



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μοντελοποίηση Αντιστροφών Διεσπαρμένης Παραγωγής για την
Μελέτη της Ευστάθειας Γρήγορων Αλληλεπιδράσεων Οδηγούμενης
από Μετατροπείς σε Δίκτυα Διανομής**

ΣΑΡΙΔΑΚΗ Χ. ΓΕΩΡΓΙΑ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μοντελοποίηση Αντιστροφών Διεσπαρμένης Παραγωγής για την
Μελέτη της Ευστάθειας Γρήγορων Αλληλεπιδράσεων Οδηγούμενης
από Μετατροπείς σε Δίκτυα Διανομής**

ΣΑΡΙΔΑΚΗ Χ. ΓΕΩΡΓΙΑ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή, την 22^η Φεβρουαρίου 2021:

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Πάυλος Γεωργιλάκης
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
ΣΑΡΙΔΑΚΗ Χ. ΓΕΩΡΓΙΑ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Γεωργία Χ. Σαριδάκη, 2021

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.

Στους γονείς μου, Χριστόφορο και Ξένια

Στην γιαγιά μου, Αγγελική

Στον Παπά Βλάση μας

*Στην μνήμη του παππού μου Σπύρου που έφυγε τον Νοέμβριο του 2015 και του Γέροντα
μας, Πατέρα Νεκταρίου που έφυγε τον Φεβρουάριο του 2018, οι οποίοι θα ζούνε πάντα
στις καρδιές μας*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη τα τελευταία χρόνια, οδήγησε τις χώρες να αναπτύξουν νέους στρατηγικούς σχεδιασμούς προκειμένου να μειώσουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και να διασφαλιστεί η ευημερία του πλανήτη. Βασικός πυλώνας επίτευξης του συγκεκριμένου στόχου είναι η αύξηση του ποσοστού της ηλεκτροπαραγωγής που προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Η ευστάθεια των ηλεκτρικών δικτύων αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις προκειμένου να εξασφαλιστεί η αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Σε ηλεκτρικά δίκτυα με σύγχρονες γεννήτριες, οι κατηγορίες ευστάθειας διακρίνονται σε ευστάθεια γωνίας, ευστάθεια συχνότητας και ευστάθεια τάσης. Με την μαζική διεύδυση των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος, οι οποίοι αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των περισσότερων μονάδων ΑΠΕ και την εμφάνιση μη αναμενόμενων αρμονικών στις κυματομορφές των ρευμάτων και των τάσεων των δικτύων, εισήχθησαν δύο ακόμα κατηγορίες ευστάθειας : η ευστάθεια συντονισμού (resonance stability) και η ευστάθεια οδηγούμενη από μετατροπείς (converter driven stability). Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η ευστάθεια γρήγορων αλληλεπιδράσεων οδηγούμενη από μετατροπείς.

Αρχικά, αναπαρίσταται το διάγραμμα βαθμίδων ενός μονοφασικού αντιστροφέα συνδεδεμένου σε δίκτυο διανομής, το οποίο περιλαμβάνει: μετατροπέα πηγής τάσης (VSC), φίλτρο LCL και PR ελεγκτή (ο έλεγχος τάσης και ο έλεγχος PLL έχουν αγνοηθεί). Με την χρήση των θεωρημάτων Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου για πολλαπλές εισόδους και των νόμων Kirchhoff, υπολογίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα Norton του αντιστροφέα.

Έχοντας ολοκληρώσει τον ανωτέρω υπολογισμό, αναπαρίσταται δίκτυο διανομής στο οποίο συνδέονται δυο αντιστροφείς. Με την χρήση του θεωρήματος της επαλληλίας υπολογίζονται αναλυτικά οι σχέσεις που διέπουν τα ρεύματα εξόδου και γενικεύονται για δίκτυο n - συνδεδεμένων αντιστροφέων.

Στην συνέχεια, αναπτύσσονται τα κριτήρια Minor Loop Gain (MLG), Global Minor Loop Gain (GMLG), Global Admittance (GA), τα οποία έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία για την ανάλυση της ευστάθειας γρήγορων αλληλεπιδράσεων οδηγούμενης από μετατροπείς. Τα κριτήρια εφαρμόζονται σε ένα σύστημα με δυο αντιστροφείς μέσω μοντελοποίησης στο MATLAB. Τα αποτελέσματα αναλύονται και σχολιάζονται.

Προς διερεύνηση των παραμέτρων του συστήματος που δύνανται να επηρεάσουν το φαινόμενο διενεργούνται επιπλέον προσομοιώσεις στις οποίες μεταβάλλεται η αυτεπαγωγή του δικτύου, το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή του αντιστροφέα καθώς και ο αριθμός των συνδεδεμένων αντιστροφέων σε δίκτυα διανομής. Πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη μεταξύ των προτεινόμενων κριτηρίων για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα.

Τέλος, αναλύεται η τεχνική της Ενεργούς Απόσβεσης (Active Damping), με την οποία προστίθεται μια εικονική σύνθετη αντίσταση μέσα από την προσθήκη φίλτρου στον έλεγχο του αντιστροφέα. Η τεχνική εφαρμόστηκε σε συστήματα που είχαν κριθεί

ασταθή και με επανάληψη των προσομοιώσεων φαίνεται πως μπορεί να επαναφέρει το σύστημα σε ευσταθή λειτουργία.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ευστάθεια γρήγορων αλληλεπιδράσεων οδηγούμενη από μετατροπείς, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Μονοφασικός Μετατροπέας Πηγής Τάσης (VSC), PR ελεγκτής, LCL φίλτρο, ΣΑΕ πολλαπλών εισόδων, Nyquist, Bode, MATLAB, Minor Loop Gain (MLG), Global Minor Loop Gain (GMLG), Global Admittance (GA), Τεχνική ενεργούς απόσβεσης (Active damping), Υψιπερατό φίλτρο (HPF)

ABSTRACT

The overall global warming led the countries to develop new strategies in order to reduce their emissions of greenhouse gases and ensure the prosperity of our planet. These strategies include among others, a massive penetration of renewable sources into energy production.

Electric power systems' stability plays a key role in ensuring network's resilience and reliability, which is vital in covering the energy demand. The stability in traditional systems with synchronous generators is categorized into Rotor angle Stability, Frequency Stability and Voltage Stability. The extensive use of power electronics converters, an integral part of most Distributed Generation (DG) systems and the harmonic oscillations issues which have raised lately, led to the introduction of two new stability classes, the Resonance Stability and the Converter driven Stability. The present Diploma Thesis examines the Fast Interaction Converter driven Stability.

Firstly, the block diagram of a single-phase distribution grid connected inverter is illustrated, which includes Voltage Source Converter, LCL filter and PR controller (the High Level Control Loop and the PLL were neglected). The Norton equivalent model is derived using the theory of multi inputs control systems and Kirchhoff's laws.

By substituting inverters with the Norton equivalent circuit, the equivalent system of two distribution grid-connected inverters can be drawn. The total current from all inverters is calculated analytically with the principle of superposition. The equations are generalized for circuits of multi-inverters systems.

Minor Loop Gain (MLG), Global Minor Loop Gain (GMLG) and Global Admittance (GA) criteria were introduced in literature to address the Fast interactions Converter Driven stability and are extensively presented in this thesis. A model of two grid connected inverters is built in MATLAB, in which the criteria were used to assess the system's stability. The results are discussed.

Furthermore, in order to reveal the influence of the system parameters on the phenomenon, more simulations were conducted. Stability analysis is carried out under different value of grid inductance, different parameters of current control loop and different number of grid connected inverters in multiple systems. A comparative study of the stability criteria is presented.

Finally, the active damping technique is discussed that aims at mimicking the passive damping through the connection of digital filters in the control of the inverter. The technique was implemented in unstable systems and new simulations were conducted. The results reflect the system's stable operation and thus the successful implementation of the technique.

KEYWORDS

Fast Interaction Converter-driven stability, Distributed Generation, Single-phase Voltage Source Converter (VSC), PR controller, LCL filter, Multi input control system, Nyquist, Bode, MATLAB, Minor Loop Gain (MLG), Global Minor Loop Gain (GMLG), Global Admittance (GA), Active damping, High Pass Filter (HPF)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας και διευθυντή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου τόσο για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την εργασία μου σε ένα θέμα που αφορά στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στο εργαστήριό του, όσο και για την διδασκαλία του και τις εκπαιδευτικές εκδρομές που διοργάνωσε στα πλαίσια των μαθημάτων για τους φοιτητές, ενισχύοντας την σύνδεση των παραδόσεων στο αμφιθέατρο με τις πραγματικές συνθήκες στα ηλεκτρικά δίκτυα. Μια ανάμνηση η οποία μου έχει εντυπωθεί από τα χρόνια των σπουδών μου, ήταν η εκπαιδευτική εκδρομή στον υποσταθμό του ΔΕΔΔΗΕ στο κέντρο της Αθήνας, όπου για πρώτη φορά είδα τις αληθινές διαστάσεις ενός μετασχηματιστή υποσταθμού και αντιλήφθηκα τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι ηλεκτρολόγοι μηχανικοί όχι μόνο στην αρχική σχεδίαση αλλά και στην υλοποίηση. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω από καρδιάς τον λαμπρό επιστήμονα, διδάκτορα και ερευνητή του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας κ. Παναγιώτη Κοτσαμπόπουλο του οποίου η συνεισφορά, η καθοδήγηση και η διαρκής υποστήριξη από την αρχή μέχρι το τέλος υπήρξε πολύτιμη και καθοριστική για την εκπόνηση της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης σε όλα τα μέλη ΔΕΠ και ΕΔΙΠ της σχολής και ιδιαίτερα στους καθηγητές της κατεύθυνσης που επέλεξα, κ. Σταύρο Παπαθανασίου, κ. Παύλο Γεωργιλάκη, κ. Ευάγγελο Διαλυνά, κ. Κώστα Βουρνά, κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο, κ. Ιωάννη Γκόνο, κ. Αντώνιο Κλαδά, κ. Ιωάννη Σταθόπουλο, κ. Ιωάννη Ψαρρά καθώς ήταν πάντα εκεί για να επιλύσουν απορίες, να μοιραστούν την αγάπη τους για το αντικείμενο και να μας παρέχουν ερεθίσματα για περαιτέρω μελέτη και διερεύνηση. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Σταθόπουλο και στον κ. Διαλυνά που στο μάθημά τους μας μίλησαν για τον διεθνή οργανισμό CIGRE, ο οποίος είναι πολύτιμος για την παρακολούθηση των νέων τεχνολογιών και εξελίξεων της επιστήμης μας.

Στα πλαίσια του εθελοντισμού στο IEEE είχα την τύχη να συνεργαστώ με εξαιρετικούς ανθρώπους, καταξιωμένους επιστήμονες με ήθος και αξίες. Θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω λοιπόν, την διευθύντρια του Εργαστηρίου Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών και πρόεδρο του IEEE Greece Section, καθηγήτρια κυρία Κωνσταντίνα Νικήτα για την συνεργασία μας μέσα από την οποία απέκτησα πολύτιμες γνώσεις, για την συνεχή υποστήριξή της, τον ενθουσιασμό με τον οποίο αγκαλιάζει κάθε καινούρια πρωτοβουλία και το έργο της στην σχολή. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κοσμήτορα της σχολής μας καθηγητή κ. Νεκτάριο Κοζύρη με τον οποίο συνεργάστηκα στο φοιτητικό παράρτημα του IEEE στο ΕΜΠ και κατά την διάρκεια των πρώτων μηνών της θητείας μου στον ελληνικό τομέα του IEEE. Τον ευχαριστώ για το ότι ήταν πάντα δίπλα μας υποστηρίζοντας ενεργά τις φοιτητικές δράσεις αλλά και για το σημαντικό έργο που έχει επιτελέσει τα τελευταία χρόνια ως Κοσμήτορας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους εθελοντές του IEEE τόσο από την Ελλάδα όσο και από το εξωτερικό με τους οποίους συνεργάστηκα στα χρόνια των σπουδών μου.

Ευχαριστώ όλους τους συμφοιτητές μου με τους οποίους ανταλλάξαμε σημειώσεις παραδόσεων, σχηματίσαμε ομάδες στα εργαστήρια, συνεργαστήκαμε και προετοιμαστήκαμε μαζί για τις εξετάσεις. Φυσικά ευχαριστώ τους φίλους μου με τους οποίους μοιράστηκα τις φοιτητικές μου στιγμές, τους αγαπημένους μου ΗΜΜΥτρελους (Δανάη, Φωτεινή, Ισιδώρα, Ισίδωρο, Παναγιώτη, Κοσμά, Λίλιαν, Μαρία, Μαρίνα, Μάριο, Μελίνα, Μυρτώ, Σωτήρη, Θανάση, Βασιλική) για την

αμέριστη συμπαράσταση τους, την Νίκη, την Μιχαέλα, την Χριστίνα τον Γιώργο και τον Ισίδωρο, επιστημονικό συνεργάτη του καθηγητή Πέτρου Μαραγκού, ο οποίος συνεισέφερε σημαντικά στην θεμελίωση των γνώσεων μου στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Ιδιαίτερα ευχαριστώ την Κάλια και τον Παναγιώτη για την υποστήριξή τους και τις όμορφες στιγμές που μοιραστήκαμε. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης στον Κώστα και στον Δημήτρη, δυο ανθρώπους που ήταν πάντα στο πλευρό μου στις καλές και στις κακές στιγμές και με βοήθησαν ουσιαστικά σε οτιδήποτε χρειάστηκα.

Η εργασία αφιερώνεται στην οικογένειά μου που αγαπάω βαθύτατα. Στους γονείς μου, στο λαμπρότερο πρότυπο μηχανικού Χριστόφορο και στο λαμπρότερο πρότυπο φιλόλογου Ξένια, που με υποστήριξαν και συνεχίζουν να με στηρίζουν καθημερινά από την πρώτη στιγμή της γέννησής μου μέχρι σήμερα, δίνοντας μου ανεξάντλητη αγάπη και όλα τα εφόδια για να εξελιχθώ σωστά. Στην γιαγιά μου, Αγγελική που ήταν πάντα εκεί για μένα και γνωρίζω πόσο περήφανη είναι για την εγγονή της. Στον πνευματικό μου, Πατέρα Βλάσιο, προϊστάμενο του προσκυνήματος του Αγίου Νεκταρίου στην Καμάριζα, του οποίου οι προσευχές μας στηρίζουν όλους και οι σοφές συμβουλές του μας καθοδηγούν.

Στην μνήμη του παππού μου Σπύρου που ξέρω ότι με προστατεύει ακόμα από εκεί ψηλά, ακόμα και αν έφυγε νωρίς. Στην μνήμη του γέροντά μας, Ιερομόναχου Νεκταρίου Βιτάλη ο οποίος ίδρυσε τον Άγιο Νεκτάριο στην Καμάριζα και συνεχίζει να στέκεται στο πλευρό όλων όσων τον έχουν ανάγκη.

Ευχαριστώ τον Θεό, τον Χριστό, την Παναγία μας, τον Άγιο Εφραίμ, τον Άγιο Νεκτάριο, τον Άγιο Γεώργιο, τους τρεις Ιεράρχες και όλους τους Αγίους μας που βρίσκονται κοντά μας και μας οδηγούν.

‘Κύριε ημών Ιησού Χριστέ, ελέησον με’

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ	7
ABSTRACT.....	8
KEYWORDS.....	9
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	10
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή.....	15
1.1 Ηλεκτρική ενέργεια και Ελληνικό Δίκτυο	15
1.2 Εθνική Ενεργειακή Στρατηγική και ΑΠΕ	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ευστάθεια Σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)	21
2.1 Εισαγωγή.....	21
2.2 Κατηγορίες Ευστάθειας ΣΗΕ	23
2.3 Ευστάθεια Γρήγορων Αλληλεπιδράσεων Οδηγούμενη Από Μετατροπείς	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ισοδύναμο Κύκλωμα Norton Μονοφασικού Αντιστροφέα ΔΠ. 29	
3.1 Σχηματικό Διάγραμμα	29
3.1.1 Αντιστροφέας	29
3.1.2 Φίλτρο Εξόδου	32
3.1.3 Βαθμίδες ελέγχου	33
3.2 Ρεύμα Εξόδου	34
3.2.1 Αρχή της Επαλληλίας	35
3.2.3 Συναρτήσεις Μεταφοράς Ελεγκτή και Καθυστέρησης	36
3.2.4 Αγωγιμότητες LCL Φίλτρου 2 Εισόδων	37
3.2.5 Κέρδος Ανοιχτού Βρόχου T_2	39
3.2.6 Κέρδος Ρεύματος G_c	39
3.2.7 Αγωγιμότητα Εξόδου Y_{oc}	40
3.3 Εναλλακτικός Υπολογισμός Κέρδους G_c και Αγωγιμότητας Εξόδου Y_{oc}	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Σύνδεση Αντιστροφών ΔΠ σε Δίκτυο Διανομής	42
4.1 Εισαγωγή	42
4.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα με 2 Αντιστροφείς ΔΠ	42
4.2.1 Έξοδοι Επιμέρους Μονάδων.....	43
4.2.2 Συνιστώσες Ανεξάρτητων Διεγέρσεων.....	44
4.2.3 Ρεύματα Εξόδου 1 ^{ου} και 2 ^{ου} Αντιστροφεία ΔΠ	46
4.3 Αθροιστικό Ρεύμα Εξόδου.....	47
4.4 Γενίκευση Εξαγόμενων Σχέσεων για Αντιστροφείς ΔΠ	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Μοντελοποίηση Δικτύου Διανομής με 2 Αντιστροφείς ΔΠ για την Μελέτη Ευστάθειας Γρήγορων Αλληλεπιδράσεων Οδηγούμενη Από Μετατροπείς	50
5.1 Κριτήριο Nyquist	50
5.2 Κριτήριο Bode	51
5.3 Κριτήρια Μελέτης Αναλογικού Τύπου.....	51
5.3.1 Minor Loop Gain.....	51
5.3.2 Global Minor Loop Gain.....	55
5.4 Κριτήριο Μελέτης Αθροιστικού Τύπου	58
5.4.1 Συνολική Αγωγιμότητα (Global Admittance).....	58
5.4.2 Τροποποιημένο Κριτήριο Nyquist	59
5.4.3 Τροποποιημένο Κριτήριο Bode	61
5.4.4 Γραφική Παράσταση Πραγματικού και Φανταστικού Μέρους.....	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Διερεύνηση Επίδρασης Παραμέτρων σε Δίκτυα Διανομής	65
6.1 Μελέτη Επίδρασης Παραμέτρων	65
6.1.1 Αυτεπαγωγή Δικτύου Διανομής	65
6.1.1.1 Δίκτυο με 1 Αντιστροφή ΔΠ	66
6.1.1.2 Δίκτυο με 2 Αντιστροφείς ΔΠ	68
6.1.2 Αναλογικό Κέρδος Ελεγκτή	70
6.1.2.1 Δίκτυο με 2 Αντιστροφείς ΔΠ.....	70
6.1.3 Αριθμός Αντιστροφών ΔΠ.....	72
6.2 Συγκριτική Μελέτη Προτεινόμενων Κριτηρίων	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Προτεινόμενη Τεχνική Ελέγχου	77
7.1 Τεχνική Ενεργούς Απόσβεσης (Active Damping).....	77
7.1.1 Σχηματικό Διάγραμμα Ελέγχου	78
7.1.2 Συνάρτηση Μεταφοράς G_{ad}	80
7.1.3 Ρύθμιση Παραμέτρων	81
7.2 Εφαρμογή σε Δίκτυο με 1 Αντιστροφέα ΔΠ	84
7.3 Εφαρμογή σε Δίκτυο με 2 Αντιστροφείς ΔΠ.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Επίλογος	91
8.1 Συνοπτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα	91
8.2 Προτάσεις και Μελλοντικές Προεκτάσεις.....	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας Μοντελοποίησης Δικτύου Διανομής με 2 Αντιστροφείς ΔΠ	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας Μοντελοποίησης Δικτύου με Πολλαπλούς Αντιστροφείς ΔΠ/ Active damping/ Συνάρτηση Υπολογισμού Πραγματικού και Φανταστικού Μέρους	97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πλήρη Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	109

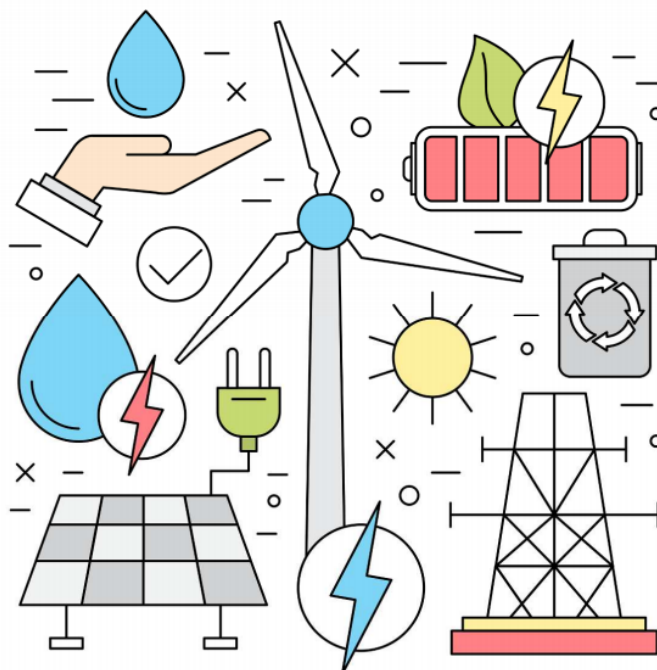
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Ηλεκτρική ενέργεια και Ελληνικό Δίκτυο

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί ζωτικό αγαθό σε κάθε αναπτυγμένη κοινωνία και η αδιάλειπτη παροχή της σε επαρκή ποιότητα ώστε να καλύπτει την ζήτηση, αποτελεί καθημερινή πρόκληση για την επιστήμη του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού.

Ενδεικτικά κάποιες από τις χρήσεις του είναι:

- στην βιομηχανία : θερμική χρήση, ηλεκτρόλυση, ηλεκτρονικοί υπολογιστές
- στις μεταφορές: ηλεκτρικά αυτοκίνητα, αεροπλάνα, τρένα, λεωφορεία
- στον οικιακό τομέα: φωτισμός, θέρμανση, ψύξη, παρασκευή φαγητού, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, συστήματα συναγερμού, ανελκυστήρες
- στο οδικό δίκτυο: φωτισμός δρόμων, φωτεινοί σηματοδότες
- στις νοσοκομειακές εγκαταστάσεις: συσκευές υποστήριξης ασθενών, ΜΕΘ
- σε λοιπές καταναλώσεις



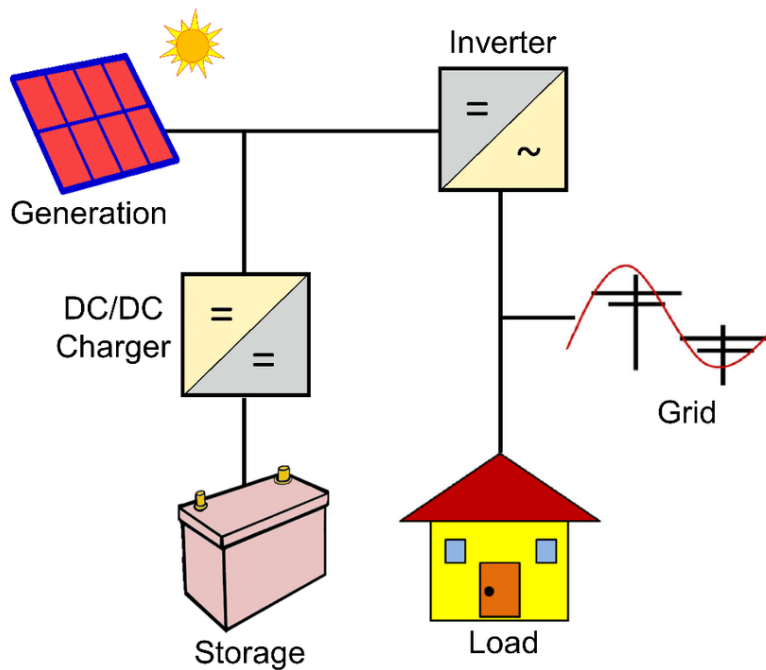
Εικόνα 1: Μακροχρόνια Στρατηγική για το 2050 ΥΠΕΝ [1]

Προχωρώντας σε μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της ηλεκτρικής ενέργειας, η εμπορική χρήση της ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1870. Το πρώτο ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) το οποίο αποτελούνταν από μια

γεννήτρια, καλώδια, ασφάλειες, μετρητές και φορτία, κατασκευάστηκε από τον Tomas Edison το 1882 στην Νέα Υόρκη. Παρά το γεγονός ότι το συγκεκριμένο σύστημα ήταν συνεχούς ρεύματος (DC) πολύ σύντομα επικράτησαν τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), καθώς τα DC συστήματα εμφάνιζαν αρκετούς περιορισμούς, όπως ότι ενώ μπορούσαν να μεταφέρουν ισχύ με μικρές απώλειες σε κοντινές αποστάσεις, για να επιτύχουν το ίδιο σε μεγάλες έπρεπε να ανυψωθούν σε πολύ υψηλές τάσεις. Η οριστική εγκαθίδρυση των συστημάτων AC όμως ήρθε με την ανάπτυξη του AC μετασχηματιστή ισχύος, ο οποίος επέτρεπε την εναλλαγή των επιπέδων τάσεων, και με την εισαγωγή του πολυφασικού AC συστήματος. Επιπρόσθετα, οι γεννήτριες AC είναι σημαντικά απλούστερες, οικονομικότερες και λιγότερο ευαίσθητες όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, από τις DC.

Στην Ελλάδα υπάρχουν τέσσερα επίπεδα τάσης : χαμηλή (220/380V) η οποία χρησιμοποιείται άμεσα από τους καταναλωτές, μέση (20kV), υψηλή (150kV) και υπερυψηλή (400 kV). Η ανακάλυψη των ανορθωτών (βαλβίδων) τόξου υδραργύρου στις αρχές της δεκαετίας του 1950, οι οποίοι σήμερα έχουν αντικατασταθεί από μετατροπείς θυρίστορ, ήταν ορόσημο για την χρήση της DC τάσης στο επίπεδο της μεταφοράς. Τα συστήματα μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC) έγιναν σχετικά πιο οικονομικά και επομένως ελκυστικά για την μεταφορά ικανών ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Δυο παραδείγματα τέτοιων διασυνδέσεων που βρίσκονται υπό κατασκευή είναι η North Sea Link Interconnector η οποία θα αποτελέσει την μεγαλύτερη σε μήκος υποθαλάσσια διασύνδεση στον κόσμο (Νορβηγία-Ηνωμένο Βασίλειο 1.4GW/525kV/730km) καθώς και η δεύτερη φάση του έργου διασύνδεσης του ηπειρωτικού δικτύου της Ελλάδας με την Κρήτη (Αττική-Κρήτη, 1 GW/500kV/330 km).

Για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η εκμετάλλευση πρωτογενών πηγών ενέργειας οι οποίες διακρίνονται σε αποθηκευμένες και συγκεντρωμένες (πετρέλαιο, κάρβουνο, ουράνιο, φυσικό αέριο, λιγνίτης), σε ενδιάμεσες (ξύλο, βιομάζα, γεωθερμία) και σε ενέργεια υπό μορφή ροής (ήλιος, άνεμος, νερό). Τα ποσά ενέργειας που παράγονται εκμεταλλεζόμενα τις δυο τελευταίες κατηγορίες ονομάζονται Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Παρά το ότι η συλλογή της πρωτογενούς ενέργειας υπό μορφή ροής προσφέρεται δωρεάν από το περιβάλλον, το γεγονός ότι είναι διάχυτη, αποθηκεύεται δύσκολα και απαιτεί υψηλά κόστη επένδυσης, λειτούργησε ως τροχοπέδη για την εκτεταμένη χρήση της τον προηγούμενο αιώνα. Οι περιορισμοί αυτοί ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχουν αναιρεθεί σημαντικά και έχουν ευρεθεί νέες πιο οικονομικές τεχνικές αποθήκευσης, με τις οποίες επιτυγχάνεται η συλλογή της πλεονάζουσας παραγόμενης ενέργειας (εικόνα 2).

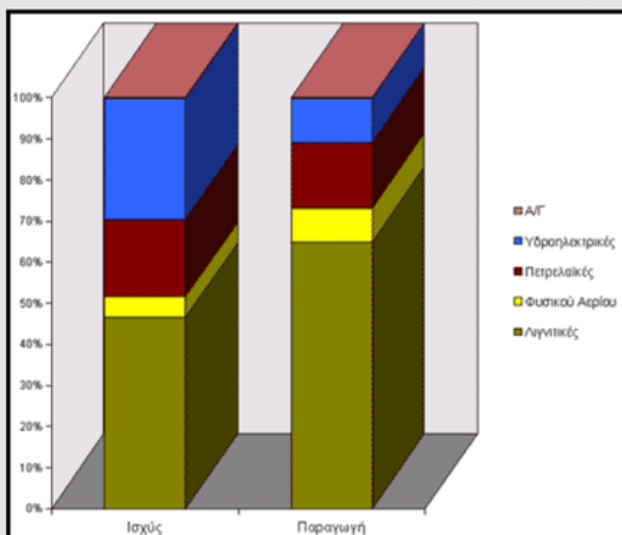


Εικόνα 2: Μονάδα ΑΠΕ και μονάδα αποθήκευσης σε επίπεδο οικίας [27]

Η Ελλάδα, διέθετε πλούσια αποθέματα λιγνίτη, τα οποία ωστόσο περιείχαν υψηλά ποσοστά υγρασίας και δεν ήταν εύκολο να χρησιμοποιηθούν σαν καύσιμο. Την λύση έδωσε ένας Γερμανός καθηγητής στα μέσα της δεκαετίας του 1950, ο οποίος ανακάλυψε τον τρόπο καύσης του λιγνίτη και άνοιξε τον δρόμο στην λιγνιτική εποχή στην Ελλάδα. Στην εικόνα 3 φαίνεται η ηλεκτροπαραγωγή της χώρας το 1999. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό (46,5%) προερχόταν από λιγνιτικές μονάδες ενώ το αμέσως επόμενο μεγαλύτερο ποσοστό (29,3%) κάλυπταν τα υδροηλεκτρικά, καθώς η Ελλάδα έχει περίπου 15 μεγάλους σταθμούς υδροηλεκτρικής ενέργειας στους ποταμούς Νέστο, Αλιάκμονα, Εδεσσαίο, Αώο, Αχελώο, Ταυρωπό, Άραχθο, Ιλαρίωνα [2]. Η αιολική παραγωγή κάλυπτε μόλις το 0.2%. Σήμερα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην χώρα στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό σε θερμοηλεκτρικές μονάδες, εκ των οποίων πολλές βρίσκονται στην Βόρεια Ελλάδα.

Εγκατεστημένη Ισχύς και Παραγωγή Ηλεκτρικής Εν. του συστήματος της Δ.Ε.Η. ανά τύπο μονάδων 1999

Τύπος Μονάδας	Ισχύς (MW)	%	Παραγωγή (GWh)	%
Λιγνιτικές	4900	46.5	29115	65.0
Πετρελαϊκές	1985	18.8	7160	16.0
Υδροηλεκτρικές	3092	29.3	4800	10.7
Φυσικού Αερίου	537	5.1	3690	8.2
Α/Γ	26	0.2	56	0.1
Σύνολο		10540		44821



Πηγή: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Εικόνα 3: Εγκατεστημένη ισχύς και ηλεκτροπαραγωγή Ελλάδας 1999 [2]

1.2 Εθνική Ενεργειακή Στρατηγική και ΑΠΕ

Τα ορυκτά καύσιμα κατά την καύση τους παράγουν αέρια του θερμοκηπίου τα οποία οδηγούν στην βαθμιαία στην αύξηση της θερμοκρασίας της Γης με καταστροφικές συνέπειες όσον αφορά την βιοποικιλότητα και το μέλλον του πλανήτη. Για τους παραπάνω λόγους το 2015 υπογράφηκε στο πλαίσιο της Σύμβασης Πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή, η συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement COP21) στην οποία πολλές χώρες δεσμεύτηκαν να περιορίσουν τις εκπομπές αυτών των αερίων σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να επιτευχθεί διατήρηση της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κάτω από τους 2 °C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα, ενώ υπογραμμίστηκε ότι πρέπει να γίνουν οι βέλτιστες προσπάθειες για τον περιορισμό του άνω ορίου σε 1.5 °C. Τα πιθανά σενάρια στρατηγικών της Ελλάδας για την επίτευξη των συγκεκριμένων στόχων περιγράφονται αναλυτικά στο ‘Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα’ που δημοσιεύτηκε το 2019 και στην ‘Μακροχρόνια Στρατηγική για το έτος 2050’ η οποία δημοσιεύτηκε το 2020.

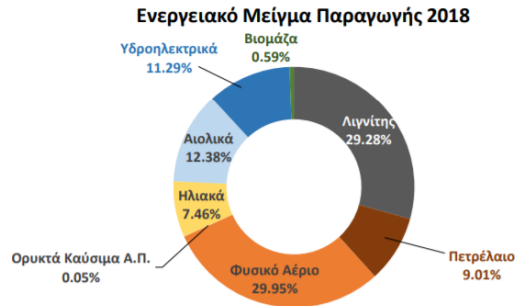
Ενδεικτικά στη ‘Μακροχρόνια Στρατηγική για το έτος 2050’ αναφέρεται [1] :

- Μαζική διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ηλεκτροπαραγωγή
- Κλείσιμο του συνόλου των λιγνιτικών μονάδων μέχρι το έτος 2030
- Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε όλους τους τομείς
- Εξηλεκτρισμός των μεταφορών αλλά και της θερμότητας και μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος
- Επέκταση των ηλεκτρικών διασυνδέσεων απομακρυσμένων περιοχών με το ηπειρωτικό δίκτυο
- Ανάπτυξη εγχώριων καυσίμων και αερίου από βιομάζα

Τον Νοέμβριο του 2020 κατατέθηκε στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή το εθνικό σχέδιο έργων προς χρηματοδότηση που περιλάμβανε μεγάλο ποσοστό δράσεων σχετικά με τον λεγόμενο ‘Πράσινο Πυλώνα’ ο οποίος αναπτύσσεται σε οκτώ στρατηγικές κατευθύνσεις [3] :

1. Απολιγνιτοποίηση
2. Αύξηση ποσοστού ΑΠΕ
3. Ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων
4. Προώθηση της ηλεκτροκίνησης
5. Παρεμβάσεις για αναβάθμιση του ενεργειακού δικτύου
6. Προστασία της φύσης και προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή
7. Δημιουργία μονάδων διαχείρισης στερεών και υγρών αποβλήτων
8. Προώθηση της κυκλικής οικονομίας

Η συγκεκριμένη αλλαγή και η σταδιακή μετάβαση στην μεταλιγνιτική εποχή αποτυπώνεται και στο Ενεργειακό Μείγμα Παραγωγής της χώρας, το οποίο υπολογίζεται από τον Διαχειριστή Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εγγυήσεων Προέλευσης (ΔΑΠΕΕΠ) για κάθε ημερολογιακό έτος [4]. Για το έτος 2018 (εικόνα 4) η παραγωγή από λιγνίτη ήταν στο 29.28% ποσοστό που έπεσε στο 21.72% για το έτος 2019 (εικόνα 5). Αυξήσεις παρατηρούνται στην παραγωγή από ΑΠΕ και συγκεκριμένα για τα ηλιακά από 7,46 % (2018) σε 8,3% (2019), για την βιομάζα από 0.59% (2018) σε 0.8% (2019) και για τα αιολικά από 12,38% (2018) σε 15,2% (2019). Παρατηρείται ακόμη ότι για το έτος 2019 το 67,49% της ηλεκτροπαραγωγής προήρθε από ορυκτά καύσιμα και το 32,51 % από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.



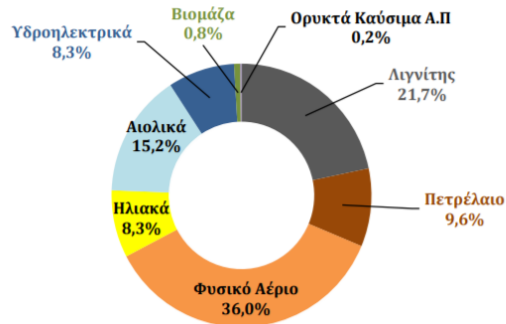
2018	Λιγνίτης	Πετρέλαιο	Φυσικό Αέριο ¹	Ορυκτά καύσιμα Α.Π. ²	Σύνολο Ορυκτών Καυσίμων	Ηλιακά	Αιολικά	Υδροηλεκτρικά	Βιομάζα	ΑΠΕ Α.Π. ²	Σύνολο ΑΠΕ	Σύνολο	CO ₂ Εκπομπές (gCO ₂ /kWh)
%	29,28%	9,01%	29,95%	0,05%	68,29%	7,46%	12,38%	11,29%	0,59%	0,00%	31,71%	100,0%	632,30
TWh	14,91	4,59	15,24	0,02	34,76	3,80	6,30	5,75	0,30	0,00	16,15	50,91	

¹ Περιλαμβάνεται η παραγωγή από ΣΗΘΥΑ που χρησιμοποιούν ως καύσιμο Φυσικό Αέριο.

² Απροσδιόριστη Προέλευσης. Στην περίπτωση των Ορυκτών καυσίμων συμπεριλάβαμε την άντληση ως ηλεκτρική ενέργεια απροσδιόριστης προέλευσης

Εικόνα 4: Ενεργειακό μείγμα Παραγωγής 2018 [4]

Ενεργειακό Μείγμα Παραγωγής 2019



2019	Λιγνίτης	Πετρέλαιο	Φυσικό Αέριο ¹	Ορυκτά καύσιμα Α.Π. ²	Σύνολο Ορυκτών Καυσίμων	Ηλιακά	Αιολικά	Υδροηλεκτρικά	Βιομάζα	ΑΠΕ Α.Π. ²	Σύνολο ΑΠΕ	Σύνολο	CO ₂ Εκπομπές (gCO ₂ /kWh)
%	21,72%	9,58%	36,04%	0,15%	67,49%	8,28%	15,17%	8,29%	0,76%	0,00%	32,51%	100,0%	547,11
TWh	10,42	4,59	17,29	0,07	32,38	3,97	7,28	3,98	0,37	0,00	15,60	47,97	

¹ Περιλαμβάνεται η παραγωγή από ΣΗΘΥΑ που χρησιμοποιούν ως καύσιμο Φυσικό Αέριο.

² Απροσδιόριστη Προέλευσης. Στην περίπτωση των Ορυκτών καυσίμων συμπεριλάβαμε την άντληση ως ηλεκτρική ενέργεια απροσδιόριστης προέλευσης

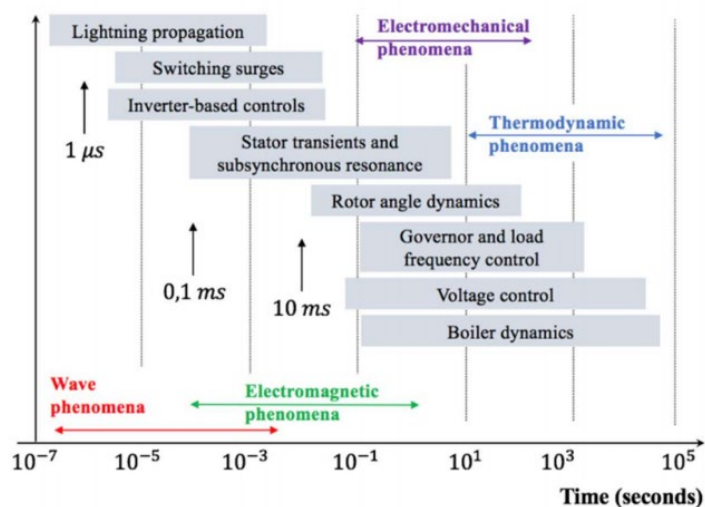
Εικόνα 5: Ενεργειακό μείγμα Παραγωγής 2019 [4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ευστάθεια Σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

2.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν νευραλγικές υποδομές καθώς όπως υπογραμμίστηκε είναι απαραίτητες στην καθημερινή ζωή της σύγχρονης κοινωνίας. Η διατήρηση της ευσταθούς και αδιάκοπης λειτουργίας τους, αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς στόχους κατά την σχεδίαση των συστημάτων. Ως ευστάθεια ενός ηλεκτρικού συστήματος καλείται η ικανότητα του για δεδομένες συνθήκες λειτουργίας, να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση μετά από την επίδραση μιας φυσικής διαταραχής [5] [6].

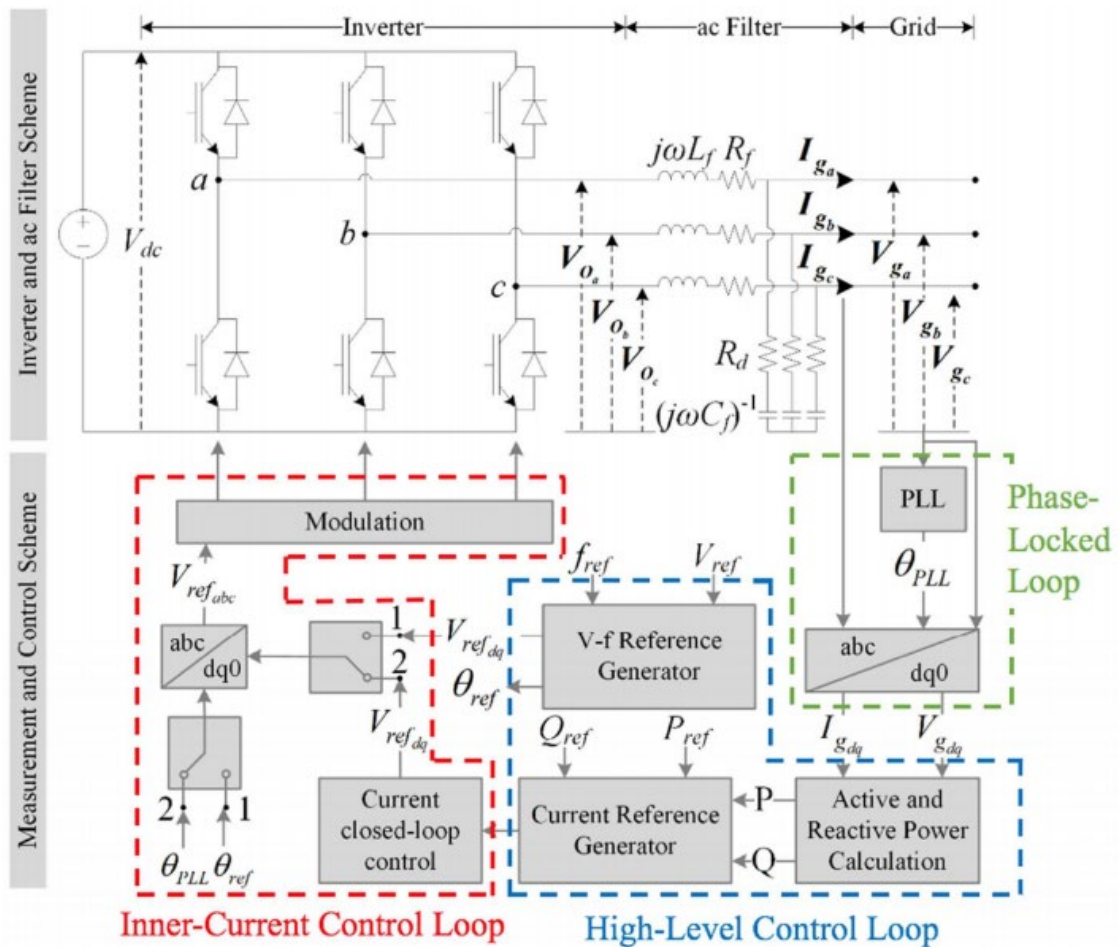
Στην εικόνα 6 φαίνεται η χρονική διάρκεια παρατηρούμενων μεταβατικών φαινομένων διαφορετικής φύσεως. Τα μεγάλα δίκτυα απαιτούν ένα μεγάλο αριθμό μεταβλητών προκειμένου να εξεταστούν όλα τα φαινόμενα, και επομένως εισάγονται κάποιες παραδοχές οι οποίες αποδίδουν λιγότερη ή μεγαλύτερη σπουδαιότητα σε κάποια από τα στοιχεία, με σεβασμό πάντα στην καθολική θεώρηση του συστήματος. Οι δυο κυριότερες κατηγορίες είναι τα ηλεκτρομαγνητικά και τα ηλεκτρομηχανικά φαινόμενα. Κάποιες από τις διαταραχές σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που δύνανται να ενεργοποιήσουν την πρώτη κατηγορία είναι οι τάσεις αποκαταστάσεως, οι υπερτάσεις χειρισμών καθώς και οι προσωρινές υπερτάσεις. Στην δεύτερη κατηγορία ενδεικτικά κάποιες από τις μεταβάσεις είναι η απώλεια συγχρονισμού και οι μεταβολές στην συχνότητα λόγω αλλαγών στο φορτίο ή στην παραγόμενη ισχύ. Τα ηλεκτρομηχανικά φαινόμενα διακρίνονται σε μικρής διάρκειας (μεταβατικά) και σε μεγάλης διάρκειας (στατική ευστάθεια ή ευστάθεια μόνιμης κατάστασης).



