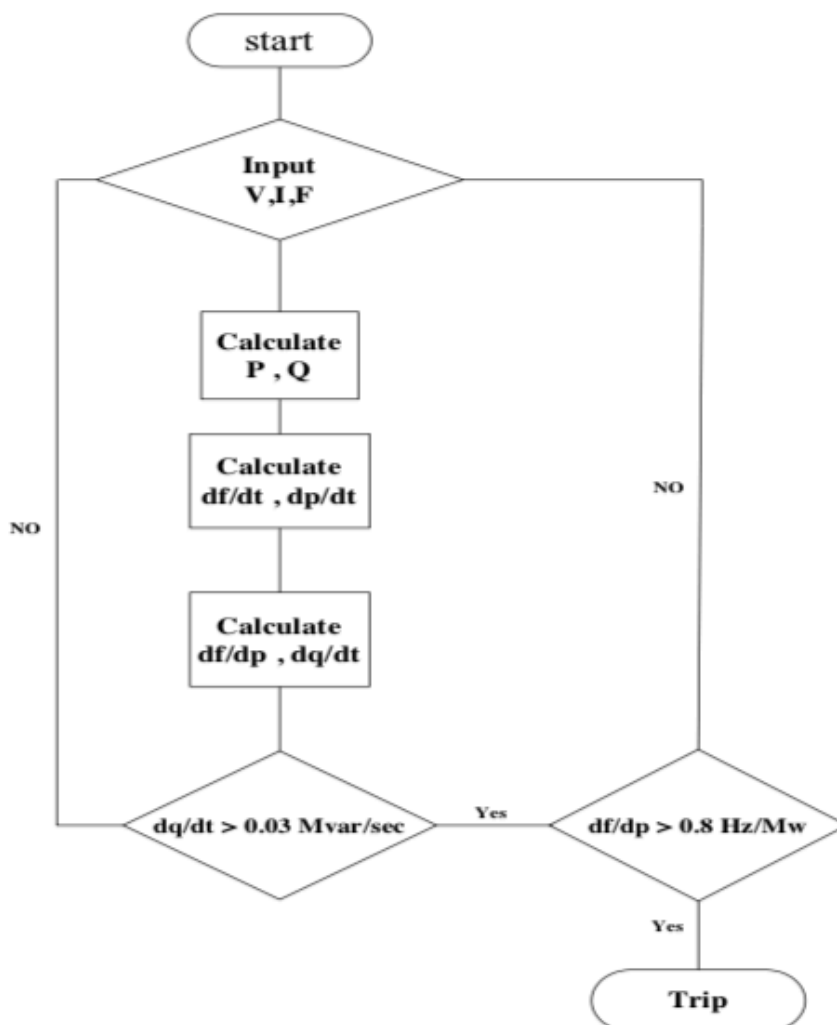
Στη μέθοδο RoCoP, η ενεργός ισχύς εξόδου της ΜΔΠ μετρείται κάθε στιγμή και υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής της ισχύος εξόδου. Η ισχύς εξόδου της ΜΔΠ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{DG} = |V_a||i_a|\cos\theta_a + |V_b||i_b|\cos\theta_b + |V_c||i_c|\cos\theta_c,$$

όπου  $V_a, V_b, V_c$  είναι οι τιμές δειγματοληψίας της στιγμιαίας τριφασικής τάσης εξόδου της ΜΔΠ και  $i_a, i_b, i_c$  είναι οι τιμές του στιγμιαίου τριφασικού ρεύματος εξόδου της ΜΔΠ. Ο ρυθμός μεταβολής της ισχύος δίνεται παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση. Η νησιδοποίηση θα ανιχνευτεί όταν αυτή η μεταβολή είναι μεγαλύτερη από μια τιμή αναφοράς [20].

## VI. Μέθοδος Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας ως προς την Ενεργό Ισχύ σε συνδυασμό με τη Μέθοδο Ρυθμού Μεταβολής της Αέργου Ισχύος (Rate of Change of Frequency over Power and Rate of Change of Reactive Power - RoCoFP & RoCoRP)

Με αυτή τη μέθοδο πρώτα υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής της αέργου ισχύος της ΜΔΠ,  $dQ/dt$  και αν αυτή η τιμή είναι μικρότερη από μια τιμή αναφοράς τότε το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί. Αν όμως, ξεπεράσει αυτή την τιμή, τότε υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας ως προς την ενεργό ισχύ,  $df/dP$ . Αν και αυτή η τιμή του  $df/dP$  ξεπερνάει μια καθορισμένη τιμή αναφοράς τότε το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση νησιδοποίησης και αποστέλεται εντολή αποσύνδεσης [20].



Σχ. 2.6 Διάγραμμα ροής της μεθόδου RoCoFP & RoCoRP

## VII. Μέθοδος Άλματος Φάσης (Vector Shift)

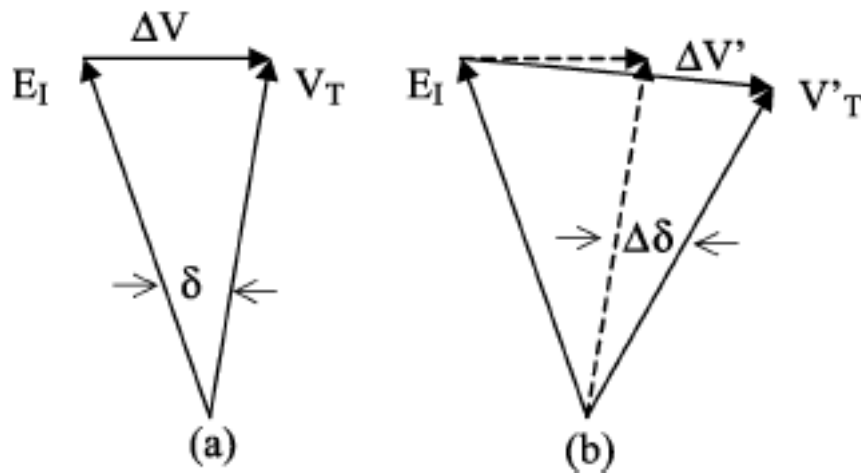
Αυτού του είδους οι ηλεκτρονόμοι ανίχνευσης της νησιδοποίησης βασίζονται στην παρακολούθηση της γωνίας φόρτισης  $\delta$  μεταξύ της εσωτερικής τάσης  $E$  και της τάσης ακροδεκτών  $V_T$  της Σύγχρονης Γεννήτριας.

Τη στιγμή μετά τη νησιδοποίηση, η ενεργός ισχύς εξόδου της Γεννήτριας μεταπηδά από την προηγούμενη τιμή της και ταυτίζεται πλέον με την ισχύ του φορτίου. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μεταπήδηση της γωνίας φόρτισης από την αρχική  $\delta_1$  (όπου  $p_{sh} = p_G$ ) στη  $\delta_2$ , όπου θα δίνεται η απαιτούμενη από το φορτίο ενεργός ισχύς.

Καθώς μετά την αποσύνδεση του δικτύου η τάση αναφοράς είναι η  $E_1$  της Σύγχρονης Γεννήτριας, η μεταβολή της γωνίας φόρτισης παρουσιάζεται ως ένα άλμα στη φάση της  $V_T$  ίσο με  $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.

Δεδομένης της νέας φάσης, η διάρκεια του κύκλου στον οποίο έγινε η νησιδοποίηση θα είναι διαφορετική από τον προηγούμενο κύκλο (π.χ. στα  $50\text{Hz}$ , άρα  $T = 20\text{ms}$ ) κατά  $\Delta t$ , χρονική διαφορά η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς φάσης  $\Delta\delta$ .

Οι ηλεκτρονόμοι μετρούν τη διάρκεια μεταξύ των στιγμών που η τάση των ακροδεκτών της Γεννήτριας  $V_T$  διέρχεται από το μηδέν αυξανόμενη προς τα θετικά, δηλαδή την περίοδο  $T$  της τάσης. Χρησιμοποιώντας ως αναφορά την προηγούμενη μέτρηση, υπολογίζουν τη χρονική διαφορά  $\Delta t = T_i - T_{i-1}$ , που είναι ανάλογη της  $\Delta\delta$ .



Σχ. 2.7 Φασικά διανύσματα εσωτερικής τάσης και τάσης ακροδεκτών: (a) πριν τη νησιδοποίηση, (b) μετά τη νησιδοποίηση

Η τιμή ρύθμισης των ηλεκτρονόμων είναι μια γωνία που αντιστοιχεί στην  $\Delta\delta$ , συνήθως από 2 έως 20 μοίρες. Όταν μετρηθεί χρονική διαφορά που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη γωνία, διεγείρονται και αποσυνδέουν τη Σύγχρονη Γεννήτρια.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου έναντι της μεθόδου ανίχνευσης με τον ηλεκτρονόμο υπερ/υπο-συχνότητας είναι ότι αναμένεται πολύ γρηγορότερη απόκριση σε σχέση με τον ηλεκτρονόμο συχνότητας. Η αναγνώριση της νησιδοποίησης από τον ηλεκτρονόμο άλματος φάσης θεωρητικά συμβαίνει μόλις στην επόμενη μετάβαση της τάσης από το 0 προς τα θετικά. Αντίθετα, ένας ηλεκτρονόμος συχνότητας θα αναγνωρίσει τη νησιδοποίηση πιθανώς μετά από πολλές περιόδους μέχρι η συχνότητα να μετρηθεί εκτός ορίων [23].

### VIII. Μέθοδος Εισαγωγής Χωρητικότητας (Capacitor Insertion)

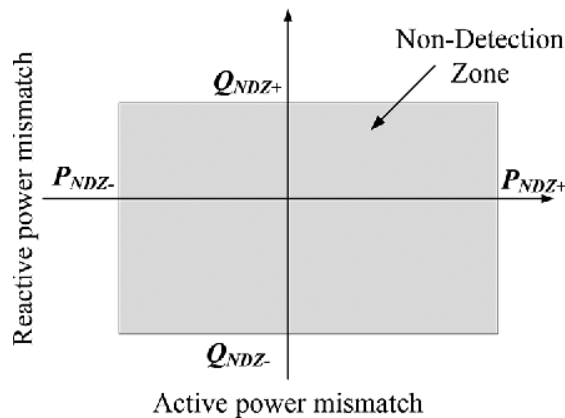
Η εισαγωγή χωρητικότητας βοηθά στο να αυξήσουμε την αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης νησιδοποίησης χρησιμοποιώντας τους στάνταρ παθητικούς ηλεκτρονόμους ανινησιδοποίησης. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι να δημιουργήσουμε την απαραίτητη αναντιστοιχία ισχύος μεταξύ παραγωγής και φορτίου έτσι ώστε τα μέσα προστασίας να μπορούν να ανιχνεύσουν τη νησιδοποίηση λόγω του ότι η αναντιστοιχία ισχύος είναι εκτός της MAZ των μέσων αυτών (χάρη στην επιπλέον άεργο ισχύ). Σ' αυτή την προσέγγιση, ένας πυκνωτής εισάγεται όταν ανοίξει ο βασικός διακόπτης, δημιουργώντας μια νησίδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου να αλλάξει, καθώς η άεργος ισχύς είναι εκτός ισορροπίας. Έτσι, οι μεταβολές τάσης και συχνότητας είναι μεγαλύτερες στη νησιδοποιημένη πλευρά του δικτύου, δημιουργώντας τις κατάλληλες συνθήκες για την ανίχνευση της νησιδοποίησης.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις:

- Παρέχεται ηλεκτρονόμος ανίχνευσης νησιδοποίησης είτε υπερ/υπο-τάσης είτε υπερ/υπο-συχνότητας είτε RoCoF.
- Είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις  $\Delta P$  και  $\Delta Q$ .
- Ο μέσος όρος των μέγιστων ενεργών ισχύων όλων των ΜΔΠ που λειτουργούν στο δίκτυο διανομής,  $P_{max}$ , είναι γνωστός.
- Η μέγιστη τιμή του συντελεστή ποιότητας  $Q_f$  είναι γνωστή.
- $\left| \frac{\Delta Q}{P} \right| \geq \left| \frac{\Delta Q}{P_{max}} \right|$

Για να έχουμε την απαραίτητη αναντιστοιχία ισχύος, η εισαγόμενη χωρητικότητα πρέπει να είναι σωστή. Γι αυτό το σκοπό, προτείνεται μια στρατηγική βασισμένη στη MAZ. Στο πρώτο βήμα, υπολογίζονται τα όρια αναντιστοιχίας ισχύος της MAZ ( $P_{NDZ-}$ ,  $P_{NDZ+}$ ,  $Q_{NDZ-}$ ,  $Q_{NDZ+}$ ). Όταν υπολογιστούν οι τιμές  $Q_{NDZ-}$  και  $Q_{NDZ+}$  τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της χωρητικότητας  $Q_{CapB}$ , η οποία θα είναι αρκετή για να δημιουργήσει αναντιστοιχία ισχύος εκτός της MAZ.

$$Q_{CapB} > P_{max}Q_{NDZ+} + P_{max} |Q_{NDZ-}|$$



Σχ. 2.8 Παράδειγμα MAZ για παθητικές μεθόδους νησιδοποίησης

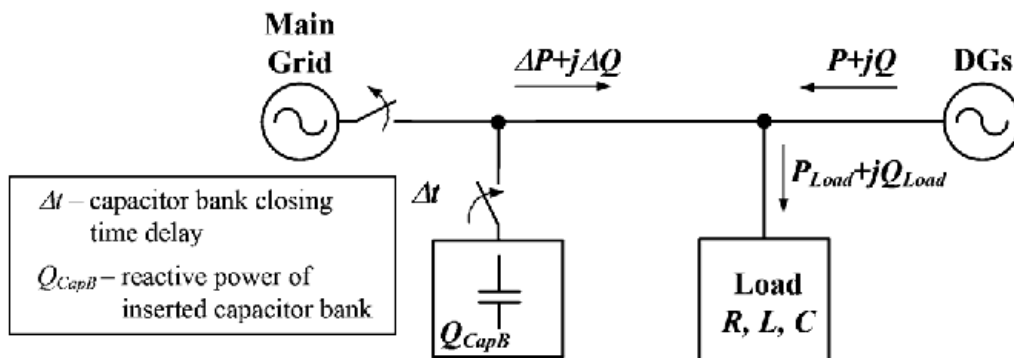
Πρέπει να σημειωθεί ότι η  $Q_{CapB}$  είναι για τη χειρότερη περίπτωση, δηλαδή όταν όλες οι ΜΔΠ στην ηλεκτρική νησίδα λειτουργούν κοντά στο  $P_{max}$ . Προφανώς, εισαγωγή χωρητικότητας τέτοιου μεγέθους δεν είναι πάντα απαραίτητη. Για παράδειγμα, αν η ανισορροπία αέργου ισχύος  $\Delta Q$  είναι κοντά στο όριο  $Q_{NDZ-}$ , τότε δε χρειάζεται να εισάγουμε τόσο πολύ άεργο ισχύ για να επιτύχουμε την απαραίτητη αναντιστοιχία. Επιπροσθέτως, η εισαγωγή χωρητικότητας μεγάλης τιμής μπορεί



να προκαλέσει ανεπιθύμητη υπέρταση στο νησιδοποιημένο τμήμα του δικτύου, καθώς και επικίνδυνα άλματα τάσης στο σημείο εισαγωγής. Γι αυτό το λόγο, η επιλογή της χωρητικότητας επιλέγεται λαμβάνοντας υπ' όψιν το  $\Delta Q$  και ακολουθώντας την παρακάτω στρατηγική:

$$\begin{aligned} & \text{Αν } P_{max} Q_{NDZ-} < \Delta Q \leq 0 \text{ εισήγαγε } Q_{CapB1}, \text{ όπου} \\ & \quad Q_{CapB1} > P_{max} Q_{NDZ+} \\ & \text{Αν } 0 < \Delta Q < P_{max} Q_{NDZ+} \text{ εισήγαγε } Q_{CapB1} \text{ και } Q_{CapB2}, \text{ όπου} \\ & \quad Q_{CapB2} > P_{max} |Q_{NDZ-}| \end{aligned}$$

Με αυτή την προσέγγιση μειώνουμε το ρίσκο υπέρτασης και τα άλματα τάσης στο σημείο εισαγωγής (εισαγωγή δύο χωρητικότητων) και ταυτόχρονα βοηθάει να προκληθεί ουσιαστική μεταβολή τάσης και συχνότητας [10].



Σχ. 2.9 Μέθοδος εισαγωγής χωρητικότητας

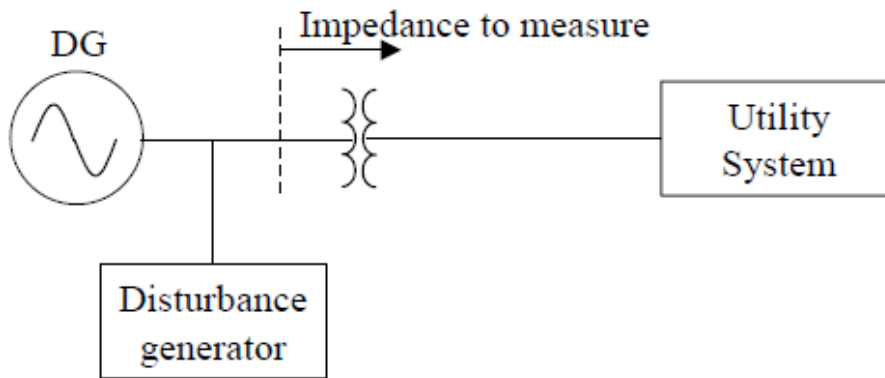
### 2.4.2.1.2 Ενεργητικές Μέθοδοι

Οι κυριότερες ενεργητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της νησιδοποίησης σε ΜΔΠ με Σύγχρονη Γεννήτρια είναι οι εξής:

- Μέθοδος Μέτρησης της Σύνθετης Αντίστασης (Impedance Measurement)
- Μέθοδος Μεταβολής της Επαγόμενης Τάσης της Σύγχρονης Γεννήτριας (Induced Voltage Change)

#### I. Μέθοδος Μέτρησης Σύνθετης Αντίστασης (Impedance Measurement)

Θεωρούμε την περίπτωση όπου έχουμε μία μόνο ΜΔΠ με μία Σύγχρονη Γεννήτρια που λειτουργεί συνδεδεμένη παράλληλα στο δίκτυο διανομής, όπως στο σχήμα 2.10.



Σχ. 2.10 Μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης σε ΜΔΠ με Σύγχρονη Γεννήτρια μέσω μέτρησης της σύνθετης αντίστασης που αυτή 'βλέπει' στους τερματικούς της ακροδέκτες

Η μέθοδος αυτή, προκειμένου να ανιχνεύσει το φαινόμενο της νησιδοποίησης, μετρά σε συνεχή βάση τη σύνθετη αντίσταση που βλέπει η Γεννήτρια στους τερματικούς της ακροδέκτες, δηλαδή στο ΣΚΣ. Συνήθως το δίκτυο διανομής στο οποίο συνδέεται η ΜΔΠ θεωρείται άκαμπτο κι έτσι σ' ένα ισοδύναμο κύκλωμα μπορεί να παρασταθεί με μια ac πηγή τάσης με πολύ χαμηλή σύνθετη αντίσταση, η οποία είναι και η μετρούμενη. Όταν όμως η σύνδεση της ΜΔΠ με το δίκτυο διανομής χαθεί, η σύνθετη αντίσταση που θα βλέπει η ΜΔΠ στους τερματικούς της ακροδέκτες θα είναι εκείνη του φορτίου της νησίδας, η οποία συνήθως είναι μεγάλη. Η μεγάλη διαφορά που παρουσιάζεται στη μετρούμενη σύνθετη αντίσταση καταδεικνύει ότι η ΜΔΠ συμμετέχει σε νησίδα. Στην περίπτωση που η εγκατάσταση της ΜΔΠ έχει τοπικό φορτίο, η σύνθετη αντίσταση που θα μετρηθεί όταν σχηματιστεί νησίδα θα είναι ο παράλληλος συνδυασμός του τοπικού φορτίου και του φορτίου της νησίδας.

Μια πιθανή υλοποίηση της μεθόδου συνίσταται στη διέγερση ενός thyristor σε σειρά με μια αυτεπαγωγή παράλληλα συνδεδεμένο στους ακροδέκτες της ΜΔΠ. Όταν το thyristor διεγείρεται, γίνεται μέτρηση του ρεύματος που το διαρρέει και συνεπώς μπορεί να μετρηθεί η ισχύς βραχυκύκλωσης. Όταν υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο η ισχύς αυτή είναι η ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου και της ΜΔΠ. Όμως, στην περίπτωση νησίδας, γίνεται μέτρηση της ισχύος βραχυκύκλωσης μόνο των ΜΔΠ που συμμετέχουν στη νησίδα, η οποία συνήθως είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται εφικτή η ανίχνευση της νησίδας.

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου συνίσταται στο γεγονός ότι το επίπεδο της ενεργειακής διαφοράς μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης δεν επηρεάζει τη λειτουργία της μεθόδου. Δηλαδή, η μέθοδος μέτρησης της σύνθετης αντίστασης συντελεί στην ανίχνευση της νησιδοποίησης ακόμα και αν η παραγωγή ταυτίζεται με την κατανάλωση εντός της σχηματιζόμενης νησίδας.

Όμως, η μέθοδος μέτρησης της σύνθετης αντίστασης συνοδεύεται κι από μια σειρά αρνητικών επιπτώσεων:

- Για την μέτρηση της σύνθετης αντίστασης απαιτείται εισαγωγή μιας διαταραχής, γεγονός το οποίο είναι ανεπιθύμητο καθώς υποβαθμίζεται η ποιότητα της ισχύος που παρέχει η ΜΔΠ.
- Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των Σύγχρονων Γεννητριών που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαταραχές που εισάγονται από τις διάφορες Σύγχρονες Γεννήτριες μπορούν να παρεμβάλλονται μεταξύ τους κι έτσι να οδηγηθούμε σε λανθασμένη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης.
- Η μέθοδος παρουσιάζει αυξημένο κόστος λόγω της απαίτησης χρησιμοποίησης μιας διάταξης που θα δημιουργεί τις απαιτούμενες διαταραχές στη ΜΔΠ.
- Ορισμένα φορτία μπορούν να διαθέτουν μια απόκριση συχνότητας, η οποία να παρουσιάζει συντονισμό στη συχνότητα λειτουργίας στην οποία εισάγεται και η διαταραχή. Δηλαδή υπάρχει πιθανότητα το φορτίο της νησίδας να παρουσιάζει μικρή σύνθετη αντίσταση στη συχνότητα της διαταραχής. Συνεπώς η μετρούμενη σύνθετη αντίσταση θα

είναι μικρή και θα συμπεραίνεται ότι υπάρχει σύνδεση στο δίκτυο, παρόλο που η τροφοδότηση έχει διακοπεί.

Από τα προηγούμενα γίνεται κατανοητό ότι η μέθοδος μέτρησης της σύνθετης αντίστασης παρουσιάζει μικρή πρακτική σημασία και χρησιμοποιείται μόνο σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους ανίχνευσης της νησιδοποίησης σαν επιπρόσθετη προστασία [23].

## II. Μέθοδος Μεταβολής της Επαγόμενης Τάσης της Σύγχρονης Γεννήτριας (Induced Voltage Change)

Μια παραλλαγή της μεθόδου μέτρησης της σύνθετης αντίστασης είναι η επιβολή μιας διακύμανσης στην επαγόμενη τάση της Σύγχρονης Γεννήτριας (μέσω του ρεύματος διέγερσης  $I_f$ ) και η παρακολούθηση της αλλαγής της ροής άεργης ισχύος καθώς και του πλάτους της τάσης στο ΣΚΣ.

Θεωρούμε την περίπτωση όπου μια Σύγχρονη Γεννήτρια συνδέεται παράλληλα στο δίκτυο διανομής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11.

Οι εξισώσεις που δίνουν την ενεργό και άεργο ισχύ που παρέχει η ΜΔΠ στο δίκτυο διανομής είναι οι εξής:

$$P = \frac{E_0 V_T}{X_T} \sin \delta$$

$$Q = \frac{V_T}{X_T} (E_0 \cos \delta - V_T)$$

όπου:  $E_0$  είναι η επαγόμενη τάση της Σύγχρονης Γεννήτριας,

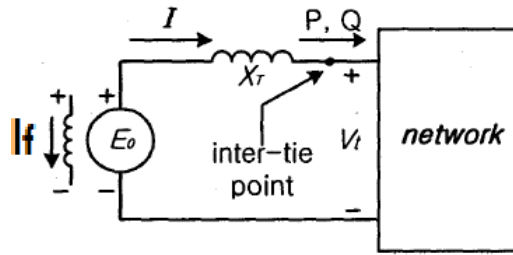
$V_T$  είναι η τάση ακροδεκτών της Σύγχρονης Γεννήτριας,

$X_T$  είναι η σύγχρονη αντίδραση της Σύγχρονης Γεννήτριας (η αντίσταση της Σύγχρονης Γεννήτριας αμελείται καθώς είναι πολύ μικρότερη της σύγχρονης αντίδρασης),

$\delta$  είναι η διαφορά στη φασική γωνία μεταξύ της  $E_0$  και της  $V_T$ .

Από τη θεωρία των στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών είναι γνωστό ότι όταν αυξάνεται το ρεύμα διέγερσης της Σύγχρονης Γεννήτριας, αυξάνεται και η επαγόμενη τάση της Γεννήτριας. Σε παραλληλισμένη λειτουργία της Γεννήτριας με το δίκτυο διανομής (άρα με σταθερή  $V_T$ ), η αύξηση της επαγόμενης τάσης  $E_0$  οδηγεί με βάση τη δεύτερη σχέση σε αύξηση της άεργης ισχύος και σε μικρή μείωση της γωνίας  $\delta$  προκειμένου να διατηρηθεί η ενεργός ισχύς της πρώτης σχέσης σταθερή.

Σε αυτόνομη λειτουργία της Γεννήτριας και θεωρώντας ότι το φορτίο που αυτή τροφοδοτεί είναι σταθερής ισχύος, η άεργη ισχύς που αυτή παρέχει στο ΣΚΣ είναι σταθερή καθώς ισούται με την απαιτούμενη άεργη ισχύ από το τοπικό φορτίο. Από τη δεύτερη σχέση προκύπτει ότι όταν η επαγόμενη τάση της Γεννήτριας αυξάνεται, θα αυξηθεί και η τάση ακροδεκτών της προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η άεργη ισχύς της Γεννήτριας. Επίσης, θα πρέπει να υπάρχει μικρή μείωση στη γωνία  $\delta$  για να διατηρηθεί η ενεργός ισχύς εξόδου της Γεννήτριας σταθερή με βάση την πρώτη σχέση.



Σχ. 2.11 Μέθοδος ανίχνευσης της νησιδοποίησης σε ΜΔΠ με Σύγχρονη Γεννήτρια μέσω μεταβολής της επαγόμενης τάσης της

Τα βήματα του αλγορίθμου που υλοποιούν τη μέθοδο είναι τα εξής:

1. Μετρώνται το πλάτος της τάσης ακροδεκτών  $V_T$  και η άεργη ισχύς εξόδου  $Q$  της Σύγχρονης Γεννήτριας προτού μεταβληθεί η επαγόμενη τάση της Σύγχρονης Γεννήτριας  $E_0$ .
2. Μεταβάλλεται η επαγόμενη τάση της Σύγχρονης Γεννήτριας  $E_0$  κατά  $\varepsilon$  (σε pu).
3. Μετρώνται ξανά το πλάτος της τάσης ακροδεκτών  $V_T$  και η άεργη ισχύς εξόδου  $Q$  της Σύγχρονης Γεννήτριας αφού μεταβληθεί η επαγόμενη τάση της Σύγχρονης Γεννήτριας  $E_0$ .
4. Αν οι παρακάτω εξισώσεις ικανοποιούνται ταυτόχρονα, τότε πρέπει να διεγερθεί ο ΑΔΔ, αλλιώς επιστρέφουμε στο βήμα 1:
  - Αν  $((V_T \text{ μετά τη μεταβολή της } E_0) - (V_T \text{ πριν τη μεταβολή της } E_0)) > \varepsilon$
  - Αν  $((Q \text{ μετά τη μεταβολή της } E_0) = (Q \text{ πριν τη μεταβολή της } E_0))$ .

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι πρακτικά δεν αλληλεπιδρά με τη λειτουργία του ενεργειακού συστήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος στηρίζεται στη μικρή μεταβολή της επαγόμενης τάσης της Σύγχρονης Γεννήτριας.

Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγονται τα εξής:

- Είναι πιο πολύπλοκη από τις παθητικές μεθόδους, γεγονός που οδηγεί και σε αυξημένο κόστος σε σχέση μ' αυτές.
- Η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μηχανικές δονήσεις στον περιστρεφόμενο δρομέα της Γεννήτριας.
- Η ύπαρξη πολλών Σύγχρονων Γεννητριών που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο εντός της νησίδας μπορεί να οδηγήσει στη μη ανίχνευση της. Όσο περισσότερες Σύγχρονες Γεννήτριες εισάγουν στο σύστημα παρόμοιες διαταραχές, τόσο δυσκολότερος καθίσταται ο καθορισμός των αποκρίσεων των Γεννητριών καθώς αυτές μπορεί να παρεμβληθούν μεταξύ τους.
- Ο κύκλος λειτουργίας της μεθόδου είναι μεγαλύτερος σε σχέση με την περίοδο επαναφοράς των διακοπών επανάξευξης του δικτύου διανομής. Έτσι είναι πιθανό η νησίδα να μην ανιχνευτεί έγκαιρα και να συμβεί επανασύνδεση στο δίκτυο εκτός φάσης [23].

## 2.4.2.2 Τοπικές μέθοδοι για ΜΔΠ με Αντιστροφή

Οι ΜΔΠ με αντιστροφείς λειτουργούν με έλεγχο  $P - Q$ . Οι αναφορές για την υλοποίηση του ελέγχου  $P - Q$  επιλέγονται με βάση αλγορίθμους που λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως ο συντελεστής ισχύος, η μέγιστη πιθανή παραγωγή ισχύος κ.ά. Οι παράγοντες αυτοί, στη διάρκεια εντός της οποίας πρέπει να ανιχνευθεί η σχηματιζόμενη νησίδα, μπορούν να θεωρηθούν σταθεροί. Για παράδειγμα, το μέγιστο σημείο ισχύος ενός ΦΒ συστήματος μπορεί να θεωρηθεί σχετικά σταθερό για δεδομένη ηλιακή ακτινοβολία. Συνεπώς, για την ανάλυση των μεθόδων ανίχνευσης

της νησιδοποίησης που ακολουθεί θα θεωρήσουμε ότι οι ΜΔΠ λειτουργούν έχοντας σταθερές αναφορές ενεργού και άεργου ισχύος. Το ερευνητικό ενδιαφέρον, όσον αφορά τις τοπικές μεθόδους σε παραγωγούς με αντιστροφείς, επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στις ενεργητικές καθώς οι παθητικές μέθοδοι είναι εγγενείς στους αντιστροφείς.

### 2.4.2.2.1 Παθητικές Μέθοδοι

Η βασική διαφορά των αντιστροφένων σε σχέση με τις Σύγχρονες Γεννήτριες είναι η απουσία στρεφόμενης μάζας (δρομέας). Η ύπαρξη του δρομέα οδηγεί σε άμεση μεταβολή της ενεργής ισχύος εξόδου της Σύγχρονης Γεννήτριας ώστε να καλύψει τις αλλαγές του φορτίου. Οι Σύγχρονες Γεννήτριες δηλαδή διαθέτουν στρεφόμενη εφεδρεία. Αυτό το χαρακτηριστικό των Σύγχρονων Γεννητριών οδηγεί σε μεταβολές της τάσης και της συχνότητας.

Αντίθετα, οι ΜΔΠ που συνδέονται μέσω αντιστροφένων συνήθως δε διαθέτουν στρεφόμενο ενεργειακό μετατροπέα, δηλαδή σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια, με αποτέλεσμα η ενεργός και άεργος ισχύς τους να διατηρούνται ίσες με τις αναφορές μέσω του ελέγχου  $P - Q$ , ανεξάρτητα από τις αλλαγές στο κύκλωμα εξόδου. Αυτή είναι μια πολύ σημαντική διαφορά καθώς σημαίνει πως, τουλάχιστον στα αρχικά στάδια ύπαρξης της νησίδας, η ενεργός και άεργος ισχύς των ΜΔΠ διατηρείται στα ίδια επίπεδα με τη στάσιμη κατάσταση πριν τη νησιδοποίηση. Αυτό το χαρακτηριστικό δικαιολογεί τη μεταβολή των παραμέτρων (πλάτος, συχνότητα κ.λπ.) της τάσης, και η οποία οδηγεί στην ανίχνευση του φαινομένου της νησιδοποίησης.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι, καθώς η πλήρης κυματομορφή της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα είναι γνωστή, εφόσον είναι απαραίτητη για τον έλεγχό του, οι παθητικές μέθοδοι των αντιστροφένων θεωρούνται εγγενείς σ' αυτούς. Συνεπώς δεν χρειάζονται επιπλέον ηλεκτρονόμοι συχνότητας, τάσης κ.λπ. όπως για τις παθητικές μεθόδους των Σύγχρονων Γεννητριών [23].

