



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

Μελέτη τεχνικών ελέγχου περιορισμού ρεύματος ενισχυμένης μεταβατικής  
ευστάθειας σε δίκτυα με αντιστροφείς

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοντάκης Μιχαήλ

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

Αθήνα, Μάρτιος 2023





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

Μελέτη τεχνικών ελέγχου περιορισμού ρεύματος ενισχυμένης μεταβατικής  
ευστάθειας σε δίκτυα με αντιστροφείς

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κοντάκης Μιχαήλ

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9η Μαρτίου 2023

.....  
N. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
ΣΤ. Παπαθανασίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Μάρτιος 2023

.....

Κοντάκης Μιχαήλ

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

Copyright © Κοντάκης Μιχαήλ, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την μελέτη τεχνικών ελέγχου περιορισμού ρεύματος ενισχυμένης μεταβατικής ευστάθειας σε δίκτυα με αντιστροφείς.

Αρχικά, γίνεται μια γενικότερη ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με έμφαση στην παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Παρουσιάζονται νέες τοπολογίες δικτύων για την καλύτερη αξιοποίηση των Α.Π.Ε. μαζί με τις απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν με βάση τους σύγχρονους Κώδικες Δικτύου των διεθνών προτύπων. Εισάγεται ακόμη η έννοια των 'έξυπνων αντιστροφέων' με τις βασικές μορφές ελέγχου τους και με μερικές βοηθητικές εφαρμογές του.

Ύστερα γίνεται η μοντελοποίηση και η περιγραφή ενός δικτύου με αντιστροφέα grid-supporting-grid-forming, και αναλύεται η δομή και η λειτουργία των επιμέρους στοιχείων του, των ελεγκτών τάσης, ρεύματος και droop.

Ακολούθως, επεξηγείται η κατάσταση περιορισμού ρεύματος κατά την διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος και η μεταβατική ευστάθεια σε δίκτυα με αντιστροφείς, εισάγοντας την έννοια της εικονικής γωνίας ισχύος, περιγράφοντας δυο καταστάσεις αστάθειας. Έπειτα περιγράφονται οι τεχνικές ελεγχόμενου περιορισμού του ρεύματος που μελετήθηκαν και εφαρμοστήκαν στο μοντελοποιημένο δίκτυο, για την ενίσχυση της μεταβατικής ευστάθειας, ο έλεγχος droop ενισχυμένης ευστάθειας και η εικονική εμπέδηση. Τονίζεται ότι οι μέθοδοι αυτοί αποτελούν εργαλεία για τον περιορισμό ρεύματος σε δίκτυα με grid-forming αντιστροφείς.

Τέλος γίνεται η υλοποίηση και προσομοίωση του δικτύου με grid-supporting-grid-forming αντιστροφέα στο Matlab Simulink. Το δίκτυο υποβάλλεται σε βραχυκύκλωμα έχοντας μόνο περιοριστή ρεύματος, αποδεικνύοντας ότι το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια, με έλεγχο droop ενισχυμένης ευστάθειας και με εικονικής εμπέδηση για κάθε μια από τις δυο περιπτώσεις.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Αντιστροφέας πηγής τάσης, αλγόριθμος ελέγχου ρεύματος, αλγόριθμος ελέγχου τάσης, έλεγχος droop, ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Κώδικες δικτύου, περιορισμός ρεύματος, εικονική εμπέδηση, έλεγχος droop ενισχυμένης ευστάθειας, εικονική γωνία ισχύος

## **ABSTRACT**

The purpose of this thesis is to study enhanced transient stability current limiting strategies on grids with inverters.

Firstly, a general analysis of Power systems is done with emphasis on renewable energy sources. New grid topologies are displayed in order to better utilize them together with the demand of the new international Grid Codes. Smart inverters are introduced in conjunction with their basic forms of control and with some auxiliary services they offer.

Furthermore, the modeling of a grid with grid-supporting-grid-forming control is done, analyzing the structure and function of its voltage, current and droop controller.

In addition, the current limiting and the stability phenomenon on inverter based grids is described with the introduction of virtual power angle, depicting two cases of instability. Also, the current limiting techniques applied to the previously modeled grid in order to enhance its transient stability are described, enhanced droop control and virtual impedance. It is emphasized that this techniques are tool in order to limit the current in grid with grid-forming control.

Lastly, a simulation in MATLAB Simulink of the grid with grid-supporting-grid-forming control is done. The grid is studied with only current limiting unit, proving that the system is becoming unstable, with enhanced droop control and virtual impedance

## **KEY WORDS**

Voltage source converter, current control, voltage control, droop control, Power System stability, Grid codes, current limit, virtual impedance, stability enhanced droop control, Virtual Power Angle

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα.

Ευχαριστώ επίσης τους ερευνητές Άλκηστης Κοντού και Αλέξανδρο Πασπάτη για την άμεση καθοδήγηση και την στήριξη καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Με το τέλος αυτού του κύκλου των σπουδών μου θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την συνεχή υποστήριξη και τους φίλους μου που ήταν διπλά όλα αυτά τα χρόνια.





# Πίνακας Περιεχομένων

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>11</b>
1.1 Γενικά.....	11
1.2 Σκοπός της διπλωματικής.....	12
1.3 Δομή της διπλωματικής.....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΟΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ .....</b>	<b>14</b>
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ).....	14
2.2.1 Ιστορική Αναδρομή.....	14
2.2.2 Δομή Σ.Η.Ε.....	15
2.2.3 Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας .....	15
2.3 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Α.Π.Ε .....	16
2.4 Διεσπαρμένη παραγωγή .....	17
2.5 Μικροδίκτυο.....	17
2.6 “Εξυπνο” δίκτυο .....	19
2.7 Κανόνες Κώδικα Δικτύου .....	20
2.7.1 Εύρος διακύμανσης συχνότητας και τάσης.....	20
2.7.2 Έλεγχος ενεργού ισχύος.....	21
2.7.3 Έλεγχος άεργου ισχύος .....	22
2.7.4 Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας.....	23
2.8 “Εξυπνοι” μετατροπείς .....	24
2.8.1 Τύποι μετατροπέων μικροδικτύου.....	25
2.8.2 Έλεγχος droop .....	26
2.8.3 Έλεγχος εικονικής αδρανείας.....	26
2.8.4 Περιορισμός ρεύματος .....	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ GRID-SUPPORTING-GRID-FORMING .....</b>	<b>28</b>
3.1 Εισαγωγή.....	28
3.2 Μετασχηματισμός Park ( $dq0$ ) .....	28
3.3 Στοιχεία του δικτύου .....	30
3.3.1 Τριφασικός Αντιστροφάας .....	30
3.3.2 Έλεγχος ρεύματος .....	32
3.3.3 Έλεγχος τάσης.....	34
3.3.4 Έλεγχος droop $P\sim f$ και $Q\sim V$ .....	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ .....</b>	<b>39</b>
4.1 Εισαγωγή.....	39

4.2 Περιορισμός ρεύματος .....	39
4.3 Μεταβατική ευστάθεια.....	41
4.3.1 Περίπτωση $U' < PO / I_{max}$ .....	44
4.3.2 Περίπτωση $U' > PO / I_{max}$ .....	45
4.4 Μοντέλο Περιορισμού Ρεύματος με SEPFC.....	46
4.5 Μοντέλο Περιορισμού Ρεύματος με Εικονική εμπέδηση .....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ MATLAB SIMULINK.....</b>	<b>51</b>
5.1 Εισαγωγή.....	51
5.2 Περιγραφή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.....	51
5.3 Υλοποίηση μοντέλου ελέγχου.....	53
5.3.1 Υλοποίηση ελέγχου ρεύματος.....	53
5.3.2 Υλοποίηση ελέγχου τάσης .....	54
5.3.3 Υλοποίηση ελέγχου droop $P \sim f$ και $Q \sim V$ .....	55
5.4 Περιοριστής ρεύματος στα ρεύματα αναφοράς .....	55
5.5 Υλοποίηση Περιορισμού ρεύματος με SEPFC .....	56
5.6 Υλοποίηση Περιορισμού ρεύματος με Virtual Impedance .....	57
5.7 Προσομοιώσεις.....	58
5.7.1 Περίπτωση 1: Βραχυκύκλωμα Πτώσης τάσης στα $0.2 U'$ .....	58
5.7.2 Περίπτωση 2: Βραχυκύκλωμα Πτώσης τάσης στα $0.4 U'$ .....	66
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ .....</b>	<b>75</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>78</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά

Ο σύγχρονος άνθρωπος, εξαρτά την επιβίωση και την ευημερία του από την ηλεκτρική ενέργεια. Η πλειονότητα των συσκευών που χρησιμοποιεί καθημερινά λειτουργεί με ηλεκτρικό ρεύμα. Με την πάροδο του χρόνου, οι απαιτήσεις σε ενέργεια αυξάνονται όλο και περισσότερο. Ο άνθρωπος έχει επιδοθεί σε μια διαρκή αναζήτηση εξασφάλισης πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έως σήμερα, η πλειονότητα των πηγών ενέργειας, προέρχεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ο λιγνίτης, κ.α. Όμως, η χρήση ορυκτών καυσίμων, πέραν του γεγονότος ότι έχουν περιορισμένο χρονικό ορίζοντα χρήσης έχει ως κύριο αποτέλεσμα την επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Η καύση των ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, μολύνει τον αέρα και αποτελεί την κύρια αιτία αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα (παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα- $\text{CO}_2$ , υποξειδίου του αζώτου- $\text{N}_2\text{O}$  και μεθανίου- $\text{CH}_4$ ), προκαλώντας με τον τρόπο αυτό την κλιματική αλλαγή. Τα τελευταία χρόνια, ο περιορισμός της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων οδηγεί όλο και περισσότερο στην έρευνα και την ανάπτυξη πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φιλικών προς το περιβάλλον, όπως είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προσπαθώντας με τον τρόπο αυτό να μειωθεί ο ρυθμός μόλυνσης του περιβάλλοντος.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι μορφές ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διεργασίες, δεν απαιτείται κάποια ανθρώπινη παρέμβαση, όπως στην εξόρυξη, την άντληση ή την καύση, αλλά εκμεταλλευόμαστε την ήδη υπάρχουσα στη φύση ροή ενέργειας.

Τέτοιες πηγές ενέργειας είναι :

- Η αιολική ενέργεια
- Η ηλιακή ενέργεια
- Η Υδραυλική ενέργεια
- Η βιομάζα
- Η Γεωθερμική ενέργεια
- Η ωσμωτική ενέργεια
- Η ενέργεια από την θάλασσα (ενέργεια από παλίρροιες ,κύματα και από τους ωκεανούς)

Η μετάβαση στις ανανεώσιμες ή πράσινες πηγές ενέργειας υποστηρίζεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, που έχει θέσει ως στόχο να καταστήσουν την Ευρώπη ουδέτερη για το κλίμα έως το 2050. Οι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μακροπρόθεσμα, καλύπτουν την μείωση των συνολικών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και τη μείωση των εκπομπών σε επιμέρους τομείς, όπως της βιομηχανίας, των μεταφορών, της θέρμανσης, της ψύξης των κτηρίων, της γεωργίας, της χρήσης της γης, των αποβλήτων, της αλλαγής χρήσης της γης και της δασοκομίας (Land Use,

Land-Use Change and Forestry ,LULUCF). Υποστηρίζει ακόμη την μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένης της έντασης αερίων θερμοκηπίου, της έντασης CO<sub>2</sub>, του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος, των σχετικών εκτιμήσεων μακροπρόθεσμων επενδύσεων και των στρατηγικών για σχετική έρευνα, ανάπτυξη και καινοτομία .

Στα πλαίσια αυτού, η Ελλάδα, προσπαθεί να μειώσει και με τελικό στόχο να σταματήσει την χρήση του λιγνίτη και των υπολοίπων ορυκτών καυσίμων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στρεφόμενη στην βιομάζα, την ηλιακή και αιολική ενέργεια και γενικότερα σε πράσινες πηγές ενέργειας. Στην προσπάθεια αυτή, σημαντικό παράδειγμα αποτελεί το επίτευγμα της αυτονομίας του νησιού της Τήλου, που έχει κατορθώσει να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του νησιού κατά 100% τη χειμερινή και 70% την καλοκαιρινή περίοδο, μέσω ενός υβριδικού σταθμού παραγωγής. Ο υβριδικός σταθμός παραγωγής αποτελεί ένα καινοτόμο σύστημα που περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια, ένα φωτοβολταϊκό πάρκο, μονάδα αποθήκευσης ενέργειας και ένα πρωτότυπο σύστημα που ελέγχει σε πραγματικό χρόνο την παραγωγή ενέργειας.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι δυνατότητες που παρέχονται αναφορικά με την ανάπτυξη τους, οδηγούν και σε αλλαγή του μοντέλου παραγωγής. Έτσι το μοντέλο από συγκεντρωτικό, με λίγους και μεγάλους σταθμούς παραγωγής σε συγκεκριμένες θέσεις, μετατρέπεται σε αποκεντρωμένο, με πολλούς παραγωγούς, διάσπαρτους γεωγραφικά, που είναι είτε διασυνδεδεμένοι στο κεντρικό δίκτυο μεταφοράς είτε ανεξάρτητοι, συνδεδεμένοι σε τοπικό επίπεδο, οι οποίοι με τη σειρά τους μπορεί ή όχι να διασυνδέονται στο κεντρικό δίκτυο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρότερων δικτύων ικανών να λειτουργήσουν ευέλικτα εξυπηρετώντας τις τοπικές ανάγκες, χωρίς απαραίτητα την υποστήριξη κάποιου άλλου κεντρικού δικτύου. Η αποδοτικότερη μεταφορά της ενέργειας, η σωστή και ασφαλής λειτουργία ενός τέτοιου δικτύου, αποτελεί αντικείμενο συνεχούς μελέτης και βελτίωσης.

## 1.2 Σκοπός της διπλωματικής

Η ένταξη νέων πηγών ενέργειας, κυρίως ΑΠΕ, και η δημιουργία νέων δικτύων, ανεξάρτητων ή μη από ένα κεντρικό δίκτυο, ενέχει πολλές δυσκολίες αναφορικά με την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Οι δυσκολίες αυτές έχουν καταστήσει αναγκαίο την εφαρμογή νέων μεθόδων ελέγχου και προστασίας του δικτύου, έτσι ώστε η παροχή ισχύος να γίνει πιο εύκολη και πιο αποδοτική. Τα ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν εργαλεία ικανά να επιτελέσουν αρκετές από τις βοηθητικές λειτουργίες ενός δικτύου για την εξασφάλιση της ευστάθειας και της ομαλής λειτουργίας του. Τέτοιες λειτουργίες συμπεριλαμβάνουν τη δημιουργία εικονικής αδράνειας, τη μίμηση της λειτουργίας μια σύγχρονης γεννήτριας με την εξισορρόπηση τάσης και συχνότητας (έλεγχος droop), τον περιορισμό ρεύματος κ.τ.λ.. Μειονέκτημα των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η ευαισθησία τους σε μεταβατικά φαινόμενα λόγω της χαμηλής θερμικής αντοχής τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την μελέτη τεχνικών ελέγχου περιορισμού ρεύματος ενισχυμένης μεταβατικής ευστάθειας σε δίκτυα με αντιστροφείς.

Στα πλαίσια αυτής :

Μοντελοποιείται ένα δίκτυο με αντιστροφείς, τύπου Grid-supporting-grid-forming, με τον έλεγχο να αποτελείται από ένα ελεγκτή τάσης, ένα ελεγκτή ρεύματος και ένα ελεγκτή droop, με σκοπό την εφαρμογή και σύγκριση τεχνικών περιορισμού ρεύματος κατά την πτώση της τάσης στο δίκτυο .

Αναλύονται τα φαινόμενα του περιορισμού ρεύματος και της μεταβατικής ευστάθειας σε ένα τέτοιο δίκτυο, χρησιμοποιώντας ένα νέο μέγεθος, την εικονική γωνία ισχύος (Virtual Power Angle, VPA). Εξετάζονται δυο περιπτώσεις αστάθειας με βάση αυτό το μέγεθος.

Τέλος, εξετάζονται οι τεχνικές περιορισμού ρεύματος με χρήση εικονικής εμπέδησης (virtual impedance) και με ελεγκτή droop ενεργού ισχύος- συχνότητας ενισχυμένης ευστάθειας (Stability Enhanced P-f droop control, SEPFC) σε ένα δίκτυο που υποβάλλεται σε βραχυκύκλωμα πτώσης τάσης .

### 1.3 Δομή της διπλωματικής

Η δομή της παρούσας διπλωματικής αποτελείται από 6 κεφάλαια

- Στο Κεφάλαιο 1 που αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζουμε το γενικότερο πλαίσιο των συνθηκών κάτω από τις οποίες γίνεται αυτή η μελέτη μαζί με το αντικείμενο και την δομή της διπλωματικής
- Στο Κεφάλαιο 2 αναλύουμε τις μορφές του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, επικεντρώνοντας στα δίκτυα στα οποία χρησιμοποιούμε τεχνολογίες των ηλεκτρονικών ισχύος και γίνεται μια εισαγωγή στους κανονισμούς και τις τεχνολογίες των έξυπνων αντιστροφέων
- Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείτε η μοντελοποίηση των στοιχείων ελέγχου ενός τριφασικού δικτύου με έλεγχο Grid-supporting-grid-forming, αποτελούμενο από ελέγχους ρεύματος, τάσης και droop.
- Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται επεξήγηση του φαινομένου περιορισμού ρεύματος και της μεταβατικής ευστάθειας σε ένα δίκτυο με αντιστροφείς, αναλύοντας και μοντελοποιώντας τις δυο μεθόδους περιορισμού που μελετάμε .
- Στο Κεφάλαιο 5 υλοποιούνται τα στοιχεία που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια με MATLAB Simulink και πραγματοποιείτε η προσομοίωση, με το δίκτυο να υπόκειται σε διαταραχή που προκαλεί πτώση τάσης, εφαρμόζοντας τις δυο μεθόδους περιορισμού ρεύματος που περιεγράφηκαν παραπάνω.
- Τέλος στο Κεφάλαιο 6 εξάγεται το συμπέρασμα από την προσομοίωση

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΟΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ

### 2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, με μια σύντομη ιστορική αναδρομή, περιγράφοντας την δομή τους και τους σταθμούς παράγωγης ενέργειας με έμφαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., τονίζοντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ένταξης των Α.Π.Ε στα δίκτυα. Περιγράφονται οι μορφολογίες δικτύου της διεσπαρμένης παραγωγής ,του μικροδικτύου και του ‘έξυπνου’ δικτύου με τους κανονισμούς λειτουργίας που αναπτύχθηκαν με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση και αξιοποίηση των νέων μορφών ενέργειας. Τέλος παρουσιάζεται η τεχνολογία των έξυπνων αντιστροφέων μαζί με μερικές από τις εφαρμογές ελέγχου τους.

### 2.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

#### 2.2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η γέννηση των Συστημάτων Ηλεκτρικής ενέργειας προήλθε από τον G.Lane-Fox και τον Thomas Edison το 1870 για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε πελάτες για τον φωτισμό τους . Στις αρχές του 1880 , πραγματοποιήθηκαν καινοτομίες στο τομέα της μεταφοράς ενέργειας ,με τους Lucien Gaulard και John Dixon Gibbs να επιδεικνύουν τα οφέλη των μετασχηματιστών που επέτρεπαν την αλλαγή τάσης στο δίκτυο , καθώς και η εισαγωγή του εναλλασσόμενου ρευματος στα δίκτυα .Το 1882 λειτούργησε ο πρώτος σταθμός παραγωγής με συνεχές ρεύμα, χαμηλής τάσης στο Λονδίνο. Το 1886 ο William Stanley εγκατέστησε τον πρώτο πειραματικό σύστημα μεταφοράς με εναλλασσόμενο ρεύμα στην Μασαχουσέτη , με την πρώτη γραμμή μεταφοράς εναλλασσόμενου ρευμάτων να λαμβάνει χωρά το 1890 στο Ορεγκον .Η εφεύρεση της γεννήτριας και των πολυφασικών συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος από τον Nikola Tesla το 1893 σε συνδυασμό η δημιουργία του πρώτου υδροηλεκτρικού σταθμού στο Niagara Falls που προμήθευε το Μπάφαλο της Νέας Υόρκης με εναλλασσόμενο ρεύμα το 1896 επισφράγισαν την επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι του συνεχούς στην μεταφορά ενέργειας .

Τα πρώτα ηλεκτρικά σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος αντιμετώπιζαν πρόβλημα στην διασύνδεση τους, καθώς λειτουργούσαν με διαφορετικές συχνότητες όπως αυτές των 25,50,60,125 και 133 Hz . Λύση σε αυτό δόθηκε με την τυποποίηση των συχνοτήτων με την Ευρώπη να χρησιμοποιεί την συχνότητα των 50 Hz και την Β. Αμερική των 60 Hz.

Η ανάγκη για μεταφορά μεγάλων ποσών ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, οδήγησε στη αύξηση της τάσης που μπορούμε να μεταφέρουμε .Το 1907 λειτούργησε γραμμή μεταφοράς στα 100 kV ,το 1913 αυξήθηκε στα 150 kV και μέχρι το 1936 έφτασε στην μεταφορά τάσης έως 287 kV. Όμως, η εξέλιξη των γραμμών μεταφοράς δεν

έμεινε στάσιμη με την πρώτη γραμμή στα 500kV να λαμβάνει χώρα το 1965 και τέσσερα χρόνια μετά, το 1969, να έχει φτάσει τα 765 kV [14],[15].

### 2.2.2 Δομή Σ.Η.Ε

Το ηλεκτρικό δίκτυο, είναι ένα δίκτυο με σκοπό την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τον παραγωγό στον καταναλωτή. Αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

Α) Την Παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Περιλαμβάνει, τα εργοστάσια παραγωγής με χρήση ορυκτών καυσίμων, τις ανεμογεννήτριες, τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια κλπ.

Β) Το Δίκτυο Μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Περιλαμβάνει τις γραμμές που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο παραγωγής στο κέντρο διανομής.

Γ) Τη Διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενέργεια διανέμεται στον τελικό καταναλωτή, μέσω του δικτύου διανομής αφού πρώτα γίνει υποβιβασμός της τάσης στο επιθυμητό επίπεδο ανάλογα με το είδος του καταναλωτή (καταναλωτής χαμηλής ή μέσης τάσης).

### 2.2.3 Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τους οποίους παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια [16] .

1. Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής. Σε αυτούς ανήκουν οι ατμοηλεκτρικοί και οι πυρηνικοί σταθμοί, οι οποίοι χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσο παράγωγης (εξωτερική καύση), καθώς και οι πετρελαϊκοί και φυσικού αερίου, οι οποίοι χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης όπως εμβολοφόρες ντιζελογεννήτριες και αεριοστρόβιλοι.
2. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής. Αξιοποιώντας την δυναμική ενέργεια του νερού, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί με τη βοήθεια υδροστροβίλων, τη μετατρέπουν σε κινητική. Ειδικότερα στους αντλητικούς σταθμούς, οι υδροστροβίλοι μπορούν να λειτουργήσουν και σαν αντλίες για την αποταμίευση του νερού ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου.
3. Εναλλακτικοί σταθμοί παραγωγής. Στους εναλλακτικούς σταθμούς παράγωγης ανήκουν οι σταθμοί παράγωγης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.). Σε αυτούς τους σταθμούς εντάσσονται και οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, με ισχύ μικρότερη των 10 MW. Οι πιο διαδεδομένοι εναλλακτικοί σταθμοί παραγωγής είναι τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, που αξιοποιούν τον άνεμο και την ακτινοβολία του ήλιου αντίστοιχα.

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, είναι εφικτός και ο συνδυασμός διαφορετικών μονάδων παράγωγης. Τέτοιοι σταθμοί παράγωγης που αξιοποιούν περισσότερες διαφορετικές μονάδες παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται υβριδικοί σταθμοί παράγωγης. Συνδυάζουν συνήθως ανανεώσιμες μορφές ενέργειας με συμβατικά μέσα παράγωγης, Σκοπός μιας τέτοιας μονάδας είναι η αδιάλειπτη παροχή

της ζητούμενης ισχύος στο δίκτυο, την όποια δεν μπορεί να καλύψει με βεβαιότητα ένα σύστημα Α.Π.Ε

## 2.3 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Α.Π.Ε

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας ή νέες πηγές ενέργειας ή πράσινη ενέργεια είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες.

Βασικά πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελούν η μηδενική επιβάρυνση στο περιβάλλον, αφού δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας και το γεγονός ότι είναι ανεξάντλητες (με εξαίρεση την γεωθερμική ενέργεια που δημιουργείται σε βάθος χιλιοτιών), σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα τα όποια υπάρχουν σε πεπερασμένη ποσότητα και σχηματίζονται σε βάθος εκατομμυρίων χρόνων. Η κατασκευή μονάδων ΑΠΕ είναι απλή, έχουν μεγάλο χρόνο ζωής και χρειάζονται λιγότερο συντήρηση σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας .

Η ευκολία πρόσβασης στις ΑΠΕ, πρωτίστως στην ηλιακή ενέργεια και δευτερευόντως στην αιολική, δίνει την δυνατότητα στους καταναλωτές να γίνουν οι ίδιοι παραγωγοί, συμβάλλοντας στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος και στη μείωση των απωλειών κατά την μεταφορά ενέργειας. Σε μεγαλύτερη κλίμακα μπορούν να βοηθήσουν στην ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσομένων χωρών που μέχρι τώρα εξαρτώνται από την εισαγωγή προϊόντων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Τέλος, η τιμή του ορυκτού καύσιμου εξαρτάται από την διαθεσιμότητα του και επηρεάζεται των πληθωρισμό, ενώ αντίθετα οι μονάδες ΑΠΕ εξαρτώνται στο μεγαλύτερο ποσοστό μόνο από το κόστος εγκατάστασης, βοηθώντας έτσι στη σταθερότητα των τιμών παγκοσμίως.

Παρότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν παράγουν ρίπους κατά την λειτουργία τους, πολλά από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία τους, κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας ορυκτά καύσιμα. Στην περίπτωση των αιολικών πάρκων υπάρχουν αντιδράσεις πάνω στην αισθητική του τοπίου, το θάνατο πτηνών και τον θόρυβο που προκαλούν.

Όμως, τα μεγαλύτερα εμπόδια της ένταξης των μονάδων ΑΠΕ (ιδιαίτερα των Α/Π) στα ΣΗΕ οφείλονται στον χαμηλό συντελεστή απόδοσης, στην αδυναμία αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, καθώς και την εξάρτησή τους από το κλίμα της περιοχής και τις καιρικές συνθήκες. Ο χαμηλός συντελεστής απόδοσης έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για μεγαλύτερη επιφάνεια γης έτσι ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες σε ενέργεια. Η εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες, δημιουργεί αβεβαιότητα για την δυνατότητα της μονάδας να καλύψει την ζητούμενη ενέργεια κάθε χρονική στιγμή. Αποτέλεσμα αυτού είναι, πολλές φορές να μην επαρκεί η μονάδα ΑΠΕ για την κάλυψη των αναγκών της περιοχής, με συνέπεια να χρησιμοποιείται υβριδικός σταθμός παραγωγής. Παραπάνω αναφέραμε το χαμηλό κόστος συντήρησης, όμως η εγκατάσταση των μονάδων παραγωγής και των μονάδων αποθήκευσης είναι ιδιαίτερα



κοστοβόρος. Τέλος, η συνεχής διακοπή και παροχή ενέργειας μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα ευστάθειας στο σύστημα.

## 2.4 Διεσπαρμένη παραγωγή

Η διεσπαρμένη παραγωγή, ή στα αγγλικά Distributed Energy Source, ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1kW μέχρι 100MW. Είναι μία σχετικά καινούρια τάση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας [17]. Στην διεσπαρμένη παραγωγή, η παραγωγή και η κατανάλωση του φορτίου λαμβάνει χώρα σε μικρή απόσταση η μια από την άλλη. Αποτελεί την πρώτη μέθοδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς τα πρώτα δίκτυα δημιουργούνταν με σκοπό την εξυπηρέτηση των τοπικών αναγκών. Με το χρόνο τα μικρά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας συγχωνεύθηκαν και έδωσαν την θέση του σε πιο μεγάλα, κεντρικά δίκτυα για την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως τα τελευταία χρόνια έχει επανέλθει στο προσκήνιο η λειτουργία των δικτύων διεσπαρμένης παραγωγής λόγω των μεγάλων απαιτήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια από τους καταναλωτές, τον περιορισμό στην κατασκευή μεγάλων γραμμών μεταφοράς, καθώς και την ανάπτυξη τεχνολογιών που υποστηρίζουν αυτήν την μορφή δικτύου. Η διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας, πέρα από τις τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα μπορούν να εντάξουν και τεχνολογίες που υποστηρίζουν την εισαγωγή των Α.Π.Ε σε ένα τέτοιο δίκτυο.