Εικόνα 6: Χρονική διάρκεια μεταβατικών φαινομένων [5]

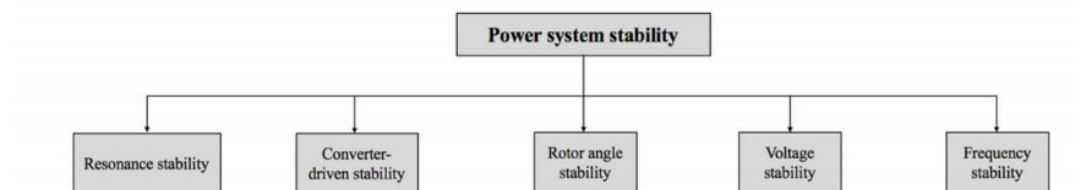
Η ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας καθορίζεται παραδοσιακά από την συμπεριφορά των επιμέρους στοιχείων που το αποτελούν, τα οποία ήταν γεννήτριες, μετασχηματιστές, φορτία και οι μονάδες ελέγχου αυτών. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με την είσοδο της ανθρωπότητας στην μεταλιγνιτική εποχή, πολλές από τις γεννήτριες αντικαθίστανται από μονάδες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας οι οποίες απαιτούν για την εύρυθμη λειτουργία τους πλήθος ημιαγωγικών διατάξεων καθώς και ελέγχων. Η μαζική διείσδυση παραγωγής βασιζόμενη σε διατάξεις μετατροπών, έχει οδηγήσει σε νέες προκλήσεις όσον αφορά την ευστάθεια. Ένας μεγάλος αριθμός μονάδων ΑΠΕ παράγουν συνεχή τάση, επομένως απαιτείται η σύνδεση ενός αντιστροφέα μεταξύ της εξόδου τους και του δικτύου. Ωστόσο δεν είναι λίγες οι μονάδες οι οποίες παράγουν εναλλασσόμενη τάση μεταβλητής συχνότητας η οποία δεν συνδέεται απευθείας στο δίκτυο των 50Hz αλλά πρέπει να ανορθωθεί και στην συνέχεια να μετατραπεί σε εναλλασσόμενη τάση στην επιθυμητή συχνότητα. Είναι λοιπόν εμφανές ότι η λειτουργία αυτών των μονάδων διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από τις σύγχρονες γεννήτριες των οποίων η συνεισφορά στην ευστάθεια έχει μελετηθεί εκτενώς.

Στην εικόνα 7 φαίνεται η τυπική διάταξη ενός τριφασικού μετατροπέα συμπεριλαμβανομένων των ελέγχων, προκειμένου να μελετηθεί η αρχή λειτουργίας του. Στο πάνω μέρος βρίσκεται η πλήρης γέφυρα των ημιαγωγικών στοιχείων μαζί με το φίλτρο εξόδου, τα οποία είναι υπεύθυνα για την μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη όπως θα αναλυθεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο. Τα τρία επιπρόσθετα πλαίσια αφορούν τις μονάδες που επιτελούν τον έλεγχο του αντιστροφέα για να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του. Στο πράσινο πλαίσιο φαίνεται ο έλεγχος PLL (Phase-locked loop) ο οποίος κλειδώνει την συχνότητα του μετατροπέα στην θεμελιώδη του δικτύου και επομένως κρατάει τον μετατροπέα σε συγχρονισμό με το δίκτυο. Στο μπλε πλαίσιο (High Level Control Loop) επιτελείται ένα πλήθος ελέγχων όπως ο έλεγχος της τάσης, της ενεργού ισχύος, απόκρισης συχνότητας και άλλων μεγεθών. Τυπικά οι μεταβάσεις σε αυτή τη βαθμίδα είναι πολύ πιο αργές σε σχέση με τον εσωτερικό έλεγχο του ρεύματος και κυμαίνονται από 1 μέχρι 10 Hz. Τέλος, στο κόκκινο πλαίσιο (Inner Current Control Loop) φαίνεται η συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται για έλεγχο του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο, βάσει εντολών που λαμβάνει από την προηγούμενη βαθμίδα (High Level Control Loop). Οι μεταβάσεις στην συγκεκριμένη βαθμίδα είναι πολύ πιο γρήγορες, τάξεως kHz. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μονάδες των αντιστροφέων προσφέρουν πλήθος επικουρικών υπηρεσιών όπως έλεγχο τάσης, ενεργού ισχύος, συχνότητας υποκαθιστώντας κάποια στοιχεία της λειτουργίας των σύγχρονων γεννητριών. Είναι εμφανές όμως ότι η πολυπλοκότητα του συνολικού συστήματος αυξάνεται περαιτέρω. Ανατρέχοντας στην εικόνα 6 διαφαίνεται ότι οι διακοπτικές συχνότητες και οι συχνότητες ελέγχων των μονάδων ΔΠ δύνανται να ενεργοποιήσουν ένα μεγάλο εύρος μεταβατικών φαινομένων και για αυτό το λόγο απαιτείται αναλυτικός σχεδιασμός.



Εικόνα 7: Σχηματικό διάγραμμα τριφασικού μετατροπέα και ελέγχων [5]

2.2 Κατηγορίες Ευστάθειας ΣΗΕ



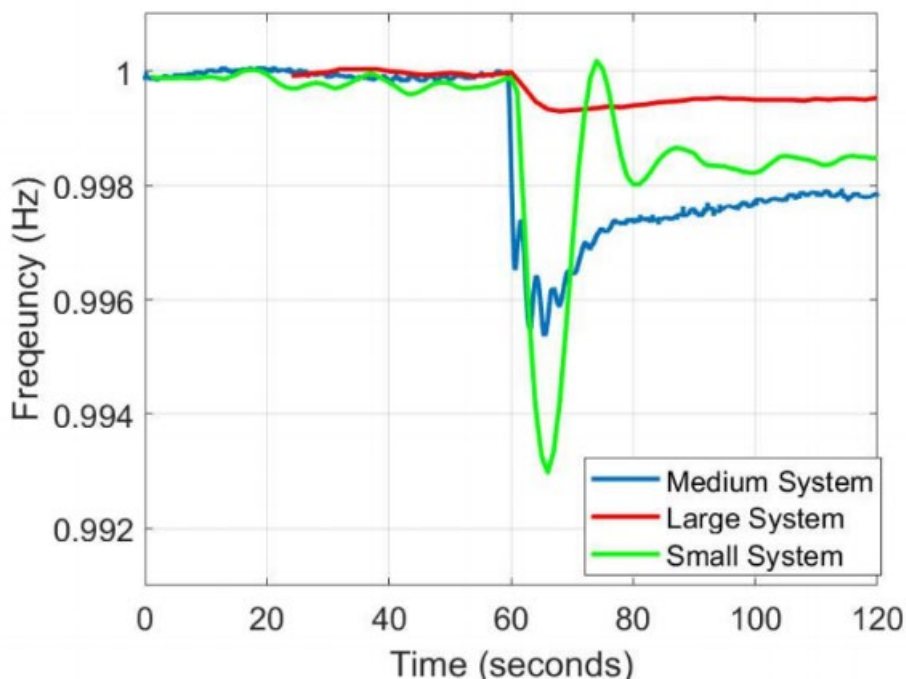
Εικόνα 8: Κατηγορίες Ευστάθειας ΣΗΕ [5]

Στη εικόνα 8 παρουσιάζεται σχηματικά η κατηγοριοποίηση των διάφορων τύπων ευστάθειας σε ηλεκτρικά δίκτυα. Οι βασικές κατηγορίες ευστάθειας είναι η ευστάθεια γωνίας (Rotor angle ability), η ευστάθεια τάσης (Voltage Stability), η ευστάθεια συχνότητας (Frequency stability) και οι δυο κατηγορίες που προστέθηκαν τα τελευταία χρόνια λόγω της μαζικής διεύδυσης ΑΠΕ, η ευστάθεια συντονισμού (Resonance stability) και η ευστάθεια οδηγούμενη από μετατροπείς (Converter-driven stability).

Η *ευστάθεια γωνίας (rotor angle stability)* αφορά στην διατήρηση του συγχρονισμού των συνδεδεμένων γεννητριών και στην ανάκτηση αυτής της ιδιότητας μετά από κάποια διαταραχή. Στην μόνιμη κατάσταση υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στην ροπή του άξονα της μηχανής και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, η οποία μπορεί να διαταραχθεί με την επίδραση μιας διαταραχής στο σύστημα, μειώνοντας ή αυξάνοντας δραστικά την ταχύτητα του δρομέα της μηχανής. Ως αποτέλεσμα η γωνία της μηχανής δύναται να μεταβληθεί και να λάβει μια τιμή που δεν ανήκει στο προκαθορισμένο εύρος, χάνοντας τον συγχρονισμό της με τις υπόλοιπες μηχανές. Ωστόσο, μια σημαντική αύξηση στην ταχύτητα των μηχανών δεν έχει ως αποτέλεσμα πάντα την απώλεια συγχρονισμού καθώς οι γεννήτριες δύνανται να επιταχυνθούν ταυτόχρονα [5].

Η *ευστάθεια τάσης (voltage stability)* αφορά στην ικανότητα του συστήματος να διατηρήσει σταθερά επίπεδα τάσης κοντά στην ονομαστική σε όλους τους ζυγούς του, και σχετίζεται κυρίως με αλλαγές στο φορτίο. Η ικανότητα παραγωγής και μεταφοράς της ισχύος μέσα από τις γραμμές μεταφοράς κρίνεται ιδιαίτερος σημαντική για ικανοποιηθούν όλα τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο. Με την σύνδεση μονάδων ΔΠ έχει παρατηρηθεί ότι η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης μπορεί να αυξηθεί. Για αυτό το λόγο έχει ενσωματωθεί στον αντιστροφέα ένα κομμάτι ελέγχου το οποίο ρυθμίζει την τάση του ζυγού καταναλώνοντας άεργο ισχύ ή περιορίζοντας την παραγόμενη ενεργό ισχύ, όταν κρίνεται απαραίτητο. Προβλήματα στην τάση εκδηλώνονται όταν μειώνονται ή αυξάνονται οι τάσεις των ζυγών, συνήθως λόγω απώλειας φορτίων, προβλημάτων στις γραμμές μεταφοράς ή σε στοιχεία προστασίας του δικτύου. Ένα τέτοιο περιστατικό θα μπορούσε εν δυνάμει να οδηγήσει σε αστάθεια της τάσης (voltage instability) είτε σε ολική κατάρρευση της τάσης (voltage collapse).

Η *ευστάθεια συχνότητας (frequency stability)* αφορά στην ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να ελέγξει και να διατηρήσει την συχνότητα του δικτύου στην ονομαστική τιμή. Εάν υπάρξει κάποια ανισορροπία στο ισοζύγιο της παραγόμενης ενεργούς ισχύος και της ισχύος του φορτίου, όπως για παράδειγμα αν τεθεί εκτός λειτουργίας κάποια γεννήτρια, η πρώτη φυσική απόκριση των συνδεδεμένων σύγχρονων γεννητριών είναι να παράξουν την επιπλέον ισχύ που χρειάζεται για να ικανοποιηθεί το φορτίο. Λόγω αυτής της πολύ γρήγορης ηλεκτρικής απόκρισης χάνεται η ισορροπία ανάμεσα στην ηλεκτρική και την μηχανική ροπή των γεννητριών με αποτέλεσμα να επιβραδυνθούν προκαλώντας βύθιση στην συχνότητα του δικτύου. Αυτή η απόκριση των γεννητριών σχετίζεται με τα φυσικά χαρακτηριστικά τους και όχι με τον έλεγχό τους. Για να αποφευχθεί το συγκεκριμένο φαινόμενο, ένας επαρκής αριθμός μονάδων λειτουργεί σε ισχύ μικρότερη της ονομαστικής, ώστε να μπορέσουν να ανταποκριθούν χωρίς να υπάρξει μείωση της συχνότητας. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής δεν ανταποκρίνονται με τον ίδιο τρόπο αλλά με περαιτέρω τροποποίηση θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στην ρύθμιση της συχνότητας σε πιο μικρούς χρόνους καθώς η απόκρισή τους εξαρτάται αποκλειστικά από τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά στοιχεία και όχι από μηχανικά. Με την αύξηση της διεξόδου των μονάδων ΔΠ προβλέπεται πως η συμπεριφορά των νέων συστημάτων θα αντιστοιχεί σε αυτή της πράσινης καμπύλης της εικόνας 9, υπογραμμίζοντας την ανάγκη πρόσθεσης επιπλέον ελέγχων των μονάδων σχετικά με την πρωταρχική ρύθμιση της συχνότητας.



Εικόνα 9: Μεταβολή της συχνότητας σε διάφορα συστήματα [5]

Οι δυο τελευταίες κατηγορίες ενσωματώθηκαν για να περιγράψουν τα προβλήματα ευστάθειας που εμφανίστηκαν στα δίκτυα μετά την μεγάλη διείσδυση των μετατροπέων. Η ευστάθεια συντονισμού (Resonance stability) περιλαμβάνει τον υποσύγχρονο συντονισμό, είτε αυτός προέρχεται από ηλεκτρομηχανικό συντονισμό είτε αποκλειστικά από ηλεκτρικό συντονισμό. Η ευστάθεια οδηγούμενη από μετατροπείς (Converter-driven stability) οφείλεται στην δυναμική συμπεριφορά των μετατροπέων. Όπως περιγράφηκε παραπάνω η τυπική μονάδα περιλαμβάνει βρόχους ελέγχου όπως το PLL και τους εσωτερικούς ελέγχους ρεύματος και τάσης. Αυτή η ευρεία κλίμακα του χρόνου στην οποία ορίζονται οι έλεγχοι και οι αλγόριθμοι των μονάδων, δύναται να αλληλεπιδράσει με την παθητικά στοιχεία του δικτύου, οδηγώντας σε ασταθή λειτουργία σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Με βάση τα παρατηρούμενα φαινόμενα ο συγκεκριμένος τύπος ευστάθειας διακρίνεται σε δύο τύπους αργών και γρήγορων αλληλεπιδράσεων.

Η κατηγορία των αργών αλληλεπιδράσεων αφορά στην μελέτη των στοιχείων του κυκλώματος που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες και μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με την ευστάθεια τάσης. Η μέγιστη μεταφορά ισχύος από τον μετατροπέα στο υπόλοιπο σύστημα, ειδικά όταν το δίκτυο είναι ασθενές, μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια.

Η κατηγορία των γρήγορων αλληλεπιδράσεων περιλαμβάνει την μελέτη των δομικών χαρακτηριστικών συστημάτων όπως ΑΠΕ, HVDC και FACTS, τα οποία περιλαμβάνουν ελέγχους που λειτουργούν σε σημαντικά υψηλότερες συχνότητες. Διάφορα φαινόμενα αστάθειας τα οποία φαίνονται να σχετίζονται με αυτή την κατηγορία έχουν παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια. Η μελέτη του φαινομένου αυτού, το οποίο αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως ευστάθεια γρήγορων αλληλεπιδράσεων οδηγούμενη από μετατροπείς ή αρμονική ευστάθεια [4], είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής και θα αναλυθεί εκτενώς στο επόμενο υποκεφάλαιο.

2.3 Ευστάθεια Γρήγορων Αλληλεπιδράσεων Οδηγούμενη Από Μετατροπείς

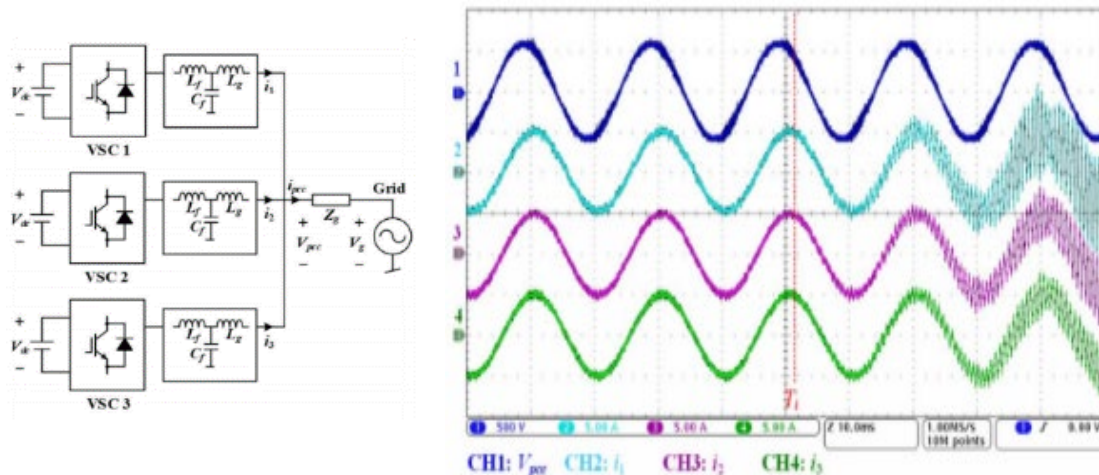
Σε ένα συμβατικό ΣΗΕ με σύγχρονες γεννήτριες και φορτία οι περισσότεροι έλεγχοι επιτελούνται σε χαμηλές συχνότητες και επομένως η δυναμική απόκριση του συστήματος οριζόταν σε αυτό το εύρος συχνοτήτων [7]. Ωστόσο οι νέες συσκευές των δικτύων που βασίζονται σε ηλεκτρονικά ισχύος εισάγουν ελέγχους που λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Γενικά, η ευστάθεια των μετατροπέων καθορίζεται από πολλαπλούς βρόχους ελέγχου όπως ο έλεγχος ρεύματος, ο έλεγχος ενεργού ισχύος και ο έλεγχος συγχρονισμού. Το εύρος ζώνης των δυο τελευταίων είναι σημαντικά χαμηλότερο από τις συχνότητες συντονισμού των φίλτρων και των καλωδίων, σε αντίθεση με τον πρώτο έλεγχο, ο οποίος επομένως είναι πολύ πιο ευαίσθητος στα σημεία συντονισμού. Οι μετατροπείς πηγής τάσης (Voltage Source Converters) για παράδειγμα είναι διατάξεις που λειτουργούν με συγκεκριμένη διακοπτική συχνότητα f_s , παράγοντας αρμονικές, οι οποίες μπορεί να επιδράσουν σε άλλα στοιχεία καθώς και να ενεργοποιήσουν συχνότητες συντονισμού του συστήματος. Η χρήση φίλτρων LCL μπορεί αποτελεσματικά να καταστείλει τις αρμονικές που οφείλονται στις διακοπτικές συχνότητες, ωστόσο η συχνότητα συντονισμού του φίλτρου δύναται να αλληλεπιδράσει με τους γρήγορους ελέγχους του αντιστροφέα, οδηγώντας σε φαινόμενα έντονης αρμονικής αστάθειας. Ο όρος αρμονική ευστάθεια που έχει επίσης προταθεί για αυτό το φαινόμενο, επιδέχεται για πολλούς τροποποιήσεις, καθώς οι μετρούμενες συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται δεν συμπίπτουν πάντα με κάποια εσωτερική αρμονική του συστήματος. Το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε παρατεταμένη διαταραχή ή σε αστάθεια με συνεχώς αυξανόμενο πλάτος [8].

Πολλοί αντιστροφείς σε κοντινή απόσταση μπορούν επίσης να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους εισάγοντας επιπλέον συχνότητες συντονισμού στο σύστημα. Σε τέτοιες διατάξεις έχει παρατηρηθεί ότι μια στιγμιαία βύθιση της τάσης ή αλλαγή στην τιμή του ρεύματος αναφοράς δύναται να ενεργοποιήσει τις υπάρχουσες αρμονικές, προκαλώντας σημαντική παραμόρφωση τόσο στο ρεύμα εξόδου όσο και στην τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης [7].

Το πρώτο παρατηρούμενο πρόβλημα που συσχετίστηκε με το φαινόμενο εμφανίστηκε το 1990 όταν κάποιες από τις εγκαταστάσεις μονάδων παραγωγής οδηγούμενων από μετατροπείς φαίνεται να προκάλεσαν την εμφάνιση μη αναμενόμενων αρμονικών αυξανόμενου πλάτους. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε ακόμα σε δίκτυα που περιλάμβαναν μετατροπείς πηγής τάσης (Voltage Source Converters) και τις απαραίτητες συνδεσμολογίες LCL φίλτρων τους. Σε ένα δίκτυο στην Γερμανία με μεγάλη διείσδυση φωτοβολταϊκών, παρατηρήθηκε ότι σε κάποιες περιπτώσεις οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής τίθονταν εκτός λειτουργίας. Παρότι οι μονάδες είχαν σχεδιαστεί προκειμένου να τηρούν τους κανονισμούς για την σύνδεση στο δίκτυο, η τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης ξεπερνούσε τα θεσπισμένα όρια [9].

Για να διερευνηθούν περαιτέρω αυτά τα φαινόμενα έχουν πραγματοποιηθεί πλήθος πειραμάτων. Στην πειραματική διάταξη του [10] συνδέθηκαν 3 μετατροπείς πηγής τάσης VSC σε ένα ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου. Οι αντιστροφείς έχουν τους ίδιους ελέγχους, ίδιες παραμέτρους φίλτρων και οι κυματομορφές της τεχνικής PWM που τους οδηγούν έχουν συγχρονιστεί. Ο έλεγχος PLL είχε ρυθμιστεί σε επαρκώς χαμηλό εύρος ζώνης προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση αρμονικών σε συχνότητες κοντά στην θεμελιώδη. Όταν το εύρος ζώνης του ελέγχου ρεύματος

αυξάνεται από $f_s/20$ σε $f_s/15$ παρατηρείται ότι τα ρεύματα εξόδου παραμορφώνονται σε μεγάλο βαθμό και το σύστημα μεταβαίνει σε αστάθεια. Παρά το γεγονός ότι ο κάθε αντιστροφέας έχει σχεδιαστεί να είναι ευσταθής και για τις δύο τιμές του εύρους ζώνης, φαίνεται πως το σύστημα των πολλαπλών αντιστροφέων εισάγει επιπλέον δεσμεύσεις στο εύρος ζώνης λειτουργίας τους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση φαίνεται ότι τα παθητικά χαρακτηριστικά των αντιστροφέων τείνουν να μετακινούν την συχνότητα συντονισμού του συστήματος στο εύρος συχνοτήτων όπου εμφανίζεται αρνητική απόσβεση (Negative Damping) από την καθυστέρηση που εισάγει ο έλεγχος ρεύματος.



Εικόνα 10: Πειραματική διάταξη και ρεύματα εξόδου των αντιστροφέων μετά την αύξηση του εύρους ζώνης του έλεγχου ρεύματος [10]

Επιπλέον, όταν ένας μετατροπέας συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, οι συχνότητες συντονισμού του συστήματος αλλάζουν λόγω της σύνδεσης του παθητικού μέρους του μετατροπέα αλλά και της επίδρασης της ενεργού συμπεριφοράς του η οποία καθορίζεται από την συχνότητα των ελέγχων του [8]. Ηλεκτρομαγνητικές συχνότητες συντονισμού που εισέρχονται στην περιοχή όπου ο μετατροπέας εμφανίζει αρνητική απόσβεση μπορεί να οδηγήσουν σε φαινόμενα έντονης αστάθειας, εφόσον το δίκτυο δεν έχει ικανή απόσβεση για να το «ισοφαρίσει», όπως φάνηκε και στην πειραματική διάταξη του [10].

Οι μετατροπείς ευθύνονται για την εμφάνιση ενός μεγάλου εύρους διαταραχών καθώς είναι πηγές αρμονικών, μπορούν να ενεργοποιήσουν ιδιοσυχνότητες άλλων στοιχείων (LCL φίλτρα) και είναι υπεύθυνοι για την αλλαγή των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος οι οποίες δύναται να ενεργοποιηθούν από διαταραχές. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι συστήματα αυτομάτου ελέγχου και επομένως η ευστάθεια τους μπορεί σε αρκετές περιπτώσεις να αξιολογηθεί με την εύρεση των πόλων τους στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο. Παρά το γεγονός ότι τα ΣΗΕ αποτελούνται κυρίως από επιμέρους ευσταθή στοιχεία, φαίνεται ότι η συνάρτηση μεταφοράς του συνολικού συστήματος μπορεί να εμφανίσει πόλους στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο [11].

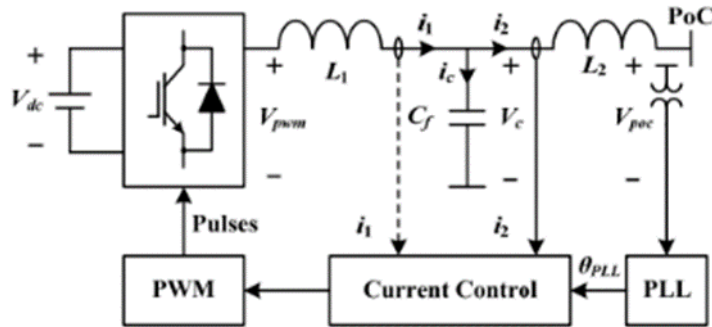
Το πολυδιάστατο αυτό φαινόμενο εξετάζεται με διάφορους τρόπους, ωστόσο δεν υπάρχει μια καθολικά αποδεκτή μέθοδος για την μελέτη του αλλά κυρίως κάποιες προσεγγίσεις που έχουν δημοσιευτεί στην βιβλιογραφία [8]. Οι μηχανισμοί που το προκαλούν και οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτό, είναι αντικείμενο έρευνας και έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον τόσο του ακαδημαϊκού χώρου όσο και της βιομηχανίας, καθώς φαίνεται να θέτει υπό προϋποθέσεις σε κίνδυνο την εύρυθμη λειτουργία των ΣΗΕ.

Παρακάτω αναφέρονται κάποιες από τις επιπτώσεις που έχει η εμφάνιση διαταραχών λόγω φαινομένων αστάθειας που σχετίζονται με τις γρήγορες αλληλεπιδράσεις των μετατροπέων, οι οποίες καταδεικνύουν τον λόγο για τον οποίο το φαινόμενο χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και μελέτης [7]:

- Μείωση της παραγόμενης, μεταφερόμενης και αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και αύξηση των απωλειών
- Ενίσχυση των παράλληλων και εν σειρά αρμονικών του συστήματος, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε έντονα αρμονικά ρεύματα και τάσεις και ενδεχομένως σε ένα ολικό shutdown του δικτύου το οποίο είναι ιδιαίτερα κοστοβόρο
- Γήρανση των μονωτήρων του δικτύου
- Σφάλματα στους έξυπνους μετρητές: Η αλληλεπίδραση των μετρητών με αντιστροφείς και άλλες συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος αποδείχτηκε ότι εισήγαγε σφάλματα στις μετρήσεις ενώ φάνηκε ότι υπάρχει ένα κενό στα πρότυπα όσον αφορά τις συχνότητες από 2-150kHz [12]
- Δυσλειτουργία και υπερθέρμανση προστατευτικών συσκευών
- Υψηλές θερμοκρασίες σε στοιχεία του δικτύου όπως μετασχηματιστές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ισοδύναμο Κύκλωμα Norton Μονοφασικού Αντιστροφέα ΔΠ

3.1 Σηματικό Διάγραμμα



Εικόνα 11: Διάγραμμα μονοφασικού αντιστροφέα [13]

Στην εικόνα 11 [13] παρουσιάζεται η τυπική διάταξη ενός μονοφασικού αντιστροφέα διεσπαρμένης παραγωγής, η οποία περιλαμβάνει έναν αντιστροφέα ημιαγωγίων στοιχείων διπολικών τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) με αντιπαράλληλες διόδους, ένα LCL φίλτρο εξόδου καθώς και τις συνδεσμολογίες ελέγχου. Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση του κάθε στοιχείου στην συνολική δυναμική συμπεριφορά του συστήματος καθώς και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, ακολουθεί συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών τους.

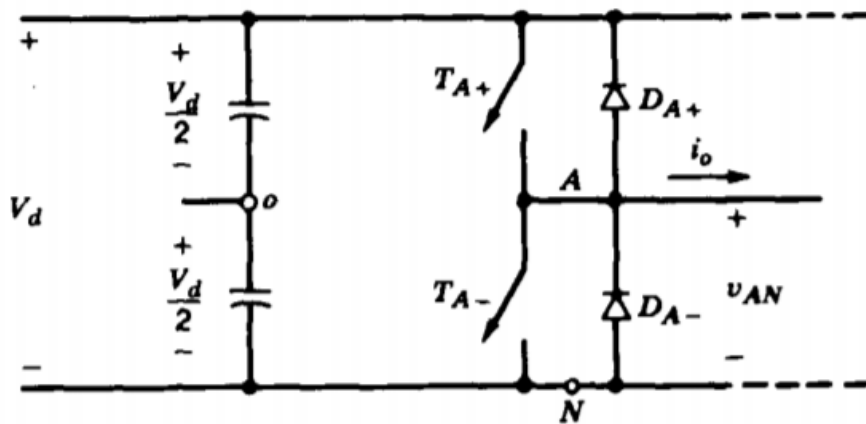
3.1.1 Αντιστροφέας

Οι Μετατροπείς Συνεχούς/Εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούν μια οικογένεια ευρέως χρησιμοποιούμενων διατάξεων, οι οποίες δύνανται τόσο να μετατρέψουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή (λειτουργία ανορθωτή) όσο και την συνεχή σε εναλλασσόμενη μεταβλητής συχνότητας και μεταβλητής ενεργού τιμής (λειτουργία αντιστροφέα) [14]. Πιο συγκεκριμένα, στην εικόνα 12 παρουσιάζεται μια διάταξη αντιστροφέα, η οποία δέχεται σαν είσοδο πηγή συνεχούς τάσης V_{dc} και την μετατρέπει σε εναλλασσόμενη προκειμένου να μπορέσει να αποδοθεί στο AC δίκτυο.

Οι αντιστροφεείς διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Οι Voltage Source Converters (VSC) δέχονται στην είσοδο τους πηγή συνεχούς τάσης ενώ οι Current Source Converters (CSC) δέχονται ως είσοδο πηγή συνεχούς ρεύματος. Οι CSC χρησιμοποιούνται για ac κινητήρια συστήματα μεγάλης ισχύος, ενώ οι VSC, βρίσκουν εφαρμογή σε διατάξεις όπως συστήματα οδήγησης κινητήρων, ηλεκτρικά οχήματα, παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας, συστήματα μεταφοράς συνεχούς ρεύματος (HVDC) και ποιότητας ισχύος (ενεργά φίλτρα). Όσον αφορά την έξοδο τους, έχουν προταθεί διάφορες συνδεσμολογίες τόσο για αυτούς που παράγουν μονοφασική εναλλασσόμενη AC τάση (1Φ αντιστροφεείς), όσο και για εκείνους που παράγουν τριφασική εναλλασσόμενη AC τάση (3Φ αντιστροφεείς).

Στην εικόνα 12 παρουσιάζεται ένας μονοφασικός αντιστροφείας διακοπτικού τύπου ενός σκέλους, όπου οι T_{A+} , T_{A-} είναι διακόπτες (παραδείγματος χάρη BJT, MOSFET, IGBT) και οι D_{A+} , D_{A-} διόδοι ελεύθερης διέλευσης. Στα άκρα της συνεχούς εισόδου συνδέονται σε σειρά δυο ίδιοι πυκνωτές με επαρκώς μεγάλες χωρητικότητες. Στην λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή 180, οι παλμοί οδήγησης των διακοπών είναι τετραγωνικοί παλμοί εύρους 180 μοιρών ενώ στην λειτουργία διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) εξαρτώνται από την συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής του φέροντος ημιτόνου. Οι διακόπτες T_{A+} , T_{A-} δεν πρέπει ποτέ να ενεργοποιηθούν την ίδια χρονική στιγμή, καθώς η ταυτόχρονη αγωγή τους θα προκαλούσε βραχυκύκλωμα. Όταν ο διακόπτης T_{A+} δεχτεί παλμό αγωγής στην είσοδό του, αν το ρεύμα i_o είναι θετικό, τότε μπορεί να άγει είτε ο διακόπτης T_{A+} είτε η διόδος D_{A-} , ενώ αν είναι αρνητικό τότε μπορεί να άγει μόνο η D_{A+} . Όταν ο διακόπτης T_{A-} δεχτεί στην είσοδό του παλμό αγωγής, τότε αν το ρεύμα i_o είναι θετικό μπορεί να άγει μόνο η αντιπαράλληλη διόδος D_{A-} , ενώ αν είναι αρνητικό μπορεί να άγει είτε ο διακόπτης T_{A-} είτε η διόδος D_{A+} . Παρατηρώντας ότι όταν άγει κάποιο από τα πάνω στοιχεία του κυκλώματος η τάση είναι θετική ενώ όταν άγει κάποιο από το κάτω μέρος η τάση είναι αρνητική, η έξοδος U_{AN} μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$U_{AN} = \begin{cases} \frac{V_d}{2} & \text{παλμός αγωγής στον } T_{A+} \\ -\frac{V_d}{2} & \text{παλμός αγωγής στον } T_{A-} \end{cases}$$

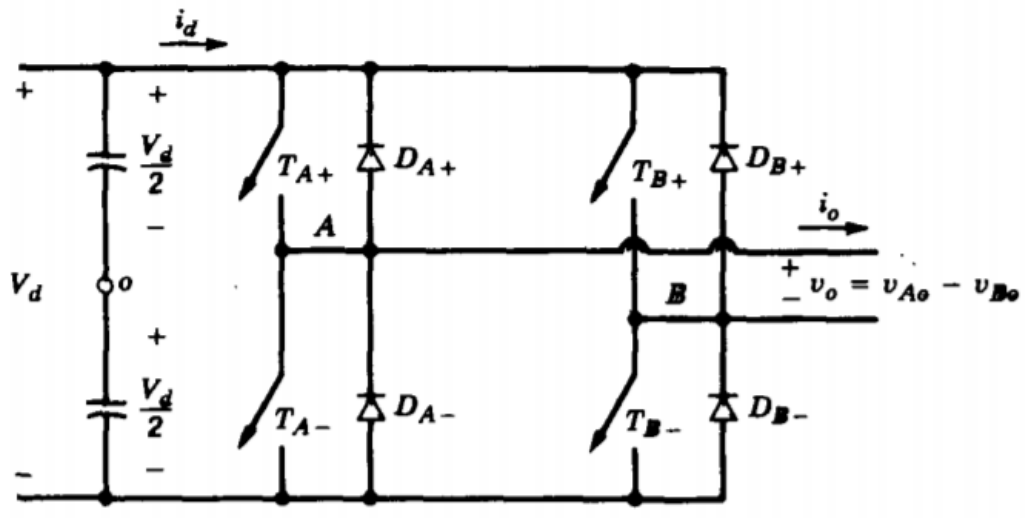


Εικόνα 12: Ημιαγώγιμη διάταξη ενός σκέλους [14]

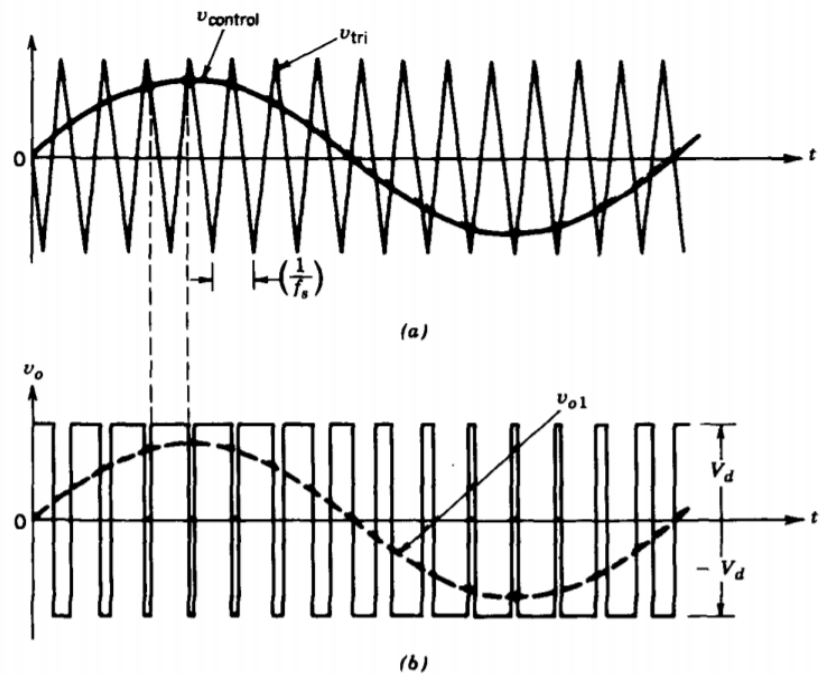
Ενδεικτικά κάποιες από τις τοπολογίες που έχουν προταθεί για τους VSC, περιλαμβάνουν τους αντιστροφείς ημιγέφυρας και τους αντιστροφείς πλήρους γέφυρας. Στην εικόνα 13 παρουσιάζεται ένας μονοφασικός αντιστροφείας σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας του οποίου θα παρουσιαστεί συνοπτικά η λειτουργία ημιτονοειδούς διαμόρφωσης παλμών PWM με διπολική έξοδο. Στην συγκεκριμένη τεχνική οι παλμοί οδήγησης των διακοπών προκύπτουν από την σύγκριση του ημιτονοειδούς σήματος ελέγχου ή αναφοράς $U_{control}$ συχνότητας διαμόρφωσης f_i με το φέρον σήμα τριγωνικής κυματομορφής U_{tri} συχνότητας μετάβασης f_c , όπως φαίνεται στην εικόνα 14(α). Η συχνότητα μετάβασης είναι εκείνη που καθορίζει τη συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες (f_s). Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους m_a ορίζεται ως το πηλίκο του πλάτους των τάσεων $U_{control}/U_{trig}$ και ο

συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f ως το πηλίκο f_c/f_1 , όπου f_c η συχνότητα του φέροντος και η f_1 συχνότητα διαμόρφωσης.

Στην συγκεκριμένη συνδεσμολογία τα ζεύγη διακοπών T_{A+} , T_{B-} και T_{A-} , T_{B+} αλλάζουν κατάσταση ως ζεύγη διακοπών και η U_{A0} είναι πάντα αντίθετη της U_{B0} . Η τάση εξόδου του αντιστροφέα έχει πλάτος θεμελιώδους συνιστώσας $m_a \cdot V_d$ και δεν είναι ημιτονοειδής, καθώς περιέχει αρμονικές σε συχνότητες πολλαπλάσιες της f_1 . Στην εικόνα 14β παρουσιάζεται η τάση εξόδου U_o καθώς η θεμελιώδης ημιτονοειδής κυματομορφή U_{o1} στην επιθυμητή συχνότητα.



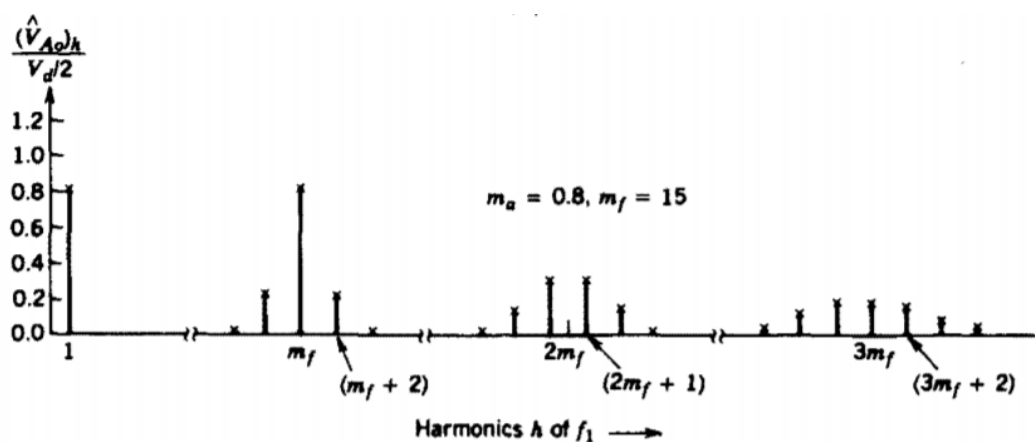
Εικόνα 13: Αντιστροφέα πλήρους γέφυρας [14]



Εικόνα 14: Κυματομορφές αντιστροφέα [14]

3.1.2 Φίλτρο Εξόδου

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η έξοδος του αντιστροφέα είναι μια τετραγωνική κυματομορφή, η οποία περιέχει τόσο την επιθυμητή τάση στην θεμελιώδη συχνότητα όσο και αρμονικές σε πολλαπλάσια της. Ενδεικτικά, για μια διάταξη της εικόνας 12 οδηγούμενη από διαμορφωμένους PWM παλμούς, με $m_a=0.8$ και $m_f=15$, το φάσμα των αρμονικών που προκύπτει από την ανάλυση Fourier της τάσης εξόδου παρουσιάζεται στην εικόνα 15. Με ανάλογο τρόπο μπορούν να υπολογιστούν τα φάσματα οποιασδήποτε διάταξης αντιστροφέων από αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το πλάτος των αρμονικών τάσεων μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση του πίνακα της εικόνας 16 θεωρώντας επαρκώς μεγάλο συντελεστή m_f , συναρτήσει του πλάτους της θεμελιώδης συνιστώσας της τάσης εξόδου [14].