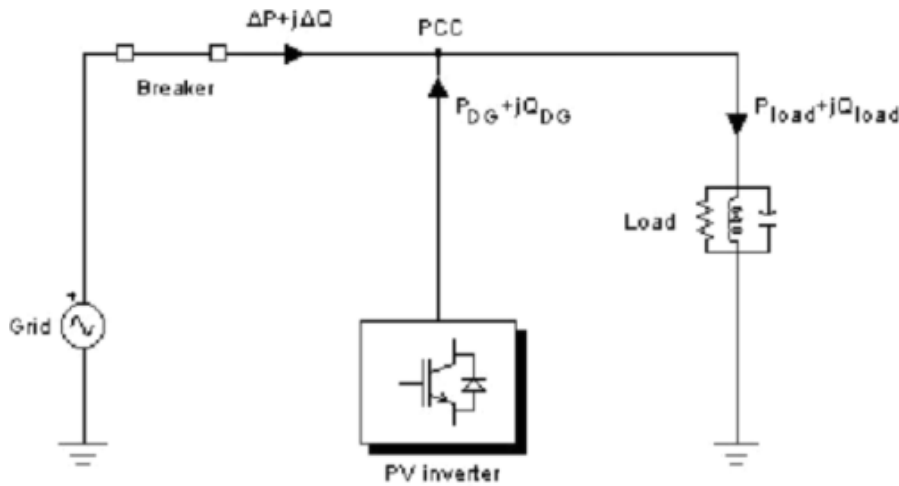
Οι παθητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της νησιδοποίησης σε ΜΔΠ με αντιστροφείς αποτελούνται από:

- Υπερ/Υπο-τάσης και Υπερ/Υπο-συχνότητας (Over/Under Voltage and Over/Under Frequency Relays - OUV & OUF Relays)
- Αλματος Φάσης της Τάσης (Voltage Phase Jump)
- Παρακολούθησης των Αρμονικών Τάσης (Voltage Harmonic Monitoring)
- Ανίχνευσης της Ασυμμετρίας στην Τάση και Ολική Αρμονική Παραμόρφωση του Ρεύματος (Detection of Voltage Unbalance and Total Harmonic Distortion)
- Ανίχνευσης με βάση Εκτιμητές Κατάστασης (Detection based on State Estimators)

#### I. Μέθοδος Υπερ/Υπο-τάσης και Υπερ/Υπο-συχνότητας (Over/Under Voltage and Over/Under Frequency Relays - OUV & OUF Relays)

Αυτή η βασική μέθοδος βασίζεται στην ύπαρξη μιας τιμής αναφοράς για την τάση και τη συχνότητα στο ΣΚΣ. Έτσι, θα έχουμε αποσύνδεση απ' το κύκλωμα αν η τάση ή η συχνότητα ξεπεράσουν αυτή την τιμή. Τα επιτρεπόμενα εύρη τάσης και συχνότητας στην Ελλάδα είναι αντίστοιχα  $184 \leq V \leq 264.5V$  και  $49.5 \leq f \leq 50.5Hz$ .

Όταν ένας αντιστροφέας είναι εξοπλισμένος με ηλεκτρονόμους OUV και OUF, τότε θεωρούμε ότι ο αντιστροφέας διαθέτει τη βασική μέθοδο ανινησιδοποίησης χρησιμοποιώντας κλασικούς ηλεκτρονόμους. Όλοι οι αντιστροφείς ΜΔΠ που συνδέονται στο δίκτυο απαιτούνται να διαθέτουν τους ηλεκτρονόμους αυτούς.



Σχ. 2.12 Σύνδεση του αντιστροφέα με το δίκτυο και το φορτίο

Το ισοζύγιο ισχύος για το σύστημα του Σχ. 2.12 δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} P_{load} &= P_{DG} + \Delta P \\ Q_{load} &= Q_{DG} + \Delta Q \end{aligned}$$

Αν  $P_{load} = P_{DG}$  και/ή  $Q_{load} = Q_{DG}$  δεν υπάρχει αναντιστοιχία μεταξύ ενεργού/άεργου ισχύος μεταξύ της ΜΔΠ και του δικτύου.

Η συμπεριφορά του συστήματος όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί εξαρτάται από το  $\Delta P$  και  $\Delta Q$ . Η ενεργός ισχύς είναι ανάλογη με την τάση. Μετά την αποσύνδεση του δικτύου, η ενεργός ισχύς του φορτίου γίνεται ίση μ' αυτή του αντιστροφέα, οπότε η τάση του δικτύου γίνεται:

$$V' = KV, \text{ όπου } K = \sqrt{\frac{P_{DG}}{P_{load}}}$$

Όταν  $P_{DG} > P_{load}$  υπάρχει αύξηση στο πλάτος της τάσης, ενώ αν  $P_{DG} < P_{load}$  έχουμε μείωση στο πλάτος της τάσης. Η άεργος ισχύς συνδέεται με τη συχνότητα και το πλάτος της τάσης με τη σχέση:

$$Q'_{load} = Q_{DG} = \left( \frac{1}{\omega' L} - \omega' C \right) V^2.$$

Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τη συχνότητα νησιδοποίησης απ' τη σχέση:

$$\omega' = \frac{-\frac{Q_{DG}}{CV^2} + \sqrt{\left(\frac{Q_{DG}}{CV^2}\right)^2 + \frac{4}{LC}}}{2}.$$

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το χαμηλό κόστος και επίσης, καθώς η μέθοδος αυτή απλώς παρακολουθεί κάποιες παραμέτρους χωρίς να εισάγει κάποια διαταραχή, δεν έχει επιρροή στην ποιότητα ισχύος στην έξοδο του αντιστροφέα. Όμως, ένα μικρό  $\Delta P$  έχει ως αποτέλεσμα σε μη επαρκή αλλαγή στο πλάτος της τάσης και ένα μικρό  $\Delta Q$  έχει μη επαρκή αλλαγή στη συχνότητα, με αποτέλεσμα να μην αποσυνδεθεί ο αντιστροφέας και να μην αποφευχθεί η νησιδοποίηση. Έτσι, η πιθανότητα να βρεθούμε στη MAZ της ΟΥV και της ΟΥF είναι μεγάλη. Οπότε οι ηλεκτρονόμοι ΟΥV και ΟΥF, ως μέσα προστασίας κατά της νησιδοποίησης, από μόνα τους θεωρούνται μη επαρκή [17].

## II. Μέθοδος Ανίχνευσης Άλματος Φάσης της Τάσης (Voltage Phase Jump)

Η ανίχνευση άλματος φάσης της τάσης είναι μία μέθοδος ικανή να απενεργοποιήσει τον αντιστροφέα αν εντοπίσει διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα, κάτι που συμβαίνει σε κατάσταση νησιδοποίησης.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι αρκετά αποτελεσματική και μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί ακόμα και με πολλούς αντιστροφείς. Όμως, η επιλογή της τιμής αναφοράς είναι δύσκολο να επιλεγεί έτσι ώστε να ανιχνεύσει με αξιοπιστία τη νησίδα, χωρίς να επηρεάζει τη συχνότητα. Παρακάτω παρουσιάζεται μια εξίσωση για τον αλγόριθμο άλματος φάσης της τάσης [17]:

$$\theta_{threshold} \geq \arctan\left(\frac{\left(\frac{\Delta Q}{P}\right)}{1 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)}\right).$$

## III. Μέθοδος Παρακολούθησης των Αρμονικών της Τάσης (Voltage Harmonics Monitoring)

Ο σκοπός αυτής της μεθόδου είναι να παρακολουθεί την αρμονική παραμόρφωση της τάσης ώστε να εντοπίσει την κατάσταση νησιδοποίησης. Σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας η τάση στο ΣΚΣ ελέγχεται από το δίκτυο. Σε κατάσταση νησιδοποίησης η ΜΔΠ ελέγχει την τάση και τις αρμονικές της. Μπορούμε να λάβουμε υπ' όψιν όλες τις αρμονικές χρησιμοποιώντας το δείκτη Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD) στο ΣΚΣ, ή μόνο τις κύριες αρμονικές, δηλαδή την 3<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> και 7<sup>η</sup>. Είναι αρκετά δύσκολο να ανιχνευθεί η νησιδοποίηση αν η αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου δεν είναι αρκετά υψηλή ή χαμηλή έτσι ώστε να αλλάξει την THD όταν συμβεί η νησιδοποίηση.

Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου μπορεί να αλλάξει στο χρόνο αναλόγως της σύνθετης αντίστασης του δικτύου. Επιπλέον, το σύστημα μετατροπέα μπορεί να παρουσιάσει μια αρμονική παραμόρφωση στο DC ζυγό έχοντας ως επακόλουθο τη δημιουργία αρμονικής παραμόρφωσης στην πλευρά του δικτύου. Γενικά, ο αντιστροφέας συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή που μπορεί να επηρεάσει την αρμονική παραμόρφωση, ειδικότερα στην περίπτωση ηλεκτρικής νησίδας. Γι αυτό το λόγο δεν είναι πάντα δυνατό να επιλέξουμε μια τιμή αποσύνδεσης η οποία να παρέχει αξιόπιστη προστασία νησιδοποίησης.

Η MAZ των μεθόδων που βασίζονται στις αρμονικές έχουν άμεση σχέση με το φορτίο. Ένα RLC παράλληλο συντονισμένο φορτίο έχει χαρακτηριστικά βαθυπερατού φίλτρου σε συχνότητα που μπορεί να φιλτράρει χαμηλής τάξης αρμονικές περισσότερο από άλλες και επηρεάζει την ανίχνευση νησιδοποίησης. Στην περίπτωση μεγάλης μεταβολής στο πλάτος των αρμονικών, αυτές οι μέθοδοι έχουν μικρή MAZ [15].

## IV. Μέθοδος Ανίχνευσης της Ασυμμετρίας στην Τάση και Ολική Αρμονική Παραμόρφωση του Ρεύματος (Detection of Voltage Unbalance and Total Harmonic Distortion)

Η μέθοδος ανίχνευσης της ασυμμετρίας της τάσης και της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD) χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους για την ανίχνευση της νησιδοποίησης: την ασυμμετρία στην τάση και την THD του ρεύματος. Η ασυμμετρία της τάσης (VU) στους τερματικούς των ΜΔΠ ορίζεται ως:

$$VU = \frac{V_{NS}}{V_{PS}},$$

όπου  $V_{NS}$  και  $V_{PS}$  είναι οι αρνητικές και θετικές ακολουθίες τάσεων της τάσης εξόδου των ΜΔΠ.  
 Η THD του ρεύματος ορίζεται ως:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2}}{I_1} 100\%,$$

όπου  $I_h$  είναι η rms τιμή της  $h^{ης}$  αρμονικής και  $I_1$  είναι η rms τιμή της θεμελιώδους αρμονικής. Υπό συνθήκες νησιδοποίησης η ΜΔΠ αναλαμβάνει το τοπικό φορτίο και άλλες συνθήκες του φορτίου. Έτσι, η φόρτωση της ΜΔΠ αλλάζει ξαφνικά. Αυτή η ξαφνική αλλαγή προκαλεί διακύμανση στην τάση και εμφανίζονται αρμονικά ρεύματα.

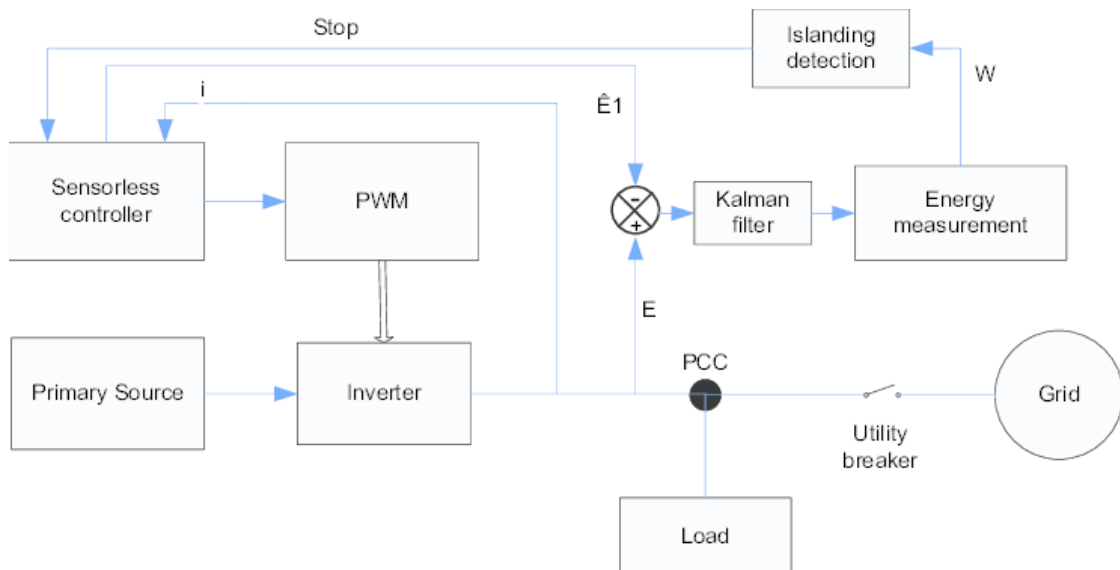
Σε δειγματικό διάστημα, η VU των τριών φάσεων κι η THD του ρεύματος της μιας φάσης υπολογίζονται και συγκρίνονται μ' ένα όριο. Αν οι τιμές είναι χαμηλότερες αυτού του ορίου τότε υπάρχει νησιδοποίηση.

Για μεγάλες τιμές του συντελεστή ποιότητας  $Q_f$  η μέθοδος αυτή αποτυγχάνει. Επίσης, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, είναι δύσκολο να τεθεί αυτό το όριο [22].

## V. Μέθοδος Ανίχνευσης με βάση Εκτιμητές Κατάστασης (Detection based on State Estimators)

Η βασική ιδέα αυτής της μεθόδου είναι βασισμένη στην εφαρμογή ενός ελέγχου τάσης σε συνδυασμό με τη χρησιμοποίηση συντονισμένων ελεγκτών. Ένας αλγόριθμος βασισμένος στα φίλτρα Kalman εφαρμόζεται για την εκτίμηση της 3<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> αρμονικής των τάσεων του δικτύου. Η αντιστοιχία μεταξύ της ενέργειας των εκτιμώμενων τιμών και των μετρούμενων τιμών μας βοηθά να ανιχνεύσουμε τη νησιδοποίηση.

Η ανίχνευση βασισμένη σε εκτιμητές κατάστασης έχει το πλεονέκτημα ότι ανήκει στις παθητικές μεθόδους και δεν επηρεάζει την ποιότητα ισχύος. Έχει αρκετά μικρή MAZ και ένα υψηλό βαθμό ανίχνευσης νησιδοποίησης. Όμως, απαιτεί μεγαλύτερη πολυπλοκότητα απ' την πλευρά του προγραμματισμού σε σχέση με άλλες παθητικές μεθόδους [14].



Σχ. 2.13 Μέθοδος ανίχνευσης με βάση εκτιμητές κατάστασης



#### 2.4.2.2.2 Ενεργητικές Μέθοδοι

Οι ενεργητικές μέθοδοι εισάγουν μικρές διαταραχές οι οποίες έχουν σαν στόχο:

- A. Να προκαλέσουν μεταβολές στη συχνότητα ικανές να ενεργοποιήσουν την προστασία OUF. Αυτές οι μέθοδοι προκαλούν μεταβολή στη συχνότητα της τάσης στο ΣΚΣ διαταράσσοντας τη συχνότητα του ρεύματος αναφοράς του αντιστροφέα, για παράδειγμα, με θετική ανάδραση. Όσο το δίκτυο είναι παρόν, είναι προφανές ότι η συχνότητα δεν μπορεί να μεταβληθεί, αλλά όταν αυτό αποσυνδέεται, η διαταραχή είναι ικανή να μεταβάλλει τη συχνότητα τόσο ώστε να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος Υπερ/Υπο-συχνότητας. Οι βασικές μέθοδοι που βασίζονται στις μεταβολές στη συχνότητα είναι οι εξής:
- Μεταβολής της Φάσης (Sandia Frequency Shift - SFS)
  - Ενεργού Μεταβολής της Συχνότητας (Active Frequency Drift - AFD)
  - Διαταραχής της Αέργου Ισχύος (Reactive Power Variation - RPV)
  - Μεταβολής της Φάσης με Θετική Ανάδραση (Slip Mode Frequency Drift - SMS)
  - Άλματος Συχνότητας (Frequency Jump)
- B. Να προκαλέσουν μεταβολές στην τάση ικανές να ενεργοποιήσουν την προστασία OUV. Αυτές οι μέθοδοι προκαλούν μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ είτε με θετική ανάδραση στο ρεύμα αναφοράς του αντιστροφέα, είτε με μεταβολή της αέργου ισχύος  $Q$ . Όσο το δίκτυο είναι παρόν, η τάση δεν μπορεί να μεταβληθεί, αλλά όταν αποσυνδεθεί, η διαταραχή είναι ικανή να μεταβάλλει την τάση τόσο ώστε να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος Υπερ/Υπο-τάσης. Οι βασικές μέθοδοι που βασίζονται στις μεταβολές της τάσης είναι οι εξής:
- Μεταβολής της Τάσης (Sandia Voltage Shift - SVS)
  - Διαταραχής της Ενεργού Ισχύος (Active Power Variation - APV)
  - D-Q εφαρμογής στην Ανάδραση της Τάσης (D-Q Implementation Voltage Feedback - DQIVF)
- C. Την εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης δικτύου, και έτσι την έμμεση ανίχνευση της κατάστασης νησιδοποίησης. Συγκεκριμένα, έχουν αναπτυχθεί πιο πολύπλοκες μέθοδοι που στοχεύουν στην ακριβή εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης δικτύου. Η ιδέα είναι ότι χρησιμοποιείται μία συγκεκριμένη διαταραχή για να γίνει εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης με βάση την απόκριση του δικτύου. Οι βασικές μέθοδοι που βασίζονται στην εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης του δικτύου είναι οι εξής:
- Έγχυσης Αρμονικών (Harmonic Injection - HI)
  - Μέτρησης της Σύνθετης Αντίστασης (Impedance Measurement - IM)
  - Εκτίμησης της Σύνθετης Αντίστασης του δικτύου εισάγοντας διαταραχές στην Ενεργό και Άεργο Ισχύ (Grid Impedance Estimation by Active Reactive Power Variation)
  - Κύριες Μονάδες Παρακολούθησης με Κατανεμημένες Διακοπτικές Συσκευές συνδεδεμένες σε Σειρά (Mains Monitoring Units with Allocated All-pole Switching Devices Connected in Series)

## A. Μέθοδοι βασισμένες στις διαταραχές στη συχνότητα

### I. Μέθοδος Μεταβολής της Φάσης (Sandia Frequency Shift - SFS)

Η μέθοδος αυτή είναι μέθοδος θετικής ανάδρασης που χρησιμοποιείται για την αποφυγή νησιδοποίησης. Όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο, η μέθοδος ανιχνεύει και προσπαθεί να ενισχύσει μικρές μεταβολές στη συχνότητα, αλλά η παρουσία του δικτύου το αποτρέπει. Όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί, οι μεταβολές στη συχνότητα παράγουν σφάλμα στη φάση και η θετική ανάδραση, σε μια επαναληπτική διαδικασία, πηγαίνει τη συχνότητα σε μια τιμή πέρα από το όριο της OUF.

Όταν η μέθοδος είναι σε εφαρμογή, υπολογίζεται η συχνότητα αναφοράς του αντιστροφέα ως μια συνάρτηση της επανάληψης  $n$  και της διαταραχής  $\Delta f$ , δηλαδή

$$f_{n+1} = f_n + K_f \Delta f_n,$$

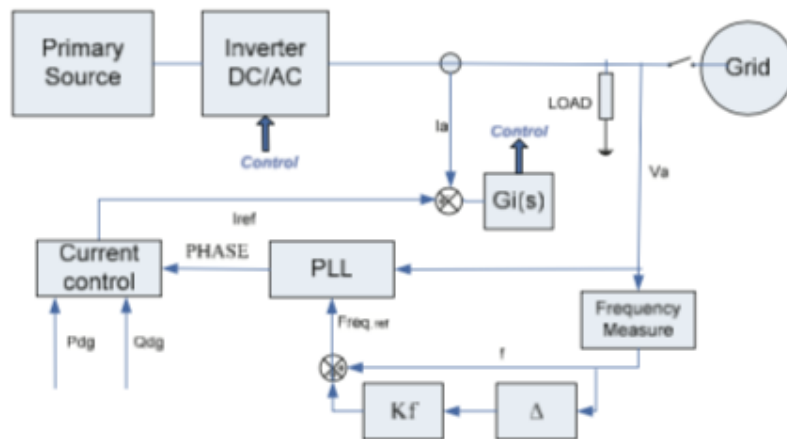
όπου  $f_{n+1}$  είναι η συχνότητα αναφοράς για τον αντιστροφέα στον  $n + 1$  κύκλο,

$f_n$  είναι η συχνότητα στον  $n$  κύκλο,

$K_f$  είναι μία σταθερά που επιτρέπει στην επιτάχυνση της ανίχνευσης της νησιδοποίησης και

$\Delta f_n$  είναι η διαταραχή της συχνότητας για κάθε κύκλο.

Το  $K_f$  είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αντισταθμίζει τη φυσική τάση του συστήματος να πηγαίνει στη συχνότητα συγχρονισμού του φορτίου όταν αυτή η συχνότητα συγχρονισμού είναι μέσα στα όρια που έχουν τεθεί για την ανίχνευση της νησιδοποίησης [14].



Σχ. 2.14 Διάγραμμα μεθόδου μεταβολής της φάσης - SFS

Στον  $n + 1$  κύκλο ο αντιστροφέας εγχύει ένα ρεύμα με συγκεκριμένη συχνότητα. Έτσι, το φορτίο εισάγει μια ολισθαίνουσα γωνία φάσης  $\varphi$  που αντιστοιχεί σ' ένα χρονικό διάστημα  $T_{PS}$ , όπου

$$T_{PS} = \frac{\varphi}{2\pi} T_{n+1} = \frac{\varphi}{2\pi f_{n+1}}.$$

Το  $K_f$  επιλέγεται έτσι ώστε να διατηρεί την ολισθαίνουσα συχνότητα κάτω απ' τη συχνότητα συγχρονισμού. Αυτή η συνθήκη υποδηλώνει ότι η συχνότητα στον κύκλο  $n + 1$  πρέπει (για

αύξουσα αλλαγή) να είναι υψηλότερη από εκείνη του κύκλου  $n$ , που οδηγεί στην παρακάτω συνθήκη:

$$f_{n+1} = \left( \frac{1}{f_n + K_f \Delta f_n} - \frac{\varphi}{2\pi(f_n + K_f \Delta f_n)} \right)^{-1} \geq \left( \frac{1}{f_n} \right)^{-1} \Rightarrow K_f > \frac{-\varphi f_n}{2\pi \Delta f_n}.$$

Αλλά ένα θέμα όσον αφορά την επιλογή της τιμής του  $K_f$  είναι ο επιθυμητός χρόνος απόκρισης. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιβολή μιας ελάχιστης χρονικής μεταβολής που ονομάζεται χρόνος μετατόπισης  $T_f$ . Έτσι έχουμε:

$$f_{n+1} = \left( \frac{1}{f_n + K_f \Delta f_n} - \frac{\varphi}{2\pi(f_n + K_f \Delta f_n)} \right)^{-1} \geq \left( \frac{1}{f_n} - T_f \right)^{-1}$$

Για συχνότητα κοντά στη συχνότητα δικτύου, ο όρος  $2\pi f_n T_f$  είναι αρκετά μεγαλύτερος απ' τη γωνία μετατόπισης φάσης  $\varphi$  και ο όρος  $(1 - f_n T_f)$  είναι κοντά στο 1. Μ' αυτές τις απλοποιήσεις έχουμε:

$$K_f \geq f_n \frac{|\varphi| + 2\pi f_n T_f}{(1 - f_n T_f) 2\pi \Delta f_n} \Rightarrow K_f \geq \frac{f_n^2 T_f}{\Delta f_n}.$$

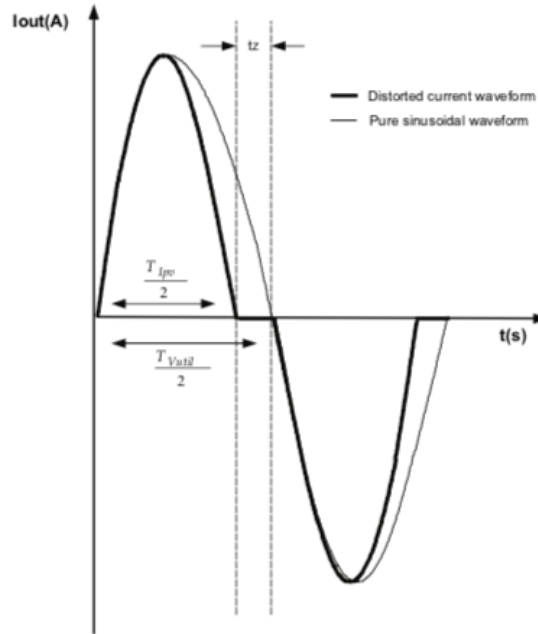
## II. Μέθοδος Ενεργού Μεταβολής της Συχνότητας (Active Frequency Drift - AFD)

Η βάση της μεθόδου AFD είναι να μεταβάλλουμε τη συχνότητα του ρεύματος εξόδου μέσω θετικής ανάδρασης. Η μέθοδος εγχύει ένα ρεύμα στο ΣΚΣ ελαφρώς παραμορφωμένο στη συχνότητα, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.15. Όταν αποσυνδεθεί το δίκτυο, εμφανίζεται ένα σφάλμα φάσης μεταξύ του ρεύματος του αντιστροφέα και της τάσης στο ΣΚΣ. Ο αντιστροφέας αντιλαμβάνεται αυτό το σφάλμα και προσπαθεί να το αντισταθμίσει αυξάνοντας τη συχνότητα του παραγόμενου ρεύματος. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η συχνότητα να ξεπεράσει τα όρια και να ενεργοποιηθούν οι ηλεκτρονόμοι OUF.

Η σχέση μεταξύ  $t_z$  στο Σχ. 2.15 και της μισής περιόδου της φάσης ονομάζεται chopping factor:

$$cf = \frac{2t_z}{T_{V_{util}}}$$

Αυτή η μέθοδος μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί για πολλούς αντιστροφείς. Όμως, η AFD επηρεάζει την ποιότητα ισχύος στην έξοδο της ΜΔΠ κι ο αντιστροφέας έχει μια MAZ που εξαρτάται απ' τον  $cf$  [14], [16].



Σχ. 2.15 Κυματομορφή παραμορφωμένου ρεύματος αντιστροφέα χρησιμοποιώντας την AFD

### III. Μέθοδος Διαταραχής της Αέργου Ισχύος (Reactive Power Variation - RPV)

Η σχέση που έχει η άεργος ισχύς με τη συχνότητα μας επιτρέπει να αναπτύξουμε μία ακόμη μέθοδο ανίχνευσης νησιδοποίησης, βασισμένη στη μέτρηση της συχνότητας του δικτύου. Οι ΜΔΠ προτείνεται να λειτουργούν κοντά σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος κι έτσι, σε κανονική λειτουργία, η παραγόμενη άεργος ισχύς πρέπει να είναι μηδενική. Σε κατάσταση νησιδοποίησης, η συχνότητα εξαρτάται απ' τα επαγωγικά και χωρητικά περιεχόμενα του φορτίου:

$$Q_{DG} = Q_{LOAD} = 0 = V^2 \left( \frac{1}{\omega L} - \omega C \right).$$

Έτσι, η σχέση της διαταραχής της αέργου ισχύος σε σχέση με τη συχνότητα είναι:

$$\frac{Q - 0}{\omega - \omega_0} = \frac{dQ}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

όπου  $\omega_0$  είναι η συχνότητα του ισοδύναμου  $RLC$  φορτίου.

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση, με σκοπό να υπολογίσουμε τη μεταβολή της συχνότητας ως μια συνάρτηση του  $Q$  και θέτοντας τη συχνότητα του φορτίου ίση με τη συχνότητα συντονισμού, παίρνουμε την παρακάτω σχέση:

$$\Delta\omega = -V^2 \left( \frac{\omega_0^2 L}{\omega_0^2 LC + 1} \right) Q.$$

Παρατηρούμε ότι η μεταβολή στην κυκλική συχνότητα είναι ανάλογη με τη μεταβολή της αέργου ισχύος κι έτσι μπορούμε να εκφράσουμε τη μεταβολή στη συχνότητα  $\Delta f$  ως συνάρτηση του συντελεστή ποιότητας  $Q_f$  της συχνότητας συντονισμού  $f_0$  και της ενεργού ισχύος  $P_{DG}$ :

$$\Delta f = - \left( \frac{f_0}{2P_{DG}Q_f} \right) Q.$$

Η συχνότητα αναφοράς στον έλεγχο του αντιστροφέα υπολογίζεται ως εξής:

$$f_{ref} = f_g + K_f(f - f_g),$$

όπου  $f_g$  είναι η συχνότητα του δικτύου,

$f$  είναι η μετρούμενη συχνότητα και

$K_f$  είναι μια σταθερά που επιτρέπει την επιτάχυνση της ανίχνευσης της νησιδοποίησης.

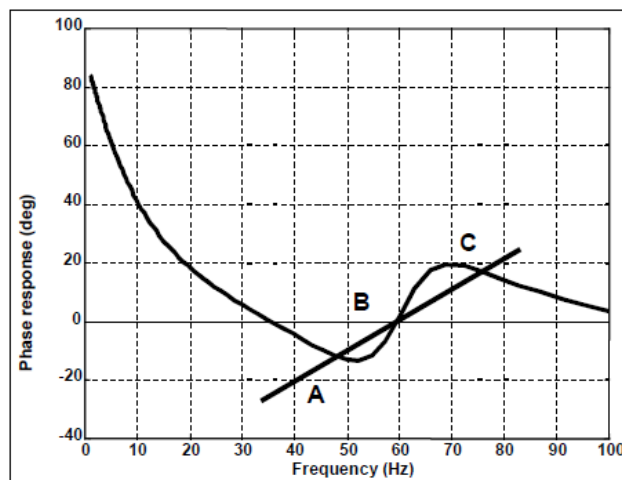
Η σταθερά  $K_f$  υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις παραμέτρους της εξίσωσης

$$\Delta f = - \left( \frac{f_0}{2P_{DG}Q_f} \right) Q.$$

Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να κάνει εσφαλμένες ανιχνεύσεις νησιδοποίησης όταν είναι συνδεδεμένοι πολλοί αντιστροφείς στο ίδιο σημείο του δικτύου. Επιπλέον, παρουσιάζονται προβλήματα αστάθειας λόγω των συνεχών εγχύσεων διαταραχών απ' τον αντιστροφέα στο δίκτυο [14].

#### IV. Μέθοδος Μεταβολής της Φάσης με Θετική Ανάδραση (Slip Mode Frequency Drift - SMS)

Η αρχή λειτουργίας αυτής της μεθόδου βασίζεται στη μεταβολή της συχνότητας του ρεύματος εξόδου ελέγχοντας τη φάση του ρεύματος του αντιστροφέα. Συνήθως, η ΜΔΠ λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, έτσι σε κανονική λειτουργία του αντιστροφέα, η γωνία φάσης τάσης-ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα, αντί να ελέγχεται να είναι μηδενική, γίνεται μια συνάρτηση της συχνότητας της τάσης στο ΣΚΣ.



Σχ. 2.16 Μέθοδος μεταβολής της φάσης με θετική ανάδραση

Η καμπύλη απόκρισης της φάσης σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η φάση του αντιστροφέα να αυξάνεται γρηγορότερα από τη φάση του  $RLC$  φορτίου με  $\Sigma I = 1$  στην περιοχή κοντά στη συχνότητα δικτύου. Αυτό κάνει τη συχνότητα της γραμμής ένα ασταθές σημείο λειτουργία για τον αντιστροφέα. Όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο, σταθεροποιεί το σημείο λειτουργίας στη συχνότητα γραμμής παρέχοντας μια στιβαρή φάση και συχνότητα αναφοράς. Όμως, αφού γίνει η νησιδοποίηση, το σημείο λειτουργίας φάσης-συχνότητας του φορτίου και του αντιστροφέα πρέπει να τέμνει τη γραμμή του φορτίου και την καμπύλη απόκρισης φάσης του αντιστροφέα.

Αυτή η μέθοδος είναι εύκολο να εφαρμοστεί, διότι απλά χρειάζεται μια αλλαγή σ' ένα περιεχόμενο, το οποίο είναι ήδη απαραίτητο, το Βρόχο Κλειδωμένης Φάσης (Phase Locked Loop - PLL). Επιπλέον, έχει μικρή MAZ σε σχέση με άλλες μεθόδους. Επίσης, έχει το πλεονέκτημα ότι δουλεύει καλά και στην περίπτωση πολλών αντιστροφέων. Όμως, η μέθοδος SMS απαιτεί μια μείωση στην ποιότητα ισχύος του αντιστροφέα [14], [16].