Η λειτουργία του συστήματος διεσπαρμένης παραγωγής βασίζεται στην κατανομή της παραγωγής, στην αποθήκευση της ενέργειας και στην ανταπόκριση του στην εκάστοτε ζήτηση ενέργειας των τοπικών καταναλωτών. Το παραδοσιακό, κεντρικό δίκτυο δεν αποθηκεύει την ενέργεια, αλλά η ενέργεια παράγεται με βάση την ζήτηση. Στο διεσπαρμένο δίκτυο όμως επιστρατεύονται τεχνικές αποθήκευσης όπως μπαταρίες, αποθήκευση με συμπιεσμένο αέρα, υπερπυκνωτές κτλ έτσι ώστε να παρέχει λειτουργίες μετατόπισης χρόνου ενέργειας, αποθηκεύοντας σε περιόδους πλεονάσματος και απελευθερώνοντας σε περιόδους ελλείμματος, συμβάλλοντας στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Τέλος σε ένα τέτοιο δίκτυο μειώνονται οι απώλειες λόγω μεταφοράς μαζί με το κόστος αφού η παραγωγή είναι δίπλα στον καταναλωτή.

## 2.5 Μικροδίκτυο

Το μικροδίκτυο αποτελεί ένα τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που συντάσσεται από την ενοποίηση κατανεμημένων ενεργειακών πόρων, τα οποία δημιουργήθηκαν ως απόρροια της ανάγκης μας για μεγαλύτερη αυτονομία και ευελιξία στο δίκτυο. Τα μικροδίκτυα είναι συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ανταποκρίνονται στις ενεργειακές απαιτήσεις και στις ανάγκες απόδοσης των καταναλωτών ενέργειας. Ανεξάρτητα από την ονομασία τους, τα μικροδίκτυα δεν αναφέρονται σε δίκτυα μικρού μεγέθους, αλλά στην ικανότητα τους να εξυπηρετούν τοπικές ανάγκες αυτόνομα είτε σε συνδυασμό με κάποιο κεντρικό ή άλλο δίκτυο. Τα μικροδίκτυα είναι αυτόνομα, αλλά έχουν την δυνατότητα να υποστηρίζονται ή και να υποστηρίζουν το ευρύτερο σύστημα δικτύου ηλεκτρισμού. Ακόμη συνδυάζουν ποικιλία τύπων

παραγωγής με μεγάλη έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Εντάσσοντας την τεχνολογία των έξυπνων αισθητήρων και μετατροπέων στην λειτουργία του συστήματος, είναι δυνατή η βελτίωση της απόδοσης του.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα μικροδίκτυα λειτουργούν είτε συνδεδεμένα με ένα ευρύτερο ηλεκτρικό δίκτυο είτε απομονωμένα (νησιδοποίηση).

Τα μικροδίκτυα απομονωμένης λειτουργίας, προμηθεύονται ενέργεια από μια μεμονωμένη εγκατάσταση είτε από πολλαπλούς παραγωγούς. Παρότι δεν εξαρτώνται από κάποιο άλλο δίκτυο, σε περίοδο ελλείμματος αδυνατούν να λάβουν ενέργεια από κάποια πηγή εκτός αυτού. Ένα τέτοιο σύστημα αξιοποιείται σε απομακρυσμένες περιοχές, περιοχές με ασταθές τοπικό δίκτυο ηλεκτρισμού και σε αυτές που απαιτείται αυτάρκεια στην παροχή ενέργειας.

Αντιθέτως, τα μικροδίκτυα συνδεδεμένα στο τοπικό δίκτυο έχουν την δυνατότητα να παρέχουν και να τους παρέχεται ενέργεια από αυτό. Πρόβλημα σε αυτά τα δίκτυα συναντάται σε περίπτωση βλάβης στο ευρύτερο δίκτυο, που με την σειρά του είναι δυνατό να προκαλέσει βλάβη και στο μικροδίκτυο. Για την αποφυγή ενός τέτοιου ενδεχόμενου, το σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ικανό να μεταβεί σε κατάσταση απομονωμένης λειτουργίας (islanded mode).



Εικόνα 2.2 Σύστημα μικροδικτύου [20]

Τα μικροδίκτυα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες με βάση την αρχιτεκτονική του συστήματος και τα χαρακτηριστικά της τάσης [17]:

- α) στα μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος AC
- β) στα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος DC και
- γ) στα υβριδικά AC/DC μικροδίκτυα.

Τα μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος AC αποτελούν την πιο συχνή κατηγορία μικροδικτύου. Ενσωματώνουν στο δίκτυο μέσω μετατροπέων ισχύος, διάφορα είδη πηγών ενέργειας, όπως αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκοί σταθμοί κτλ. Οι μετατροπές που χρειάζεται να γίνουν στο κυρίως σύστημα για να γίνει η ένταξη ενός τέτοιου μικροδικτύου είναι ελάχιστες, καθώς τα περισσότερα συμβατικά δίκτυα λειτουργούν

και αυτά με εναλλασσόμενο AC ρεύμα. Η ένταξη τους γίνεται συνήθως σε δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης και προσφέρουν καλύτερη ροή ισχύος στο δίκτυο διανομής και μειωμένες απώλειες κατά την μεταφορά. Σημαντικό κομμάτι ενός τέτοιου δικτύου είναι ο σωστός έλεγχος του, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα του συστήματος και ο συγχρονισμός των διαφόρων πηγών ενέργειας.

Τα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος DC αποτελούν απόρροια της τεχνολογικής προόδου των ηλεκτρονικών ισχύος. Σημαντικό πλεονέκτημα τέτοιων μικροδικτύων είναι η απουσία άεργου ισχύος καθώς και ο περιορισμός σταδίων μετατροπής ενέργειας .

Τέλος, τα υβριδικά μικροδίκτυα, αποτελούν τον συνδυασμό των μικροδικτύων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Σκοπός ενός υβριδικού μικροδικτύου είναι η εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων του κάθε είδους. Η ενσωμάτωση τους στο δίκτυο είναι άμεση και προσφέρουν μείωση στις δαπανηρές σε απώλειες μετατροπές ενέργειας. Όμως ο συντονισμένος έλεγχος των μικροδικτύων αυτού του τύπου αποτελεί μια πρόκληση καθώς ο συνδυασμός του εναλλασσόμενου και του συνεχούς ρεύματος αποτελεί μια πολύπλοκη εφαρμογή.

Μια ακόμη κατηγοριοποίηση γίνεται στα μικροδίκτυα και αφορά τις εφαρμογές τους. Οι κατηγορίες των μικροδικτύων με βάση τις εφαρμογές είναι :

- Τα εμπορικά και βιομηχανικά μικροδίκτυα
- Τα κοινοτικά μικροδίκτυα
- Τα μικροδίκτυα στρατιωτικού σκοπού
- Τα μικροδίκτυα ακαδημαϊκού σκοπού
- Τα απομακρυσμένα μικροδίκτυα

## 2.6 “Έξυπνο” δίκτυο

Το «Έξυπνο» δίκτυο είναι ένα αναβαθμισμένο δίκτυο ενέργειας στο οποίο έχουν προστεθεί, η αμφίδρομη ψηφιακή επικοινωνία μεταξύ προμηθευτή και καταναλωτή και έξυπνα συστήματα μέτρησης, παρακολούθησης και ελέγχου. Το ευφυές δίκτυο έχει την ικανότητα να ανιχνεύει και να αντιδρά σε αλλαγές κατά την λειτουργία του. Για να το επιτελέσει αυτό συνδυάζει τεχνολογίες όπως αυτή των Smart inverters, μεγάλων βάσεων δεδομένων, στατιστικής κ.τ.λ.

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για την ανάπτυξη ενός τέτοιου δικτύου με τους κυριότερους να αποτελούν η εξέλιξη των οργάνων μέτρησης και οι αλλαγές στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και των κανονισμών που την διέπουν .Ακόμη αποτελεί ένα ακόμα εργαλείο για την αποκεντροποίηση της παραγωγής ενέργειας και την «έλευση» των λεγόμενων prosumer, δηλαδή ιδιωτών που παράγουν και καταναλώνουν την ενέργεια . Τέλος, η ανάπτυξη των μικροδικτύων (microgridstovn ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και νέων τεχνολογιών που αξιοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια (π.χ ηλεκτρικά αυτοκίνητα ), απαιτεί την ανάγκη για ένα δίκτυο ικανό να τις συνδυάσει αποτελεσματικά.

Η βασική διάφορα ενός smart grid και ενός παραδοσιακού δικτύου είναι η δυνατότητα του δικτύου να διαχειριστεί την πολυπλοκότητα που εντάσσεται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, πιο αποτελεσματικά σε σχέση με το παραδοσιακό δίκτυο .

Οι προοπτικές που μας προσφέρει ένα τέτοιο δίκτυο είναι :

- Η διευκόλυνση στη σύνδεση και λειτουργία διαφορετικών παραγωγών ενέργειας ανεξαρτήτως μεγέθους και τεχνολογίας, με αυξημένη την εισαγωγή συστημάτων παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές
- Η δυνατότητα του καταναλωτή να παίζει ενεργό ρολό στην λειτουργία του συστήματος και στην παραγωγή ενέργειας
- Μεγαλύτερο εύρος πληροφοριών και επιλογών στον καταναλωτή για τον τρόπο χρήσης της προμήθειας της ηλεκτρικής ενέργειας
- Μειωμένη επιβάρυνση στο περιβάλλον
- Γρηγορότερη επαναφορά του δικτύου μετά από διαταραχές
- Λιγότερες απώλειες κατά την μεταφορά ενέργειας

Παρόλο που η έννοια του έξυπνου δίκτυο αναφέρεται στην αμφίδρομη ροή των δεδομένων και του ηλεκτρισμού(καταναλωτής γίνεται και παραγωγός ,prosumer), ο Όρος έχει επεκταθεί και εντάσσει σε αυτό και άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα τέτοιες είναι οι τεχνολογίες των μεγάλων δεδομένων, της στατιστικής με την χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης ,τεχνολογίες IoT ( Internet of Things) και του Edge Computing κ.α.

## 2.7 Κανόνες Κώδικα Δικτύου

Η διείσδυση των ΑΠΕ και ειδικότερα των Ανεμογεννητριών (Α/Γ) στο δίκτυο πρέπει να ακολουθούν κάποιες τεχνικές απαιτήσεις ώστε να περιοριστούν τα προβλήματα στην ευστάθεια που μπορεί να δημιουργήσουν στο δίκτυο. Οι διαχειριστές του δικτύου με βάση αυτό έχουν διαμορφώσει ένα σύνολο απαιτήσεων και οφελών που θα πρέπει να ικανοποιούνται από τους καταναλωτές και παραγωγούς που συμμετέχουν σε αυτό. Αυτοί οι κανόνες ονομάζονται Κανόνες Κώδικα δικτύου και αναλύονται παρακάτω [7]. ‘

### 2.7.1 Εύρος διακύμανσης συχνότητας και τάσης

Σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, η μεταβολή του φορτίου κατανάλωσης ή της παραγωγής προκαλούν αποκλίσεις από την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας του δικτύου. Οι αποκλίσεις αυτές δημιουργούν πρόβλημα στην ευστάθεια του συστήματος.

Σύμφωνα με τον κώδικα δικτύου, οι Α/Γ θα πρέπει να είναι ικανές να λειτουργήσουν αδιάκοπα εντός των επιθυμητών ορίων συχνότητας και τάσης. Ακόμη, η λειτουργία

τους θα πρέπει να συνεχίζει σε περίπτωση απόκλισης από τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας και σε μερικές περιπτώσεις παράγοντας συγκεκριμένη ποσότητα ενεργής ισχύος .

Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικά, ο κώδικας δικτύου που αφορά την διακύμανση της συχνότητας σε δέκα διαφορετικές χώρες (εικόνα 2.3)

	England and Wales	Nordic		Scotland	Romania	Ireland	Denmark
53.5							
53							
52.5				Disconnection within 1 s			
52		3 min, power reduction possible at any level					
51.5							
51		30 min, small <i>P</i> reduction		2% active power reduction per Hz	Continuous with 20% max power losses	60 min	15 min 60%–100% of power
50.5							
50		Continuous					
49.5							
49	Max 5% linear active power reduction	Full power		Max 5% linear active power reduction	Continuous-linear power reduction <20% proportional to frequency deviation		
48.5		30 min, linear reduction from 100% to 85%				60 min	5 hrs 90%–100% power 30 min 90%–100% power 3 min, 80%–100% power
48							
47.5	20 s			20 s	20 s, 80% power	20 s	20 s, 80%–100% power
47							
46.5				Disconnection within 1 s			
46							

	France	Spain	Cyprus	Germany	Belgium	Italy	Poland	Sweden
53.5								
53								
52.5				Fast automatic disconnection			Disconnection within 300 ms	
52								
51.5	20 s, power set by TSO							30 min at reduced power output
51	15 min, power set by TSO				Time by agreement			
50.5	60 min, 90% power		60 min	30 min			Reduced power output	Nominal power
50								
49.5								Nominal power
49	5 hrs, 90% power						30 min, 90% power	
48.5	3 min, 90% power			30 min			20 min, 85% power	30 min <5% power reduction
48	3 min, 85% power			20 min	Time by agreement		10 min, 20% power	
47.5	20 s, 80% power	3 s	60 min	10 min				
47			5 s					
46.5				Fast automatic disconnection				
46								

Εικόνα 2.3 Διακύμανση συχνότητας σε δέκα διαφορετικές χώρες [7]

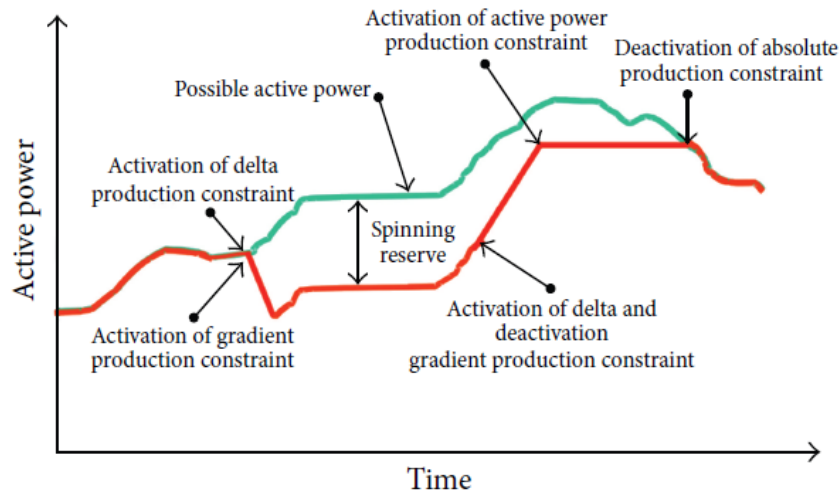
Με πράσινο συμβολίζονται οι συχνότητες στις οποίες οι Α/Γ θα πρέπει να είναι συνεχώς συνδεδεμένες στο δίκτυο και να λειτουργούν με την μέγιστη απόδοση τους. Στις λευκές συχνότητες θα πρέπει να λειτουργούν με μικρότερη απόδοση και να παραμείνουν στο δίκτυο τον χρόνο που παρουσιάζει ο πίνακας. Ενώ το γκρι χρώμα θα πρέπει να γίνει η αποσύνδεση των Α/Γ.

## 2.7.2 Έλεγχος ενεργού ισχύος

Ο έλεγχος ενεργού ισχύος αφορά την ικανότητα των Α/Γ να ελέγχουν την ενεργό ισχύ εξόδου τους σε συγκεκριμένα επίπεδα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε αποσυνδέοντας μερικές τουρμπίνες είτε αλλάζοντας την γωνία των φτερών των Α/Γ. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να περιορίσουμε υψηλές μεταβολές συχνότητας και να παρέχουν υποστήριξη στην συχνότητα του δικτύου.

Παράδειγμα, ο έλεγχος ενεργού ισχύος της Δανίας αποτελεί τον πιο απαιτητικό κανονισμό, με την λειτουργία ελέγχου που πρέπει να ικανοποιούν να περιγράφεται

από την εικόνα 2.4. Στο δίκτυο της Δάνειας, θα πρέπει τα αιολικά πάρκα να είναι σε θέση να μεταβάλουν την ενεργό ισχύ του, από το 10% στο 100% τις ονομαστικής ισχύος  $P_N$  σε περίπτωση που ο χειριστής το ζητήσει .

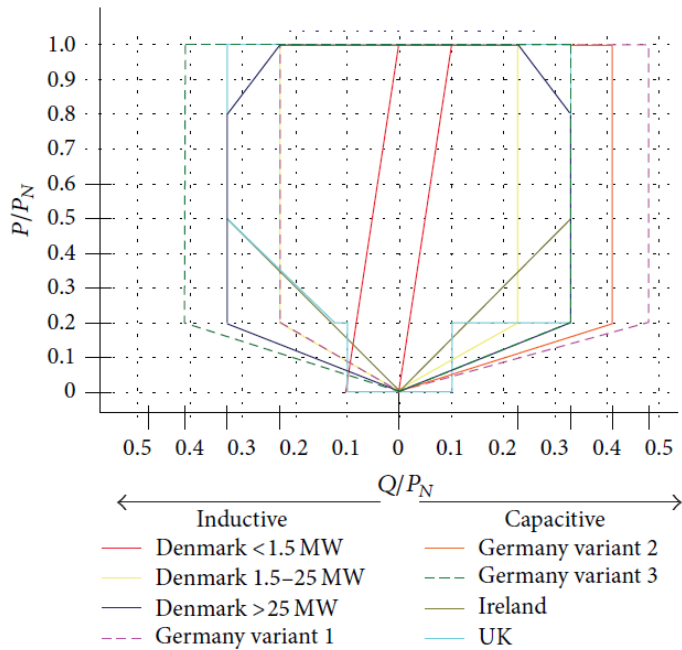


Εικόνα 2.4 Απαιτήσεις κώδικα δικτύου στο έλεγχο ενεργού ισχύος στην Δανία[7]

### 2.7.3 Έλεγχος άεργου ισχύος

Τα δίκτυα πλέον έχουν την απαίτηση από τα αιολικά πάρκα να συνεισφέρουν στον χειρισμό της τάσης του συστήματος. Όπως η ενεργός ισχύς αποτελεί μέσο ελέγχου της συχνότητας, έτσι και η άεργος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης, αλλάζοντας τον συντελεστή ισχύος από επαγωγικό σε χωρητικό ή και αντίστροφα.

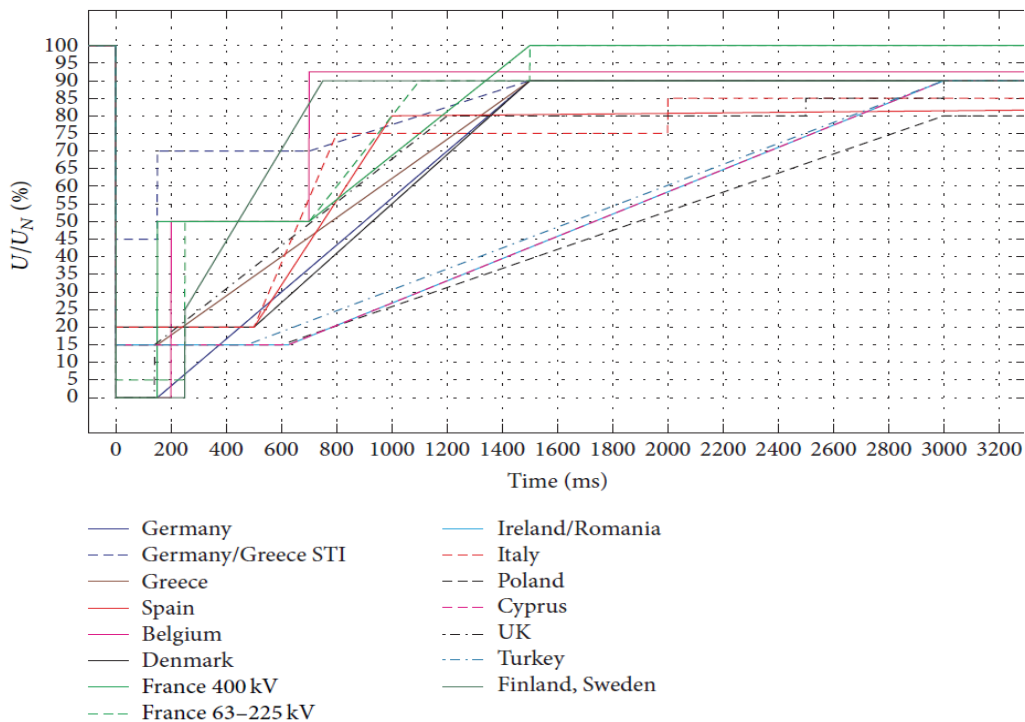
Το Α/Π θα πρέπει να έχει την ικανότητα απορρόφησης και να έγχυσης άεργου ισχύος στο δίκτυο, επηρεάζοντας τα επίπεδα τάσης στο σημείο κοινής ζεύξης (point of common coupling, PCC). Πρέπει να είναι ικανά να στηρίξουν την ζήτηση άεργου ισχύος και την τάση στο σημείο κοινής ζεύξης κατά τις ξαφνικές μεταβολές τάσης .



Εικόνα 2.5 Απαιτήσεις κώδικα δικτύου στην άεργο ισχύ σε διάφορες χώρες [7]

#### 2.7.4 Ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας

Η ικανότητα συνεχούς λειτουργίας των Α/Γ, ανεξαρτήτως των διαταραχών του δικτύου αποτελεί την πιο σημαντική απαίτηση των κανονισμών του δικτύου. Οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να είναι ικανές να μένουν λειτουργικές και να υποστηρίζουν το δίκτυο κατά την διάρκεια του σφάλματος και μετά από αυτό. Κατά την διάρκεια των σφαλμάτων πολλές φορές επιτρέπεται από τις μονάδες παραγωγής να αποσυνδέονται από το δίκτυο με αποτέλεσμα η μαζική αποσύνδεση να προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Οι Α/Γ θα πρέπει να αντέχουν την πτώση της τάσης για ένα συγκεκριμένο χρόνο και να λειτουργήσουν υπό χαμηλή τάση. Για αυτό αναφερόμαστε σε αυτές τις απαιτήσεις ως απαιτήσεις αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση (Low Voltage Ride Through).



Εικόνα 2.6 Απαιτήσεις του ποσοστού επί τις εκατό πτώσης τάσης με το χρόνο λειτουργίας σε διάφορες χώρες[7]

## 2.8 “Έξυπνοι” μετατροπείς

Η αυξανόμενη ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δημιούργησε την ανάγκη για τη βελτίωση των υποδομών του δικτύου. Το δίκτυο θα πρέπει να ανταποκριθεί στην διακοπτόμενη φύση αυτών των εναλλακτικών μορφών ενέργειας και να εγγυηθεί την ευσταθή λειτουργία του, καθώς και την ικανοποίηση των απαιτήσεων των καταναλωτών. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί με την ένταξη των έξυπνων μετατροπέων η αλλιώς Smart inverters σε αυτό.

Ο έξυπνος μετατροπέας χαρακτηρίζεται από την ψηφιακή του αρχιτεκτονική, την δυνατότητα του για αμφίδρομη επικοινωνία με το δίκτυο και την συμπαγή δομή του λογισμικού του. Ο smart inverter πρέπει να προσαρμόζεται στις συνθήκες του δικτύου, να επικοινωνεί με το σύστημα σε σύντομο χρονικό διάστημα, καθώς και να μοιράζεται δεδομένα που αφορούν την λειτουργία του. Τέτοιο σύστημα επιτρέπει στους τεχνικούς να διαγνώσουν ή ακόμη και να προβλέψουν πιθανά προβλήματα στην λειτουργία του δικτύου και να ελέγχουν ή να προσαρμόσουν παραμέτρους του, κάθε στιγμή τοπικά ή από απόσταση.

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα, τα δίκτυα με ‘έξυπνους’ μετατροπείς αντιμετωπίζουν πρόβλημα αναφορικά με την αδράνεια του συστήματος. Η διατήρηση της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή σε ένα κλασικό δίκτυο, βασιζόταν στις σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες αξιοποιούσαν την υψηλή τους αδράνεια και κατ’ επέκταση την κινητική τους ενέργεια, στην περίπτωση εμφάνισης κάποιας αστάθειας του συστήματος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος όμως προσφέρουν χαμηλότερα επίπεδα



αδράνειας στο σύστημα, εξαιτίας της απουσίας περιστρεφόμενων μερών. Αποτέλεσμα τις ένταξης όλο και περισσότερων ηλεκτρονικών ισχύος στο δίκτυο είναι η μείωση της αδράνειας του συστήματος, με αποτέλεσμα τυχόν αστάθεια στο σύστημα σε περίπτωση μεταβατικών φαινομένων. Λύση στο πρόβλημα μπορεί να δοθεί εισάγοντας συστήματα ελέγχου που θα βελτιώσουν την αδράνεια του συστήματος μιμούμενα τις σύγχρονες γεννήτριες. Τέτοιες μέθοδοι ελέγχου, αποτελούν, ο έλεγχος εικονικής αδρανείας με ελεγκτή  $P_i$ , ο έλεγχος με ενισχυμένο ελεγκτή ενεργού ισχύος-τάσης, ο έλεγχος με εικονική γη, ο έλεγχος με βρόγχο κλειδωμένης φάσης κτλ. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά εφαρμογές ελέγχου σε δίκτυα που λειτουργούν με ηλεκτρονικά ισχύος.

### 2.8.1 Τύποι μετατροπών μικροδικτύου

Βασικό δομικό στοιχείο του μικροδικτύου αποτελούν οι μετατροπείς ισχύος. Οι μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται στα μικροδίκτυα είναι κυρίως οι αντιστροφείς ή inverters (DC-AC μετατροπείς), οι ανορθωτές (AC-DC μετατροπείς) και οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC-DC μετατροπείς).

Σε ένα σύστημα διεσπαρμένης παραγωγής όπως οι ανεμογεννήτριες είναι επιθυμητή η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, ώστε στην συνέχεια για την μετατροπή της πάλι σε εναλλασσόμενη να χρησιμοποιηθούν αντιστροφείς για την πραγματοποίηση του ελέγχου της ενέργειας της.

Οι αντιστροφείς είναι απαραίτητοι σε κάθε μικροδίκτυο και ανάλογα με τον έλεγχο που χρησιμοποιείται, μπορούν να καθορίσουν την μορφή και τη λειτουργία του δικτύου. Οι αντιστροφείς του μικροδικτύου μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με τον έλεγχο τους [4]:

- Grid-forming,
- Grid-feeding,
- Grid-supporting-Grid-forming (GSGFm) και ο
- Grid-supporting-Grid-feeding .

Οι αντιστροφείς με έλεγχο Grid-forming, Grid-feeding αποτελούν μέσα ελέγχου έγχυσης ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο. Ο grid-forming ελέγχει την ισχύ του συστήματος ρυθμίζοντας απευθείας την τάση του τοπικού δικτύου ενώ ο grid ελέγχοντας τα εγχεόμενα ρεύματα στο δίκτυο. Ο πρώτος κατά την λειτουργία του χωρίς φορτίο παρέχει μια τάση αναφοράς στα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου, αντίθετος ο δεύτερος απαιτεί μια γωνία αναφοράς για την έγχυση της έντασης του στο υπόλοιπο δίκτυο. Επομένως, ο grid-forming έχει την ικανότητα να χρησιμοποιηθεί όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί σε απομονωμένη λειτουργία, ενώ ο grid-feeding αδυνατεί να λειτουργήσει αυτόνομα, απαιτώντας την χρήση κάποιας γεννήτριας η ενός grid-forming μετατροπέα. Οι δυο αυτοί τύποι μπορούν να αναπαρασταθούν ως μια σταθερή πηγή τάσης και ως σταθερή πηγή έντασης αντίστοιχα.

Ο Grid-supporting-Grid-forming ενεργεί ως μια πηγή τάσης με έλεγχο droop (ο έλεγχος droop περιγράφεται παρακάτω) με την τάση και την συχνότητα αναφοράς να ρυθμίζονται με βάση την μετρούμενη ενεργό και άεργο ισχύ, επιτρέπει ακόμη σε πολλαπλές πηγές grid-forming να λειτουργούν παράλληλα ανεξαρτήτως εάν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό ή σε απομονωμένη λειτουργία. Αντίστοιχα ο έλεγχος Grid-supporting-Grid-feeding ενεργεί ως μια πηγή έντασης με έλεγχο droop με την ενεργό και άεργο ισχύ αναφοράς να ρυθμίζονται με βάση την μετρούμενη τάση και την συχνότητα. Οι αντιστροφείς grid-supporting έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν και σε διασυνδεδεμένη και σε απομονωμένη λειτουργία.