Εικόνα 15: Φάσμα αρμονικών [14]

Table 8-1 Generalized Harmonics of v_{Ao} for a Large m_f .

m_a	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
h					
1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
<i>Fundamental</i>					
m_f	1.242	1.15	1.006	0.818	0.601
$m_f \pm 2$	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
$m_f \pm 4$					0.018
$2m_f \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212
$2m_f \pm 5$				0.013	0.033
$3m_f$	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
$3m_f \pm 2$	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
$3m_f \pm 4$		0.012	0.047	0.104	0.157
$3m_f \pm 6$				0.016	0.044
$4m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
$4m_f \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
$4m_f \pm 5$			0.034	0.084	0.119
$4m_f \pm 7$				0.017	0.050

Note: $(\hat{V}_{Ao})_h / \frac{1}{2}V_d [= (\hat{V}_{AN})_h / \frac{1}{2}V_d]$ is tabulated as a function of m_a .

Εικόνα 16: Πλάτη Αρμονικών [14]

Το φίλτρο εξόδου συνδέεται σε σειρά με την έξοδο του αντιστροφέα πριν την έγχυση της παραγόμενης τάσης στο δίκτυο, προκειμένου να απομονώσει την θεμελιώδη κυματομορφή και να ελαχιστοποιήσει τις εγχεόμενες αρμονικές. Παραδοσιακά, ένα L

φίλτρο συνδεόταν μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου για να επιτελέσει την συγκεκριμένη λειτουργία. Ενδεικτικά κάποια ακόμη φίλτρα που έχουν προταθεί για να αντιμετωπίσουν αυτό το φαινόμενο είναι τα LC φίλτρα, τα ενεργά φίλτρα καθώς και τα LCL φίλτρα.

Η σύνδεση ενός LCL φίλτρου, φαίνεται να μπορεί να επιτύχει σημαντική μείωση των αρμονικών σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες τάξεως kHz. Ωστόσο, τα συγκεκριμένα φίλτρα τρίτου βαθμού απαιτούν πολύ πιο περίπλοκες διαδικασίες ελέγχου, είναι πολύ πιο ευαίσθητα σε παρεμβολές που μπορεί να εμφανιστούν από την παραμόρφωση της τάσης του δικτύου και συνεισφέρουν στις ηλεκτρικές συχνότητες συντονισμού του συστήματος [15].

3.1.3 Βαθμίδες Ελέγχου

Προκειμένου να μελετηθούν οι διαταραχές σε υψηλές συχνότητες, τάξεως kHz, έχει αγνοηθεί η επίδραση του High Level Control Loop καθώς σχετίζεται με διαταραχές σε χαμηλές συχνότητες τάξεως Hz [11]. Στην εικόνα 11 παρουσιάζονται δυο βαθμίδες ελέγχου, ο έλεγχος PLL και ο έλεγχος ρεύματος (Current Control) του οποίου η έξοδος οδηγείται στην τεχνική διαμόρφωσης παλμών οδήγησης του αντιστροφέα (PWM) ως σήμα αναφοράς.

- **Phase-locked loop (PLL):** Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιείται για να διασφαλίσει ότι η θεμελιώδης συχνότητα της παραγόμενης τάσης ταυτίζεται με αυτή του δικτύου. Παρά το γεγονός ότι έχουν προταθεί και άλλες μέθοδοι, αυτή μέχρι στιγμής είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται κατά κόρον για την διασφάλιση του συγχρονισμού της μονάδας με το δίκτυο [5].
- **Έλεγχος ρεύματος και PWM :** Για τον έλεγχο της εξόδου του αντιστροφέα χρησιμοποιείται έλεγχος ρεύματος ο οποίος δέχεται ως είσοδο την διαφορά I_{ref} (ρεύμα αναφοράς) – I_g (ρεύμα πηνίου εξόδου) και παράγει την τάση που χρησιμοποιείται σαν σήμα αναφοράς στην ημιτονοειδή διαμόρφωση παλμών PWM.

Από την εικόνα 11 (με αντικατάσταση του συμβολισμού i_2 με I_g) παρατηρείται ότι με την χρήση νόμων ρευμάτων και τάσεων Kirchhoff, προκύπτουν οι εξισώσεις που περιγράφουν το εξεταζόμενο σύστημα, με τις οποίες στην συνέχεια θα αναπαρασταθεί το κύκλωμα σε μπλοκ διάγραμμα. Η τιμή του ρεύματος αναφοράς που τροφοδοτείται στην είσοδο του ελεγκτή ρεύματος I_{ref} ρυθμίζεται να είναι ίδια με αυτή του ρεύματος εισόδου στο LCL φίλτρο. Το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφει το σύστημα είναι το εξής:

$$(I_{ref} - I_g) * G_{pr} * G_d = V_{pwm} \quad (3.1)$$

$$(V_{pwm} - V_c) \frac{1}{Z_{L1}} = i_1 \quad (3.2)$$

$$i_1 - I_g = i_c = \frac{V_c}{Z_{cf}} \quad (3.3)$$

$$(V_c - V_{pcc})^{1/Z_{L2}} = I_g \quad (3.4)$$

3.2 Ρεύμα Εξόδου

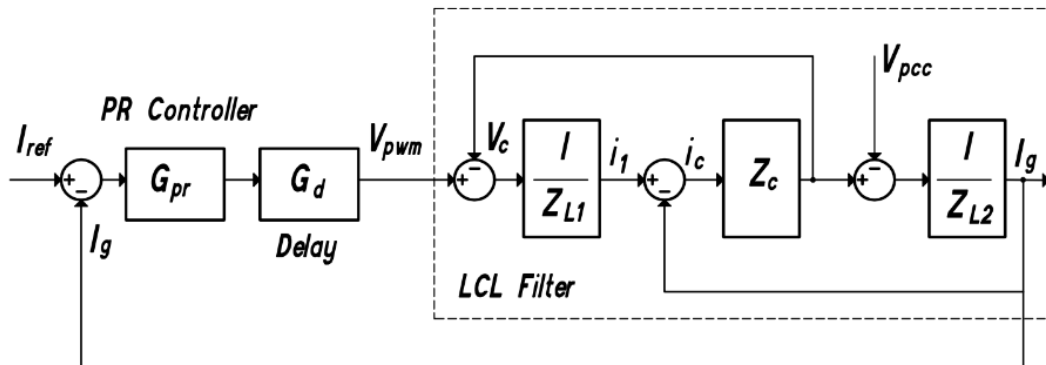
Μια γενική μέθοδος ανάλυσης δικτύων είναι η ανάλυση ιδιοτιμών (eigenvalues analysis), η οποία περιλαμβάνει την δημιουργία του συστήματος εξισώσεων που περιγράφουν το δίκτυο συνήθως στο πεδίο του χρόνου. Σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα στα οποία η δυναμική του συστήματος καθορίζεται κυρίως από τις στρεφόμενες μηχανές, στα συστήματα με υψηλή διεύθυνση ηλεκτρονικών ισχύος, οι μικρές σταθερές χρόνων λειτουργίας των μετατροπέων απαιτούν αναλυτική μελέτη όλων των επιμέρους συστημάτων του δικτύου. Επομένως, η κατάστροψη των εξισώσεων ανάγεται σε μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία με μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Μια συγκεκριμένη κατηγορία αυτής της μεθόδου είναι η Component Connection Method, στην οποία οι δυναμικές συμπεριφορές όλων των στοιχείων του ηλεκτρικού συστήματος και του δικτύου αναπαριστώνται από ξεχωριστές μήτρες (2 vectors matrix). Με αυτό τον τρόπο οι εξισώσεις επιμερίζονται σε αυτοτελή κομμάτια απλοποιώντας σημαντικά τους υπολογισμούς ενώ επίσης αναλύεται η επιμέρους συμπεριφορά κάθε στοιχείου ξεχωριστά και η συνεισφορά του σε πιθανές διαταραχές [16].

Εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί η Impedance Based ανάλυση η οποία είχε αρχικά προταθεί για την μελέτη σχεδιασμού φίλτρων εισόδου για μετατροπείς συνεχούς τάσης [16] και στηρίζεται επίσης στην επιμέρους ανάλυση των στοιχείων και των υποσυστημάτων του συνολικού κυκλώματος. Η διαφοροποίηση της έγκειται στο ότι δεν επιλύει το σύνολο των εξισώσεων που προκύπτουν από τις ξεχωριστές μήτρες αλλά εξετάζει την ευστάθεια τοπικά στο σημείο σύνδεσης κάθε στοιχείου. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί ο σχεδιασμός της συνολικής μήτρας αγωγιμοτήτων και ταυτόχρονα να εξεταστεί ο βαθμός επίδρασης όλων των επιμέρους στοιχείων στην ευστάθεια του συστήματος. Παράλληλα, η συνάρτηση μεταφοράς του κάθε στοιχείου μπορεί να τροποποιηθεί με την προσθήκη επιπλέον διατάξεων όπως φίλτρα και εξωτερικές αντιστάσεις, προκειμένου το συνολικό σύστημα να μεταβεί σε ευστάθεια. Η τεχνική αυτή διαθέτει πλήθος πλεονεκτημάτων και έχει επιλεγεί για την ανάλυση στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η ανάλυση σε επίπεδο συχνότητας χρησιμοποιείται ευρέως για την μελέτη πολύπλοκων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου καθώς απλοποιεί τους σύνθετους υπολογισμούς που θα απαιτούνταν στην ανάλυση σε επίπεδο χρόνου. Ένα από τα πιο σημαντικά παραδείγματα αυτού του ισχυρισμού είναι η εν σειρά σύνδεση δυο συστημάτων, η οποία σε επίπεδο χρόνου υπολογίζεται ως η συνέλιξη των δυο συναρτήσεων μεταφοράς απαιτώντας υψηλό υπολογιστικό φόρτο, ενώ σε επίπεδο συχνότητας οι πράξεις απλοποιούνται σημαντικά καθώς ισούται με τον πολλαπλασιασμό τους.

Με την χρήση των εξισώσεων (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) προκύπτει το διάγραμμα βαθμίδων της εικόνας 17 [13].

Ο έλεγχος του ρεύματος επιτελείται με την χρήση ενός Proportional Resonant (PR) ελεγκτή. Λόγω του άπειρου κέρδους του σε μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού ο ελεγκτής λειτουργεί με μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης στην θεμελιώδη συχνότητα [13]. Η πηγή τροφοδοσίας συνεχούς τάσης του αντιστροφέα έχει θεωρηθεί σταθερή. Ο έλεγχος Phase Locked Loop έχει αγνοηθεί καθώς έχει σχεδιαστεί σε εύρος ζώνης σημαντικά χαμηλότερο από την θεμελιώδη συχνότητα του δικτύου, και επομένως δεν μπορεί να συνεισφέρει στο συγκεκριμένο φαινόμενο [11].



Εικόνα 17: Διάγραμμα βαθμίδων αντιστροφέα

3.2.1 Αρχή της Επαλληλίας

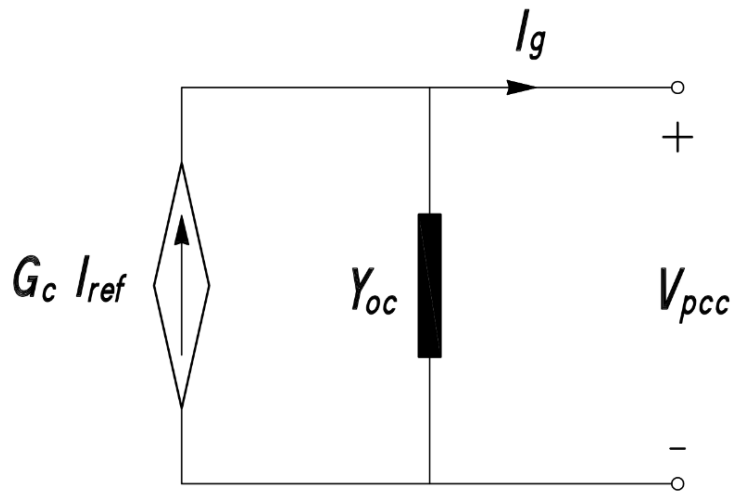
Ως γραμμικό σύστημα καλείται εκείνο που απαρτίζεται μόνο από γραμμικά στοιχεία όπως γραμμικούς πυκνωτές, γραμμικές αντιστάσεις, γραμμικά πηνία. Η αρχή της επαλληλίας αποτελεί μια γενική αρχή που διέπει όλα τα γραμμικά ηλεκτρικά κυκλώματα είτε παραμένουν σταθερά στον χρόνο, είτε είναι χρονικά μεταβαλλόμενα. Σύμφωνα με αυτήν, σε κάθε τέτοιο κύκλωμα, η έξοδος που προέρχεται από την επίδραση περισσότερων από μιας διεγέρσεων, μπορεί να υπολογιστεί ως το επιμέρους άθροισμα των εξόδων που θα εμφανίζονταν στο κύκλωμα αν η κάθε διεγερση δρούσε μόνη της, ενώ οι υπόλοιπες είχαν μηδενιστεί. Γραμμικά συστήματα τα οποία αποτελούνται από γραμμικά χρονικά αναλλοίωτα στοιχεία, δηλαδή στοιχεία των οποίων οι ιδιότητες δεν μεταβάλλονται στον χρόνο, ονομάζονται γραμμικά χρονικά αναλλοίωτα. Τα γραμμικά συστήματα των οποίων τα στοιχεία χαρακτηρίζονται από συναρτήσεις μεταφοράς των οποίων οι συντελεστές εξαρτώνται από τον χρόνο καλούνται γραμμικά χρονικά μεταβαλλόμενα. Για παράδειγμα γραμμικά χρονικά μεταβαλλόμενο χαρακτηρίζεται το σύστημα αυτομάτου ελέγχου ενός αεροσκάφους καθώς η μάζα του αλλάζει στο επίπεδο του χρόνου (κατανάλωση καυσίμων) [17].

Το σύστημα το οποίο δέχεται ως διεγέρσεις το ρεύμα αναφοράς του PR ελεγκτή, I_{ref} και την τάση στο σημείο κοινής σύνδεσης, V_{pcc} της εικόνας 17 είναι γραμμικό χρονικά αναλλοίωτο. Εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας, προκύπτει ότι το συνολικό ρεύμα εξόδου I_g ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα του γινομένου της πρώτης διεγέρσης I_{ref} με το κέρδος ρεύματος G_c και του γινομένου της δεύτερης διεγέρσης V_{pcc} με την σύνθετη αγωγιμότητα Y_{oc} :

$$I_g = G_c * I_{ref} + Y_{oc} * V_{pcc}$$

Πριν τον αναλυτικό υπολογισμό των G_c και Y_{oc} , παρατηρείται ότι η αναπαράσταση Norton του ρεύματος εξόδου της μονάδας I_g είναι μια πηγή ρεύματος συνδεδεμένη παράλληλα με μια αγωγιμότητα, όπως αναπαρίσταται στην εικόνα 18 [10]. Θεωρώντας θετική την φορά της πηγής I_{ref} , συνδέοντας την V_{pcc} με την πολικότητα που αναγράφεται στο σχήμα, το ρεύμα που διαρρέει την Y_{oc} θα έχει αρνητική φορά και επομένως η εξίσωση (3.5) μετασχηματίζεται σε :

$$I_g = G_c * I_{ref} - Y_{oc} * V_{pcc} \quad (3.5)$$



Εικόνα 18: Ισοδύναμο κύκλωμα Norton

3.2.3 Συναρτήσεις Μεταφοράς Ελεγκτή και Καθυστέρησης

Η G_{pr} προσομοιώνει το αναλογικό και το αρμονικό κέρδος του PR ελεγκτή ο οποίος λαμβάνει ως είσοδο την διαφορά $I_{ref} - I_g$ και παράγει την επιθυμητή τάση. Αυτή η τάση συνδέεται ως είσοδος στην συνάρτηση μεταφοράς G_d η οποία περιγράφει την καθυστέρηση του συστήματος.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς τους στο φάσμα της συχνότητας είναι οι εξής:

$$G_{pr} = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega_1^2} \quad (3.6)$$

$\omega_1 = 2\pi f_1$, f_1 η θεμελιώδης συχνότητα του δικτύου

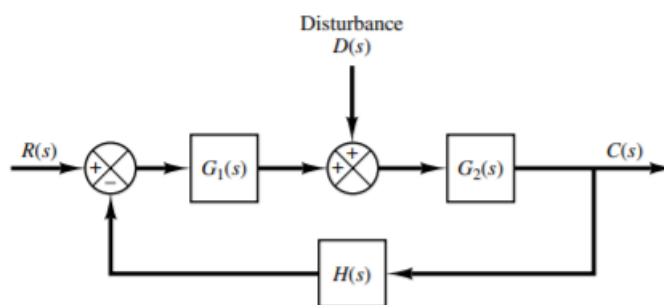
$$G_d = e^{-1.5T_s s} \quad (3.7)$$

T_s = περίοδος δειγματοληψίας του συστήματος

3.2.4 Αγωγιμότητες LCL Φίλτρου 2 Εισόδων

Συναρτήσεις μεταφοράς καλούνται οι μαθηματικές εκφράσεις που χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν την σχέση μεταξύ εισόδου-εξόδου σε στοιχεία τα οποία περιγράφονται με ένα σύστημα γραμμικών, χρονικά αναλλοίωτων εξισώσεων. Πιο συγκεκριμένα, συνάρτηση μεταφοράς καλείται ο λόγος του μετασχηματισμού Laplace της εξόδου (απόκριση συστήματος) δια τον μετασχηματισμό Laplace της εισόδου, θεωρώντας ότι οι αρχικές συνθήκες είναι μηδενικές [17].

Στην είσοδο του LCL φίλτρου όπως φαίνεται στην εικόνα 17, οδηγείται η τάση V_{pwm} , και η τάση του σημείου κοινής σύνδεσης V_{pcc} . Λόγω εσωτερικών αναδράσεων όπως η ανατροφοδότηση του ρεύματος I_g στην είσοδο του πυκνωτή καθώς και της τάσης του πυκνωτή στην είσοδο του πηνίου L_1 , οι ζητούμενες αγωγιμότητες δεν μπορούν να προκύψουν από τον πολλαπλασιασμό των συναρτήσεων μεταφοράς των επιμέρους στοιχείων του φίλτρου.



Εικόνα 19: Σύστημα στο οποίο επιδρά εξωτερική διαταραχή [17]

Στην εικόνα 19 παρουσιάζεται ένα σύστημα κλειστού βρόχου στο οποίο επιβάλλεται διαταραχή $D(s)$. Όταν δυο εισοδοί (η είσοδος αναφοράς $R(s)$ και η διαταραχή $D(s)$) επιδρούν ταυτόχρονα σε ένα γραμμικό χρονικά αναλλοίωτο σύστημα, κάθε είσοδος μπορεί να χειριστεί ανεξάρτητα από την άλλη και οι έξοδοι που προκύπτουν από κάθε είσοδο ξεχωριστά δύνανται να αθροιστούν για να περιγράψουν τη συνολική έξοδο του συστήματος [17].

Η συνιστώσα της εξόδου $C_D(s)$ που οφείλεται στην διαταραχή, θεωρώντας αρχικές μηδενικές συνθήκες ισούται με :

$$\frac{C_D(s)}{D(s)} = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s) * G_2(s) * H(s)}$$

Η συνιστώσα της εξόδου $C_R(s)$ που οφείλεται στην είσοδο αναφοράς, θεωρώντας αρχικές μηδενικές συνθήκες ισούται με:

$$\frac{C_R(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s) * G_2(s)}{1 + G_1(s) * G_2(s) * H(s)}$$

$$\text{Τελικά : } C(s) = C_D(s) + C_R(s) = \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)*G_2(s)*H(s)} [G_1(s) * R(s) + D(s)]$$

Παρατηρείται ότι το εξεταζόμενο κύκλωμα έχει την μορφή του κυκλώματος του LCL φίλτρου της εικόνας 17 και επομένως οι ζητούμενες αγωγιμότητες μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας, μηδενίζοντας διαδοχικά την μια διέγερση διατηρώντας ενεργή αυτήν της οποίας η συνάρτηση μεταφοράς επιζητείται να υπολογιστεί.

Με την εφαρμογή των παραπάνω η σύνθετη αγωγιμότητα Y_{20} προκύπτει υπολογίζοντας την συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου για την διέγερση V_{pwm} μηδενίζοντας την V_{pcc} :

$$Y_{20} = \frac{I_g}{V_{pcc}} (v_{pwm}=0) \quad (3.8)$$

Μετασχηματίζοντας τις εξισώσεις (3.2), (3.3) και (3.4) για $V_{pwm} = 0$ προκύπτει το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$I_g = i_1 - i_c \quad (3.9)$$

$$i_1 = -\frac{V_c}{Z_{L1}} \quad (3.10)$$

$$V_c = V_{pcc} + (I_g * Z_{L2}) \quad (3.11)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.3) και (3.10) στην (3.9) και εν συνεχεία αντικαθιστώντας στο αποτέλεσμα την (3.11) προκύπτει η εξίσωση (3.13) η οποία έχει ως μεταβλητές μόνο το V_{pcc} και το I_g . Με μια σειρά πράξεων προκύπτει η ζητούμενη συνάρτηση μεταφοράς (3.14).

$$I_g = -V_c * \left(\frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_c} \right) \quad (3.12)$$

$$I_g * \left(Z_c * Z_{L1} + \frac{Z_{L2}(Z_c + Z_{L1})}{(Z_c * Z_{L1})} \right) = -V_{pcc} \left(\frac{Z_c + Z_{L1}}{Z_c * Z_{L1}} \right) \quad (3.13)$$

$$Y_{20} = \frac{Z_c + Z_{L1}}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1}} \quad (3.14)$$

Αναλόγως, η σύνθετη αγωγιμότητα Y_{2p} προκύπτει υπολογίζοντας την συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου για την διέγερση V_{pwm} μηδενίζοντας την V_{pcc} :

$$Y_{2p} = \frac{I_g}{V_{pwm}} (V_{pcc}=0) \quad (3.15)$$

Μετασχηματίζοντας τις εξισώσεις (3.2), (3.3) και (3.4) για $V_{pcc} = 0$ προκύπτει το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$V_{pwm} = V_c + i_1 * Z_{L1} \quad (3.16)$$

$$i_1 = I_g + i_c \quad (3.17)$$

$$V_c = I_g * Z_{L2} \quad (3.18)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.18), (3.17) και (3.3) στην (3.16) προκύπτει η εξίσωση (3.19) και η ζητούμενη συνάρτηση μεταφοράς (3.20):

$$V_{pwm} = I_g * \left(\frac{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1}}{Z_c} \right) \quad (3.19)$$

$$Y_{2p} = \frac{Z_c}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1}} \quad (3.20)$$

3.2.5 Κέρδος Ανοιχτού Βρόχου T_2

Κέρδος ανοιχτού βρόχου του συστήματος καλείται η αναλογία του σήματος ανάδρασης δια του μετρούμενου σφάλματος.

Το κέρδος ανοιχτού βρόχου του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$T_2 = \frac{I_g}{I_{ref} - I_g} = G_{pr} * G_d * \frac{I_g}{V_{pwm}} (V_{pcc} = 0) = G_{pr} * G_d * Y_{2p} \quad (3.21)$$

3.2.6 Κέρδος Ρεύματος G_c

Συνάρτηση μεταφοράς ευθέως κλάδου καλείται η αναλογία του σήματος εξόδου δια του μετρούμενου σφάλματος. Η συνάρτηση μεταφοράς μιας εισόδου που ανήκει σε

σύστημα πολλαπλών εισόδων, μπορεί να υπολογιστεί ως το πηλίκο $\frac{\text{ΣΜ ευθέως κλαδου}}{1+\text{κέρδος ανοιχτού βρόχου}}$ [17].

Συνάρτηση μεταφοράς ευθέως κλάδου της εισόδου I_{ref} , καλείται η αναλογία του σήματος εξόδου (το οποίο ταυτίζεται με το σήμα ανάδρασης στο εξεταζόμενο σύστημα επειδή η ανάδραση είναι μοναδιαία) δια το μετρούμενο σφάλμα και επομένως ορίζεται ως T_2 :

$$\begin{aligned}
 G_c &= \frac{\text{ΣΜ ευθέως κλαδου}}{1 + \text{κέρδος ανοιχτού βρόχου}} = \frac{T_2}{1 + T_2} = \frac{G_{pr} * G_d * Y_{2p}}{1 + G_{pr} * G_d * Y_{2p}} = \\
 &= \frac{G_{pr} * G_d * \frac{Z_c}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1}}}{1 + G_{pr} * G_d * \frac{Z_c}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1}}} = \\
 &= \frac{G_{pr} * G_d * Z_c}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1} + G_{pr} * G_d * Z_c} \quad (3.22)
 \end{aligned}$$

3.2.7 Αγωγιμότητα Εξόδου Y_{oc}

Ανατρέχοντας στην εικόνα 17, ο ευθύς κλάδος μεταξύ της εισόδου V_{pcc} και της εξόδου I_g ισούται με την Y_{20} . Επομένως η αγωγιμότητα εξόδου μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\begin{aligned}
 Y_{oc} &= \frac{\text{ΣΜ ευθέως κλαδου}}{1 + \text{κέρδος ανοιχτού βρόχου}} = \frac{\frac{I_g}{V_{pcc}} (V_{pwm} = 0)}{1 + T_2} = \frac{Y_{20}}{1 + T_2} \\
 &= \frac{\frac{Z_c + Z_{L1}}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1}}}{1 + \frac{G_{pr} * G_d * Z_c}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1}}} \\
 &= \frac{Z_c + Z_{L1}}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1} + G_{pr} * G_d * Z_c} \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

3.3 Εναλλακτικός Υπολογισμός Κέρδους G_c και Αγωγιμότητας Εξόδου Y_{oc}

Εναλλακτικά, οι εξισώσεις για το G_c και το Y_{oc} θα μπορούσαν να υπολογιστούν χωρίς εφαρμογή των κανόνων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, αντικαθιστώντας τις αρχικές

εξισώσεις (3.1), (3.2) και (3.4) στην (3.3). Ακολουθεί ο υπολογισμός των ανωτέρω υπολογισμών προς επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων (3.22) και (3.23).

$$I_g = i_1 - i_c \quad (3.24)$$

$$I_g = \frac{V_{pwm} - V_c}{Z_{L1}} - i_c \quad (3.25)$$

$$I_g = \frac{G_d * G_{pr}(I_{ref} - i_2) - V_{pcc} - I_g * Z_{L2}}{Z_{L1}} - \frac{V_{pcc} + I_g * Z_{L2}}{Z_c} \quad (3.26)$$

$$I_g \left(1 + \frac{Z_{L2} - G_d * G_{pr}}{Z_{L1}} + \frac{Z_{L2}}{Z_c} \right) = I_{ref} \left(\frac{G_d * G_{pr}}{Z_{L1}} \right) + V_{pcc} \left(\frac{1}{Z_{L1}} + \frac{1}{Z_c} \right) \quad (3.27)$$

Η εξίσωση (3.27) έχει ως αγνώστους μόνο το I_g , I_{ref} , V_{pcc} . Ο συντελεστής του I_g ισούται με $\frac{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1} - G_d * G_{pr} * Z_c}{Z_{L1} * Z_c}$ και διαιρώντας τα σκέλη της εξίσωσης (3.27) με αυτόν, προκύπτει η εξίσωση (3.28)

$$I_g = I_{ref} * \left(\frac{G_d * G_{pr} * Z_c}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1} + G_{pr} * G_d * Z_c} \right) - V_{pcc} * \left(\frac{Z_{L1} + Z_c}{Z_{L1} * Z_c + Z_c * Z_{L2} + Z_{L2} * Z_{L1} + G_{pr} * G_d * Z_c} \right) \quad (3.28)$$

Οι συντελεστές της εξίσωσης (3.28) ταυτίζονται με τις εξισώσεις (3.23) και (3.24) αντίστοιχα, επιβεβαιώνοντας τους υπολογισμούς των υποκεφαλαίων 3.2.6 και 3.2.7. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αλγεβρικός υπολογισμός (3.28) φανερώνει το αρνητικό πρόσημο του συντελεστή της V_{pcc} , δηλαδή την αντίθετη φορά της συνιστώσας του ρεύματος I_g που προκύπτει από την εφαρμογή της τάσης του σημείου κοινής σύνδεσης V_{pcc} , στην αγωγιμότητα εξόδου της μονάδας Y_{oc} , μια πληροφορία που με τους προηγούμενους υπολογισμούς υπολογίστηκε ποιοτικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Σύνδεση Αντιστροφών ΔΠ σε Δίκτυο Διανομής

4.1 Εισαγωγή

Το δίκτυο διανομής περιλαμβάνει το δίκτυο Μέσης τάσης (20KV) το οποίο μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής και το δίκτυο Χαμηλής τάσης (400/230V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές. Οι παραγωγοί μπορούν να συνδεθούν και στα δυο δίκτυα ωστόσο στο δίκτυο χαμηλής τάσης (400/230V) επιτρέπεται η σύνδεση εγκαταστάσεων συνολικής ισχύος μέχρι 100kW, εφόσον υπάρχει περιθώριο διείσδυσης στο δίκτυο, μια πληροφορία που παρέχεται από τον διαχειριστή (ΔΕΔΔΗΕ) [18].

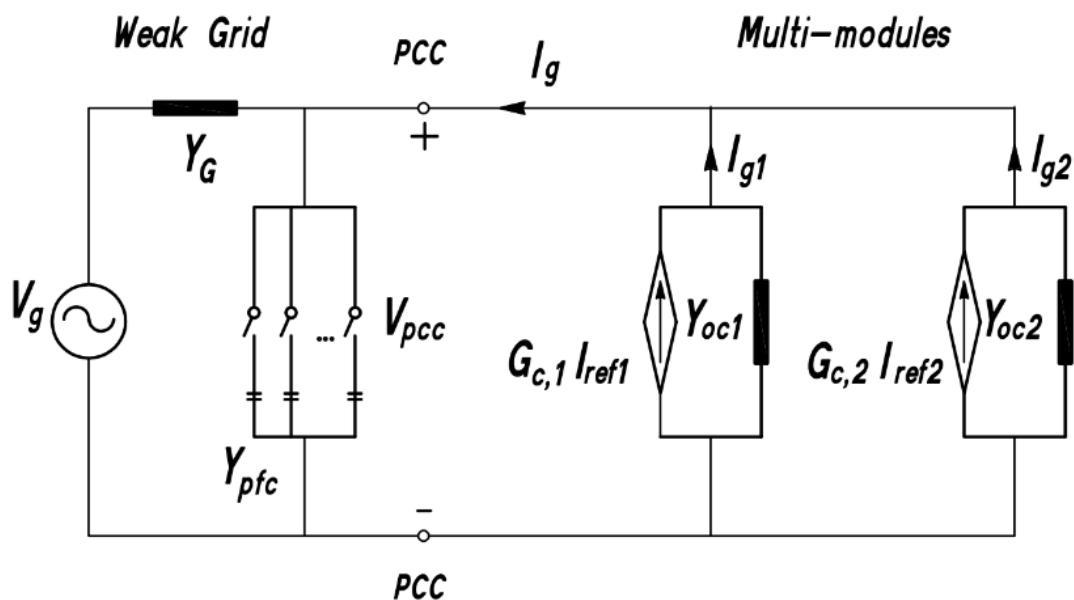
Σημείο Σύνδεσης στο δίκτυο (ΣΣΔ) καλείται το σημείο του δικτύου στο οποίο συνδέονται οι παραγωγοί και βρίσκεται πάντα κοντά στην έξοδο των εγκαταστάσεων. Στο ΣΣΔ εγκαθίστανται οι μετρητικές διατάξεις οι οποίες παρακολουθούν την ενέργεια που απορροφούν και αποδίδουν οι εγκαταστάσεις. Σημείο Κοινής Σύνδεσης στο δίκτυο (ΣΚΣ) καλείται το σημείο του δικτύου στο οποίο έχουν συνδεθεί ή δύνανται να συνδεθούν στο μέλλον άλλοι παραγωγοί ή καταναλωτές και δεν ταυτίζεται σε όλες τις περιπτώσεις με το ΣΣΔ. Στο ΣΚΣ πραγματοποιείται ο έλεγχος των προκαλούμενων επιπτώσεων στο δίκτυο από τους παραγωγούς που συνδέονται και λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για το δίκτυο.

Η εγκατάσταση οφείλει να διαθέτει διακοπτικές διατάξεις όπως μέσα διακοπής ρεύματος φορτίου και διακόπτες φορτίου ή ισχύος, προκειμένου να εξασφαλιστεί η απόξευξη και η απομόνωσή του από το δίκτυο άμεσα, εφόσον κριθεί αναγκαία. Μια βασική συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται είναι ο παραγωγός να μην προκαλεί υπέρβαση των ορίων της τάσης που έχουν τεθεί για το ΣΚΣ, καθώς κάτι τέτοιο θα είχε σοβαρές επιπτώσεις και στις υπόλοιπες εγκαταστάσεις του δικτύου. Προκειμένου λοιπόν να διασφαλιστεί η ποιότητα της τάσης που εγγέεται στο ΣΚΣ, απαιτείται μια σειρά μελετών για να πιστοποιηθεί ότι τα χαρακτηριστικά των παραγωγών πληρούν τα κριτήρια που έχει θέσει ο διαχειριστής. Ενδεικτικά κάποια από τα στοιχεία που εξετάζονται είναι οι μεταβολές της τάσης και flicker καθώς και η εκπομπή των αρμονικών. Οι απαιτήσεις που πρέπει να πληροί μια εγκατάσταση στην Ελλάδα προκειμένου να είναι αποδεκτή καθορίζονται από τα πρότυπα IEC 61000-3-2, 61000-3-3, 61000-3-11 και τις τεχνικές εκθέσεις IEC 61000-3-4 61000-3-5. Για να συνδεθεί μια καινούρια εγκατάσταση οφείλει να προσκομίσει τα αντίστοιχα πιστοποιητικά στα οποία φαίνεται ότι πληρούνται οι προδιαγραφές [18].

4.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Με 2 Αντιστροφείς ΔΠ

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, το ρεύμα εξόδου της μονάδας και κατ'επέκταση του αντιστροφέα είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξεταστεί ως προς το εάν αλλοιώνει την ποιότητα της τάσης στο ΣΚΣ. Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται ο υπολογισμός του ρεύματος εξόδου των αντιστροφέων μετά την σύνδεσή τους σε δίκτυο διανομής με την χρήση της επαλληλίας και των νόμων Kirchhoff.

Έχοντας υπολογίσει τις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος Norton της εικόνας 18, ακολουθεί η αναπαράσταση ενός δικτύου διανομής τάσης V_g και σύνθετης αγωγιμότητας Y_g στο οποίο έχουν συνδεθεί παράλληλα 2 αντιστροφείς ΔΠ (εικόνα 20). Το δίκτυο περιλαμβάνει ακόμα εγκάρσιες αγωγιμότητες Y_{pfc} .



Εικόνα 20: Δίκτυο διανομής δυο συνδεδεμένων αντιστροφών ΔΠ [11]

Το ισοδύναμο κύκλωμα έχει τρεις πηγές εισόδου:

- V_g : Πηγή τάσης που παρέχει το δίκτυο στο κύκλωμα
- $G_{c,1} I_{ref1}$: Πηγή ρεύματος πρώτου αντιστροφέα ΔΠ
- $G_{c,2} I_{ref2}$: Πηγή ρεύματος δεύτερου αντιστροφέα ΔΠ

Με την χρήση του θεωρήματος Norton, η πηγή τάσης V_g μετασχηματίζεται σε πηγή ρεύματος $V_g \cdot Y_g$.

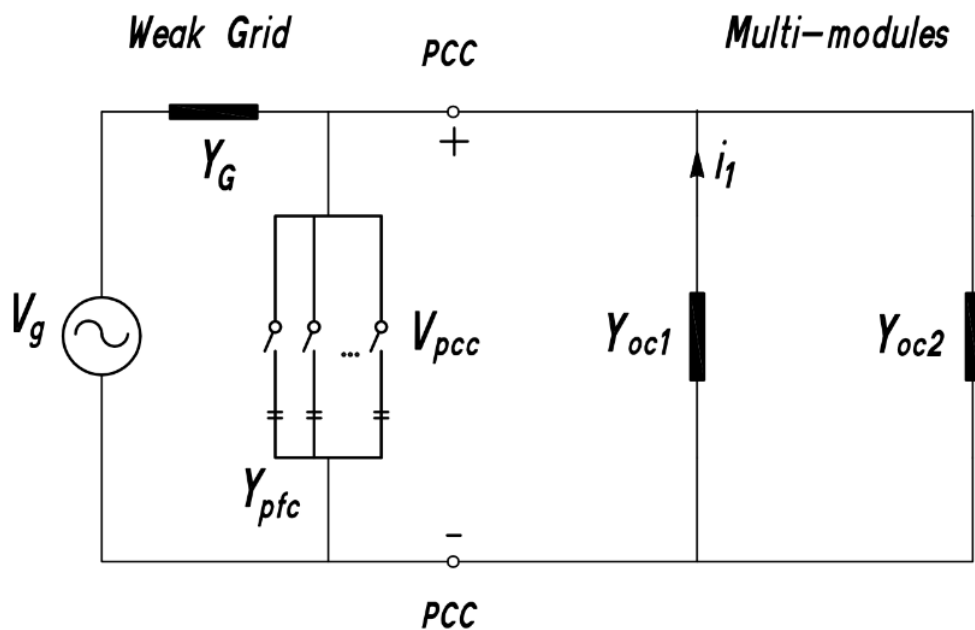
4.2.1 Έξοδοι Επιμέρους Μονάδων

Η αρχή της επαλληλίας του υποκεφαλαίου 3.2.1, μπορεί να διατυπωθεί ισοδύναμα ως:

Σε κάθε γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα η απόκριση μιας εισόδου είναι ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες που εφαρμόζονται ταυτόχρονα, φαινόμενο που οφείλεται στην γραμμική σχέση που συνδέει την απόκριση και την διέγερση των κυκλωμάτων αυτού του είδους. Για την εξαγωγή των σχέσεων ρευμάτων των επιμέρους μονάδων στο ισοδύναμο γραμμικό ηλεκτρικό κύκλωμα του σχήματος που περιλαμβάνει τρεις εισόδους εφαρμόζεται η αρχή της επαλληλίας.