## V. Μέθοδος Άλματος Συχνότητας (Frequency Jump - FJ)

Η μέθοδος FJ είναι μια τροποποίηση της μεθόδου AFD και είναι εννοιολογικά παρόμοια με τις τεχνικές εκτίμησης της σύνθετης αντίστασης. Στη μέθοδο FJ, εισάγονται νεκρές ζώνες σε κάποιους κύκλους της κυματομορφής του ρεύματος εξόδου. Η συχνότητα είναι 'αποσβεμένη' σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο μοτίβο.

Όταν ο αντιστροφέας συνδέεται με το δίκτυο, η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ καθορίζεται από το δίκτυο. Όμως, όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί, η ανίχνευση της νησιδοποίησης επιτυγχάνεται με μια εξαναγκασμένη απόκλιση στη συχνότητα.

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, αν το μοτίβο είναι αρκετά εξελιγμένο, η FJ μπορεί να είναι αρκετά αποτελεσματική στην ανίχνευση νησιδοποίησης όταν χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας. Επίσης, αυτή η μέθοδος έχει ελάχιστη MAZ στη λειτουργία με ένα αντιστροφέα, αλλά χάνει την αποτελεσματικότητά της στην περίπτωση πολλαπλών αντιστροφέων, εκτός και αν οι συχνότητες απόσβεσης μεταξύ των αντιστροφέων συγχρονιστούν [14].

## B. Μέθοδοι βασισμένες στις διαταραχές στην τάση

### I. Μέθοδος Μεταβολής της Τάσης (Sandia Voltage Shift - SVS)

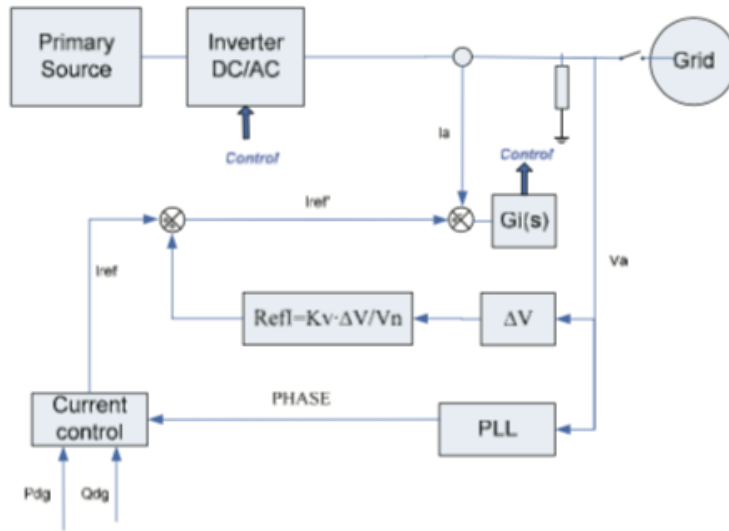
Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα βρόχο θετικής ανάδρασης στο πλάτος της τάσης στο ΣΚΣ. Αν το πλάτος της τάσης (μετρούμενο σε rms τιμή) μειωθεί, ο αντιστροφέας μειώνει το ρεύμα εξόδου και επομένως και την ισχύ εξόδου. Η μεταβολή της ενεργού ισχύος εκφράζεται ως εξής:

$$\Delta P_{DG} = 2\Delta V \frac{V}{R}.$$

Η μεταβολή  $\Delta V$  υπολογίζεται συγκρίνοντας την τιμή της τάσης με αυτή που παίρνουμε μετά το φιλτράρισμα. Επομένως, με το δίκτυο συνδεδεμένο, σε σταθερή κατάσταση, δεν υπάρχει μεταβολή στην τάση και το ΣΚΣ δε θα επηρεαστεί.

Ο χρόνος απόκρισης του αλγορίθμου μπορεί να ρυθμιστεί και με τη χρήση ενός κέρδους  $K_V$  που αυξάνει ή μειώνει το ρεύμα του αντιστροφέα ανάλογα με τη μεταβολή στην τάση. Το ρεύμα αναφοράς στον έλεγχο του αντιστροφέα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{ref} = \frac{dP + P_{DG}}{V} = K_V \Delta V + \frac{P_{DG}}{V}.$$



Σχ. 2.17 Διάγραμμα μεθόδου μεταβολής της τάσης

Τελικά, αυτή η μέθοδος οδηγεί το πλάτος της τάσης πέρα απ' τα όρια της ΟΥΒ επιτρέποντας την ανίχνευση νησιδοποίησης. Για να αποφύγουμε οποιαδήποτε ζημιά στο συνδεδεμένο εξοπλισμό προτιμάται να μειώνουμε το πλάτος της τάσης αντί να το αυξάνουμε.

Η μέθοδος SVS είναι εύκολη να εφαρμοστεί και θεωρείται αρκετά αποτελεσματική ανάμεσα στις μεθόδους που χρησιμοποιούν θετική ανάδραση. Τις περισσότερες φορές η SVS κι η SFS εφαρμόζονται ταυτόχρονα, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Όμως, η μέθοδος SVS έχει δύο μειονεκτήματα. Απ' τη μία έχουμε μια μικρή μείωση στην ποιότητα ισχύος διότι η τάση στο ΣΚΣ δέχεται συνεχώς διαταραχές. Απ' την άλλη επηρεάζεται η αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων Παρακολούθησης Μέγιστου Σημείου Ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT) [14].

## II. Μέθοδος Διαταραχής Ενεργού Ισχύος (Active Power Variation - APV)

Στο Σχ. 2.18 φαίνεται ο έλεγχος του αντιστροφέα για τη μέθοδο APV καθώς και για τη μέθοδο RPV. Ο έλεγχος του αντιστροφέα επιτυγχάνεται μέσω μιας ισχύος αναφοράς  $P_{DG}$ , η οποία θεωρείται σταθερή, αλλά στην πραγματικότητα μπορεί να μεταβάλλεται ή να ταλαντεύεται ανάλογα με τη θερμοκρασία και τις καταστάσεις ακτινοβολίας. Θεωρούμε ότι το φορτίο απορροφά συνεχώς ισχύ  $P_{load}$ .

Σε κατάσταση νησιδοποίησης η διαταραχή της ισχύος ρέει απευθείας στο φορτίο, επηρεάζοντας το ρεύμα του αντιστροφέα και την τάση στο ΣΚΣ. Είναι δυνατό να υπολογίσουμε τη διαταραχή της τάσης σε σχέση με τη διαταραχή της ισχύος που επιτυγχάνεται από τον αντιστροφέα στο φορτίο κατά την κατάσταση νησιδοποίησης ως εξής:

$$P_{DG} = P_{load} = \frac{V^2}{R} \Leftrightarrow V = \sqrt{RP_{DG}}$$

Παραγωγίζοντας την  $P_{DG}$  έχουμε:

$$\frac{\partial P_{DG}}{\partial V} = \frac{2V}{R} = \frac{2\sqrt{RP_{DG}}}{R} = 2\sqrt{\frac{P_{DG}}{R}}$$

Η διαταραχή της τάσης ισούται με:

$$\Delta V = \frac{\Delta P_{DG}}{2} \sqrt{\frac{R}{P_{DG}}},$$

όπου  $R$  και  $P_{DG}$  είναι σταθερά, οπότε η διαταραχή της τάσης είναι ανάλογη με τη διαταραχή της ενεργού ισχύος. Έτσι, είναι δυνατό να μεταβάλλουμε την ενεργό ισχύ του αντιστροφέα, ώστε να στείλει την τάση εκτός των ορίων κανονικής λειτουργίας.

Είναι απαραίτητο να επιλεγούμε πότε να εγχύουμε ισχύ, διότι η συνεχής μεταβολή της εγχύμενης ισχύος έρχεται σε αντίθεση με το MPPT. Γι αυτό το λόγο η μέθοδος βασίζεται στην έγχυση μιας διαταραχής ενεργού ισχύος μόνο όταν η μετρούμενη τάση στο ΣΚΣ ξεπεράσει ένα καθορισμένο όριο  $V_s$  [14].

Ο χρόνος παρεμβολής του αλγορίθμου μπορεί να ρυθμιστεί από ένα κέρδος  $K_V$ , το οποίο αυξάνει ή μειώνει την ισχύ  $\Delta P$  ανάλογα με τη μετρούμενη μεταβολή της τάσης. Είναι σημαντικό να επιλέξουμε μια σωστή τιμή για το κέρδος  $K_V$  έτσι ώστε να αποφευχθούν οι υπερεντάσεις. Το ρεύμα αναφοράς στον έλεγχο του αντιστροφέα υπολογίζεται:

$$I_{ref} = \frac{dP + P_{DG}}{V},$$

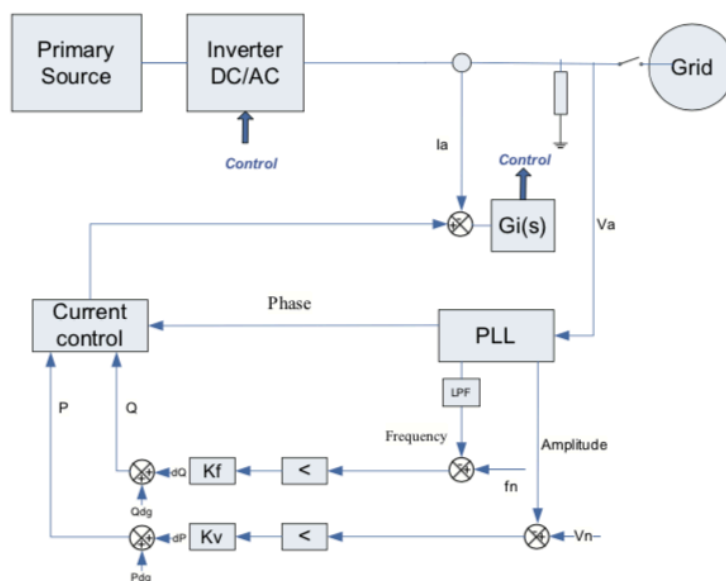
όπου  $dP = K_V(V - V_n)$  είναι η διαταραχή της ενεργού ισχύος  
 $V_n$  είναι η τιμή της ονομαστικής τάσης και  
 $V$  είναι η τιμή της μετρούμενης τάσης.

Άρα,

$$I_{ref} = \frac{K_V(V - V_n) + P_{DG}}{V}.$$

Αν  $V = V_n \Rightarrow dP = 0$ , άρα

$$I_{ref} = \frac{P_{DG}}{V}.$$



Σχ. 2.18 Διάγραμμα μεθόδων APV και RPV



### III. D-Q εφαρμογής στην Ανάδραση της Τάσης (D-Q Implementation Voltage Feedback - DQIVF)

Η ιδέα της ανάδρασης τάσης είναι να δημιουργήσουμε ένα μηχανισμό που, όταν ο αντιστροφέας αντιληφθεί μια αλλαγή στην τάση, πχ. αύξηση, τότε να παράγει περισσότερη ενεργό ισχύ. Λόγω των χαρακτηριστικών του φορτίου  $P = V^2/R$ , η τάση θα συνεχίσει να αυξάνεται με σκοπό να εξισορροπήσει την ισχύ. Έτσι, θα βγει εκτός ορίων και θα τεθούν σε λειτουργία οι ηλεκτρονόμοι ΟΥΒ. Αυτή η αλλαγή δε θα είναι σημαντική με το δίκτυο συνδεδεμένο. Αρχικά, το δίκτυο καθορίζει την τάση, έτσι η μεταβολή είναι μικρή. Δεύτερον, παρόλο που υπάρχει μεταβολή στην τάση και ο αντιστροφέας ανταποκρίνεται σ' αυτή μεταβάλλοντας της ενεργό ισχύ, η ανισορροπία στην ισχύ θα απορροφηθεί από το δίκτυο λόγω της χαμηλής σύνθετης αντίστασής του. Έτσι, η μεταβολή της τάσης λόγω της ανισορροπίας ισχύος θα είναι ασήμαντη.

Λόγω της εφαρμογής του συστήματος D-Q, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι  $V_d$  και  $V_q$  ως τάσεις ανάδρασης. Αν, για παράδειγμα, διαλέξουμε την τάση  $V_d$ , τότε μια θετική ανάδραση σχεδιάζεται ως εξής: η τάση ανάδρασης  $V_d$  περνά από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο, ένα κέρδος κι έναν limiter και μετά εγχύεται στο ρεύμα αναφοράς  $I_{dref}$ . Αυτή η ανάδραση θα κάνει τον αντιστροφέα να μεταβάλλει την ενεργό ισχύ (απαιτώντας περισσότερο ρεύμα) κι αυτό θα οδηγήσει σε εκ νέου αλλαγή της τάσης λόγω των χαρακτηριστικών του φορτίου [11].

#### C. Μέθοδοι βασισμένες στην εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης του δικτύου

##### I. Μέθοδος Έγχυσης Αρμονικών (Harmonic Injection - HI)

Αυτή η μέθοδος είναι μια ειδική περίπτωση της μεθόδου παρακολούθησης αρμονικών. Η διαφορά κι ο λόγος που αυτή η μέθοδος θεωρείται ενεργητική αντί για παθητική, είναι ότι αυτή η μέθοδος εγχύει μια αρμονική ρεύματος σε μια συγκεκριμένη συχνότητα στο ΣΚΣ μέσω του αντιστροφέα.

Το PLL παρακολούθησης έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ανιχνεύει μια διαφοροποίηση στην αρμονική τάσης που αντιστοιχεί στην αρμονική ή υπο-αρμονική ρεύματος που εγχύει ο αντιστροφέας.

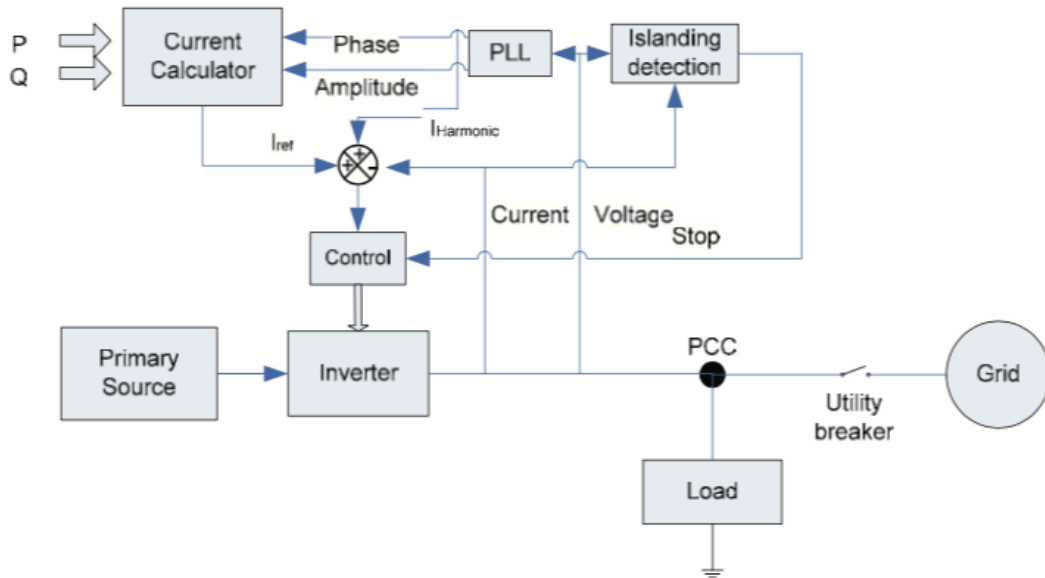
Όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο, αν η σύνθετη αντίσταση του δικτύου είναι μικρότερη απ' αυτή του φορτίου στην αρμονική συχνότητα, τότε το αρμονικό ρεύμα ρέει στο δίκτυο και δεν ανιχνεύεται κάποια μη φυσιολογική τιμή της τάσης. Με την αποσύνδεση του δικτύου το αρμονικό ρεύμα ρέει στο φορτίο. Τότε το φορτίο παράγει μια αρμονική τάση που μπορεί να ανιχνευθεί.

Αυτή η μέθοδος έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης σε μια συγκεκριμένη συχνότητα στους ακροδέκτες του αντιστροφέα

$$Z(h) = \frac{\tilde{V}(h)}{\tilde{I}(h)},$$

όπου  $\tilde{I}(h)$  είναι το ρεύμα που εγχύεται και  $\tilde{V}(h)$  η μετρούμενη τάση για την  $h^{\text{η}}$  αρμονική.

Η δύναμη αυτής της μεθόδου είναι η πιθανότητα να ανιχνεύσει τη νησιδοποίηση χρησιμοποιώντας μόνο ένα PLL παρακολούθησης συγχρονισμένο σε μια συγκεκριμένη συχνότητα (σε αντίθεση στην αντίστοιχη παθητική μέθοδο πρέπει να παρακολουθούνται πολλές αρμονικές). Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός ότι το πλάτος της αρμονικής τάσης εξαρτάται από το φορτίο κι αυτό έχει ως επακόλουθο τη μείωση της ποιότητας ισχύος. Επίσης, αν πολλοί αντιστροφέες εγχύουν τις ίδιες αρμονικές μπορεί να έχουμε λανθασμένες αποσυνδέσεις [14].



Σχ. 2.19 Διάγραμμα μεθόδου HI

## II. Μέθοδος Μέτρησης της Σύνθετης Αντίστασης (Impedance Measurement - IM)

Οι τεχνικές που βασίζονται στη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης αναζητούν αλλαγές στη σύνθετη αντίσταση στην έξοδο του αντιστροφέα, οι οποίες παρατηρούνται όταν το δίκτυο, το οποίο υποτίθεται πως πρέπει να έχει να έχει μικρή σύνθετη αντίσταση, αποσυνδέεται.

Ο αντιστροφέας της ΜΔΠ συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος, η οποία εγχύει ρεύμα ως εξής:

$$i_{DG-inv} = I_{DG-inv} \sin(\omega_{DG}t + \varphi_{DG}).$$

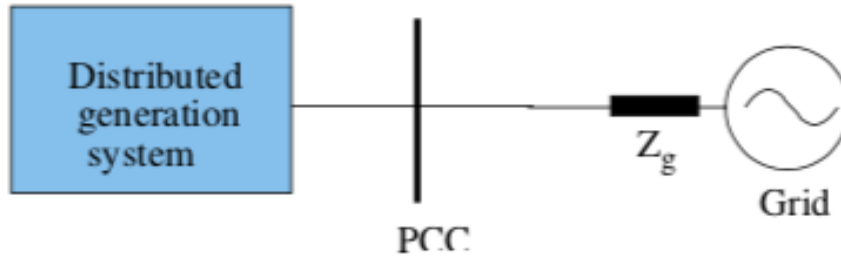
Συνήθως, προστίθεται μια διαταραχή στο ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα,  $I_{DG-inv}$ , το οποίο προκαλεί αλλαγές στην τάση εξόδου όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί. Αυτή η μεταβολή παρακολουθείται υπολογίζοντας το  $dv/di$ , το οποίο είναι η σύνθετη αντίσταση του δικτύου την οποία 'βλέπει' ο αντιστροφέας.

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου IM είναι η μικρή MAZ. Όμως, αυτή η μέθοδος έχει πολλές αδυναμίες. Αρχικά, μειώνεται η αποτελεσματικότητά της όσο περισσότεροι αντιστροφείς συνδέονται στο δίκτυο, εκτός κι αν όλοι χρησιμοποιούν την ίδια μέθοδο και είναι όλοι συγχρονισμένοι. Η δεύτερη είναι ότι πρέπει να καθορισθεί ένα όριο σύνθετης αντίστασης για να αναγνωρίζεται αν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο. Αυτό απαιτεί την τιμή της σύνθετης αντίστασης του δικτύου, κάτι που αρχικά είναι άγνωστο. Αυτό, κάνει μερικές φορές τη μέθοδο μη πρακτική [14].

## III. Μέθοδος Εκτίμησης της Σύνθετης Αντίστασης του δικτύου εισάγοντας διαταραχές στην Ενεργό και Άεργο Ισχύ (Grid Impedance Estimation by Active Reactive Power Variation - ARPV)

Αυτή η μέθοδος ανιχνεύει τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου χρησιμοποιώντας διαταραχές ενεργού και άεργου ισχύος που παράγονται από ένα συνδεδεμένο στο δίκτυο σύστημα παραγωγής. Οι αναφορές για την ενεργό και άεργο ισχύ μεταβάλλονται σκόπιμα για να επιτρέψουν την ανίχνευση της αντίστασης αλλά και των επαγωγικών τμημάτων της σύνθετης αντίστασης της γραμμής.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανίχνευση των  $dq$  περιεχομένων της τάσης του δικτύου και του ρεύματος αντίστοιχα, τα οποία μετατρέπονται περαιτέρω σε ένα αυθαίρετο περιστρεφόμενο μετασχηματισμό αναφοράς συγχρονισμένο με τη γωνιακή συχνότητα του δικτύου.



Σχ. 2.20 ΜΔΠ συνδεδεμένη στο δίκτυο

Θεωρώντας ότι η ΜΔΠ συνδέεται στο δίκτυο όπως φαίνεται στο Σχ. 2.20, η γωνία του αυθαίρετου μετασχηματισμού αναφοράς μπορεί να δωθεί απ' τη γωνιακή συχνότητα του δικτύου:

$$\theta = \int \omega dt.$$

Επειδή η τάση στο ΣΚΣ για δύο σημεία λειτουργίας μπορεί να γραφτεί:

$$\begin{aligned}\vec{V}_{pcc1} &= \vec{V}_s(1) - Z\vec{i}_{pcc1}, \\ \vec{V}_{pcc2} &= \vec{V}_s(2) - Z\vec{i}_{pcc2},\end{aligned}$$

όπου 1 και 2 αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικές δειγματοληψίες, η σύνθετη αντίσταση της γραμμής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις μεταβολές τάσης και ρεύματος στο ΣΚΣ:

$$Z = \frac{\Delta \vec{V}_{pcc}}{\Delta \vec{i}_{pcc}},$$

όπου

$$\begin{aligned}\Delta \vec{V}_{pcc} &= \vec{V}_{pcc1} - \vec{V}_{pcc2} \text{ και} \\ \Delta \vec{i}_{pcc} &= \vec{i}_{pcc1} - \vec{i}_{pcc2},\end{aligned}$$

είναι οι μεταβολές της τάσης και του ρεύματος στο ΣΚΣ. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν όταν η τάση της πηγής κι η σύνθετη αντίσταση του δικτύου δεν αλλάζουν μεταξύ δύο δειγματοληψιών,  $\vec{V}_s(1) = \vec{V}_s(2)$ .

Το πλάτος κι η φάση στο ΣΚΣ υπολογίζονται απ' τα  $\alpha\beta$  περιεχόμενα:

$$\begin{aligned}|V_{pcc1,2}| &= \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2}, \\ \theta_{V_{pcc1,2}} &= \tan^{-1} \frac{V_\beta}{V_\alpha}.\end{aligned}$$

Έτσι, τα  $dq$  περιεχόμενα της τάσης και για τις δύο δειγματοληψίες δίνονται απ' τη σχέση:

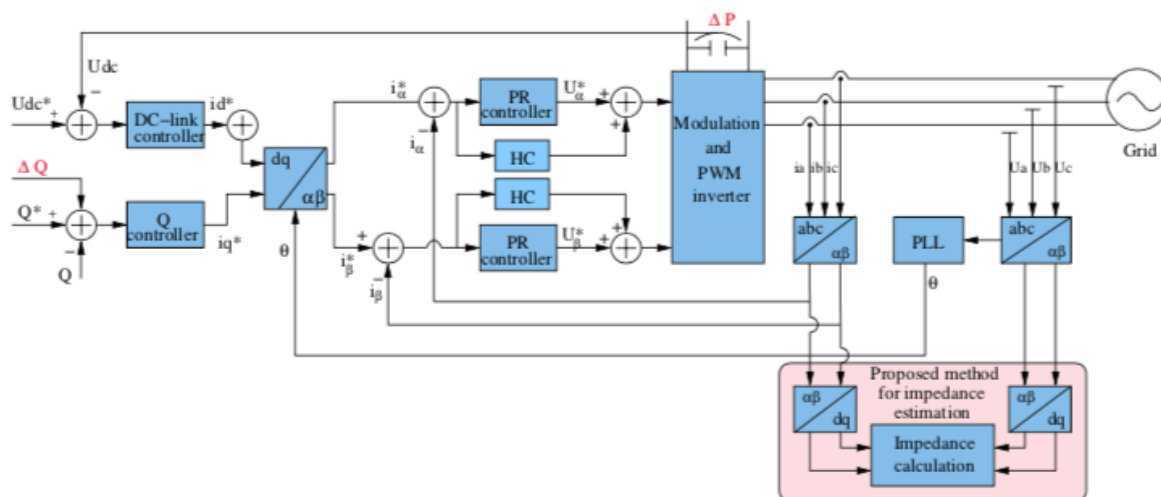
$$V_{d1,2} = |V_{pcc1,2}| \cos(\theta_{V_{pcc1,2}} - \theta),$$

$$V_{q1,2} = |V_{pcc1,2}| \sin(\theta_{V_{pcc1,2}} - \theta).$$

Με βάση τα  $dq$  περιεχόμενα της τάσης και του ρεύματος, η αντίσταση κι η αντίδραση του δικτύου υπολογίζεται ως εξής:

$$R = \frac{(V_{q1} - V_{q2})(I_{q1} - I_{q2}) + (V_{d1} - V_{d2})(I_{d1} - I_{d2})}{(I_{q1} - I_{q2})^2 + (I_{d1} - I_{d2})^2} \text{ και}$$

$$\omega L = \frac{(V_{d1} - V_{d2})(I_{q1} - I_{q2}) - (V_{q1} - V_{q2})(I_{d1} - I_{d2})}{(I_{q1} - I_{q2})^2 + (I_{d1} - I_{d2})^2} [9].$$



Σχ. 2.21 Διάγραμμα μεθόδου ARPV

#### IV. Κύριες Μονάδες Παρακολούθησης με Κατανεμημένες Διακοπτικές Συσσκευές συνδεδεμένες σε Σειρά (Mains Monitoring Units with Allocated All-pole Switching Devices Connected in Series)

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση της σύνθετης αντίστασης του δικτύου. Χρησιμοποιεί δύο συσκευές παρακολούθησης παράλληλα, συνδεδεμένες σε δύο σειρές διασυνδεδεμένων διακοπών, οι οποίες ελέγχονται ανεξάρτητα. Κάθε μία απ' τις μονάδες παρακολουθούν συνέχεια την τάση, τη συχνότητα και τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου. Το πότε και πως η μέθοδος παρακολουθεί τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου ήταν το επίκεντρο των πιο καινοτόμων βελτιώσεων.

Τυπικά, ένας παλμός ρεύματος εγχύεται στο δίκτυο απ' τη συσκευή για να υπολογίσει τη σύνθετη αντίσταση. Το κύκλωμα είναι σχεδιασμένο ώστε να ανιχνεύει σημαντικές αλλαγές στη σύνθετη αντίσταση για ένα μικρό χρονικό διάστημα, όπως θα συνέβαινε αν το δίκτυο αποσυνδεόταν [8].

## 2.4 Μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης για DC μικροδίκτυα

Λόγω της υψηλής διείσδυσης των DC ΜΔΠ και των DC φορτίων, τα DC δίκτυα διανομής αποκτούν ευρεία αποδοχή στα μοντέρνα ενεργειακά δίκτυα. Πολλά οφέλη επιτυγχάνονται με την αλλαγή του ηλεκτρικού συστήματος από AC σε DC, ιδιαίτερα για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις συσκευές αποθήκευσης. Με το DC σύστημα διανομής σε σύγκριση με το AC, η αποδοτικότητα του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί με την εξάλειψη των περιττών βαθμίδων μετατροπής από την πηγή στο φορτίο. Επιπλέον, η απλοποιημένη διαμόρφωση του συστήματος επιτρέπει τη μείωση του κόστους του συστήματος και τη βελτίωση της αξιοπιστίας. Επομένως, τα DC συστήματα διανομής λειτουργούν παράλληλα με τα ήδη υπάρχοντα AC.

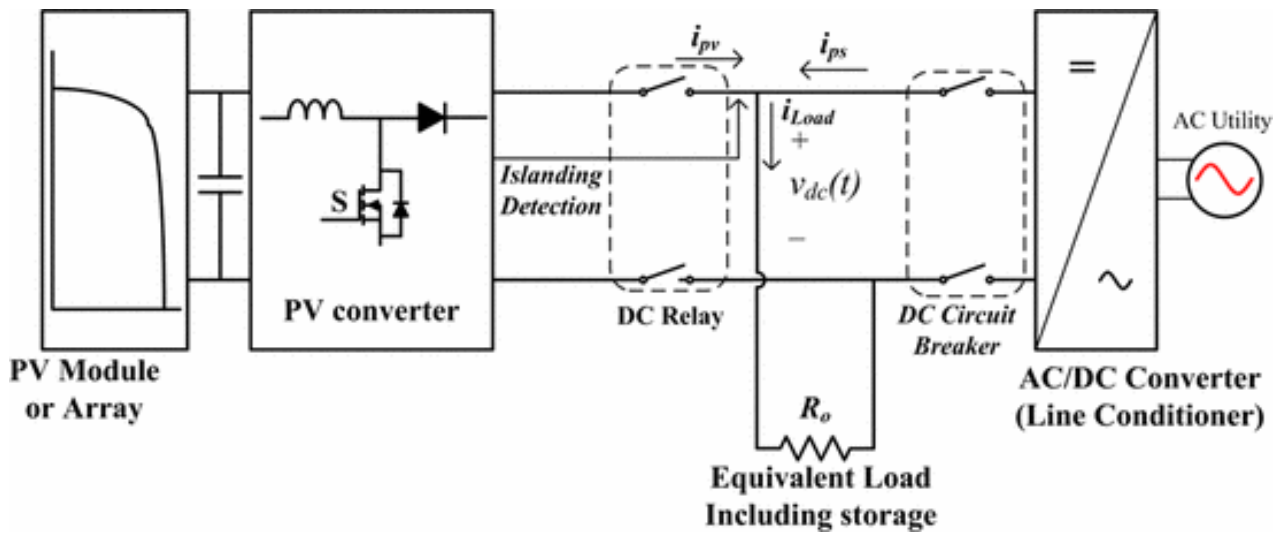
Για να αξιοποιηθούν πλήρως τα πλεονεκτήματα των DC συστημάτων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα θέματα αξιοπιστίας και ασφάλειας. Μεταξύ αυτών είναι η ανίχνευση της νησιδοποίησης, που εγγυάται την ασφάλεια του προσωπικού συντήρησης και την προστασία του εξοπλισμού. Όπως είδαμε και στα προηγούμενα, στα AC Μικροδίκτυα χρησιμοποιούμε την τάση, τη συχνότητα, το αρμονικό περιεχόμενο καθώς και τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου για να ανιχνεύσουμε τη νησιδοποίηση. Επιπροσθέτως, οι περισσότερες AC μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης είχαν ως μετρούμενο μέγεθος τη συχνότητα. Ωστόσο, στα DC συστήματα διανομής, μόνο το πλάτος της τάσης στο ΣΚΣ μπορεί να παρακολουθείται για την ανίχνευση της νησιδοποίησης. Αυτό περιορίζει τον αριθμό των μεθόδων κι έτσι η αντιμετώπιση του φαινομένου είναι πιο δύσκολη σε σχέση με τα AC Μικροδίκτυα.

Παρακάτω παρατίθενται οι βασικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης στα DC συστήματα διανομής.

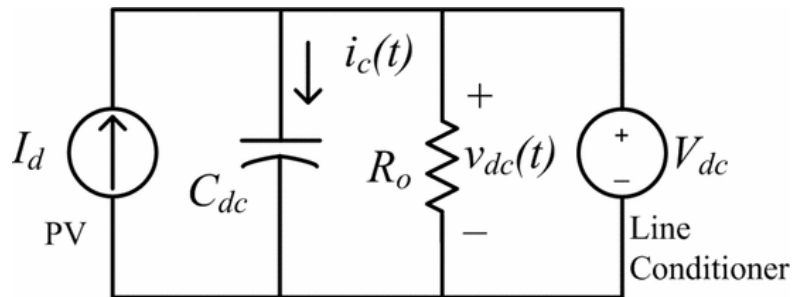
### I. Αλγόριθμος ανίχνευσης DC νησιδοποίησης που χρησιμοποιεί την τεχνική διαταραχής ρεύματος για Φ/B αντιστροφείς σε DC διανομή

Για τη μελέτη της νησιδοποίησης το σύστημα μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα απλοποιημένο διάγραμμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.22, όπου ένας Φ/B αντιστροφέας, ένας AC/DC αντιστροφέας κι η ισοδύναμη αντίσταση, η οποία αντιπροσωπεύει τα φορτία και τη φόρτιση-εκφόρτιση των συσκευών αποθήκευσης, συνδέονται στο DC ζυγό. Θεωρούμε ότι οι DC διακόπτες κι οι DC ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται για ασφάλεια και για λειτουργία νησίδας. Όταν η διαφορά μεταξύ της παραγωγής ισχύος του Φ/B και της κατανάλωσης των φορτίων είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να οδηγήσει την τάση του DC ζυγού στα ανώτερα ή στα κατώτερα όρια της κανονικής λειτουργίας, η κατάσταση νησιδοποίησης μπορεί να ανιχνευτεί εύκολα. Όμως, με βάση το πρότυπο IEEE std. 929-2000, η χειρότερη περίπτωση είναι όταν αυτή η διαφορά είναι κοντά στο μηδέν, όπου η τάση παραμένει εντός ορίων ακόμα κι όταν το σύστημα νησιδοποιηθεί. Μια μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης πρέπει να ανιχνεύει το φαινόμενο υπό οποιοσδήποτε συνθήκες. Γι αυτό το λόγο χρειάζεται μια ενεργητική τεχνική για να εγγυηθεί την προστασία του συστήματος.