Προβληματισμοί δημιουργούνται όταν οι διαφορετικές πηγές ενέργειας σε συνδυασμό με τους μετατροπείς του GSGFm λειτουργούν απομονωμένα από το δίκτυο. Το φορτίο που μοιράζονται κατά μια μεταβατική κατάσταση επιβαρύνει περισσότερο τους αντιστροφείς, επιδρώντας αρνητικά στην αντοχή τους και την ευστάθεια του συστήματος. Λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορεί να επέλθει με χρήση επιπλέον τεχνικών ελέγχου οι οποίοι επιδρούν στο κύκλωμα χωρίς να επηρεάσουμε την συχνότητα και την τάση στην μόνιμη κατάσταση. Μερικές συμπληρωματικές μέθοδοι περιγράφονται παρακάτω

### 2.8.2 Έλεγχος droop

Σε ένα δίκτυο, το ισοζύγιο ενεργού ισχύος θα πρέπει πάντα να είναι μηδέν, δηλαδή η ενέργεια που παράγεται να είναι πάντα ίση με την ενέργεια που καταναλώνεται από αυτό. Στην περίπτωση που η παραγόμενη ισχύς δεν είναι ίση με την καταναλισκόμενη, δημιουργούνται μεταβολές στην συχνότητα. Ο έλεγχος droop ή έλεγχος στατισμού αξιοποιεί αυτή την ιδιότητα μετρώντας την μεταβολή της συχνότητας στο σημείο σύνδεσης και ανάλογα με την τιμή της συχνότητας διοχετεύει είτε μειώνει την παρεχόμενη ισχύ στο δίκτυο. Συγκεκριμένα όταν η συχνότητα υπερβαίνει την ονομαστική, δηλαδή έχουμε περισσότερη παραγόμενη ισχύ από αυτήν που μπορεί να κατανάλωσει το δίκτυο, τότε θα πρέπει να μειωθεί η ισχύς που παράγουμε και αντίστροφα όταν η συχνότητα είναι μικρότερη της ονομαστικής τότε θα πρέπει να προσφέρουμε περισσότερη ενεργό ισχύ στο δίκτυο.

Ο στατισμός R ορίζεται ως ο λόγος της μεταβαλλόμενης συχνότητας ανά μονάδα προς την μεταβολή της ενεργού ισχύος ανά μονάδα

$$R = -\frac{\Delta f}{\Delta P}$$

### 2.8.3 Έλεγχος εικονικής αδρανείας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η έλλειψη των σύγχρονων μηχανών δημιουργεί στο δίκτυο πρόβλημα όσον αφορά την αδράνεια του. Η εικονική αδράνεια αποτελεί ένα τεχνητό μέσο στις εφαρμογές δικτύου με αντιστροφείς ώστε να καλύψουμε τα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω χαμηλής αδρανείας. Η λειτουργία της εικονικής αδρανείας μιμείται εκείνη των στρεφόμενων μονάδων παράγωγης αυξάνοντας την αδράνεια του συστήματος. Η δυναμική του δρομέα της σύγχρονης μηχανής αναπληρώνεται με αποθηκευτικά μέσα είτε με την ρύθμιση της ισχύος των

συνδεδεμένων αντιστροφών. Ο έλεγχος αδρανείας με την χρήση των μπαταριών εκμεταλλεύεται τον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας. Στην μόνιμη κατάσταση η συχνότητα είναι σταθερή συνεπώς δεν υπάρχει κάποια έγχυση ισχύος στο σύστημα. Όμως κατά την διάρκεια κάποιου σφάλματος η συχνότητα μεταβάλλεται και ως αποτέλεσμα εγχέεται στο σύστημα ισχύ αναλογικά με το μέγεθος του σφάλματος

Η σχέση που εκφράζει την ισχύ που εγχέουν τα συστήματα αποθήκευσης όπως οι μπαταρίες είναι:

$$P = -M \frac{df}{dt}$$

Όπου Μ το κέρδος της εικονικής αδρανείας.

#### 2.8.4 Περιορισμός ρεύματος

Σημαντική προϋπόθεση για την σωστή λειτουργία ενός δικτύου με μετατροπείς είναι η αδιάλειπτη λειτουργία του σε όλες τις συνθήκες που μπορεί να αντιμετωπίσει. Την στιγμή ενός μεταβατικού φαινομένου θα πρέπει να είναι ικανό να λειτουργήσει με βάση τον εκάστοτε κανονισμό δικτύου και να αποφύγει τυχόν βλάβες στα στοιχεία του από τα υψηλά ρεύματα. Λόγο της ευαισθησίας τους, τα ηλεκτρονικά ισχύος κατά το σφάλμα αποσυνδέονται από αυτό για να προστατευθούν από βλάβες εξαιτίας της χαμηλής αντοχής τους στα υψηλά ρεύματα. Σε τυχόν σφάλμα οι ενέργειες του δικτύου θα πρέπει να είναι η διάγνωση του σφάλματος, ο περιορισμός ρεύματος του σφάλματος, και η επαναφορά του σε επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας μετά το σφάλμα. Εκτός από την επαναφορά της έντασης σε επιθυμητά επίπεδα, σε ένα δίκτυο αποτελούμενο από πολλά διαφορετικά στοιχεία πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διατήρηση της ευστάθειας και του συγχρονισμού του. Για αυτόν το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι για το περιορισμό ρεύματος έτσι ώστε να επιτευχθεί κατά το σφάλμα και μετά από αυτό η επιθυμητή λειτουργία του δικτύου, ικανοποιώντας αποτελεσματικά τις απαιτήσεις που έχουμε θέσει σε αυτό. Το φαινόμενο του περιορισμού ρεύματος, της ευστάθειας καθώς και μέθοδοι που το επιτυγχάνουν περιγράφονται εκτενώς στο κεφάλαιο 4.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ GRID-SUPPORTING-GRID-FORMING

### 3.1 Εισαγωγή

Στόχος του κεφαλαίου είναι η περιγραφή ενός μοντέλου δικτύου με αντιστροφής με έλεγχο τύπου Grid-supporting-Grid-forming (GSGFm). Όμοιο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί και για την προσομοίωση στο MATLAB Simulink για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Παρακάτω περιγράφονται και αναλύονται τα στοιχεία του δικτύου και οι σχέσεις που διέπουν τον αντιστροφέα και τα στοιχεία ελέγχου του. Πριν από αυτά αναλύεται ο μετασχηματισμός Park που αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την μελέτη και τη σχεδίαση των στοιχείων ελέγχου του αντιστροφέα .

### 3.2 Μετασχηματισμός Park (dq0)

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, σχεδόν όλα τα ηλεκτρικά και μαγνητικά στοιχεία που υπάρχουν στο σύστημα είναι τριφασικά και χρονικά μεταβαλλόμενα. Όμως μεγάλο μέρος των τεχνικών ελέγχων αναφέρεται σε χρονικά αμετάβλητα συστήματα, καθιστώντας δύσκολη την σχεδίαση συστημάτων ελέγχου για τα ΣΗΕ. Γι' αυτόν τον λόγο, ο μετασχηματισμός Park αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη του ελέγχου ενός ΣΗΕ, καθώς μετασχηματίζει ένα τριφασικό σύστημα σε διφασικό και οι άξονες αναφοράς μπορούν να καθοριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη να μετασχηματιστούν σε χρονικά αμετάβλητα [19].

Οι εξισώσεις μετασχηματισμού των σχέσεων του τριφασικού κυκλώματος σε μετασχηματισμό park είναι :

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix}$$

Ή συνοπτικά

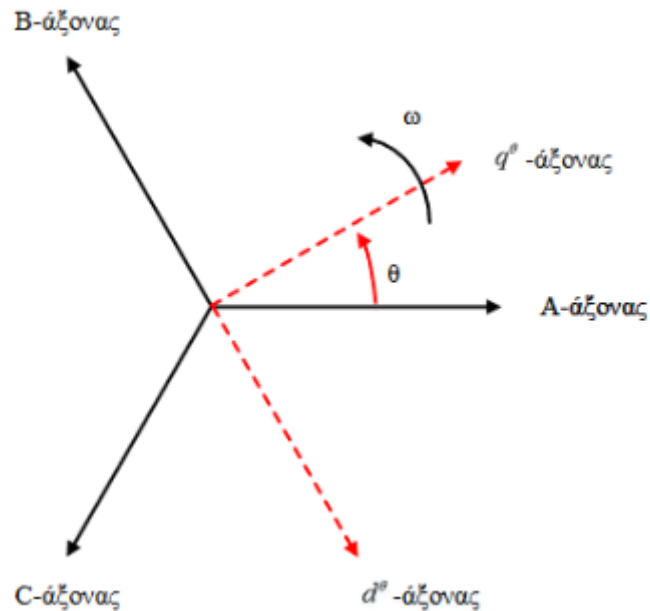
$$f_{dq0} = K_{\theta} f_{ABC}$$

Η γωνία στροφής  $\theta$  στο διφασικό σύστημα ( $f_q, f_d$ ) ορίζεται ως

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0)$$

Η συνιστώσα  $f_0$  ονομάζεται συνιστώσα μηδενικής συχνότητας και όπως βλέπουμε δεν εξαρτάται από την γωνία στροφής  $\theta$ . Στην περίπτωση που το τριφασικό σύστημα είναι συμμετρικό η συνιστώσα μηδενικής συχνότητας είναι ίση με το μηδέν .

Η γωνία στροφής  $\theta$  χαρακτηρίζει το σύστημα αξόνων αναφοράς που μετασχηματίζουμε το τριφασικό μέγεθος



Εικόνα 3.1 Σχέση αξόνων αρχικού συστήματος ABC και μετασχηματισμένου d-q[19]

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0.5 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0.5 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix}$$

Σε συνοπτική μορφή

$$f_{ABC} = (K_\theta)^{-1} f_{dq0}$$

Όπως αναφέραμε παραπάνω η συνιστώσα  $f_0$  είναι μηδέν στο συμμετρικό τριφασικό σύστημα . Συνεπώς το διάνυσμα  $f_{dq}$  μπορεί να αναπαρασταθεί ως

$$f_{dq} = f_d + jf_q$$

Με  $f_d$  και  $f_q$  το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του διανύσματος .

Αποδεικνύεται ότι η ενεργός και άεργος ισχύς ενός τριφασικού συστήματος στον σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο d-q υπολογίζεται

$$P_{ABC}=P_{dq0}=\frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q)$$

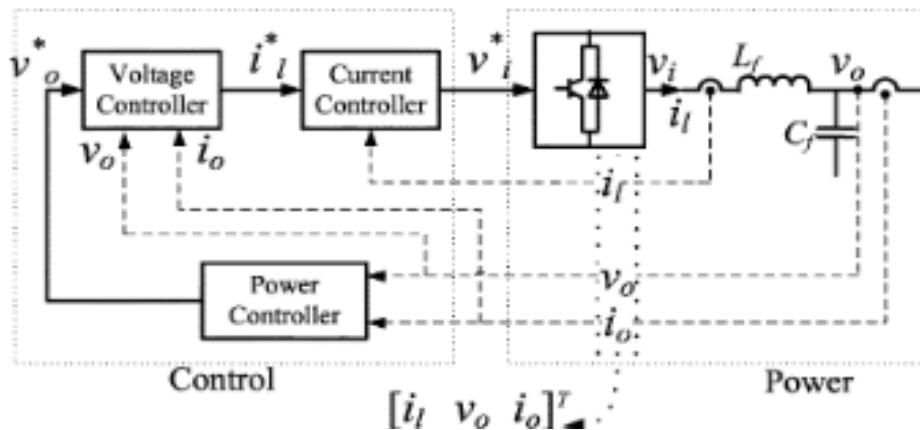
$$Q_{ABC}=Q_{dq0}=\frac{3}{2} (V_q I_d - V_d I_q)$$

### 3.3 Στοιχεία του δικτύου

Το σύστημα του δικτύου που θα μοντελοποιήσουμε σε αυτήν την διπλωματική αποτελείται από δύο διακριτά στοιχεία, το δίκτυο και το σύστημα ελέγχου .

Το δίκτυο αποτελείται από έναν τριφασικό αντιστροφέα πηγής τάσης ή στα αγγλικά Voltage Source Converter (VSC) και ένα βαθυπερατό φίλτρο LC στην έξοδο του αντιστροφέα, για προστασία από τις αρμόνικες. Θεωρείται ακόμη ότι το δίκτυο είναι συνδεδεμένο με μια πηγή τάσης που προσομοιώνει το άπειρο σύστημα ΣΗΕ.

Το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα απαρτίζεται από τον έλεγχο τάσης και ρεύματος που αποτελούν τις βασικές μεθόδους για τον έλεγχο έγχυσης της άεργου και ενεργού ισχύος του αντιστροφέα, καθώς και τον έλεγχο ισχύος droop. Η δομή του αναλυόμενου συστήματος περιγράφεται στην **Εικόνα 3.2**

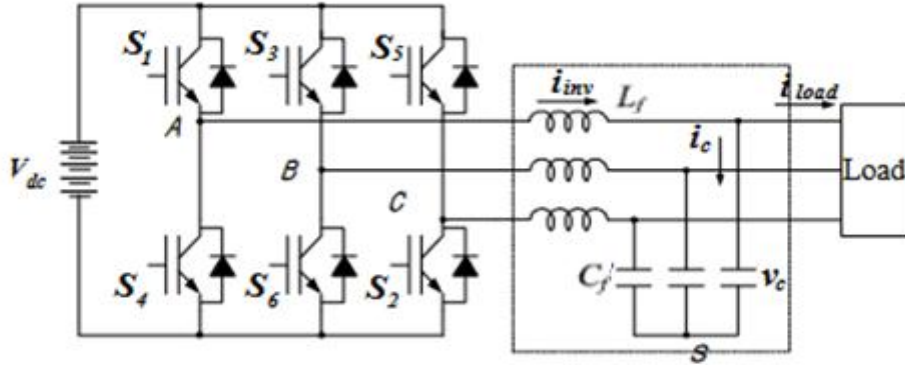


Εικόνα 3.2 Διάγραμμα κυκλώματος με αντιστροφείς

#### 3.3.1 Τριφασικός Αντιστροφέας

Ο Αντιστροφέας (Inverter) ή μετατροπέας DC-AC είναι μια ηλεκτρονική διάταξη η οποία μετατρέπει μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενο, του οποίου μπορούμε να ρυθμίσουμε το πλάτος και την συχνότητα. Το κύκλωμα ισχύος ενός αντιστροφέα μπορεί να υλοποιηθεί με την χρήση διάφορων ηλεκτρονικών ισχύος όπως IGBTs ισχύος, τρανζίστορ ισχύος, GTOs, MOSFETS ή και θυρίστορ ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ στην έξοδο του αντιστροφέα. Ο τριφασικός αντιστροφέας μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί σύστημα τριών μονοφασικών

αντιστροφέων ημιγέφυρας συνδεδεμένων παράλληλα (Εικόνα 3.3). Οι τρεις μονοφασικοί αντιστροφείς έχουν την ίδια κυματομορφή τάσης εξόδου με ένα υποθετικό σημείο αναφοράς με μια μετατόπιση  $120^\circ$  μεταξύ τους [9].



**Εικόνα 3.3** Τριφασικός αντιστροφέας με φίλτρο LC στην έξοδο

Οι σχέσεις που περιγράφουν των αντιστροφέα είναι

$$C_f \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \vec{i}_{inv} - \vec{i}_{load} \quad (3.1)$$

$$L_f \frac{d\vec{i}_{inv}}{dt} = -R_l \vec{i}_{inv} + \vec{v}_{inv} - \vec{v}_c \quad (3.2)$$

Αν το σήμα διαμόρφωσης του αντιστροφέα είναι  $m$  έχουμε ακόμα :

$$\vec{v}_{inv} = \tilde{m} \frac{V_{DC}}{2} \quad (3.3)$$

Με:

$$\tilde{m} = \begin{bmatrix} m \cos(\omega\tau - \varphi) \\ m \cos\left(\omega\tau - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ m \cos\left(\omega\tau - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, |m| < 1$$

$$\vec{v}_c = \begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} \quad \vec{v}_{inv} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \vec{i}_{inv} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

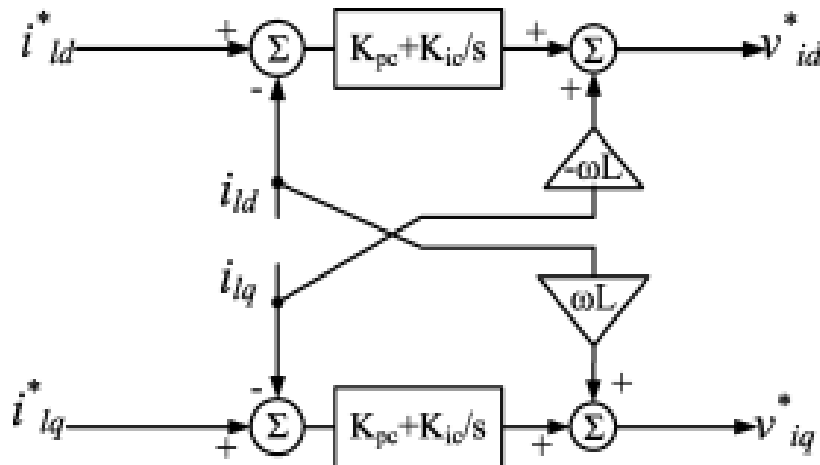
$$\vec{i}_{load} = \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix}$$

όπου  $\bar{v}_c$ , η τάση των πυκνωτών,  $\bar{v}_{inv}$ ,  $\bar{i}_{inv}$  η τάση και το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα αντίστοιχα,  $\vec{i}_{load}$  το ρεύμα φορτίου,  $L_f, C, R_l$  ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου, η χωρητικότητα του πυκνωτή και η αντίσταση της γραμμής αντίστοιχα και τέλος  $V_{DC}$  η τάση στη DC πλευρά του αντιστροφέα.

Ο έλεγχος τάσης και ρεύματος του αντιστροφέα πηγής τάσης βασίζεται πάνω στις εξισώσεις **3.1-3.3**

### 3.3.2 Έλεγχος ρεύματος

Ο έλεγχος ρεύματος γίνεται με την ρύθμιση της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα, η οποία με την σειρά της ρυθμίζεται από το σήμα διαμόρφωσης του (σχέση 3.3). Ο σκοπός του ελέγχου ρεύματος, είναι η ρύθμιση της ενεργού και άεργου ισχύος, που ανταλλάσσονται μεταξύ του αντιστροφέα και του υπόλοιπου AC δικτύου. Η είσοδος του ελέγχου ρεύματος είναι οι συνιστώσες των ρευμάτων αναφοράς και των ρευμάτων του δικτύου.



Εικόνα 3.4 Μοντέλο ελεγκτή ρεύματος [5]

Η τάση του συστήματος του αντιστροφέα σε κάθε φάση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$v_{ca} = \hat{V} e^{j(\omega_0 \tau + \varphi_0)} \quad v_{cb} = \hat{V} e^{j(\omega_0 \tau + \varphi_0 - \frac{2\pi}{3})} \quad v_{cc} = \hat{V} e^{j(\omega_0 \tau + \varphi_0 + \frac{2\pi}{3})}$$

Για να προσδιορίσουμε την εξίσωση ελέγχου του ρεύματος θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (3.2)



$$L_f \frac{d\vec{i}_{inv}}{dt} = -R_l \vec{i}_{inv} + \vec{v}_{inv} - \vec{v}_c$$

Οπού  $\vec{i}_{inv}$  διαφορά του ρεύματος αναφοράς  $\vec{i}_l^*$  με το ρεύμα δίκτυο  $\vec{i}_l$

$$\vec{i}_{inv} = \vec{i}_l^* - \vec{i}_l = \vec{i}_{id}^* - \vec{i}_{id} + (\vec{i}_{iq}^* - \vec{i}_{iq})j$$

Η συνοπτικά:  $i_{invdq} = (i_d + ji_q)e^{j\delta}$  και με την σχέση  $\omega = \frac{d\delta}{dt}$  έχουμε

$$L_f \frac{d(i_d + ji_q)e^{j\delta}}{dt} = -R_l(i_d + ji_q)e^{j\delta} + \vec{v}_{invdq} - \vec{v}_c \Rightarrow$$

$$L_f \frac{d(i_d + ji_q)}{dt} = -jL\omega i_{invdq} - R_l(i_d + ji_q) + (\vec{v}_{invdq} - \widehat{V}e^{j(\omega_0\tau + \varphi_0) - \delta})$$

Έτσι οι συνιστώσες που προκύπτουν χωρίζοντας τις μεταβλητές είναι:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = L\omega i_q + (v_{invd} - \widehat{V}\cos((\omega_0\tau + \varphi_0) - \delta)) - R_l i_d \quad (3.4)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -L\omega i_d + (v_{invq} - \widehat{V}\sin((\omega_0\tau + \varphi_0) - \delta)) - R_l i_q \quad (3.5)$$

Όπως φαίνεται, οι εξισώσεις ελέγχου, παρουσιάζουν ένα μη γραμμικό σύστημα ελέγχου που οφείλεται στην ύπαρξη των ημιτόνων και των συνημιτόνων καθώς και με την ύπαρξη της εξάρτησης των μεταβλητών  $i_q$  και  $i_d$  που υπάρχουν η μια στην εξίσωση της άλλης.

Το σύστημα μπορεί να γραμμικοποιηθεί μέσω της σχέσης (3.3) :

$$\vec{v}_{inv} = \tilde{m} \frac{V_{DC}}{2} \xrightarrow{\text{Park transformation}}$$

$$v_{invq} = m_q \frac{V_{DC}}{2} \quad (3.6)$$

$$v_{invd} = m_d \frac{V_{DC}}{2} \quad (3.7)$$

Επιλέγοντας τους κατάλληλους συντελεστής  $m_q$  και  $m_d$  μπορούμε να απαλείψουμε τους όρους και να γραμμικοποιήσουμε το σύστημα, έχοντας δυο ανεξάρτητα συστήματα. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται απόξευξη(decoupling) και υλοποιείται θέτοντας :

$$m_q = \frac{2}{V_{DC}} (L_f \omega i_d + v_{invq} + \widehat{V}\sin((\omega_0\tau + \varphi_0) - \delta)) \quad (3.8)$$

$$m_d = \frac{2}{V_{DC}} ( -L_f \omega i_q + v_{invd} + \widehat{V} \cos ((\omega_0 \tau + \varphi_0) - \delta) ) \quad (3.9)$$

Επομένως οι νέες γραμμικοποιημένες εξισώσεις έχουν την μορφή

$$L_f \frac{di_d}{dt} = v_{invd} - R_l i_d \quad (3.10) \quad \text{και}$$

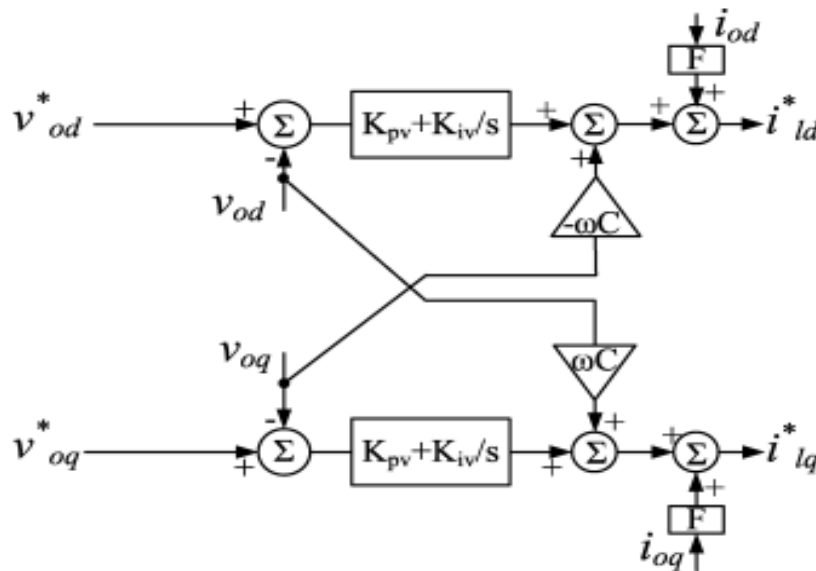
$$L_f \frac{di_q}{dt} = v_{invq} - R_l i_q \quad (3.11)$$

Οι συνιστώσες  $i_d$  και  $i_q$  είναι συνιστώσες DC και εισέρχονται σε έναν ελεγκτή PI διακριτού χρόνου (Εικόνα 3.4).

Στην έξοδο του ελεγκτή πολλαπλασιάζοντας και προσθέτοντας τα κατάλληλα σήματα μπορούμε να λάβουμε τα σήματα διακύμανσης του αντιστροφέα, και αφού μετασχηματιστούν τα σήματα με τον αντίστροφο μετασχηματισμό Park να τροφοδοτηθεί ο αντιστροφέας πηγή τάσης με αυτό το σήμα. Ο αντιστροφέας με την σειρά του θα επηρεάσει το ρεύμα του συστήματος, δίνοντας νέες τιμές στα στοιχεία του ελέγχου και δημιουργώντας έτσι τον κλειστό βρόγχο.

### 3.3.3 Έλεγχος τάσης

Ο έλεγχος τάσης ρυθμίζει τις συνιστώσες dq της τάσης ώστε να ακολουθούν τις τάσεις αναφοράς, παράγοντας τις συνιστώσες dq των ρευμάτων αναφοράς στην είσοδο του ελέγχου ρεύματος. Δέχεται ως είσοδο τις συνιστώσες της τάσης αναφοράς καθώς και τις συνιστώσες της τάσης και ρεύματος του δικτύου .



Εικόνα 3.5 Μοντέλο ελεγκτή τάσης [5]

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.1) για κάθε μια φάση θα έχουμε τις εξισώσεις:

$$C_f \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \vec{i}_{inv} - \vec{i}_{load}$$

Οπού  $\vec{v}_c$ , η διαφορά της τάσης αναφοράς  $\vec{v}_o^*$  με την τάση δίκτυού  $\vec{v}_o$

$$\vec{v}_c = \vec{v}_o^* - \vec{v}_o$$

Με την χρήση του μετασχηματισμού Park, όπως με τον έλεγχο ρεύματος, η εξίσωση μπορεί να γραφεί σε δυο συνιστώσες  $v_c = (v_d + jv_q)e^{j\delta}$  και  $\omega = \frac{d\delta}{dt}$  (δ γωνία αναφοράς του μετασχηματισμού park) :

$$C_f \frac{dv_d}{dt} = C_f (\omega v_q) + i_d - i_{ld}^* \quad (3.12)$$

$$C_f \frac{dv_q}{dt} = C_f (\omega v_d) + i_q - i_{lq}^* \quad (3.13)$$

Με  $i_{lq}^*$  και  $i_{ld}^*$  τα ρεύματα αναφοράς στους αντίστοιχους άξονες .

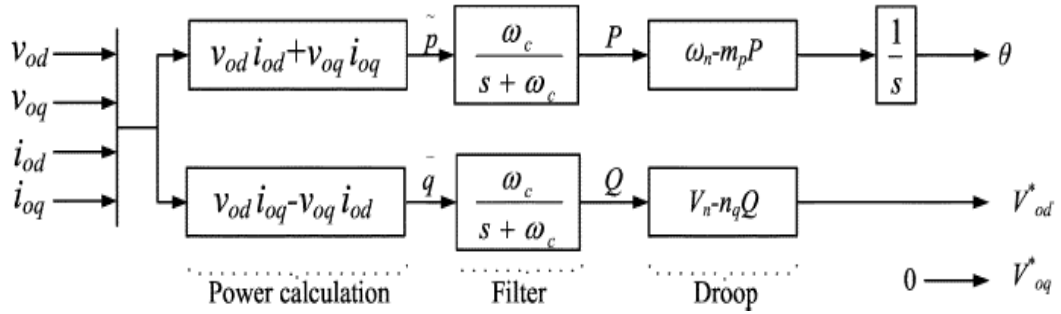
Μέσω του decoupling μπορούμε να αποζεύξουμε τις εξισώσεις καταλήγοντας σε :

$$i_{ld}^* = C_f \frac{dv_d}{dt} - C_f (\omega v_q) + i_d \quad (3.14) \quad i_{lq}^* = C_f \frac{dv_q}{dt} + C_f (\omega v_d) + i_q \quad (3.15)$$

Οι συνιστώσες  $v_d$  και  $v_q$  είναι συνιστώσες DC , εισέρχονται σε έναν ελεγκτή PI διακριτού χρόνου **(Εικόνα 3.5)**.

### 3.3.4 Έλεγχος droop P~f και Q~V

Στο παραδοσιακό κύκλωμα, μια μεταβολή στο φορτίο έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της συχνότητας της μηχανής αφού ο λόγος V/f στις σύγχρονες μηχανές παραμένει σταθερός. Η σύγχρονη γεννήτρια θα μοιράσει την αύξηση του φορτίου μειώνοντας την συχνότητα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της. Το ρόλο αυτό της γεννήτριας αναλαμβάνει ο ελεγκτής ισχύος droop . Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιεί τη μετρούμενη ενεργό και άεργο ισχύ για να καθορίσει την τιμή της συχνότητας και της τάσης αντίστοιχα. Αποτελείται από ένα βαθυπερατό φίλτρο, με συχνότητα αποκοπής  $\omega_c$  και έναν συντελεστή αρνητικού κέρδους-πτώσης (droop) που εισάγει στο κύκλωμα έναν βαθμό αρνητικής ανατροφοδότησης .