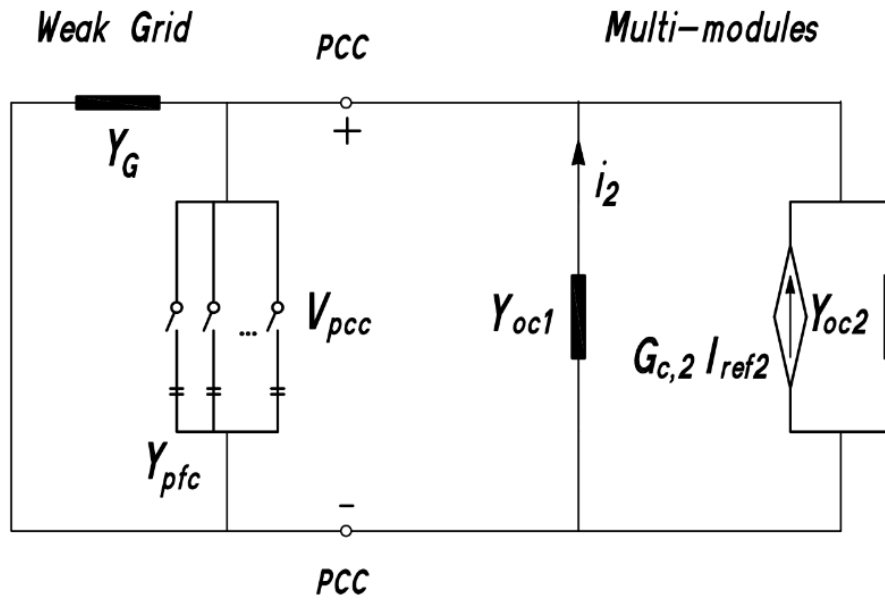
4.2.2 Συνιστώσες Ανεξάρτητων Διεγέρσεων

Για τον υπολογισμό της συνιστώσας i_1 του I_{g1} η είσοδος $V_g Y_g$, παραμένει ενεργή και μηδενίζονται οι υπόλοιπες (εικόνα 21). Αντιστοίχως, για τον υπολογισμό της συνιστώσας i_2 του I_{g1} η είσοδος $G_{c,2}I_{ref2}$ παραμένει ενεργή και μηδενίζονται οι υπόλοιπες (εικόνα 22). Για τον υπολογισμό της συνιστώσας i_3 του I_{g1} η είσοδος $G_{c,1}I_{ref1}$ παραμένει ενεργή και μηδενίζονται οι υπόλοιπες (εικόνα 23). Με την χρήση των νόμων ρευμάτων του Kirchhoff στις εικόνες 21, 22 και 23 αντίστοιχα, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:



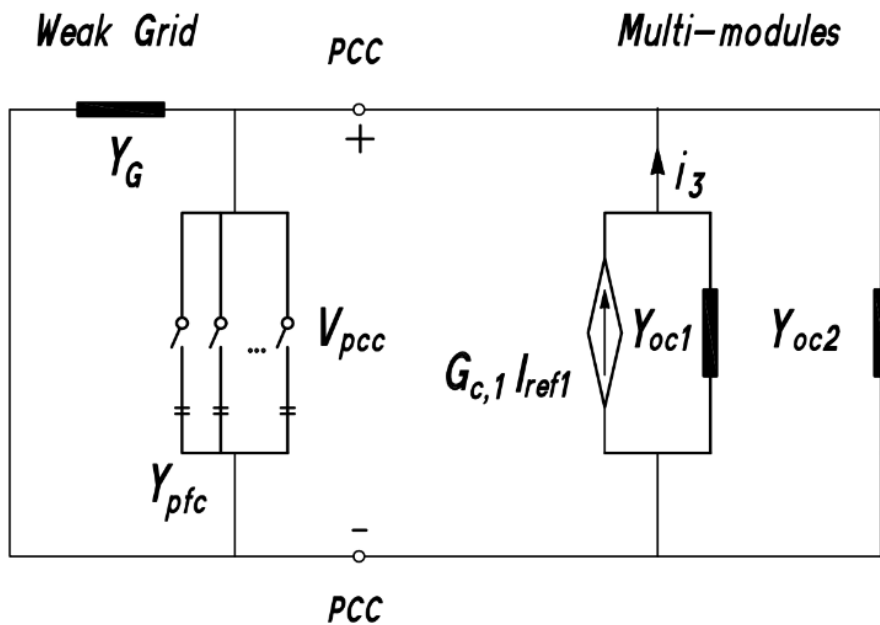
Εικόνα 21: Ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος με V_g ενεργή

$$i_1 = -\frac{Y_{oc1}}{Y_{oc1} + Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G} * V_G Y_G \quad (4.1)$$



Εικόνα 22: Ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος με $G_{c,2} I_{ref2}$ ενεργή

$$i_2 = -\frac{Y_{oc1}}{Y_{oc1} + Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G} * G_{c,2} I_{ref2} \quad (4.2)$$



Εικόνα 23: Ισοδύναμο κύκλωμα συστήματος με $G_{c,1} I_{ref1}$ ενεργή

$$i_3 = G_{c,1} I_{ref1} - V_{pcc} * Y_{oc1} \quad (4.3) \quad V_{pcc} = \frac{G_{c,1} I_{ref1}}{Y_{oc1} + Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G} \quad (4.4)$$

Αντικαθιστώντας την (4.4) στην (4.3) προκύπτει :

$$i_3 = \left(1 - \frac{Y_{OC1}}{Y_{OC1} + Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G} \right) * G_{c,1} I_{ref1} \quad (4.5)$$

$$i_3 = \left(\frac{Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_{G1}}{Y_{OC1} + Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G} \right) * G_{c,1} I_{ref1} \quad (4.6)$$

4.2.3 Ρεύματα Εξόδου 1^{ου} και 2^{ου} Αντιστροφεία ΔΠ

Το συνολικό άθροισμα των σύνθετων αγωγιμοτήτων του κυκλώματος μπορεί να οριστεί ως $Y_{tot} = Y_{OC1} + Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G$. Με αυτή την αντικατάσταση και χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας, το συνολικό ρεύμα εξόδου της πρώτης μονάδας ορίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών του:

$$I_{g1} = i_1 + i_2 + i_3$$

$$I_{g1} = G_{c,1} I_{ref1} - \left(\frac{Y_{OC1}}{Y_{tot}} \right) * G_{c,1} I_{ref1} - \frac{Y_{OC1}}{Y_{tot}} * G_{c,2} I_{ref2} - \frac{Y_{OC1}}{Y_{tot}} * V_G Y_G \quad (4.7)$$

Το οποίο μπορεί να γραφτεί με την χρήση της (4.6) ισοδύναμα ως [11]:

$$I_{g1} = \left(\frac{Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G}{Y_{tot}} \right) * G_{c,1} I_{ref1} - \frac{Y_{OC1}}{Y_{tot}} * G_{c,2} I_{ref2} - \frac{Y_{OC1}}{Y_{tot}} * V_G Y_G$$

Διαιρώντας τα μέλη της εξίσωσης με $Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G$ (4.7) προκύπτει [19]:

$$I_{g1} = \left(\frac{1}{1 + \frac{Y_{OC1}}{Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) * G_{c,1} I_{ref1} - \left(\frac{\frac{Y_{OC1}}{Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{OC1}}{Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) * G_{c,2} I_{ref2} - \left(\frac{\frac{Y_{OC1}}{Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{OC1}}{Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) * V_G Y_G \quad (4.8)$$

Ακολουθώντας ανάλογα βήματα ανάλυσης για τον υπολογισμό του ρεύματος εξόδου της δεύτερης μονάδας προκύπτουν οι εξισώσεις (4.9) και (4.10)

$$I_{g2} = \mathbf{G}_{c,2} \mathbf{I}_{ref2} - \left(\frac{Y_{OC2}}{Y_{tot}} \right) * \mathbf{G}_{c,2} \mathbf{I}_{ref2} - \frac{Y_{OC2}}{Y_{tot}} * \mathbf{G}_{c,1} \mathbf{I}_{ref1} - \frac{Y_{OC2}}{Y_{tot}} * \mathbf{V}_G \mathbf{Y}_G \quad (4.9)$$

$$I_{g2} = \left(\frac{1}{1 + \frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) * \mathbf{G}_{c,2} \mathbf{I}_{ref2} - \left(\frac{\frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) * \mathbf{G}_{c,1} \mathbf{I}_{ref1} - \left(\frac{\frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) * \mathbf{V}_G \mathbf{Y}_G \quad (4.10)$$

4.3 Αθροιστικό Ρεύμα Εξόδου

Το συνολικό ρεύμα εξόδου που εγγέεται στο δίκτυο ορίζεται ως [11] :

$$I_g = I_{g1} + I_{g2}$$

$$I_g = \left(\frac{1}{1 + \frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}} - \left(\frac{\frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) \right) * \mathbf{G}_{c,1} \mathbf{I}_{ref1} + \left(\frac{1}{1 + \frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}} - \left(\frac{\frac{Y_{OC1}}{Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) \right) * \mathbf{G}_{c,2} \mathbf{I}_{ref2} - \left(\frac{\frac{Y_{OC1}}{Y_{OC2} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}} - \left(\frac{\frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{OC2}}{Y_{OC1} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) \right) * \mathbf{V}_G \mathbf{Y}_G$$

Οι συντελεστές των $\mathbf{G}_{c,1} \mathbf{I}_{ref1}$, $\mathbf{G}_{c,2} \mathbf{I}_{ref2}$, $\mathbf{V}_G \mathbf{Y}_G$ με μια σειρά αλγεβρικών πράξεων μπορούν να γραφτούν ως το σύστημα (4.11) από το οποίο με διαίρεση με τον όρο $Y_{pfc} + Y_G$ προκύπτει το σύστημα (4.12) και η τελική εξίσωση (4.13)

$$\frac{Y_{pfc} + Y_G}{Y_{tot}}, \frac{Y_{pfc} + Y_G}{Y_{tot}}, \frac{-Y_{OC1} - Y_{OC2}}{Y_{tot}} \quad (4.11)$$

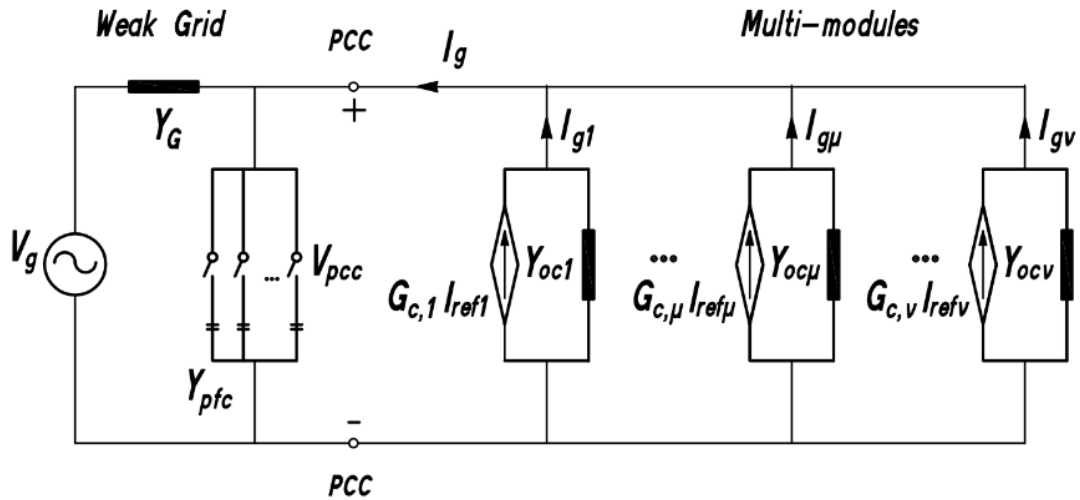
$$\frac{1}{1 + \frac{Y_{oc1} + Y_{oc2}}{Y_{pfc} + Y_G}}, \frac{1}{1 + \frac{Y_{oc1} + Y_{oc2}}{Y_{pfc} + Y_G}}, \frac{1}{1 + \frac{Y_{oc1} + Y_{oc2}}{Y_{pfc} + Y_G}} \left(\frac{Y_{oc1}}{Y_{pfc} + Y_G} - \frac{Y_{oc2}}{Y_{pfc} + Y_G} \right) \quad (4.12)$$

$$I_g = \frac{1}{1 + \frac{Y_{oc1} + Y_{oc2}}{Y_{pfc} + Y_G}} \left(G_{c,1} I_{ref1} + G_{c,2} I_{ref2} - \left(\frac{Y_{oc1}}{Y_{pfc} + Y_G} - \frac{Y_{oc2}}{Y_{pfc} + Y_G} \right) * V_G Y_G \right) \quad (4.13)$$

Από τις (4.7) και (4.9) προκύπτει επίσης:

$$I_g = I_{g1} + I_{g2} = \left(\frac{Y_{pfc} + Y_G}{Y_{tot}} \right) * (G_{c,1} I_{ref1} + G_{c,2} I_{ref2}) - \left(\frac{Y_{oc1} + Y_{oc2}}{Y_{tot}} \right) * V_G Y_G$$

4.4 Γενίκευση Εξαγόμενων Σχέσεων για Αντιστροφείς ΔΠ



Εικόνα 24: Ισοδύναμο κύκλωμα ν συνδεδεμένων αντιστροφέων ΔΠ σε δίκτυο διανομής

Στην εικόνα 24 παρουσιάζεται ένα δίκτυο διανομής με ν παραλληλισμένους αντιστροφείς ΔΠ. Έχοντας ολοκληρώσει την εξαγωγή των σχέσεων που περιγράφουν τα ρεύματα εξόδου τόσο των επιμέρους μονάδων όσο και του συνόλου, επαγωγικά προκύπτουν οι αντίστοιχες σχέσεις (4.14), (4.15) για το ρεύμα εξόδου της μ-οστής μονάδας $I_{g\mu}$ και για το συνολικό ρεύμα εξόδου ν μονάδων I_g (4.16) (4.17).

$$\begin{aligned}
I_{g\mu} &= \left(\frac{1}{1 + \frac{Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v Y_{OC\kappa}}} \right) * \mathbf{G}_{c,\mu} \mathbf{I}_{ref\mu} \\
&- \left(\frac{\frac{Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v Y_{OC\kappa}}}{1 + \frac{Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v Y_{OC\kappa}}} \right) * \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v \mathbf{G}_{c,\kappa} \mathbf{I}_{ref\kappa} \\
&- \left(\frac{\frac{Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v Y_{OC\kappa}}}{1 + \frac{Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v Y_{OC\kappa}}} \right) * \mathbf{V}_G \mathbf{Y}_G \quad (4.14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{g\mu} &= \mathbf{G}_{c,\mu} \mathbf{I}_{ref\mu} - \left(\frac{Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v Y_{OC\kappa}} \right) * \mathbf{G}_{c,\mu} \mathbf{I}_{ref\mu} - \left(\frac{Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v Y_{OC\kappa}} \right) \\
&* \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v \mathbf{G}_{c,\kappa} \mathbf{I}_{ref\kappa} - \left(\frac{Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v Y_{OC\kappa}} \right) * \mathbf{V}_G \mathbf{Y}_G \quad (4.15)
\end{aligned}$$

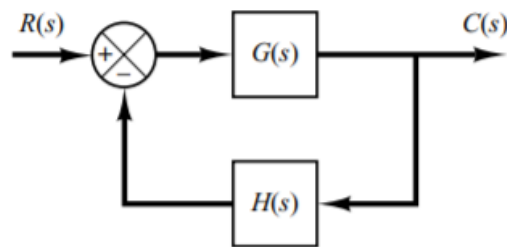
$$I_g = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{\mu=1}^v Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G}} \sum_{\mu=1}^v \left(\mathbf{G}_{c,\mu} \mathbf{I}_{ref\mu} - \mathbf{V}_G \mathbf{Y}_G \left(\frac{Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G} \right) \right) \quad (4.16)$$

$$I_g = \left(\frac{Y_{pfc} + Y_G}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\mu=1}^v Y_{OC\mu}} \right) * \sum_{\mu=1}^v \mathbf{G}_{c,\mu} \mathbf{I}_{ref\mu} - \left(\frac{\sum_{\mu=1}^v Y_{OC\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\mu=1}^v Y_{OC\mu}} \right) * \mathbf{V}_G \mathbf{Y}_G \quad (4.17)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Μοντελοποίηση Δικτύου Διανομής με 2 Αντιστροφείς ΔΠ για την Μελέτη Ευστάθειας Γρήγορων Αλληλεπιδράσεων Οδηγούμενη Από Μετατροπείς

5.1 Κριτήριο Nyquist

Το κριτήριο Nyquist καθορίζει την ευστάθεια ενός συστήματος κλειστού βρόχου εξετάζοντας το αντίστοιχο σύστημα ανοιχτού βρόχου ως προς την θέση των πόλων του και ως προς την συμπεριφορά του στο φάσμα της συχνότητας (διάγραμμα Nyquist) [17].



Εικόνα 25: Σύστημα κλειστού βρόχου με ανάδραση [17]

Για το σύστημα της εικόνας 25, με είσοδο $R(s)$ και έξοδο την $C(s)$, η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου μπορεί να γραφτεί ως εξής :

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (5.1)$$

Το σύστημα ορίζεται ευσταθές όταν όλες οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης $1+G(s)H(s)$ βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Το κριτήριο συσχετίζει την συμπεριφορά της συνάρτησης ανοιχτού βρόχου $G(j\omega)H(j\omega)$ στην συχνότητα και τους πόλους της, με τον αριθμό των μηδενικών της χαρακτηριστικής εξίσωσης. Διατυπώθηκε από τον Harry Nyquist και διευκολύνει σημαντικά την ανάλυση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, καθώς η εκτίμηση της ευστάθειας του συστήματος μπορεί να γίνει γραφικά χρησιμοποιώντας την συνάρτηση ανοιχτού βρόχου, χωρίς να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι πόλοι της συνάρτησης του κλειστού βρόχου.

Το κριτήριο δύναται ισοδύναμα να εκφραστεί ως εξής:

$$Z = N + P \quad (5.2)$$

Όπου:

Z: αριθμός των μηδενικών της χαρακτηριστικής εξίσωσης $1+G(s)H(s)$ στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο

N: αριθμός των δεξιόστροφων περιστροφών του διαγράμματος Nyquist της $G(s)H(s)$ γύρω από το σημείο $-1+j0$

P: αριθμός των πόλων της συνάρτησης $G(s)H(s)$ στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο

Στην περίπτωση όπου το P είναι διάφορο του μηδενός, το Z ισούται με 0 και το σύστημα είναι ευσταθές, μόνο εάν $N=-P$, δηλαδή όταν υπάρχουν ακριβώς P αριστερόστροφες περιστροφές γύρω από το σημείο $-1+j0$.

Εάν η $G(s)H(s)$ δεν διαθέτει πόλους στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο τότε $Z=N$ και επομένως για να αποφανθεί κανείς για την ευστάθεια του συνολικού συστήματος αρκεί να εξετάσει τις περικυκλώσεις του διαγράμματος Nyquist της συνάρτησης $G(j\omega)H(j\omega)$ γύρω από το σημείο $-1+j0$.

5.2 Κριτήριο Bode

Ένα διάγραμμα Bode αναπαρίσταται από δυο γραφήματα. Το πρώτο παρουσιάζει την απόκριση του πλάτους της εξεταζόμενης συνάρτησης μεταφοράς σε σχέση με την συχνότητα και το δεύτερο την απόκριση της φάσης σε σχέση με την συχνότητα, συνήθως σε λογαριθμική κλίμακα.

Προκειμένου να εξεταστεί η ευστάθεια ενός κλειστού συστήματος μελετάται όπως και στην προηγούμενη περίπτωση η χαρακτηριστική εξίσωση $1+G(s)H(s)$ ως προς τα σημεία όπου μηδενίζεται. Για να είναι το σύστημα ευσταθές πρέπει όταν το πλάτος της συνάρτησης λαμβάνει την τιμή 0 ($\ln(0)=1$) η φάση να λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη των -180 μοιρών [17].

5.3 Κριτήρια Μελέτης Αναλογικού Τύπου

5.3.1 Minor Loop Gain

Χρησιμοποιώντας τους υπολογισμούς του κεφαλαίου 3 προκύπτει ότι για ένα δίκτυο διανομής με δυο αντιστροφείς ΔΠ συνδεδεμένους παράλληλα στο σημείο κοινής σύνδεσης το ρεύμα εξόδου της πρώτης μονάδας ορίζεται ως [11] :

$$I_{g1} = \left(\frac{1}{1 + \frac{Y_{oc1}}{Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) * G_{c,1} I_{ref1} - \left(\frac{\frac{Y_{oc1}}{Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{oc1}}{Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) * G_{c,2} I_{ref2} - \left(\frac{\frac{Y_{oc1}}{Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G}}{1 + \frac{Y_{oc1}}{Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G}} \right) * V_G Y_G \quad (4.8)$$

Το κριτήριο Minor Loop Gain, στηρίζεται στην παρατήρηση ότι ο πρώτος συντελεστής του $G_{c,1}I_{ref1}$ μοιάζει με συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου ενός συστήματος μοναδιαίου ανοιχτού βρόχου ο οποίος κλείνει, προσθέτοντας έναν κλάδο με συνάρτηση μεταφοράς MLG_1 ως αρνητική ανάδραση. Με παρόμοιο τρόπο οι όροι των $G_{c,2}I_{ref2}$ και $V_g Y_g$ παρομοιάζονται με συναρτήσεις μεταφοράς κλειστού βρόχου ενός συστήματος ανοιχτού βρόχου MLG_1 , ο οποίος κλείνει με αρνητική μοναδιαία ανάδραση [20]. Η χαρακτηριστική εξίσωση και των τριών όρων ισούται με $1 + \frac{Y_{oc1}}{Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G}$ και επομένως η ευστάθεια του συνολικού συστήματος της πρώτης μονάδας ΔΠ, δύναται να εξεταστεί με την εφαρμογή του κριτηρίου Nyquist ή Bode στην συνάρτηση $\frac{Y_{oc1}}{Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G}$ [16] [13].

Θέτοντας ως MLG_1 την αναλογία της σύνθετης αγωγιμότητας της πρώτης μονάδας προς το άθροισμα των σύνθετων αγωγιμοτήτων του δικτύου, των παρασιτικών χωρητικοτήτων και της δεύτερης μονάδας $\left(\frac{Y_{oc1}}{Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G} = MLG_1\right)$ (5.3) προκύπτει :

$$I_{g1} = \left(\frac{1}{1 + MLG_1}\right) * G_{c,1}I_{ref1} - \left(\frac{MLG_1}{1 + MLG_1}\right) * G_{c,2}I_{ref2} - \left(\frac{MLG_1}{1 + MLG_1}\right) * V_G Y_G \quad (5.4)$$

Στην εξίσωση (5.4) η έξοδος I_{g1} είναι αποτέλεσμα τριών ανεξάρτητων εισόδων και επομένως είναι εμφανές ότι υπάρχουν τρεις συναρτήσεις μεταφοράς κλειστού βρόχου που επηρεάζουν την απόκριση του ρεύματος εξόδου του πρώτου αντιστροφέα ΔΠ [9].

Ακολουθώντας την ίδια ανάλυση και την εξίσωση (4.10), προκύπτει ότι η ευστάθεια του συστήματος του δεύτερου αντιστροφέα ΔΠ, δύναται να εξεταστεί με την εφαρμογή του κριτηρίου Nyquist ή Bode στο $MLG_2 = \frac{Y_{oc2}}{Y_{oc1} + Y_{pfc} + Y_G}$ (5.5), και χρησιμοποιώντας την γενικευμένη σχέση (4.14) για ένα σύστημα n παραλληλισμένων μονάδων το κριτήριο MLG δύναται να διατυπωθεί ως εξής [11]:

Για ένα δίκτυο διανομής με σύνθετη αγωγιμότητα Y_G , PFC συσκευές αντιστάθμισης Y_{pfc} και n παραλληλισμένους αντιστροφείς ΔΠ αγωγιμότητας Y_{ocv} , η ευστάθεια του ρεύματος εξόδου του μ-οστού αντιστροφέα ΔΠ μπορεί να εξεταστεί με την εφαρμογή ενός εκ των κριτηρίων Nyquist ή Bode στην συνάρτηση $MLG_\mu = \frac{Y_{oc\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{k=1, k \neq \mu}^n Y_{oc_k}}$ (5.6)

Για την εφαρμογή του κριτηρίου στο δίκτυο διανομής της εικόνας 20, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση στο MATLAB η οποία παρατίθεται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Αντικαθιστώντας $Z_c = \frac{1}{s * C_f}$, $Z_{L1} = R_{L1} + s * L_{L1}$, $Z_{L2} = R_{L2} + s * L_{L2}$ στις σχέσεις (3.14) και (3.15) προκύπτει:

$$Y_{20} = \frac{(L_1 * C) s^2 + (C * R_1)s + 1}{(L_1 * L_2 * C)s^3 + ((C * L_1 * R_2) + (C * L_2 * R_1))s^2 + ((C * R_1 * R_2) + L_1 + L_2)s + R_1 + R_2}$$

$$Y_{2p} = \frac{1}{(L_1 * L_2 * C)s^3 + ((C * L_1 * R_2) + (C * L_2 * R_1))s^2 + ((C * R_1 * R_2) + L_1 + L_2)s + R_1 + R_2}$$

Με την αντικατάσταση αυτών των σχέσεων στην εξίσωση (3.23) και χρησιμοποιώντας τις (3.6) και (3.7) υπολογίζεται η σύνθετη αγωγιμότητα εξόδου των αντιστροφών σε μορφή συνάρτησης μεταφοράς προκειμένου να αντικατασταθεί στις σχέσεις (5.3) και (5.5).

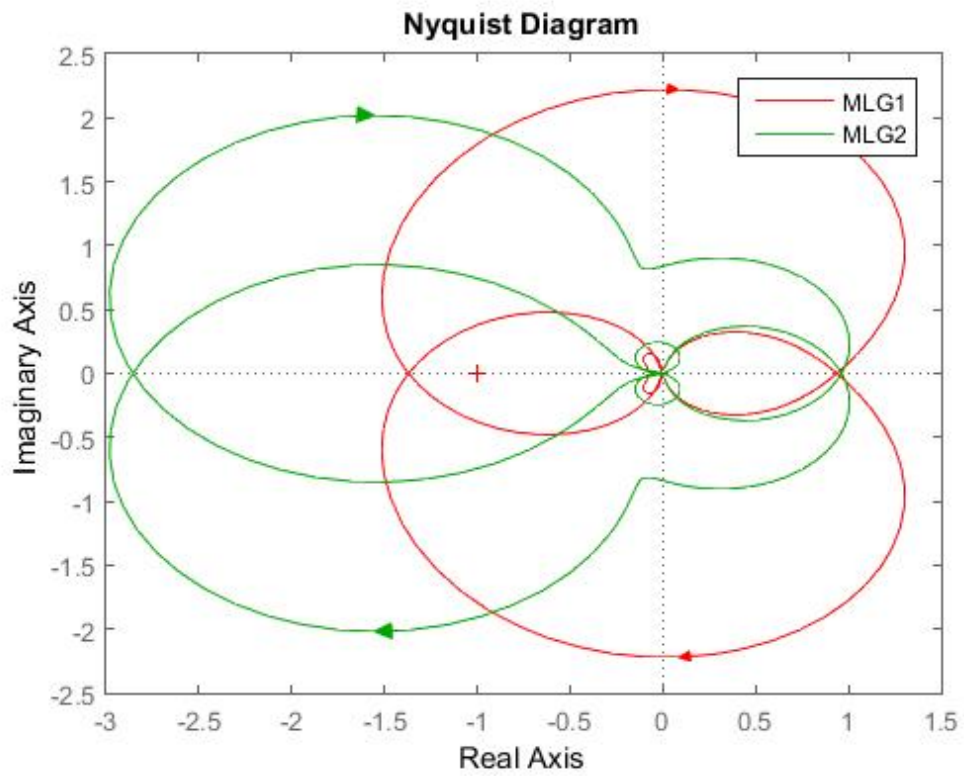
Οι τυπικές παράμετροι του συστήματος και των αντιστροφών παρουσιάζονται στους πίνακες 1 και 2 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της μοντελοποίησης του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α με τις τυπικές παραμέτρους των πινάκων 1 και 2 παρουσιάζονται στις εικόνες 26, 27 και 28.

Πίνακας 1: Τυπικές παράμετροι συστήματος

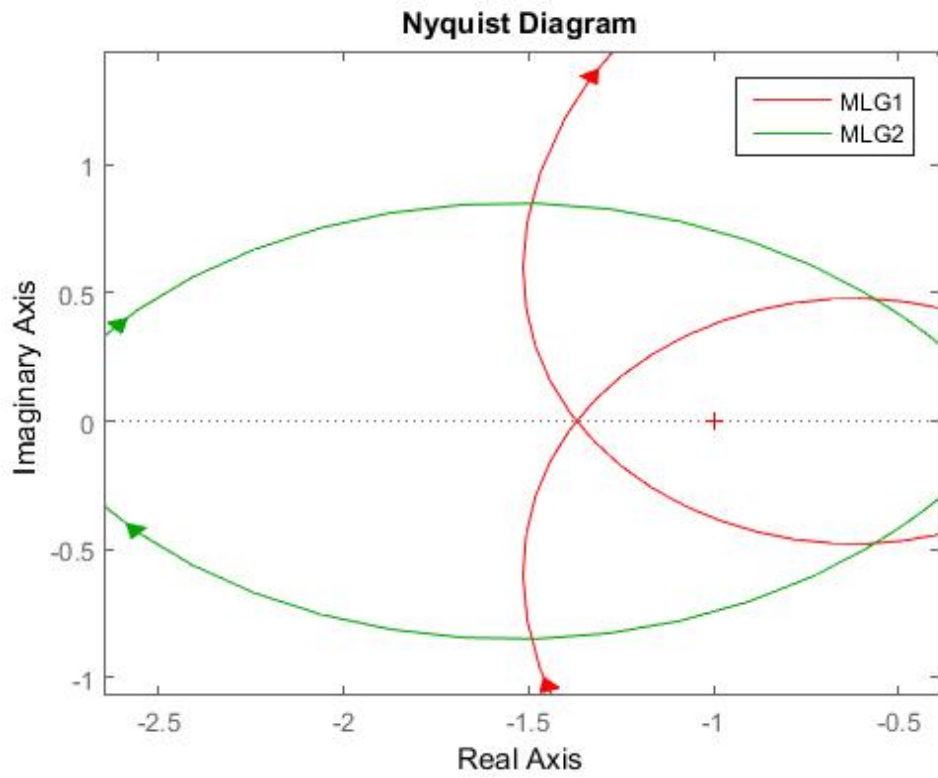
Συχνότητα δειγματοληψίας	f_{sw}	10kHz
Δίκτυο	L_s	1.2mH
	R_s	0.4 Ω
PFC συσκευές	C_{pfc}	20μF

Πίνακας 2: Τυπικές παράμετροι αντιστροφών

Αντιστροφές 1		
Φίλτρο LCL	L_{L11}	1.5mH
	R_{L11}	0.1 Ω
	C_{f1}	4.7 μF
	L_{L21}	1.8 mH
	R_{L21}	0.2Ω
PR ελεγκτής	K_{p1}	18
	K_{i1}	3000
	f_s	10kHz
Αντιστροφές 2		
Φίλτρο LCL	L_{L21}	1.8 mH
	R_{L21}	0.1 Ω
	C_{f2}	3 μF
	L_{L22}	1.3 mH
	R_{L22}	0.2 Ω
PR ελεγκτής	K_{p2}	16
	K_{i2}	3000
	f_s	10kHz



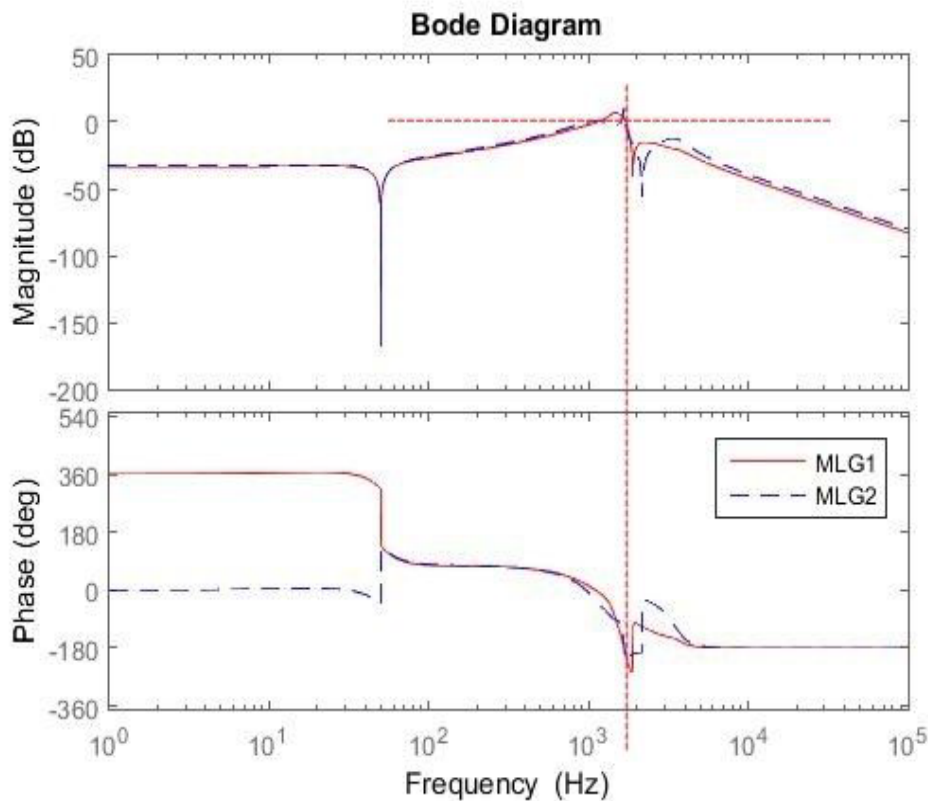
Εικόνα 26: Διάγραμμα Nyquist MLG_1 , MLG_2 (2 αντιστροφείς ΔΠ)



Εικόνα 27: Διάγραμμα Nyquist MLG_1 , MLG_2 (2 αντιστροφείς ΔΠ) μεγέθυνση

Οι συναρτήσεις MLG_1 και MLG_2 δεν διαθέτουν πόλους στο δεξί μιγαδικό ημιπίπεδο επομένως η ευστάθεια του κλειστού βρόχου του συστήματος μπορεί να εξεταστεί από τον αριθμό των δεξιόστροφων περιστροφών του διαγράμματος Nyquist τους γύρω από το σημείο $-1+j0$. Τα διαγράμματα Nyquist και Bode του MLG_1 και του MLG_2 παρουσιάζονται στις εικόνες 26 και 28 αντίστοιχα, ενώ στην εικόνα 27 φαίνεται μια πιο κοντινή λήψη στο σημείο $-1+j0$ στην οποία αποτυπώνεται η δεξιόστροφη περικύκλωση του σημείου και από τους δυο γεωμετρικούς τόπους, και επομένως η αστάθεια του υπό εξέταση συστήματος. Το ίδιο συμπέρασμα εξαγάγεται και από το διάγραμμα Bode της εικόνας 28, καθώς και για τις δυο συναρτήσεις στα σημεία που μηδενίζεται το πλάτος η φάση του συστήματος είναι μικρότερη των 180 μοιρών [11].

Είναι εμφανές ότι για ένα σύστημα με μεγάλο πλήθος μονάδων η συγκεκριμένη ανάλυση θα πρέπει να πραγματοποιηθεί πολλές φορές για την εκτίμηση της ευστάθειας του συνολικού συστήματος αυξάνοντας κατά πολύ τους απαιτούμενους υπολογισμούς. [19].



Εικόνα 28: Διάγραμμα Bode MLG_1 , MLG_2 (2 αντιστροφείς $\Delta\Gamma$)

5.3.2. Global Minor Loop Gain

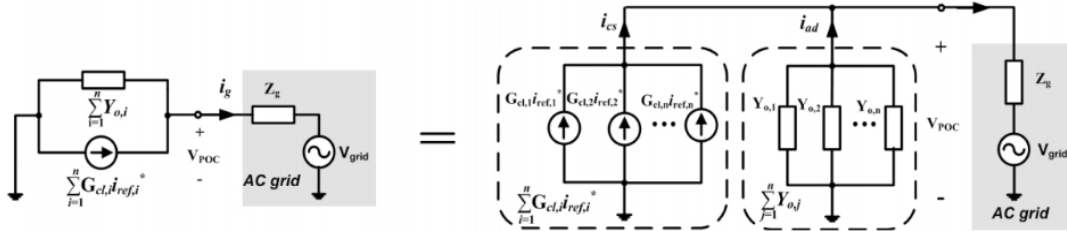
Προκειμένου να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος και να απλοποιηθεί σημαντικά η διαδικασία των υπολογισμών, προτάθηκε το κριτήριο GMLG [21] το οποίο στηρίζεται στον υπολογισμό του συνολικού ρεύματος εξόδου των επιμέρους αντιστροφέων όπως φαίνεται στην εξίσωση (4.13) από την οποία αντικαθιστώντας $\frac{Y_{oc1}+Y_{oc2}}{Y_{pfc}+Y_G} = GMLG$ προκύπτει [11]:

$$I_g = \frac{1}{1 + GMLG} \left(G_{c,1} I_{ref1} + G_{c,2} I_{ref2} - \left(\frac{Y_{oc1}}{Y_{pfc} + Y_G} - \frac{Y_{oc2}}{Y_{pfc} + Y_G} \right) * V_G Y_G \right) \quad (5.7)$$

Χρησιμοποιώντας την σχέση (4.16) το κριτήριο GMLG διατυπώνεται ως εξής [11]:

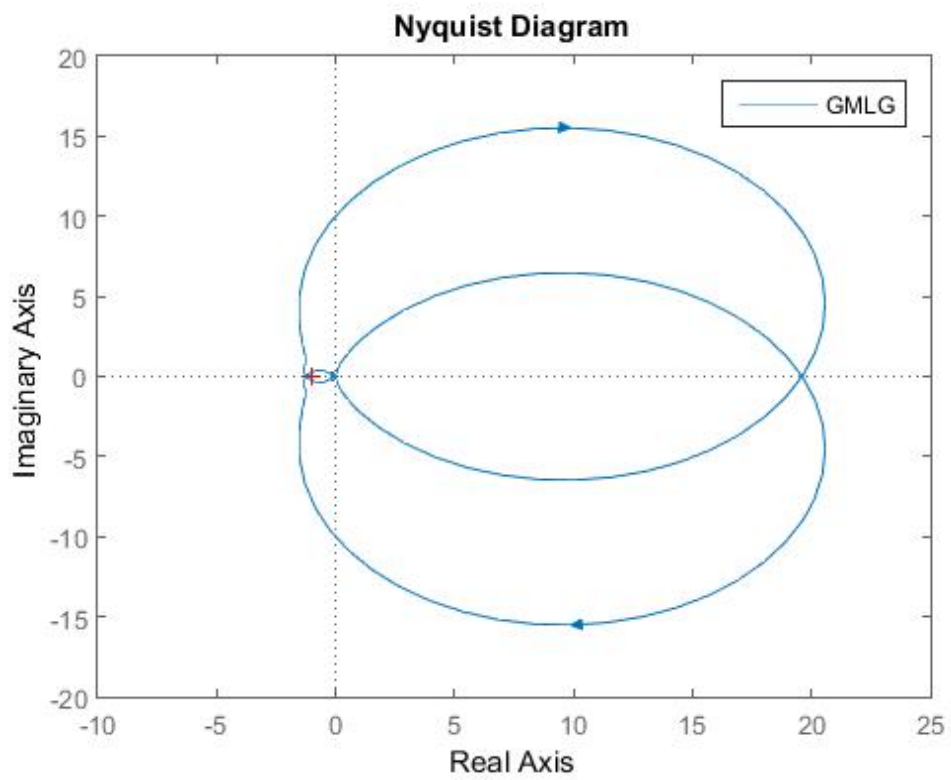
Για ένα δίκτυο διανομής με σύνθετη αγωγιμότητα Y_G , εγκάρσιες αγωγιμότητες Y_{pfc} και n παραλληλισμένους αντιστροφείς ΔΠ αγωγιμότητας $Y_{oc\mu}$, η ευστάθεια του συνολικού ρεύματος εξόδου των αντιστροφέων μπορεί να εξεταστεί με την εφαρμογή ενός εκ των κριτηρίων Nyquist ή Bode στην συνάρτηση $GMLG = \frac{\sum_{\mu=1}^n Y_{oc\mu}}{Y_{pfc} + Y_G}$ [16].

Το αναλογικό κριτήριο GMLG μπορεί να αναχθεί σε MLG αν θεωρηθεί ότι στο σημείο κοινής σύνδεσης συνδέεται ένας αντιστροφέας ο οποίος έχει σύνθετη αγωγιμότητα και πηγή ρεύματος ίση με το άθροισμα των επιμέρους σύνθετων αγωγιμοτήτων εξόδου και πηγών ρεύματος αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην εικόνα 29 [21].

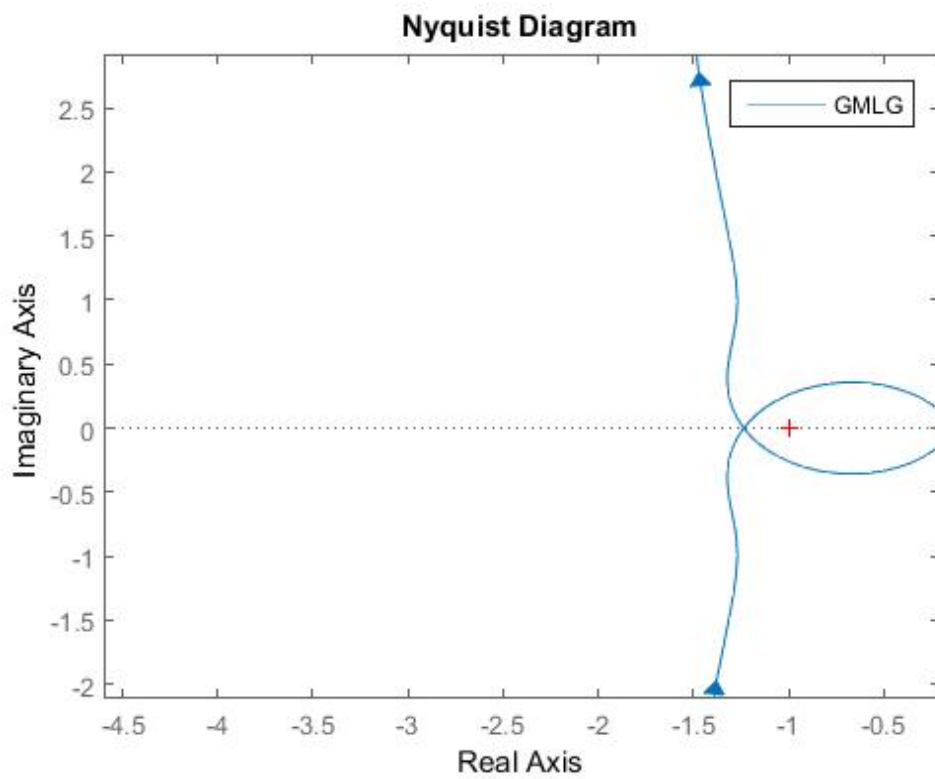


Εικόνα 29: Αναγωγή GMLG σε MLG [21]

Για την εφαρμογή του κριτηρίου χρησιμοποιήθηκε η μοντελοποίηση του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α με τις τυπικές παραμέτρους των πινάκων 1 και 2, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στις εικόνες 30, 31 και 32. Το $GMLG = \frac{Y_{oc1} + Y_{oc2}}{Y_{pfc} + Y_G}$ δεν διαθέτει πόλους στο δεξί ημιεπίπεδο και επομένως η μελέτη του κλειστού συστήματος ανάγεται στην εύρεση των δεξιόστροφων περιστροφών του, γύρω από το σημείο $(-1,0)$. Στις εικόνες 30 και 31 φαίνεται το διάγραμμα Nyquist της συνάρτησης $GMLG = \frac{Y_{oc1} + Y_{oc2}}{Y_{pfc} + Y_G}$ καθώς και μια μεγέθυνση στο σημείο $(-1,0)$ στην οποία αποτυπώνεται πως υπάρχει δεξιόστροφη περικύκλωση του κρίσιμου σημείου, και επομένως το συνολικό κλειστό σύστημα δεν είναι ευσταθές.

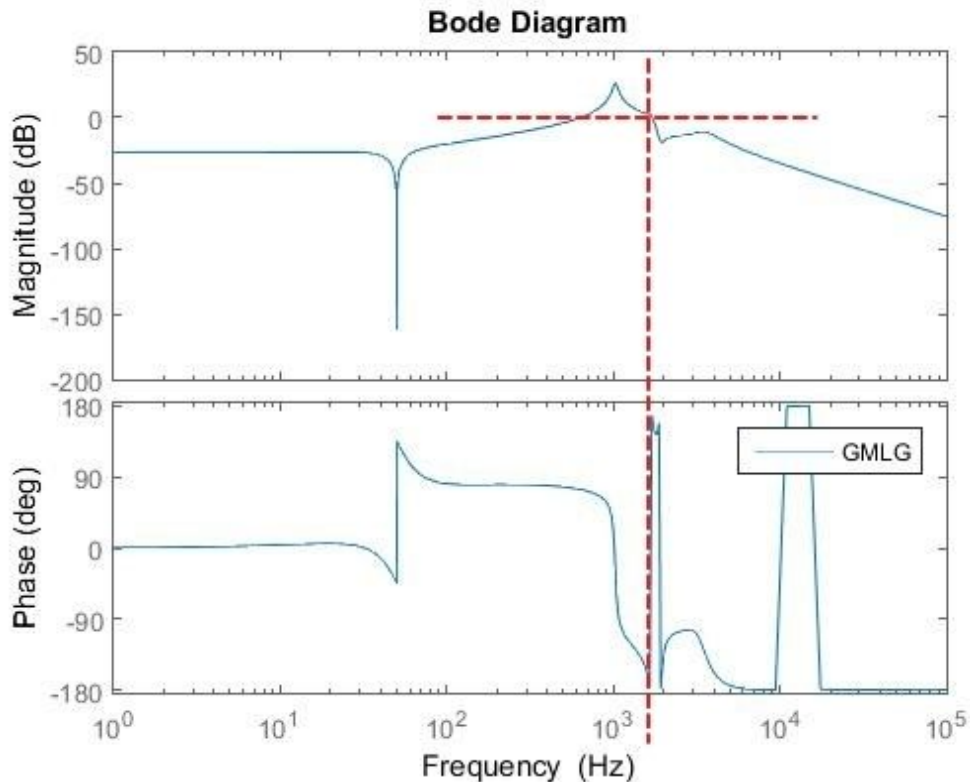


Εικόνα 30: Διάγραμμα Nyquist GMLG (2 αντιστροφείς ΔΠ)



Εικόνα 31: Διάγραμμα Nyquist GMLG (2 αντιστροφείς ΔΠ) μεγέθυνση

Προχωρώντας στο διάγραμμα Bode της συνάρτησης GMLG (εικόνα 32) αποτυπώνεται ότι υπάρχει σημείο στο οποίο όταν το πλάτος μηδενίζεται η φάση λαμβάνει τιμή -180 μοιρών. Παρατηρείται λοιπόν ότι το αποτέλεσμά του βρίσκεται σε συμφωνία με το αποτέλεσμα της εφαρμογής του κριτηρίου Nyquist ως προς την αστάθεια του συνολικού κλειστού συστήματος.



Εικόνα 32: Διάγραμμα Bode GMLG (2 αντιστροφείς ΔΠ)

Έχοντας ολοκληρώσει την παρουσίαση των κριτηρίων MLG και GMLG παρατηρείται ότι αφορούν στην εξέταση συναρτήσεων των οποίων οι μαθηματικές εκφράσεις διατυπώνονται σε μορφή αναλογίας, ο οποίος είναι και ο λόγος για τον οποίο θεωρείται ότι ανήκουν στην ίδια οικογένεια κριτηρίων αναλογικού τύπου.