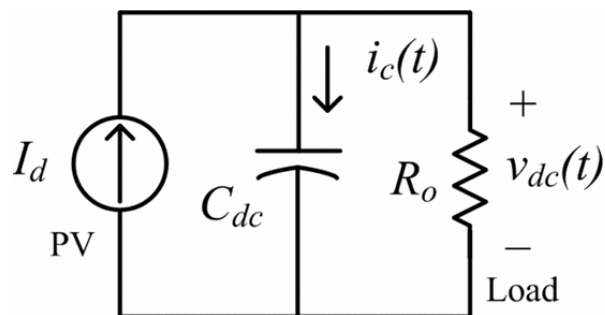
Για να μοντελοποιηθεί η κατάσταση νησιδοποίησης, στα Σχ. 2.23 και Σχ. 2.24 φαίνονται τα ισοδύναμα κυκλώματα για κανονική και νησιδοποιημένη λειτουργία αντίστοιχα. Ο Φ/B αντιστροφέας μοντελοποιείται ως μια πηγή ρεύματος με χωρητικότητα εξόδου  $C_{dc}$ . Το φορτίο κι η φόρτιση-εκφόρτιση των συσκευών αποθήκευσης μοντελοποιούνται ως μια ισοδύναμη αντίσταση  $R_0$  και ο AC/DC αντιστροφέας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια σταθερή πηγή τάσης σε κανονική λειτουργία.



Σχ. 2.22 Απλοποιημένο διάγραμμα DC συστήματος διανομής



Σχ. 2.23 Ισοδύναμο κύκλωμα κανονικής λειτουργίας



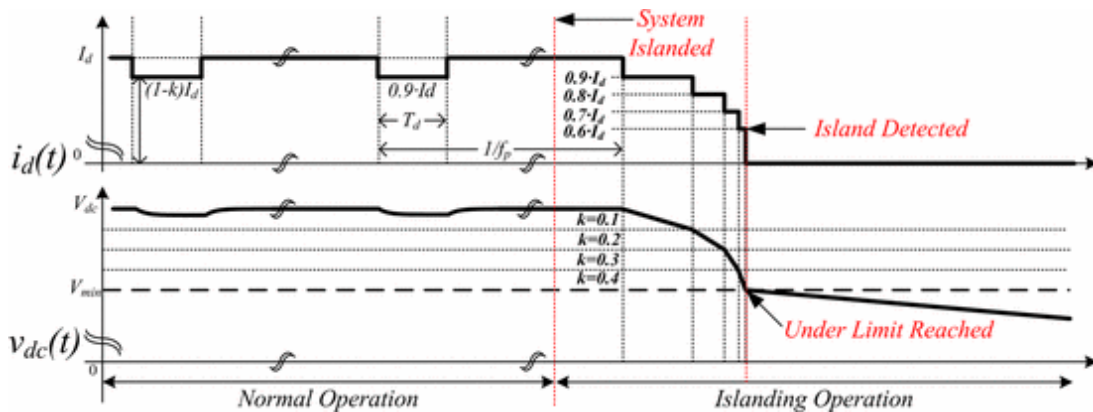
Σχ. 2.24 Ισοδύναμο κύκλωμα κατάστασης νησιδοποίησης

Η προτινόμενη μέθοδος βασίζεται στην τεχνική διαταραχής και παρατήρησης. Δημιουργώντας μια ανισορροπία ρεύματος για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε μια προκαθορισμένη συχνότητα και παρατηρώντας την απόκριση, η κατάσταση νησιδοποίησης μπορεί να ανιχνευθεί μέσα στον απαιτούμενο χρόνο. Με τον AC/DC αντιστροφέα σε λειτουργία που σημαίνει ότι το σύστημα λειτουργεί κανονικά, η τάση του DC ζυγού δεν αλλάζει λόγω της στιβαρής ρύθμισης, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.23. Όμως, σε κατάσταση νησιδοποίησης, η τάση θα επηρεαστεί από τη διαταραχή του ρεύματος λόγω της απουσίας του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.24.

Στο Σχ. 2.25 φαίνεται η λειτουργία της προτινόμενης μεθόδου. Στο Σχ. 2.25, η κατάσταση λειτουργίας αλλάζει από κανονική σε νησιδοποιημένη. Μόνο μια μικρή διακύμανση στην DC τάση θα πρέπει να εμφανίζεται σε κανονική λειτουργία, λόγω της ύπαρξης του δικτύου. Όμως, η τάση θα πρέπει να επηρεάζεται άμεσα από την διαταραχή όταν το σύστημα νησιδοποιηθεί. Αν οι διακυμάνσεις της τάσης, που προκαλούνται απ' την εγχυόμενη διαταραχή ρεύματος ξεπερνούν

την επιτρεπόμενη τιμή, ο αλγόριθμος αυξάνει το συντελεστή διαταραχής,  $k$ . Η κλίση της πτώσης τάσης επιτυγχάνεται λόγω περαιτέρω διαταραχής και η κατάσταση νησιδοποίησης ανιχνεύεται από τους ηλεκτρονόμους ΟΥΒ.

Η απόδοση του αλγορίθμου εξαρτάται από το συντελεστή διαταραχής  $k$ , τη συχνότητα διαταραχής  $f_p$  και την περίοδο διαταραχής  $T_d$ . Καθώς οι αρχικές τιμές των  $k$ ,  $f_p$  και  $T_d$  αυξάνονται, η απόκριση της ανίχνευσης βελτιώνεται. Ωστόσο, η υπερβολική διαταραχή θα επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της MPPT λόγω της αυξημένης λειτουργία εκτός της MPPT. Ως εκ τούτου, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων θα πρέπει να επιλέγονται κατά το σχεδιασμό έτσι ώστε να υπάρχει ισορροπία μεταξύ της αποτελεσματικότητας της MPPT σε κανονική λειτουργία και της απόκρισης ανίχνευσης νησιδοποίησης.



Σχ. 2.25 Αρχή λειτουργίας της προτινόμενης μεθόδου

Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα στο Σχ. 2.24, μπορεί να γίνει μαθηματική ανάλυση της μεθόδου. Κατά τη νησιδοποίηση, η παράγωγος της DC τάσης εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{dv_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \left( (1-k)I_d - \frac{1}{R_0}v_{dc}(t) \right),$$

όπου  $v_{dc}(t)$  είναι η DC τάση του ζυγού,

$C_{dc}$  είναι η χωρητικότητα εξόδου του αντιστροφέα,

$I_d$  είναι το μέσο ρεύμα από τον αντιστροφέα στη χωρητικότητα εξόδου και

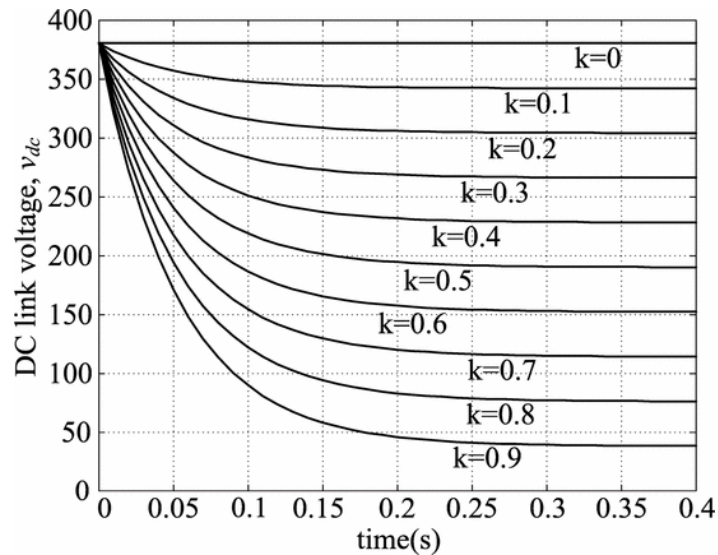
$R_0$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση του φορτίου.

Η λύση της διαφορικής δίνει:

$$v_{dc}(t) = (1-k)I_d R_0 + [(V_{dc} - R_0(1-k)I_d) e^{-\frac{1}{(R_0 C_{dc})t}}],$$

όπου  $V_{dc}$  είναι η τιμή της τάσης ακριβώς πριν τη νησιδοποίηση.

Με βάση την παραπάνω εξίσωση, οι καμπύλες της τάσης συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές του  $k$  φαίνονται στο Σχ. 2.26. Καθώς το  $k$  αυξάνεται, μειώνεται ο χρόνος ανίχνευσης. Όμως, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ένα μεγάλο  $k$  σημαίνει μεγάλη διαταραχή στην είσοδο του Φ/Β, η οποία είναι στενά συνδεδεμένη με την MPPT. Ένα μεγάλο  $k$  επηρεάζει την αποδοτικότητα του MPPT, προκαλώντας μεγάλες διακυμάνσεις στην τάση και στο ρεύμα λειτουργίας, οι οποίες οδηγούν σε χαμηλής απόδοσης MPPT.

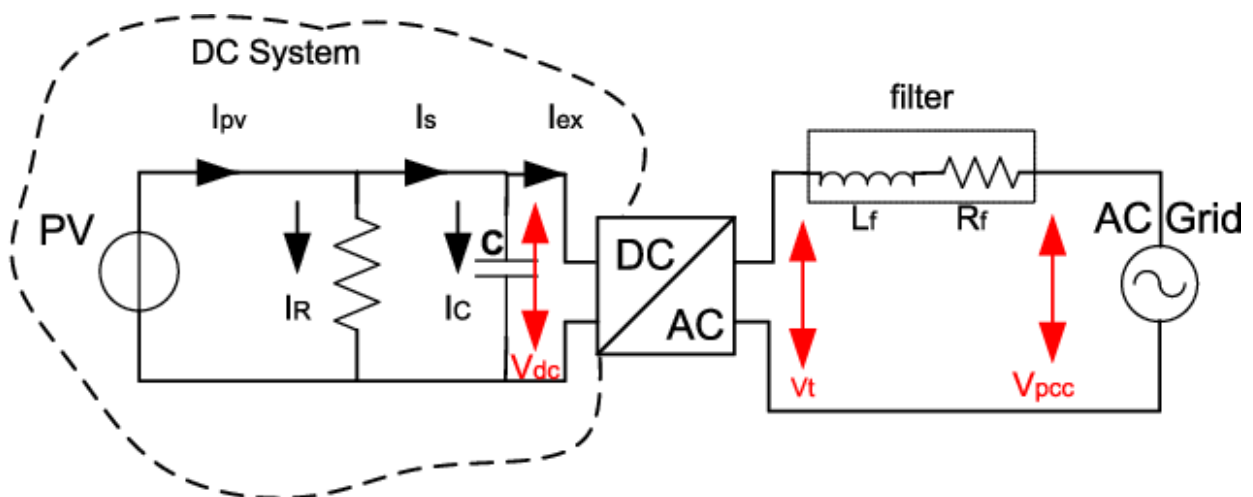


Σχ. 2.26 Καμπύλες τάσης για διαφορετικές τιμές του  $k$

Για την επιλογή της συχνότητας διαταραχής λαμβάνονται υπόψιν η απόκριση ανίχνευσης κι η αποδοτικότητα της MPPT. Η περίοδος διαταραχής,  $T_d$ , θα πρέπει να προσδιορίζεται με βάση την κατάσταση της DC τάσης του ζυγού, όπως η κυμάτωση της DC τάσης κι οι δυναμικές τάσης σε κανονική λειτουργία, τα οποία συνδέονται με χαρακτηριστικά μικρού σήματος της γραμμής [24], [25].

## II. Μέθοδος βασισμένη στην επιρροή των μεταβολών τάσης και συχνότητας από την AC πλευρά στην τάση της DC πλευράς

Η προτινόμενη μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης δεν αφορά αποκλειστικά Φ/Β αντιστροφείς, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε ΜΔΠ. Βασίζεται στην επιρροή των μεταβολών της τάσης και της συχνότητας από την AC πλευρά στην DC πλευρά, και συγκεκριμένα στην DC τάση μέσω του ελέγχου των DC/DC μετατροπέων. Στο Σχ. 2.27 φαίνεται το σύστημα υπό μελέτη.



Σχ. 2.27 Σύστημα υπό μελέτη



Η παραπάνω μέθοδος επιτυγχάνεται θέτοντας το ρυθμιστή της DC τάσης αναφοράς συναρτήσει των μεταβολών της τάσης και της συχνότητας. Για να γίνει αυτό εφικτό στην πραγματικότητα πρέπει να εγκατασταθούν συστήματα επικοινωνίας. Η DC τάση ακολουθεί την DC τάση αναφοράς, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα και όταν ξεπεράσει τα όρια ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι ΟΥΒ.

Η νέα DC τάση αναφοράς δίνεται από τη σχέση:

$$V_{dcref} = V_{dcref, stdy} + \alpha \Delta V_{pcc} + \beta \Delta f.$$

Αυτή η σχέση εγγυάται ότι οι μεταβολές στη συχνότητα και στην AC τάση (rms) θα επηρεάσουν την DC τάση ακόμα και αν η AC τάση κι η συχνότητα δεν μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Για αυτό το λόγο, οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  επηρεάζουν τις τιμές των  $\Delta V_{pcc}$  και  $\Delta f$  αντίστοιχα, με τέτοιο τρόπο ώστε να οδηγήσουν την DC τάση εκτός ορίων της ΟΥΒ. Οι τιμές των συντελεστών  $\alpha$  και  $\beta$  δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha = \frac{10\% V_{dcref}}{0.15 V_{pcc}} \text{ και } \beta = \frac{10\% V_{dcref}}{0.04 f_{nom}}.$$

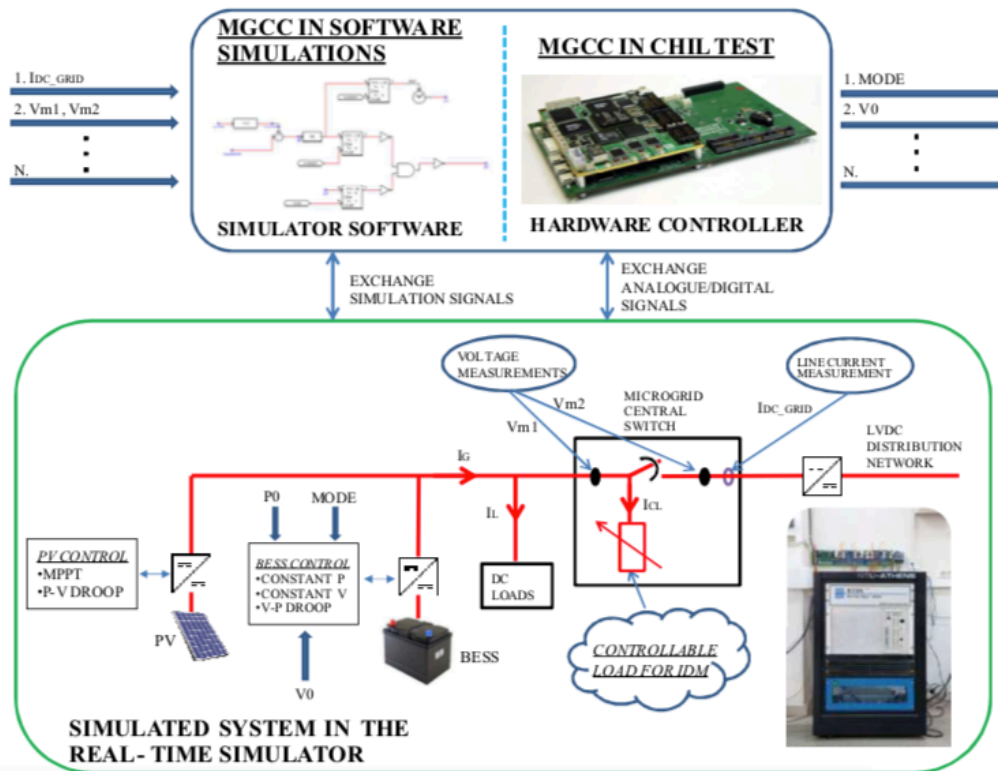
Οι παραπάνω συντελεστές υποδηλώνουν ότι μια απόκλιση 15% της ονομαστικής  $V_{pcc}$  ή 4% απόκλιση απ' την  $f_{nom}$ , προκαλεί μεταβολή της τάσης αναφοράς κατά 10%.

Η μέθοδος αυτή έχει μικρή MAZ, η οποία εξαρτάται απ' τις διαταραχές  $\Delta V_{pcc}$  και  $\Delta f$ . Τέλος, η μέθοδος είναι εξίσου αποτελεσματική και σε λειτουργία πολλαπλών αντιστροφών συνδεδεμένων στο ίδιο ΣΚΣ [26].

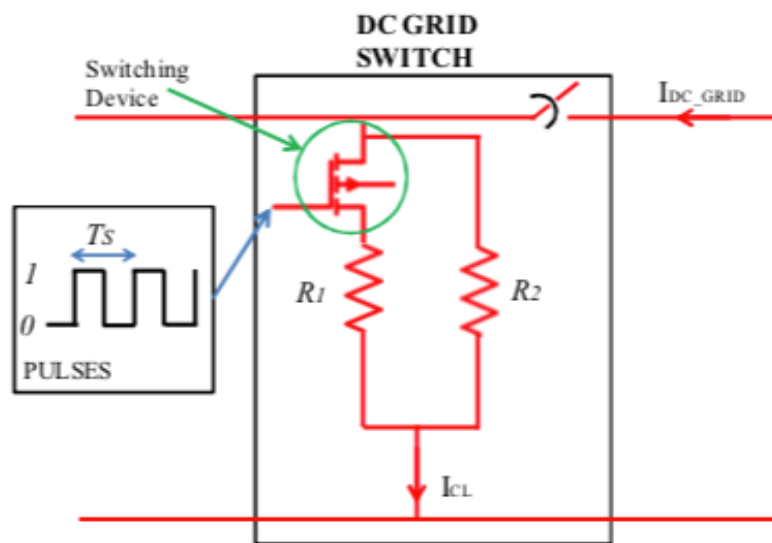
### III. Μέθοδος εισαγωγής ελεγχόμενου φορτίου

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εισαγωγή ενός ελεγχόμενου φορτίου, παράλληλα με τον κεντρικό διακόπτη του DC Μικροδικτύου, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.28. Γενικά, οποιαδήποτε αναντιστοιχία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας σε ένα διασυνδεδεμένο Μικροδίκτυο καλύπτεται από το ανάντη δίκτυο. Ως εκ τούτου, η νησιδοποίηση ενός DC Μικροδικτύου μπορεί να ανιχνευτεί εύκολα μετρώντας απλά την ανταλλαγή ρεύματος μεταξύ του Μικροδικτύου και του υπόλοιπου δικτύου (το ρεύμα θα πέσει στο μηδέν). Όμως, στην περίπτωση που η παραγωγή είναι πολύ κοντά στην κατανάλωση, το ρεύμα που περνά από τον κεντρικό διακόπτη του DC Μικροδικτύου είναι σχεδόν μηδενικό κι η νησιδοποίηση είναι δύσκολο να ανιχνευτεί.

Αυτό το πρόβλημα επιλύεται με την εισαγωγή ενός ελεγχόμενου φορτίου που αλλάζει περιοδικά την ισορροπία ρεύματος μέσα στο DC Μικροδίκτυο. Το ελεγχόμενο φορτίο θα μπορούσε να είναι κάτι απλό, όπως δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα, οι οποίες αλλάζουν σύμφωνα μ' ένα διακοπτικό μοτίβο, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.29, ή θα μπορούσε να είναι κάτι πιο πολύπλοκο, όπως ένα πλήρως προγραμματίσιμο ηλεκτρικό φορτίο. Η πρώτη μέθοδος είναι πιο φθηνή και πιο εύκολα εφαρμόσιμη.



Σχ. 2.28 Τοπολογία του DC Μικροδικτύου



Σχ. 2.29 Τοπολογία του κεντρικού διακόπτη σε συνδυασμό με το ελεγχόμενο φορτίο

Οι σχέσεις που δίνει το DC Μικροδίκτυο χωρίς το ελεγχόμενο φορτίο είναι οι εξής:

- Αν η παραγωγή δεν είναι ίση με την κατανάλωση, τότε

$$I_G \neq I_L \Rightarrow |I_{DC,GRID}| = |I_G - I_L| \neq 0,$$

όπου  $I_G$  είναι το ρεύμα παραγωγής

$I_L$  είναι το ρεύμα του φορτίου και

$I_{DC,GRID}$  είναι το ρεύμα του DC Μικροδικτύου.

Μετρώντας το  $I_{DC,GRID}$  μπορούμε να διαπιστώσουμε τη νησιδοποίηση όταν το  $I_{DC,GRID}$  είναι μηδενικό.

- Αν η παραγωγή είναι ίση με την κατανάλωση, τότε

$$I_G \cong I_L \Rightarrow |I_{DC,GRID}| \cong 0.$$

Μετρώντας το  $I_{DC,GRID}$  δεν είναι δυνατό να ανιχνεύσουμε τη νησιδοποίηση.

Με την εισαγωγή του ελεγχόμενου φορτίου παράλληλα με τον κεντρικό διακόπτη του DC Μικροδικτύου, οι σχέσεις που εξάγονται είναι οι εξής:

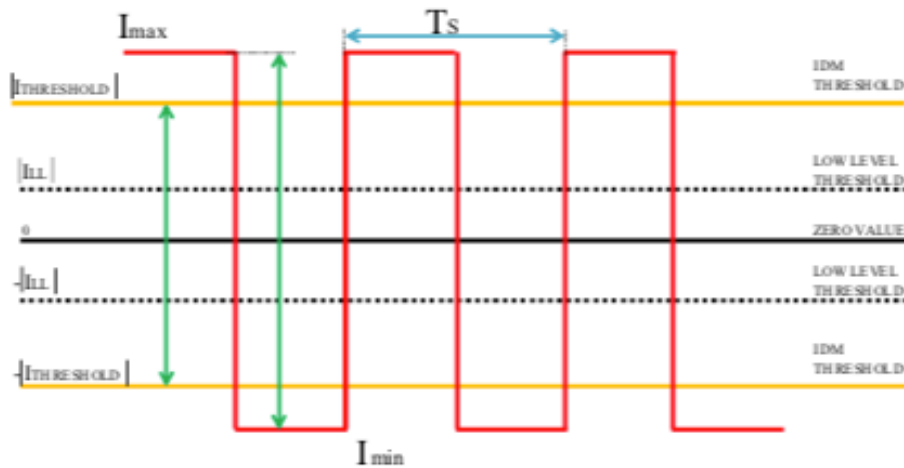
- Αν η παραγωγή είναι ίση με την κατανάλωση, τότε

$$I_G \cong I_L \Rightarrow |I_{DC,GRID}| \cong |I_{CL}| \neq 0,$$

όπου  $I_{CL}$  είναι το ρεύμα του ελεγχόμενου φορτίου.

Όταν το  $I_{DC,GRID}$  παραμένει κάτω από ένα όριο (πολύ κοντά στο μηδέν) για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (τυπικά  $0.2s$ ), τότε υπάρχει νησιδοποίηση κι ο κεντρικός διακόπτης του DC Μικροδικτύου ανοίγει. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά αυτού του μοτίβου (μορφή, διάρκεια, τιμές των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ , κτλ) επηρεάζουν την ευαισθησία και την ακρίβεια της μεθόδου, όπως και τις συνολικές απώλειες του συστήματος.

Οι παράμετροι του ελεγχόμενου φορτίου εξαρτώνται απ' τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού μέτρησης ρεύματος, όπως η ακρίβεια σε χαμηλές τιμές του σήματος εισόδου, το εύρος ζώνης, κλπ. Η αποτελεσματική επιλογή των  $R_1$  και  $R_2$  εξηγείται με βάση το Σχ. 2.30 και την παρακάτω ανάλυση.



Σχ. 2.30 Ανάλυση σχεδιασμού για την επιλογή του ελεγχόμενου φορτίου

- $I_{LL}$  είναι η χαμηλότερη τιμή του ρεύματος, την οποία ο εξοπλισμός μέτρησης ρεύματος μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια.
- $I_{THRESHOLD}$  είναι το όριο της μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης. Είναι πάντα μεγαλύτερο από το  $I_{LL}$ . Αν το  $I_{DC,GRID}$  είναι μικρότερο από αυτή την τιμή για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τότε η μέθοδος ανιχνεύει τη νησιδοποίηση.
- $I_{min}$  είναι το ρεύμα που διαρέει την αντίσταση  $R_2$  όταν η διακοπτική συσκευή είναι OFF.

- $I_{max}$  είναι το ρεύμα που διαρέει τη συνολική αντίσταση ( $R_1 \parallel R_2$ ) όταν η διακοπτική συσκευή είναι ON.
- $T_s$  είναι η περίοδος μεταβολής των αντιστάσεων.

Για να είναι επιτυχής η ανίχνευση της νησιδοποίησης πρέπει η ελάχιστη διαφορά μεταξύ  $I_{max}$  και  $I_{min}$  να είναι μεγαλύτερη από δύο φορές το  $I_{THRESHOLD}$ . Με άλλα λόγια πρέπει η παρακάτω συνθήκη να είναι TRUE:

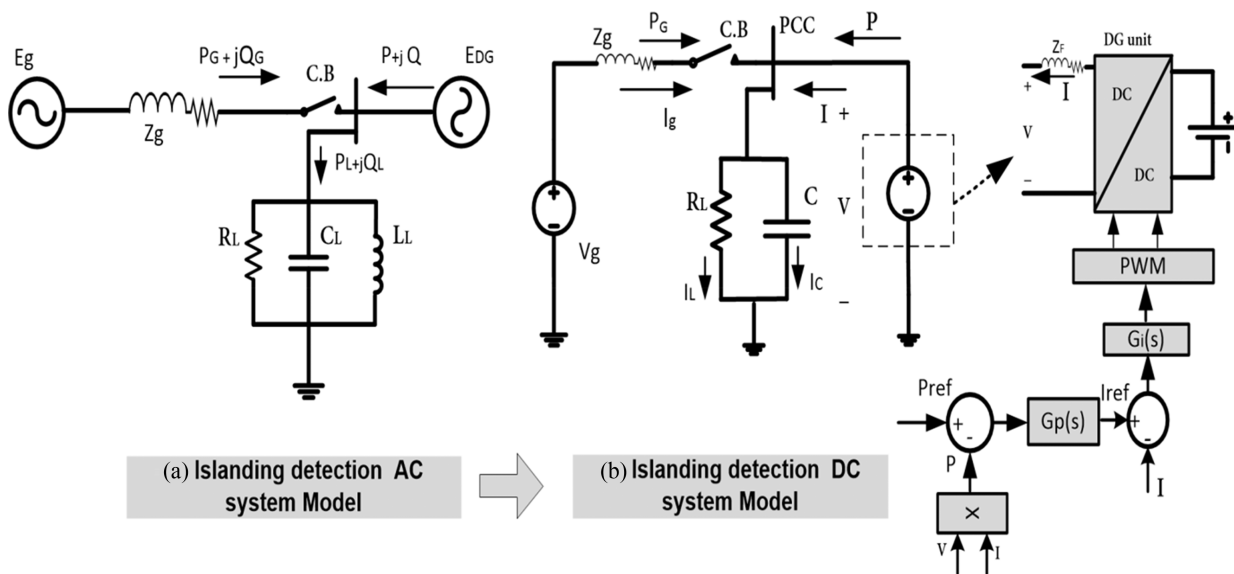
$$|I_{max} - I_{min}| > 2|I_{THRESHOLD}| \Rightarrow \left| \frac{V_{DC,LOW}}{R_1 \parallel R_2} - \frac{V_{DC,LOW}}{R_2} \right| > 2|I_{THRESHOLD}|,$$

όπου  $V_{DC,LOW}$  είναι η ελάχιστη τάση λειτουργίας του DC δικτύου.

Από την παραπάνω εξίσωση βλέπουμε ότι η ελάχιστη διαφορά μεταξύ  $I_{min}$  και  $I_{max}$  πρέπει να υπολογιστεί στην  $V_{DC,LOW}$ . Από την ανισότητα εξάγουμε μια σχέση μεταξύ  $R_1$  και  $R_2$ . Η περίοδος  $T_s$  κατά την οποία αλλάζει το ελεγχόμενο φορτίο εξαρτάται από την επιθυμητή απόκριση της μεθόδου. Όσο μικρότερο είναι το  $T_s$  τόσο πιο γρήγορη είναι η ανίχνευση της νησιδοποίησης (τυπικά  $T_s = 0.05s$ ). Το ρεύμα μπορεί να μετρηθεί από ένα μετατροπέα ρεύματος (πχ. μια συσκευή LEM) με υψηλό εύρος ζώνης. Για παράδειγμα, ένα τυπικό probe ρεύματος με εύρος ζώνης  $50kHz$  μπορεί να μετρήσει τις μεταβολές του ρεύματος που εισάγονται από το ελεγχόμενο φορτίο [27].

#### IV. Μέθοδος βασισμένη στη Θετική Ανάδραση του Συστήματος Ελέγχου του Αντιστροφέα

Αυτή η μέθοδος εξερευνεί την επίδοση και την ευστάθεια της ενεργητικής τεχνικής ανίχνευσης νησιδοποίησης θετικής ανάδρασης στα DC συστήματα διανομής. Τέσσερις διαφορετικές μέθοδοι εφαρμογής της τεχνικής αντινησιδοποίησης με θετική ανάδραση μελετώνται και αναλύονται. Η πιο σημαντική πρόκληση της μεθόδου είναι η επιλογή ενός κέρδους, το οποίο θα καθορίζει την αστάθεια του συστήματος όταν απουσιάζει το δίκτυο και την ευστάθεια του συστήματος όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο. Γι αυτό το λόγο, για κάθε μέθοδο, το εύρος των παραμέτρων ελέγχου που εγγυόνται την ευστάθεια του συστήματος αποκτάται αναλυτικά.



Σχ. 2.31 AC και DC σύστημα ανίχνευσης νησιδοποίησης

Στο Σχ. 2.31 φαίνεται το γραμμικό διάγραμμα μια διασυνδεδεμένης στο AC δίκτυο ΜΔΠ. Το κλασικό μοντέλο αποτελείται από μια ΜΔΠ, η οποία μοντελοποιείται ως μια πηγή τάσης η οποία παράγει φαινόμενη ισχύ  $P_{DG} + jQ_{DG}$  και το φορτίο  $R - L - C$  συνδεδεμένο στο ζυγό της ΜΔΠ καταναλώνοντας ισχύ  $P_L + jQ_L$ . Η ΜΔΠ και το φορτίο με τη σειρά τους συνδέονται στο AC δίκτυο μέσω μια γραμμής μεταφοράς με σύνθετη αντίσταση  $Z_g$  το οποίο καταναλώνει ή παράγει την αναντιστοιχία ισχύος μεταξύ της ΜΔΠ και του φορτίου,  $P_G + jQ_G$ . Χρησιμοποιώντας μια παρόμοια αναλογία, το προτινόμενο DC δίκτυο για την ανίχνευση της νησιδοποίησης φαίνεται στο Σχ. 2.29. Το AC δίκτυο καθώς κι ο αντιστροφέας AC/DC μοντελοποιούνται ως μια σταθερή πηγή τάσης. Η γραμμή μεταφοράς έχει μια σύνθετη αντίσταση  $Z_g = R_g + j\omega L_g$ . Το φορτίο είναι μια αντίσταση  $R_L$ . Η ΜΔΠ μοντελοποιείται ως μια DC πηγή τάσης συνδεδεμένη σ' ένα DC/DC αντιστροφέα στο ΣΚΣ. Σε κανονική λειτουργία, οι ΜΔΠ συνήθως λειτουργούν παρέχοντας σταθερή ισχύ στο δίκτυο, ενώ η λειτουργία ρύθμισης της τάσης εκτελείται από την πλευρά του δικτύου. Η ΜΔΠ ελέγχεται ώστε να εντοπίζει μια ισχύ αναφοράς,  $P^*$ , και να την εγχύει στο δίκτυο. Δύο ελεγκτές  $PI$  ( $G_p(s)$  και  $G_i(s)$ ) χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν την ισχύ της ΜΔΠ μέσω δύο βρόχων ελέγχου. Ο ελεγκτής του εξωτερικού βρόχου  $G_p(s)$  είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση της εγχυόμενης ισχύος από τη ΜΔΠ και ο ελεγκτής του εσωτερικού βρόχου  $G_i(s)$  είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση του ρεύματος. Επειδή οι ΜΔΠ αλληλεπιδρούν με το DC σύστημα μέσω AC/DC ή DC/DC αντιστροφέων, η επίδραση των πυκνωτών εξόδου των αντιστροφέων αντικαθιστούνται στο ισοδύναμο μοντέλο με μια ισοδύναμη χωρητικότητα  $C_F$ .