Εικόνα 3.6 Μοντέλο ελεγκτή droop P~f και Q~V [5]

Η στιγμιαία ενεργός και άεργος ισχύ , στο d-q επίπεδο, εκφράζονται από τους τύπους:

$$\tilde{p} = u_{od} i_{od} + u_{oq} i_{oq} \quad (3.16)$$

$$\tilde{q} = -u_{od} i_{oq} + u_{oq} i_{od} \quad (3.17)$$

Με  $u = [u_{od}, u_{oq}]^T$  και  $i = [i_{od}, i_{oq}]^T$  την στιγμιαία τάση και ένταση αντίστοιχα .

Οι ισχύς έπειτα εισάγονται στο βαθυπερατό φίλτρο, παίρνοντας στην έξοδο την αποκοπή των μη επιθυμητών συχνοτήτων με συχνότητα αποκοπής  $\omega_c$  :

$$P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \tilde{p} \quad (3.18)$$

$$Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \tilde{q} \quad (3.19)$$

Στον ελεγκτή P-f, αν θεωρήσουμε την συχνότητα αναφοράς  $\omega_0$  και τον συντελεστή droop  $m_p$  τότε στην έξοδο του θα έχουμε :

$$\omega = \omega_0 - m_p P \quad (3.20)$$

Αν ορίσουμε την γωνία του αντιστροφέα  $\delta$ , η όποια αλλάζει ανάλογα με την πραγματική ισχύ, αυτή υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$\dot{\theta} = \omega \xrightarrow{(3.20)} \theta = \omega_0 t - \int m_p P \quad (3.21)$$

$$\alpha = - \int m_p P \text{ και } \dot{\alpha} = m_p P \quad (3.22)$$

Αντίστοιχα στον ελεγκτή Q-V , έχοντας  $V_o$  την τάση στο δίκτυο,  $V_{d*}$  την τάση στην έξοδο από τον ελεγκτή και θέτοντας την τάση στον άξονα  $V_{q*}$  ίση με το μηδέν, προκύπτει:

$$V_{d*} = V_d - n_q Q \quad (3.23) \quad V_{q*} = 0$$

Τα κέρδη του ελεγκτή droop  $m_p$  και  $n_q$  ορίζονται με βάση την μέγιστη και ελάχιστη τιμή της συχνότητας και τάσης αντίστοιχα

$$m_p = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{P_{max}}$$

$$n_q = \frac{V_{dmax} - V_{dmin}}{Q_{max}}$$

Τέλος θα πρέπει να οριστεί μια κοινή γωνία αναφοράς για όλους τους μετατροπείς του συστήματος[5]. Όλες οι γωνίες των αντιστροφών θα πρέπει να οριστούν με βάση την κοινή γωνία αναφοράς, η οποία θα ανήκει σε έναν από τους αντιστροφείς .

Αν θεωρήσουμε τους νέους άξονες αναφοράς D-Q με βάση την κοινή γωνία αναφοράς στρεφομένη με συχνότητα  $\omega_{com}$ , η μετατόπιση των αξόνων δίνεται από την εξίσωση :

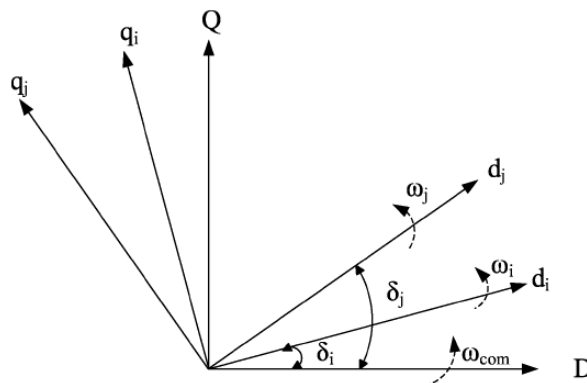
$$f_{DQ} = T_i f_{dq}$$

Με

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos(\delta_i) & -\sin(\delta_i) \\ \sin(\delta_i) & \cos(\delta_i) \end{bmatrix}$$

Οπού  $\delta_i$  είναι η γωνία αναφοράς του i-οστού αντιστροφέα σε σχέση με την κοινή γωνία αναφοράς

Στην **εικόνα 3.7** φαίνεται ο κοινός άξονας αναφοράς D-Q , οι άξονες του i-οστού αντιστροφέα  $(d - q)_i$  και του j-οστού αντιστροφέα  $(d - q)_j$  μαζί με τις αντίστοιχες στρεφόμενες συχνότητες  $\omega_{com}$  ,  $\omega_i$  ,  $\omega_j$



**Εικόνα 3.7 Μετατόπιση της κοινής γωνίας αναφοράς[5]**

Αν θεωρηθεί  $\delta$  η γωνία μεταξύ της γωνίας αναφοράς του αντιστροφέα και την κοινή γωνία αναφοράς , ώστε να οριστούν οι μετατροπείς με βάση την κοινή γωνία αναφοράς, τότε θα ισχύει :

$$\delta = \int (\omega - \omega_{com})$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

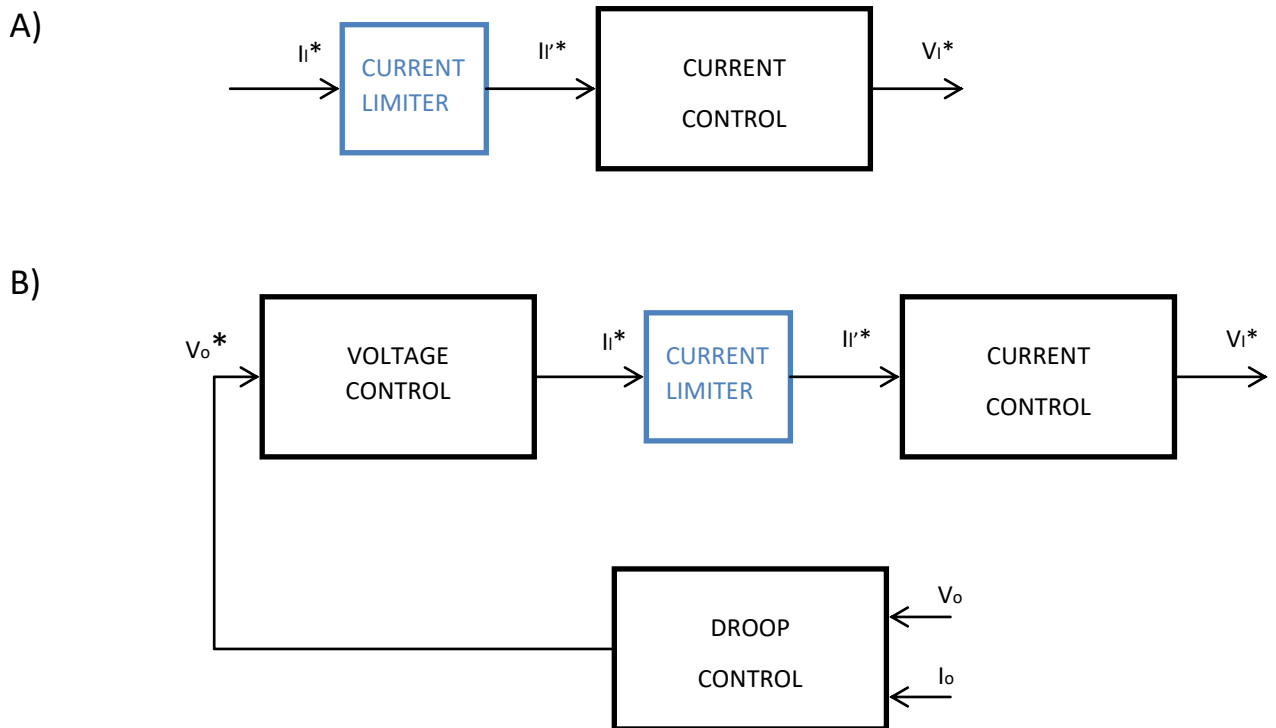
### 4.1 Εισαγωγή

Τα παραδοσιακά δίκτυα που λειτουργούν με σύγχρονες γεννήτρες, μπορούν να ανταπεξέλθουν σε ένα μεταβατικό φαινόμενο με αύξηση του ρεύματος έως και δώδεκα φορές του ονομαστικού χωρίς κανένα ιδιαίτερο πρόβλημα στα στοιχεία του . Σε αντιδιαστολή στα μοντέρνα δίκτυα, τα οποία αποτελούνται από διακοπτικά στοιχεία ,η αντοχή τους στην αύξηση του ρεύματος είναι πολύ μικρότερη φτάνοντας έως και δυο φορές το ονομαστικό τους ρεύμα. Αυτό γέννησε την ανάγκη για την δημιουργία τεχνικών, ικανών να περιορίσουν το ρεύμα κατά την διάρκεια ενός μεταβατικού φαινομένου, προστατεύοντας έτσι τα στοιχεία του.

### 4.2 Περιορισμός ρεύματος

Η χαμηλή αδράνεια σε συνδυασμό με την αβεβαιότητα στην παραγωγή που απορρέει από την εισαγωγή ανανεώσιμων πηγών ενεργείας στο δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεταβατικών φαινομένων. Κατά το μεταβατικό φαινόμενο σε ένα δίκτυο που λειτουργεί απομονωμένο, οι αντιστροφείς καταπονούνται περισσότερο, λαμβάνοντας την πλειοψηφία του φορτίου, χωρίς όμως να έχουν την αντοχή να το υποστηρίξουν αυτό, οδηγώντας τους έτσι σε μικρότερο χρόνο ζωής ή πιθανότητα βλάβης στο δίκτυο ή ακόμη και την αποσύνδεση τους από αυτό. Για να αντιμετωπίσουμε ένα τέτοιο φαινόμενο και να διατηρήσουμε την λειτουργία του δικτύου στα επιθυμητά επίπεδα, θα πρέπει να τροποποιήσουμε τον έλεγχο των αντιστροφέων ώστε να προσαρμόζονται σε τέτοιες καταστάσεις, περιορίζοντας το ρεύμα που δέχονται.

Στα δίκτυα με αντιστροφείς που λειτουργούν με έλεγχο Grid following, η συνήθης μέθοδος για την προστασία του δικτύου είναι μέσω ενός περιοριστή ρεύματος (current limiter) στην είσοδο του ελεγκτή ρεύματος (current controller), όπως σχεδιαγραμματικά δείχνεται στην Εικόνα 4.1 Α. Όμως ο περιοριστής ρεύματος δεν επαρκεί για τα δίκτυα με έλεγχο τύπου grid forming. Τα δίκτυα με έλεγχο grid forming αποτελούνται από περισσότερα στοιχεία ελέγχου, όπως ελεγκτές τάσης ή droop για να μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα από το ευρύτερο δίκτυο. Σε αυτήν την μορφολογία, Εικόνα 4.1 Β, πριν το περιοριστή ρεύματος υπάρχουν άλλα στοιχεία ελέγχου και συνεπώς κατά το μεταβατικό φαινόμενο, όταν τεθεί σε λειτουργία ο περιοριστής, υπονομεύει την λειτουργία των ελεγκτών πριν από αυτό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία προβλημάτων στην ευστάθεια του συστήματος με το δίκτυο να αδυνατεί να επανέλθει σε κατάσταση ισορροπίας μετά το μεταβατικό φαινόμενο. Γι' αυτό τον λόγο, επιστρατεύονται συμπληρωματικές τεχνικές ελέγχου με σκοπό τον επιτυχή περιορισμό του ρεύματος και την επαναφορά του συστήματος στην αρχική κατάσταση λειτουργίας.



Εικόνα 4.1 Διάγραμμα BLOCK ελέγχου τύπου

A)grid following με περιοριστή ρεύματος

B)grid forming με περιοριστή ρεύματος

Αν οριστεί ως  $I_{max}$  η μέγιστη επιτρεπτή ένταση του ρεύματος από την εκάστοτε στρατηγική περιορισμού του και η οποία επιτρέπει την ασφαλή λειτουργία του δικτύου αποτρέποντας την καταστροφή των αντιστροφών, τότε διακρίνονται δυο καταστάσεις με βάση την τιμή του ρεύματος στο δίκτυο: την κορεσμένη και την μη κορεσμένη κατάσταση. Ως μη κορεσμένη κατάσταση λειτουργίας, ορίζεται η κατάσταση που λειτουργεί ένα δίκτυο όταν η τιμή του ρεύματος είναι μικρότερη από την  $I_{max}$  και ως κορεσμένη, όταν η τιμή του ρεύματος είναι ίση με  $I_{max}$ . Η τιμή  $I_{max}$ , αποτελεί το κατώφλι στο οποίο αρχίζει να επενεργεί η στρατηγική περιορισμού του ρεύματος, ώστε να αποφύγουμε βλάβες στους αντιστροφείς πηγής τάσης και κατ' επέκταση στο δίκτυο [6].

Στην κατάσταση μη κορεσμού οι τιμές της τάσης αναφοράς και της συχνότητας καθορίζονται από τον ελεγκτή droop P-f και Q-V αντίστοιχα (παράγραφος 3.3.4). Όταν η τιμή του ρεύματος φτάσει την τιμή  $I_{max}$ , και συνεπώς το δίκτυο θα επέλθει σε κατάσταση κορεσμού, η τιμή της τάσης θα καθοριστεί από την εκάστοτε μέθοδο για τον περιορισμό του ρεύματος.

Το φαινόμενο της ευστάθειας κατά την διάρκεια μεταβατικών φαινομένων αναλύεται παρακάτω. Αναλύονται επίσης, οι δυο τεχνικές που επιστρατεύτηκαν για τον περιορισμό του ρεύματος, για το μοντέλο του μικροδικτύου που δομήθηκε στο

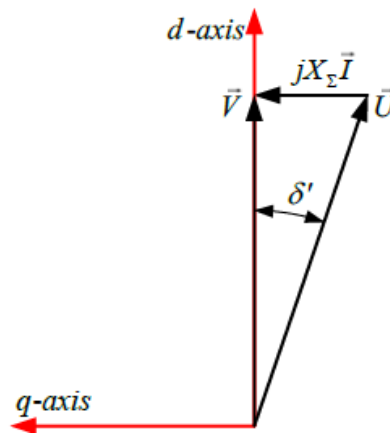


**κεφάλαιο 3.** Πρόκειται για την τεχνική με ελεγκτή droop  $P \sim f$  ενισχυμένης ευστάθειας και την τεχνική της εικονικής εμπέδησης,

### 4.3 Μεταβατική ευστάθεια

Ως μεταβατική ευστάθεια ορίζεται από την πηγή [6] η ικανότητα του συστήματος να διατηρήσει τον συγχρονισμό του με το δίκτυο όταν αυτό υπόκειται σε μεγάλες μεταβολές τάσης. Θεωρείτε ευσταθές ένα σύστημα το οποίο έπειτα από ένα μεταβατικό φαινόμενο μπορεί να επιστρέψει στην κατάσταση ισορροπίας που είχε πριν από αυτό ή επέρχεται σε καινούργια κατάσταση ισορροπίας.

Για να περιγραφεί πότε ένα δικτυο grid forming με έλεγχο droop είναι ευσταθές ορίζεται η εικονική γωνία ισχύος, Virtual Power Angle (VPA) [6]. Ως εικονική γωνία ισχύος ορίζουμε την γωνία μεταξύ του άξονα d (που παράγεται από τον ελεγκτή droop P-f) και την τάση του δικτύου,  $\delta' = \{d\text{-axis}, \vec{U}\}$  (εικόνα 4.2). Η VPA στην μόνιμη κατάσταση, θα πρέπει να έχει ένα σημείο ευσταθούς ισορροπίας έτσι ώστε το σύστημα να μπορέσει να διατηρήσει τον συγχρονισμό του. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.3.4, η συνιστώσα  $V_q$  της εξόδου του Q-V droop τίθεται ίση με το μηδέν ( $V_q = 0$ ), συνεπώς η εικονική γωνία ισχύος (VPA) μπορεί να περιγραφεί από την γωνία που σχηματίζει η τάση στην έξοδο του ελεγκτή droop, με την τάση του δικτύου.



Εικόνα 4.2 Καμπύλη διανυσμάτων ενός αντιστροφέα πηγής τάσης ελεγχόμενο από ελεγκτή Droop [6]

Από την εικόνα 4.2 προκύπτουν οι σχέσεις για την εικονική γωνία ισχύος :

$$\delta' = \int \delta_{\bar{v}} - \delta_{\bar{u}}$$

$$\delta' = \delta_{\bar{v}} - \delta_{\bar{u}}$$

$$\omega = \omega_{\bar{v}} - \omega_{\bar{u}} \Rightarrow$$

$$\omega = m_p (P - P_0) \text{ με } m_p < 0 \text{ (4.1)}$$

όπου  $P$  η ενεργός ισχύ του δικτύου και  $P_0$  η ενεργός ισχύ αναφοράς

Στην μόνιμη κατάσταση ισχύει ότι  $P = P_0$

Στην κατάσταση κορεσμού ο μετατροπέας πηγής τάσης μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή ρεύματος με ρεύμα ίσο με τα όρια που έχουμε ορίσει, και την ισχύ να υπολογίζεται την σχέση

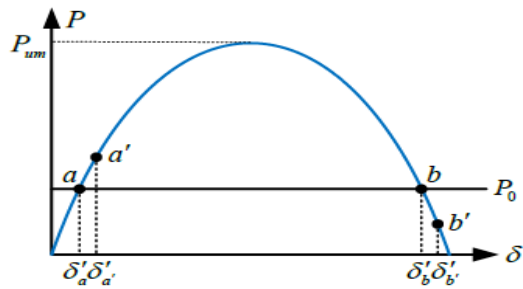
$$P = \vec{U} \cdot \overrightarrow{I_{max}} = U \cdot I_{max} \cos \delta'$$

$$= U \cdot I_{max} \sin(\delta' + 90) = P_{sm} \sin(\delta' + 90) \quad (4.2)$$

Στην μη κορεσμένη κατάσταση η εξίσωση υπολογισμού δίνεται από την σχέση

$$P = \frac{U \cdot V \sin(\delta')}{X_\Sigma} = P_{um} \sin(\delta') \quad (4.3)$$

με  $X_\Sigma$  την επαγωγική αντίσταση του δικτύου.



Εικόνα 4.3 Μη κορεσμένη καμπύλη VPA[6]

Από την σχέση (4.1) και την σχέση (4.3) παρατηρούμε ότι υπάρχουν δυο σημεία ισορροπίας μικρού σήματος στην μη κορεσμένη καμπύλη της VPA (Εικόνα 4.3) τα σημεία α,β με αντίστοιχες γωνίες  $\delta'_\alpha$  και  $\delta'_\beta$ .

Το σημείο α αποτελεί σημείο ευσταθούς ισορροπίας, ενώ το β σημείο ασταθούς ισορροπίας

Απόδειξη [6]: Έστω μεταβολή της γωνίας από το σημείο α στο σημείο α' με  $\delta'_{\alpha'} > \delta'_\alpha$ , κοντά στο σημείο α, με την ισχύ του σημείου α' ίση με P και την ισχύ του σημείου ισορροπίας ίση  $P_0$  όπως περιγράφηκε παραπάνω. Τότε:

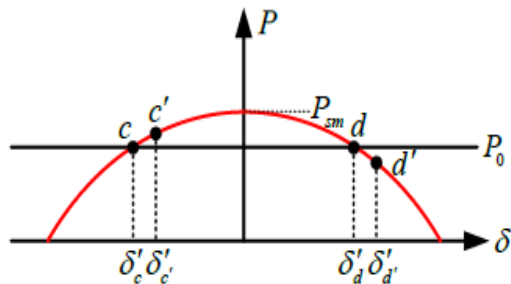
$$P > P_0 \xrightarrow{(4.1) P - P_0 > 0 \text{ και } m_p < 0} \omega < 0 \text{ και συνεπώς } \delta' < 0 \Rightarrow \Delta \delta' < 0 .$$

Δίνοντας έτσι αρνητικό feedback στον έλεγχο droop και οδηγώντας το σύστημα πίσω στο σημείο α.

Παρομοίως για το σημείο β,  $\delta'_{\beta'} > \delta'_\beta$  όμως με  $P < P_0 \xrightarrow{4.3} \omega > 0 \delta' > 0 \Rightarrow \Delta \delta' > 0 .$

Δίνοντας έτσι θετικό feedback στον έλεγχο droop και οδηγώντας το σύστημα σε αστάθεια .

Ομοίως για την κορεσμένη καμπύλη εικονικής γωνίας ισχύος(Εικόνα 4.4 ) με τα αντίστοιχα σημεία c,d και γωνίες  $\delta'_c$  και  $\delta'_d$ . Το c αποτελεί σημείο ευσταθούς και το d ασταθούς, ισορροπίας.



Εικόνα 4.4 Κορεσμένη καμπύλη VPA[6]

Η εικόνα 4.5 περιγράφει την μεταβολή της κατάστασης από την μη κορεσμένη κατάσταση (μπλε καμπύλη) στην κορεσμένη κατάσταση(κόκκινη καμπύλη)

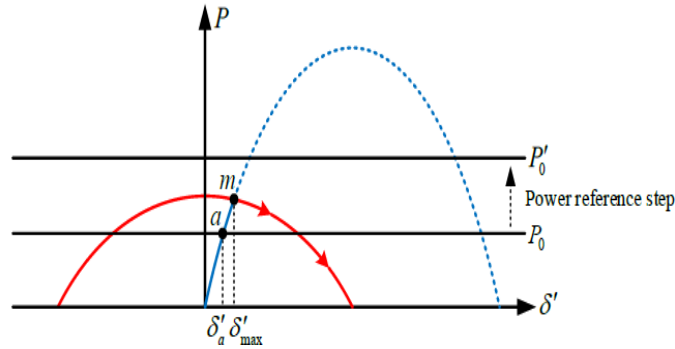
Αρχικά το σύστημα λειτουργεί με  $I < I_{max}$  πάνω στην μη κορεσμένη καμπύλη. Κατά την διάρκεια ενός σφάλματος, το ρεύμα φτάνει  $I = I_{max}$  και το σύστημα επέρχεται σε κατάσταση κορεσμού. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι μεταβολές της εικονικής γωνίας ισχύος να περιγράφεται από την καμπύλη της κατάστασης κορεσμού. Τέτοια μεταβολή φαίνεται στην εικόνα 4.5 με m το κοινό σημείο των δυο καμπυλών. Το σημείο m αποτελεί το σημείο μετάβασης από την μια κατάσταση στην άλλη. Προκειμένου το σημείο m να αποτελέσει σημείο ευσταθούς ισορροπίας, θα πρέπει να ισχύει  $P_m > P_0$ , διαφορετικά το δίκτυο θα επέλθει σε αστάθεια.

Το σημείο m αποτελεί το σημείο όπου  $I = I_{max}$  και  $P_m$ ,  $\delta'_m$  η μέγιστη ενεργός ισχύς και η μέγιστη γωνία κατά την μη κορεσμένη κατάσταση αντίστοιχα.

Η γωνία και η ισχύς του σημείου m περιγράφονται από τις σχέσεις :

$$\delta'_m = \delta'_{max} = \arcsin\left(\frac{P_m}{P_{um}}\right) \quad (4.4) \quad \text{και} \quad P_m \approx P_{sm} \quad (4.5)$$

Σημειώνεται ότι τα σημεία μετά το m στην καμπύλη μη κορεσμού είναι “μη προσιτά” καθώς το ρεύμα δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή  $I_{max}$  λόγω της χρησιμοποιούμενης τεχνικής περιορισμού ρεύματος.



Εικόνα 4.5 καμπύλη VPA κατά την διάρκεια μεταβατικού φαινομένου[6]

Κατά την διάρκεια ενός μεταβατικού φαινομένου, μελετώνται τα παρακάτω δυο σενάρια ασταθούς ισορροπίας ανάλογα με την τιμή της ισχύος. Τα σενάρια αυτά είναι όταν  $P_m < P_0$  και  $P_0 < P_m$ .

#### 4.3.1 Περίπτωση $U' < P_0 / I_{max}$

Αν θεωρηθεί ότι υπάρχει βραχυκύκλωμα με πτώση τάσης από  $U$  σε  $U'$  με  $P_m < P_0$  τότε αυτή η σχέση γίνεται  $U' < P_0 / I_{max}$ . Οι μετατροπείς σε αυτήν την περίπτωση αδυνατούν να συγχρονιστούν με το δίκτυο με την κατάσταση αυτή να περιγράφεται από την εικόνα 4.6 [6].

Αρχικά η λειτουργία του συστήματος βρίσκεται στο σημείο  $a$  της μη κορεσμένης καμπύλης λειτουργίας (καμπύλη 1 εικόνα 4.6, μπλε καμπύλη). Όμως λόγω του σφάλματος η λειτουργία του συστήματος μεταβαίνει στο σημείο  $a''$  από το οποίο η VPA θα αρχίσει να μειώνεται αφού πληροί την υπόθεση  $P_m < P_0$ . Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις στην κίνηση του σημείου λειτουργίας, ανάλογα με το σημείο που γίνεται η εκκαθάριση του σφάλματος σε σχέση με την γωνία εκκαθάρισης του. Η γωνία εκκαθάρισης σφάλματος προκύπτει από την σχέση (4.3) με  $\delta_{cc} = \arccos\left(\frac{P_0}{P_{sm}}\right)$  [6]:

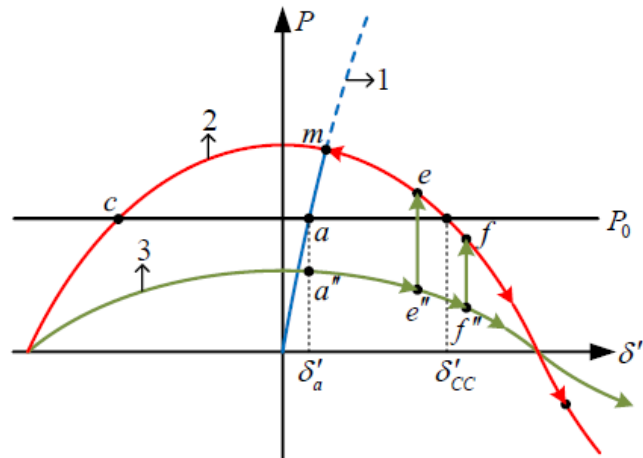
**Περίπτωση μη εκκαθάρισης σφάλματος :** Το σύστημα οδηγείτε σε αστάθεια , η VPA αυξάνεται συνεχώς κινούμενη στην καμπύλη 3 (κορεσμένη καμπύλη ) αδυνατώντας να διατηρήσει τον συγχρονισμό με το δίκτυο.

**Περίπτωση εκκαθάρισης σφάλματος με VPA  $\delta_f > \delta_{cc}$  :** Σε αυτήν την περίπτωση η εκκαθάριση γίνεται στο σημεία  $f''$  μετατοπίζοντας την γωνία λειτουργίας στο σημεία  $f$ .

Στο σημείο  $f$  της καμπύλης 2 η ενεργός ισχύς είναι μικρότερη της ισχύος αναφοράς οδηγώντας πάλι σε αστάθεια το δίκτυο

**Περίπτωση εκκαθάρισης σφάλματος με VPA  $\delta_e < \delta_{cc}$  :** Σε αντίθεση με την παραπάνω περίπτωση το σφάλμα αντιμετωπίζεται σε σημεία που η γωνία  $e''$  μετατοπίζεται στο σημεία  $e$  με ενεργό ισχύ μεγαλύτερη της ισχύος αναφοράς. Έτσι η

αύξηση της ενεργού ισχύος οδηγεί σε μικρότερη εικονική γωνία επανερχόμενο στο σημείο m και φτάνοντας τελικά πίσω στο σημεία της αρχικής λειτουργίας a



Εικόνα 4.6 καμπύλες VPA κατά την διάρκεια μεταβατικού φαινομένου υπό την συνθήκη

$$U' < P_0 / I_{max} [6]$$

1. καμπύλη μη κορεσμένης λειτουργίας
2. Καμπυλη κορεσμένης λειτουργίας σε τάση  $U=1$  p.u
3. Καμπύλη κορεσμένης λειτουργίας σε τάση  $U' < P_0 / I_{max}$

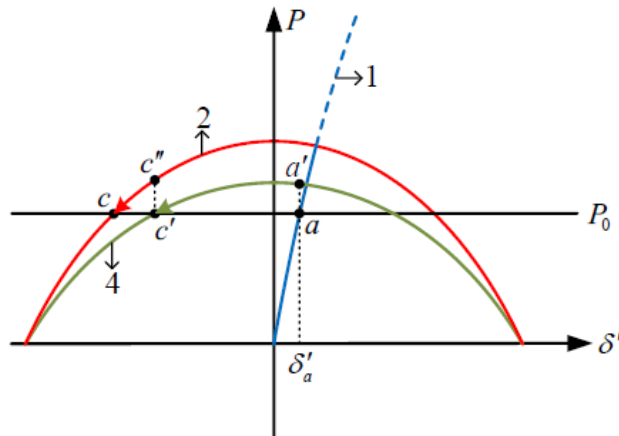
#### 4.3.2 Περίπτωση $U' > P_0 / I_{max}$

Αν θεωρηθεί ότι υπάρχει βραχυκύκλωμα με πτώση τάσης από  $U$  σε  $U'$  με  $P_m > P_0$  τότε η σχέση γίνεται  $U' > P_0 / I_{max}$ . Το παραπάνω φαινόμενο περιγράφεται από την **εικόνα 4.7**.