5.4 Κριτήριο Μελέτης Αθροιστικού Τύπου

5.4.1 Συνολική Αγωγιμότητα (Global Admittance)

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.17) και αντικαθιστώντας την συνολική σύνθετη αγωγιμότητα του δικτύου $Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\mu=1}^v Y_{oc\mu}$ με Y_{tot} προκύπτει ο ακόλουθος τύπος για το συνολικό ρεύμα εξόδου του δικτύου της εικόνας 20 [19] :

$$I_g = \left(\frac{Y_{pfc} + Y_G}{Y_{tot}} \right) * \sum_{\mu=1}^v G_{c,\mu} I_{ref\mu} - \left(\frac{\sum_{\mu=1}^v Y_{oc\mu}}{Y_{tot}} \right) * V_G Y_G \quad (5.8)$$

Οι συναρτήσεις Y_{pfc} , Y_G αποτελούν συναρτήσεις μεταφοράς παθητικών στοιχείων, επομένως δεν διαθέτουν πόλους στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο, όπως και οι σύνθετες αγωγιμότητες εξόδου των αντιστροφών Y_{oc} καθώς έχουν σχεδιαστεί να είναι ευσταθείς. Παρατηρείται λοιπόν ότι η επίδραση των αριθμητών των συναρτήσεων μεταφοράς της εξίσωσης (4.17) στην ευστάθεια του κλειστού συστήματος μπορούν να παραλειφθούν. Οι πηγές εισόδου της εξίσωσης θεωρούνται επίσης ευσταθείς.

Το κριτήριο συνολικής αγωγιμότητας διατυπώνεται ως εξής [19] :

Για ένα δίκτυο διανομής με σύνθετη αγωγιμότητα Y_G , εγκάρσιες αγωγιμότητες Y_{pfc} και n παραλληλισμένους αντιστροφείς ΔΠ αγωγιμότητας Y_{ocn} , η ευστάθεια του συνολικού ρεύματος εξόδου των αντιστροφών μπορεί να μελετηθεί με διερεύνηση των μηδενικών της χαρακτηριστικής εξίσωσης, $Y_{tot} = Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\mu=1}^n Y_{oc\mu}$

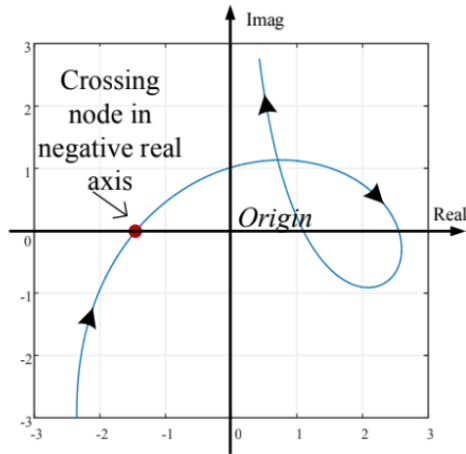
5.4.2 Τροποποιημένο Κριτήριο Nyquist

Το κριτήριο της συνολικής αγωγιμότητας (Global Admittance) δύναται να εκτιμήσει την συνολική ευστάθεια του συστήματος μέσα από τον προσδιορισμό των μηδενικών της συνάρτησης Y_{tot} . Το σύστημα θα είναι ευσταθές αν και μόνο αν όλα τα μηδενικά του βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Για τον λόγο αυτό προτάθηκε ένα τροποποιημένο κριτήριο Nyquist στο οποίο ο αριθμός N της εξίσωσης (5.2) αφορά στον αριθμό των δεξιόστροφων περιστροφών του διαγράμματος Nyquist της Y_{tot} γύρω από το σημείο $0+0j$. Αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς η σύνθετη καθολική αγωγιμότητα αποτελεί άθροισμα συναρτήσεων που δεν διαθέτουν πόλους στο δεξί ημιεπίπεδο ($Y_{tot} = Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\mu=1}^n Y_{oc\mu}$) είναι και η ίδια ευσταθής. Επομένως το σύστημα είναι ευσταθές αν το διάγραμμα Nyquist δεν περικυκλώνει δεξιόστροφα το μηδέν ($N=0$) [19].

Στην εικόνα 33 φαίνεται το διάγραμμα Nyquist του Y_{tot} για ένα ασταθές σύστημα στο οποίο επιβεβαιώνεται η θεώρηση, καθώς περικυκλώνει δεξιόστροφα το σημείο $(0,0)$ και έχει ένα σημείο τομής με τον αρνητικό πραγματικό ημιάξονα. Στο διάγραμμα φαίνεται πως υπάρχουν τρία σημεία τομής του διαγράμματος με τον πραγματικό άξονα τα οποία καλούνται σημεία συντονισμού και καθορίζουν την κατάσταση συντονισμού όλου του συστήματος. Το πραγματικό τους μέρος καλείται παράγοντας απόσβεσης συντονισμού (resonance damping factor) και ορίζεται ως:

$$R_d = Y_{tot}(j\omega)|_{Im = 0} \quad (5.9)$$

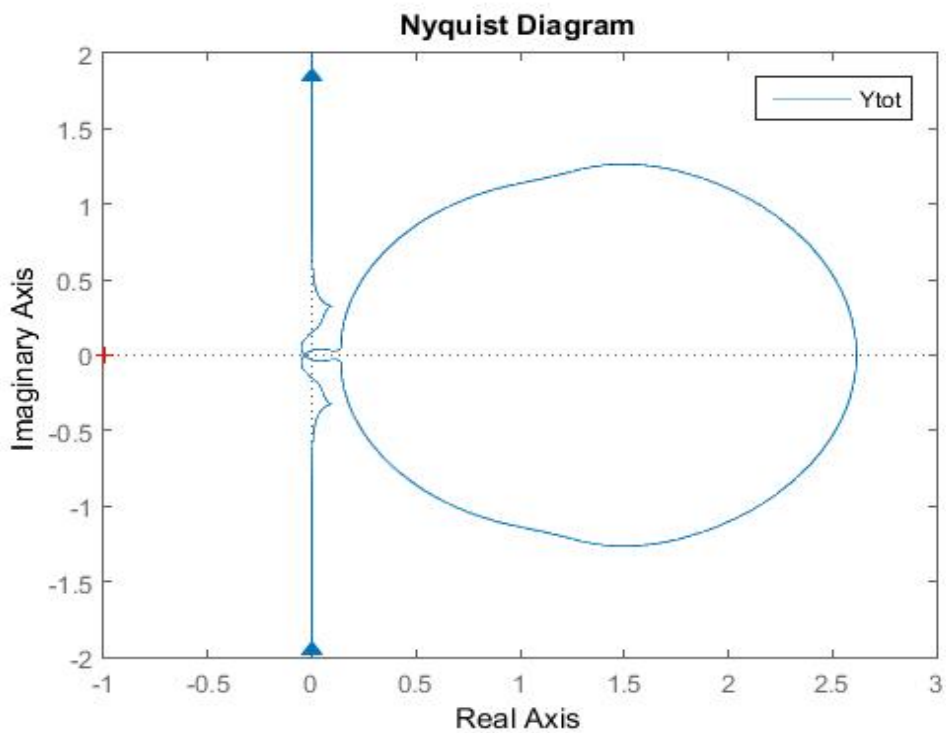
Εάν το R_d έχει αρνητική τιμή τότε το διάγραμμα περικυκλώνει το σημείο $(0,0)$ και το σύστημα είναι ασταθές, ενώ εάν έχει θετική τιμή τότε δεν υπάρχει περικύκλωση και το σύστημα είναι ευσταθές. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του R_d τόσο πιο ευσταθές είναι το υπό εξέταση σύστημα. Οι συγγραφείς του [22] πρότειναν η σχεδίαση των αντιστροφών να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το πραγματικό τους μέρος να είναι θετικό σε όλο το φάσμα συχνοτήτων, μια προσέγγιση η οποία θα βοηθούσε σημαντικά στην ευστάθεια όμως θα μείωνε σημαντικά το εύρος ζώνης του ελεγκτή. Επιπρόσθετα, το κριτήριο εξετάζει το πραγματικό μέρος των σημείων συντονισμού της καθολικής αγωγιμότητας του συνολικού συστήματος και όχι το κατά πόσο το πραγματικό μέρος των επιμέρους στοιχείων είναι θετικό.



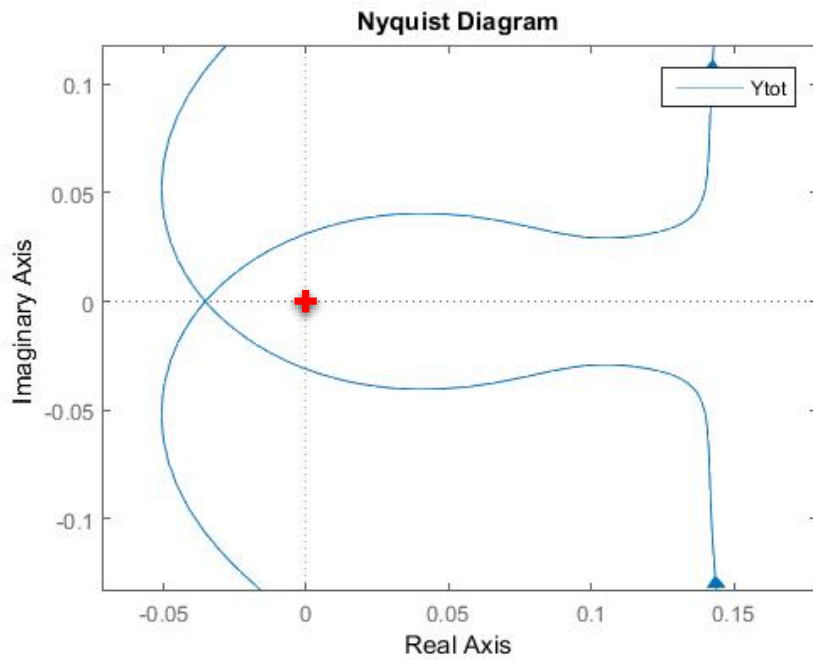
Εικόνα 33: Τροποποιημένο κριτήριο Nyquist [11]

Για την εφαρμογή του κριτηρίου και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων των εικόνων 34, 35, 37 και 39 χρησιμοποιήθηκε η μοντελοποίηση του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α με τις τυπικές παραμέτρους των πινάκων 1 και 2.

Στις εικόνες 34 και 35 φαίνεται το διάγραμμα Nyquist της συνάρτησης $Y_{tot} = Y_{oc1} + Y_{oc2} + Y_{pfc} + Y_G$ καθώς και μια πιο κοντινή λήψη στο $(0,0)$. Παρατηρείται ότι υπάρχει περικύκλωση του σημείου και επομένως ο αριθμός των μηδενικών της συνάρτησης που βρίσκονται στον θετικό ημιάξονα είναι διάφορο του μηδενός και το σύστημα είναι ασταθές.



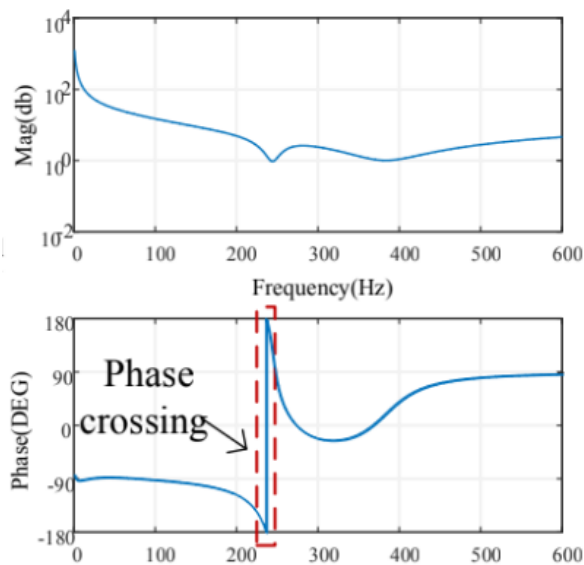
Εικόνα 34: Διάγραμμα Nyquist Y_{tot} (2 αντιστροφείς ΔΠ)



Εικόνα 35: Διάγραμμα Nyquist Y_{tot} (2 αντιστροφείς ΔΠ) μεγέθυνση

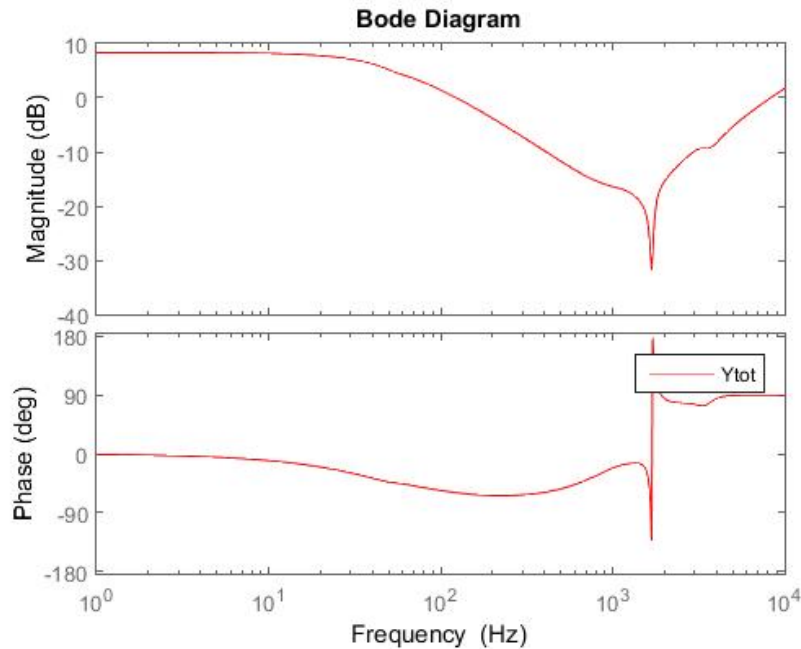
5.4.3 Τροποποιημένο Κριτήριο Bode

Στην εικόνα 36 φαίνεται πως η ύπαρξη αρνητικού R_d για δεδομένο σημείο συντονισμού μπορεί να αναγνωριστεί σε ένα διάγραμμα Bode εάν εντοπιστεί αλλαγή της φάσης στο σημείο συντονισμού από -180 μοίρες σε 180 μοίρες. Αυτή η εναλλαγή αποκαλύπτει την εμφάνιση σημείου τομής του πραγματικού άξονα με αρνητικό πραγματικό μέρος στο διάγραμμα Nyquist. Επομένως η ευστάθεια του συνολικού συστήματος δύναται να μελετηθεί μέσα από το διάγραμμα Bode της συνάρτησης Y_{tot} [19].



Εικόνα 36: Τροποποιημένο κριτήριο Bode [11]

Παρατηρείται για το εξεταζόμενο σύστημα ότι στο σημείο συντονισμού η φάση μεταβάλλεται από -180 μοίρες σε 180, εναλλαγή η οποία είναι εμφανές σημάδι ενός ασταθούς συστήματος (εικόνα 37).



Εικόνα 37: Διάγραμμα Bode Y_{tot} (2 αντιστροφείς $\Delta\Gamma$)

5.4.4 Γραφική Παράσταση Πραγματικού και Φανταστικού Μέρους

Βάση της ανάλυσης του προηγούμενου υποκεφαλαίου, σύμφωνα με το κριτήριο της καθολικής σύνθετης αγωγιμότητας, το δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κύκλωμα RLC. Προκειμένου να διερευνηθούν εκτενώς τα σημεία συντονισμού και η συνολική ευστάθεια του συστήματος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση του πραγματικού και του φανταστικού μέρους της καθολικής σύνθετης αγωγιμότητας στο φάσμα της συχνότητας [11]:

$$Y_{tot} = R_d + jX_d = \sum Y_{oci} + Y_{to} = \sum R_{oci} + R_{to} + \sum X_{oci} + X_{to} \quad (5.10)$$

Όπου:

- R_d, X_d το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της συνολικής σύνθετης αγωγιμότητας
- $R_{to} = R_G + R_{pfc}, X_{to} = X_G + X_{pfc}$ το πραγματικό και φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας του δικτύου και των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων
- R_{oci}, X_{oci} το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας εξόδου του αντιστροφέα. Τα σημεία συντονισμού του συστήματος είναι εκείνα τα σημεία στα οποία το X_d παίρνει την τιμή μηδέν. Στην περίπτωση που στο

προαναφερθέν σημείο το R_d έχει αρνητική τιμή, το σύστημα είναι ασταθές [11].

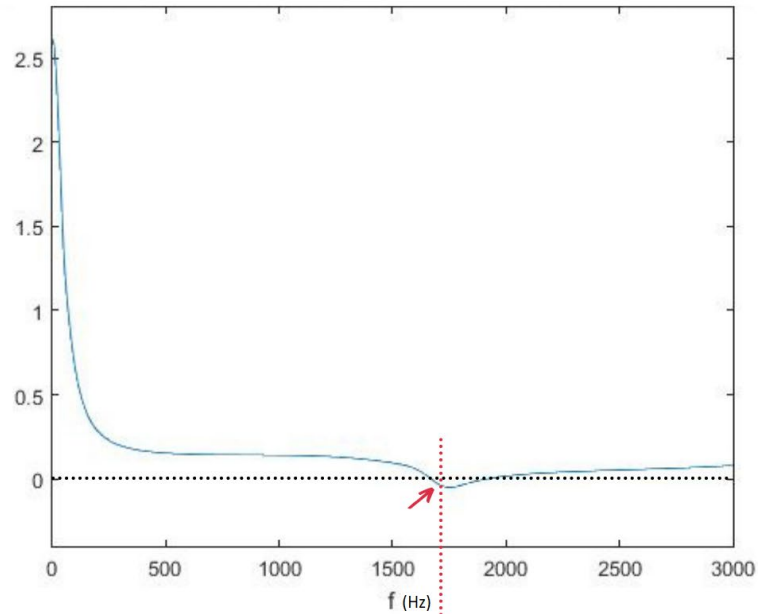
Με βάση αυτή την παρατήρηση μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα όσον αφορά την συνολική ευστάθεια του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα είναι ευσταθές όταν [11]:

1. Δεν υπάρχει σημείο συντονισμού στο σύστημα, δηλαδή το X_d είναι θετικό ή αρνητικό σε όλο το φάσμα της συχνότητας.
2. Το R_d είναι θετικό σε όλο το φάσμα της συχνότητας, δηλαδή δεν υπάρχει κανένα σημείο για το οποίο το R_d μπορεί να λάβει αρνητική τιμή.
3. Το σύστημα έχει σημεία συντονισμού και περιοχές συχνοτήτων στις οποίες το R_d παίρνει αρνητικές τιμές, όμως τα σημεία συντονισμού βρίσκονται εντός των διαστημάτων όπου το R_d είναι θετικό. Δηλαδή όταν το X_d είναι 0, το R_d έχει θετική τιμή.

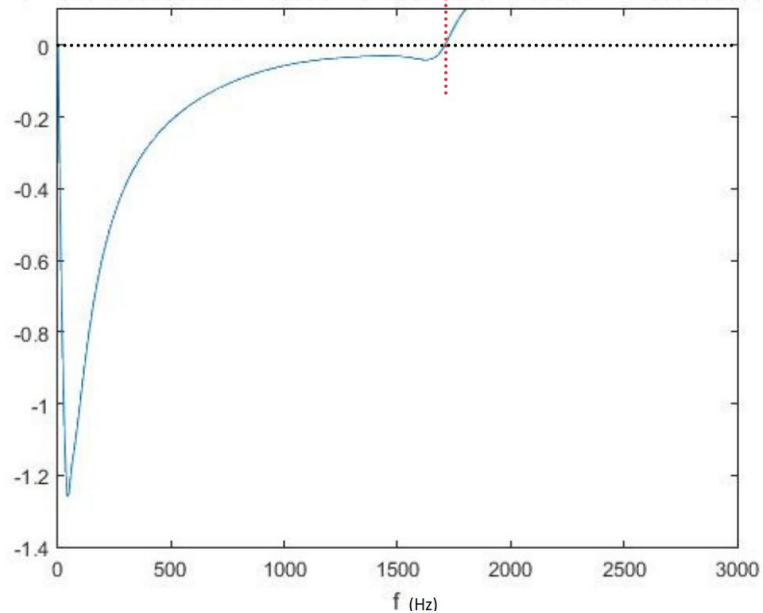
Είναι εμφανές ότι και οι δύο παράγοντες R_d, X_d επιδρούν στην ευστάθεια του συστήματος και επομένως με την ανάλυσή τους στο φάσμα της συχνότητας μπορεί να εντοπιστούν τόσο οι συχνότητες των σημείων συντονισμού, όσο και το εύρος συχνοτήτων στις οποίες αν βρεθεί κάποιο από τα κρίσιμα σημεία, το σύστημα θα μεταβεί σε αστάθεια. Όταν οι παράμετροι του συστήματος αλλάξουν τότε η συμπεριφορά του συστήματος και η αλλαγή των σημείων συντονισμού μπορούν να ευρεθούν πολύ εύκολα από τα διαγράμματα τους στο φάσμα της συχνότητας.

Για την εφαρμογή του κριτηρίου χρησιμοποιήθηκε η μοντελοποίηση των προηγούμενων κεφαλαίων με τις ίδιες παραμέτρους. Η εικόνα 38 παρουσιάζει τις γραφικές παραστάσεις του πραγματικού R_d και του φανταστικού X_d μέρους στο φάσμα της συχνότητας, στο οποίο φαίνεται πως στο σύστημα υπάρχει ένα σημείο μηδενισμού του φανταστικού μέρους σε συχνότητα περίπου 1700Hz. Για την δεδομένη συχνότητα από το πάνω διάγραμμα μπορεί να παρατηρηθεί ότι το πραγματικό μέρος έχει αρνητική τιμή και επομένως το σύστημα είναι ασταθές.

Πραγματικό
μέρος



Φανταστικό
μέρος



Εικόνα 38: Ανάλυση Πραγματικού και Φανταστικού μέρους Y_{tot}

Συμπερασματικά, για το εξεταζόμενο σύστημα της εικόνας 20 όλα τα κριτήρια συγκλίνουν στο ότι είναι ασταθές. Σε σχέση με τα αναλογικά τύπου κριτήρια, το αθροιστικό κριτήριο της συνολικής σύνθετης αγωγιμότητας που αναπτύχθηκε σε αυτό το κεφάλαιο, είναι μια επιπλέον αποτελεσματική προσέγγιση η οποία εφαρμόζεται πιο εύκολα σε κάποιες περιπτώσεις. Έχει επιβεβαιωθεί [19] [11] [21] [13] ότι και οι δυο οικογένειες κριτηρίων δύνανται να περιγράψουν αποτελεσματικά ένα σύνολο πειραματικών διατάξεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Διερεύνηση Επίδρασης Παραμέτρων σε Δίκτυα Διανομής

6.1 Μελέτη Επίδρασης Παραμέτρων

Το σύστημα μελέτης της ευστάθειας με χρήση MATLAB του κεφαλαίου 5 δέχεται ως μεταβλητές ένα πλήθος παραμέτρων όπως φαίνεται στους πίνακες 1 και 2. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται επιπλέον προσομοιώσεις σε δίκτυα διανομής με πολλαπλές συνδεδεμένες μονάδες ΔΠ, στις οποίες συγκεκριμένοι παράμετροι μεταβάλλονται, προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδρασή τους στην συγκεκριμένη κατηγορία ευστάθειας με την εφαρμογή του κριτηρίου της καθολικής αγωγιμότητας [11].

Παρόλο που η εξαγωγή του φανταστικού και πραγματικού μέρους μιας συνάρτησης, αλγεβρικά είναι μια αρκετά εύκολη διαδικασία, σε επίπεδο προγραμματισμού με συναρτήσεις μεταφοράς μεγάλης τάξεως, απαιτεί ειδική σχεδίαση. Οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν παράχθηκαν με την κατάστροψη μιας επιπλέον συνάρτησης, καθώς η βιβλιοθήκη του MATLAB δεν δύναται να αποσπάσει το θετικό και το πραγματικό μέρος ενός αντικειμένου μορφής transfer function όπως το Y_{tot} με τις συναρτήσεις `real` και `imag`. Μια αρχική προσέγγιση ήταν ο υπολογισμός του πραγματικού και του φανταστικού μέρους του αριθμητή και του παρονομαστή της συνάρτησης μεταφοράς. Στην συνέχεια, με τον σχηματισμό των αντίστοιχων μιγαδικών και ακολουθώντας την αλγεβρική εξίσωση, ο μιγαδικός του αριθμητή πολλαπλασιαζόταν με τον συζυγή μιγαδικό του παρονομαστή και διαιρούταν με το μέτρο του παρονομαστή προκειμένου να παραχθεί η συνάρτηση της οποίας το MATLAB θα μπορούσε να εξαγάγει το πραγματικό και φανταστικό μέρος με τις προαναφερθείσες εντολές. Ωστόσο μια τέτοια προσέγγιση αν εφαρμοζόταν για πολλές καταστάσεις θα αύξανε σημαντικά την πιθανότητα λάθους καθώς δεν είναι επαρκώς αυτοματοποιημένη και απαιτεί πλήθος ενεργειών από τον χρήστη.

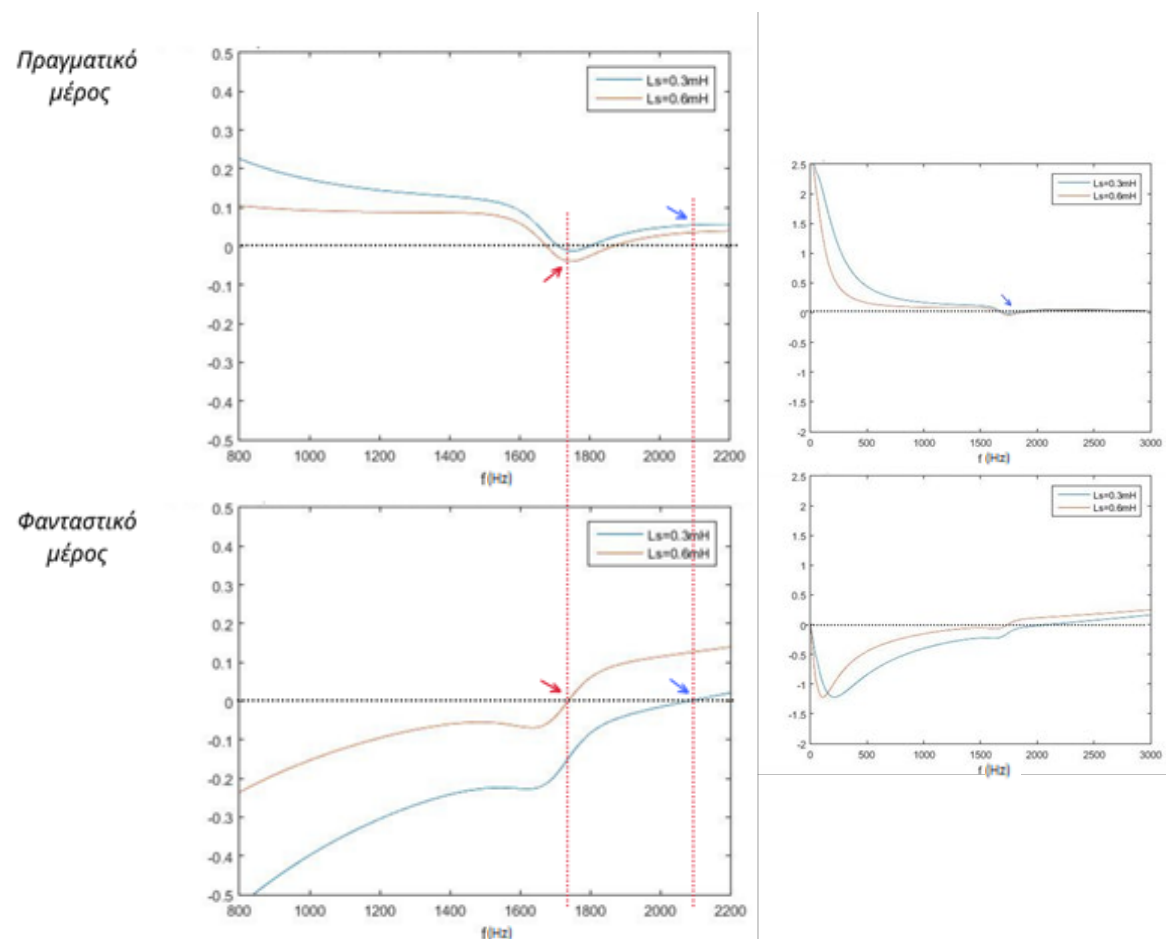
Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε μια καινούρια στρατηγική στην οποία σε κάθε αλλαγή της κατάστασης στο συνολικό κύκλωμα, μετά τον υπολογισμό της συνολικής σύνθετης αγωγιμότητας του δικτύου Y_{tot} , ο αριθμητής και ο παρονομαστής της συνάρτησης μεταφοράς αντιγράφονταν σε μορφή διανυσμάτων και μεταφέρονταν στον τροποποιημένο αλγόριθμο του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β, όπου χρησιμοποιήθηκαν για να σχηματίσουν ξανά την εξεταζόμενη συνάρτηση μεταφοράς αλλά αυτή την φορά ως symbolic μεταβλητή προκειμένου να ακολουθήσει αντικατάσταση του s με $j\omega$ και τελικά να χωριστεί το πραγματικό από το φανταστικό του μέρος.

6.1.1 Αυτεπαγωγή Δικτύου Διανομής

Η αυτεπαγωγή του δικτύου στο οποίο συνδέεται το σύστημα των αντιστροφών ΔΠ δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, καθώς αλλάζει όταν οι συνθήκες στο δίκτυο μεταβάλλονται.

6.1.1.1 Δίκτυο με 1 Αντιστροφέα ΔΠ

Οι αντιστροφείς ΔΠ οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε αυτό το κεφάλαιο, έχουν ίδιες τυπικές παραμέτρους με τον πρώτο αντιστροφέα του πίνακα 2. Οι παρασιτικές χωρητικότητες διατηρούνται στην ίδια τιμή. Στην περίπτωση (I) εξετάστηκε ένα δίκτυο διανομής στο οποίο συνδέεται ένας αντιστροφέας, για τρεις διαφορετικές τιμές της αυτεπαγωγής του δικτύου. Στο δεξί μέρος της εικόνας 39 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο φάσμα των συχνοτήτων από 0 μέχρι 3000 Hz στην οποία φαίνεται ότι το φανταστικό μέρος και των δύο διαγραμμάτων έχουν σημεία μηδενισμού.



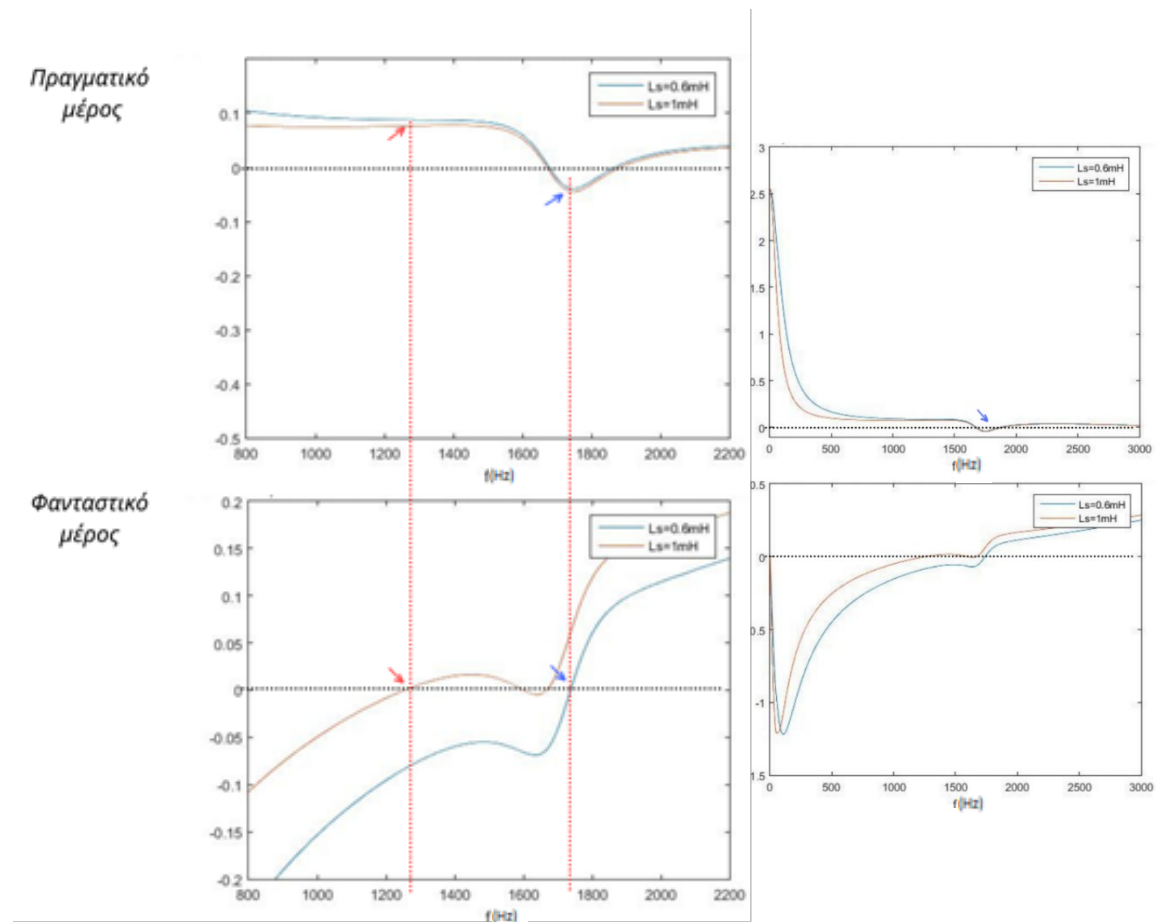
Εικόνα 39: Ανάλυση πραγματικού και φανταστικού μέρους Y_{tot} για $L_s=0.3mH$ και $L_s=0.6mH$ (1 αντιστροφέας ΔΠ)

Η εκτίμηση της ευστάθειας πραγματοποιείται με την εφαρμογή του κριτηρίου της συνολικής αγωγιμότητας. Προκειμένου να διερευνηθεί η περιοχή των συχνοτήτων στις οποίες το πραγματικό μέρος λαμβάνει αρνητικές τιμές και να εξεταστεί κατά πόσο οι συχνότητες των κρίσιμων σημείων ανήκουν σε αυτό το διάστημα έχει σχεδιαστεί το αριστερό διάγραμμα της εικόνας 39 στο φάσμα των 800-2200 Hz, στο οποίο φαίνεται ότι βρίσκονται τα υπό εξέταση σημεία.

Όταν η αυτεπαγωγή του δικτύου είναι μικρή, της τάξεως των 0.3mH (εικόνα 39), το φανταστικό μέρος της συνολικής σύνθετης αγωγιμότητας του δικτύου έχει ένα κρίσιμο σημείο περί τα 2100 Hz, το οποίο όμως δεν ανήκει στην περιοχή στην οποία γίνεται αρνητικό το πραγματικό μέρος και επομένως το σύστημα είναι ευσταθές. Με την αύξηση της αυτεπαγωγής του δικτύου στα 0.6mH το σημείο αυτό μετατοπίζεται σε χαμηλότερη συχνότητα τάξεως 1750 Hz με αποτέλεσμα να ανήκει πλέον στο διάστημα του αρνητικού πραγματικού μέρους και το σύστημα να οδηγηθεί στην αστάθεια. Το διάστημα συχνοτήτων στο οποίο αν παρουσιαστεί πόλος το σύστημα κρίνεται ασταθές, είναι περίπου για την πρώτη περίπτωση μεταξύ των 1700 και 1850 Hz ενώ για την δεύτερη μεταξύ των 1650 και 1900 Hz.

Προχωρώντας σε περαιτέρω αύξηση της αυτεπαγωγής του δικτύου στα 1mH παρατηρείται στην εικόνα 40, ότι η συχνότητα του σημείου συντονισμού μειώνεται δραστικά περίπου στα 1250 Hz. Η μείωση αυτή είναι ικανή για να μεταφέρει το κρίσιμο σημείο εκτός της αρνητικής πραγματικής ζώνης, με αποτέλεσμα το σύστημα να είναι πλέον ευσταθές.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από το δεξί μέρος της εικόνας 40 φαίνεται ότι πιθανώς να υπάρχουν σημεία μηδενισμού και πριν την συχνότητα των 1350 Hz. Είναι εμφανές ωστόσο γνωρίζοντας ότι τα σημεία αυτά δεν βρίσκονται στο κρίσιμο διάστημα μεταξύ των 1700 Hz και των 1900 Hz, ότι δεν δύνανται να επηρεάσουν την ευστάθεια του συστήματος. Σύμφωνα με το κριτήριο Nyquist τα τρία σημεία αποτελούν σημεία τομής του διαγράμματος Nyquist με τον θετικό φανταστικό ημιάξονα και επομένως αυτό που βρίσκεται πιο κοντά στην αρχή του αρνητικού πραγματικού διαστήματος είναι εκείνο που καθορίζει την ευστάθεια του συνολικού συστήματος [11]. Ένας ανάλογος ισχυρισμός είναι ότι εάν μέσα στην αρνητική ζώνη του πραγματικού μέρους βρίσκονται πολλαπλά σημεία με θετικό και αρνητικό φανταστικό μέρος, τότε θα ακυρωθούν διαδοχικά ανά ζεύγη, και εκείνο που θα παραμείνει ως τελευταίο θα καθορίσει το σημείο συντονισμού του συστήματος.

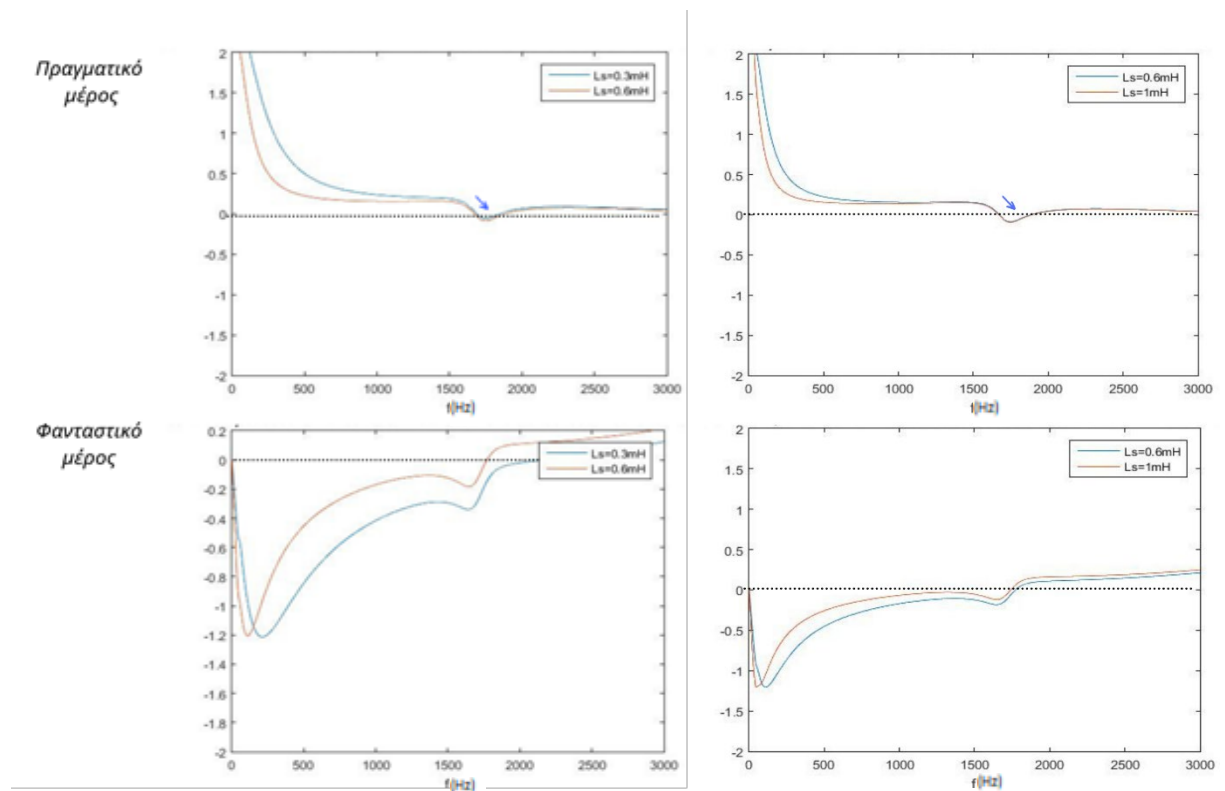


Εικόνα 40: Ανάλυση πραγματικού και φανταστικού μέρους Y_{tot} για $L_s=0.6\text{mH}$ και $L_s=1\text{mH}$ (1 αντιστροφέας ΔΠ)

6.1.1.2 Δίκτυο με 2 Αντιστροφείς ΔΠ

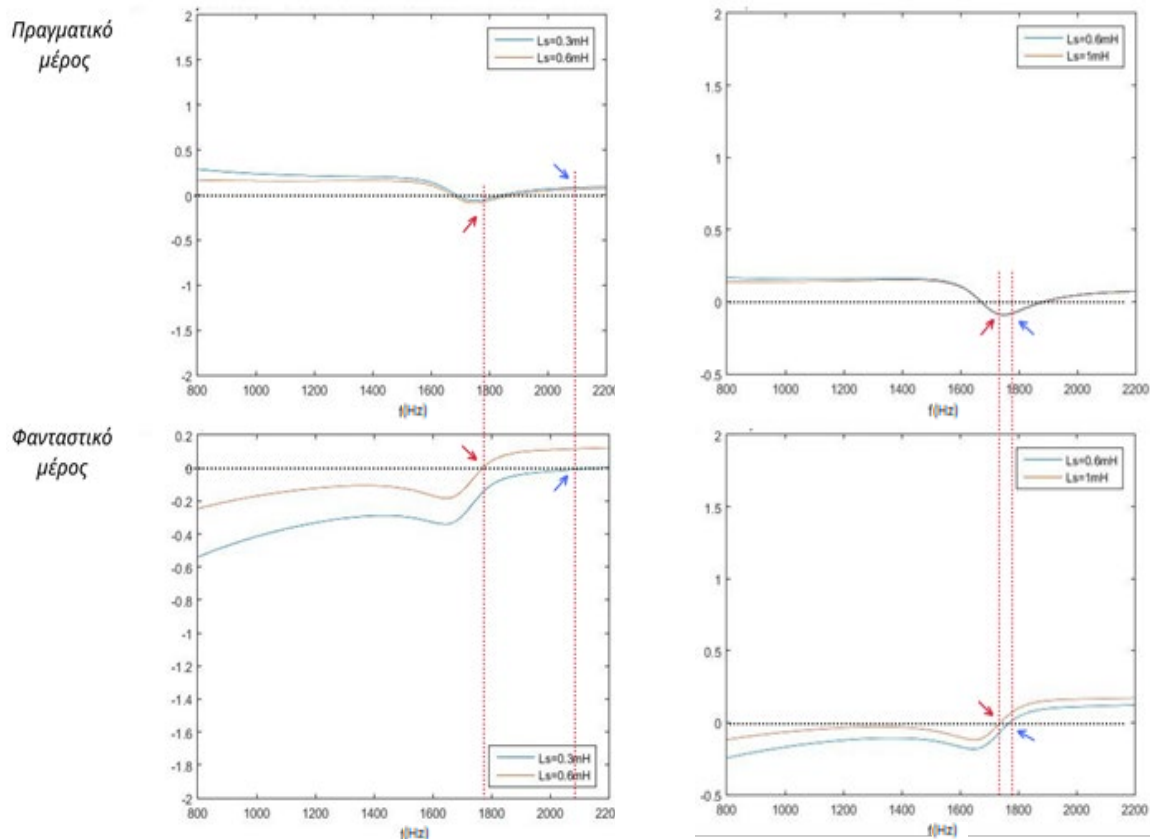
Στο δεύτερο μέρος της περίπτωσης (I), ενσωματώθηκε στην μοντελοποίηση ένας ακόμη αντιστροφέας ΔΠ με τις ίδιες τυπικές παραμέτρους και επαναλήφθηκαν οι προσομοιώσεις για τις ίδιες τιμές της αυτεπαγωγής του δικτύου της προηγούμενης ενότητας.