Ο βρόχος ισχύος του συστήματος προκαλεί μη γραμμικότητα και γι αυτό το λόγο αναπτύσσεται ένα γραμμικό μοντέλο μικρού σήματος. Σε αυτό το μοντέλο, η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του εσωτερικού βρόχου παριστάνεται με ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με χρονική σταθερά  $\tau$ , όπου  $1/\tau$  είναι το εύρος ζώνης του εσωτερικού βρόχου, το οποίο επιλέγεται να είναι το 15% της διακοπτικής συχνότητας του αντιστροφέα. Η χειρότερη περίπτωση για την ανίχνευση της νησιδοποίησης είναι όταν η ισχύς που παράγεται από τη ΜΔΠ είναι ίση με την ισχύ που καταναλώνεται από το φορτίο. Σε αυτή την περίπτωση το δίκτυο δεν παρέχει ισχύ ( $P_G = 0$ ). Γι αυτό το λόγο, το μοντέλο του Σχ. 2.29 γραμμικοποιείται γύρω από ένα σταθερό σημείο λειτουργίας ( $V_0, I_0, I_{g0}$ ), το οποίο ικανοποιεί την προηγούμενη συνθήκη [30]. Το γραμμικοποιημένο μοντέλο δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\tilde{I}_{ref} = G_p(s)(\tilde{P}_{ref} - \tilde{P}) \quad (1)$$

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{I}_{ref}}{\tau s + 1} \quad (2)$$

$$\tilde{P} = I_0 \tilde{V} + V_0 \tilde{I} \quad (3)$$

$$\tilde{I} + \tilde{I}_g = \tilde{I}_C + \tilde{I}_L \quad (4)$$

$$\tilde{I}_L = \frac{\tilde{V}}{R_L}, \tilde{I}_C = \tilde{V} s C \quad (5)$$

$$0 = \tilde{V} + \tilde{I}_g (R_g + s L_g) \quad (6)$$

Οι παράμετροι του DC δικτύου διανομής δίνονται παρακάτω:

$V$  - Ονομαστική τάση ΜΔΠ, 500V

$P$  - Ονομαστική ισχύς ΜΔΠ, 100kW

$V_g$  - Ονομαστική τάση DC δικτύου διανομής, 500V

$R_g$  - Αντίσταση γραμμής μεταφοράς, 0.22Ω/km

$L_g$  - Επαγωγή γραμμής μεταφοράς,  $0.3mH/km$

$l$  - Μήκος γραμμής μεταφοράς,  $1km$

$R_L$  - Αντίσταση φορτίου,  $2.5\Omega$

$R_F$  - Αντίσταση φίλτρου ΜΔΠ,  $5m\Omega$

$L_F$  - Επαγωγή φίλτρου ΜΔΠ,  $1.0mH$

$K_p$  - 0.75

$K_I$  -  $1.2 * 10^{-5}$

$C$  - Ισοδύναμη χωρητικότητα,  $2000\mu F$

$\omega$  - κυκλική συχνότητα,  $2\pi rad/s$

$\sim$  - Διαταραχή μικρού σήματος.

Άλλες παράμετροι του δικτύου είναι οι εξής:

Νεκρός χρόνος αντιστροφής -  $10\mu s$

Εύρος ζώνης βρόχου ρεύματος -  $1.20kHz$

Εύρος ζώνης βρόχου ισχύος -  $70Hz$

Εύρος ζώνης βρόχου τάσης -  $180Hz$ .

Οι ενεργητικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης εισήλθαν στα AC συστήματα με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν τη MAZ ακόμα και όταν υπάρχει τέλεια αντιστοιχία ισχύος μεταξύ του φορτίου και της ΜΔΠ. Η πρωταρχική μέθοδος στις ενεργητικές μεθόδους είναι να εκμεταλευτούμε την έννοια της θετικής ανάδρασης με σκοπό να δημιουργήσουμε συνθήκες αστάθειας σε περίπτωση νησιδοποίησης. Στα AC συστήματα, η μέθοδος θετικής ανάδρασης εφαρμόστηκε στα σήματα τάσης και συχνότητας, εισάγοντας μια διαταραχή, ανάλογα με την απόκλιση της τάσης ή της συχνότητας απ' την ονομαστική της τιμή, στην εντολή αναφοράς του ελεγκτή της ΜΔΠ.

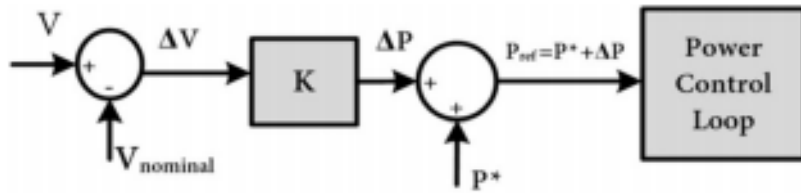
Στα DC συστήματα, η έννοια της θετικής ανάδρασης μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στο σήμα της τάσης. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, προτείνονται δύο μέθοδοι βασισμένοι στη θετική ανάδραση της τάσης, όπου η διαταραχή της τάσης στο ΣΚΣ περνά μέσα από ένα κέρδος είτε στον εξωτερικό βρόχο (βρόχο ισχύος), είτε στον εσωτερικό βρόχο (βρόχο ρεύματος) του ελεγκτή της ΜΔΠ [29], [31], [32].

## A. Μέθοδος διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ισχύος

Η βασική ιδέα αυτής της μεθόδου είναι να εισάγουμε μια διαταραχή ισχύος ( $\Delta P$ ) στον εξωτερικό βρόχο του ελεγκτή της ΜΔΠ. Αυτή η διαταραχή είναι ανάλογη με τη διαταραχή της τάσης στο ΣΚΣ ( $\Delta V$ ). Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, οι οποίοι αναλύονται παρακάτω.

### 1. Μέθοδος βασισμένη στην τάση αναφοράς

Το block διάγραμμα της πρώτης μεθόδου φαίνεται στο Σχ. 2.32, όπου η απόκλιση της τάσης από την ονομαστική τάση ( $\Delta V$ ) περνά μέσα από ένα κέρδος ανάδρασης ( $K$ ), παράγοντας ένα σήμα διαταραχής ισχύος ( $\Delta P$ ), το οποίο προστίθεται στην ισχύ αναφοράς του ελεγκτή της ΜΔΠ. Σε κατάσταση νησιδοποίησης η διαταραχή  $\Delta P$  πρέπει να οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια ανιχνεύοντας το φαινόμενο. Όμως, το κέρδος ανάδρασης  $K$ , πρέπει να επιλεγθεί προσεκτικά, αλλιώς η διαταραχή αυτή δε θα επαρκεί για να προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα.



Σχ. 2.32 Block διάγραμμα πρώτης μεθόδου

• Υπολογισμός  $K_{min}$  με βάση το μοντέλο μικρού σήματος

Για να υπολογίσουμε το ελάχιστο κέρδος για ανίχνευση νησιδοποίησης, το νησιδοποιημένο δίκτυο αποτελούμενο απ' τη ΜΔΠ και το φορτίο πρέπει να βρεθούν σε συνθήκες αστάθειας. Για κάθε μέθοδο ανίχνευσης νησιδοποίησης, εξάγονται οι δυναμικές του συστήματος μικρού σήματος. Ύστερα εφαρμόζεται το κριτήριο Routh-Hurwitz για να βρεθούν η ελάχιστη κι η μέγιστη τιμή του κέρδους που ωθούν το σύστημα σε οριακή ευστάθεια για κάθε μέθοδο.

Για το νησιδοποιημένο δίκτυο, το ρεύμα δικτύου  $\tilde{I}_g$  είναι μηδενικό και η τάση αναφοράς που εισέρχεται στο βρόχο ισχύος είναι ίση με το σήμα διαταραχής ( $\Delta P$ ) και μαθηματικά δίνεται από τη σχέση

$$\tilde{P}_{ref} = K \tilde{V} \quad (7)$$

Επειδή ο βρόχος ισχύος είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να έχει πιο αργές δυναμικές απ' το βρόχο ρεύματος, η εξίσωση (2) απλοποιείται και γίνεται

$$\tilde{I} \cong \tilde{I}_{ref} \quad (8)$$

Λύνοντας τις εξισώσεις (4) και (8) βρίσκουμε ότι:

$$I = I_L + I_C.$$

Αντικαθιστώντας τα  $I_L, I_G$  με την εξίσωση (5), τότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$I = \frac{V}{R_L} + VsC.$$

Τέλος, αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση, καθώς και τις εξισώσεις (2), (7) και (8) στην (1), έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{V}{R_L} + VsC &= (K_p + \frac{K_I}{s})(KV - I_0V - V_0(\frac{V}{R_L} + VsC)) \Rightarrow \\ \frac{1}{R_L} + sC &= (K_p + \frac{K_I}{s})(K - I_0 - \frac{V_0}{R_L} - V_0sC) \Rightarrow \\ \frac{1}{R_L} + sC &= K_pK - K_pI_0 - \frac{K_pV_0}{R_L} - sCV_0K_p + \frac{K_IK}{s} - \frac{K_I I_0}{s} - \frac{K_I V_0}{sR_L} - K_I V_0 C \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\frac{s}{R_L} + s^2 C = s K_P K - s K_P \frac{V_0}{R_L} - \frac{s K_P V_0}{R_L} - s^2 C V_0 K_P + K_I K - K_I \frac{V_0}{R_L} - \frac{K_I V_0}{R_L} - s K_I V_0 C.$$

Άρα, με βάση τις εξισώσεις που προέκυψαν από το μοντέλο μικρού σήματος, καταλήγουμε στη χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος σε κατάσταση ημισιδοποίησης:

$$(C + C V_0 K_P) s^2 + \left( \frac{1}{R_L} + C V_0 K_I + \frac{2 V_0 K_P}{R_L} - K K_P \right) s + \left( \frac{2 V_0 K_I}{R_L} - K K_I \right) = 0.$$

Για να υπολογίσουμε το ελάχιστο κέρδος, έτσι ώστε το σύστημα να περνά από ευστάθεια σε αστάθεια, θα εφαρμόσουμε το κριτήριο ευστάθειας Routh-Hurwitz.

$s^2$	$C + C V_0 K_P$	$\frac{2 V_0 K_I}{R_L} - K K_I$	
$s^1$	$\frac{1}{R_L} + C V_0 K_I + \frac{2 V_0 K_P}{R_L} - K K_P$	$0$	
$s^0$	$\frac{2 V_0 K_I}{R_L} - K K_I$	$0$	

Για να έχω ευστάθεια, σύμφωνα με το κριτήριο Routh-Hurwitz, πρέπει να μην υπάρχουν εναλλαγές προσήμου στην 1η στήλη. Ο όρος  $C + C V_0 K_P$  είναι πάντα θετικός, άρα πρέπει:

$$\frac{1}{R_L} + C V_0 K_I + \frac{2 V_0 K_P}{R_L} - K K_P > 0 \text{ και}$$

$$\frac{2 V_0 K_I}{R_L} - K K_I > 0.$$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι για  $K < \frac{2 V_0}{R_L}$  το σύστημα είναι ευσταθές. Άρα η ελάχιστη τιμή του κέρδους, για την οποία το σύστημα περνά από ευστάθεια σε αστάθεια είναι:

$$K_{min} = 400 W/V.$$

Η κύρια πρόκληση στο σχεδιασμό της μεθόδου αυτής, είναι η επιλογή ενός κέρδους, το οποίο πηγαίνει το σύστημα μας σε αστάθεια, όταν αυτό ημισιδοποιηθεί, αλλά ταυτόχρονα διασφαλίζει την ευστάθεια του συστήματος, όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο. Γι αυτό το λόγο είναι αναγκαίο να υπολογιστεί και το μέγιστο κέρδος το οποίο κάνει το σύστημά μας ασταθές υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

#### • Υπολογισμός $K_{max}$ με βάση το μοντέλο μικρού σήματος

Το μέγιστο κέρδος για ευσταθή λειτουργία της ΜΔΠ μπορεί να υπολογιστεί λύνοντας τις σχέσεις (1), (3), (4), (5), (6), (7) και (8), οι οποίες μας δίνουν τη χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας:

$$\alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0 = 0$$

όπου



$$\alpha_3 = L_g(C + CV_0K_P),$$

$$\alpha_2 = \frac{L_g}{R_L} + R_gC + L_gCV_0K_I + \frac{2V_0L_gK_P}{R_L} + V_0K_P R_gC - K_P L_g K,$$

$$\alpha_1 = 1 + \frac{R_g}{R_L} + V_0K_P + R_gCV_0K_I + \frac{2V_0R_gK_P}{R_L} + \frac{2V_0L_gK_I}{R_L} - K(R_gK_P + L_gK_I) \text{ και}$$

$$\alpha_0 = V_0K_I + \frac{2V_0R_gK_I}{R_L} - K_I R_g K.$$

Άρα η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος είναι:

$$(3.7725 * 10^{-6})s^3 + (0.0049045 - 2.25 * 10^{-8}K)s^2 + (8.4379 - 0.0014K)s + (2756.25 - 1.0313K) = 0$$

Από τη χαρακτηριστική εξίσωση προκύπτει και ο πίνακας Ruth-Hurwitz:

$s^3$	$3.7725 * 10^{-6}$	$8.4379 - 0.0014K$
$s^2$	$0.0049045 - 2.25 * 10^{-8}K$	$2756.25 - 1.0313K$
$s^1$	$\frac{0.00315 * 10^{-8}K^2 - 10.9467 * 10^{-6}K + 0.51782}{0.0049045 - 2.25 * 10^{-8}K}$	0
$s^0$	$2756.25 - 1.0313K$	0

Όπως παρατηρούμε από την 1η στήλη του πίνακα Routh-Hurwitz, ο όρος  $3.7725 * 10^{-6}$  είναι θετικός. Για να έχουμε ευστάθεια πρέπει να μην υπάρχει εναλλαγή προσήμου στην 1η στήλη, δηλαδή κι οι υπόλοιποι όροι να είναι θετικοί. Οπότε

$$0.0049045 - 2.25 * 10^{-8}K > 0 \Rightarrow K_1 < 217980W/V$$

$$\frac{0.00315 * 10^{-8}K^2 - 10.9467 * 10^{-6}K + 0.51782}{0.0049045 - 2.25 * 10^{-8}K} > 0 \Rightarrow K_2 < 291031.294W/V, K_3 < 56484W/V$$

$$2756.25 - 1.0313K > 0 \Rightarrow K_4 < 2672.6W/V$$

Με βάση τις παραπάνω συνθήκες, καταλήγουμε ότι το μέγιστο κέρδος, για το οποίο το σύστημα σε κανονική λειτουργία είναι ευσταθές είναι:

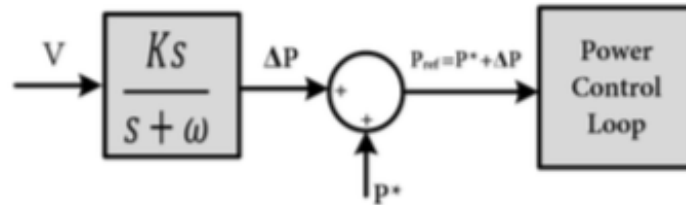
$$K_{max} = 2672.6W/V$$

Άρα, λαμβάνοντας υπόψιν τους θεωρητικούς υπολογισμούς που έγιναν παραπάνω, οι τιμές που μπορεί να πάρει το κέρδος  $K$  είναι:

$$400W/V < K < 2672.6W/V.$$

## 2. Μέθοδος βασισμένη σε υπεραυτό φίλτρο

Το block διάγραμμα της συγκεκριμένης μεθόδου φαίνεται στο Σχ. 2.33. Η διαταραχή της τάσης,  $\Delta V$ , αποκτάται περνώντας τη μετρούμενη τάση μέσα από ένα φίλτρο washout, το οποίο είναι ένα υπεραυτό φίλτρο που εξαλείφει το DC περιεχόμενο και κρατάει μόνο τα μεταβατικά περιεχόμενα, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο υπό συνθήκες νησιδοποίησης.



Σχ. 2.33 Block διάγραμμα δεύτερης μεθόδου

### • Υπολογισμός $K_{min}$ με βάση το μοντέλο μικρού σήματος

Υπό συνθήκες νησιδοποίησης, η αλλαγή στην ισχύ αναφοράς τροποποιείται ως εξής:

$$\tilde{P}_{ref} = \frac{Ks}{s + \omega} \tilde{V} \quad (9)$$

Λύνοντας τις εξισώσεις (1), (3), (4), (5), (8) και (9), η χαρακτηριστική εξίσωση δίνεται από τη σχέση:

$$(C + CV_0K_P)s^3 + (\omega C + \frac{1}{R_L} + CV_0K_I + \omega K_P V_0 C + \frac{2V_0K_P}{R_L} - KK_P)s^2 + (\frac{\omega}{R_L} + \omega K_I V_0 C + \frac{2V_0K_I}{R_L} + \frac{2\omega V_0K_P}{R_L} - KK_I)s + (\frac{2\omega V_0K_I}{R_L}) = 0$$

$$\Rightarrow (2.012 * 10^{-3})s^3 + (1.167384 - 1.2 * 10^{-5}K)s^2 + (307.252144 - 0.75K)s + 1884 = 0$$

Εφαρμογή κριτηρίου Routh-Hurwitz:

$s^3$	2.012 * 10 <sup>-3</sup>	307.252144 - 0.75K
$s^2$	1.167384 - 1.2 * 10 <sup>-5</sup> K	1884
$s^1$	$\frac{0.9 * 10^{-5}K^2 - 0.879225K + 354.89}{1.167384 - 1.2 * 10^{-5}K}$	0
$s^0$	1884	0

Όπως παρατηρούμε από την 1η στήλη του πίνακα Routh-Hurwitz, ο πρώτος κι ο τέταρτος όρος είναι θετικοί. Για να μην έχουμε εναλλαγή προσήμου στην 1η στήλη πρέπει να είναι θετικοί κι ο δεύτερος και τρίτος όρος της πρώτης στήλης. Άρα, πρέπει

$$1.167384 - 1.2 * 10^{-5}K > 0 \Rightarrow K_1 < 97282W/V$$

$$\frac{0.9 * 10^{-5} K^2 - 0.879225K + 354.89}{1.167384 - 1.2 * 10^{-5} K} > 0 \Rightarrow K_2 < 97286.35W/V, K_3 < 405.32W/V$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι, το ελάχιστο κέρδος για να περάσει το νησιδοποιημένο σύστημα από ευστάθεια σε αστάθεια είναι:

$$K_{min} = 405.32W/V.$$

• Υπολογισμός  $K_{max}$  με βάση το μοντέλο μικρού σήματος

Για τον υπολογισμό του κέρδους, για το οποίο το σύστημα, υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας, πηγαίνει από ευστάθεια σε αστάθεια, πρέπει να έχουμε τη χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος, η οποία δίνεται λύνοντας τις σχέσεις (1), (3), (4), (5), (6), (8) και (9):

$$0.603 * 10^{-6} s^4 + (792.87 * 10^{-6} - 0.36 * 10^{-8} K) s^3 + (1355.011 * 10^{-3} - 0.227 * 10^{-3} K) s^2 + (449.47 - 0.165K) s + 2769.5 = 0$$

Καταstrώνουμε τον πίνακα Routh-Hurwitz:

$s^4$	$0.603 * 10^{-6}$	$1355.011 * 10^{-3} - 0.227 * 10^{-3} K$	$2769.5$
$s^3$	$792.87 * 10^{-6} - 0.36 * 10^{-8} K$	$449.47 - 0.165K$	$0$
$s^2$	$\frac{8.195 * 10^{-13} K^2 - 8.5773 * 10^{-8} K + 8.0304 * 10^{-4}}{792.87 * 10^{-6} - 0.36 * 10^{-8} K}$	$2769.5$	$0$
$s^1$	$\frac{-1.3522 * 10^{-13} K^3 + 1.4521 * 10^{-8} K^2 - 1.7104 * 10^{-4} K + 0.3592}{8.195 * 10^{-13} K^2 - 8.5773 * 10^{-8} K + 8.0304 * 10^{-4}}$	$0$	$0$
$s^0$	$2769.5$	$0$	$0$

Οπότε, εφόσον το πρώτο και το τελευταίο στοιχείο της πρώτης στήλης του πίνακα, δηλαδή  $0.603 * 10^{-6}$  και  $2769.5$ , είναι θετικοί αριθμοί, για να μην έχουμε εναλλαγή προσήμου στην πρώτη στήλη, πρέπει και τα υπόλοιπα στοιχεία της να είναι θετικά. Άρα, πρέπει:

$$792.87 * 10^{-6} - 0.36 * 10^{-8} K > 0 \Rightarrow K_1 < 220240W/V$$

$$\frac{8.195 * 10^{-13} K^2 - 8.5773 * 10^{-8} K + 8.0304 * 10^{-4}}{792.87 * 10^{-6} - 0.36 * 10^{-8} K} > 0 \Rightarrow K_2 < 94270W/V, K_3 < 10395W/V$$

$$\frac{-1.3522 * 10^{-13} K^3 + 1.4521 * 10^{-8} K^2 - 1.7104 * 10^{-4} K + 0.3592}{8.195 * 10^{-13} K^2 - 8.5773 * 10^{-8} K + 8.0304 * 10^{-4}} \Rightarrow K_4 < 94269W/V, K_5 < 10413W/V, K_6 < 2706.3W/V$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι το κέρδος, για το οποίο το σύστημα, υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας, περνά από ευστάθεια σε αστάθεια και άρα το η μέγιστη τιμή που μπορούμε να επιλέξουμε για να εφαρμοστή σωστά η μέθοδος αυτή, είναι:

$$K_{max} = 2706.3W/V.$$

Οπότε με βάση την παραπάνω μελέτη, οι τιμές που μπορεί να πάρει το κέρδος για σωστή λειτουργία της μεθόδου είναι:

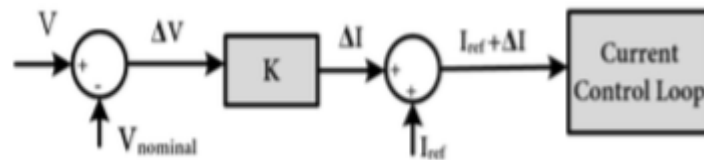
$$405.32W/V < K < 2706.3W/V.$$

## B. Μέθοδος διαταραχής του βρόχου ρεύματος

Αυτή η μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης εισάγει μια διαταραχή ρεύματος ( $\Delta I$ ) στον εσωτερικό βρόχο ελέγχου του ελεγκτή της ΜΔΠ. Αυτή η διαταραχή είναι ευθέως ανάλογη με τη μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ ( $\Delta V$ ). Όπως έγινε και στη μέθοδο διαταραχής του βρόχου ισχύος, η μέθοδος διαταραχής του βρόχου ρεύματος μπορεί να εφαρμοστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους.

### 3. Μέθοδος βασισμένη στην τάση αναφοράς

Το block διάγραμμα της μεθόδου φαίνεται στο Σχ. 2.34, όπου η διαταραχή εφαρμόζεται στον εσωτερικό βρόχο ελέγχου χρησιμοποιώντας το ρεύμα ως σήμα διαταραχής.



Σχ. 2.34 Block διάγραμμα μεθόδου

#### • Υπολογισμός $K_{min}$ με βάση το μοντέλο μικρού σήματος

Η μεταβολή στην ισχύ αναφοράς,  $\tilde{P}_{ref}$ , τίθεται ίση με το 0. Επομένως, η μεταβολή στο ρεύμα αναφοράς δίνεται από τη σχέση:

$$\tilde{I}_{ref} = (-\tilde{P})(K_p + \frac{K_I}{s}) + K \tilde{V} \quad (10)$$

Λύνοντας τις εξισώσεις (3), (4), (5), (8), (10) η χαρακτηριστική εξίσωση της τάσης  $\tilde{V}$  δίνεται:

$$2.012 * 10^{-3} s^2 + (1.1548 - K)s + 300 = 0$$

Εφαρμογή κριτηρίου Routh-Hurwitz:

$s^2$	$2.012 * 10^{-3}$	$300$
$s^1$	$1.1548 - K$	$0$
$s^0$	$300$	$0$

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα, το πρώτο και το τρίτο στοιχείο της πρώτης στήλης, δηλαδή οι αριθμοί  $2.012 * 10^{-3}$  και  $300$  είναι θετικοί. Επομένως για να μην έχουμε εναλλαγή προσήμου στην πρώτη στήλη πρέπει:

$$1.1548 - K > 0 \Rightarrow K < 1.1548A/V$$

Άρα, το ελάχιστο κέρδος, για το οποίο το σύστημα περνά από ευστάθεια σε αστάθεια, υπό συνθήκες νησιδοποίησης είναι:

$$K_{min} = 1.1548A/V.$$

• Υπολογισμός  $K_{max}$  με βάση το μοντέλο μικρού σήματος

Λύνοντας τις εξισώσεις (1), (3), (4), (5), (6), (8) και (10) προκύπτει η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας:

$$0.60036 * 10^{-6} s^3 + (0.78908 * 10^{-3} - 0,3 * 10^{-3} K) s^2 + (1.350056 - 0.22K) s + 441 = 0$$

Εφαρμογή κριτηρίου Routh-Hurwitz:

$s^3$	$0.60036 * 10^{-6}$	$1.350056 - 0.22K$	0
$s^2$	$0.78908 * 10^{-3} - 0,3 * 10^{-3} K$	441	0
$s^1$	$\frac{6.6 * 10^{-5} K^2 - 5.7861 * 10^{-4} K + 8.0054 * 10^{-4}}{0.78908 * 10^{-3} - 0,3 * 10^{-3} K}$	0	0
$s^0$	441	0	0

Για να είναι ευσταθές το σύστημα πρέπει να μην υπάρχει εναλλαγή προσήμου στην πρώτη στήλη του πίνακα. Οι αριθμοί  $0.60036 * 10^{-6}$  και 441 είναι θετικοί, άρα πρέπει:

$$0.78908 * 10^{-3} - 0,3 * 10^{-3} K > 0 \Rightarrow K_1 < 2.6303A/V$$

$$\frac{6.6 * 10^{-5} K^2 - 5.7861 * 10^{-4} K + 8.0054 * 10^{-4}}{0.78908 * 10^{-3} - 0,3 * 10^{-3} K} > 0 \Rightarrow K_2 < 7.0452A/V, K_3 < 1.717A/V$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το κέρδος, για το οποίο το σύστημα σε κανονική λειτουργία περνά από ευστάθεια σε αστάθεια είναι:

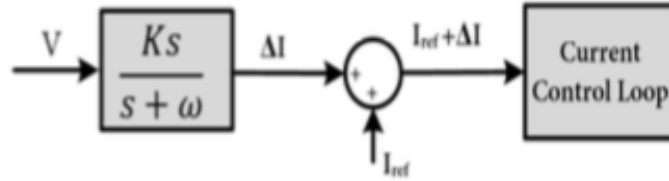
$$K_{max} = 1.717A/V.$$

Τελικά, με βάση τους θεωρητικούς υπολογισμούς που έγιναν παραπάνω και τις τιμές που υπολογίστηκαν για το κέρδος, καταλήγουμε ότι το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει το κέρδος, έτσι ώστε το σύστημα να είναι ευσταθές σε κανονική λειτουργία και ασταθές σε κατάσταση νησιδοποίησης είναι:

$$1.1548A/V < K < 1.717A/V.$$

4. Μέθοδος βασισμένη σε υπεραυτό φίλτρο

Σε αυτήν τη μέθοδο χρησιμοποιείται ένα φίλτρο washout για να αποκτήσουμε τη μεταβολή της τάσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.35, και αυτή η μεταβολή μετατρέπεται σε σήμα διαταραχής ρεύματος, το οποίο εφαρμόζεται στον εσωτερικό βρόχο του ελεγκτή της ΜΔΠ.



Σχ. 2.35 Block διάγραμμα της μεθόδου

**• Υπολογισμός  $K_{min}$  με βάση το μοντέλο μικρού σήματος**

Η μεταβολή στο ρεύμα αναφοράς θα γίνει:

$$\tilde{I}_{ref} = (-\tilde{P})(K_P + \frac{K_I}{s}) + \frac{Ks}{s + \omega} \tilde{V} \quad (11)$$

Λύνοντας τις εξισώσεις (3), (4), (5), (8) και (11), η χαρακτηριστική εξίσωση της τάσης είναι:

$$(C + CV_0K_P)s^3 + (\omega C + \frac{1}{R_L} + CV_0K_I + \omega K_P V_0 C + \frac{2V_0K_P}{R_L} - K)s^2 + (\frac{\omega}{R_L} + \omega K_I V_0 C + \frac{2V_0K_I}{R_L} + \frac{2\omega V_0K_P}{R_L})s + \frac{2\omega V_0K_I}{R_L} = 0$$

$$\Rightarrow 2.012 * 10^{-3}s^3 + (1.16743536 - K)s^2 + 307.252s + 1884 = 0$$

Από τη χαρακτηριστική εξίσωση και εφαρμόζοντας το κριτήριο Routh-Hurwitz θα υπολογίσουμε το ελάχιστο κέρδος για να είναι το σύστημα ευσταθές.

$s^3$	$2.012 * 10^{-3}$	$307.252$	$0$
$s^2$	$1.16743536 - K$	$1884$	$0$
$s^1$	$\frac{354.9062 - 307.252K}{1.16743536 - K}$	$0$	$0$
$s^0$	$1884$	$0$	$0$

Όπως παρατηρούμε απ' την πρώτη στήλη του πίνακα Routh-Hurwitz, οι αριθμοί  $2.012 * 10^{-3}$  και  $1884$  είναι θετικοί, άρα για να μην υπάρχει εναλλαγή προσήμου στα στοιχεία της πρώτης στήλης, πρέπει:

$$1.16743536 - K > 0 \Rightarrow K_1 < 1.16743536A/V$$

$$\frac{354.9062 - 307.252K}{1.16743536 - K} < 0 \Rightarrow K_2 < 1.155A/V$$

Οπότε το ελάχιστο κέρδος για να είναι το σύστημα ασταθές σε κατάσταση νησιδοποίησης είναι:

$$K_{min} = 1.155A/V.$$

• Υπολογισμός  $K_{max}$  με βάση το μοντέλο μικρού σήματος

Όπως έγινε και στις προηγούμενες μεθόδους, πρέπει να υπολογίσουμε το κέρδος, για το οποίο, όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο, το σύστημα πάει από ευστάθεια σε αστάθεια. Λύνοντας τις εξισώσεις (3), (4), (5), (6), (8) και (11) προκύπτει η χαρακτηριστική εξίσωση:

$$6.036 * 10^{-6}s^4 + (7.9287 * 10^{-4} - 0.3 * 10^{-3}K)s^3 + (1.355 - 0.22K)s^2 + 449.445s + 2563.5 = 0$$

Με βάση τη χαρακτηριστική εξίσωση προκύπτει κι ο πίνακας Routh-Hurwitz:

$s^4$	$6.036 * 10^{-6}$	$1.355 - 0.22K$	$2563.5$
$s^3$	$7.9287 * 10^{-4} - 0.3 * 10^{-3}K$	$449.445$	$0$
$s^2$	$\frac{6.6 * 10^{-5}K^2 - 5.8093 * 10^{-4}K + 8.0305 * 10^{-4}}{7.9287 * 10^{-4} - 0.3 * 10^{-3}K}$	$2563.5$	$0$
$s^1$	$\frac{0.0294K^2 - 0.2599K + 0.3593}{6.6 * 10^{-5}K^2 - 5.8093 * 10^{-4}K + 8.0305 * 10^{-4}}$	$0$	$0$
$s^0$	$2563.5$	$0$	$0$

Όπως παρατηρούμε απ' τον πίνακα Routh-Hurwitz, ο πρώτος και ο τελευταίος όρος της πρώτης στήλης είναι θετικοί αριθμοί. Επομένως, για να μη υπάρχει εναλλαγή προσήμου στην πρώτη στήλη πρέπει κι οι υπόλοιποι όροι της να είναι θετικοί. Άρα:

$$7.9287 * 10^{-4} - 0.3 * 10^{-3}K > 0 \Rightarrow K_1 < 2.6429A/V$$

$$\frac{6.6 * 10^{-5}K^2 - 5.8093 * 10^{-4}K + 8.0305 * 10^{-4}}{7.9287 * 10^{-4} - 0.3 * 10^{-3}K} > 0 \Rightarrow K_2 < 7.0845A/V, K_3 < 1.7175A/V$$

$$\frac{0.0294K^2 - 0.2599K + 0.3593}{6.6 * 10^{-5}K^2 - 5.8093 * 10^{-4}K + 8.0305 * 10^{-4}} > 0 \Rightarrow K_4 < 7.1133A/V, K_5 < 1.7162A/V$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ελάχιστο κέρδος, για το οποίο το σύστημα, υπό διασυνδεδεμένη λειτουργία, περνάει από ευσταθή κατάσταση σε ασταθή είναι:

$$K_{max} = 1.7162A/V.$$

Τελικά, το εύρος τιμών που μπορεί να πάρει το κέρδος, έτσι ώστε η μέθοδος να πηγαίνει το σύστημα σε αστάθεια, υπό συνθήκες νησιδοποίησης, ενώ ταυτόχρονα θα εγγυάται την ευσταθή λειτουργία του σε διασυνδεδεμένη κατάσταση, είναι:

$$1.155A/V < K < 1.7162A/V.$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

---

### 3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνουν προσομοιώσεις, με τη βοήθεια του MATLAB/Simulink, της DC μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης βασισμένη στη Θετική Ανάδραση του Συστήματος Ελέγχου του Αντιστροφέα. Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτή η μέθοδος υλοποιείται με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους, είτε εφαρμόζοντας θετική ανάδραση στον εξωτερικό βρόχο (βρόχο ισχύος), είτε στον εσωτερικό βρόχο (βρόχο ρεύματος). Αυτές οι μέθοδοι εξαρτώνται από την τιμή ενός κέρδους, το οποίο σε κατάσταση νησιδοποίησης πηγαίνει το σύστημα σε ασταθή λειτουργία, ενεργοποιώντας τους ηλεκτρονόμους ΟΥΝ, ενώ σε κανονική λειτουργία το σύστημα παραμένει ευσταθές.