Σε αυτήν την περίπτωση η μετάβαση του σημείου λειτουργίας γίνεται από το σημεία  $a$  στο σημείο  $a'$  από την καμπύλη 1 στην 4 [6]. Παρατηρείται ότι υπάρχει ένα σημείο ευσταθούς ισορροπίας, το σημείο  $c'$  της καμπύλης 4, το οποίο δεν είναι όμως επιθυμητό σημείο λειτουργίας.

Η κίνηση του σημείου λειτουργίας σε αυτήν την περίπτωση είναι η εξής :

Μετά το σφάλμα η VPA μειώνεται συνεχώς μέχρι να φτάσει στο σημείο  $c'$ . Η ενεργός ισχύς στο σημείο αυτό είναι ίση με την ενεργό ισχύ αναφοράς με αποτέλεσμα να γίνει εκκαθάριση του σφάλματος και να μεταβούμε στην καμπύλη 2 με τάση ίση με την ονομαστική και το αντίστοιχο σημείο της VPA, το  $c''$ . Στο σημείο  $c''$  όμως ικανοποιείται ακόμη η συνθήκη  $U' > P_0 / I_{max}$  με αποτέλεσμα η VPA να συνεχίσει να μειώνεται μέχρι το  $c$  σημείο . Το σημείο  $c$  έχει  $P_m = P_0$  όμως δεν αποτελεί το σημείο επιθυμητής λειτουργίας καθώς το ρεύμα είναι ακόμη κορεσμένο και η τάση ασταθής, συμπεραίνοντας ότι αποτελεί μια ανεπιθύμητη κατάσταση λειτουργίας..



Εικόνα 4.7 καμπύλες VPA κατά την διάρκεια μεταβατικού φαινομένου υπό την συνθήκη  $U' > P_0 / I_{max}$  [6]

1. καμπύλη μη κορεσμένης λειτουργίας
2. Καμπυλη κορεσμένης λειτουργίας σε τάση  $U=1$  p.u
4. Καμπύλη κορεσμένης λειτουργίας σε τάση  $U' > P_0 / I_{max}$

#### 4.4 Μοντέλο Περιορισμού Ρεύματος με SEPFC

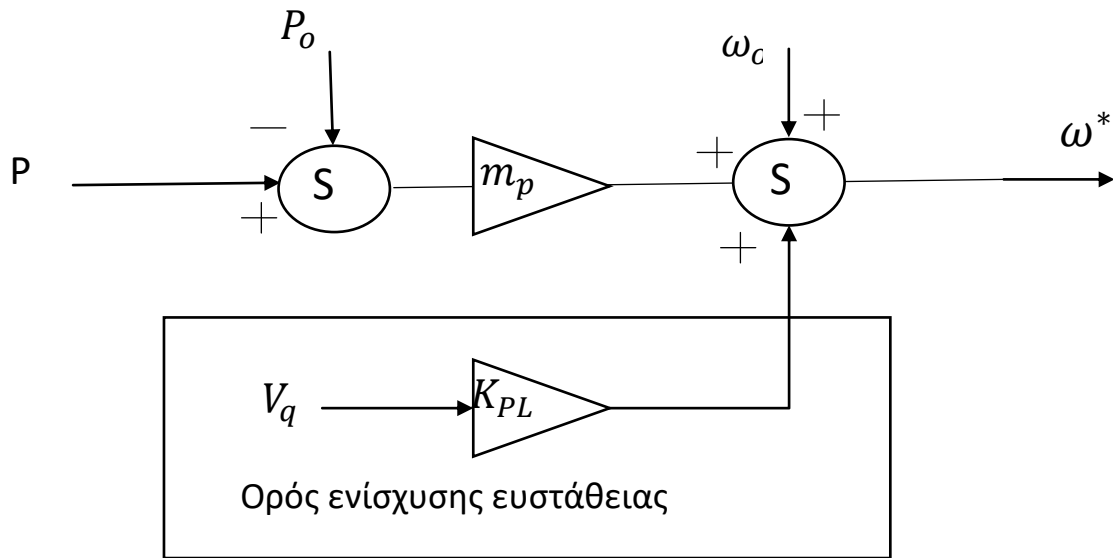
Μια εκ των μεθόδων που εξετάζονται σε αυτή την διπλωματική για την βελτίωση της ευστάθειας κατά την διάρκεια ενός μεταβατικού φαινομένου είναι ο περιορισμός ρεύματος με έλεγχο  $P \sim f$  droop ενισχυμένης ευστάθειας. Η διαφορά του με τον παραδοσιακό έλεγχο  $P \sim f$  είναι η προσθήκη ενός μη γραμμικού όρου, της τάσης  $V_q$  πολλαπλασιαζόμενη με τον συντελεστή ενισχυμένης ευστάθειας  $K_{PL}$ . Επομένως η εξίσωση του ελέγχου droop με SEPFC γίνεται :

$$\delta' = m_p(P - P_0) + K_{PL}V_q \quad (4.6) \quad \text{με } m_p < 0$$

Ο όρος  $V_q$  κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι αμελητέος (κοντά στο 0), επομένως μπορεί να παραληφθεί. Έτσι η εξίσωση στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι ίδια με αυτή ενός απλού ελεγκτή droop.

$$\delta' = m_p(P - P_0) \quad m_p < 0$$

Αντιθέτως κατά την διάρκεια ενός μεταβατικού φαινομένου οι τιμές τους όρου  $V_q$  μεταβάλλονται και συνεπώς ο όρος αυτός παύει να είναι αμελητέος .



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα block droop control P-f SEPFC [6]

Για να περιγράψουμε καλύτερα την μεταβολή της VPA χρησιμοποιώντας την σχέση (4.1) έχουμε:

$$S = V_q \frac{K_{PL}}{m_p} - P \quad (4.7)$$

Συνεπώς η (4.6) γίνεται

$$\delta' = m_p (S - P_o) \quad (4.8)$$

Για την ύπαρξη ενός σημείου ευσταθούς ισορροπίας θα πρέπει η μέγιστη τιμή του  $S$ ,  $S_{max}$  να είναι μεγαλύτερη από την ενεργό ισχύ αναφοράς  $S_{max} > P_o$ .

Ο όρος  $K_{PL}V_q$  δεν επηρεάζει το κύκλωμα κατά την μόνιμη λειτουργία ή όταν το ρεύμα του είναι μικρότερο του  $I_{max}$ , καθώς η συνιστώσα  $V_q$  έχει μηδενική τιμή. Άρα

$$\delta' = m_p (P - P_o) \quad (4.9) \text{ με } S=P$$

και η καμπύλη VPA παραμένει σταθερή.

Στην περίπτωση όμως όπου το ρεύμα φτάσει το σημείο κορεσμού η καμπύλη VPA μεταβάλλεται με την προσθήκη του νέου όρου, άρα  $S \neq P$ . Η τάση  $V_q$  από το μοντέλο που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 3 δίνεται από την διαφορά

$$V_q = U_q + X_\Sigma I_d \xrightarrow{U_q = -U \sin(\delta')} V_q = -U \sin(\delta') + X_\Sigma I_d \quad (4.10)$$

Και από την 4.3 η S γίνεται

$$S = (P_{sm} \cos(\delta') - \frac{K_{PL}}{m_p} U \sin(\delta')) + \frac{K_{PL}}{m_p} X_{\Sigma} I_d \quad \text{με } m_p < 0 \quad (4.11) \quad \text{ή αλλιώς}$$

$$S = (P'_{sm} \sin(\delta' + \theta) + \frac{K_{PL}}{m_p} X_{\Sigma} I_d) \quad (4.12)$$

$$\text{Με } P'_{sm} = \sqrt{P_{sm}^2 + \left(\frac{K_{PL}}{m_p} U\right)^2}$$

$$\text{Και } \theta = \arctan\left(\frac{P_{sm}}{\frac{K_{PL} U}{m_p}}\right) = -\arctan\left(\frac{m_p P_{sm}}{K_{PL} U}\right)$$

Για να διακρίνουμε αν το σύστημα είναι ευσταθές θα πρέπει

$$S_{max} > P_O \xrightarrow{\max(\sin(\delta'+\theta))=1} P'_{sm} + \frac{K_{PL}}{m_p} X_{\Sigma} I_{max} > P_O$$

$$\sqrt{P_{sm}^2 + \left(\frac{K_{PL}}{m_p} U\right)^2} + \frac{K_{PL}}{m_p} X_{\Sigma} I_{max} > P_O \xrightarrow{P_{sm}=U \cdot I_{max}}$$

$$U > \frac{P_O - \frac{K_{PL}}{m_p} X_{\Sigma} I_{max}}{\sqrt{I_{max}^2 + \left(\frac{K_{PL}}{m_p} U\right)^2}}$$

Σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αυτής είναι η απλότητα της, με μόνη παράμετρο το κέρδος  $K_{PL}$  και χωρίς την ύπαρξη αλγορίθμου εντοπισμού σφάλματος.

## 4.5 Μοντέλο Περιορισμού Ρεύματος με Εικονική εμπέδηση

Η δεύτερη μέθοδος που μελετάται, είναι η μέθοδος περιορισμού ρεύματος με την χρήση εικονικής εμπέδησης (Virtual Impedance). Παραδοσιακά, η μέθοδος περιορισμού ρεύματος αφορά τον περιορισμό του ρεύματος αναφοράς, μειώνοντας το ρεύμα του δικτύου. Με την τεχνική της εικονικής εμπέδησης, ο περιορισμός συμβαίνει στην τάση αναφοράς, αποτρέποντας το έλεγχο ρεύματος εξαρχής να λειτουργήσει με υψηλά ρεύματα αναφοράς και αποτρέποντας τον κορεσμό στην



έξοδο του ελέγχου τάσης. Η εξίσωση υπολογισμού της τάσης αναφοράς από την εικονική εμπέδηση δίνεται από τον τύπο [4]:

$$u_{d,VI} = R_{VI}^0 i_{od} \frac{s}{s+\omega_{c,hpf}} - \omega L_{VI}^0 i_{oq} \frac{s}{s+\omega_{c,hpf}} + \Delta R_{VI} i_{od} - \omega \Delta L_{VI} i_{oq} \quad (4.13)$$

$$u_{q,VI} = R_{VI}^0 i_{oq} \frac{s}{s+\omega_{c,hpf}} + \omega L_{VI}^0 i_{od} \frac{s}{s+\omega_{c,hpf}} + \Delta R_{VI} i_{oq} + \omega \Delta L_{VI} i_{od} \quad (4.14)$$

Με

$$\Delta R_{VI} = \max \left( k_{p,Rvi} \left( \sqrt{i_{Ld,ref}^2 + i_{Lq,ref}^2} - I_{thresh} \right), 0 \right) \quad (4.15)$$

$$\Delta L_{VI} = \Delta R_{VI} \frac{\Delta X}{R} \quad (4.16)$$

Και

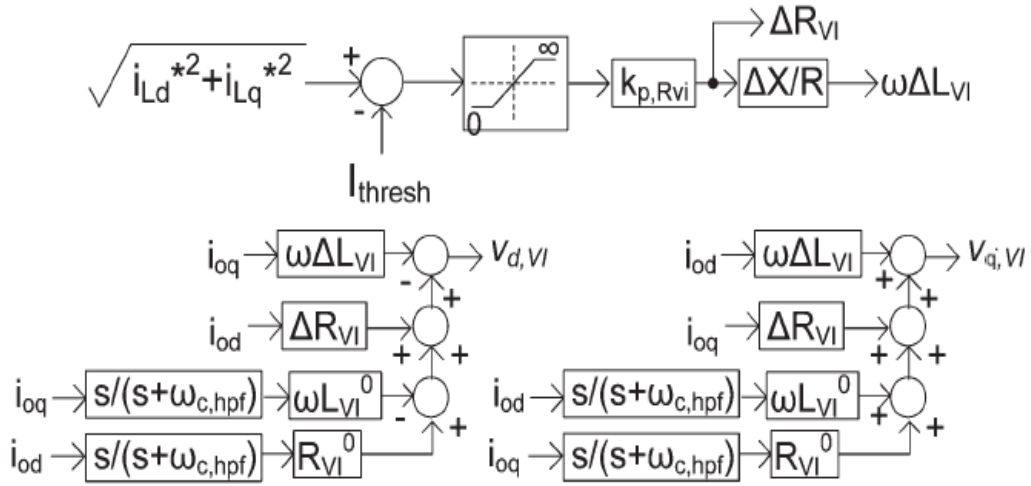
$$R_{VI} = R_{VI}^0 + \Delta R_{VI} \quad (4.17)$$

$$L_{VI} = L_{VI}^0 + \Delta L_{VI} \quad (4.18)$$

Οπού  $R_{VI}$  και  $L_{VI}$  η συνολική αντίσταση και επαγωγή του VI, όντας το άθροισμα της αντίστοιχης ονομαστική αντίστασης και επαγωγής  $R_{VI}^0$ ,  $L_{VI}^0$  και της αντίστασης και επαγωγή περιορισμού ρεύματος,  $\Delta R_{VI}$   $\Delta L_{VI}$  αντίστοιχα .

Το  $k_{p,Rvi}$  αποτελεί τον κέρδος της εικονικής εμπέδησης περιορισμού ρεύματος ,

$I_{thresh}$  το οριο ρευματος που εχουμε θεσει ,  $\frac{\Delta X}{R}$  αποτελεί τον όρο για τον προσδιορισμό του λογού μεταβολής επαγωγής με αντίσταση,  $\omega \Delta L_{VI} / \Delta R_{VI}$  και  $\omega_{c,hpf}$  η συχνότητα αποκοπής ενός υψιπερατού φίλτρου .



Εικόνα 4.9 Μοντέλο Virtual Impedance [4]

Η χρήση του ρεύματος αναφοράς της εισόδου του ελέγχου ρεύματος αντί του ρεύματος του δικτύου έγκειται στο γεγονός ότι έχουν παρατηρηθεί λιγότερες ταλαντώσεις στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος του δικτύου .

Κατά την διάρκεια του σφάλματος οι όροι  $\frac{\Delta X}{R}$  και  $k_{p,Rvi}$  καθορίζουν τη μείωση της έντασης του ρεύματος ώστε να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο. Αν  $I_{maxVI}$  η μέγιστη επιθυμητή ένταση τότε η τιμή της τάσης θα πρέπει να είναι ίση με

$$V_0 = I_{maxVI} Z_{VI} = I_{maxVI} \sqrt{R_{VI}^2 + (\omega_0 L_{VI})^2} \quad \text{και}$$

$$k_{p,Rvi} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Με:

$$a = (I_{maxVI} - I_{thresh})^2 \left(1 + \frac{\Delta X^2}{R}\right)$$

$$b = 2(I_{maxVI} - I_{thresh}) \left(R_{VI}^0 + \left(\frac{\Delta X}{R}\right) \omega_0 L_{VI}^0\right)$$

$$c = (R_{VI}^0)^2 + (\omega_0 L_{VI}^0)^2 - \frac{V_0^2}{I_{maxVI}^2}$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ MATLAB SIMULINK

## 5.1 Εισαγωγή

Αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου είναι η δημιουργία ενός δικτύου με αντιστροφείς, αποτελούμενο από τα στοιχεία ελέγχου που περιγράφηκαν στο **Κεφάλαιο 3**. Εφαρμόζονται στο δίκτυο οι τεχνικές περιορισμού ρεύματος με έλεγχο  $P\sim f$  droop ενισχυμένης ευστάθειας και με εικονική εμπέδωση και εξετάζεται η συμπεριφορά του δικτύου με κάθε μια από αυτές τις τεχνικές όταν αυτό υποβάλλεται σε βραχυκύκλωμα με πτώση τάσης στα 0.2 και 0.4 της ονομαστικής τάσης. Με αυτόν τον τρόπο εξετάζονται οι συνθήκες αστάθειας του **Κεφαλαίου 4**,  $P_m < P_o$  και  $P_o < P_m$ . Η προσομοίωση πραγματοποιείται μέσω Matlab Simulink.

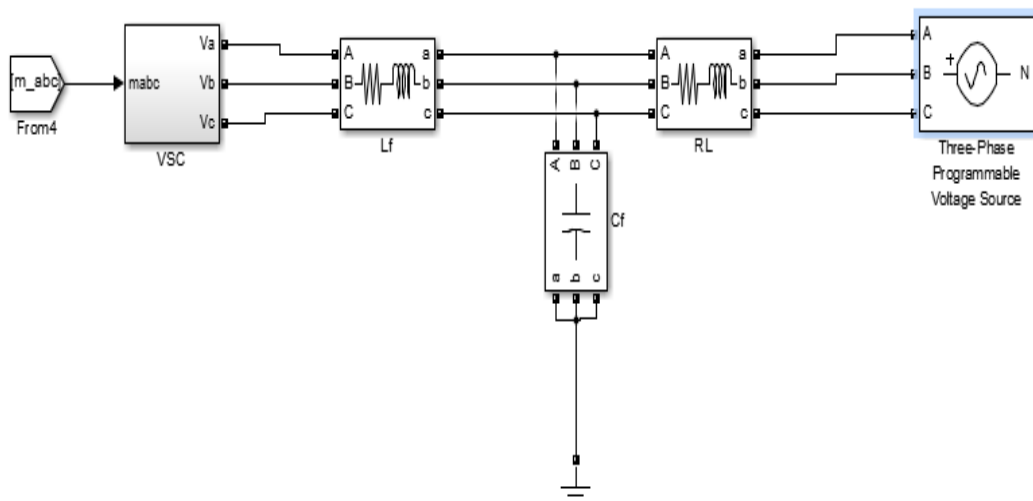
## 5.2 Περιγραφή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που σχεδιάστηκε στο Simulink αποτελείται από ένα βαθυπερατό φίλτρο LC, μια πηγή τάσης που προσομοιώνει το άπειρο σύστημα ΣΗΕ και έναν αντιστροφέα πηγής τάσης (**εικόνα 5.1**).

Το βαθυπερατό φίλτρο LC προσομοιώνεται με ένα πηνίο  $L_f$  και έναν πυκνωτή  $C_f$  με σκοπό να διακόπτει τις αρμόνικες που δημιουργούνται από το αντιστροφέα.

Οι τιμές των επαγωγικών στοιχείων του φίλτρου που έχουν επιλεγεί είναι  $L_f = 2.5$  mH με παρασιτική αντίσταση ίση με  $0.035 \Omega$ . Η τιμή του πυκνωτή είναι  $C_f = 25 \mu\text{F}$

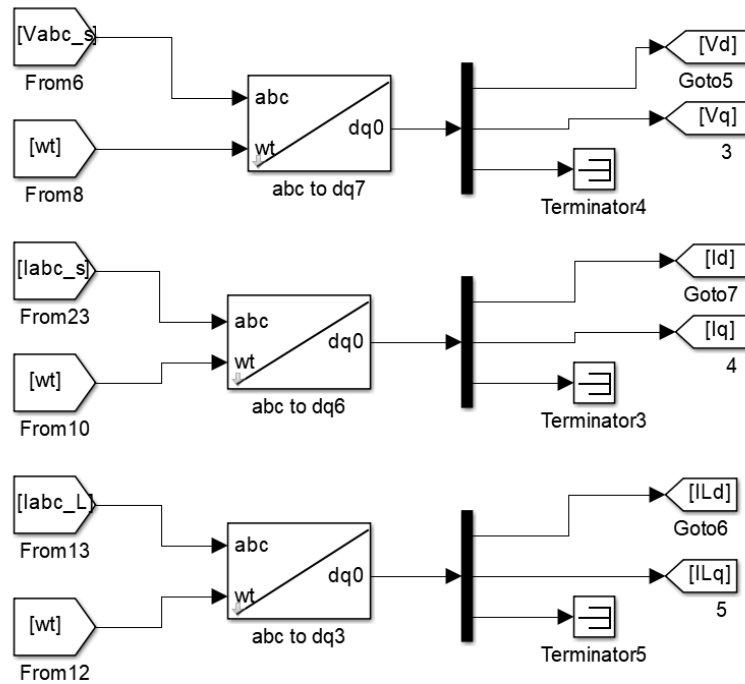
Η πηγή τάσης του κυκλώματος είναι τριφασική με πολική τάση  $V_\pi = 400$  V και συχνότητας  $f = 50$  Hz και η αντίσταση γραμμής είναι ίση με  $R = 0.25 \Omega$  με επαγωγή  $L = 1.59$  mH



Εικόνα 5.1 Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

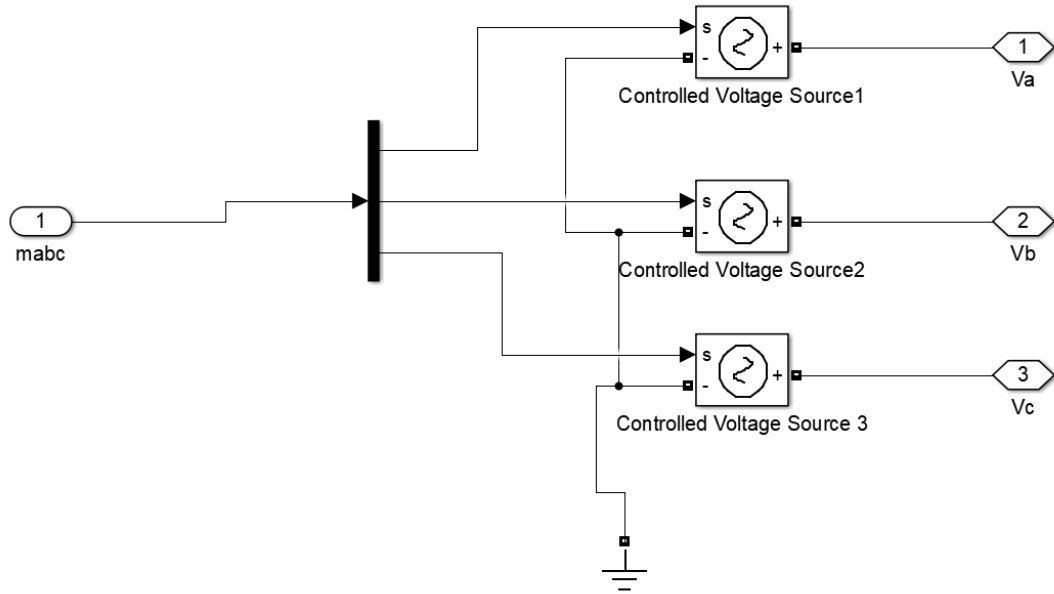
Για την προσομοίωση του Matlab Simulink χρειάζεται ο μετασχηματισμός των στοιχείων στο πεδίο dq0 ο οποίος επιτελείτε με την χρήση του αντιστοίχου block. Η γωνία του περιστρεφόμενου πλαισίου για τον μετασχηματισμό Park προέρχεται από την έξοδο του ελεγκτή droop  $P \sim f$ ,  $\omega t$ .

Στην **εικόνα 5.3** φαίνονται οι μετασχηματισμοί σημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στον έλεγχο .



**Εικόνα 5.3 μετατροπές abc-dq**

Τέλος, ο αντιστροφείας προσομοιώνεται με την χρήση τριών ελεγχόμενων πηγών τάσης. Στην είσοδο τους δέχονται το σήμα διαμόρφωσης  $m_{abc}$  και παράγουν τρία ημιτονοειδή σήματα με διάφορα φάσης  $120^\circ$ . Το σήμα διακύμανσης προκύπτει από τον έλεγχο που θα περιγράψουμε παρακάτω



Εικόνα 5.2 Αντιστροφείας πηγής τάσης στο Matlab Simulink

### 5.3 Υλοποίηση μοντέλου ελέγχου

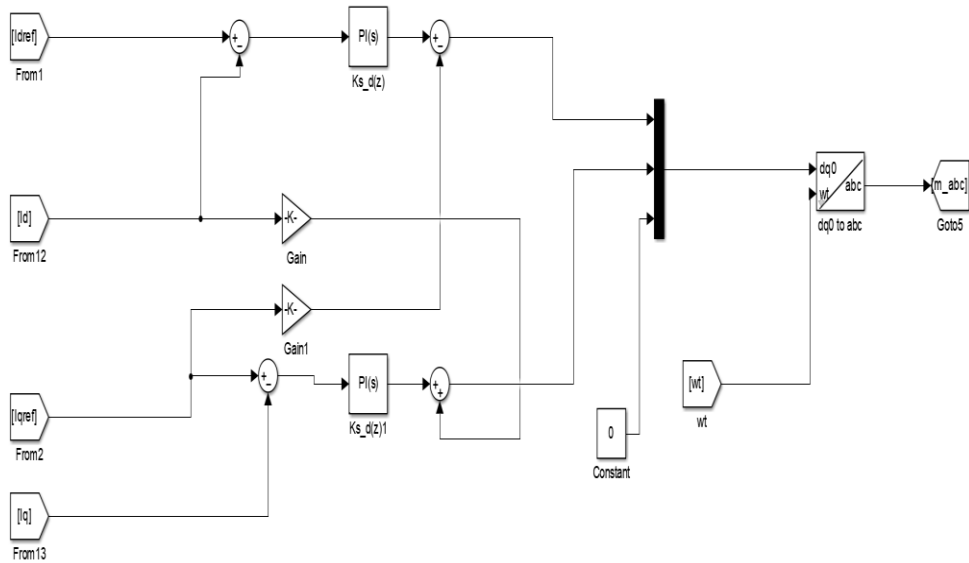
Το μοντέλο ελέγχου που υλοποιήθηκε στο παραπάνω σύστημα είναι αυτό που περιγράφηκε στο **κεφάλαιο 3**, αποτελούμενο από τους ελεγκτές ρεύματος, τάσης και droop.

#### 5.3.1 Υλοποίηση ελέγχου ρεύματος

Ο έλεγχος ρεύματος όπως περιγράφηκε στο **κεφάλαιο 3.3.2** παράγει ως έξοδο το σήμα διακύμανση με το οποίο τροφοδοτούμε τον αντιστροφή πηγή τάσης. Η είσοδος που δέχεται είναι τα δυο ρεύματα αναφοράς  $I_{qref}$  και  $I_{dref}$  καθώς και οι συνιστώσες των ρευμάτων στην έξοδο του αντιστροφεία  $I_q$  και  $I_d$ . Τα κέρδη του ελεγκτή υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\text{Gain} = L * \omega_0 = 1.8$$

Τα στοιχεία του ελεγκτή PI είναι :  $k_p = 0.003$  και  $k_i = 35.35$



Εικόνα 5.4 Ελεγκτής ρεύματος

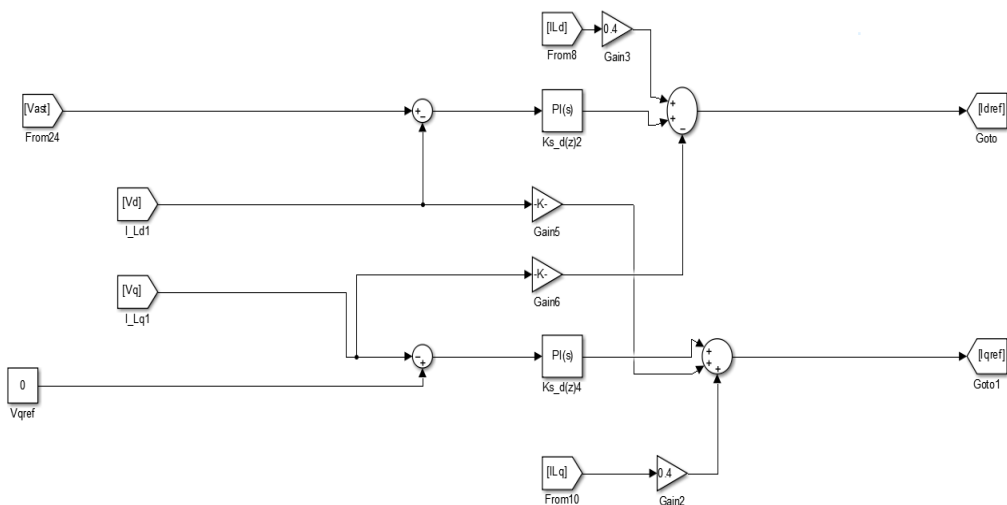
### 5.3.2 Υλοποίηση ελέγχου τάσης

Στον ελεγκτή τάσης, που μοντελοποιήθηκε στο κεφάλαιο 3.3.3, ως τάση αναφοράς για την συνιστώσα d παίρνεται την τιμή που θα προκύψει από τον έλεγχο droop  $Q \sim V$ ,  $V_{ast}$ , και για την συνιστώσα q την τιμή 0 ώστε να αποφύγουμε αρχική φάση. Ο ελεγκτής ρυθμίζει τις τιμές του δικτύου να ακολουθούν αυτές τις τιμές αναφοράς. Χρησιμοποιείται όπως και στον έλεγχο ρεύματος ελεγκτής PI με:  $k_p = 6.45$  και  $k_i = 6450$

Τα κέρδη του ελεγκτή τάσης είναι

$$\text{Gain} = \omega C_f = 0.0078$$

Τέλος οι τιμές της εξόδου ελέγχου τάσης αποτελούν την είσοδο στον έλεγχο ρεύματος  $I_{qref}$  και  $I_{dref}$



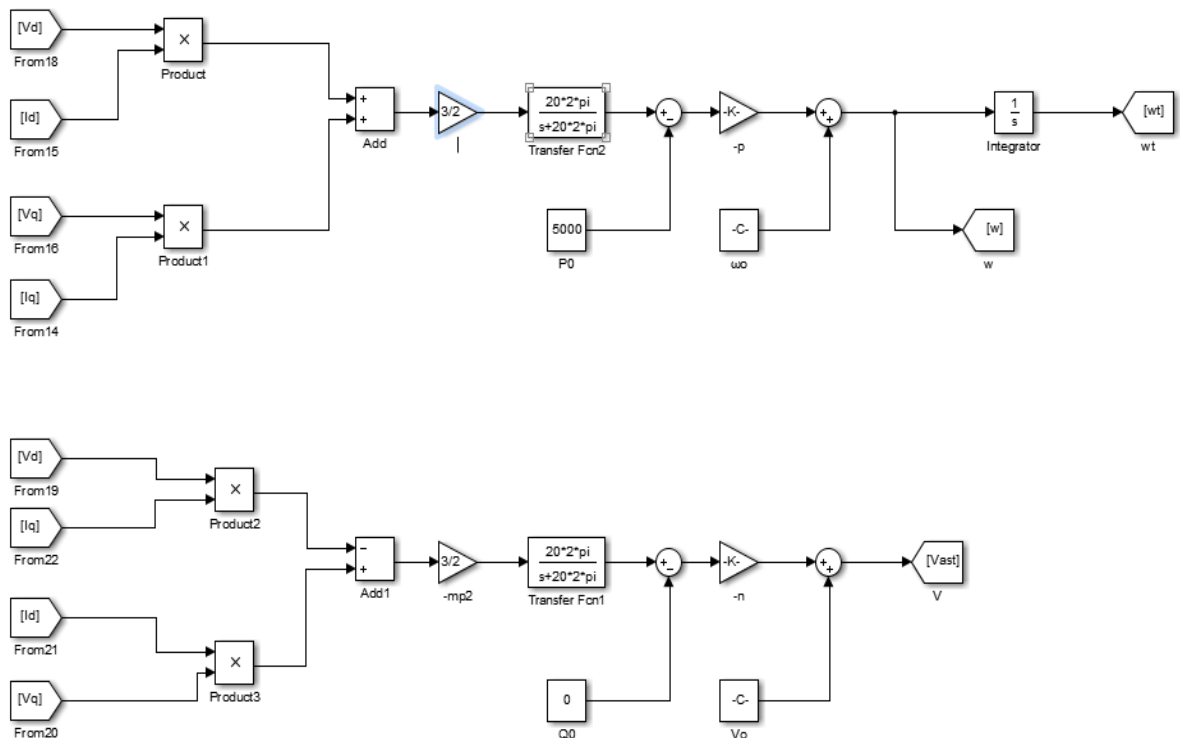
Εικόνα 5.5 Ελεγκτής τάσης

### 5.3.3 Υλοποίηση ελέγχου droop P~f και Q~V

Οι έλεγχοι droop P~f Q~V που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση δέχονται ως είσοδο την ενεργό και άεργο ισχύ και δίνουν έξοδο την συχνότητα και την τάση που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο αντίστοιχα όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 3.3.4. Το βαθυπερατο φίλτρο των ελεγκτών droop μέσα στο οποίο εισέρχεται η στιγμιαία ενεργός και άεργος ισχύ έχει συχνότητα αποκοπής  $f_c=20$  Hz .