Στην εικόνα 41 σχεδιάστηκε το πραγματικό και το φανταστικό μέρος στο φάσμα από 0 έως 3000 Hz προκειμένου να εντοπιστούν τα κρίσιμα σημεία και το κρίσιμο διάστημα συχνοτήτων στο οποίο οι συναρτήσεις πρέπει να επανασχεδιαστούν για να βρεθούν οι τιμές τους για τις τρεις καταστάσεις. Για αυτεπαγωγή δικτύου 0.3 mH και 0.6 mH φαίνεται πως όπως και στην προηγούμενη περίπτωση υπάρχει μόνο ένα κρίσιμο σημείο το οποίο βρίσκεται μετά τα 1500 Hz και πριν τα 2200 Hz. Με ανάλογο τρόπο φαίνεται ότι τα κρίσιμα σημεία για αυτεπαγωγή δικτύου 0.6mH και 1 mH βρίσκονται επίσης εντός του διαστήματος που ξεκινά από 1500 Hz και φτάνει στα 2000 Hz



Εικόνα 41: Πραγματικό και φανταστικό μέρος Y_{tot} στο φάσμα 0-3000 Hz για $L_s=0.3\text{ mH}$, $L_s=0.6\text{ mH}$, $L_s=1\text{ mH}$ (2 αντιστροφείς ΔΠ)

Η εικόνα 42 αναπαριστά τις δυο συναρτήσεις στο φάσμα από 800 μέχρι 2200 Hz. Στην πρώτη περίπτωση των 0.3 mH το κρίσιμο σημείο βρίσκεται σε συχνότητα τάξης 2100 Hz στο οποίο το πραγματικό μέρος είναι θετικό, επομένως το συνολικό σύστημα είναι ευσταθές. Με την αύξηση της αυτεπαγωγής του δικτύου στα 0.6 mH η συχνότητα του κρίσιμου σημείου μειώνεται με αποτέλεσμα να μεταβεί στο κρίσιμο διάστημα συχνοτήτων για τις οποίες το θετικό μέρος είναι πραγματικό και να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια. Όταν η αυτεπαγωγή αυξάνεται και φτάνει στα 1mH παρότι παρατηρείται μια ελαφριά μείωση στην συχνότητα του κρίσιμου σημείου, δεν είναι επαρκής για να το μετατοπίσει στο εύρος συχνοτήτων με θετικό πραγματικό μέρος, επομένως το σύστημα παραμένει ασταθές.



Εικόνα 42: Πραγματικό και φανταστικό μέρος Y_{tot} στο φάσμα 800-2200 Hz για $L_s=0.3\text{mH}$, $L_s=0.6\text{ mH}$, $L_s=1\text{ mH}$ (2 αντιστροφείς ΔΠ)

Παρατηρείται συμπερασματικά ότι και τα δυο συστήματα είναι ευσταθή για μικρές τιμές της αυτεπαγωγής του δικτύου τάξεως 0.3mH και ασταθή όταν αυτή αυξηθεί στα 0.6 mH. Στο σύστημα μιας μονάδας ΔΠ η μετατόπιση του κρίσιμου σημείου με περαιτέρω αύξηση της αυτεπαγωγής δικτύου σε 1mH είναι επαρκής για να εξασφαλίσει την συνολική ευστάθεια του δικτύου [11] ενώ στο σύστημα δυο μονάδων ΔΠ δεν παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο και το σύστημα παραμένει σε αστάθεια.

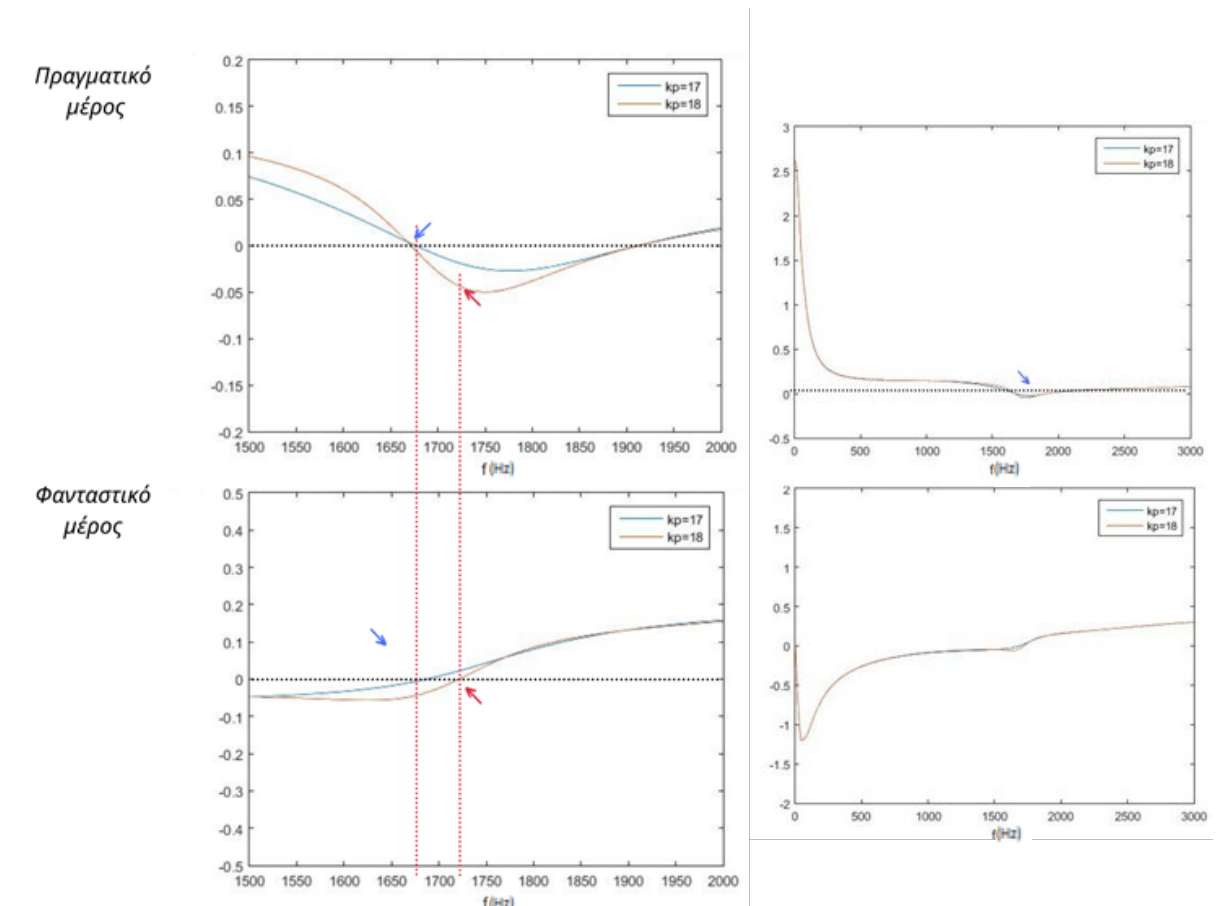
6.1.2 Αναλογικό Κέρδος Ελεγκτή

6.1.2.1 Δίκτυο με 2 Αντιστροφείς ΔΠ

Στην περίπτωση (II) εξετάστηκε ένα δίκτυο με δυο αντιστροφείς ΔΠ ίδιων τυπικών παραμέτρων με τους αντιστροφείς 1 και 2 του πίνακα 2 για δυο διαφορετικά αναλογικά κέρδη k_p του αντιστροφέα 1. Οι παρασιτικές χωρητικότητες διατηρούνται στην ίδια τιμή. Η αυτεπαγωγή του δικτύου έχει τιμή 1.2 mH.

Στην γραφική παράσταση που αναπαρίσταται με την μπλε συνεχή γραμμή το αναλογικό κέρδος k_p του ελεγκτή PR του αντιστροφέα 1 ισούται με 17 ενώ στην

κόκκινη συνεχή γραμμή μεταβάλλεται σε 18. Οι δυο γραφικές παραστάσεις στα δεξιά της εικόνας 43 αναπαριστούν τις χαρακτηριστικές του πραγματικού μέρους και του φανταστικού μέρους της συνολικής σύνθετης αγωγιμότητας για τις δυο καταστάσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως από 0 Hz μέχρι 3000 Hz. Ενώ το φανταστικό μέρος ενδέχεται να μηδενίζεται σε περισσότερα από ένα σημεία, το πραγματικό μέρος λαμβάνει αρνητικές τιμές σε ένα διάστημα μεταξύ των 1500 και 2000 Hz. Επομένως ακόμα και αν υπάρχουν κρίσιμα σημεία μετά την συχνότητα των 2000Hz δεν δύνανται να εμφανίσουν αρνητικό πραγματικό μέρος και να αλλάξουν την ευστάθεια του συστήματος.



Εικόνα 43: Πραγματικό και φανταστικό μέρος Y_{tot} για $K_r=17$ και $K_r=18$ (2 αντιστροφείς ΔΠ)

Στα αριστερά της εικόνας 43 φαίνονται τα διαγράμματα στην περιοχή 1500-2000 Hz. Το εύρος των συχνοτήτων για τις οποίες το πραγματικό μέρος της μπλε συνάρτησης λαμβάνει αρνητικές τιμές ξεκινάει περίπου στα 1680 Hz και τερματίζει περίπου στα 1900 Hz, ενώ για την κόκκινη συνάρτησης είναι ελαφρώς μεγαλύτερο και βρίσκεται περίπου στο διάστημα μεταξύ 1670 και 1900 Hz. Το κρίσιμο σημείο για $k_p=17$ βρίσκεται περίπου στα 1670 Hz όπου το πραγματικό του μέρος είναι θετικό, επομένως το συνολικό σύστημα είναι ευσταθές. Με την αλλαγή του k_p το σημείο συντονισμού αυξάνεται περίπου στα 1720 Hz με αποτέλεσμα να ανήκει πλέον στην αρνητική ζώνη και το σύστημα να είναι ασταθές.

Παρατηρείται λοιπόν, ότι και μια τόσο μικρή ποιοτικά αλλαγή μπορεί να κριθεί ικανή να μετατοπίσει το σημείο συντονισμού του συνολικού συστήματος και να το τοποθετήσει στην κρίσιμη ζώνη, οδηγώντας το σε αστάθεια.

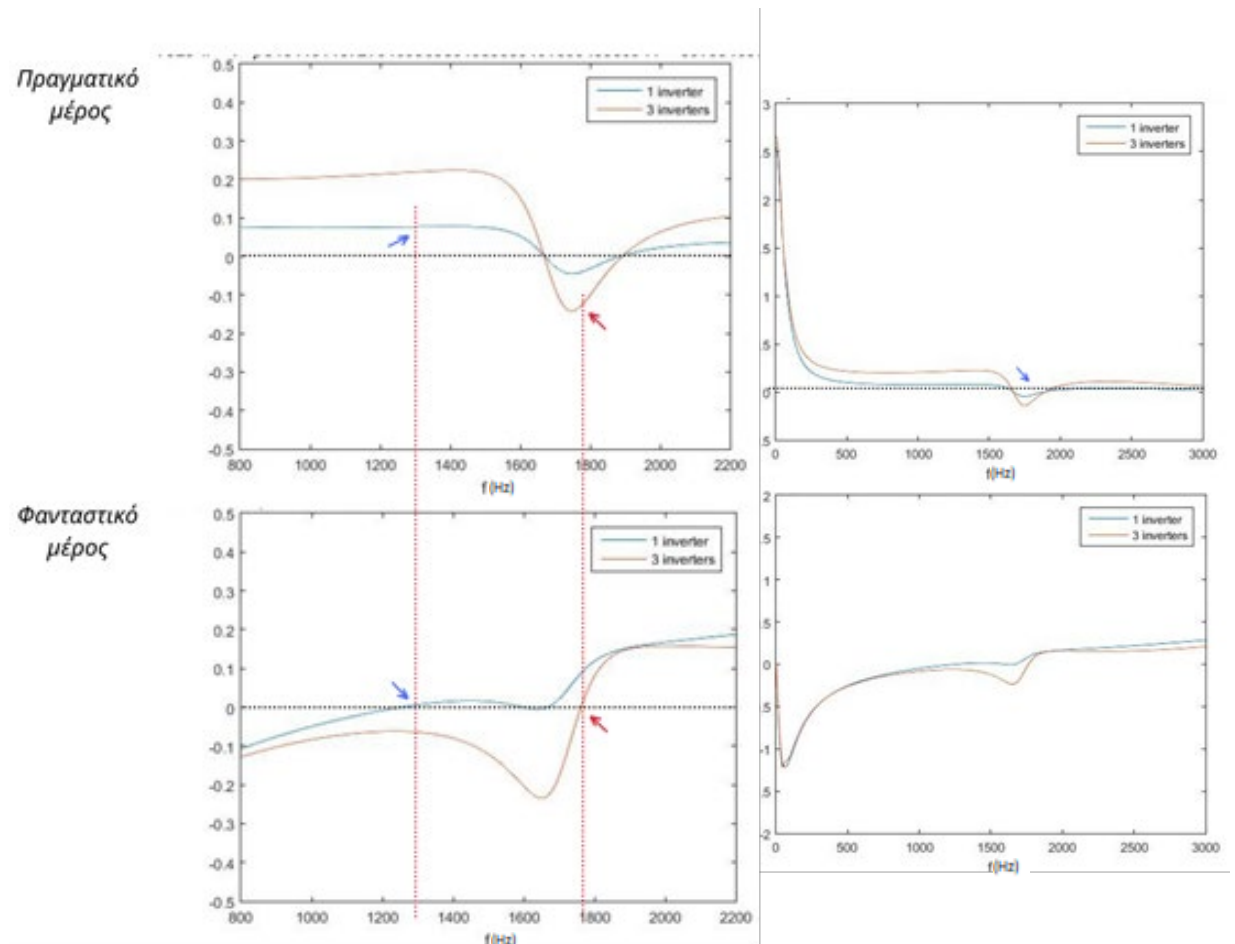
6.1.3 Αριθμός Αντιστροφών ΔΠ

Δεδομένου ότι διαρκώς συνδέονται καινούριες μονάδες στο δίκτυο, κρίνεται αναγκαίο να μελετηθεί η επίδραση της αύξησης του αριθμού των αντιστροφών στην συνολική ευστάθεια του συστήματος.

Στην περίπτωση (III) εξετάζεται η συμπεριφορά του συνολικού συστήματος για δυο διαφορετικές τιμές του αριθμού συνδεδεμένων αντιστροφών ΔΠ ίδιων τυπικών παραμέτρων με τον πρώτο αντιστροφή του πίνακα 2. Οι παρασιτικές χωρητικότητες διατηρούνται στην ίδια τιμή. Η αυτεπαγωγή του δικτύου έχει τιμή 1.2 mH.

Όπως και στις προηγούμενες ενότητες στο δεξί μέρος της εικόνας 44 παρουσιάζεται μια πρώτη διερεύνηση της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων συναντήσεων στο φάσμα συχνοτήτων από 0 μέχρι 3000 Hz, ενώ στο αριστερό μέρος της εικόνας φαίνεται για το φάσμα από 800 μέχρι 2200 Hz στο οποίο εντοπίστηκε ότι ανήκει το διάστημα στο οποίο το πραγματικό μέρος της συνάρτησης λαμβάνει αρνητικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα αυτό το διάστημα φαίνεται να ξεκινάει και για τις δυο συναρτήσεις από την συχνότητα της τάξης 1650 Hz και να τερματίζει περί τα 1850 Hz. Στην πρώτη περίπτωση όπου είναι συνδεδεμένη μόνο μια μονάδα παρατηρείται ότι το σημείο συντονισμού βρίσκεται εκτός του κρίσιμου διαστήματος περίπου στα 1300 Hz. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα του σημείου συντονισμού για την ίδια διάταξη με αυτεπαγωγή δικτύου 1mH της ενότητας 6.1.1 ήταν ελαφρώς μικρότερη, περίπου στα 1250Hz. Το συνολικό σύστημα σε αυτήν την περίπτωση είναι ευσταθές. Με την παράλληλη σύνδεση δυο επιπλέον μονάδων, το κρίσιμο σημείο αυξάνεται περίπου στα 1750 Hz με αποτέλεσμα να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια.

Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι όλα τα συστήματα είναι ευσταθή για κάποια εύρη τιμών της αυτεπαγωγής του δικτύου. Και στα δύο δίκτυα που εξετάστηκαν παρατηρείται ότι για $L_s=0.3\text{mH}$ το σύστημα είναι ευσταθές ενώ για $L_s=0.6\text{mH}$ μεταβαίνει στην αστάθεια. Στο δίκτυο με έναν αντιστροφή η περαιτέρω αύξηση του L_s σε 1mH οδηγεί το σύστημα σε ευστάθεια ενώ στο δίκτυο των δυο αντιστροφών το σύστημα παραμένει ασταθές. Με την αύξηση του αναλογικού κέρδους του ελεγκτή ρεύματος του ενός αντιστροφή σε δίκτυο δυο αντιστροφών, παρατηρείται ότι το σύστημα μεταβαίνει σε αστάθεια. Με την προσθήκη δυο επιπλέον αντιστροφών στην διάταξη του ενός αντιστροφή το σύστημα επίσης μεταβαίνει σε αστάθεια.



Εικόνα 44: Πραγματικό και Φανταστικό Μέρος Y_{tot} δικτύου διανομής με 1 και 3 αντιστροφείς ΔΠ

6.2 Συγκριτική Μελέτη Προτεινόμενων Κριτηρίων

Στην ενότητα 6.1 εξετάστηκαν διαφορετικά συστήματα με διαφορετικές παραμέτρους και μελετήθηκε η ευστάθειά τους με την ανάλυση σε πραγματικό και φανταστικό μέρος της συνολικής αγωγιμότητας του δικτύου. Ένα από τα αντικείμενα που καλύπτει η παρούσα διπλωματική εργασία είναι η συγκριτική μελέτη των κριτηρίων του κεφάλαιού 5 για τις περιπτώσεις (I), (II) και (III). Προκειμένου να εξεταστεί η ευστάθεια κλειστού συστήματος των MLG, GMLG και Y_{tot} (GA) εφαρμόστηκαν τόσο το κριτήριο Nyquist όσο και το κριτήριο Bode.

Στα συστήματα ενός αντιστροφέα το MLG και το GMLG ταυτίζονται καθώς υπάρχει μόνο μια σύνθετη αγωγιμότητα αντιστροφέα Y_{oc} . Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στις διατάξεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν ίδιοι τύποι αντιστροφέων, οι οποίοι διαθέτουν ίδια σύνθετη αγωγιμότητα εξόδου Y_{oc} , η έκφραση του MLG ταυτίζεται και επομένως μπορεί να εξεταστεί μια φορά ως προς την ευστάθειά της. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει σε διατάξεις δυο διαφορετικών αντιστροφέων όπως στην περίπτωση (II) καθώς οι σύνθετες αγωγιμότητες εξόδου τους δεν ταυτίζονται, και επομένως οι συναρτήσεις MLG διαφοροποιούνται. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να εξεταστεί το MLG₁ του πρώτου αντιστροφέα και το MLG₂ του δεύτερου και μόνο αν είναι και τα δύο ευσταθή,

το συνολικό σύστημα είναι ευσταθές. Το τελευταίο επιχείρημα εμφανίζει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα του MLG, καθώς μπορεί να εντοπίσει ποιος αντιστροφείας οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια ώστε με κατάλληλες τροποποιήσεις σε αυτόν, να επιλυθεί το πρόβλημα στο συνολικό δίκτυο.

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται οι συνθήκες που πρέπει να πληρούν τα 3 κριτήρια MLG, GMLG, GA προκειμένου να θεωρούνται ευσταθή [11] και στους πίνακες 4, 5, 6 τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους στα συστήματα του 6.1. Αναλυτικά οι γραφικές παραστάσεις των προσομοιώσεων που παράχθηκαν από την μοντελοποίηση του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β βρίσκονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ. Στα σημεία στον πίνακα όπου υπάρχει η ένδειξη * μπορεί να παρατηρήσει κανείς στα γραφήματά τους, ότι η καμπύλη Nyquist δεν περικυκλώνει το (-1,0). Ωστόσο η εξεταζόμενη συνάρτηση έχει πόλους στο δεξί μιγαδικό ημιπέδο, οι οποίοι φαίνονται στο διάγραμμα πόλων μηδενικών που περιλαμβάνεται στο παράρτημα και για αυτό το λόγο το συνολικό σύστημα σύμφωνα με το κριτήριο Nyquist είναι ασταθές. Στα διαγράμματα Nyquist του GA περιλαμβάνεται η μεγέθυνσή του διαγράμματος στο 0 προκειμένου να φανεί εάν υπάρχει περικύκλωση. Τέλος το MATLAB διαθέτει συνάρτηση υπολογισμού της ευστάθειας του κλειστού συστήματος των συναρτήσεων μέσα από τα γραφήματα, και οι ενδείξεις που λήφθηκαν κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων βρίσκονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα.

Πίνακας 3: Συνοπτική παρουσίαση κριτηρίων [11]

Κριτήριο	<u>MLG</u> (αναλογικού τύπου)	<u>GMLG</u> (αναλογικού τύπου)	<u>GA</u> (αθροιστικού τύπου)
Μαθηματική έκφραση	$\frac{Y_{oc\mu}}{Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\kappa=1, \kappa \neq \mu}^v Y_{oc\kappa}}$	$\frac{\sum_{\mu=1}^v Y_{oc\mu}}{Y_{pfc} + Y_G}$	$Y_{pfc} + Y_G + \sum_{\mu=1}^v Y_{oc\mu}$
Nyquist	Το MLG πρέπει να πληροί το κριτήριο Nyquist (N=0) [5.2.3]	Το GMLG πρέπει να πληροί το κριτήριο Nyquist (N=0) [5.2.3]	Η καμπύλη Nyquist δεν πρέπει να περικυκλώνει το (0,0)
Bode	Για πλάτος 0 η φάση δεν πρέπει να είναι μικρότερη των -180 μοιρών	Για πλάτος 0 η φάση δεν πρέπει να είναι μικρότερη των -180 μοιρών	Στο σημείο συντονισμού δεν πρέπει να υπάρχει εναλλαγή της φάσης από -180 μοίρες σε 180

Πίνακας 4: Αποτελέσματα συγκριτικής μελέτης περίπτωση (I)

Αυτεπαγωγή δικτύου L_s , <i>1 αντιστροφείας ΔΠ</i>	0.3mH	0.6mH	1mH
MLG (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές	ευσταθές
MLG (Bode)	ευσταθές	ασταθές	ευσταθές
Ytot (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές	ευσταθές
Ytot (Bode)	ευσταθές	ασταθές	ευσταθές
Αυτεπαγωγή δικτύου L_s , <i>2 αντιστροφείς ΔΠ</i>	0.3mH	0.6mH	1mH
MLG (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές*	ασταθές
MLG (Bode)	ευσταθές	ασταθές	ασταθές
GMLG (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές	ασταθές
GMLG (Bode)	ευσταθές	ασταθές	ασταθές
Ytot (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές	ασταθές
Ytot (Bode)	ευσταθές	ασταθές	ασταθές

Πίνακας 5: Αποτελέσματα συγκριτικής μελέτης περίπτωση (II)

Αναλογικό κέρδος k_p , <i>2 αντιστροφείς ΔΠ</i>	17	18
MLG₁, MLG₂ (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές
MLG₁, MLG₂ (Bode)	ευσταθές	ασταθές
GMLG (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές
GMLG (Bode)	ευσταθές	ασταθές
Ytot (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές
Ytot (Bode)	ευσταθές	ασταθές

Πίνακας 6: Αποτελέσματα συγκριτικής μελέτης περίπτωση (III)

Αριθμός αντιστροφέων ΔΠ	1	3
MLG (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές*
MLG (Bode)	ευσταθές	ασταθές
GMLG (Nyquist)	-	ασταθές
GMLG (Bode)	-	ασταθές
Ytot (Nyquist)	ευσταθές	ασταθές
Ytot (Bode)	ευσταθές	ασταθές

Για τις περιπτώσεις (I), (II) και (III) που εξετάστηκαν, τα κριτήρια συγκλίνουν τόσο μεταξύ τους όσο και με τα αποτελέσματα του προηγούμενου υποκεφαλαίου.

Συμπερασματικά, το κριτήριο αναλογικού τύπου MLG προσφέρει την δυνατότητα της μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς και αλληλεπίδρασης ενός αντιστροφέα τόσο με το δίκτυο όσο και με τους άλλους αντιστροφείς που είναι παράλληλα συνδεδεμένοι στο σημείο κοινής σύνδεσης. Παρότι απαιτούνται πολλές επαναλήψεις, ειδικά σε συστήματα με μεγάλη διεύθυνση μονάδων, δίνεται η δυνατότητα εξέτασης της ευστάθειας του καθενός ξεχωριστά, και αν η αστάθεια προέρχεται από αυτόν, μπορεί να αντιμετωπιστεί με τεχνικές όπως αυτή που θα αναπτυχθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Το κριτήριο αναλογικού τύπου GMLG απαιτεί λιγότερες επαναλήψεις των προσομοιώσεων αλλά το δεδομένο που μπορεί να εξαχθεί με την χρήση του είναι η ένδειξη της ευστάθειας του συνολικού συστήματος, και όχι από ποιο στοιχείο προέρχεται.

Το αθροιστικό κριτήριο, το οποίο είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμο σε σχέση με τα αναλογικά κριτήρια, αναπαριστά την συνολική σύνθετη αγωγιμότητα του συστήματος στο φάσμα της συχνότητας και επομένως μειώνει αισθητά τους υπολογισμούς [19].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Προτεινόμενη Τεχνική Ελέγχου

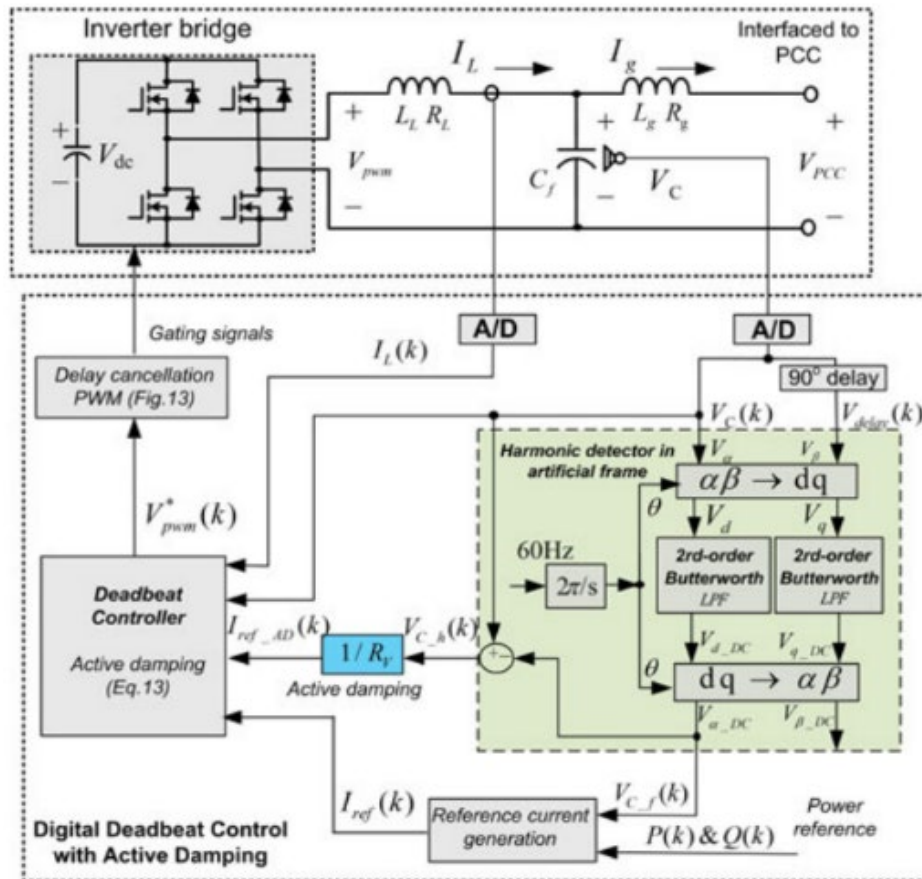
7.1. Τεχνική Ενεργούς Απόσβεσης (Active Damping)

Έχοντας εξετάσει ένα σύνολο παραμέτρων που ενδέχεται να επηρεάσουν την ευστάθεια του συστήματος, διαφαίνεται πλέον η ανάγκη εύρεσης μηχανισμών αντιμετώπισης του φαινομένου της αστάθειας όταν εμφανίζεται σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Η τεχνική Active Damping, η οποία σχετίζεται με την εισαγωγή εικονικής σύνθετης αντίστασης, έχει εφαρμοστεί σε αρκετές διατάξεις αντιστροφών συνδεδεμένων στο δίκτυο και η αποτελεσματικότητά της φαίνεται να μην επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις μεταβολές των παραμέτρων. Η βασική λειτουργία της, είναι να μιμηθεί την συμπεριφορά του Passive damping (πρόσθεση σύνθετης αντίστασης) μέσα από το σύστημα ελέγχου της μονάδας. Με αυτό τον τρόπο είναι εμφανές ότι μιας και δεν προστίθεται κανένα φυσικό στοιχείο, δεν υπάρχει απώλεια ενέργειας στο δίκτυο.

Πολλές τοπολογίες έχουν προταθεί για να προσομοιώσουν την συγκεκριμένη τεχνική οι οποίες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες. Στην πρώτη, η τεχνική υλοποιείται μέσα από την σύνδεση ενός φίλτρου σε σειρά με τον ελεγκτή ρεύματος [23]. Παρ'ότι είναι σχετικά απλή στην υλοποίηση η εν σειρά σύνδεση του ψηφιακού φίλτρου κάνει το κύκλωμα πολύ πιο ευαίσθητο στις αλλαγές των παραμέτρων.

Η δεύτερη, η οποία χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο πλήθος εφαρμογών, στηρίζεται στην ανατροφοδότηση κάποιων μεταβλητών του φίλτρου πίσω στο κύκλωμα, όπως για παράδειγμα η τάση ή το ρεύμα εξόδου του πυκνωτή. Στην εικόνα 45 φαίνεται ένας αντιστροφέας του οποίου ο έλεγχος επιτελείται με έναν deadbeat controller. Στο κύκλωμα μετράται ως ανάδραση το ρεύμα εισόδου του φίλτρου ενώ ακόμη μετράται η τάση του πυκνωτή για να διασφαλιστεί ο συγχρονισμός με το σύστημα. Με την προσθήκη της τεχνικής, η τάση του πυκνωτή οδηγείται σε έναν μηχανισμό ανάχενυσης αρμονικών και περνάει από μια εικονική αγωγιμότητα $1/R_v$, παράγοντας μια πρόσθετη συνιστώσα του ρεύματος αναφοράς η οποία τροφοδοτείται ως επιπλέον είσοδος στον ελεγκτή. Με αυτόν τον τρόπο εξασθενεί σημαντικά το αρμονικό ρεύμα και επιτυγχάνεται ικανοποιητική καταστολή των αρμονικών που προκύπτουν από τις αλληλεπιδράσεις των μονάδων σε υψηλές συχνότητες [24].



Εικόνα 45: Σχηματικό διάγραμμα αντιστροφεία με Deadbeat controller [24]

Ο συγκεκριμένος έλεγχος μετρά ως σήμα ανάδρασης το ρεύμα της εισόδου του φίλτρου σε αντίθεση με το κύκλωμα της εικόνας 17 όπου ως ανάδραση χρησιμοποιείται το ρεύμα εξόδου του φίλτρου. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση μια τεχνικής active damping η οποία μπορεί να βρει εφαρμογή στην τοπολογία της εικόνας 17 [25].

7.1.1 Σχηματικό Διάγραμμα Ελέγχου

Στις εικόνες 46 και 47 φαίνονται τα διαγράμματα μπλοκ του αντιστροφεία με την προσθήκη της συνάρτησης μεταφοράς του active damping G_{ad} και με την προσθήκη της παθητικής σύνθετης αντίστασης που θα έπρεπε να συνδεθεί στο κύκλωμα για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο. Για την σχεδίαση του διαγράμματος μπλοκ της εικόνας 46 έχουν ληφθεί δυο παραδοχές [25]:

1. Η μέτρηση του ρεύματος του πηνίου L_2 έχει αντικατασταθεί από την μέτρηση της πτώσης τάσης που εμφανίζεται στο πηνίο εξόδου L_2 .
2. Ο κόμβος στον οποίο προστίθεται η έξοδος του active damping έχει μετατεθεί από την έξοδο του PR ελεγκτή στην έξοδο του πηνίου L_1 .

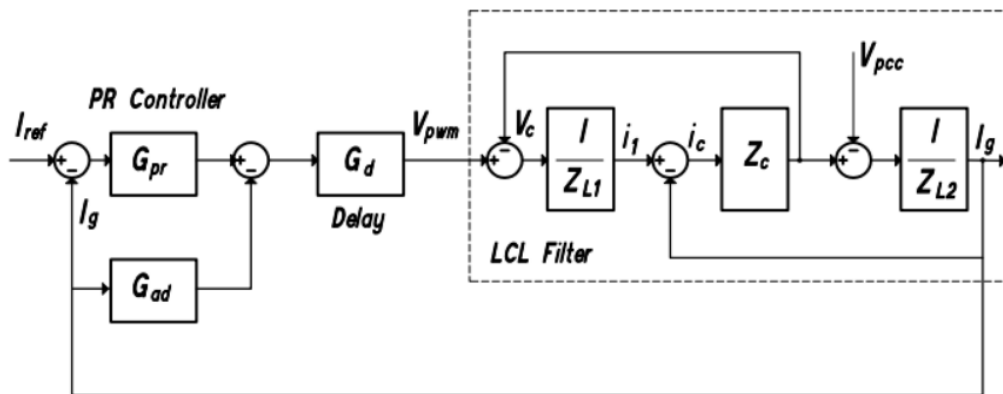
Τα δύο μπλοκ διαγράμματα αποτελούν δυο διαφορετικές απεικονίσεις του ίδιου κυκλώματος και επομένως τα χαρακτηριστικά των κλειστών βρόχων τους πρέπει να ταυτίζονται.

Πιο συγκεκριμένα:

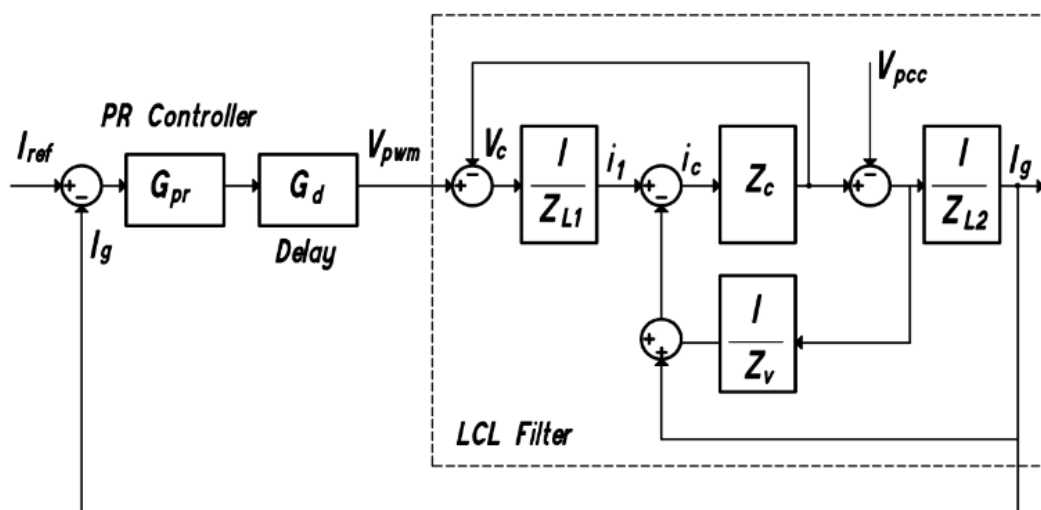
$$G_{PR} * G_d * \frac{1}{L_1 s} * C_f s * \frac{1}{L_2 s} = \frac{1}{Z_v} * C_f s$$

$$Z_v = \frac{L_1 * L_2 * s^2}{G_{ad} * G_{PR} * G_d} \quad (7.1)$$

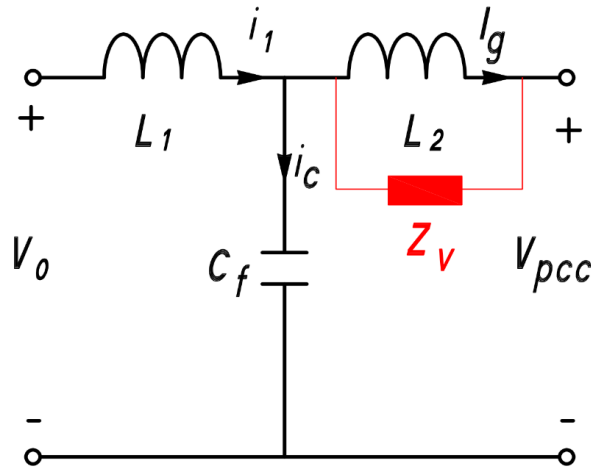
Το μπλοκ διάγραμμα της εικόνας 47 αναπαρίσταται σε επίπεδο κυκλώματος στην εικόνα 48. Με αυτό τον τρόπο διαφαίνεται ότι το active damping ισοδυναμεί με την σύνδεση μιας σύνθετης αντίστασης παράλληλα στο πηνίο εξόδου.



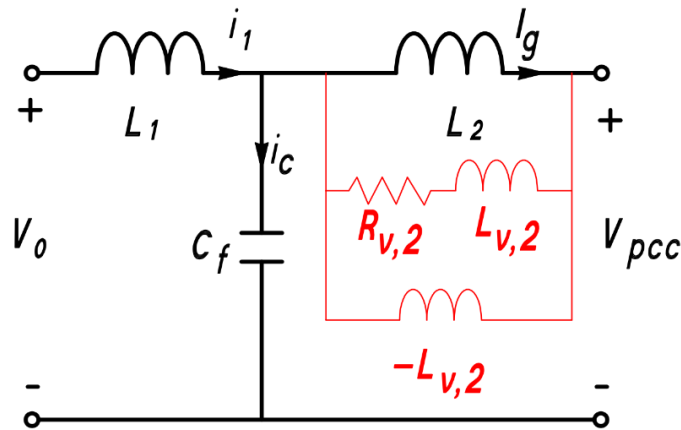
Εικόνα 46: Διάγραμμα βαθμίδων αντιστροφεία με active damping [25]



Εικόνα 47: Διάγραμμα βαθμίδων αντιστροφεία με passive damping [25]



Εικόνα 48: Ισοδύναμο Κύκλωμα [25]



Εικόνα 49: Ισοδύναμο κύκλωμα που μιμείται το HPF [25]

7.1.2 Συνάρτηση Μεταφοράς G_{ad}

Παρατηρείται από την σχέση (7.1) ότι η τιμή της εικονικής σύνθετης αντίστασης μπορεί να μεταβληθεί κυρίως με την αλλαγή του G_{ad} , καθώς το G_d είναι προκαθορισμένο και εξαρτάται από την συχνότητα δειγματοληψίας του συστήματος. Για $G_d = 1$, δηλαδή όταν το κύκλωμα έχει μηδενική καθυστέρηση, με αντικατάσταση στην σχέση 5.1 η προσθήκη εικονικής αποσβένουσας αντίστασης τιμής $Z_v = R_v$ θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί εάν η συνάρτηση μεταφοράς G_{ad} ρυθμιζόταν με τέτοιο τρόπο ώστε να ισούται με s^2 ώστε να ακυρώσει τον ίδιο s^2 όρο που βρίσκεται στον αριθμητή της εξίσωσης (5.1). Αυτή ωστόσο η πρόταση δεν είναι πρακτικά υλοποιήσιμη, και για τον λόγο αυτό εξετάζεται η παράλληλη σύνδεση μιας σύνθετης αντίστασης $R+Ls$. Αυτή η σύνθετη αντίσταση θα μπορούσε να επιτευχθεί με την προσθήκη του $G_{ad,1} = \frac{L_1 * L_2 * s^2}{L_{v,1} s + R_{v,1}} = \frac{L_1 * L_2 * s}{L_{v,1}} - \frac{L_1 * L_2 * R_{v,1} * s}{L_{v,1} (L_{v,1} s + R_{v,1})}$ (7.2) αντικαθιστώντας τον ανεπιθύμητο όρο s^2 με τον όρο s . Παρατηρείται ότι και οι δυο όροι περιέχουν τον όρο s ο οποίος σε επίπεδο κυκλώματος αντιπροσωπεύει ένα υπερβατικό φίλτρο. Κρατώντας τον δεύτερο όρο της εξίσωσης (7.2) και αντικαθιστώντας στην εξίσωση (7.1), παρατηρείται ότι η παράλληλη σύνδεση μιας σύνθετης αντίστασης $Z_v =$

$\frac{-L_{v,2}s*(L_{v,2}s+R_{v,2})}{R_{v,2}} = [(L_{v,2}s + R_{v,2}) // (-L_{v,2})]$ (εικόνα 49) πραγματοποιείται με την τοποθέτηση ενός υψιπερατού φίλτρου ως αρνητική ανάδραση στον PR ελεγκτή. Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου ορίζεται ως:

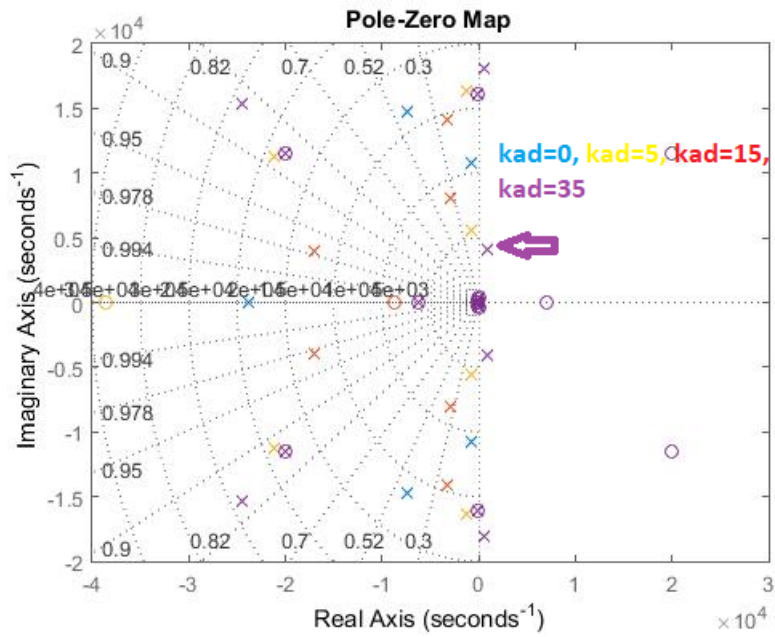
$G_{ad,2} = \frac{-k_{ad}s}{s+\omega_{ad}}$, $k_{ad} = \frac{L_1*L_2*R_{v,2}}{L_{v,2}^2}$ και $\omega_{ad} = \frac{R_{v,2}}{L_{v,2}}$, όπου $R_{v,2}$, $L_{v,2}$ είναι η εικονική αυτεπαγωγή και η εικονική αντίσταση ενώ k_{ad} , ω_{ad} το κέρδος και συχνότητα αποκοπής του υψιπερατού φίλτρου. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η ίδια συνάρτηση μεταφοράς έχει προταθεί ως μηχανισμός σε εργασίες χωρίς ωστόσο να αναλυθεί εκτενώς η σχέση της με τα παθητικά στοιχεία που προσομοιώνει [26].