Στις προσομοιώσεις παρακάτω, θα παρατηρήσουμε την κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ για διάφορες τιμές του κέρδους, όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο και όταν αυτό αποσυνδέεται. Για να μελετήσουμε την ευστάθεια του συστήματος, κατασκευάζουμε το block διάγραμμα, το οποίο αποτελείται από τα block διαγράμματα των μεθόδων, τον έλεγχο του αντιστροφέα (βρόχος ισχύος και βρόχος ρεύματος) καθώς και τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος, όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση νησιδοποίησης και όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο. Επίσης, οι προσομοιώσεις γίνονται με βάση το μοντέλο μικρού σήματος, οπότε οι είσοδοι μηδενίζονται και παρατηρούμε μόνο τις διαταραχές, οι οποίες μας βοηθούν να μελετήσουμε την ευστάθεια του συστήματος [31], [32].

Τέλος, γίνονται προσομοιώσεις στην κυκλωματική διάταξη του συστήματος και παρατηρείται ο χρόνος που απαιτείται για να ανιχνευθεί η νησιδοποίηση από τη στιγμή που αποσυνδέεται το δίκτυο.

### 3.2 Προσομοιώσεις

#### A. Μέθοδος διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ισχύος

##### 1. Μέθοδος βασισμένη στην τάση αναφοράς

- Μελέτη ευστάθειας συστήματος σε κανονική λειτουργία

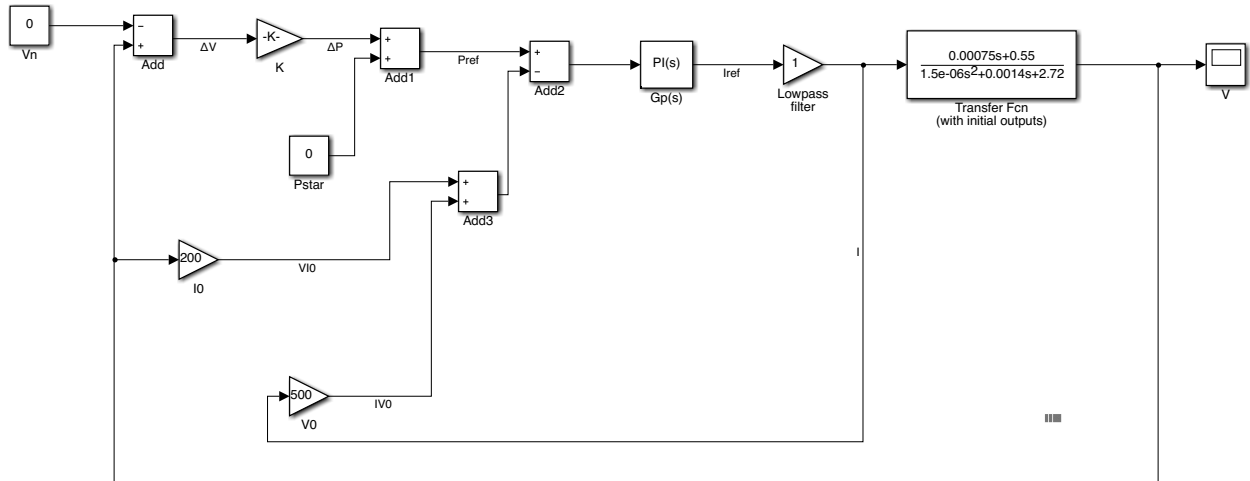
Με βάση του θεωρητικούς υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, το μέγιστο κέρδος για να είναι το σύστημά μας ευσταθές υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας είναι:



$$K_{max} = 2672.6W/V.$$

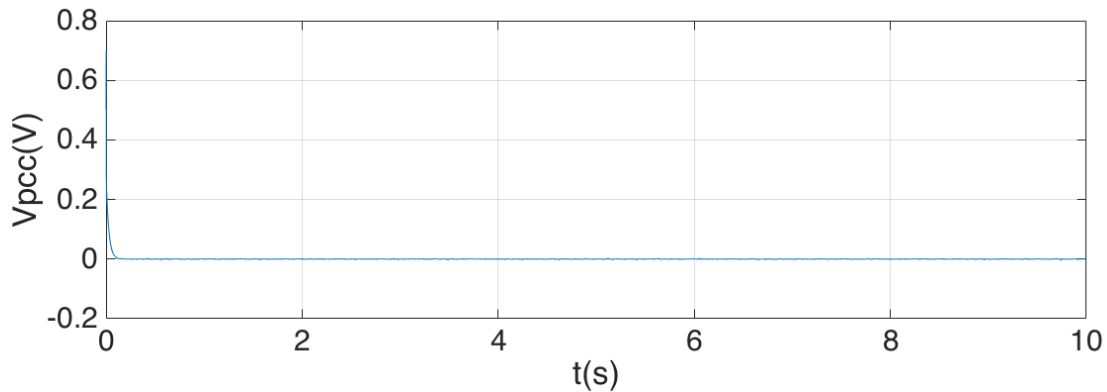
Άρα θα παρατηρήσουμε το σύστημά μας για μια τιμή κέρδους μικρότερη, μία τιμή μεγαλύτερη και μια τιμή ίση με το  $K_{max}$ .

Στο Σχ.3.1 φαίνεται το block διάγραμμα του συστήματος σε κανονική λειτουργία.



Σχ. 3.1 Block διάγραμμα συστήματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας

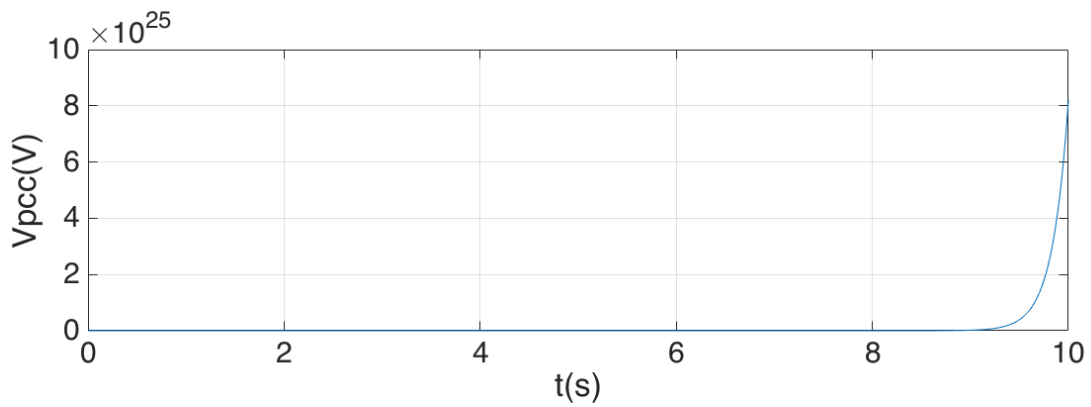
Για τιμή του κέρδους μικρότερη από την οριακή,  $K = 2500W/V$ , η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ φαίνεται στο Σχ.3.2.



Σχ. 3.2 Κυματομορφή τάσης στο ΣΚΣ για κέρδος μικρότερο του  $K_{max}$

Όπως παρατηρούμε στο Σχ.3.2, η τάση ξεκινά από μια αρχική τιμή, που του δίνει το Simulink, και μετά από λίγο πηγαίνει στο 0 για όλο το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης. Όπως έχουμε αναφέρει, η μελέτη ευστάθειας γίνεται με βάση το μοντέλο μικρού σήματος, στο οποίο οι εισδοδι έχουν μηδενιστεί και παρατηρούμε μόνο τη συμπεριφορά των διαταραχών. Συνεπώς, η σταθεροποίηση της κυματομορφής της τάσης στο μηδέν αποδεικνύει την ευστάθεια του συστήματος υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

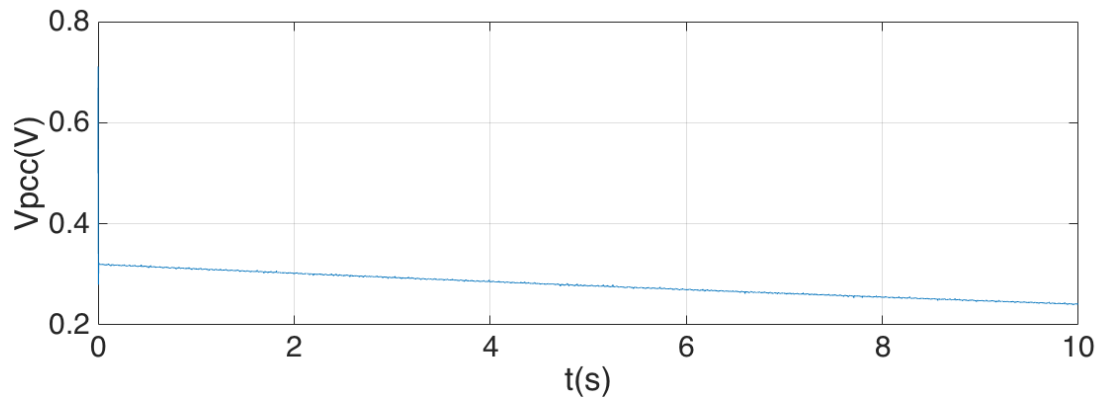
Η κυματομορφή της τάσης για τιμή του κέρδους μεγαλύτερη από τη οριακή,  $K = 2700W/V$ , φαίνεται στο Σχ.3.3.



Σχ.3.3 Κυματομορφή τάσης στο ΣΚΣ για κέρδος μικρότερο του  $K_{max}$

Όπως είναι προφανές από το Σχ.3.3, η τάση πέρνει μια τεράστια τιμή όσο περνά ο χρόνος, πράγμα που σημαίνει ότι το σύστημά μας είναι ασταθές.

Τέλος, για τιμή του κέρδους ίση με την οριακή,  $K = 2672.6W/V$ , παρατηρούμε στο Σχ.3.4 ότι η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Αυτή η συμπεριφορά της τάσης αποδεικνύει την οριακή ευστάθεια του συστήματος.



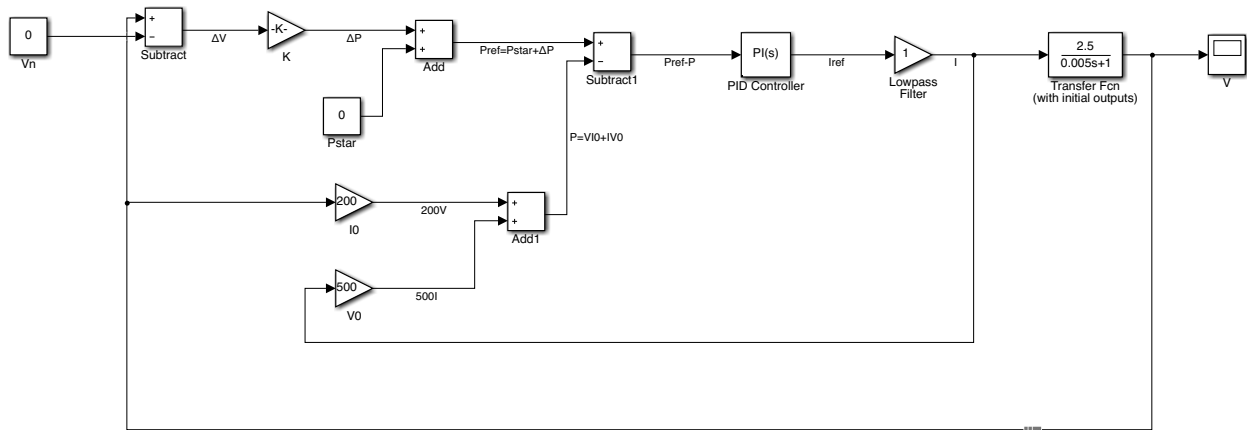
Σχ.3.4 Κυματομορφή τάσης για τιμή κέρδους ίση με το  $K_{max}$

#### • Μελέτη ευστάθειας συστήματος κατά τη νησιδοποίηση

Η ελάχιστη τιμή του κέρδους, έτσι ώστε το σύστημα να περνά από ευστάθεια σε αστάθεια κατά τη νησιδοποίηση, όπως υπολογίστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι:

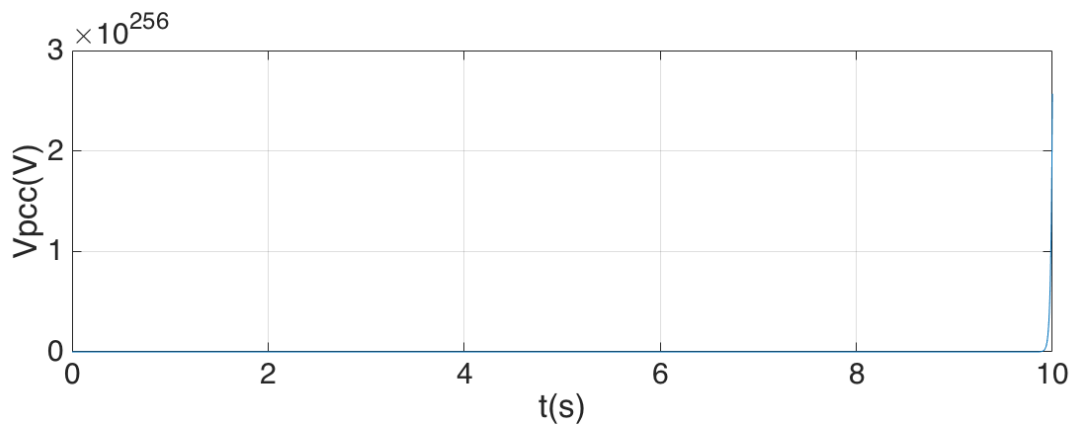
$$K_{min} = 450W/V$$

Με τη βοήθεια του block διαγράμματος του Σχ.3.5 και του MATLAB/Simulink, θα παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά του συστήματος για τιμή του κέρδους μεγαλύτερη, μικρότερη και ίση με την οριακή, παρατηρώντας την κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ.



Σχ.3.5 Block διάγραμμα συστήματος κατά τη νησιδοποίηση

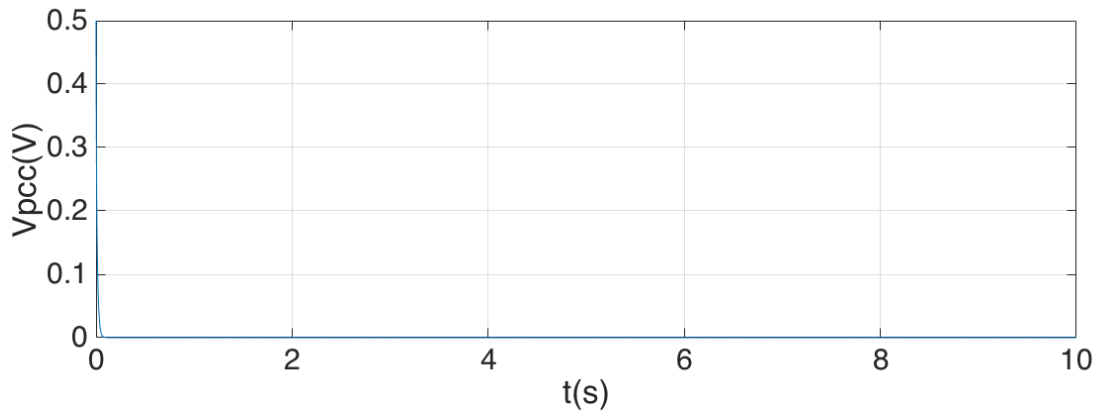
Για τιμή κέρδους μεγαλύτερη από την οριακή,  $K = 500W/V$ , η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ φαίνεται στο Σχ.3.6.



Σχ.3.6 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μεγαλύτερο από το  $K_{min}$

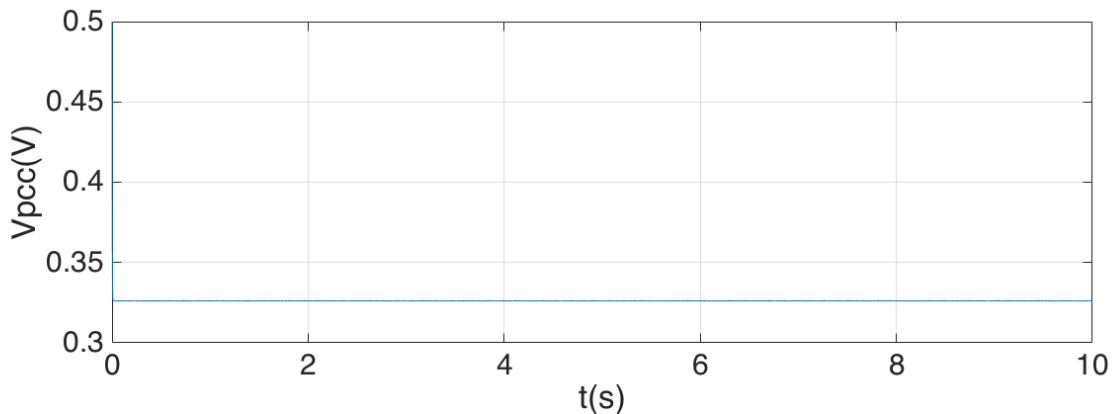
Όπως είναι προφανές από την παραπάνω κυματομορφή, το σύστημα για τιμή κέρδους μεγαλύτερη από την οριακή, είναι ασταθές.

Για τιμή κέρδους μικρότερη από την οριακή,  $K = 300W/V$ , η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ φαίνεται στο Σχ.3.7, όπου παρατηρούμε την ευστάθεια του συστήματος.



Σχ.3.7 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μικρότερο από το  $K_{min}$

Τέλος, παρατηρούμε την οριακή ευστάθεια του συστήματος για τιμή κέρδους ίση με την οριακή,  $K = 400W/V$ , η οποία φαίνεται στο Σχ.3.8.



Σχ.3.8 Κυματομορφή τάσης για τιμή κέρδους ίση με  $K_{min}$

#### • Προσομοίωση μεθόδου στην κυκλωματική διάταξη του συστήματος

Σε αυτή την ενότητα θα παρατηρήσουμε το χρονικό διάστημα που χρειάζεται, από τη στιγμή που εμφανίζεται το φαινόμενο της νησιδοποίησης μέχρι η τιμή της τάσης στο ΣΚΣ να ξεπεράσει τα όρια και να ενεργοποιηθούν οι ηλεκτρονόμοι ΟΥΒ. Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE, τα επιτρεπόμενα όρια της τάσης είναι:

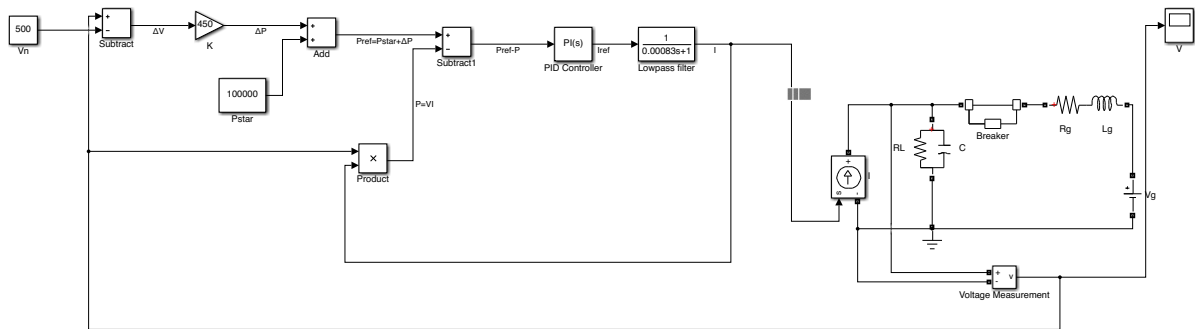
$$0.88pu < V_{pcc} < 1.1pu.$$

Επίσης, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE η νησιδοποίηση θα πρέπει να ανιχνεύεται σε χρόνο:

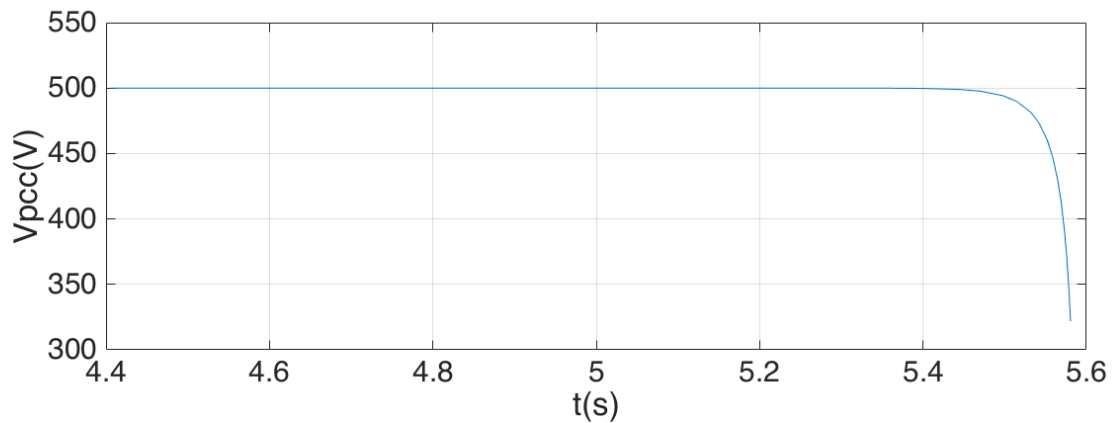
$$t < 2s.$$

Στο Σχ.3.9 φαίνεται το δίκτυο, η γραμμή μεταφοράς, η ΜΔΠ, το φορτίο καθώς και το σύστημα ελέγχου της ΜΔΠ με εφαρμοσμένη τη μέθοδο. Η ΜΔΠ έχει αντικατασταθεί με μια εξαρτημένη πηγή ρεύματος που συνδέεται στο ΣΚΣ με το φορτίο και μέσω ενός ΑΑΔ με το δίκτυο. Η προσομοίωση διαρκεί  $t = 10s$  και θεωρούμε ότι η νησιδοποίηση συμβαίνει τη χρονική στιγμή  $t = 5s$ , όπου και ανοίγει ο ΑΑΔ. Το κέρδος που έχει επιλεχθεί για την προσομοίωση της μεθόδου έχει τιμή  $K = 1.125pu \Rightarrow K = 450W/V$ .

Continuous Ideal Switch  
powergui



Σχ.3.9 Εφαρμογή μεθόδου 1



Σχ.3.10 Κυματομορφή τάσης Μεθόδου 1

Όπως παρατηρούμε από την κυματομορφή της τάσης και με τη βοήθεια του MATLAB/Simulink, η χρονική στιγμή κατά την οποία η τάση στο ΣΚΣ είναι μικρότερη από  $0.88pu$ , δηλαδή  $V < 400V$ , είναι η:

$$t = 5.561s.$$

Οπότε, από τη στιγμή που εμφανίζεται το φαινόμενο της νησιδοποίησης μέχρι η τάση στο ΣΚΣ να βγει εκτός ορίων της ΟΥΒ, η μέθοδος αυτή χρειάζεται:

$$t_d = 561ms.$$

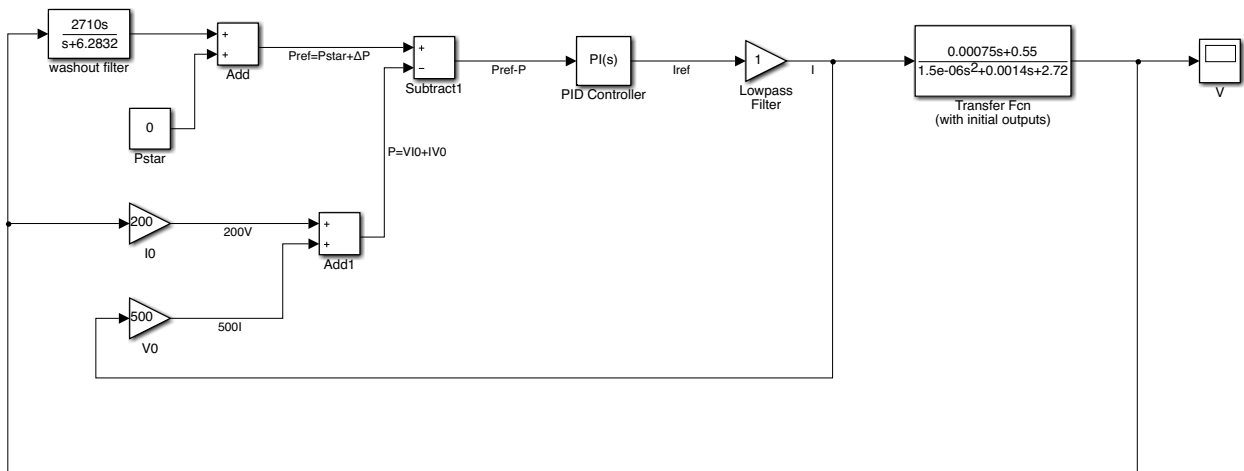
## 2. Μέθοδος βασισμένη σε υπερεπατό φίλτρο

- **Μελέτη ευστάθειας συστήματος σε κανονική λειτουργία**

Το μέγιστο κέρδος για να είναι το σύστημα ευσταθές όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο, σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς που έγιναν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι:

$$K_{max} = 2706.3W/V.$$

Στο Σχ.3.11 φαίνεται το block διάγραμμα του συστήματος με το δίκτυο συνδεδεμένο. Επιλύοντας τις εξισώσεις του δικτύου εξάγουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του, η οποία αντικαθιστά το δίκτυο και μας βοηθά στη μελέτη ευστάθειας του συστήματος υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

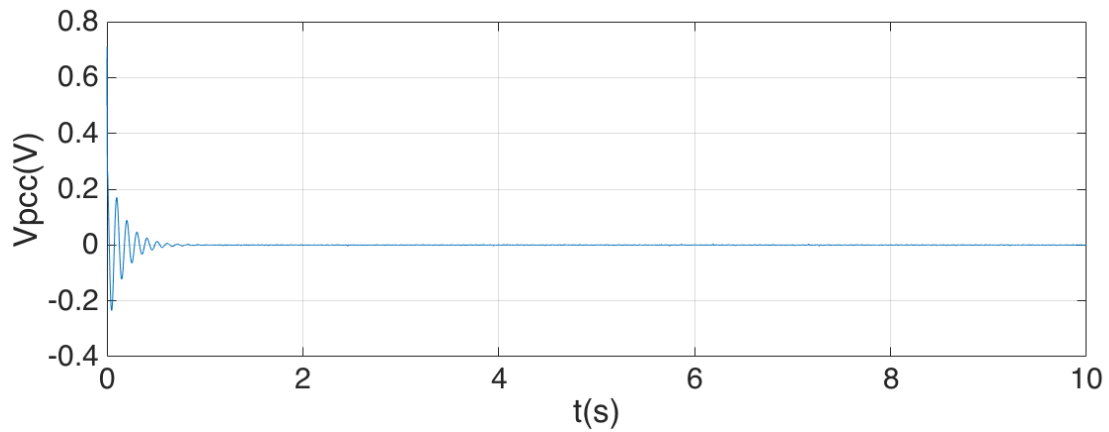


Σχ.3.11 Block διάγραμμα συστήματος υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας

Για να γίνει μελέτη ευστάθειας του συστήματος, θα παρατηρήσουμε την κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ για μικρότερη, μεγαλύτερη και ίση τιμή κέρδους με την οριακή τιμή.

Το σύστημα πρέπει να είναι ευσταθές για τιμή κέρδους μικρότερη της οριακής. Στο Σχ.3.12 φαίνεται η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ για τιμή κέρδους ίση με:

$$K = 2650W/V.$$

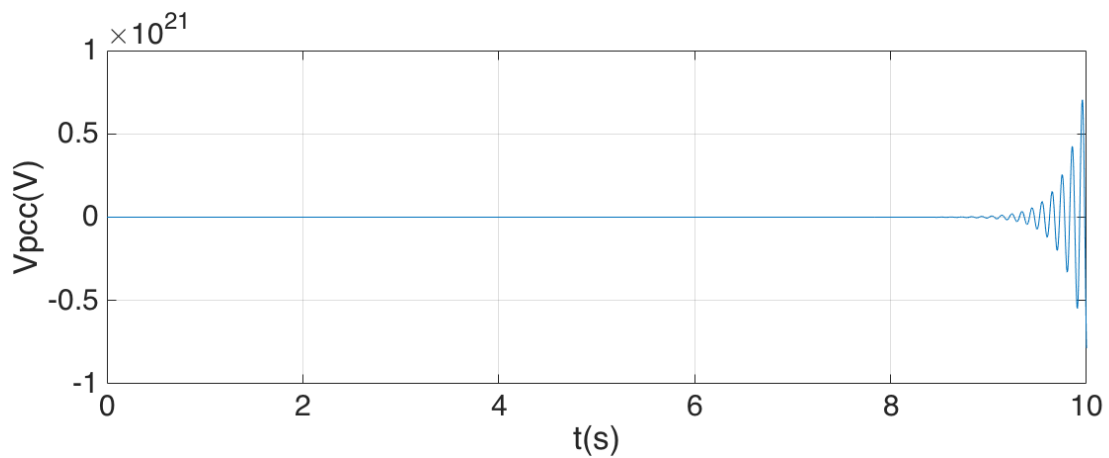


Σχ.3.12 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μικρότερο του  $K_{max}$

Όπως παρατηρούμε από το Σχ.3.12, η κυματομορφή της τάσης ξεκινάει από μια αρχική τιμή που του δίνει το MATLAB/Simulink και σταθεροποιείται στο μηδέν μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα. Αυτή η συμπεριφορά της τάσης υποδηλώνει την ευστάθεια του συστήματος για κέρδος μικρότερο από το οριακό.

Σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς, όταν το κέρδος ξεπεράσει το  $K_{max}$  το σύστημα θα πρέπει να είναι ασταθές. Στο Σχ.3.13 φαίνεται η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ για κέρδος μεγαλύτερο του οριακού και συγκεκριμένα:

$$K = 2750W/V$$

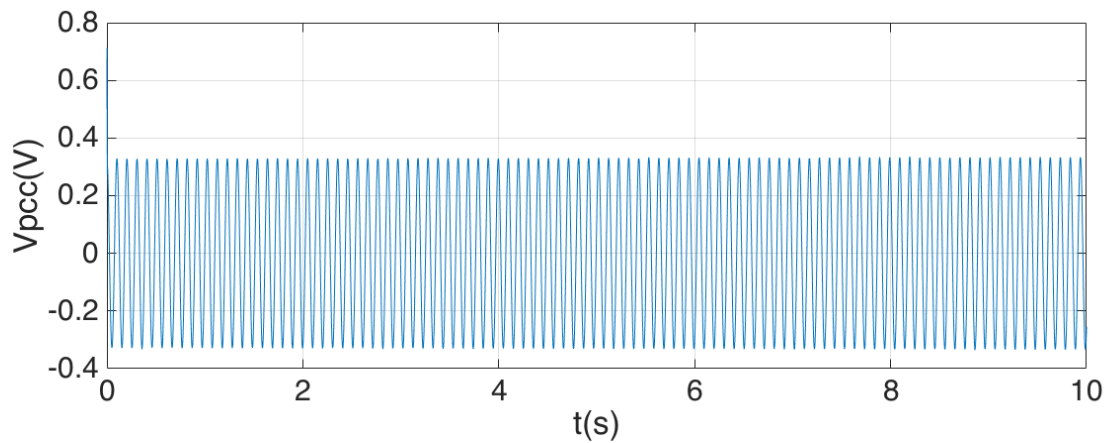


Σχ. 3.13 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μεγαλύτερο του  $K_{max}$

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι η τάση ξεκινάει από το μηδέν και με το πέρασμα του χρόνου ταλαντεύεται προς το άπειρο. Αυτή η συμπεριφορά της τάσης αποδεικνύει την αστάθεια του συστήματος για κέρδος μεγαλύτερο από το  $K_{max}$ .