Ο ελεγκτή P~f έχει ισχύ αναφοράς  $P=5$  kW και κυκλική συχνότητα αναφοράς ίση με την ονομαστική, με τιμή  $\omega_0=2\pi 50=314.15$  rad/s. Ο συντελεστής droop του ελεγκτή είναι  $p=0.0000563$

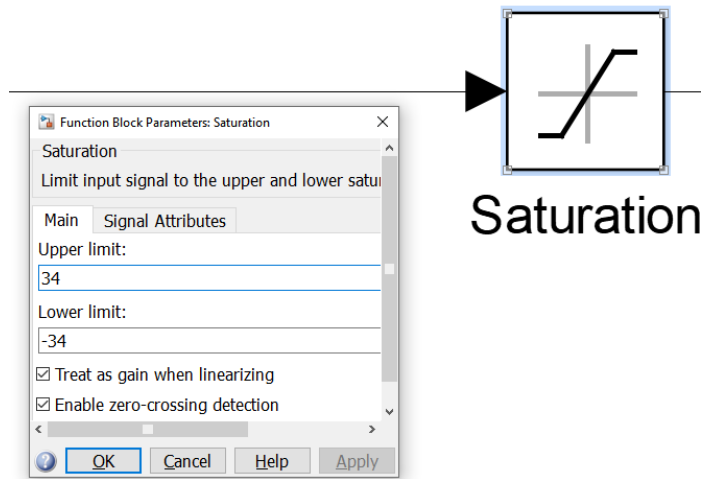
Στο ελεγκτή Q~V, η άεργος ισχύ αναφοράς είναι  $Q=0$  kVAR και η τάση αναφοράς  $V_0=\frac{400\sqrt{2}}{\sqrt{3}}=326.59$  V με συντελεστή droop  $n=0.00179$



Εικόνα 5.6 Ελεγκτής droop P~f και Q~V

### 5.4 Περιοριστής ρεύματος στα ρεύματα αναφοράς

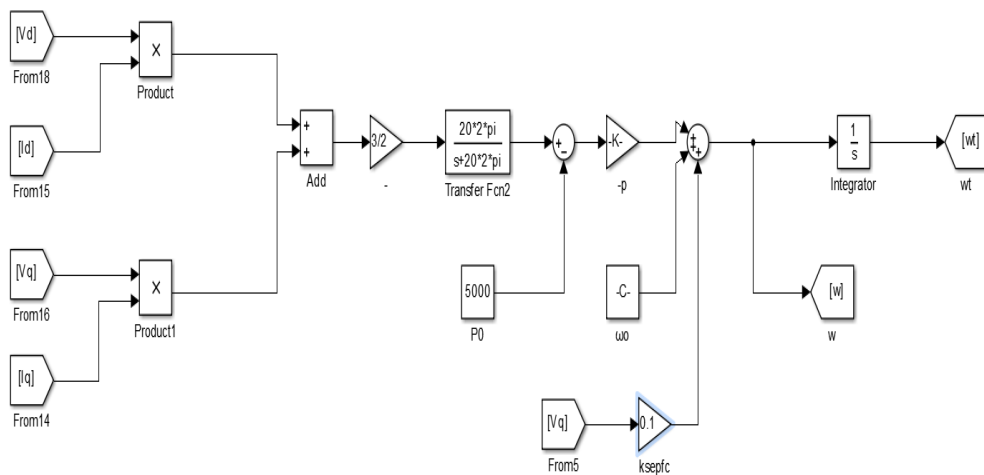
Στην είσοδο του ελεγκτή ρεύματος χρησιμοποιείται περιοριστής ρεύματος. Ο περιοριστής ρεύματος στην προσομοίωση πραγματοποιείται με το Block της μονάδας κορεσμού του MATLAB Simulink με ανώτερο όριο 34A και κατώτερο -34 A (εικόνα 5.7)



Εικόνα 5.7 Μονάδα κορεσμού και οι συνιστώσες της

## 5.5 Υλοποίηση Περιορισμού ρεύματος με SEPFC

Η πρώτη μέθοδος που εξετάζεται είναι αυτή του ελέγχου droop ενισχυμένης ευστάθειας που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4.4. Για την δημιουργία του ελέγχου droop ενισχυμένης ευστάθειας χρησιμοποιήσαμε κέρδος  $K_{pi}=0.1$ , με το οποίο πολλαπλασιάζουμε την συνιστώσα της τάσης του δικτύου  $V_q$  στον ελεγκτή ενεργού ισχύος συχνότητας. Ο ελεγκτής droop με Sepfc έχει την μορφή της εικόνας 5.7. Σε αυτήν την περίπτωση το δίκτυο χρησιμοποιεί ακόμη περιοριστή ρεύματος στην είσοδο του ελεγκτή ρεύματος.



Εικόνα 5.8 Ελεγκτής droop με Sepfc

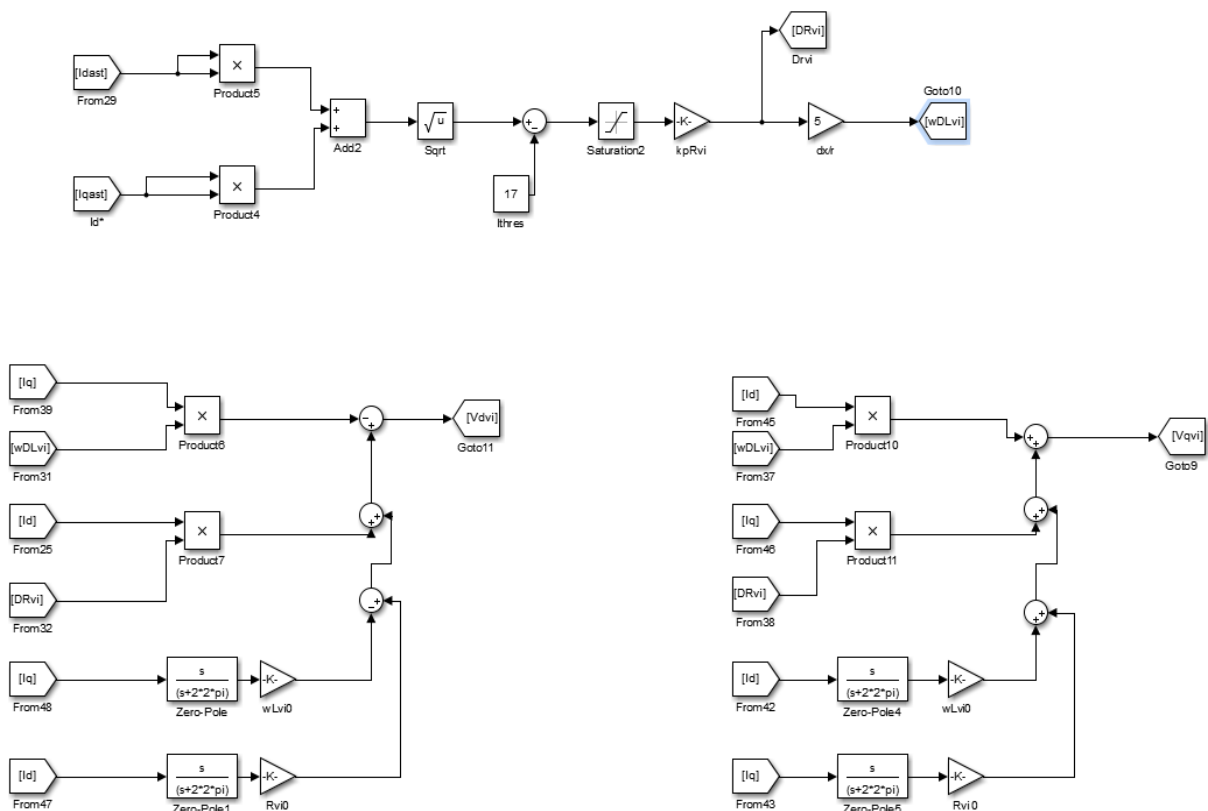


## 5.6 Υλοποίηση Περιορισμού ρεύματος με Virtual Impedance

Η δεύτερη μέθοδος περιορισμού ρεύματος που υλοποιήσαμε περά από την SEPFC είναι με την χρήση εικονικής εμπέδησης. Με βάση το μοντέλο που περιγράψαμε στο κεφάλαιο 4.5, η μορφή του περιοριστεί είναι αυτή της εικόνας 5.9 με είσοδο τα ρεύματα αναφοράς από την έξοδο του ελέγχου τάσης. Σε αυτήν την μέθοδο δεν χρησιμοποιείται περιοριστής ρεύματος στα ρεύματα αναφοράς του ελέγχου ρεύματος καθώς ο περιορισμός του ρεύματος πραγματοποιείται εξ αρχής στις τάσεις αναφοράς του δικτύου.

Οι τιμές της ονομαστικής εικονικής εμπέδωσης  $R_{vi}^0$  και  $\omega L_{vi}^0$  είναι ίσες με  $0.8484 \Omega$ .

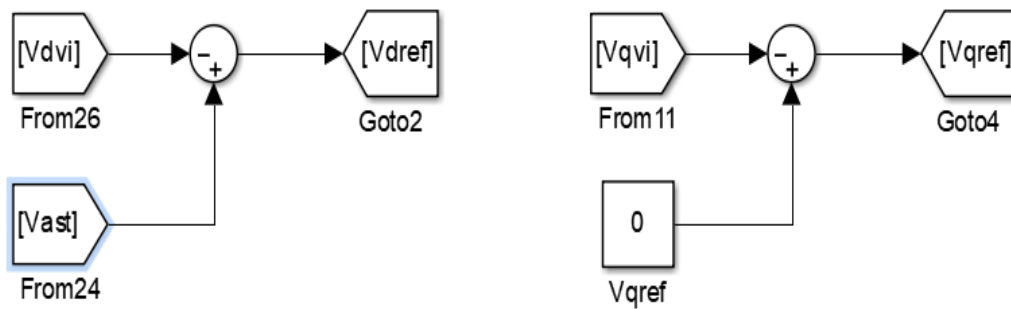
Το όριο ρεύματος είναι ίσο με  $17 \text{ A}$ , το κέρδος του ελεγκτή  $k_{pRvi}=0.012 \Omega/\text{A}$ , ο λόγος μεταβολής επαγωγής και αντίστασης  $\Delta x/r = 5$  και η συχνότητα αποκοπής του υπερυψηλού φίλτρου  $f_{c,hpf}=2\text{Hz}$ .



Εικόνα 5.9 Υλοποίηση περιοριστή ρεύματος με εικονική εμπέδηση

Οι τιμές που πάρθηκαν για την προσομοίωση προήρθαν από την προσομοίωση της πηγής [6].

Οι τιμές αναφοράς στον ελεγκτή τάσης σε αυτήν την περίπτωση έχοντας στο σύστημα τον περιοριστή VI είναι



Εικόνα 5.10 Τιμές αναφοράς στον ελεγκτή τάσης με virtual impedance

## 5.7 Προσομοιώσεις

Το δίκτυο που δημιουργήσαμε προσομοιώνεται σε συνθήκες που ανήκουν στις διαταραχές που περιγράψαμε στο **κεφάλαιο 4.3**, με το δίκτυο να δέχεται βραχυκύκλωμα με πτώση τάσης στα 0.2 της ονομαστικής τιμής της όπου  $U' < P_O / I_{max}$  (1η περίπτωση), και με το δίκτυο να δέχεται βραχυκύκλωμα με πτώση τάσης στα 0.4 της ονομαστικής τιμής, με  $U' > P_O / I_{max}$  (2η περίπτωση). Η διαταραχή διαρκεί από  $T=3s$  έως  $3.15s$  και έπειτα η τάση του δικτύου επανέρχεται στην αρχική τιμή της. Μελετάται η συμπεριφορά του δικτύου με μόνο περιοριστή ρεύματος, με έλεγχο droop ενισχυμένης ευστάθειας και με εικονική εμπέδηση, για κάθε μια από τις δυο περιπτώσεις βραχυκυκλώματος.

### 5.7.1 Περίπτωση 1: Βραχυκύκλωμα Πτώσης τάσης στα 0.2 U'

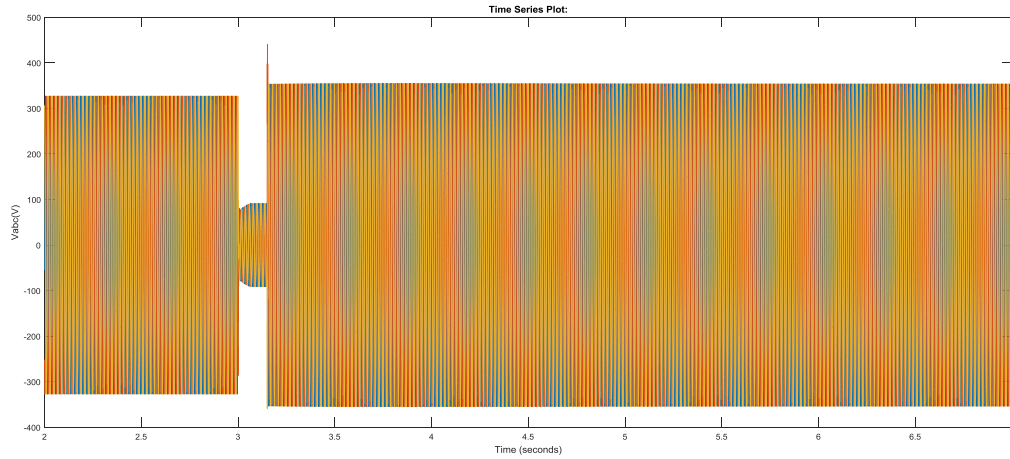
Με την πτώση τάσης στο 0.2 της ονομαστικής τιμής της, η προσομοίωση μας αναπαριστά το φαινόμενο της αστάθειας κατά το οποίο  $U' < P_O / I_{max}$ ,  $0.2V=80 < 5000/34=147.05$ , που περιγράφει την περίπτωση αστάθειας του κεφαλαίου 4.3.1.

#### 5.7.1.1 Προσομοίωση με περιοριστή ρεύματος

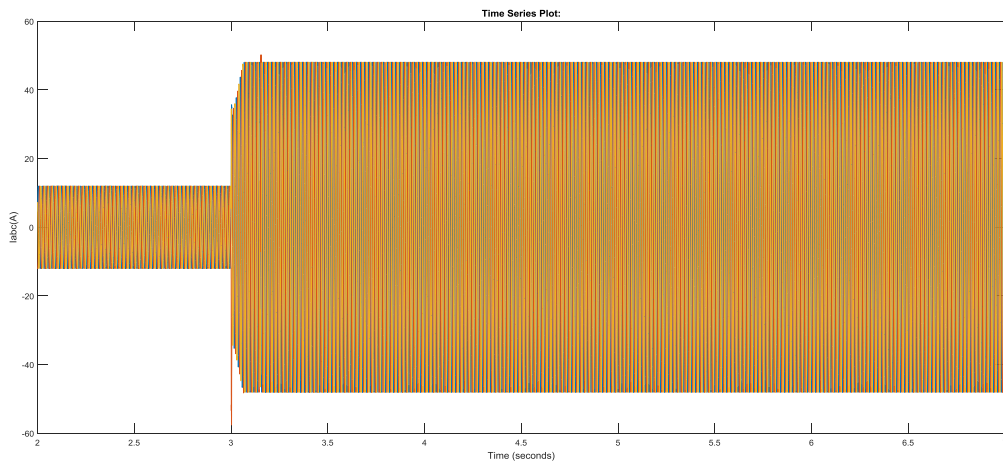
Σε αυτήν την περίπτωση το δίκτυο λειτουργεί μόνο με την μονάδα κορεσμού στο ρεύμα αναφοράς του ελέγχου ρεύματος.

Παρατηρούμε ότι κατά την διάρκεια και μετά την διαταραχή το σύστημα δεν επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση με την τάση μετά την διαταραχή να φτάνει  $V_{abc}=354V$  και το ρεύμα να είναι ίσο με το ρεύμα κορεσμού που έχει ορίσει  $I_{abc}=48A$  (**εικόνα 5.11,5.12**). Η συχνότητα και η ενεργός ισχύ παρουσιάζουν αντιστρόφως ανάλογη συμπεριφορά, σύμφωνα με τις **εικόνες 5.13 και 5.15**, με την αύξηση της ενεργού να οδηγεί σε μείωση της συχνότητα και αντίστροφα εξαιτίας του feedback του ελεγκτή droop που περιεγράφηκε στο **κεφάλαιο 3.3.4**. Όπως φαίνεται το

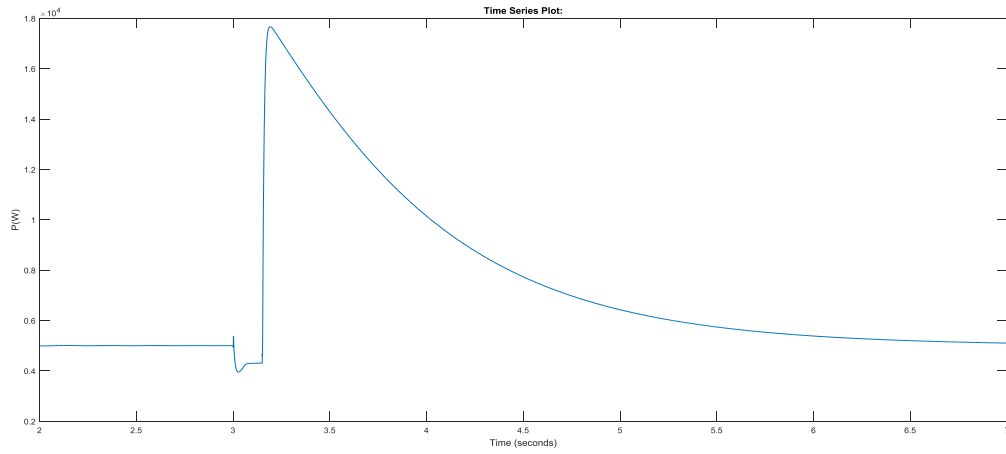
σύστημα επέρχεται σε αστάθεια ,αφού ο περιοριστής ρεύματος δεν επαρκεί για την διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος, με το ρεύμα να μην μπορεί να επανέλθει στις αρχικές τιμές. Αιτία αυτού ήταν η ύπαρξης περισσότερων στοιχείων έλεγχου εκτός του ελεγκτή ρεύματος, γεγονός που περιγράφηκε στο **κεφάλαιο 4.2** .



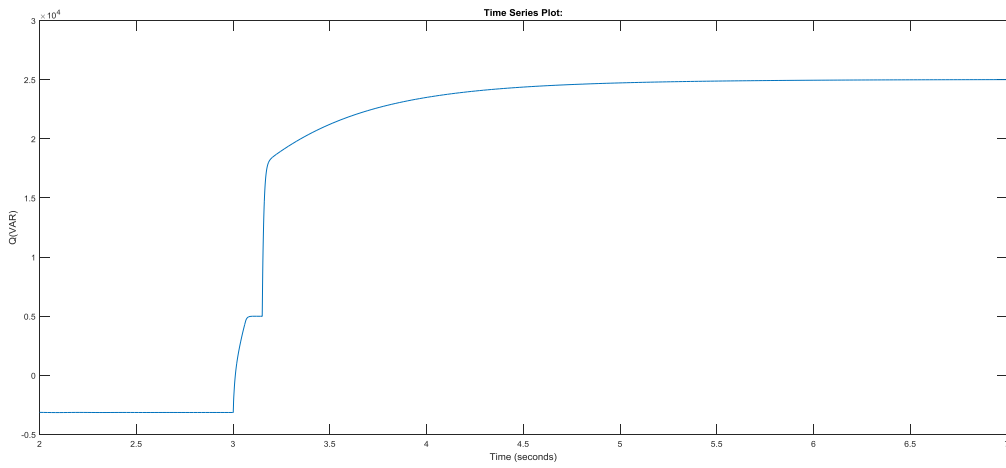
**Εικόνα 5.11 Τριφασική τάση δικτύου**



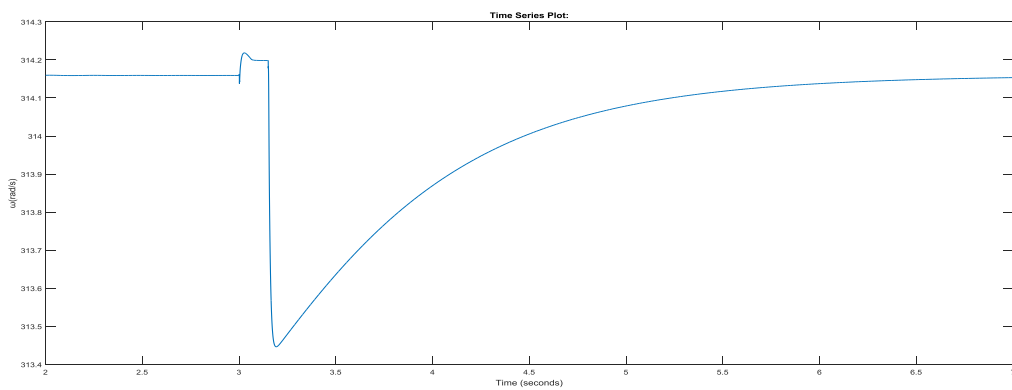
**Εικόνα 5.12 Τριφασικό ρεύμα δικτύου**



**Εικόνα 5.13 Ενεργός ισχύ του δικτύου**



**Εικόνα 5.14 Άεργος ισχύ του δικτύου**

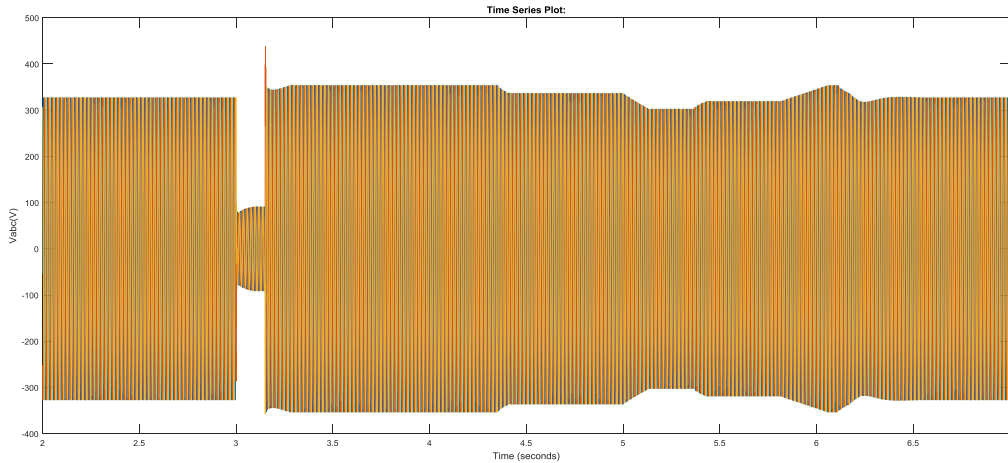


**Εικόνα 5.15 Κυκλική συχνότητα του δικτύου**

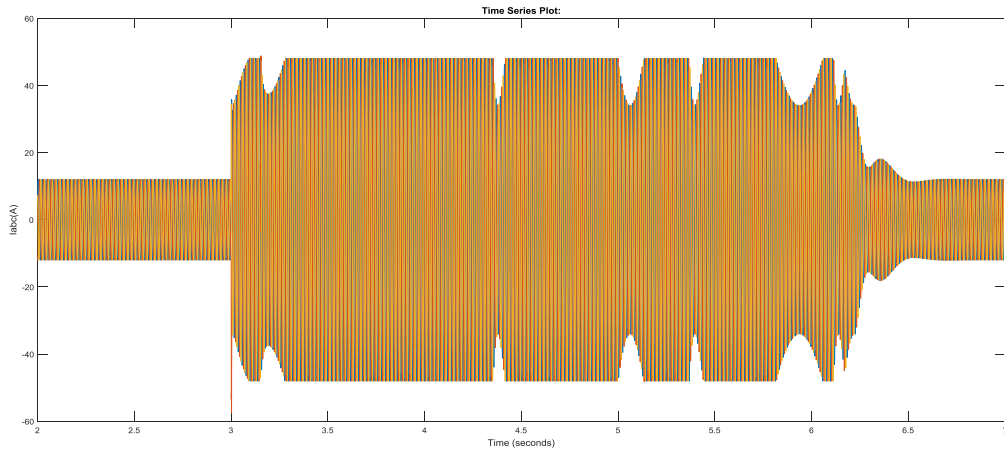
### 5.7.1.2 Προσομοίωση με SEPFC

Το δίκτυο, όπως φαίνεται από τις κυματομορφές των **εικόνων 5.16-5.21**, μετά την διαταραχή επανέρχεται ξανά στις αρχικές συνθήκες λειτουργίας την χρονική στιγμή  $T=6.7s$ .