7.1.3 Ρύθμιση Παραμέτρων

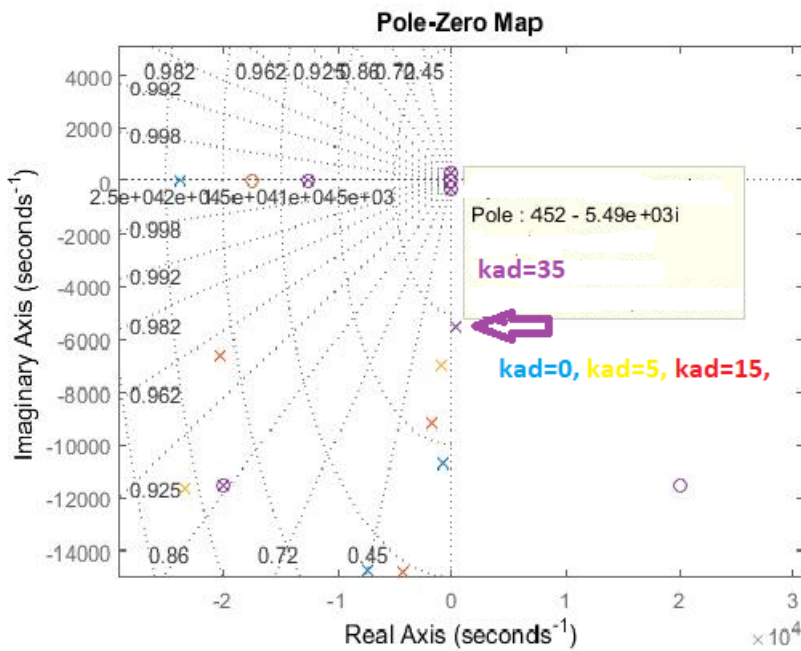
Με την πρόσθεση του υψιπερατού φίλτρου ως αρνητική ανάδραση στον ελεγκτή η συνάρτηση μεταφοράς του κλάδου μετασχηματίζεται όπως φαίνεται στην εικόνα 45 σε $G_{activedamping} = G_{pr} - G_{ad,2}$ (7.3). Προκειμένου να εξεταστεί η ευστάθεια της μονάδας ΔΠ μετά την αλλαγή, εξετάστηκε η τοποθεσία των πόλων της συνάρτησης κλειστού βρόχου του αντιστροφέα για διάφορες τιμές παραμέτρων του κέρδους του φίλτρου k_{ad} και της συχνότητας αποκοπής ω_{ad} του υψιπερατού φίλτρου. Πιο συγκεκριμένα με την χρήση της μοντελοποίησης στο MATLAB του παραρτήματος Β πραγματοποιήθηκε γραφική απεικόνιση των πόλων και των μηδενικών της νέας συνάρτησης κλειστού βρόχου του αντιστροφέα.

Στην εικόνα 50 φαίνεται η συμπεριφορά του κλειστού συστήματος για $\omega_{ad} = 0.1 * \omega_s$ όπου ω_s είναι η γωνιακή συχνότητα δειγματοληψίας του συστήματος. Με γαλάζιο χρώμα σημειώνονται οι πόλοι για $k_{ad} = 0$, με κίτρινο για $k_{ad} = 5$, με κόκκινο για $k_{ad} = 15$ και με μωβ για $k_{ad} = 35$. Παρατηρείται ότι για τις πρώτες τρεις τιμές οι πόλοι του συστήματος βρίσκονται όλοι στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο και επομένως το σύστημα είναι ευσταθές. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι το κέρδος του φίλτρου δεν πρέπει να αυξηθεί περαιτέρω καθώς όταν πάρει την τιμή 35, αναγκάζει τους πόλους να μετακινηθούν στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο. Το συνολικό σύστημα σε αυτή την περίπτωση είναι πάντα ασταθές ανεξαρτήτως από το πώς έχει σχεδιαστεί ο ελεγκτής ρεύματος. Το ίδιο συμπέρασμα δύναται να εξαχθεί από την εικόνα 51 στην οποία παρουσιάζεται η ίδια ανάλυση για $\omega_{ad} = 0.2 * \omega_s$ και τις προαναφερθείσες τιμές του κέρδους του φίλτρου.

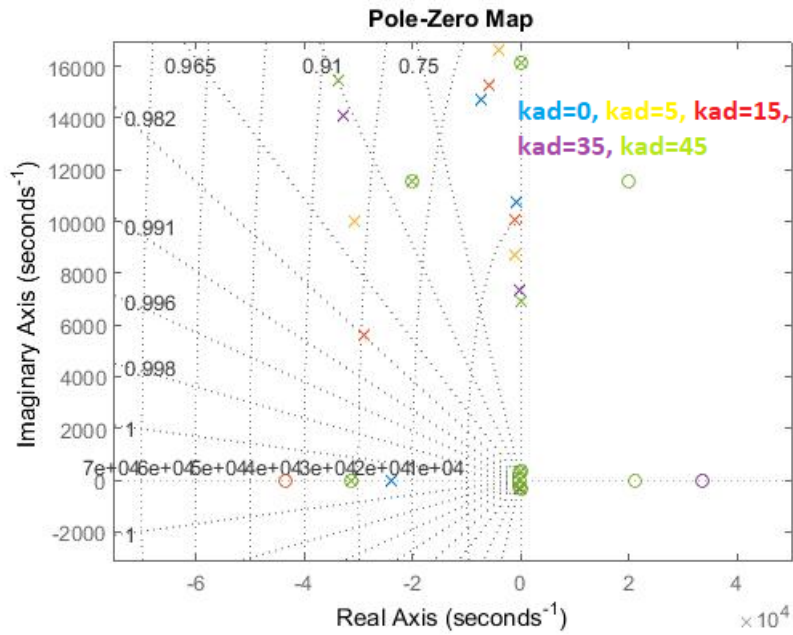
Καθώς η συχνότητα αποκοπής αυξάνεται στα $0.5 * \omega_s$ παρατηρείται στην εικόνα 52 ότι και για τις πέντε τιμές του k_{ad} το σύστημα είναι ευσταθές. Με την περαιτέρω αύξηση του στην τιμή 45 (πόλοι με πράσινο χρώμα) εμφανίζεται πόλος στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο με θετικό πραγματικό μέρος $38.1+6.88e^{03}i$ (εικόνα 53). Επομένως, φαίνεται ότι το όριο αστάθειας όσον αφορά το k_{ad} μεγαλώνει όσο αυξάνεται η συχνότητα αποκοπής. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος κλειστού βρόχου μετά την προσθήκη της τεχνικής, προκειμένου οι παράμετροι του φίλτρου να επιλεγούν με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλιστεί η ευστάθειά του αντιστροφέα.



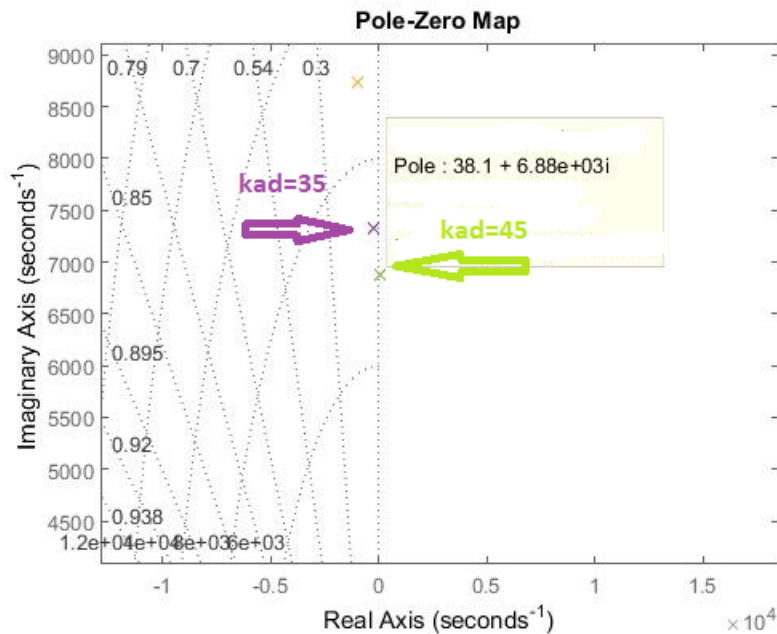
Εικόνα 50: Διάγραμμα πόλων μηδενικών της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου του αντιστροφέα μετά την προσθήκη της τεχνικής για $\omega_{ad}=0.1*\omega_s$ και διάφορες τιμές του k_{ad}



Εικόνα 51: Διάγραμμα πόλων μηδενικών της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου του αντιστροφέα μετά την προσθήκη της τεχνικής για $\omega_{ad}=0.2*\omega_s$ και διάφορες τιμές του k_{ad}



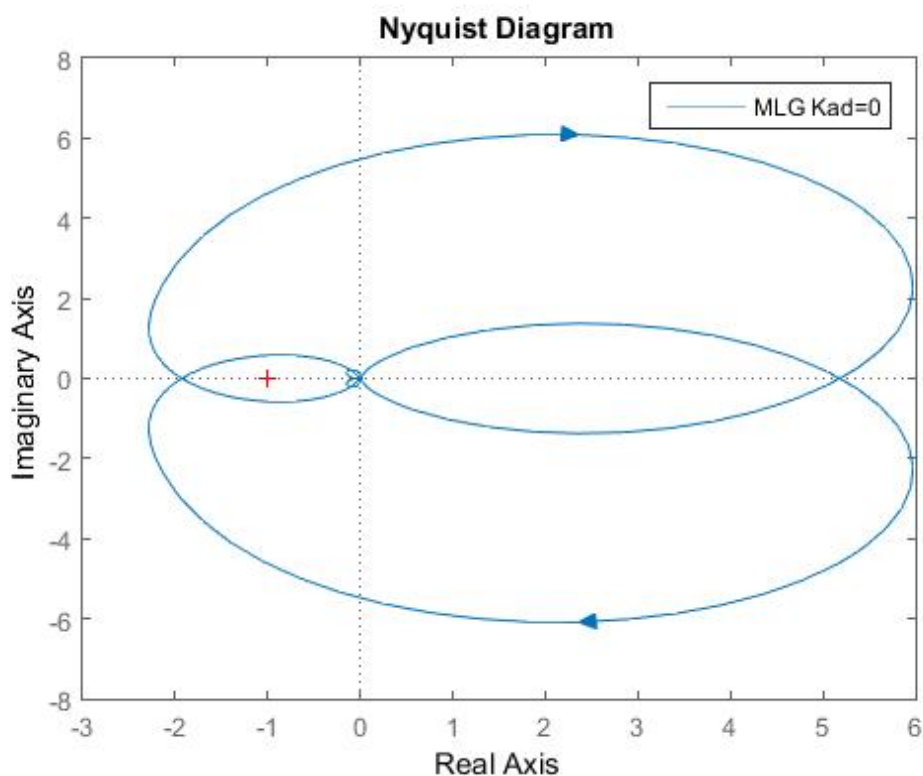
Εικόνα 52: Διάγραμμα πόλων μηδενικών της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου του αντιστροφέα με την προσθήκη της τεχνικής για $\omega_{ad}=0.5*\omega_s$ και διάφορες τιμές του k_{ad}



Εικόνα 53: Διάγραμμα πόλων μηδενικών συνάρτησης κλειστού βρόχου με την προσθήκη της τεχνικής για $\omega_{ad}=0.5*\omega_s$ και διάφορες τιμές του k_{ad} (μεγέθυνση)

7.2. Εφαρμογή σε Δίκτυο με 1 Αντιστροφέα ΔΠ

Ανατρέχοντας στο κεφάλαιο 6 το σύστημα ενός αντιστροφέα ΔΠ συνδεδεμένο σε δίκτυο αυτεπαγωγής 0.6mH έχει κριθεί ασταθές. Στην εικόνα 54 παρουσιάζεται το διάγραμμα Nyquist της συνάρτησης MLG το οποίο φαίνεται ότι περικυκλώνει δεξιόστροφα το κρίσιμο σημείο $(-1,0)$. Η συνάρτηση MLG δεν διαθέτει πόλους στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο.

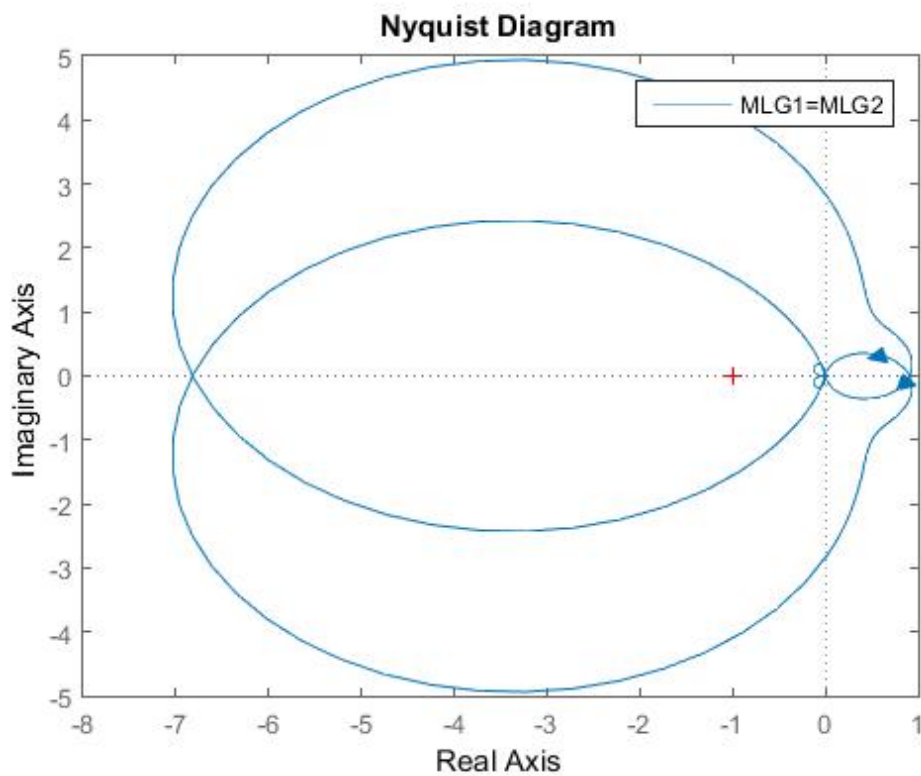


Εικόνα 54: Διάγραμμα Nyquist MLG (1 αντιστροφέας ΔΠ) πριν την εφαρμογή της τεχνικής

Στο σύστημα προστίθεται εικονική σύνθετη αντίσταση μέσα από την σύνδεση ενός υπεραποκτοφίλτρου συχνότητας αποκοπής $0.1 \cdot \omega_s$ και αναλογικού κέρδους τιμής 15.

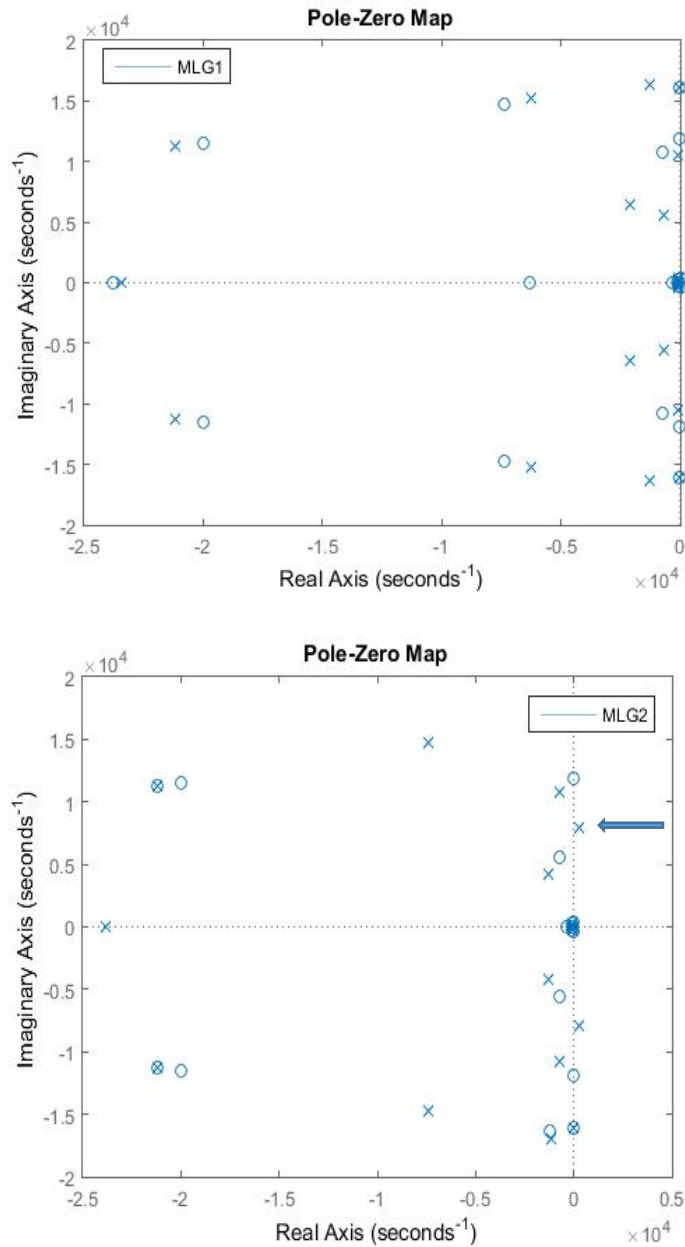
Με την εφαρμογή του κριτηρίου MLG, δεδομένου ότι συνεχίζει να μην διαθέτει πόλους στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο, παρατηρείται ότι το διάγραμμα Nyquist της εικόνας 55 δεν περικυκλώνει πλέον το σημείο $(-1,0)$ και επομένως το συνολικό σύστημα είναι ευσταθές.

συνολική ευστάθεια του συστήματος θα προκύψει αν και οι δύο είναι ευσταθείς ή με την μελέτη της συνάρτησης $GMLG$, όπως αναλύθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 5.



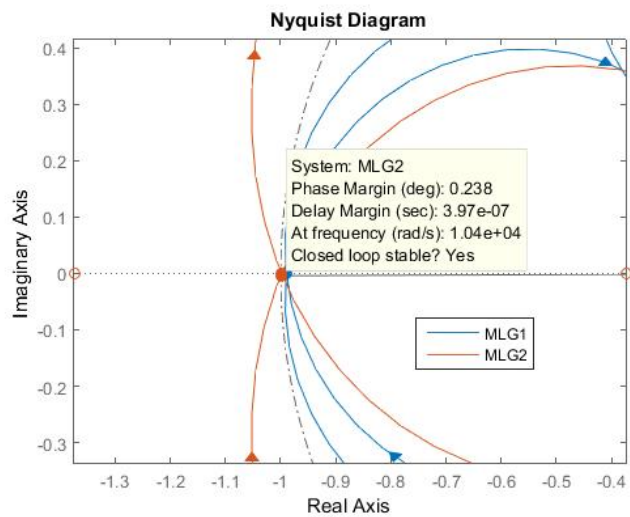
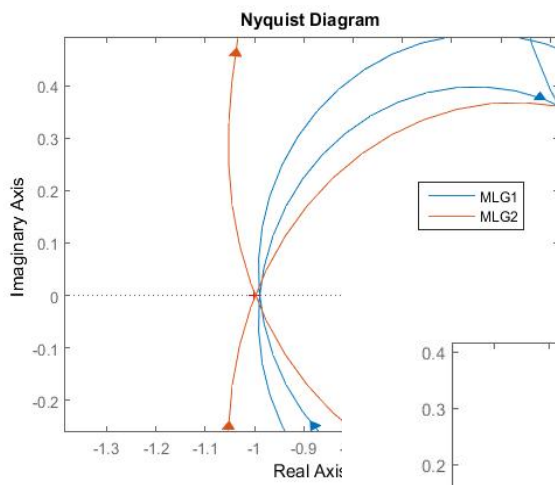
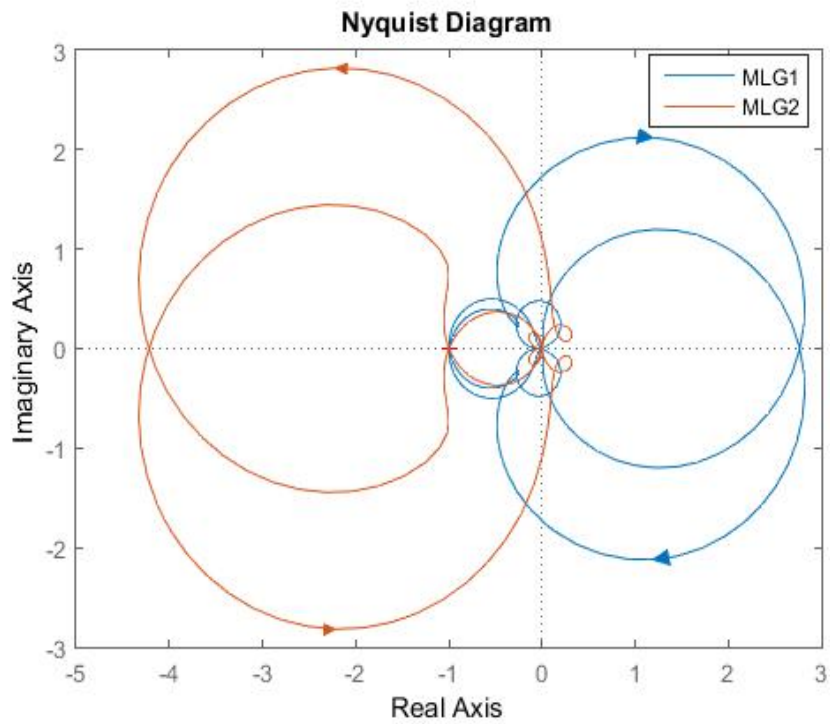
Εικόνα 56: Διάγραμμα Nyquist MLG_1 , MLG_2 πριν την εφαρμογή της τεχνικής

Εφαρμόζοντας την τεχνική παρατηρείται στην εικόνα 57 ότι ενώ οι πόλοι του MLG_1 βρίσκονται όλοι στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο, στο διάγραμμα πόλων μηδενικών του MLG_2 εμφανίζεται ένα ζευγάρι συζυγών πόλων με θετικό πραγματικό μέρος.



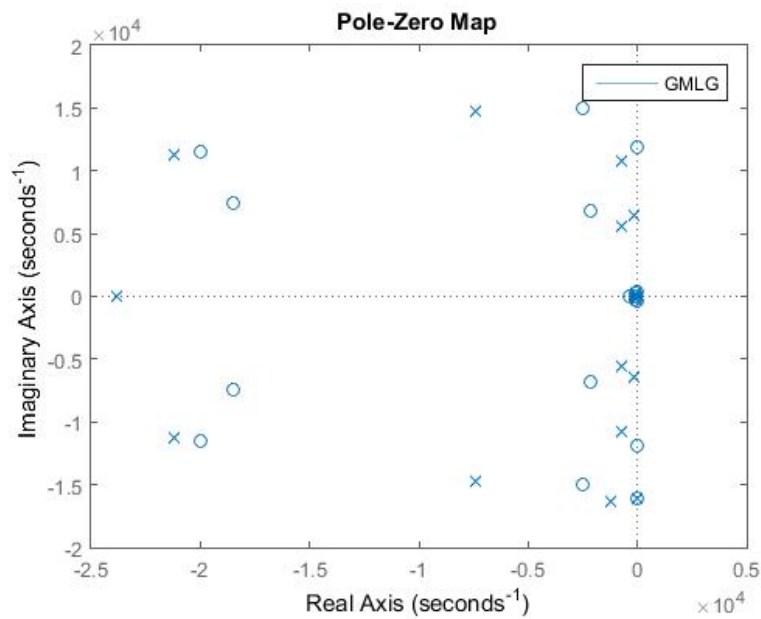
Εικόνα 57: Διάγραμμα πόλων μηδενικών $MLG1$, $MLG2$ μετά την εφαρμογή της τεχνικής

Στην εικόνα 58 παρουσιάζονται τα διαγράμματα Nyquist των δυο συναρτήσεων. Το $MLG1$ το οποίο δεν διαθέτει πόλους στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο, δεν περικυκλώνει το κρίσιμο σημείο και επομένως είναι ευσταθές. Το διάγραμμα του $MLG2$ περικυκλώνει το -1, όμως είναι αρκετά περίπλοκο για να μετρηθεί ο αριθμός των περικυκλώσεων και να συνυπολογιστεί μαζί με τον αριθμό των πόλων στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο κατά την εφαρμογή του κριτηρίου Nyquist. Για τον λόγο αυτό κλήθηκε η συνάρτηση Closed loop stable του MATLAB η οποία αναγνώρισε το κλειστό σύστημα με συνάρτηση ανοιχτού βρόχου $MLG2$ ως ευσταθές.

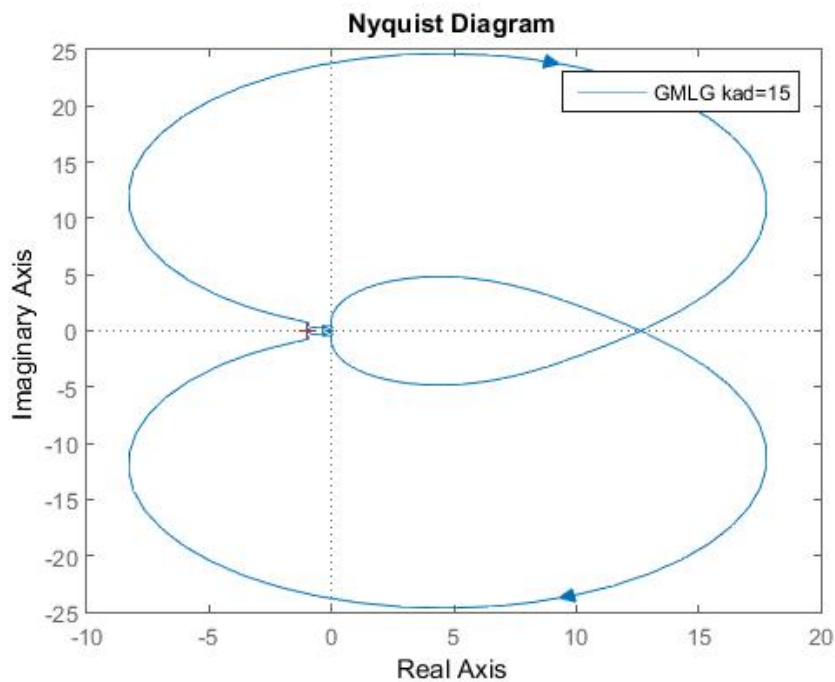


Εικόνα 58: Διάγραμμα Nyquist MLG1 MLG2 μετά την εφαρμογή της τεχνικής

Για να επιβεβαιωθεί ο παραπάνω ισχυρισμός εξετάζεται η συνάρτηση $GMLG = (Y_{oc1} + Y_{oc2}) / (Y_g + Y_{rfe})$ η οποία όπως φαίνεται στην εικόνα 59, δεν διαθέτει πόλους στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο και επιπλέον το διάγραμμα Nyquist της (εικόνα 60) δεν περικυκλώνει το $(-1,0)$ επομένως το σύστημα με την προσθήκη του active damping είναι ευσταθές.



Εικόνα 59: Διάγραμμα πόλων μηδενικών GMLG μετά την εφαρμογή της τεχνικής



Εικόνα 60: Διάγραμμα Nyquist GMLG μετά την εφαρμογή της τεχνικής

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η προσθήκη του φίλτρου σε έναν μόνο από τους αντιστροφείς του συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε ευστάθεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Επίλογος

8.1 Συνοπτική Παρουσίαση Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η μελέτη της ευστάθειας γρήγορων αλληλεπιδράσεων οδηγούμενης από μετατροπείς σε δίκτυα διανομής, μέσα από μοντελοποίηση των επιμέρους στοιχείων. Οι συναρτήσεις μεταφοράς κάποιων στοιχείων μπορούν να υπολογιστούν εύκολα, όπως για παράδειγμα των πυκνωτών αντιστάθμισης. Ωστόσο στην περίπτωση του διασυνδεδεμένου αντιστροφέα, οι υπολογισμοί περιπλέκονται όπως φαίνεται στην εικόνα 17 καθώς περιλαμβάνει δυο διεγέρσεις και εσωτερικές αναδράσεις. Στα πλαίσια της εργασίας υπολογίστηκε αναλυτικά το ισοδύναμο Norton κύκλωμα του αντιστροφέα το οποίο αποτελείται από μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια αγωγιμότητα. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν αγνοώντας τους ελέγχους που δεν σχετίζονται με υψηλές συχνότητες, ξεκινώντας από το μπλοκ διάγραμμα και χρησιμοποιώντας τους νόμους ρευμάτων Kirchhoff σε συνδυασμό με την αρχή της επαλληλίας. Με αυτή την θεωρητική ανάλυση αποδεικνύεται ότι μπορεί να μοντελοποιηθεί πληθώρα συστημάτων περίπλοκων ελέγχων με τέτοιο τρόπο, ώστε να συμπεριληφθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Αφού ολοκληρώθηκε η αναπαράσταση του ισοδύναμου κυκλώματος δικτύου διανομής, το οποίο για n συνδεδεμένους αντιστροφείς ΔΠ απαρτίζεται πλέον από $n+1$ εισόδους, την πηγή V_G και τις n πηγές ρευμάτων των αντιστροφέων, υπολογίστηκαν αναλυτικά με την χρήση της επαλληλίας τα ρεύματα εξόδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι με την προσθήκη φορτίων στο ΣΚΣ τα ρεύματα εξόδου θα αλλάξουν και θα πρέπει να επαναληφθεί η διαδικασία υπολογισμού. Τα φορτία δύνανται ακόμα και να επιδράσουν θετικά στο φαινόμενο όπως φαίνεται από το [11] όπου σε μια ασταθή περίπτωση με την προσθήκη ωμικού φορτίου 10Ω το σύστημα επαναφέρεται σε ευσταθή λειτουργία.

Από τις σχέσεις των ρευμάτων εξάγονται εύκολα οι συναρτήσεις μεταφοράς κάθε μιας από τις $n+1$ εισόδους του συστήματος, οι οποίες παρομοιάζονται με συναρτήσεις μεταφοράς κλειστών συστημάτων. Με βάση αυτή την παρατήρηση προέκυψε ένα σύνολο κριτηρίων αναλογικού τύπου Minor Loop Gain (MLG), Global Minor Loop Gain (GMLG) που στηρίζονται στην εφαρμογή των κλασσικών κριτηρίων της θεωρίας Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το MATLAB χρησιμοποιήθηκαν ως δείκτες για την πρόβλεψη του φαινομένου ενώ το κριτήριο της συνολικής αγωγιμότητας (Global Admittance) στηρίζεται στην γενίκευση κριτηρίων των ΣΑΕ με τρόπο που να μπορεί να εφαρμοστεί στις συναρτήσεις μεταφοράς του δικτύου, απλοποιώντας τους υπολογισμούς.

Η αλλαγή παραμέτρων όπως η αυτεπαγωγή του δικτύου, το αναλογικό κέρδος των ελεγκτών και το πλήθος των συνδεδεμένων αντιστροφέων ΔΠ δύνανται να οδηγήσουν το συνολικό σύστημα σε αστάθεια. Συμπερασματικά, με την συνεχή αύξηση της αυτεπαγωγής του δικτύου διαφαίνεται ότι το σύστημα μπορεί να οδηγηθεί σε αστάθεια. Η αυτεπαγωγή του δικτύου διαφαίνεται ότι πρέπει να κυμαίνεται εντός κάποιων ορίων τα οποία διαφοροποιούνται ανάλογα με το πλήθος των διασυνδεδεμένων αντιστροφέων. Στο σύστημα ενός αντιστροφέα η αύξηση της αυτεπαγωγής του δικτύου από 0.6mH σε 1mH οδηγεί το σύστημα σε ευστάθεια. Η αύξηση του αναλογικού κέρδους του PR ελεγκτή μπορεί επιπλέον να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια.

Ιδιαίτερα ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν όλα τα κριτήρια ευστάθειας συγκλίνουν. Τέλος διαφαίνεται ότι με την προσθήκη επιπλέον διατάξεων που μιμούνται την προσθήκη αποσβένουσων αντιστάσεων (active damping), όπως παράλληλη σύνδεση υψιπερατών φίλτρων στον έλεγχο του αντιστροφέα, το φαινόμενο καταστέλλεται. Σε κάποιες περιπτώσεις φαίνεται ότι η παρέμβαση σε μια μόνο εκ των συνδεόμενων μονάδων μπορεί να επαναφέρει το σύστημα σε ευστάθεια.

Με την μαζική αύξηση της διείδυσης μονάδων ΔΠ και κατ'επέκταση μετατροπέων, η οποία έχει ήδη ξεκινήσει να πραγματοποιείται, φαίνεται πως η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται, αυξάνοντας το ενδιαφέρον από την ερευνητική κοινότητα και την βιομηχανία.

8.2 Προτάσεις και Μελλοντικές Προεκτάσεις

A. Μοντελοποίηση

Παρά το γεγονός ότι η εφαρμογή των κριτηρίων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου σε δεδομένη συνάρτηση μεταφοράς είναι μια σχετικά απλή διαδικασία, δεδομένου ότι περιλαμβάνει κυρίως το κάλεσμα κάποιων βασικών συναρτήσεων από την βιβλιοθήκη του MATLAB και την εφαρμογή των ήδη διατυπωμένων κριτηρίων, μεγάλη πρόκληση αποτελεί ο υπολογισμός των συναρτήσεων μεταφοράς όλων των επιμέρους στοιχείων και η μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος στο σημείο κοινής σύνδεσης.

Δεδομένου ότι δεν έχουν χαρτογραφηθεί πλήρως οι αιτίες που προκαλούν την αστάθεια και επομένως ποια στοιχεία πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο, θα προτεινόταν να σχεδιαστεί μια πιο πιστή απεικόνιση ενός συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, θα προτεινόταν να συγκεντρωθούν οι παράμετροι ενός συστήματος που μπορεί να προσομοιωθεί σε πραγματικό χρόνο (φίλτρα εξόδου αντιστροφέων, παράμετροι ελεγκτών, φορτία, χωρητικότητες) και να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στην μοντελοποίηση. Μέσα από την σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των πειραμάτων, θα μπορούσε να διερευνηθεί κατά πόσο επιδρούν όλα τα στοιχεία με τον ίδιο τρόπο στο φαινόμενο και αν θα μπορούσε κάποιο να αγνοηθεί προς απλοποίηση της ανάλυσης. Επιπλέον, θα μπορούσε να διερευνηθεί κατά πόσο κάποιος παράγοντας επιδρά θετικά, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη φορτίων. Επίσης, προτείνεται να προστεθεί η πραγματική συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή PR (καθώς στην συγκεκριμένη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε η ιδανική) και τυχόν αρμονικοί ελεγκτές.

B. Κριτήρια μελέτης

Τα ήδη διατυπωμένα κριτήρια μελέτης αυτού του τύπου της ευστάθειας έχει φανεί πως μπορούν να περιγράψουν ένα μεγάλο σύνολο καταστάσεων. Ωστόσο όπως υπογραμμίστηκε στο κεφάλαιο 6 όσον αφορά τα αναλογικά κριτήρια MLG και GMLG είναι ιδιαίτερα σημαντικό να πραγματοποιείται η χαρτογράφηση των πόλων τους και να προσμετρώνται, αν υπάρχουν στο θετικό ημιάξονα, κατά την εφαρμογή του κριτηρίου Nyquist.

Το κριτήριο Nyquist έχει διατυπωθεί για συναρτήσεις μεταφοράς που περιγράφουν το σύστημα κλειστού βρόχου της εικόνας 25. Τα κριτήρια των οποίων όλες οι επιμέρους συναρτήσεις μεταφοράς με αντικαταστάσεις στο $G(s)$ και στο $H(s)$, μπορούν να γραφτούν σε αυτή την μορφή, είναι το MLG και το GMLG. Όσον αφορά το MLG ο πρώτος συντελεστής του $G_{c,1}I_{ref1}$ παρομοιάζεται με το κέρδος κλειστού βρόχου ενός συστήματος με $G(s)=1$ και $H(s)=MLG_1$. Οι όροι των $G_{c,2}I_{ref2}$ και $V_g Y_g$ παρομοιάζονται με το κέρδος κλειστού βρόχου ενός συστήματος με $G(s)=MLG_1$ και $H(s)=1$. Επομένως η μελέτη της ευστάθειας του κλειστού συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή του κριτηρίου Nyquist στην χαρακτηριστική εξίσωση $1+MLG_1$. Μια τέτοια αντιστοίχιση μπορεί να πραγματοποιηθεί και για το GMLG με την τροποποίηση ότι προστίθεται ένας επιπλέον όρος της $V_G Y_G$ προς εξέταση, ο όρος $\left(\frac{Y_{oc1}}{Y_{pfc}+Y_G} - \frac{Y_{oc2}}{Y_{pfc}+Y_G}\right)$ στην σχέση (5.7), γεγονός καθόλου ανησυχητικό καθώς είναι το άθροισμα των αγωγιμοτήτων του δικτύου και των παρασιτικών χωρητικοτήτων που δεν διαθέτουν πόλους στο θετικό ημιπίεδο και επομένως δεν συνεισφέρουν στην αστάθεια. Το κριτήριο GA που αυτή τη στιγμή στηρίζεται σε γενικευμένα κριτήρια των ΣΑΕ, αποτελεί πρόκληση καθώς θα μπορούσε να διερευνηθεί η πλήρης μαθηματική θεμελίωσή του.

Γ. Εμβάθυνση στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου για την εφαρμογή τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας:

Είναι γεγονός πως η θεωρία συστημάτων αυτομάτου ελέγχου είναι ένας ιδιαίτερα ανεπτυγμένος τομέας, που απλοποιεί τους υπολογισμούς και μπορεί να λειτουργήσει ως σύμμαχος στην αντιμετώπιση του φαινομένου. Η ανάλυση ΣΑΕ στηρίζεται στην παρατήρηση της συμπεριφοράς της εξόδου ενός συστήματος για δεδομένες εισόδους. Τα ηλεκτρικά συστήματα είναι συστήματα αυτομάτου ελέγχου συνήθως πολλαπλών εισόδων και επομένως χαρακτηρίζονται από πολλαπλές συναρτήσεις μεταφοράς των οποίων ο υπολογισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με επαλληλία.

Δεδομένης της ανάλυσης των κεφαλαίων 5 και 6, η ύπαρξη πόλων στο δεξί μιγαδικό ημιπίεδο σε ένα σύστημα το οποίο ορίζεται για όλες τις συχνότητες, εκφράζεται ως συνέλιξη στο χρόνο με έναν εκθετικό όρο που απειρίζεται, και επομένως για φραγμένη είσοδο δεν προκύπτει φραγμένη έξοδος. Κάτι τέτοιο όμως δεν παρατηρείται σε όλες τις πειραματικές διατάξεις στην βιβλιογραφία, καθώς σε κάποιες η αστάθεια εμφανίζεται ως αλλοίωση της ποιότητας της τάσης που μοιάζει με αρμονική παραμόρφωση [11] [18].

Διαφαίνεται λοιπόν, ότι είναι απαραίτητη όχι μόνο η εφαρμογή αλλά και η προσαρμογή της θεωρίας των ΣΑΕ στις δεσμεύσεις και στις ειδικές συνθήκες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ικανά να περιγράψουν τα παρατηρούμενα φαινόμενα και κατ'επέκταση να προβλέψουν την ευστάθεια στα ηλεκτρικά δίκτυα. Μια αρχική χαρτογράφηση και κατηγοριοποίηση των παρατηρούμενων φαινομένων με συλλογή και καταγραφή δεδομένων από πραγματικά δίκτυο, θα μπορούσε να βοηθήσει στην ανάλυση.

Δ. Αντιμετώπιση

Η αντιμετώπιση του φαινομένου δύναται να διακριθεί σε δυο κλάδους, στην θέσπιση ορίων όσον αφορά τους παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο και στην άμεση αντιμετώπιση με σύνδεση επιπλέον διατάξεων.

Φαίνεται με βάση τα παραπάνω ότι προκειμένου να αποσαφηνιστούν πλήρως οι παράγοντες που επιδρούν σε αυτή την κατηγορία της ευστάθειας, απαιτείται αρκετή μελέτη. Ωστόσο ακόμα και στην περίπτωση που κάτι τέτοιο τα επόμενα χρόνια πραγματοποιηθεί, οι διαχειριστές θα πρέπει να παρακολουθούν την κατάσταση του δικτύου και να προχωρήσουν στην σύνδεση διατάξεων όπως το active damping, σε περίπτωση εκδήλωσης του φαινομένου.