Τέλος, θα παρατηρήσουμε την κυματομορφή της τάσης για κέρδος ίσο με το οριακό, δηλαδή

$$K = 2706.3W/V.$$

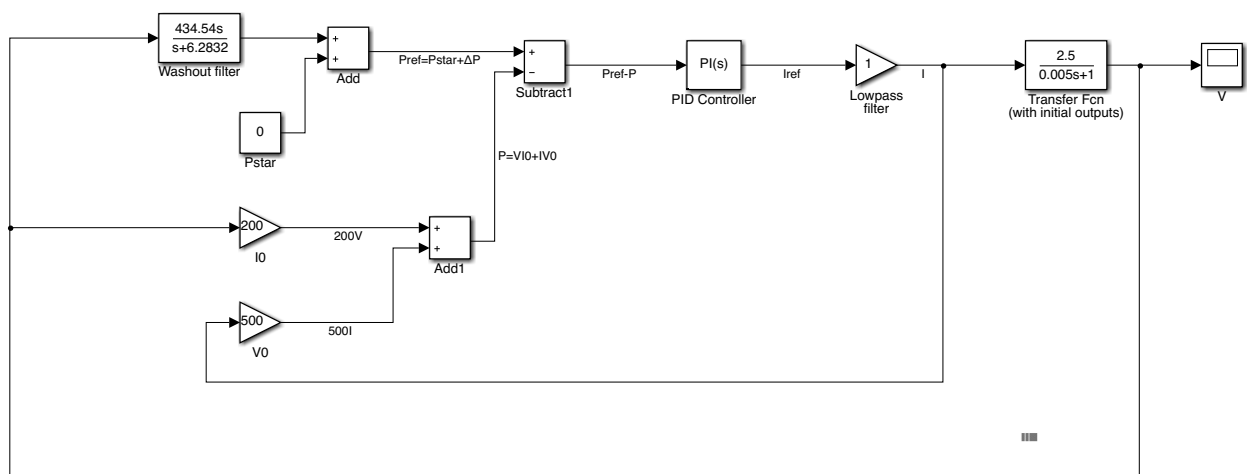


Σχ.3.14 Κυματομοφή τάσης για κέρδος ίσο με  $K_{max}$

Στο Σχ.3.14 παρατηρούμε ότι η τάση ταλαντώνεται γύρω από το μηδέν, συμπεριφορά που υποδηλώνει την οριακή ευστάθεια του συστήματος.

- **Μελέτη ευστάθειας συστήματος κατά τη νησιδοποίηση**

Επιλύοντας τις εξισώσεις του συστήματος με το δίκτυο αποσυνδεδεμένο εξάγουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος και κατασκευάζουμε το block διάγραμμα, όπως φαίνεται στο Σχ.3.15.



Σχ.3.15 Block διάγραμμα νησιδοποιημένου συστήματος

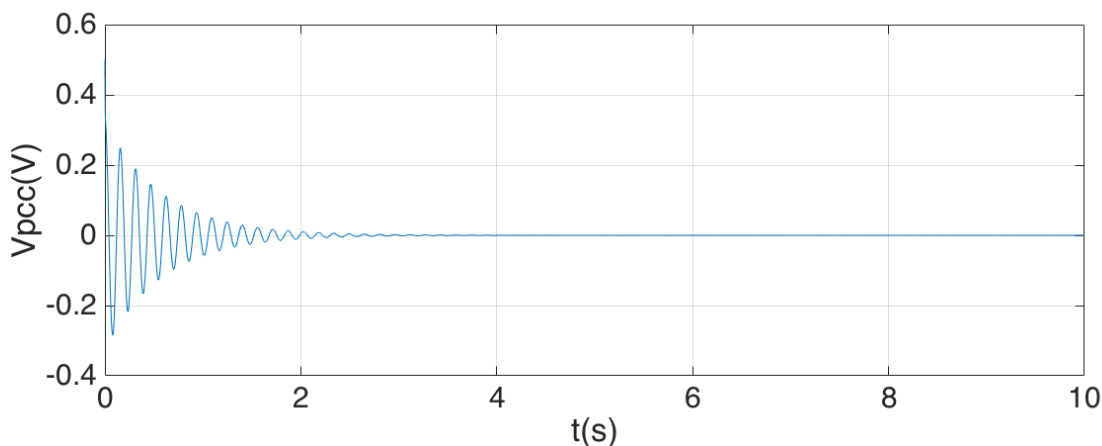


Όπως στη μελέτη ευστάθειας με συνδεδεμένο το δίκτυο έτσι και για το νησιδοποιημένο σύστημα θα παρατηρήσουμε την ευστάθειά του για διάφορες τιμές του κέρδους. Η οριακή τιμή του κέρδους είναι:

$$K_{min} = 405.32W/V.$$

Στο Σχ.3.16 φαίνεται η κυματομορφή της τάσης για κέρδος μικρότερο από το οριακό και συγκεκριμένα για:

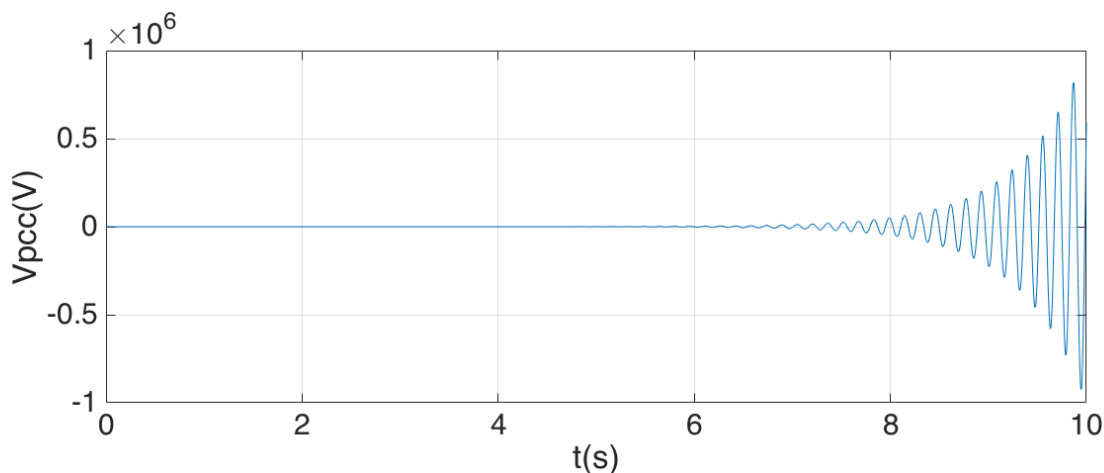
$$K = 400W/V.$$



Σχ.3.16 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μικρότερο του  $K_{min}$

Παρατηρούμε ότι η τάση ταλαντώνεται γύρω από το μηδέν για ένα μικρό χρονικό διάστημα μέχρι που σταθεροποιείται στο μηδέν. Αυτή η συμπεριφορά της τάσης στο ΣΚΣ δείχνει την ευστάθεια του συστήματος για κέρδος μικρότερο από το  $K_{min}$ .

Για κέρδος μεγαλύτερο του  $K_{min}$  και συγκεκριμένα για  $K = 410W/V$ , η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ φαίνεται στο Σχ.3.17.

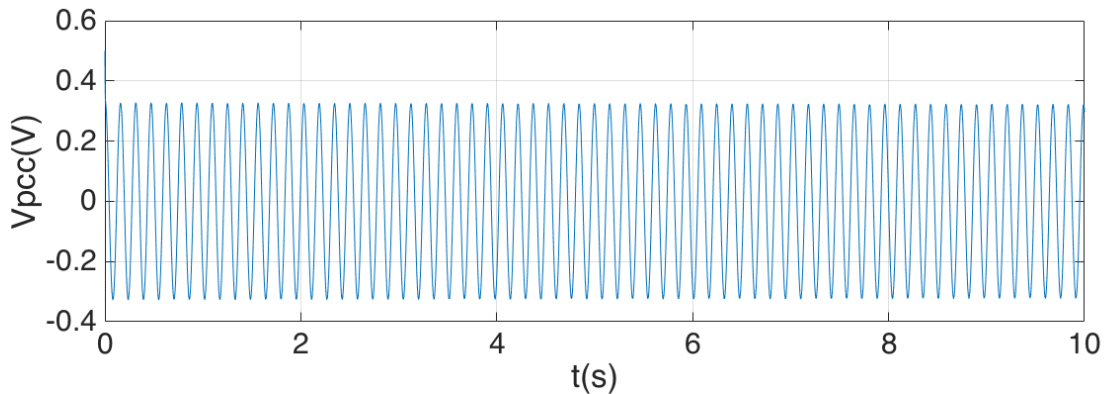


Σχ.3.17 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μεγαλύτερο του  $K_{min}$

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, η τάση ξεκινά από μηδενική τιμή και με την πάροδο του χρόνου ταλαντώνεται στο άπειρο, συμπεριφορά που υποδηλώνει την αστάθεια του συστήματος.

Για να παρατηρήσουμε την οριακή ευστάθεια του νησιδοποιημένου συστήματος επιλέγουμε κέρδος ίσο με το οριακό, δηλαδή:

$$K = 405.32W/V.$$



Σχ.3.18 Κυματομορφή τάσης για κέρδος ίσο με  $K_{min}$

Όπως και στη μελέτη ευστάθειας του συστήματος υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας, έτσι και σ' αυτή την περίπτωση η τάση ταλαντώνεται γύρω από το μηδέν. Αυτή η συμπεριφορά της τάσης υποδηλώνει την οριακή ευστάθεια του νησιδοποιημένου συστήματος.

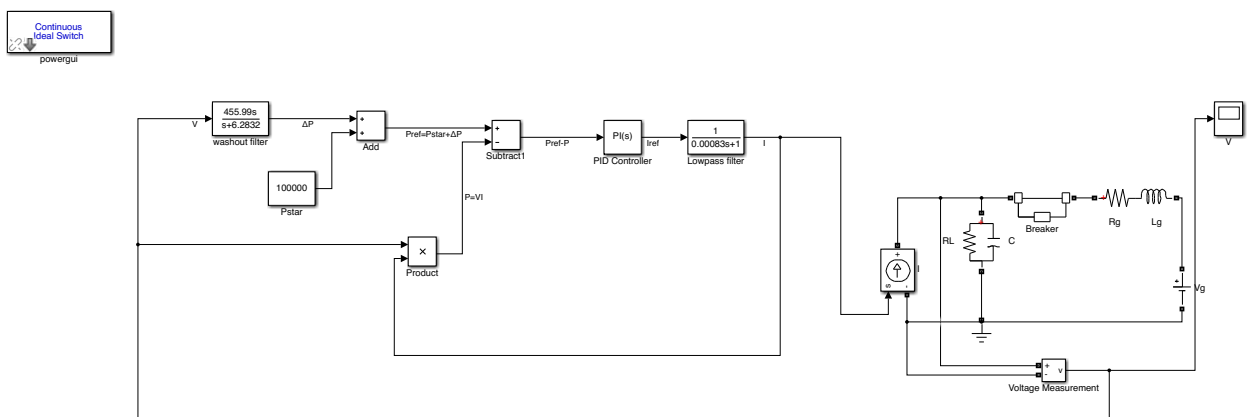
• Προσομοίωση μεθόδου στην κυκλωματική διάταξη του συστήματος

Όπως και στην πρώτη μέθοδο το σύστημα μοντελοποιείται με τον ίδιο τρόπο και ο ΑΑΔ ανοίγει τη χρονική στιγμή:

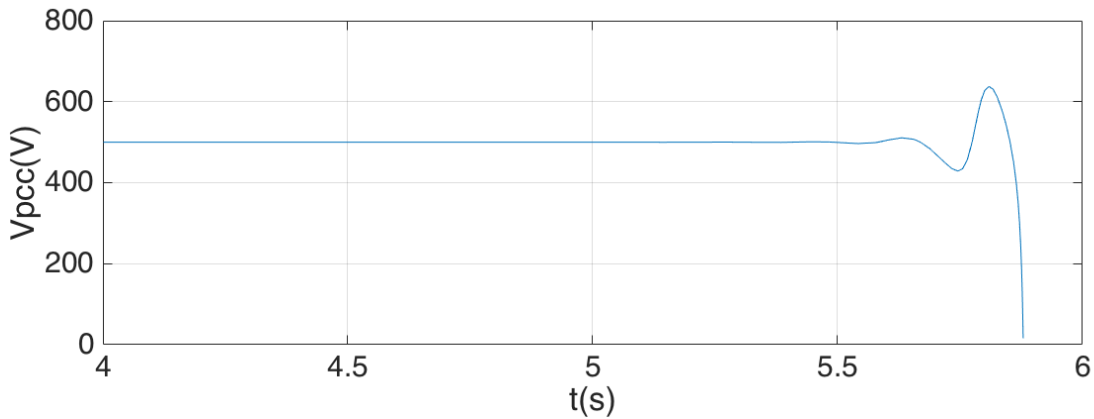
$$t = 5s.$$

Η τιμή του κέρδους που επιλέγουμε είναι μια τιμή κοντά στο  $K_{min}$  και συγκεκριμένα είναι:

$$K = 1.125pu \Rightarrow K = 455.985W/V.$$



Σχ.3.19 Εφαρμογή μεθόδου 2



Σχ.3.20 Κυματομορφή τάσης Μεθόδου 2

Με τη βοήθεια της κυματομορφής της τάσης στο ΣΚΣ καθώς και του MATLAB/Simulink υπολογίζουμε ότι η τάση στο ΣΚΣ ξεπερνά τα επιτρεπόμενα όρια και συγκεκριμένα το ανώτερο όριο, δηλαδή:

$$V_{upper-limit} = 1.1pu \Rightarrow V_{upper-limit} = 550V,$$

τη χρονική στιγμή:

$$t = 5.783s.$$

Άρα, ο χρόνος που απαιτείται έτσι ώστε το σύστημα να περάσει σε αστάθεια από τη στιγμή που εμφανίζεται η νησιδοποίηση είναι:

$$t_d = 783ms.$$

Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους με βάση τις κυματομορφές της τάσης στο ΣΚΣ, παρατηρούμε ότι η Μέθοδος 1 είναι πιο γρήγορη από τη Μέθοδο 2. Επίσης, η Μέθοδος 2 έχει ταλαντευόμενη απόκριση, ενώ η Μέθοδος 1 έχει αποσβεσμένη απόκριση, οπότε η Μέθοδος 1 υπερτερεί της Μεθόδου 2 και όσον αφορά την ποιότητα ισχύος και τη λειτουργία της ΜΔΠ.

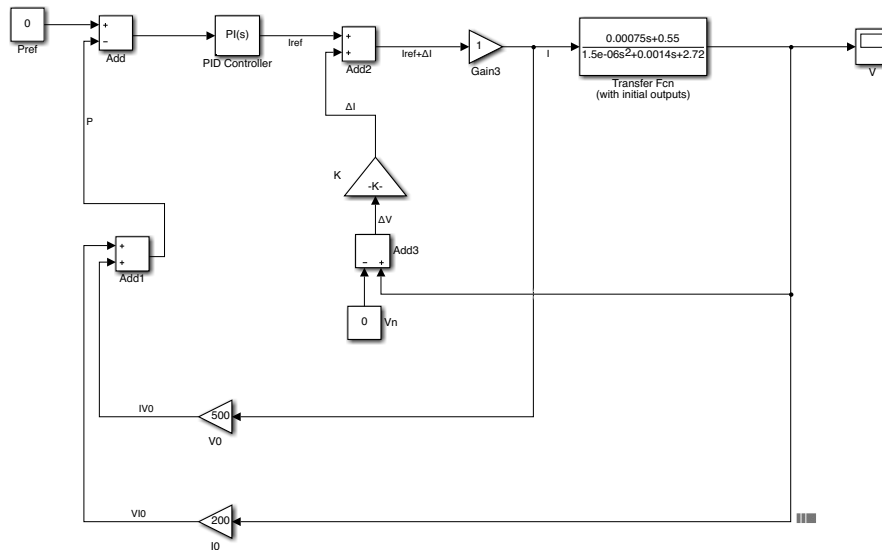
## **B. Μέθοδος διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ρεύματος**

### **3. Μέθοδος βασισμένη στην τάση αναφοράς**

- **Μελέτη ευστάθειας συστήματος σε κανονική λειτουργία**

Στο Σχ.3.21 έχει σχεδιαστεί με τη βοήθεια του MATLAB/Simulink το block διάγραμμα της μεθόδου αυτής, όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο. Με βάση τους θεωρητικούς υπολογισμούς του προηγούμενου κεφαλαίου, η τιμή του κέρδους για την οποία το σύστημα, υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας, περνά από ευσταθή λειτουργία σε ασταθή είναι:

$$K_{max} = 1.7217A/V.$$

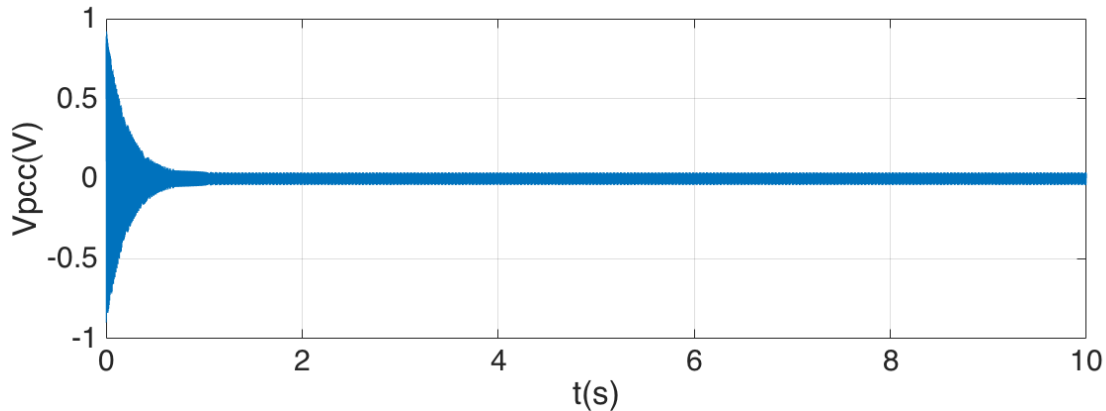


Σχ.3.21 Block διάγραμμα συστήματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας

Θεωρώντας κέρδος μικρότερο του  $K_{max}$ , θα παρατηρήσουμε, μέσω της κυματομορφής της τάσης στο ΣΚΣ, την ευστάθεια του συστήματος. Οπότε για :

$$K = 1.7A/V$$

η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ φαίνεται στο Σχ.3.22.

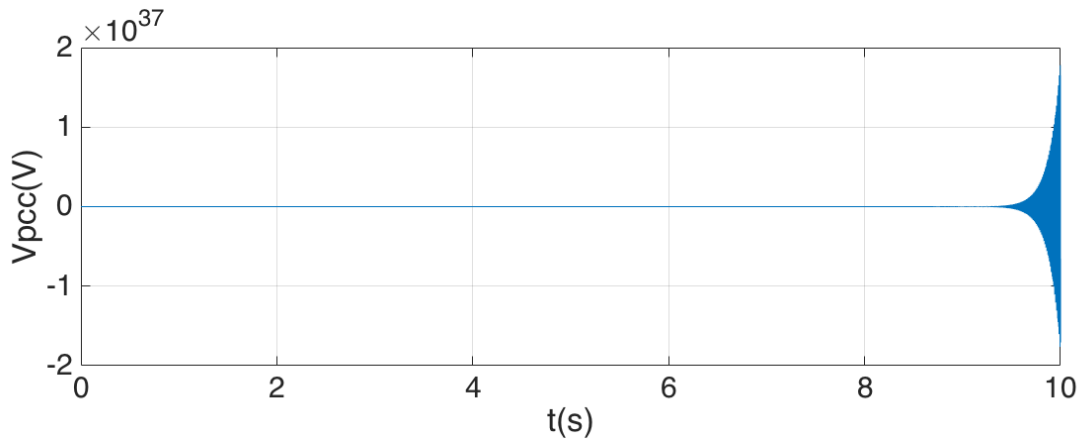


Σχ.3.22 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μικρότερο του  $K_{max}$

Στην παραπάνω γραφική παρατηρούμε ότι με το πέρασμα του χρόνου η τάση στο ΣΚΣ σταθεροποιείται στο μηδέν. Άρα για τιμές κέρδους μικρότερες από το  $K_{max}$  το σύστημα, υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας είναι ευσταθές.

Για τιμές κέρδους μεγαλύτερες από το  $K_{max}$  το σύστημα πρέπει να είναι ασταθές. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να βγει παρατηρώντας την κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ για κέρδος:

$$K = 1.75A/V.$$

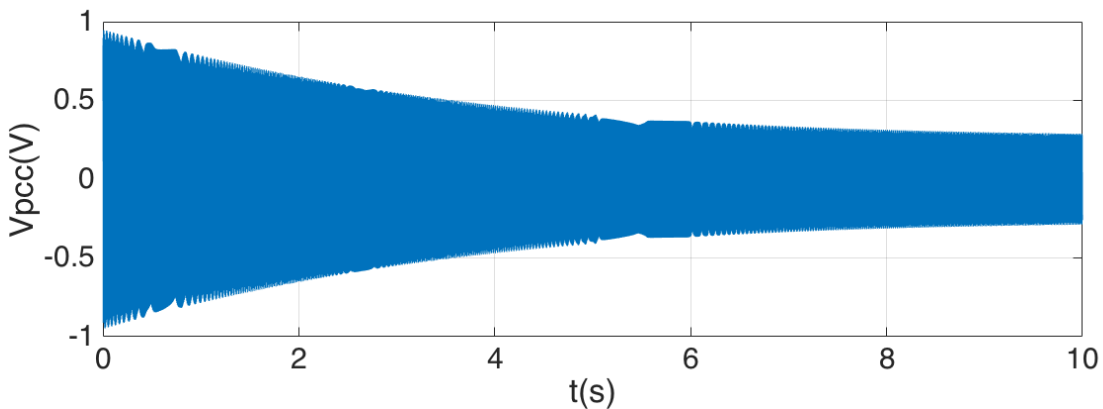


Σχ.3.23 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μεγαλύτερο του  $K_{max}$

Σύμφωνα με την παραπάνω κυματομορφή, παρατηρούμε ότι η τάση τείνει σε μια άπειρη τιμή, όσο περνά ο χρόνος της προσομοίωσης, γεγονός που αποδεικνύει την αστάθεια του συστήματος για κέρδος μεγαλύτερο του  $K_{max}$ .

Τέλος, για τιμή κέρδους ίση με την οριακή, θα παρατηρήσουμε την οριακή ευστάθεια του διασυνδεδεμένου συστήματος, μέσω της τάσης στο ΣΚΣ. Επομένως, για:

$$K = 1.717A/V$$



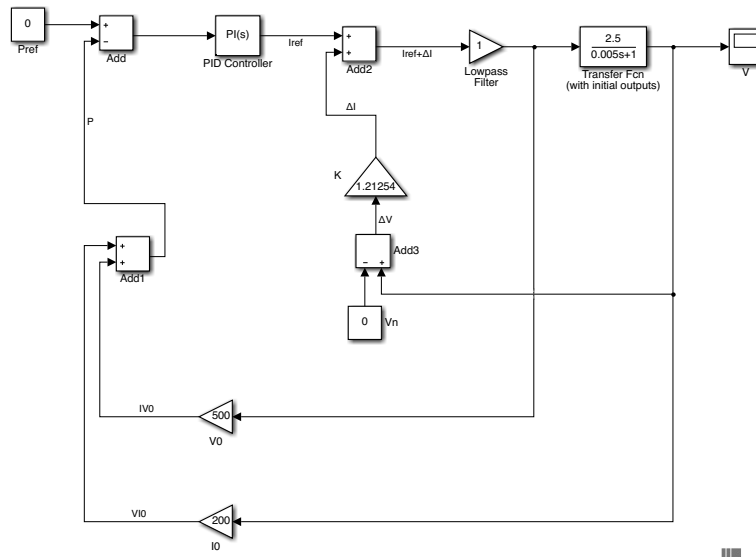
Σχ.3.24 Κυματομορφή τάσης για κέρδος ίσο με  $K_{max}$

• **Μελέτη ευστάθειας συστήματος κατά τη νησιδοποίηση**

Σε αυτή την ενότητα θα παρατηρήσουμε την ευστάθεια, αστάθεια και οριακή ευστάθεια του νησιδοποιημένου συστήματος, μέσω της κυματομορφής της τάσης στο ΣΚΣ, για διάφορες τιμές του κέρδους. Η τιμή του κέρδους για την οποία το νησιδοποιημένο σύστημα περνά από ευστάθεια σε αστάθεια είναι:

$$K_{min} = 1.1548A/V.$$

Στο Σχ.3.25 φαίνεται το block διάγραμμα του νησιδοποιημένου συστήματος.

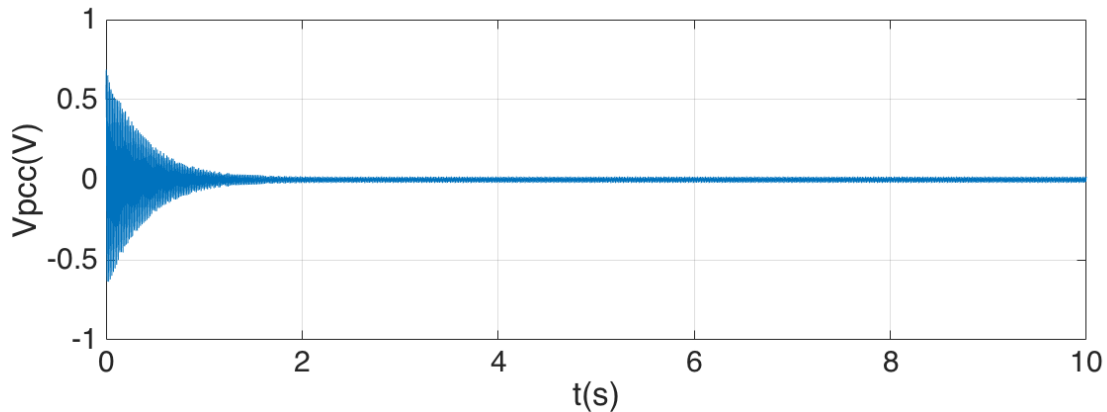


Σχ.3.25 Block διάγραμμα νησιδοποιημένου συστήματος

Για τιμή κέρδους μικρότερη από την οριακή το σύστημα θα πρέπει να είναι ευσταθές, παρόλο που υπάρχει νησιδοποίηση. Οπότε για κέρδος:

$$K = 1.145A/V$$

Η τάση στο ΣΚΣ φαίνεται στο Σχ.3.26.

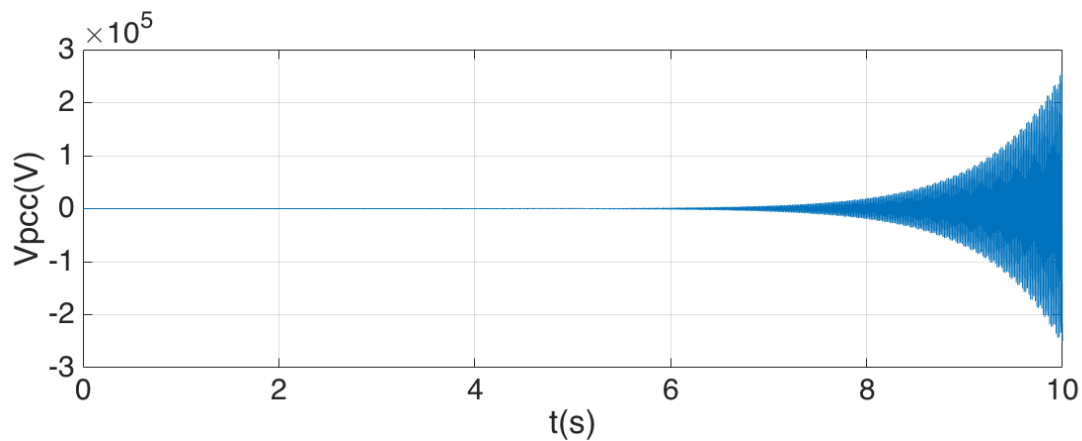


Σχ.3.26 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μικρότερο του  $K_{min}$

Όπως παρατηρούμε από την παραπάνω κυματομορφή, η τάση στο ΣΚΣ σταθεροποιείται στο μηδέν και επομένως το σύστημα είναι ευσταθές, υπό συνθήκες νησιδοποίησης. Όμως, η μέθοδος πρέπει να πηγαίνει το σύστημα σε αστάθεια υπό συνθήκες νησιδοποίησης. Για τιμή κέρδους μεγαλύτερη του οριακού και συγκεκριμένα για:

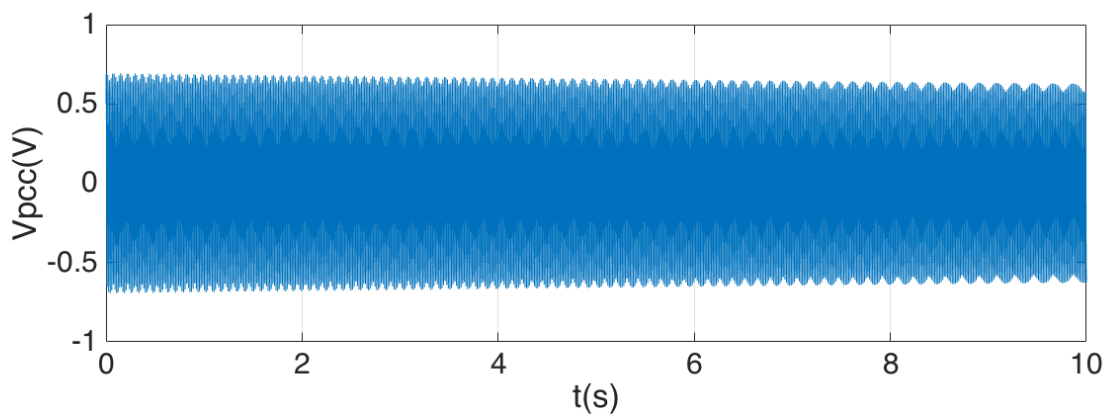
$$K = 1.16A/V$$

παρατηρούμε, με βάση την κυματομορφή του Σχ.3.27, ότι το νησιδοποιημένο σύστημα είναι ασταθές.



Σχ.3.27 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μεγαλύτερο του  $K_{min}$

Τέλος, για τιμή κέρδους ίση με  $K_{min}$ , η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ φαίνεται στο Σχ.3.28.



Σχ.3.28 Κυματομορφή τάσης για κέρδος ίσο με  $K_{min}$

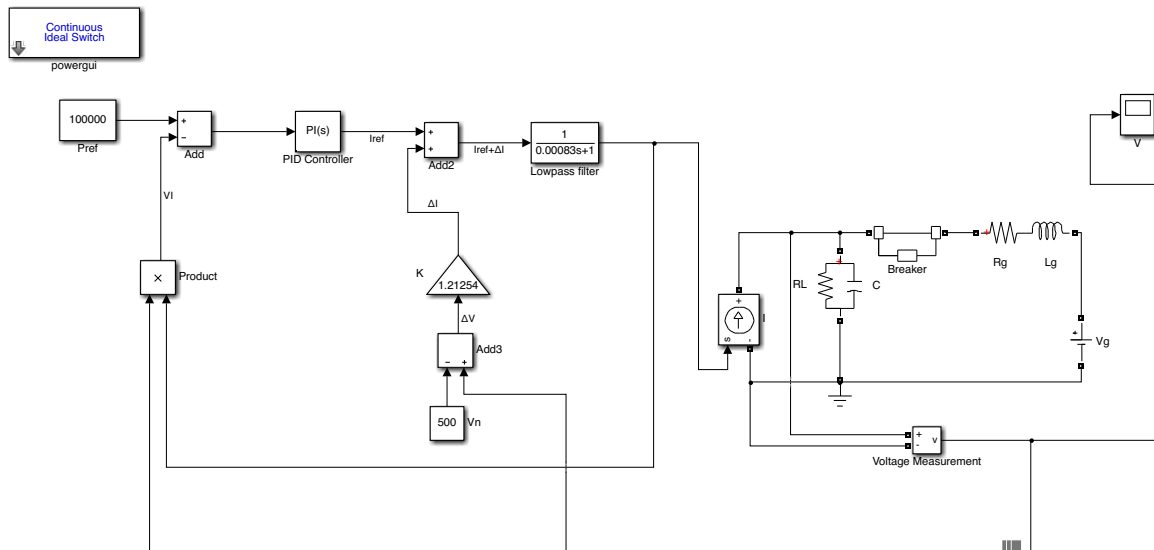
Παρατηρούμε ότι η κυματομορφή της τάσης ταλαντώνεται γύρω από το μηδέν και παίρνει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν, συμπεριφορά η οποία υποδηλώνει την οριακή ευστάθεια του νησιδοποιημένου συστήματος.

- Προσομοίωση μεθόδου στην κυκλωματική διάταξη του συστήματος

Το διάγραμμα του συστήματος με εφαρμοσμένη τη Μέθοδο 3 φαίνεται στο Σχ.3.29. Ο διακόπτης που συνδέει τη ΜΔΠ και το φορτίο με το υπόλοιπο δίκτυο ανοίγει τη χρονική στιγμή

$$t = 5s,$$

όπου θεωρούμε ότι εμφανίζεται το φαινόμενο της νησιδοποίησης.