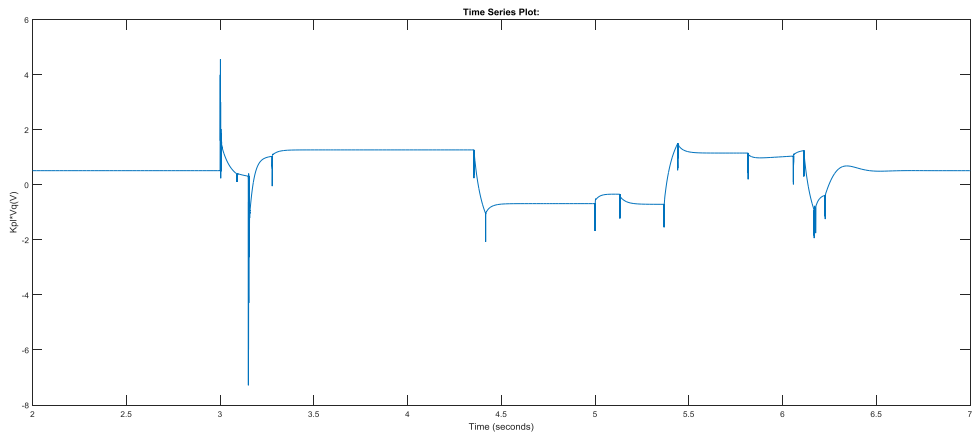
Την στιγμή της διαταραχής επιδρά στο σύστημα η μονάδα κορεσμού μη αφήνοντας την τιμή του ρεύματος να φτάσει πάνω από το ανώτερο όριο που έχει τεθεί,  $I_{abc}=48A$  με το SEPFC, όπως περιγράψαμε στο κεφάλαιο 4.4, επαναφέρει το σύστημα στην αρχική κατάσταση με  $I_{abc}=12A$  και  $V_{abc} = 327.15$ . Σε αντίθεση με την παραπάνω περίπτωση, με μονό τον περιοριστή ρεύματος, όταν το σύστημα αρχίζει να κινείται προς την αστάθεια, επενεργεί σε αυτό η συνιστώσα  $V_q$  του SEPFC, η οποία πλέον δεν έχει αμελητέες τιμές (**εικόνα 5.18**) και οδηγεί το σύστημα σε κατάσταση ευσταθούς λειτουργίας. Παρατηρείται ότι η κυματομορφή της ενεργού ισχύος και του  $K_{pl}V_q$  έχουν την ίδια μορφή. Όταν η ενεργός ισχύς είναι υψηλότερη από την ισχύ αναφοράς, τότε η τιμή του  $K_{pl}V_q$  αυξάνεται. Ομοίως και όταν είναι μικρότερη. Έτσι η συχνότητα όταν δεν υπάρχουν μεταβολές τις ενεργού ισχύος, δηλαδή είτε η ισχύς είναι μεγαλύτερη είτε μικρότερη από την ονομαστική, έχει σταθερή τιμή και ίση με αυτή της κανονικής λειτουργίας. Μεταβολές τις συχνότητας υπάρχουν μόνο κατά την μεταβολή την ισχύος. Παρακάτω φαίνονται οι κυματομορφές τάσης, ρεύματος,  $K_{pl}V_q$  του SEPFC, ενεργού και άεργου ισχύος καθώς και της κυκλικής συχνότητας του συστήματος(**εικόνες 5.16-21**).



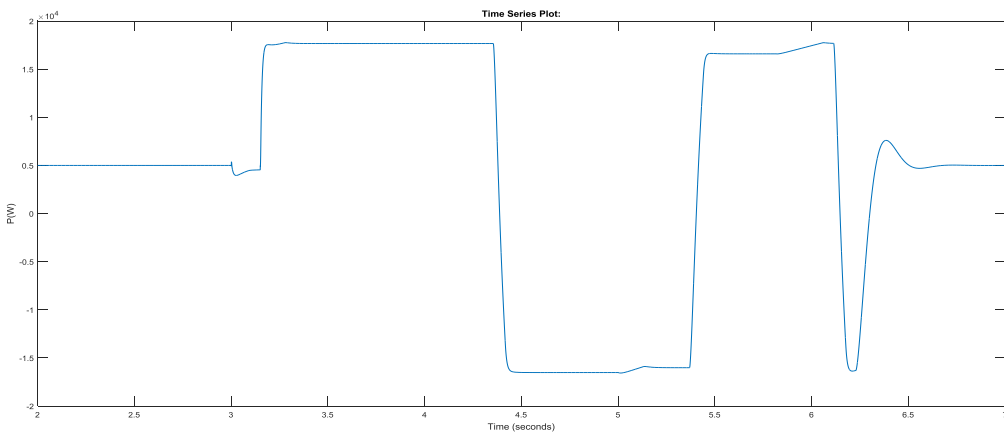
**Εικόνα 5.16 Τριφασική τάση δικτύου με SEPFC**



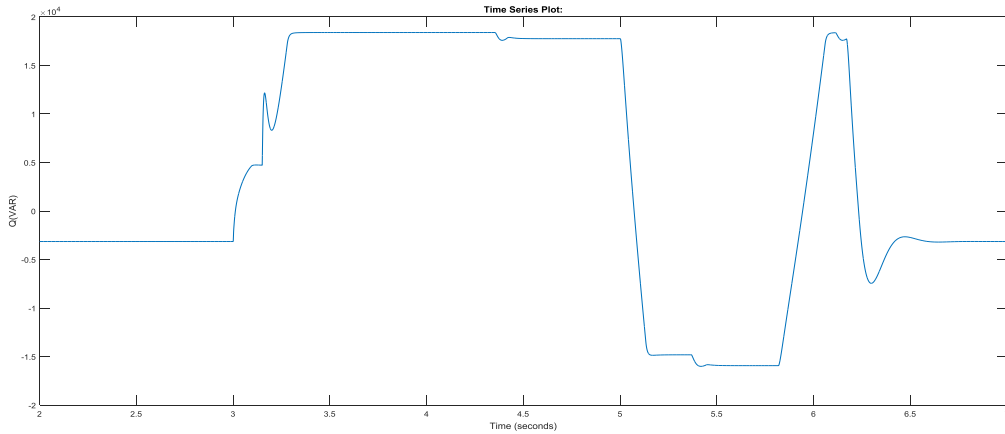
Εικόνα 5.17 Τριφασικό ρεύμα δικτύου με SEPFC



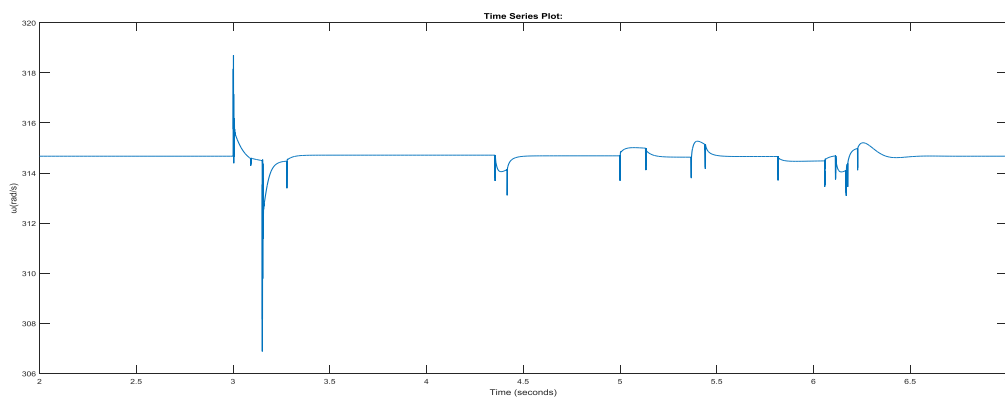
Εικόνα 5.18 Συνιστώσα  $K_{pI} V_q$  του SEPFC



Εικόνα 5.19 Ενεργός ισχύ του δικτύου με SEPFC



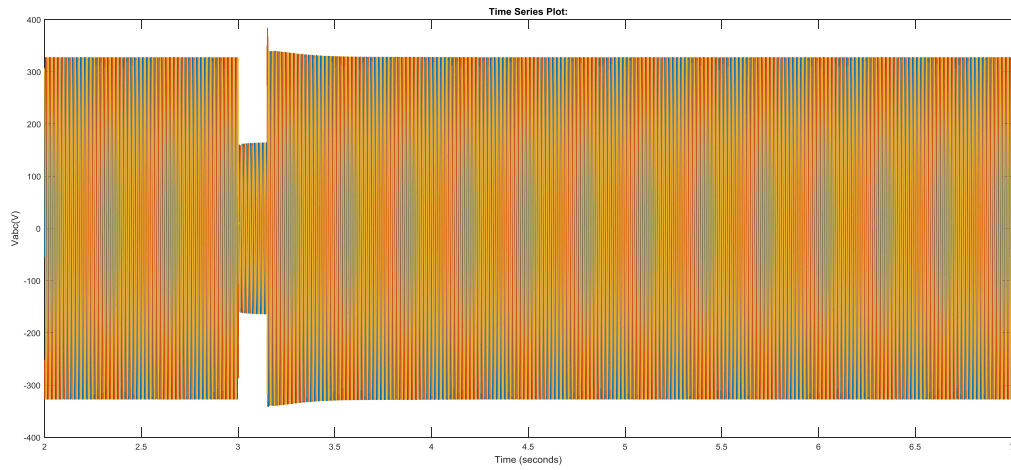
Εικόνα 5.20 Άεργος ισχύ του δικτύου με SEPFC



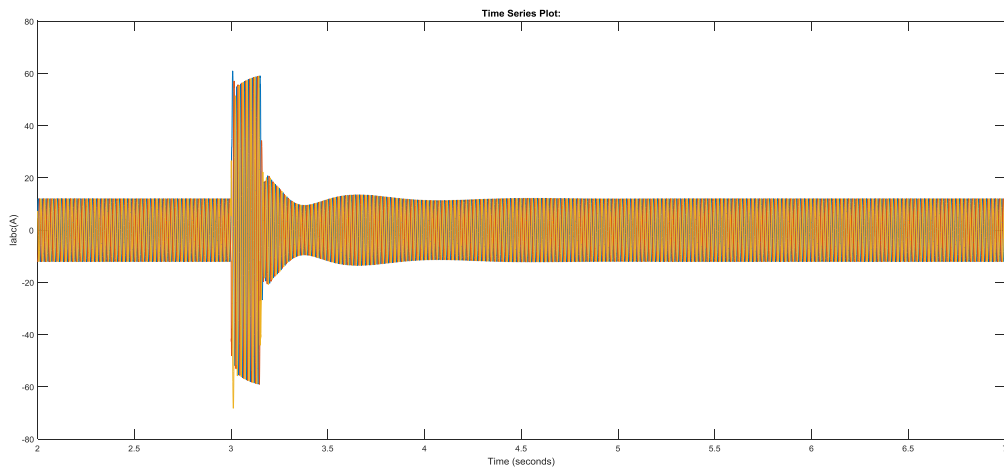
Εικόνα 5.21 Κυκλική συχνότητα του δικτύου με SEPFC

### 5.7.1.3 Προσομοίωση δικτύου με εικονική εμπέδηση

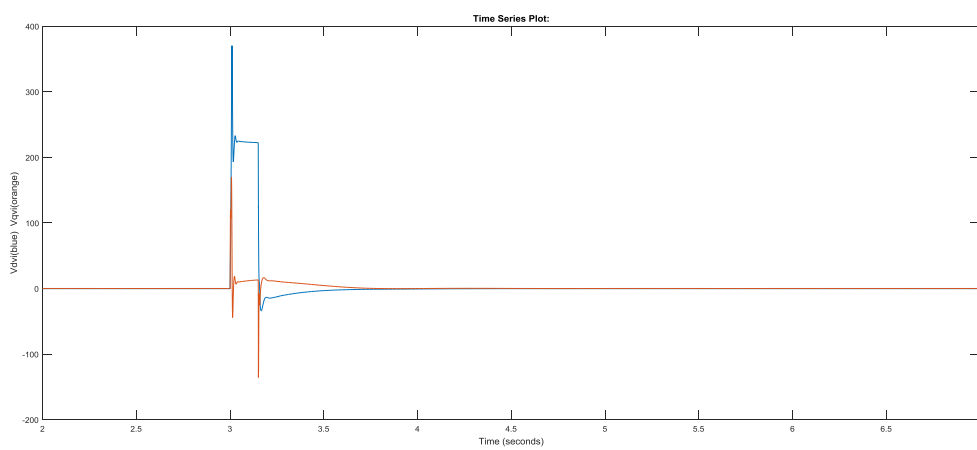
Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει μονάδα κορεσμού ώστε να διατηρήσει την τιμή του ρεύματος σε επιτρεπτά επίπεδα κατά την διάρκεια του σφάλματος. Σύμφωνα με το κεφάλαιο 4.5, τον ρολό αυτό μαζί με την επαναφορά του συστήματος σε ευσταθή λειτουργία αναλαμβάνει η εικονική εμπέδηση επηρεάζοντας την τιμή αναφοράς στην τάση του ελεγκτή. Στην προσομοίωση, το ρεύμα κατά την διάρκεια του σφάλματος λαμβάνει μέγιστη τιμή στα 77A και μετά το τέλος της διαταραχής αρχίζει να μειώνεται έως ότου φτάσει τις αρχικές τιμές. Το σύστημα επανέρχεται στις αρχικές συνθήκες λειτουργίας όταν  $T=5.6s$ . Η ενεργός ισχύ και η συχνότητα έχουν αντιστρόφως ανάλογη συμπεριφορά όπως περιγράφηκε για τον έλεγχο droop (κεφάλαιο 3.3.4). Από την κυματομορφή της εικόνας 5.24 φαίνεται η επίδραση της εικονικής εμπέδησης στις τάσεις αναφοράς κατά την διάρκεια του σφάλματος και έως ότου αυτό διορθωθεί. Οι κυματομορφές τις ενεργού ισχύος και της συχνότητας φαίνονται στις εικόνες 5.25 και 5.27.



Εικόνα 5.22 Τριφασική τάση δικτύου με εικονική εμπέδηση

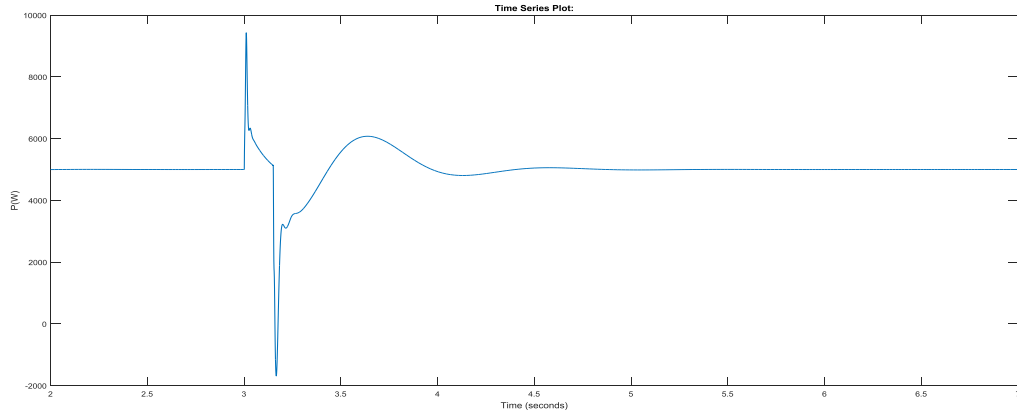


Εικόνα 5.23 Τριφασικό ρεύμα δικτύου με εικονική εμπέδηση

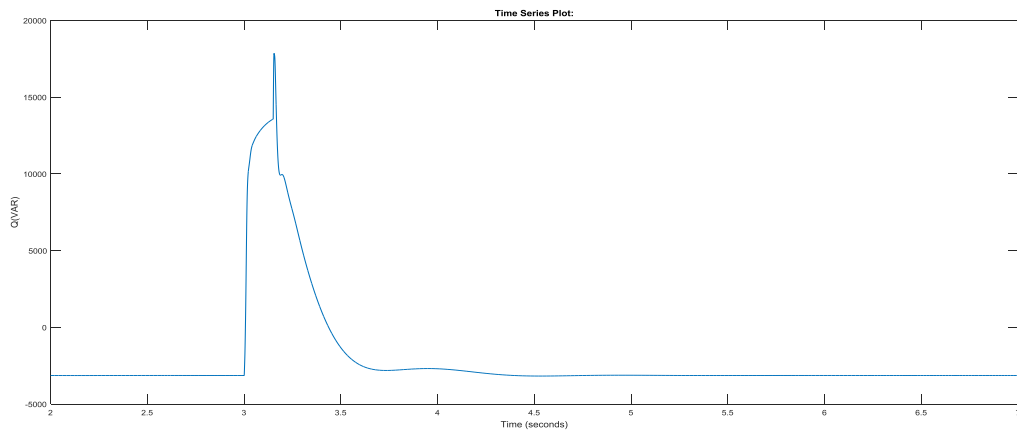


Εικόνα 5.24 Τάσεις αναφοράς από την εικονική εμπέδηση  $V_{dref}$  (μπλε)  $V_{qref}$  (πορτοκαλί)

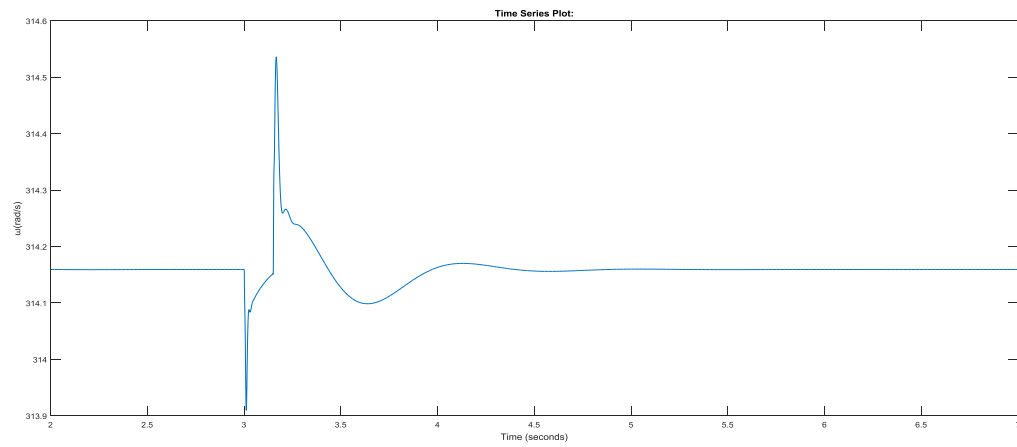




**Εικόνα 5.25 Ενεργός ισχύ του δικτύου με εικονική εμπέδηση**



**Εικόνα 5.26 Άεργος ισχύ του δικτύου με εικονική εμπέδηση**



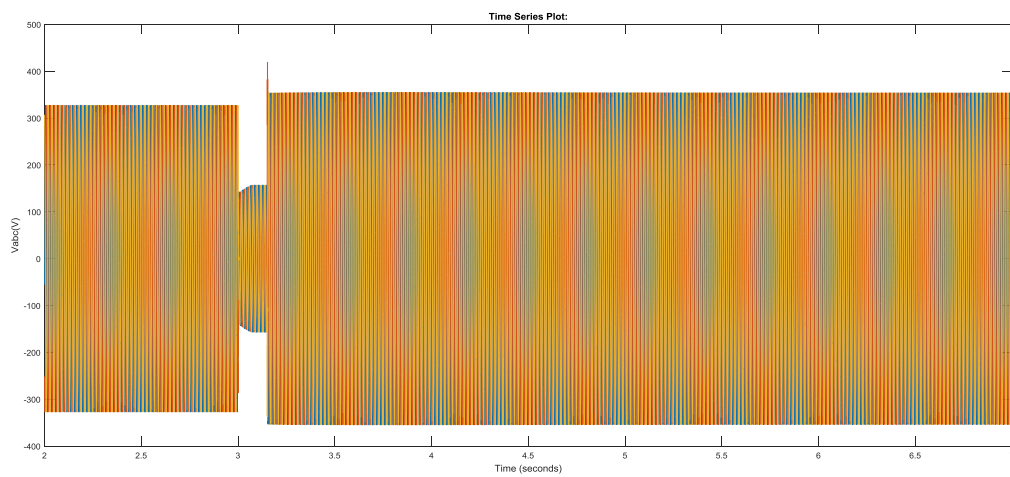
**Εικόνα 5.27 Κυκλική συχνότητα του δικτύου με εικονική εμπέδηση**

## 5.7.2 Περίπτωση 2: Βραχυκύκλωμα Πτώσης τάσης στα 0.4 U'

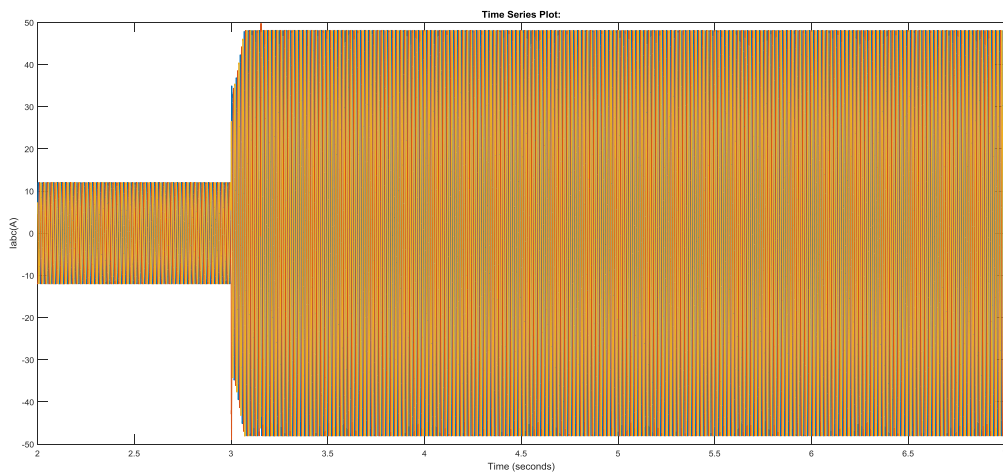
Με την πτώση τάσης στο 0.4 της ονομαστικής η προσομοίωση μας αναπαριστά το φαινόμενο της αστάθειας κατά το οποίο  $0.4V=160 > 5000/34=147.05$  που περιγράφει την περίπτωση αστάθειας του κεφαλαίου 4.3.2.

### 5.7.2.1 Προσομοίωση με περιοριστή ρεύματος

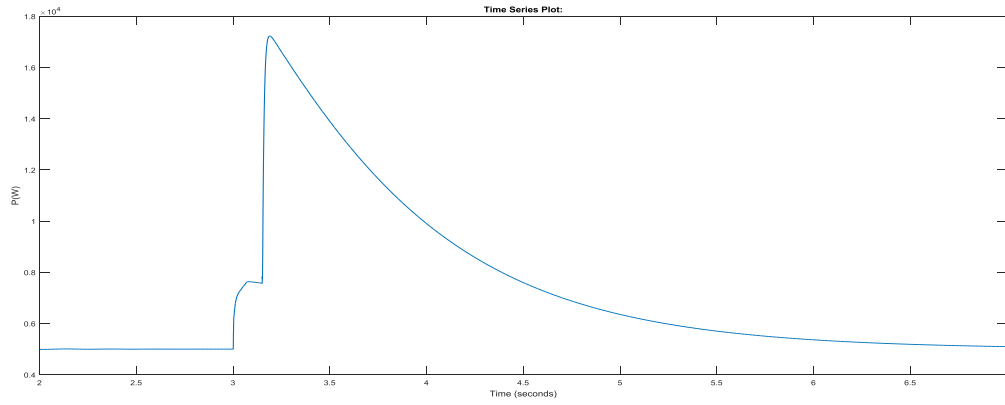
Παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα δεν είναι δυνατό να επανέλθει σε ευστάθεια παρομοίως με ότι παρατηρήθηκε στο κεφαλαίο 5.7.1.1. Με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται παρακάτω στις εικόνες 5.28-32.



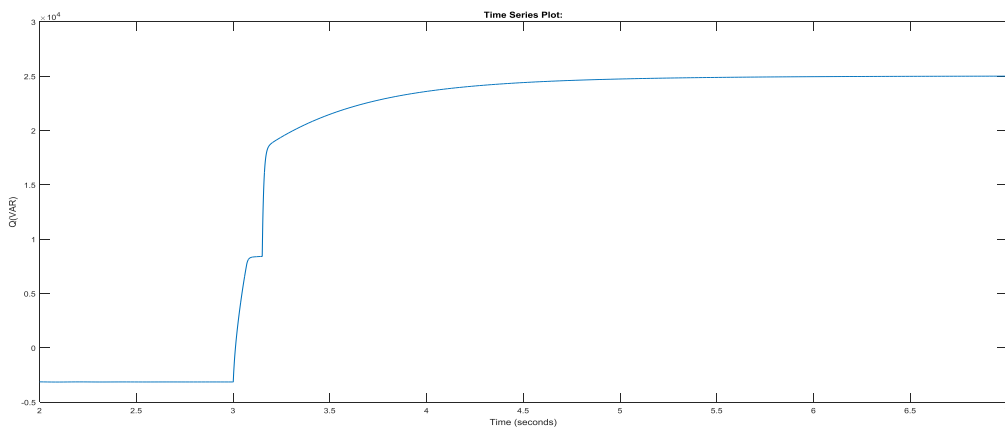
Εικόνα 5.28 Τριφασική τάση δικτύου



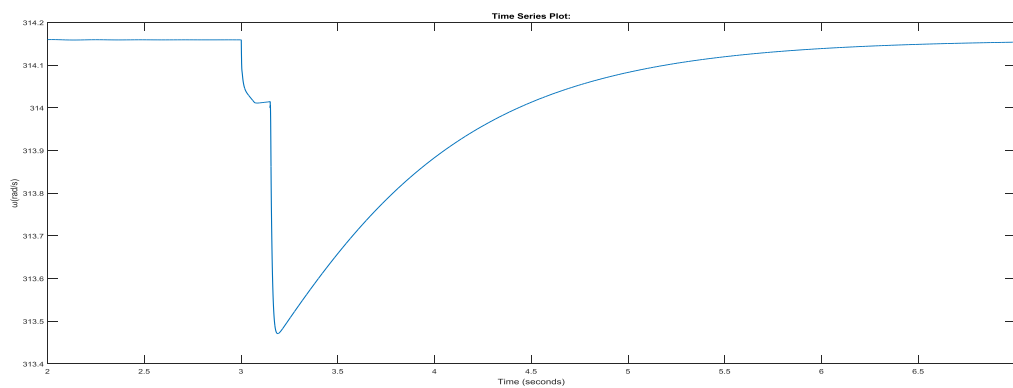
Εικόνα 5.29 Τριφασικό ρεύμα δικτύου



Εικόνα 5.30 Ενεργός ισχύ του δικτύου



Εικόνα 5.31 Άεργος ισχύ του δικτύου

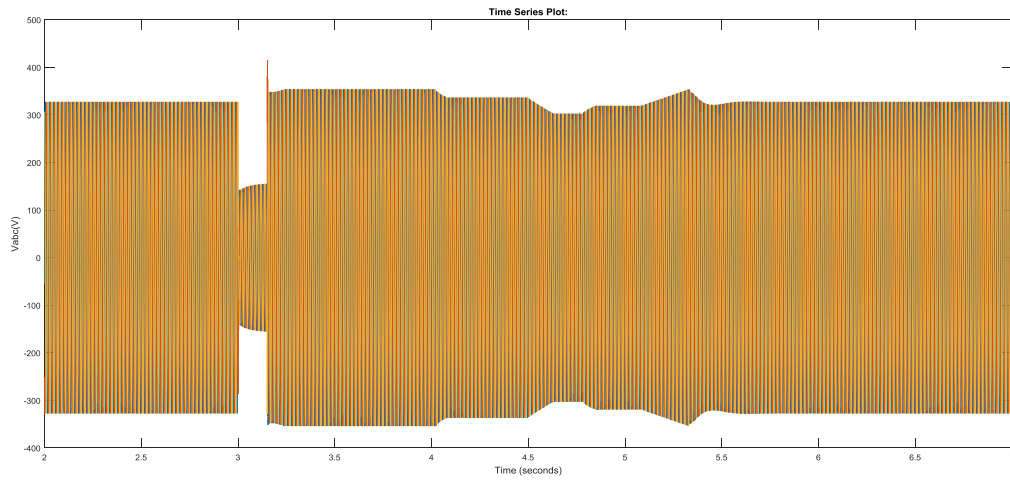


Εικόνα 5.32 Κυκλική συχνότητα του δικτύου

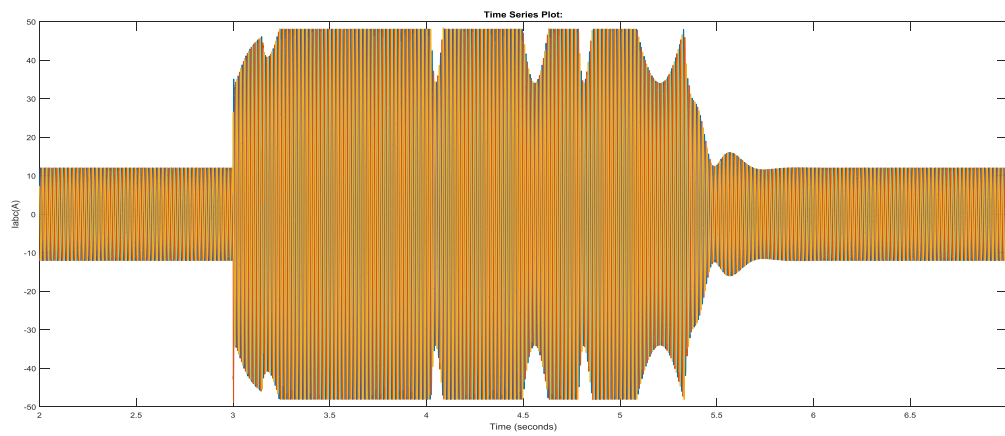
### 5.7.2.2 Προσομοίωση με SEPFC

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούνται παρακάτω με το σύστημα να επανέρχεται σε  $T=5.85$ s. Η συμπεριφορά του δικτύου είναι ίδια με αυτήν του 5.7.1.2 με την διάφορα ότι ο SEPFC εδώ επενεργεί πιο γρήγορα και επαναφέρει το σύστημα

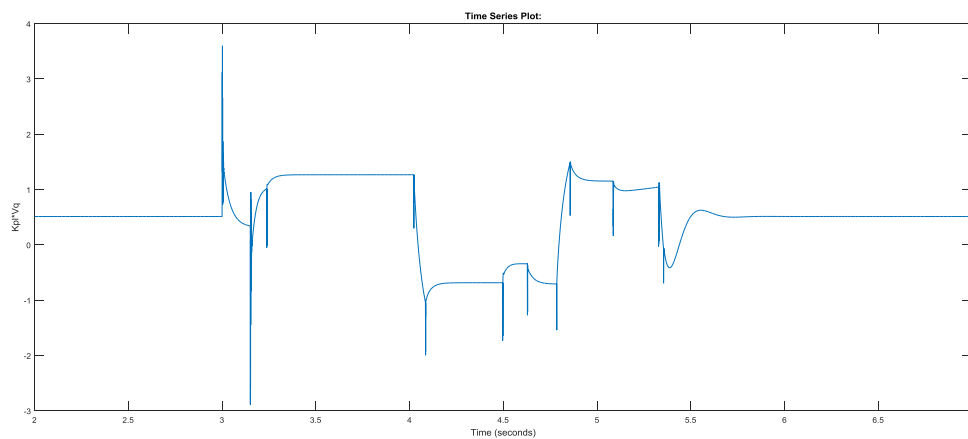
σε λιγότερο χρόνο από όταν η τάση είχε πέσει στα 0.2 της ονομαστικής. Οι αντίστοιχες κυματομορφές παρουσιάζονται παρακάτω (εικόνες 5.32-5.37).