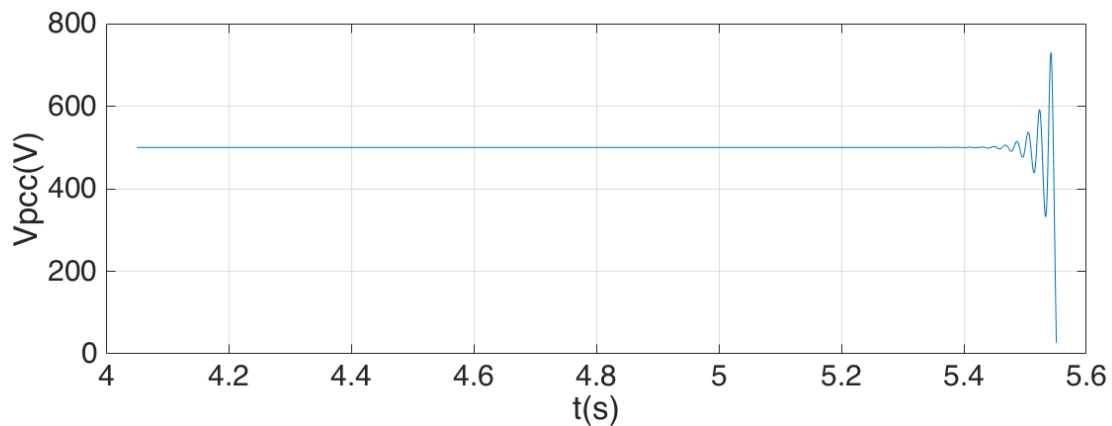


Σχ.3.29 Εφαρμογή μεθόδου 3

Η τιμή του κέρδους που επιλέχθηκε για την προσομοίωση της συγκεκριμένης μεθόδου, είναι μία τιμή λίγο μεγαλύτερη από το ελάχιστο κέρδος και συγκεκριμένα:

$$K = 1.05pu \Rightarrow K = 1.21254A/V.$$

Η κυματομορφή της τάσης φαίνεται στο Σχ.3.30, με την προσομοίωση να διαρκεί δέκα δευτερόλεπτα και την νησιδοποίηση να εμφανίζεται, όπως προαναφέρθηκε τη χρονική στιγμή  $t = 5s$ .



Σχ.3.30 Κυματομορφή τάσης μεθόδου 3

Όπως παρατηρούμε στο Σχ.3.30, με το άνοιγμα του διακόπτη τη χρονική στιγμή  $t = 5s$  και με το πέρασμα κάποιων  $ms$ , η τάση αρχίζει να ταλαντώνεται με αύξοντα ρυθμό μέχρι που κάποια στιγμή ξεπερνάει τα προκαθορισμένα όρια τάσης, τα οποία έχουν τεθεί από το πρότυπο IEEE και ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι ΟΥΒ. Σύμφωνα με την παραπάνω κυματομορφή, αλλά και με τη βοήθεια του MATLAB, η ταλάντωση αυτή ξεπερνά για πρώτη φορά το κατώτερο όριο της τάσης, δηλαδή τα  $440V$ . Η χρονική στιγμή κατά την οποία συμβαίνει αυτή η παράβαση του κατώτατου ορίου είναι:

$$t = 5.514s.$$



Οπότε το χρονικό διάστημα που χρειάζεται η συγκεκριμένη μέθοδος για να ανιχνεύσει τη νησιδοποίηση είναι:

$$t_d = 514ms.$$

Η μέθοδος αυτή είναι πιο γρήγορη από τις δύο προηγούμενες, όμως επειδή η τάση έχει αυτή την ταλαντευόμενη συμπεριφορά μέχρι να παραβιάσει τα όρια, συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος αυτή επηρεάζει την ποιότητα ισχύος της ΜΔΠ, γεγονός το οποίο την κάνει να μειονεκτεί σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους, όσον αφορά την ποιότητα ισχύος.

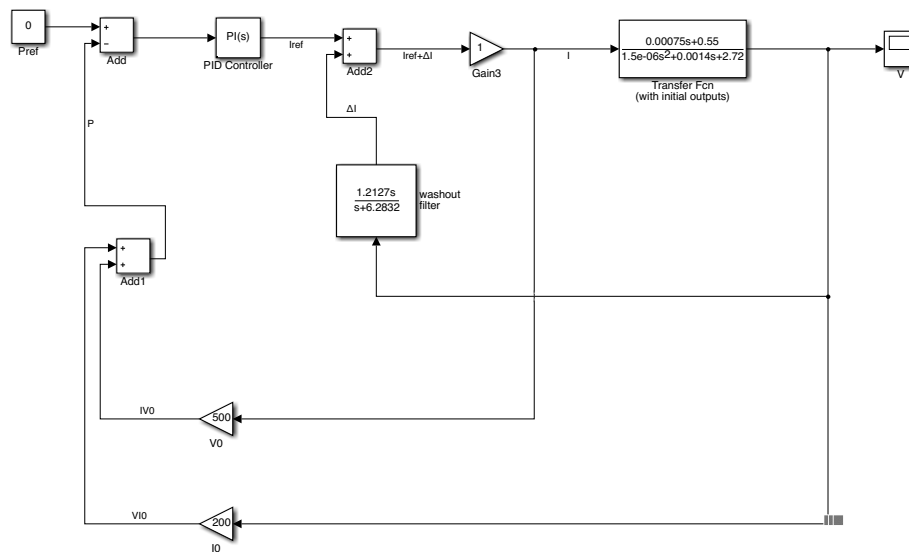
#### 4. Μέθοδος βασισμένη σε υπερβατό φίλτρο

- Μελέτη ευστάθειας συστήματος σε κανονική λειτουργία

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά της τάσης στο ΣΚΣ για τιμές κέρδους μικρότερες, ίσες και μεγαλύτερες από το οριακό κέρδος, υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας, το οποίο έχει υπολογιστεί και ισούται με:

$$K_{max} = 1.7162A/V.$$

Το block διάγραμμα του διασυνδεδεμένου με το δίκτυο συστήματος φαίνεται στο Σχ.3.31.

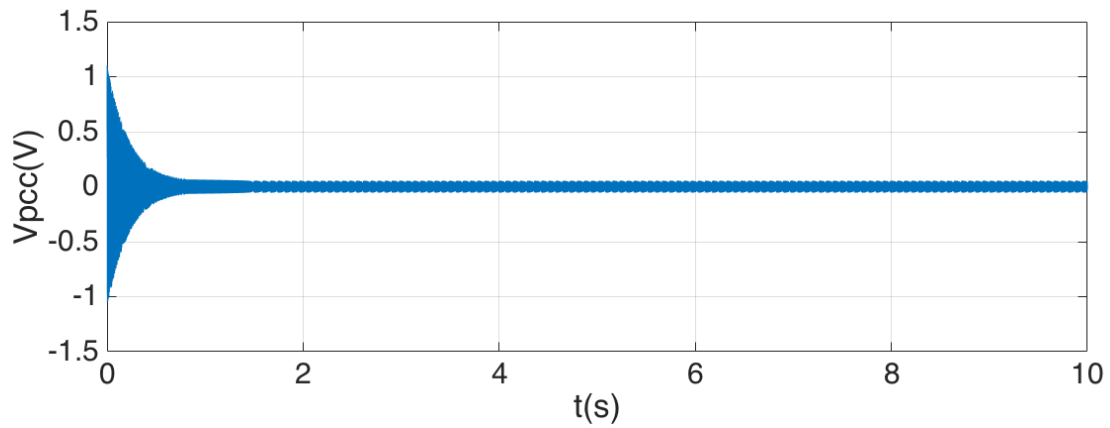


Σχ.3.31 Block διάγραμμα διασυνδεδεμένου συστήματος

Για τιμή κέρδους μικρότερη της οριακής, θα παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά της τάσης στο ΣΚΣ, και συγκεκριμένα για τιμή κέρδους ίση με:

$$K = 1.7A/V$$

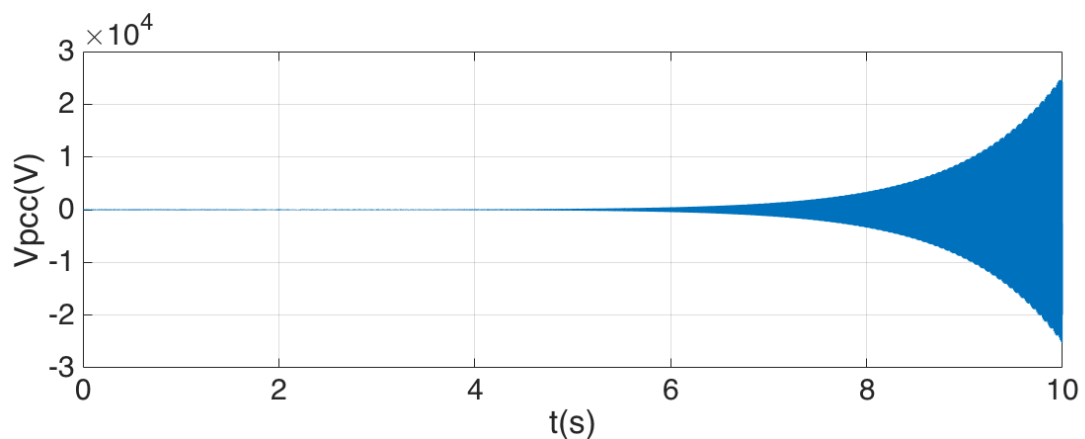
η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ φαίνεται στο Σχ.3.32. Παρατηρούμε ότι, όσο περνά ο χρόνος της προσομοίωσης, η τιμή της τάσης στο ΣΚΣ σταθεροποιείται στο μηδέν και επομένως το σύστημα είναι ευσταθές για τιμή κέρδους μικρότερη της οριακής.



Σχ.3.32 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μικρότερο του  $K_{max}$

Αντίθετα, για τιμή κέρδους μεγαλύτερη της οριακής, το σύστημα πρέπει να είναι ασταθές. Συγκεκριμένα, στο Σχ.3.33 φαίνεται η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ για κέρδος ίσο με:

$$K = 1.72A/V.$$

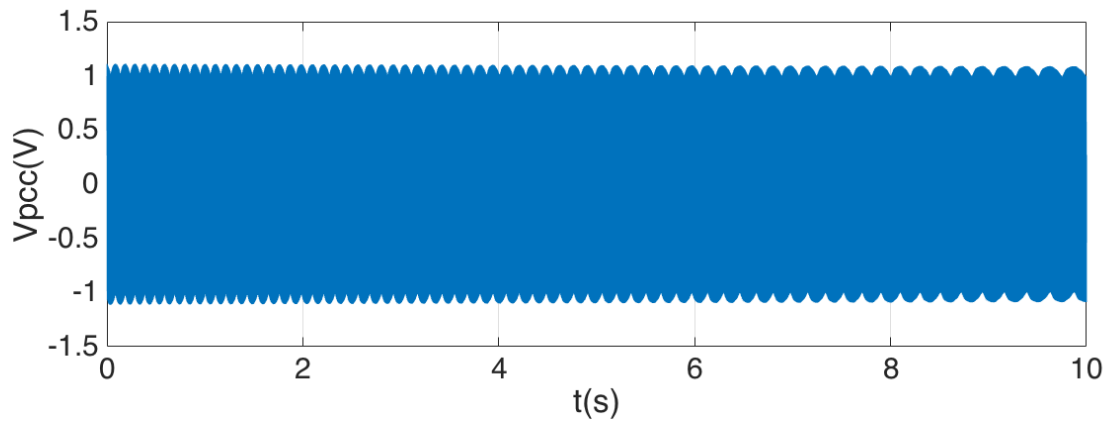


Σχ.3.33 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μεγαλύτερο του  $K_{max}$

Είναι σαφές πως η τάση στο ΣΚΣ ξεκινά από μηδενική τιμή και όσο περνά ο χρόνο τείνει προς μια πολύ μεγάλη (άπειρη) τιμή. Αυτή η συμπεριφορά της τάσης δηλώνει ότι για κέρδος μεγαλύτερο από το οριακό το σύστημα είναι ασταθές.

Τέλος, θα μελετηθεί και θα αποδειχθεί, μέσω της κυματομορφής της τάσης στο ΣΚΣ, η οριακή ευστάθεια του συστήματος, η οποία επιτυγχάνεται θέτωντας το κέρδος ίσο με το οριακό, δηλαδή:

$$K = 1.7162A/V.$$

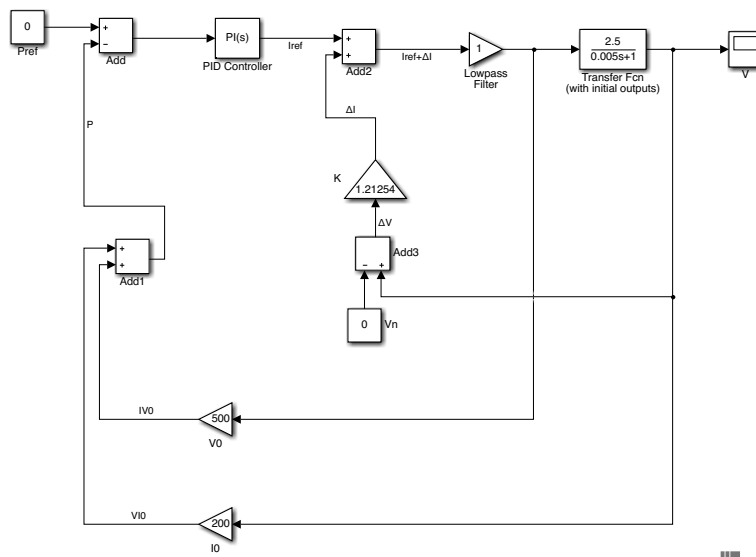


Σχ.3.34 Κυματομορφή τάσης για κέρδος ίσο με  $K_{max}$

Παρατηρούμε στο Σχ.3.34 ότι η τάση στο ΣΚΣ ταλαντώνεται μεταξύ τιμών πολύ κοντά στο μηδέν, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι το σύστημα είναι οριακά ευσταθές.

### • Μελέτη ευστάθειας συστήματος κατά τη νησιδοποίηση

Όπως και στη λειτουργία του συστήματος με το δίκτυο συνδεδεμένο, έτσι και για το σύστημα που λειτουργεί ως νησί θα πρέπει να αποδείξουμε μέσω της τάσης στο ΣΚΣ την ευστάθεια, την αστάθεια και την οριακή ευστάθεια. Το block διάγραμμα του νησιδοποιημένου συστήματος φαίνεται στο Σχ.3.35.



Σχ.3.35 Block διάγραμμα νησιδοποιημένου συστήματος

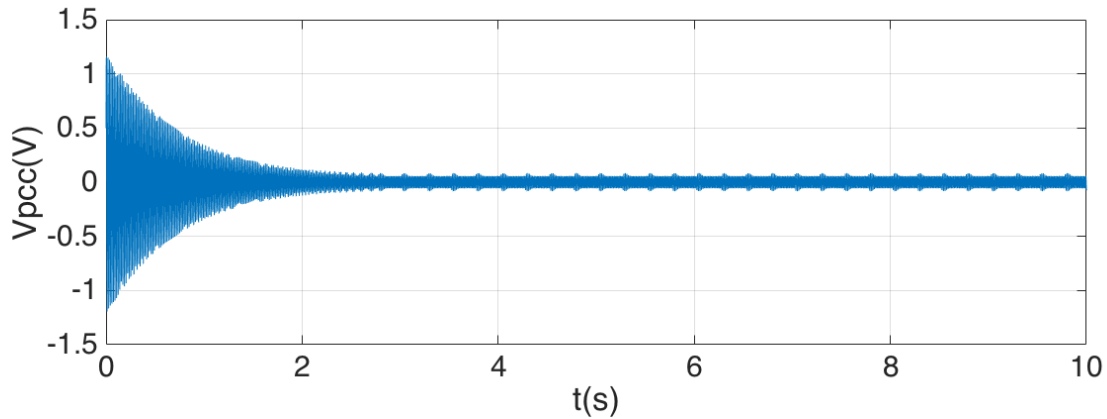
Το κέρδος για το οποίο το σύστημα περνά από ευσταθή λειτουργία σε ασταθή, σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς είναι:

$$K_{min} = 1.155A/V.$$

Για τιμή κέρδους μικρότερη από την οριακή και συγκεκριμένα για κέρδος ίσο με:

$$K = 1.15A/V$$

η κυματομορφή της τάσης φαίνεται στο Σχ.3.36.

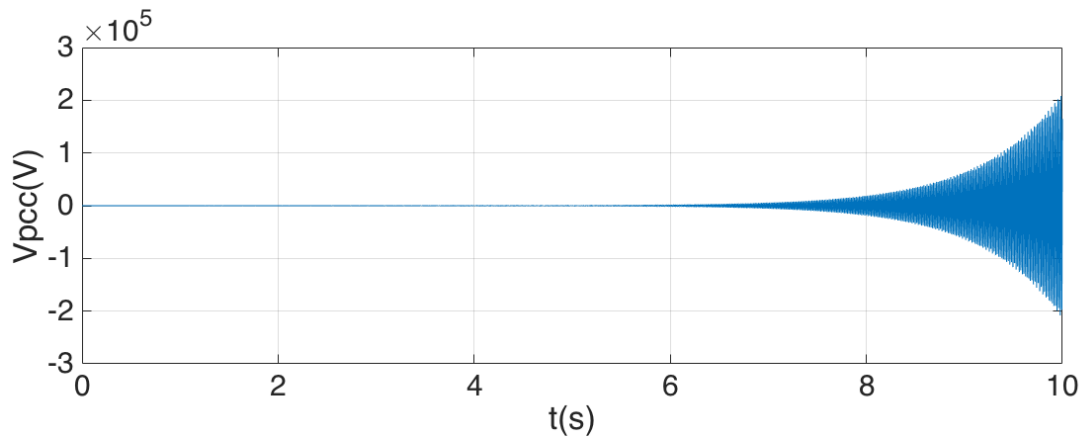


Σχ.3.36 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μικρότερο του  $K_{min}$

Παρατηρούμε ότι η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ σταθεροποιείται στο μηδέν, πράγμα που αποδεικνύει την ευστάθεια του συστήματος. Για τιμή κέρδους μεγαλύτερη της οριακής και συγκεκριμένα για:

$$K = 1.16A/V$$

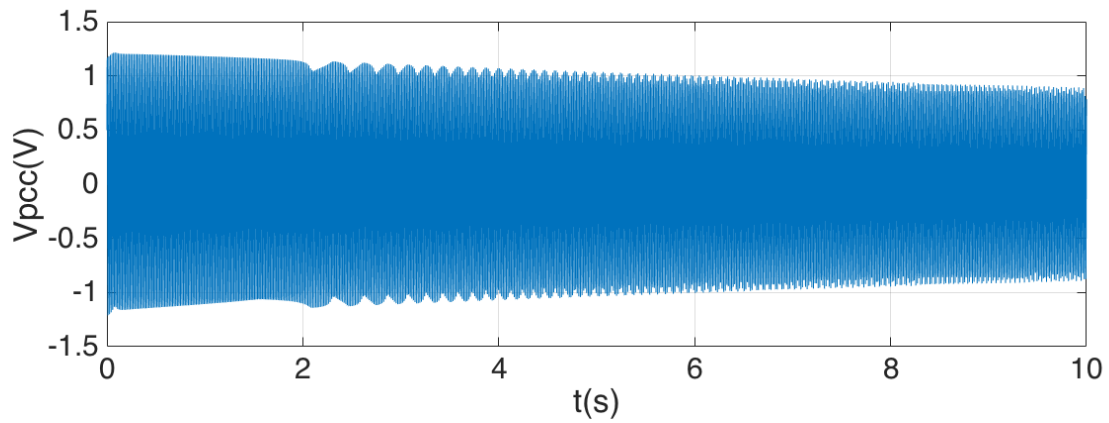
το σύστημα πρέπει να είναι ασταθές.



Σχ.3.37 Κυματομορφή τάσης για κέρδος μεγαλύτερο του  $K_{min}$

Όπως είναι σαφές από το Σχ.3.37 η τάση τείνει προς μια πολύ μεγάλη τιμή, δηλαδή το σύστημα σε κατάσταση νησιδοποίησης και για κέρδος μεγαλύτερο από το οριακό είναι ασταθές. Τέλος, για κέρδος ίσο με το οριακό το σύστημα πρέπει να είναι οριακά ευσταθές. Η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ φαίνεται στο Σχ.3.38, για τιμή κέρδους ίση με:

$$K = 1.155A/V.$$



Σχ.3.38 Κυματομορφή τάσης για κέρδος ίσο με  $K_{min}$

Η κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ για κέρδος ίσο με το οριακό ταλαντώνεται γύρω από το μηδέν και παίρνει τιμές πολύ κοντά σ' αυτό. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα σε συνθήκες νησιδοποίησης και για κέρδος ίσο με το οριακό είναι οριακά ευσταθές.

Η μέθοδος αυτή είναι πιο γρήγορη από τις μεθόδους διαταραχής του βρόχου ισχύος, αλλά ταυτόχρονα είναι πιο αργή από τη Μέθοδο 3. Επίσης, η τάση στο ΣΚΣ έχει ταλαντευόμενη μορφή, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει υποβάθμιση στην ποιότητα ισχύος.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ

## ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

---

### 3.1 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς και τις προσομοιώσεις που προηγήθηκαν μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα, όσον αφορά τις μεθόδους διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ισχύος και μέσω του βρόχου ρεύματος:

- Η Μέθοδος 1 είναι πιο αργή από τη Μέθοδο 2.
- Η Μέθοδος 1 έχει αποσβεσμένη απόκριση, ενώ η Μέθοδος 2 έχει ταλαντευόμενη απόκριση. Αυτό σημαίνει ότι η Μέθοδος 2 υποβαθμίζει την ποιότητα ισχύος περισσότερο από τη Μέθοδο 1.
- Η Μέθοδος 3 είναι πιο γρήγορη από την Μέθοδο 4.
- Η Μέθοδος 3 και η Μέθοδος 4 έχουν ταλαντευόμενη απόκριση και κατ' επέκταση υποβαθμίζουν την ποιότητα ισχύος του αντιστροφέα.
- Οι μέθοδοι διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ρεύματος είναι πιο γρήγορες στην ανίχνευση της νησιδοποίησης σε σχέση με τις μεθόδους διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ισχύος.
- Οι μέθοδοι διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ρεύματος δημιουργούν μεγαλύτερη υποβάθμιση της ποιότητας ισχύος σε σχέση με την υποβάθμιση της ποιότητας που προκαλείται από τις μεθόδους διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ισχύος

Εν κατακλείδει, οι μέθοδοι διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ρεύματος είναι πιο γρήγορες από τις αντίστοιχες μεθόδους διαταραχής της τάσης μέσω του βρόχου ισχύος. Η απόκρισή τους όμως υποβαθμίζει την ποιότητα ισχύος σε σχέση με τις μεθόδους διαταραχής του βρόχου ισχύος και πιο συγκεκριμένα με τη Μέθοδο 1, η οποία έχει την πιο κατάλληλη απόκριση, όσον αφορά την ποιότητα ισχύος. Οπότε, λαμβάνοντας υπ όψιν τα παραπάνω, η Μέθοδος 1 φαίνεται η πιο κατάλληλη μέθοδος από τις τέσσερις, όσον αφορά την ανίχνευση της νησιδοποίησης στα DC Μικροδίκτυα.

## 3.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στο Κεφάλαιο 2 έγινε μια καταγραφή των AC και των DC μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών. Όπως παρατηρήσαμε, όσον αφορά τις μεθόδους ανίχνευσης νησιδοποίησης στα AC Μικροδίκτυα, υπήρχε μια πληθώρα από μεθόδους, που είτε ελέγχανε την τάση, είτε τη συχνότητα, είτε τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου. Αντιθέτως, στα DC Μικροδίκτυα, οι μέθοδοι ήταν λιγότερες και αυτό οφείλεται στην απουσία της συχνότητας από τα DC σήματα.

Σε αυτήν την ενότητα θα προταθούν κάποιες AC Μέθοδοι, οι οποίες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και στα DC Μικροδίκτυα.

### I. Μέθοδος Μεταβολής της Τάσης (Sandia Voltage Shift - SVS)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ένα βρόχο θετικής ανάδρασης στην τάση στο ΣΚΣ. Αν η τάση στο ΣΚΣ μειωθεί τότε ο αντιστροφέας θα μειώσει το ρεύμα εξόδου του και την ισχύ εξόδου του. Αντιθέτως, αν η τάση στο ΣΚΣ αυξηθεί τότε ο αντιστροφέας θα αυξήσει την ισχύ εξόδου του. Η μεταβολή αυτή της ισχύος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta P_{DG} = 2\Delta V \frac{V}{R}.$$

Αν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο, αυτή η μεταβολή δε θα έχει κάποια συνέπεια, καθώς η επιπλέον ισχύς που παράγεται ή απαιτείται απορροφάται ή παράγεται από το δίκτυο. Αν το δίκτυο αποσυνδεθεί και βρεθούμε σε κατάσταση νησιδοποίησης, η μέθοδος αυτή θα οδηγήσει την τάση στο ΣΚΣ εκτός ορίων με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθούν οι ηλεκτρονόμοι ΟUV.

### II. Μέθοδος Διαταραχής Ενεργού Ισχύος (Active Power Variation - APV)

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί διαταραχές στην ενεργό ισχύ του αντιστροφέα με σκοπό να οδηγήσει την τάση στο ΣΚΣ εκτός ορίων. Σε κατάσταση νησιδοποίησης η διαταραχή της ισχύος ρέει απευθείας στο φορτίο, επηρεάζοντας το ρεύμα του αντιστροφέα και την τάση στο ΣΚΣ. Η διαταραχή της τάσης ισούται με:

$$\Delta V = \frac{\Delta P_{DG}}{2} \sqrt{\frac{R}{P_{DG}}},$$

όπου  $R$  και  $P_{DG}$  είναι σταθερά, οπότε η διαταραχή της τάσης είναι ανάλογη με τη διαταραχή της ενεργού ισχύος. Έτσι, είναι δυνατό να μεταβάλλουμε την ενεργό ισχύ του αντιστροφέα, ώστε να στείλει την τάση εκτός των ορίων κανονικής λειτουργίας.

### III. Μέθοδος Μέτρησης της Σύνθετης Αντίστασης (Impedance Measurement - IM)

Η μέθοδος αυτή αναζητά αλλαγές στη σύνθετη αντίσταση στην έξοδο του αντιστροφέα, οι οποίες παρατηρούνται όταν το δίκτυο, το οποίο υποτίθεται πως πρέπει να έχει να έχει μικρή σύνθετη αντίσταση, αποσυνδέεται. Συνήθως, προστίθεται μια διαταραχή στο ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα, το οποίο προκαλεί αλλαγές στην τάση εξόδου όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί. Αυτή η

μεταβολή παρακολουθείται υπολογίζοντας το  $dv/di$ , το οποίο είναι η σύνθετη αντίσταση του δικτύου την οποία 'βλέπει' ο αντιστροφέας. Αν η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από κάποια προκαθορισμένα όρια, τότε υπάρχει κατάσταση νησιδοποίησης .

Οι παραπάνω μέθοδοι που εφαρμόζονται στα AC Μικροδίκτυα, παρακαλουθούν μεταβολές είτε στην τάση στο ΣΚΣ είτε στη σύνθετη αντίσταση του δικτύου και γι αυτό το λόγο προτείνονται για περαιτέρω μελέτη, όσον αφορά τη μεταφορά τους ως μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης στα DC Μικροδίκτυα.





# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Χ. Παπαδημητρίου, Διδακτορική Διατριβή “Έλεγχος κατανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για ένταξη της στα μικροδίκτυα” , Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Ιούνιος 2012.
2. Ε. Μελίστα, Διπλωματική Εργασία “Εφαρμογή και μελέτη ευστάθειας ιεραρχικού ελέγχου σε DC Μικροδίκτυο”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Οκτώβριος 2015.
3. Α. Τσικαλάκης, Διδακτορική Διατριβή, “Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Ιούλιος 2008.
4. Π. Γεωργιλιάκης “Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας” ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Copyright © ΣΕΑΒ, 2015.
5. Ν. Χαρίτος, Διπλωματική Εργασία “Μοντελοποίηση και έλεγχος συσσωρευτών Λιθίου συνδεδεμένων σε μικροδίκτυο μέσω dc/dc μετατροπών”, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Σεπτέμβριος 2015.
6. University of Cyprus, Department of Electrical and Computer Engineering, “ΗΜΥ 445 /681 Εισαγωγή στη Διεσπαρμένη Παραγωγή”, Lectures 2010.
7. Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας” Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010.
8. W. Bower and M. Ropp. “Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems”, Sandia Report, Sandia National laboratories, November 2002.
9. Adrian V. Timbus, Pedro Rodriguez, Remus Teodorescu and Mihai Ciobotaru. “Line Impedance Estimation Using Active and Reactive Power Variations”, 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference.
10. D. Bejmert and T. S. Sidhu, Fellow, IEEE. “Investigation Into Islanding Detection With Capacitor Insertion-Based Method”, 2014 IEEE Transactions on Power Delivery
11. Zhihong Ye, L. Li, L. Garces, C. Wang, R. Zhang, M. Dame ,R. Walling, N. Miller. “A New Family of Active Anti-Islanding Schemes Based on DQ Implementation For Grid-Connected Inverters”, 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference.
12. Μ. Παπαμιχάλη, Διπλωματική Εργασία “Υλοποίηση και Αξιολόγηση Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Σεπτέμβριος 2015.
13. Σ. Σταθόπουλος, Διπλωματική Εργασία “Μελέτη/Κατασκευή υβριδικού συστήματος (κυψέλη υδρογόνου και PV στοιχείων) και της συμπεριφοράς των διατάξεων προστασίας”, Πολυτεχνική Σχολή του Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών.
14. Cesar Trujillo, David Velasco, Emilio Figueres and Gabriel Garcera (2010). Local and Remote Techniques for Islanding Detection in Distributed Generators, Distributed Generation, D N Gaonkar (Ed.), ISBN: 978-953-307- 046-9, InTech, Available from: <http://>

15. F. De Mago, M. Lissere, A. Dell' Aquila and A. Picazo. "Overview of Anti-islanding Algorithms for PV Systems. Part I: Passive Methods", 2006 12th International Power Electronics and Motion Controls Conference.
16. F. De Mago, M. Lissere and A. Dell' Aquila. "Overview of Anti-islanding Algorithms for PV Systems. Part II: Active Methods", 2006 12th International Power Electronics and Motion Controls Conference.
17. T. Skocil, O. Gomis-Bellmunt, D. Montesinos-Miracle, S. Galceran-Arellano and J. Rull-Duran. "Passive and Active Methods of Islanding for PV systems", 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications.
18. P. Mahat, Z. Chen and B. Bak-Jensen. "Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation", 2008 Third International Conference of Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies.
19. A. Safari. "A Novel Islanding Detection Technique for Distributed Generation (DG) Units in Power Systems", International Journal of Advanced Science and Technology, February 2013.
20. A. Etxegarai, P. Eguía and I. Zamora. "Analysis of Remote Islanding Detection Methods for Distributed Resources", 13-15 April, Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 2011, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11).
21. Rohit S. Kunte and Wenzhong Gao. "Comparison and Review of Islanding Detection Techniques for Distributed Energy Resources", 2008 40th North American Power Symposium.
22. Ν. Στεφόπουλος και Π. Τριανταφύλλου, Διπλωματική Εργασία "Διερεύνηση Προβλημάτων Νησιδοποίησης σε Δίκτυα Διανομής με Ιδιοπαραγωγούς", Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Θεσσαλονίκη 2011.
23. Ι. Καφούρου, Διπλωματική Εργασία "Αξιολόγηση της Προστασίας σε Κατανεμημένη Παραγωγή", Πολυτεχνική Σχολή του Πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Φεβρουάριος 2010.
24. Gab-Su Seo, Kyu-Chan Lee and Bo-Hyung Cho. "A New DC Anti-Islanding Technique of Electrolytic Capacitor-Less Photovoltaic Interface in DC Distribution Systems", 2013 IEEE Transactions on Power Electronics.
25. Gab-Su Seo, Kyu-Chan Lee and Bo-Hyung Cho. "DC Islanding Detection Algorithm Using Injection Current Perturbation Technique for Photovoltaic Converters in DC Distribution", 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
26. Christina N. Papadimitriou, Vasilis A. Kleftakis, and Nikos D. Hatziargyriou. "A Novel Method for Islanding Detection in DC Networks", 2017 IEEE Transactions on Sustainable Energy.
27. Vasilis A. Kleftakis, Dimitris T. Lagos, Christina N. Papadimitriou, and Nikos D. Hatziargyriou. "Seamless transition between interconnected and islanded operation of DC Microgrids", 2017 IEEE Transactions on Smart Grid.
28. Ahmed Mohey I. Mohamad, and Yasser A.-R. I. Mohamed. "Assessment and Performance Comparison of Positive Feedback Islanding Detection Methods in DC Distribution Systems", 2017 IEEE Transactions on Power Electronics.
29. Smitha K, Priyanka G. Aryar ,Renuka Bijlwan,Sachin Angadi. "Steady State Analysis of PID Controlled Boost Converter using State Space Averaging Technique", National Conference-NCPE-2k15, organized by KLE Society's Dr. M. S. Sheshgiri College of Engineering &

Technology, Belagavi, Special issue published by Multidisciplinary Journal of Research in Engineering and Technology, Pg.100-110.

30. A. Karimi, A. Pirayesh, T. S. Aghdam, M. Ajalli. "DC Micro Grid Small Signal Stability Analysis", 2013 18th Electronic Power Distribution Conference.
31. Amr Ahmed A. Radwan and Yasser Abdel-Rady I. Mohamed. "Networked Control and Power Management of AC/DC Hybrid Microgrids", 2017 IEEE Systems Journal.
32. Antip Ghosh Mayank Kandpal. "State-space average Modeling of DC-DC Converters with parasitic in Discontinuous Conduction Mode (DCM)", National Institute of Technology, Rourkela, May 2010.