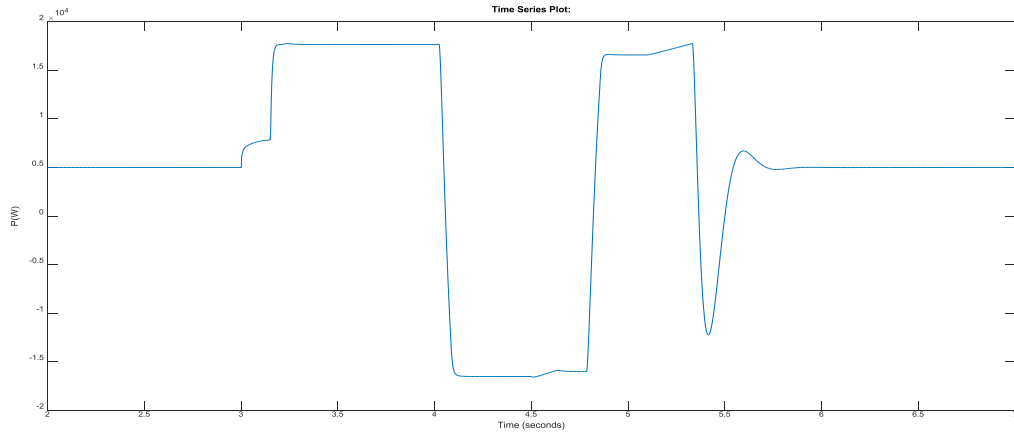
**Εικόνα 5.33 Τριφασική τάση δικτύου με SEPFC**



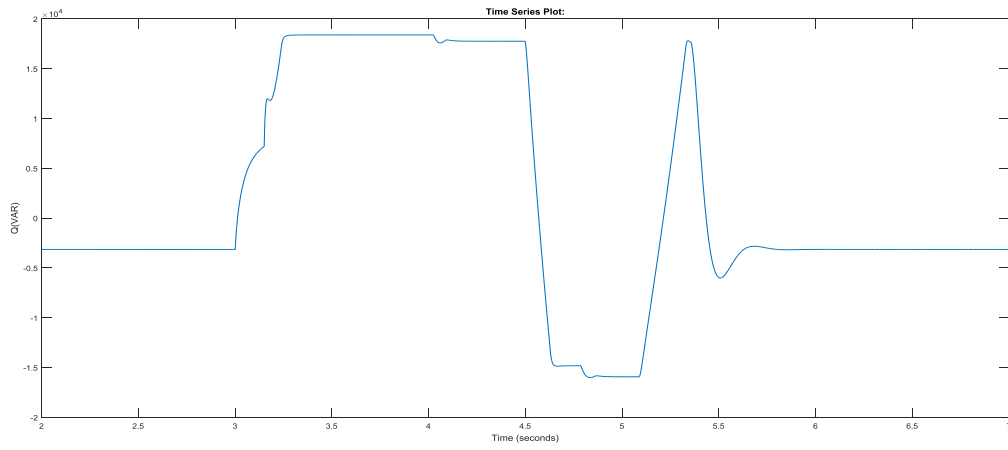
**Εικόνα 5.34 Τριφασικό ρεύμα δικτύου με SEPFC**



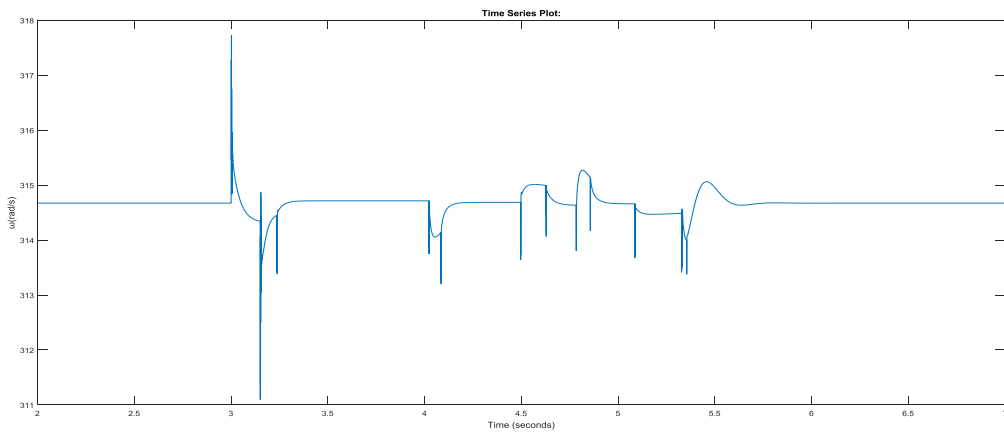
**Εικόνα 5.35 Συνιστώσα  $K_{pl} V_q$  του SEPFC**



**Εικόνα 5.36 Ενεργός ισχύ του δικτύου με SEPFC**



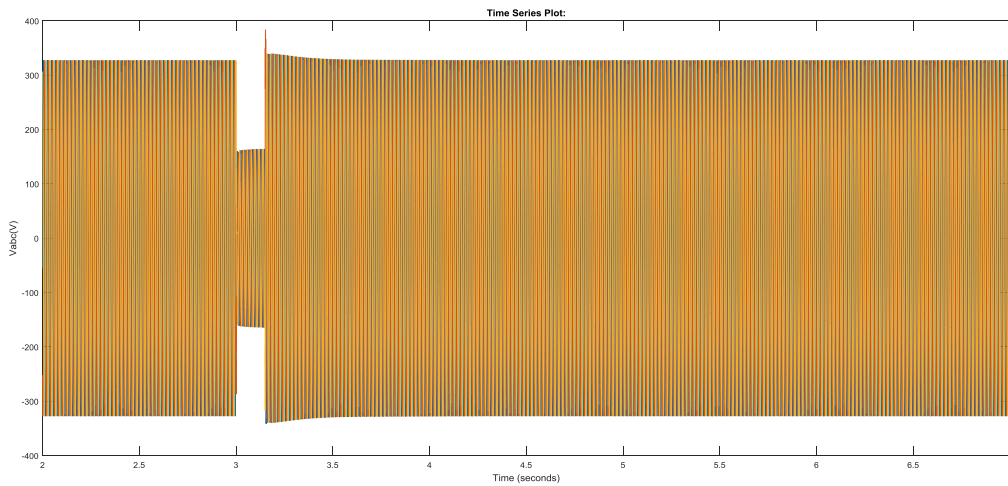
**Εικόνα 5.37 Άεργος ισχύ του δικτύου με SEPFC**



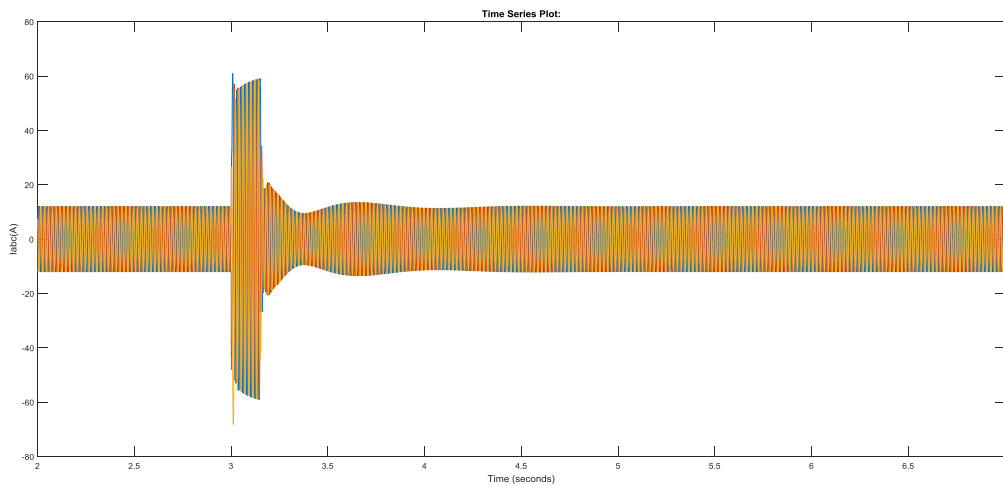
**Εικόνα 5.38 Κυκλική συχνότητα του δικτύου με SEPFC**

### 5.7.2.3 Προσομοίωση δικτύου με εικονική εμπέδηση

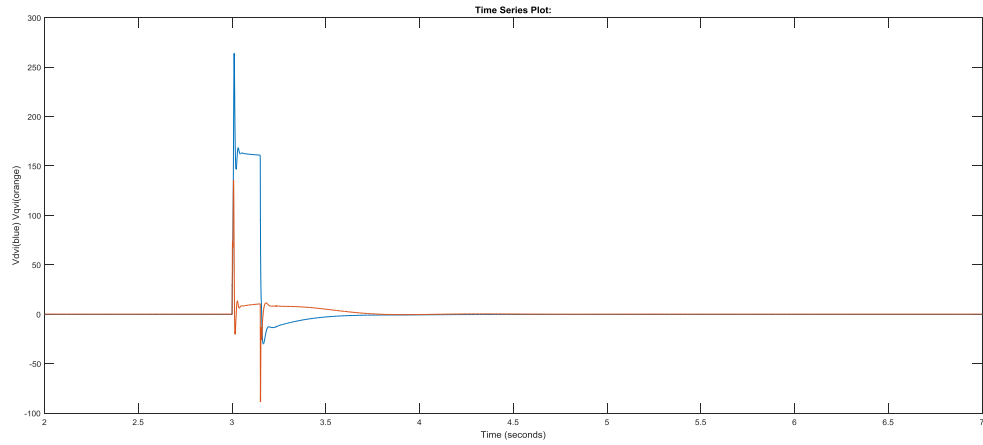
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούνται παρακάτω με το σύστημα να επανέρχεται σε  $T=5.2s$  και παρουσιάζονται παρακάτω. Σε σχέση με την πτώση τάσης στα 0.2 της ονομαστικής, παρατηρούμε ότι οι τάσεις αναφοράς στην εικονική εμπέδηση παίρνουν μικρότερες τιμές, καθώς η εικονική εμπέδηση για την δημιουργία των συνιστωσών της τάσης αναφοράς λαμβάνει υπόψη την τιμή του ρεύματος. Σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη τιμή του ρεύματος κατά το σφάλμα είναι  $I=61 A$  όποτε ο μηχανισμός περιορισμού ρεύματος δίνει μικρότερες τιμές στην τάση αναφοράς.



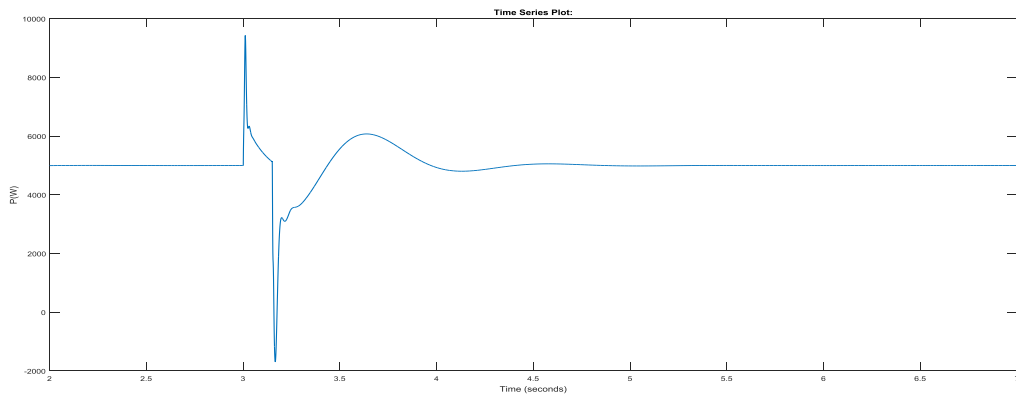
Εικόνα 5.39 Τριφασική τάση δικτύου με εικονική εμπέδηση



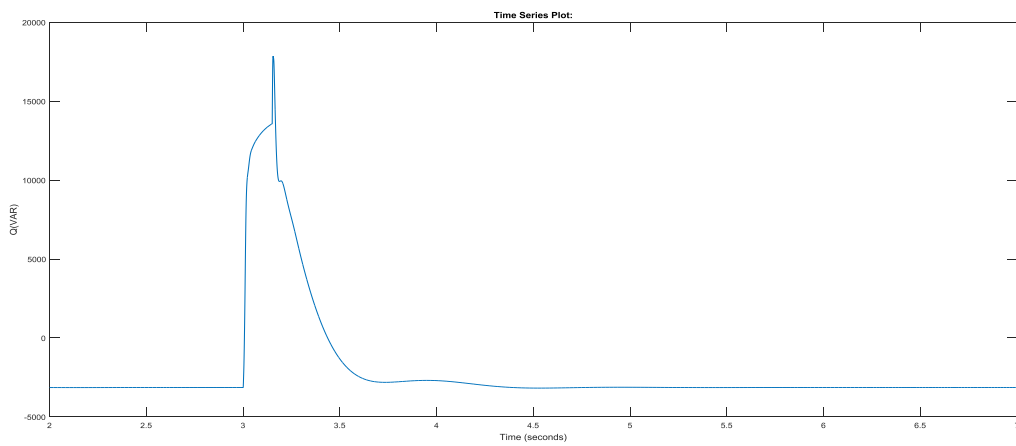
Εικόνα 5.40 Τριφασικό ρεύμα δικτύου με εικονική εμπέδηση



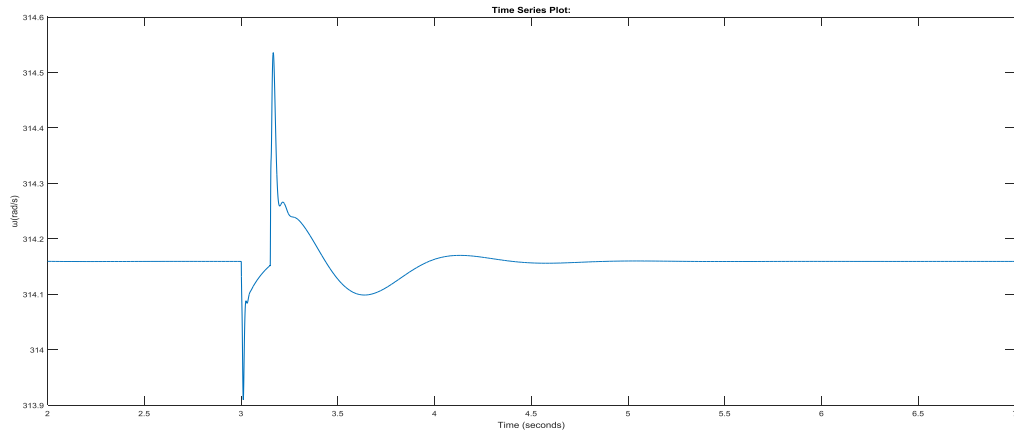
**Εικόνα 5.41** Τάσεις αναφοράς από την εικονική εμπέδηση  $V_{dvi}$  (μπλε)  $V_{qvi}$  (πορτοκαλί)



**Εικόνα 5.42** Ενεργός ισχύ του δικτύου με εικονική εμπέδηση



**Εικόνα 5.43** Άεργος ισχύ του δικτύου με εικονική εμπέδηση



**Εικόνα 5.44 Κυκλική συχνότητα του δικτύου με εικονική εμπροσθη**



## Συνοπτικός πινάκας στοιχείων της προσομοίωσης

<b>Δίκτυο</b>	
Τάση δικτύου U	400V
Συχνότητα δικτύου f	50Hz
Αντίσταση γραμμής δικτύου R	0.25Ω
Επαγωγή γραμμής δικτύου L	1.59mH
Πυκνωτής φίλτρου LC C <sub>f</sub>	25μF
Επαγωγή φίλτρου LC L <sub>f</sub>	2.5 mH
<b>Στοιχεία ελέγχου</b>	
Μεταβλητές ελεγκτή PI ελέγχου τάσης , k <sub>vp</sub> k <sub>vi</sub>	0.003,35.35
Μεταβλητές ελεγκτή PI ελέγχου ρεύματος , k <sub>cp</sub> k <sub>ci</sub>	6.45,6450
Κέρδος droop P-f, m <sub>p</sub>	-0.0000563
Κέρδος droop Q-V, n <sub>q</sub>	-0.000179
Ενεργός ισχύ αναφοράς ελέγχου P-f, P <sub>o</sub>	5kW
Άεργος ισχύς αναφοράς ελέγχου Q-V, Q <sub>o</sub>	0
Κυλική συχνότητα αναφοράς ελέγχου droop P-f, ω <sub>o</sub>	100π rad/s
Τάση αναφοράς ελέγχου droop Q-V, V <sub>o</sub>	326.59V
Συχνότητα αποκοπής φίλτρου P-f, Q-V ,ω <sub>c</sub>	40π rad/s
Κέρδος ρεύματος feedforward ελεγκτή τάσης F	0.4
Μεγίστη τιμή ρεύματος I <sub>max</sub>	34A
<b>Στοιχεία SEPFC</b>	
Κέρδος SEPFC , k <sub>pl</sub>	0.1
<b>Στοιχεία εικονικής εμπεδησης</b>	
ΔX/R	5
Κέρδος εικονικής εμπεδησης k <sub>PRvi</sub>	0.012 Ω/A
Κατώφλι ρεύματος I <sub>thresh</sub>	17A
Συχνότητα αποκοπής φίλτρου εικονικής εμπεδησης ω <sub>c,hpf</sub>	4π rad/s

Ονομαστική εικονική αντίσταση $R_{vi}^0$	0.8484Ω
Ονομαστική εικονική επαγωγή $L_{vi}^0$	0.8484Ω

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Ένα δίκτυο που αξιοποιεί τεχνολογίες αντιστροφών είναι ευαίσθητο σε μεταβατικά φαινόμενα. Η απουσία της αδρανείας που προσφέρουν οι σύγχρονες μηχανές μπορεί να αποβεί ζημιογόνα για την λειτουργία του και τον συγχρονισμό των διαφόρων πηγών ενέργειας. Έτσι η παροχή υποστήριξης σε ένα τέτοιο φαινόμενο είναι απαραίτητη για την ασφαλή και επιτυχή λειτουργία ενός μικροδικτύου.

Στην παρούσα διπλωματική σχεδιάστηκε ένα δίκτυο με έλεγχο GSGFm στο Matlab Simulink (**Κεφάλαιο 5**) το οποίο υπεβλήθη στις δυο περιπτώσεις αστάθειας με βάση την εικονική γωνία ισχύος, που περιεγράφηκαν στον **κεφάλαιο 4.3** με βραχυκύκλωμα κατά το όποιο  $U' < P_o / I_{max}$  και  $U' > P_o / I_{max}$ . Στην πρώτη δοκιμή στο σύστημα επενεργούσε μόνο η μονάδα περιορισμού ρεύματος στην είσοδο του ελεγκτή ρεύματος. Παρατηρήθηκε ότι η μονάδα περιορισμού δεν ήταν επαρκής ώστε στις δυο περιπτώσεις αστάθειας να επαναφέρει το σύστημα μετά το μεταβατικό φαινόμενο, στις αρχικές συνθήκες (**Κεφάλαια 5.7.1.1 και 5.7.2. 1**).

Αντιθέτως με την χρήση των δυο μεθόδων περιορισμού ρεύματος του **Κεφαλαίου 4.4** και **4.5**, του ελέγχου droop ενισχυμένης ευστάθειας και της εικονικής εμπέδησης, το σύστημα μπόρεσε και στις δυο περιπτώσεις να επανέλθει στην αρχική του λειτουργία, να διατηρήσει την ευστάθεια του μετά το μεταβατικό φαινόμενο και να περιορίσει την τιμή του ρεύματος σε επίπεδα που να μην επιφέρουν ζημιά στα ηλεκτρονικά ισχύος (**Κεφάλαια 5.7.1.2-3 και 5.7.2. 2-3**).

Οι δυο αυτές μέθοδοι παρότι καταφέρνουν την επιθυμητή λειτουργία, διαφέρουν ως προς τον τρόπο που το επιτυγχάνουν.

Η μέθοδος με τον έλεγχο droop ενισχυμένης ευστάθειας P-f καταφέρνει να επαναφέρει το σύστημα στην ευστάθεια όταν αυτό βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού, χωρίς την χρήση κάποιας διακοπτικής δομής και μη έχοντας κάποιον αλγορίθμο εντοπισμού σφάλματος. Η μονή μεταβλητή για την ρύθμιση της ευσταθείας που εντάσσεται στο σύστημα αυτή η μέθοδος είναι το κέρδος της συνιστώσας  $V_q$  που εισάγεται στον ελεγκτή droop P-f χωρίς να επηρεάζει τον σύστημα στην μόνιμη κατάσταση. Η κυκλική συχνότητα καθώς και το ρεύμα του συστήματος επαναφέρεται στα αρχικά επίπεδα σε χρόνο  $T=6.7s$  και  $T=5.85s$  για τις περιπτώσεις  $U' < P_o / I_{max}$  και  $U' > P_o / I_{max}$  αντίστοιχα.

Η δεύτερη μέθοδος, η στρατηγική με εικονική εμπέδηση για τον περιορισμό του ρεύματος, χρησιμοποιεί περισσότερα στοιχεία για την επίτευξη της ευσταθείας. Όταν το ρεύμα γίνει μεγαλύτερο από το ρεύμα που έχουμε ορίσει ως όριο για τον έλεγχο, τότε ενεργεί στο σύστημα αλλάζοντας την τάση αναφοράς στην είσοδο του ελεγκτή τάσης μέσω των  $V_{dvi}$  και  $V_{qvi}$ . Η κυκλική συχνότητα καθώς και το ρεύμα του συστήματος επαναφέρεται στα αρχικά επίπεδα σε χρόνο  $T=5.6s$  και  $T=5.2s$  για τις περιπτώσεις  $U' < P_o / I_{max}$  και  $U' > P_o / I_{max}$  αντίστοιχα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η δεύτερη μέθοδος είναι πιο πολύπλοκη από την πρώτη, έχοντας περισσότερες συνιστώσες για τον υπολογισμό των τάσεων αναφοράς, με την δυνατότητα όμως να επαναφέρει το σύστημα πιο γρήγορα στη ευσταθή λειτουργία. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην δυνατότητα της

εικονικής εμπέδησης να επιδρά πριν τον κορεσμό του ρεύματος αναφοράς, αλλάζοντας την είσοδο στον ελεγκτή τάσης.

Συμπεραίνοντας, και οι δυο τεχνικές περιορισμού ρεύματος είναι ικανές να διατηρήσουν τον συγχρονισμό και την ευστάθεια του συστήματος αφού αυτό εκτεθεί σε καταστάσεις αστάθειας με βάση την εικονική γωνία ισχύος .

## Προτάσεις για επέκταση της μελέτης

Η μελέτη αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί αρχικά εφαρμόζοντας και την τεχνική αλλαγής ελέγχου για τον περιορισμού ρεύματος στο παρόν κύκλωμα που αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.6

Ακόμη, ο ελεγκτής droop ενισχυμένης ευστάθειας θα μπορούσε να δοκιμαστεί σε ένα κύκλωμα με εικονική σύγχρονη μηχανή ώστε να βελτιώσει την μεταβατική ευστάθεια. Ο λόγος που θα μπορούσε να επιτευχθεί αυτό είναι διότι η εικονική μηχανή και ο ελεγκτής droop ενός μετατροπέα πηγής τάσης έχουν παρόμοια ηλεκτρομαγνητική δυναμική.

Η παρούσα προσομοίωση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε ψηφιακό εξομοιωτή πραγματικού χρόνου (Real Time Digital Simulator – RTDS) που αποτελεί πρότυπο για την προσομοίωση συστημάτων ισχύος. Πλεονέκτημα αυτής της προσομοίωσης είναι η λήψη αποτελεσμάτων πολύ γρήγορα σε λειτουργία σε πραγματικό χρόνο προσεγγίζοντας πραγματικές συνθήκες διαταραχών χωρίς τον κίνδυνο βλάβης εξοπλισμού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N.L. Panwar, S.C. Kaushik, Surendra Kothari, Role of renewable energy sources in environmental protection: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 3, 2011, Pages 1513-1524, ISSN 1364-0321
- [2] R. H. Lasseter and P. Paigi, "Microgrid: a conceptual solution," 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551), Aachen, Germany, 2004, pp. 4285-4290 Vol.6
- [3] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani and C. Marnay, "Microgrids," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 78-94, July-Aug. 2007
- [4] A. D. Paquette and D. M. Divan, "Virtual Impedance Current Limiting for Inverters in Microgrids With Synchronous Generators," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, pp. 1630-1638, March-April 2015
- [5] Pogaku, Nagaraju et al. "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid." *IEEE Transactions on Power Electronics* 22 (2007): 613-625.
- [6] L. Huang, H. Xin, Z. Wang, L. Zhang, K. Wu and J. Hu, "Transient Stability Analysis and Control Design of Droop-Controlled Voltage Source Converters Considering Current Limitation," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 578-591, Jan. 2019
- [7] Constantinos Sourkounis, Pavlos Tourou, "Grid Code Requirements for Wind Power Integration in Europe", *Conference Papers in Science*, vol. 2013, Article ID 437674, 9 pages, 2013
- [8] Taoufik Qoria, François Gruson, Frédéric Colas, Xavier Kestelyn, Xavier Guillaud, Current limiting algorithms and transient stability analysis of grid-forming VSCs, *Electric Power Systems Research*, Volume 189, 2020, 106726, ISSN 0378-7796
- [9] Σ. Ν. ΜΑΝΙΑΣ, Ηλεκτρονικά Ισχύος. 2017.
- [10] N. Soni, S. Doolla and M. C. Chandorkar, "Improvement of Transient Response in Microgrids Using Virtual Inertia," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1830-1838, July 2013

[11] Μελέτη αλγορίθμων ελέγχου αντιστροφέα και Control Hardware in the Loop προσομοίωση, διπλωματική εργασία, Λαγός Δημήτριος, ΕΜΠ, 2015

[12] Σχεδίαση Αλγορίθμου Ελέγχου Αντιστροφέα για Εφαρμογή Τεχνικών Ρύθμισης Συχνότητας και Control Hardware In the Loop Προσομοίωση, διπλωματική εργασία, Άλκηστις Χριστίνα Κοντού, ΕΜΠ, 2019

[13] X. Xiong, C. Wu and F. Blaabjerg, "Effects of Virtual Resistance on Transient Stability of Virtual Synchronous Generators Under Grid Voltage Sag," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 5, pp. 4754-4764, May 2022

[14] John J. Grainger, William D. Stevenson, Gary W. Chang, Power System Analysis

[15] Κ. ΒΟΥΡΝΑΣ, Γ. ΚΟΝΤΑΞΗΣ 'Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας'

[16] Κ. ΒΟΥΡΝΑΣ, Β. Κ. ΠΑΠΑΔΙΑΣ, Κ. ΝΤΕΛΚΗΣ 'Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος '

[17] 'Κατασκευή DC μικροδικτύου σε περιβάλλον Matlab/Simulink και μελέτη τεχνικών ελέγχου', διπλωματική εργασία, Πετράκη Αικατερίνη, Αθήνα, Απρίλιος 2015

[18] Rosso, Roberto et al. "Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends—A Review." *IEEE Open Journal of Industry Applications* 2 (2021): 93-109.

[19] 'ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ', Διπλωματική εργασία, ΑΣΠΑΣΙΑΣ ΚΩΝ/ΝΟΥ ΜΟΥΛΑΓΙΑΝΝΗ, ΝΙΚΟΛΕΤΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΥ Πάτρα, Οκτώβριος 2019

[20] 'Microgrids – What Are They and How Do They Work?' [Online]

Available: <https://nsci.ca/2019/11/08/microgrids-what-are-they-and-how-do-they-work/>