Όσον αφορά τις διατάξεις που δύνανται να χρησιμοποιηθούν για να επαναφέρουν το σύστημα σε ευστάθεια το active damping φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική. Ωστόσο, η Σχεδίαση Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου (ΣΣΑΕ) η οποία αποσκοπεί στην σχεδίαση ευσταθών συστημάτων, είναι επίσης ένα πολύ αναπτυγμένο πεδίο. Έχουν προταθεί πλήθος ελεγκτών οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την μεταφορά των πόλων του συστήματος στον αρνητικό ημιεπίπεδο με τέτοιο τρόπο ώστε τα περιθώρια ευστάθειας να είναι σημαντικά μεγάλα. Μια πρόταση επομένως θα ήταν η εμβάθυνση στους προτεινόμενους ελεγκτές των ΣΣΑΕ ώστε να εντοπιστούν πιθανές λύσεις που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν με επιτυχία στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας Μοντελοποίησης Δικτύου Διανομής με 2 Αντιστροφείς ΔΠ

```

clear all

clc

s=tf('s');
%Time delay
%delay=(((((T*s)^2)/12)- ((T*s)/2) +1)/(((T*s)^2)/12)+ ((T*s)/2) +1));
T=1.5e-4;
delay1=exp(-s*T);
delay= pade(delay1,2);

%%
%Transfer function PR Controller 1
Gpr1= kp1+((ki1*s)/((s^2)+((2*pi*50)^2)));
%Gpr1=tf([kp1, ki1, (kp1*((2*pi*50)^2))],[ 1, 0, ((2*pi*50)^2)]);

%Transfer function PR Controller 2
kp2=16;
ki2=3000;
Gpr2= kp2+((ki2*s)/((s^2)+((2*pi*50)^2)));

%PFG and Grid transfer functions
Ypfc=((20e-6)*s);
Yg=(1/(0.4+(s*(1.2e-3))));

%%
%inverter 1

%Element Values
%Zf1= Rf1+s*Lf1;
Lf1=1.5e-3;
Rf1=0.1;
%Zc1=(1/(s*4.7e-06));
C1=4.7e-06;
%Zg1=Rg1+s*Lg1;
Lg1=1.8e-3;
Rg1=0.2;

%Open loop output admittance
%Y201= ((Zc1+Zf1)/(Zf1*Zg1+Zg1*Zc1+Zc1*Zf1));
Y201= (((s^2)*Lf1*C1)+ (s*C1*Rf1)+ 1)/ (((s^3)*(Lg1*Lf1*C1)+
(s^2)*((C1*Lf1*Rg1)+ (C1*Lg1*Rf1))+ s*((C1*Rf1*Rg1)+Lg1+Lf1)+ Rg1+Rf1));
%Y2001=tf([ Lf1*C1, C1*Rf1,1],[Lg1*Lf1*C1,((C1*Lf1*Rg1)+
(C1*Lg1*Rf1)),((C1*Rf1*Rg1)+Lg1+Lf1), Rg1+Rf1]);

%Transfer function from Vpwm to i2
%Y2p1= ((Zc1)/(Zf1*Zg1+Zg1*Zc1+Zc1*Zf1));
Y2p1 = (1/(((s^3)*(Lg1*Lf1*C1)+ (s^2)*((C1*Lf1*Rg1)+ (C1*Lg1*Rf1))+
s*((C1*Rf1*Rg1)+Lg1+Lf1)+ Rg1+Rf1)));
%Y2p1=tf(1,[ (
Lg1*Lf1*C1),((C1*Lf1*Rg1)+(C1*Lg1*Rf1)),((C1*Rf1*Rg1)+Lg1+Lf1), Rg1+Rf1]);

%Output admittance of the first inverter
Yoc1= (Y201/(1+Y2p1*Gpr1*delay));
%%
%inverter 2

%Element Values
%Zf2= Rf2+s*Lf2;
Lf2=1.8e-3;
Rf2=0.1;

```

```

%Zc2=(1/(s*3e-06));
C2=3e-6;
%Zg2=Rg2+s*Lg2;
Lg2=1.3e-3;
Rg2=0.2;

%Open loop output admittance
%Y202= ((Zc2+Zf2)/(Zf2*Zg2+Zg2*Zc2+Zc2*Zf2));
Y202= (((s^2)*Lf2*C2)+ (s*C2*Rf2)+ 1)/ ((s^3)*(Lg2*Lf2*C2)+
(s^2)*((C2*Lf2*Rg2)+ (C2*Lg2*Rf2))+ s*((C2*Rf2*Rg2)+Lg2+Lf2)+ Rg2+Rf2));
%Y202=tf([ Lf2*C2, C2*Rf2,1],[Lg2*Lf2*C2,((C2*Lf2*Rg2)+
(C2*Lg2*Rf2)),((C2*Rf2*Rg2)+Lg2+Lf2), Rg2+Rf2]);

%Transfer function from Vpwm to i2
%Y2p2= (Zc2)/(Zf2*Zg2+Zg2*Zc2+Zc2*Zf2));
Y2p2=1/ ((s^3)*(Lg2*Lf2*C2)+ (s^2)*((C2*Lf2*Rg2)+ (C2*Lg2*Rf2))+
s*((C2*Rf2*Rg2)+Lg2+Lf2)+ Rg2+Rf2));
%Y2p2=tf(1,[Lg2*Lf2*C2,((C2*Lf2*Rg2)+ (C2*Lg2*Rf2)),((C2*Rf2*Rg2)+Lg2+Lf2),
Rg2+Rf2]);

%Output admittance of the first inverter
Yoc2= (Y202/(1+Y2p2*Gpr2*delay));
%%
%MLG Criterion
MLG1= Yoc1/(Yg+Ypfc+Yoc2);
MLG2= Yoc2/(Yg+Ypfc+Yoc1);

%nyquist
%nyquist(MLG1,'r',MLG2,'g')
%legend('MLG1','MLG2')
%bode
%bode(MLG1,'r',MLG2,'b--')
%legend('MLG1','MLG2')
%%
%GMLG Criterion
GMLG=(Yoc1+Yoc2)/(Yg+Ypfc);
nyquist(GMLG)
legend('GMLG ')
%bode(GMLG)
%grid on
%legend('GMLG')
%%
%Ytot criterion
Ytot=Yoc1+Yoc2+Yg+Ypfc;
Y1=Yoc1+Yoc2;
%nyquist
bode(Ytot)
legend('Ytot')

```


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας Μοντελοποίησης Δικτύου με Πολλαπλούς Αντιστροφείς ΔΠ/ Active damping/ Συνάρτηση Υπολογισμού Πραγματικού και Φανταστικού Μέρους

```

clear all
clc

s=tf('s');
%Time delay
%delay=(((((T*s)^2)/12)- ((T*s)/2) +1)/(((T*s)^2)/12)+ ((T*s)/2) +1));
T=1.5e-4;
delay1=exp(-s*T);
delay= pade(delay1,2);

%%
%Tranfer function PR Controler
kp1=18;
ki1=3000;
Gpr2= kp1+((ki1*s)/((s^2)+((2*pi*50)^2))); %PR controller
%%
%Active damping
ws=2*pi*1e04; %sampling freq
wad=0.1*ws; %syxnothta apokophs/cutoff freq
%wad=(0.1,0.2,0.5)*ws;

kad=15; %kad=0,5,15,35 %kad=15-26
Gpr1+=((kad*s)/(s+wad)); %active damper
Gpr3=Gpr2-Gpr1;%active damping technique

%PFG and Grid transfer functions
Ypfc=((20e-6)*s);
%Grid conditions
%Yg=(1/(0.4+(s*(0.3e-3))));
%Yg=(1/(0.4+(s*(0.6e-3))));
Yg=(1/(0.4+(s*(1.2e-3))));

%%
%Inverter
%Element Values
%Zf1= Rf1+s*Lf1;
Lf1=1.5e-3;
Rf1=0.1;
%Zc1=(1/(s*4.7e-06));
C1=4.7e-06;
%Zg1=Rg1+s*Lg1;
Lg1=1.8e-3;
Rg1=0.2;

%Open loop output admittance
%Y201= ((Zc1+Zf1)/(Zf1*Zg1+Zg1*Zc1+Zc1*Zf1));
Y201= (((s^2)*Lf1*C1)+ (s*C1*Rf1)+ 1)/ ((s^3)*(Lg1*Lf1*C1)+
(s^2)*((C1*Lf1*Rg1)+ (C1*Lg1*Rf1))+ s*((C1*Rf1*Rg1)+Lg1+Lf1)+ Rg1+Rf1));
%Y2001=tf([ Lf1*C1, C1*Rf1,1],[Lg1*Lf1*C1,((C1*Lf1*Rg1)+
(C1*Lg1*Rf1)),((C1*Rf1*Rg1)+Lg1+Lf1), Rg1+Rf1]);

%Transfer function from Vpwm to i2
%Y2p1= ((Zc1)/(Zf1*Zg1+Zg1*Zc1+Zc1*Zf1));
Y2p1 = (1/(((s^3)*(Lg1*Lf1*C1)+ (s^2)*((C1*Lf1*Rg1)+ (C1*Lg1*Rf1))+
s*((C1*Rf1*Rg1)+Lg1+Lf1)+ Rg1+Rf1)));

```

```

%Y2p1=tf(1,[(
Lg1*Lf1*C1),((C1*Lf1*Rg1)+(C1*Lg1*Rf1)),((C1*Rf1*Rg1)+Lg1+Lf1), Rg1+Rf1]);

%Output admittance of the first inverter
Yoc= (Y201/(1+Y2p1*Gpr3*delay));
Yoc1=(Y201/(1+Y2p1*Gpr2*delay));
MLG1=Yoc/(Yg+Ypfc+Yoc1);
MLG2=Yoc1/(Yg+Ypfc+Yoc);
nyquist(MLG1,MLG2)
legend('MLG1', 'MLG2 kad=15')

%Closed loop transfer functions
TFactivedamping= ((Gpr3*delay*Y2p1)/(1+(Gpr3*delay*Y2p1))); %activedamper
%pzmap(TFactivedamping)
%hold on

%MLG Ytot Criterion
%MLG1= Yoc/(Yg);
%GMLG= ((Yoc+Yoc1+Yoc1)/(Yg+Ypfc))
%Ytot=Yg+Yoc;
%nyquist(MLG1)
%legend('1 inverter,Ls=0.6mH')
%pzmap(MLG1)

Ytot= 2*Yoc1+Yg+Ypfc;
[num,den]=tfdata(Ytot);
syms s f;

f1 = poly2sym(num,s)/poly2sym(den,s);
f2 = subs(f1,s,1i*2*pi*f);
f2_real=(real(f2));
f2_imag=(imag(f2));

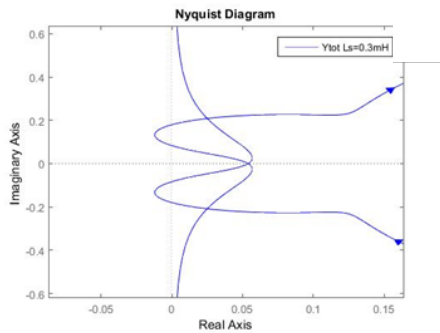
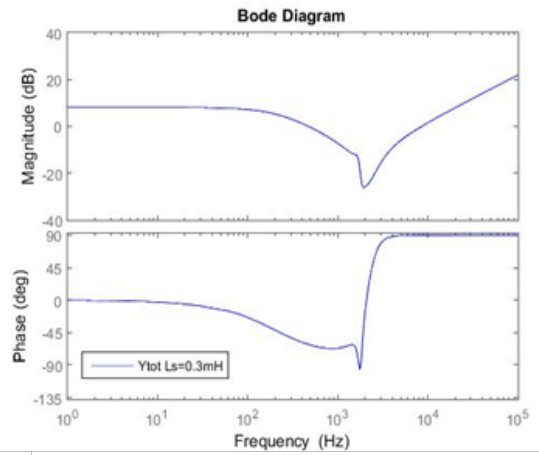
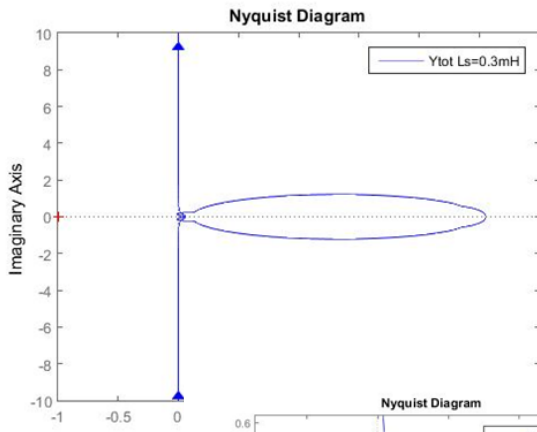
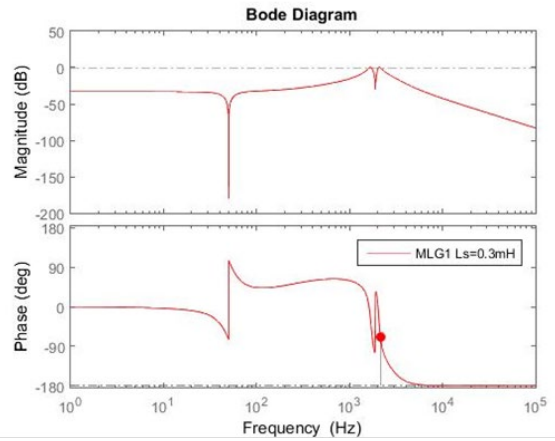
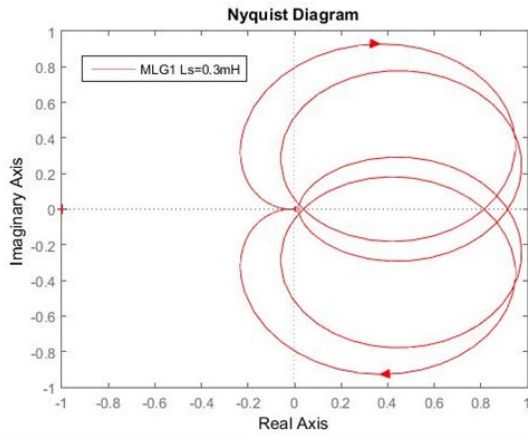
ezplot( f2_real, [1000, 1800])
hold on
axis([1000 1800 -0.5 0.5])
legend('Without active damping','With active damping')

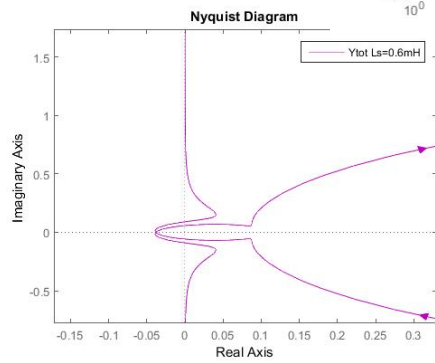
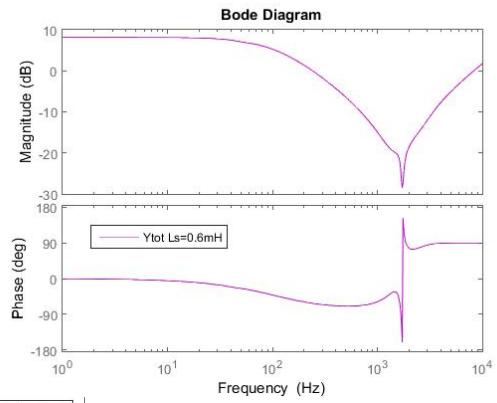
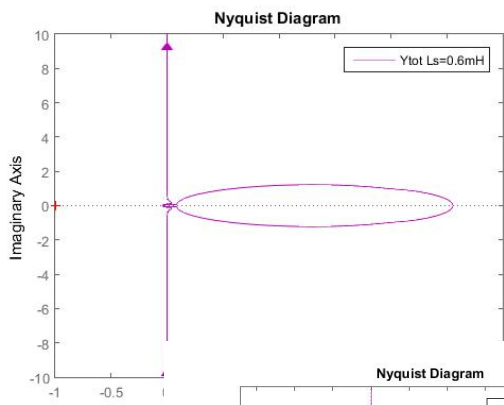
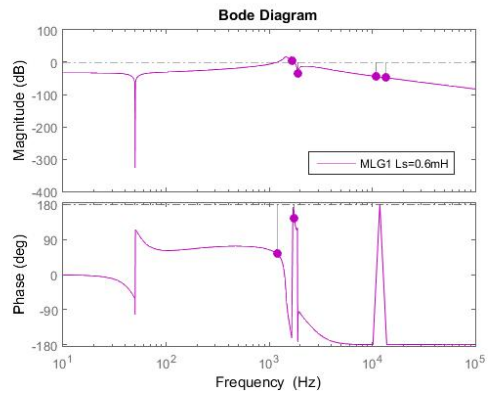
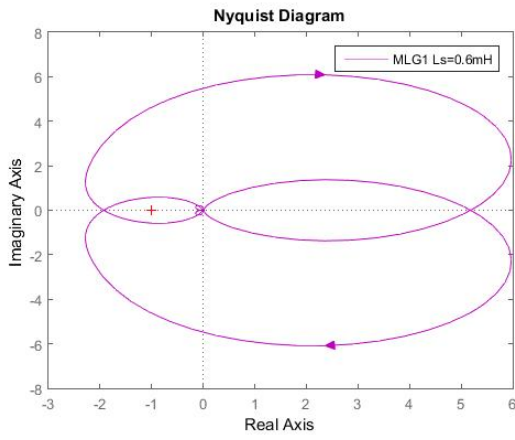
```

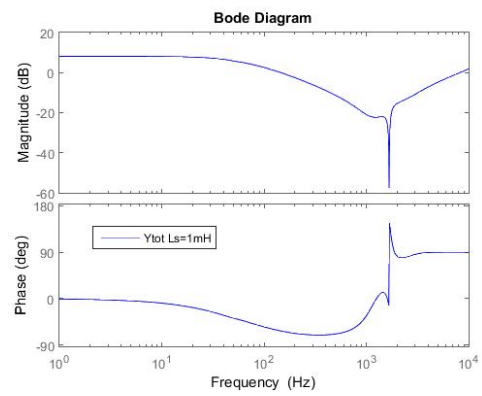
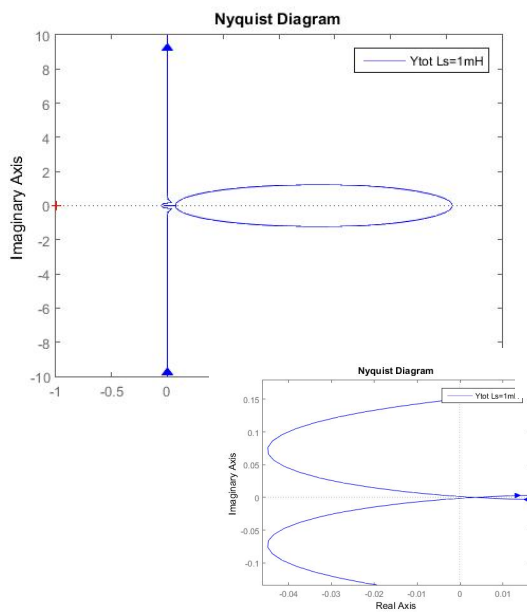
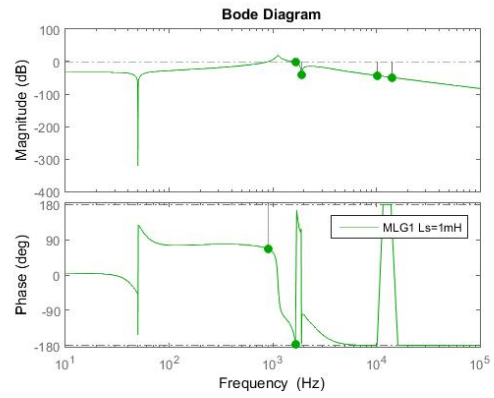
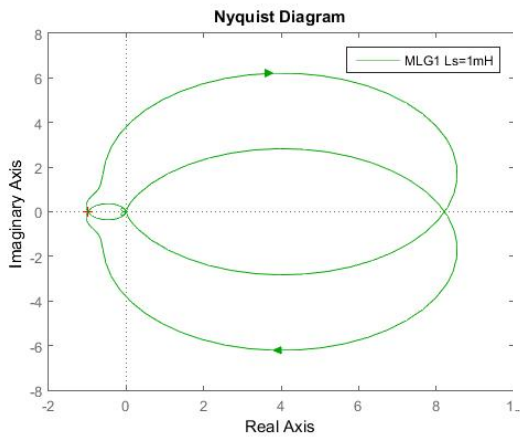
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Πλήρη Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ (I)

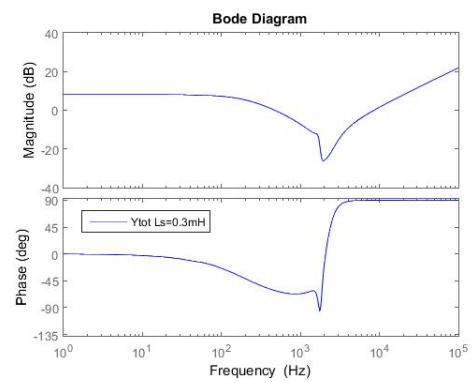
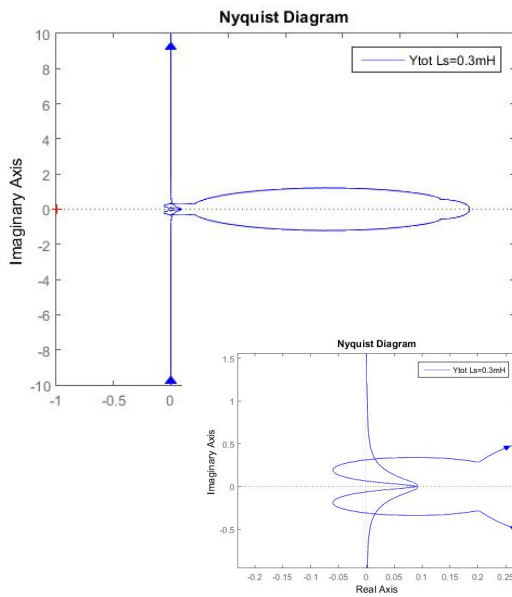
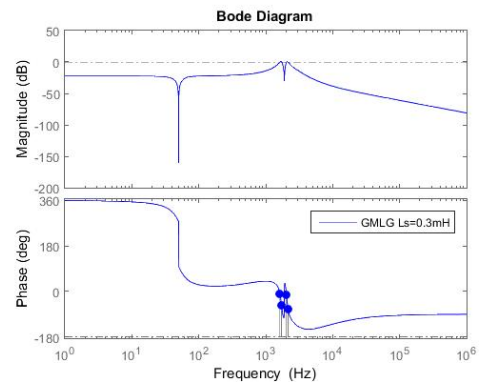
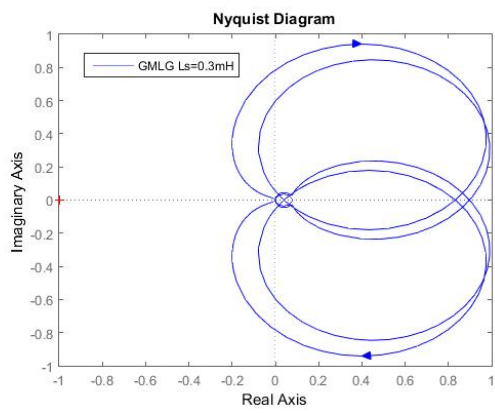
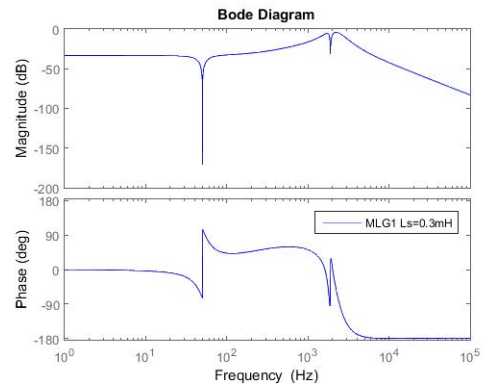
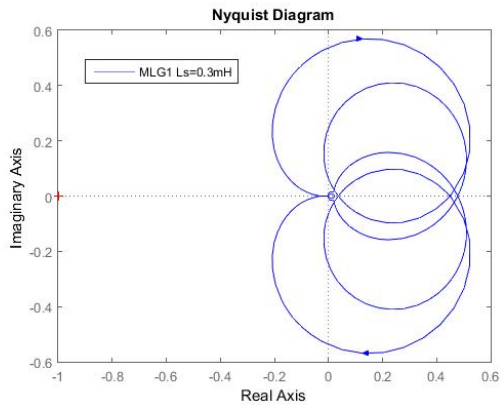
Σύστημα ενός συνδεδεμένου αντιστροφέα ΔΠ

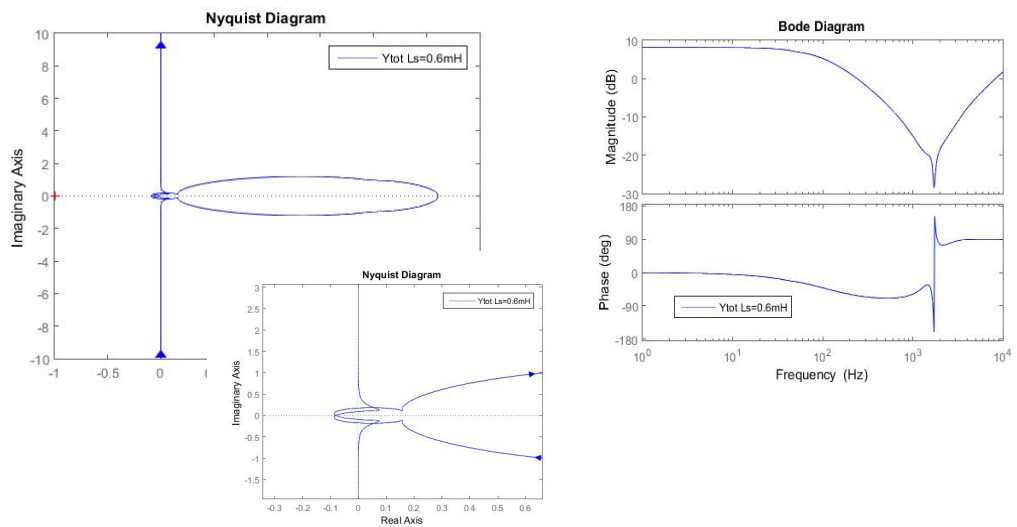
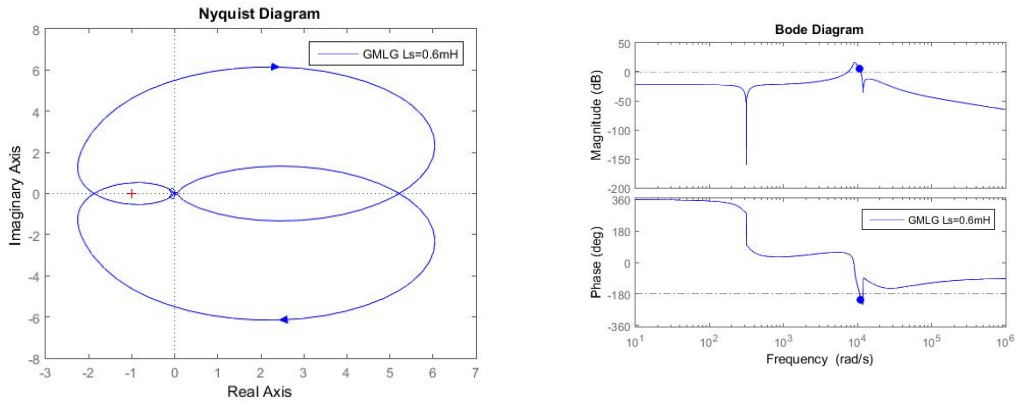
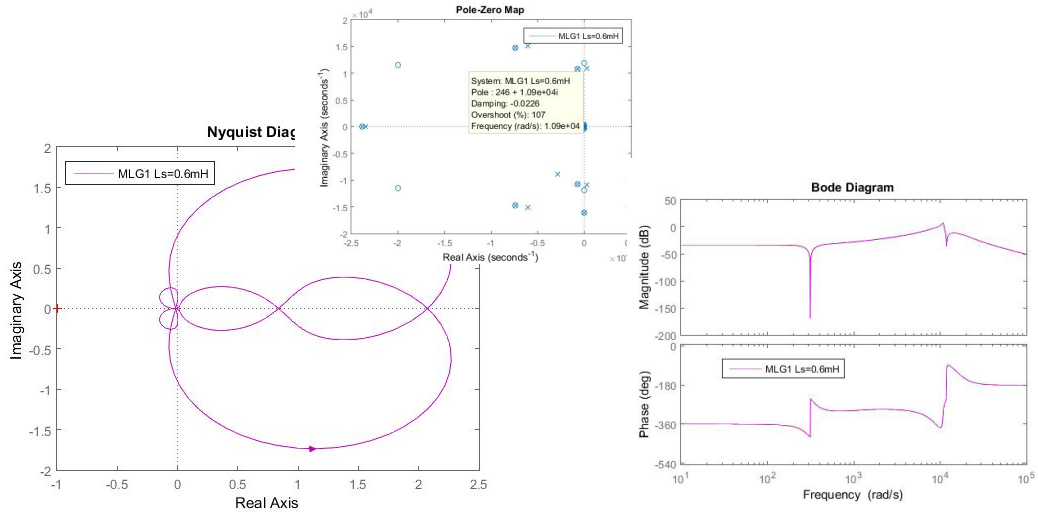


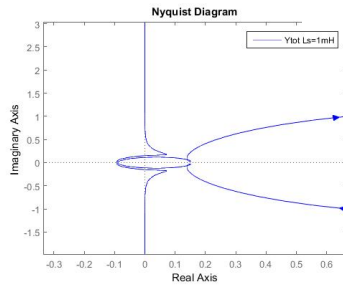
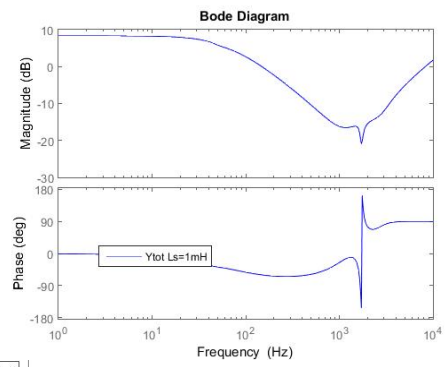
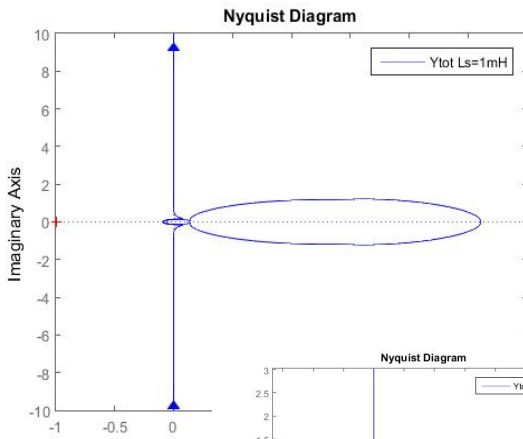
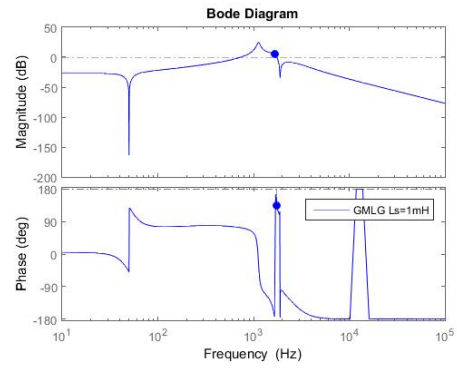
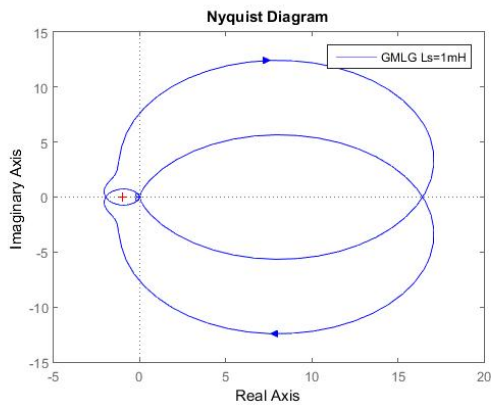
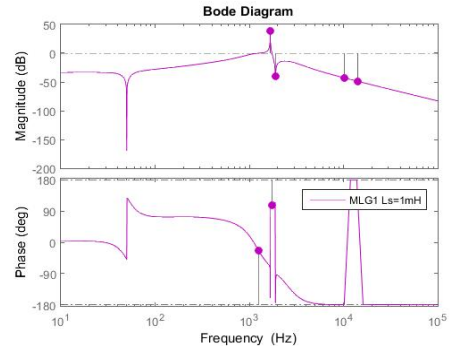
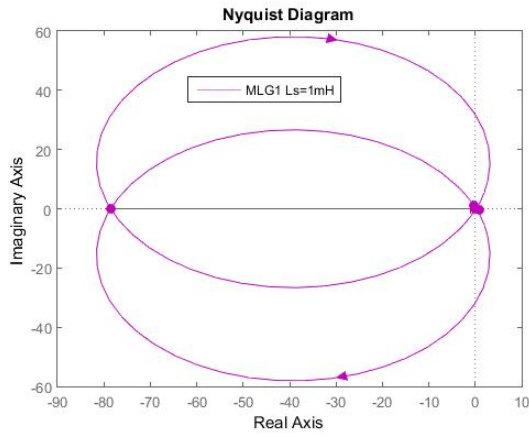




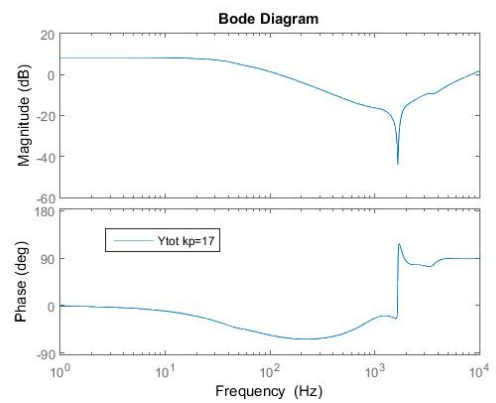
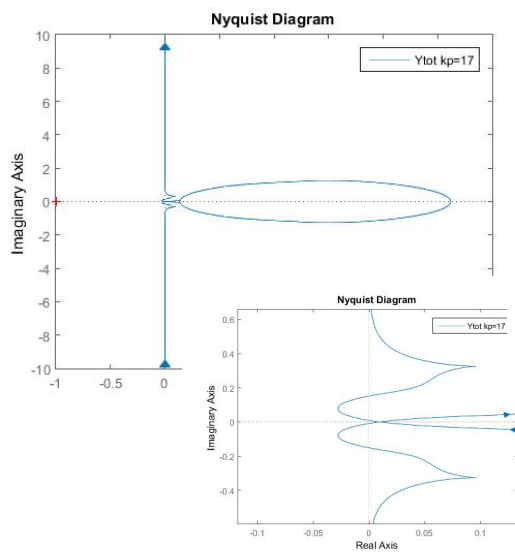
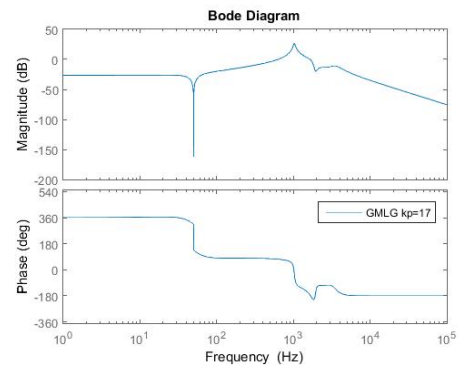
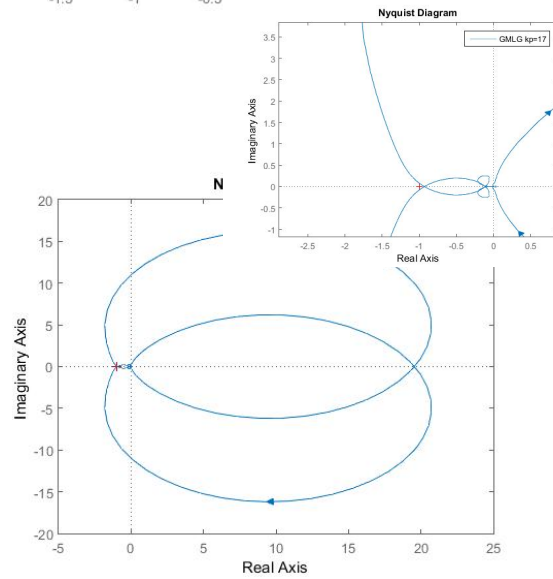
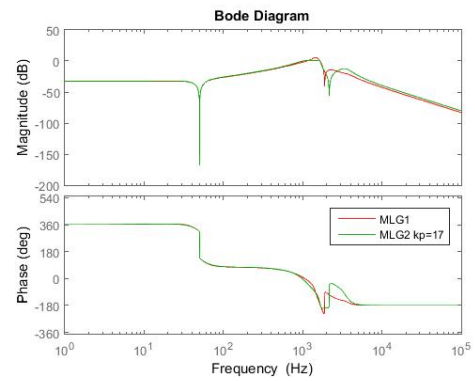
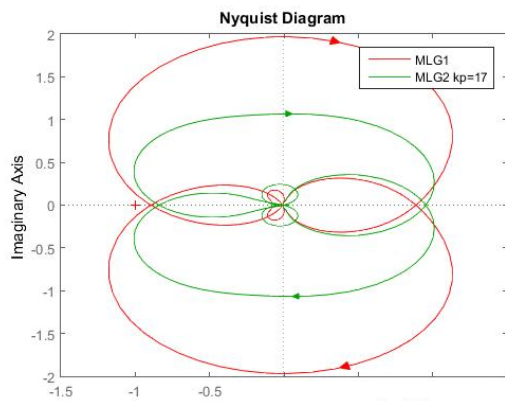
Σύστημα δυο συνδεδεμένων αντιστροφών ΔΠ

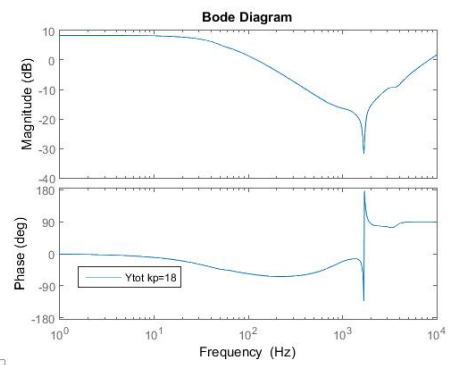
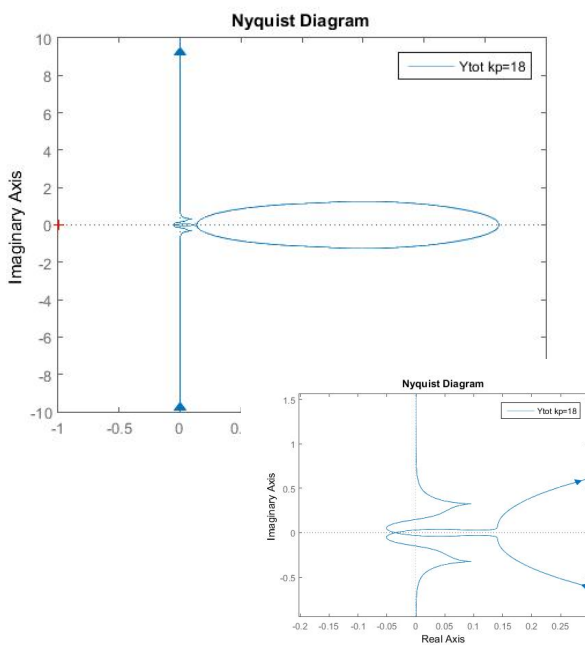
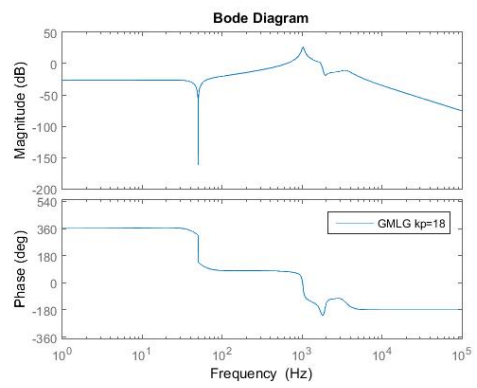
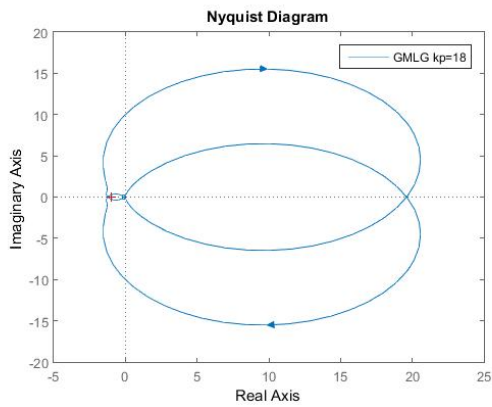
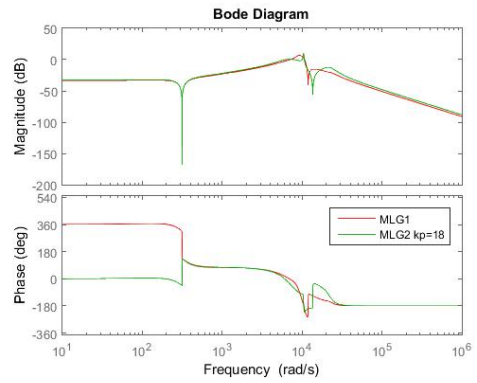
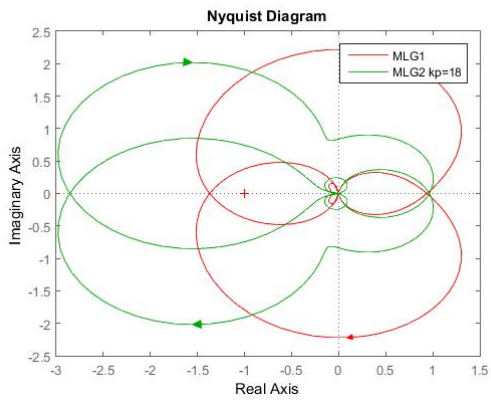




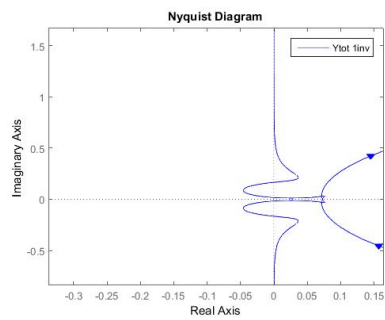
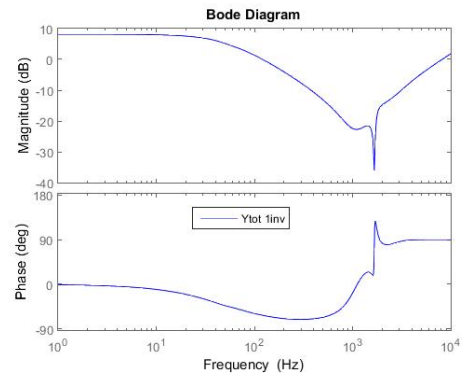
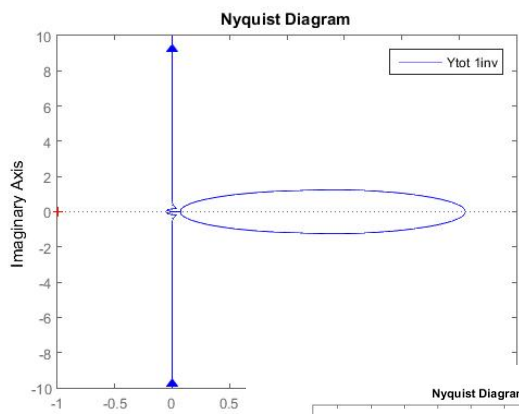
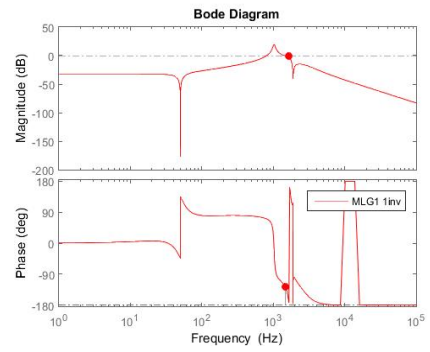
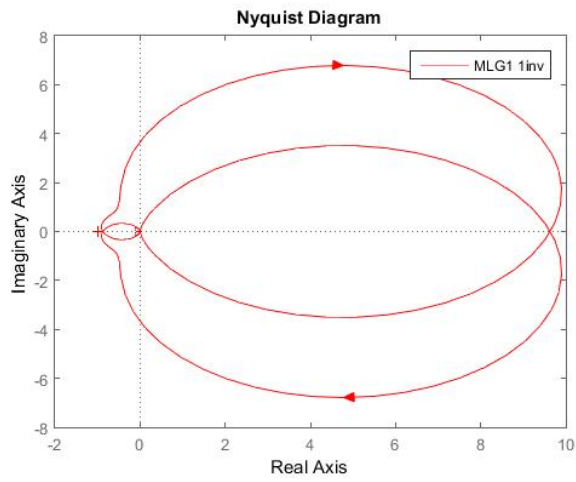


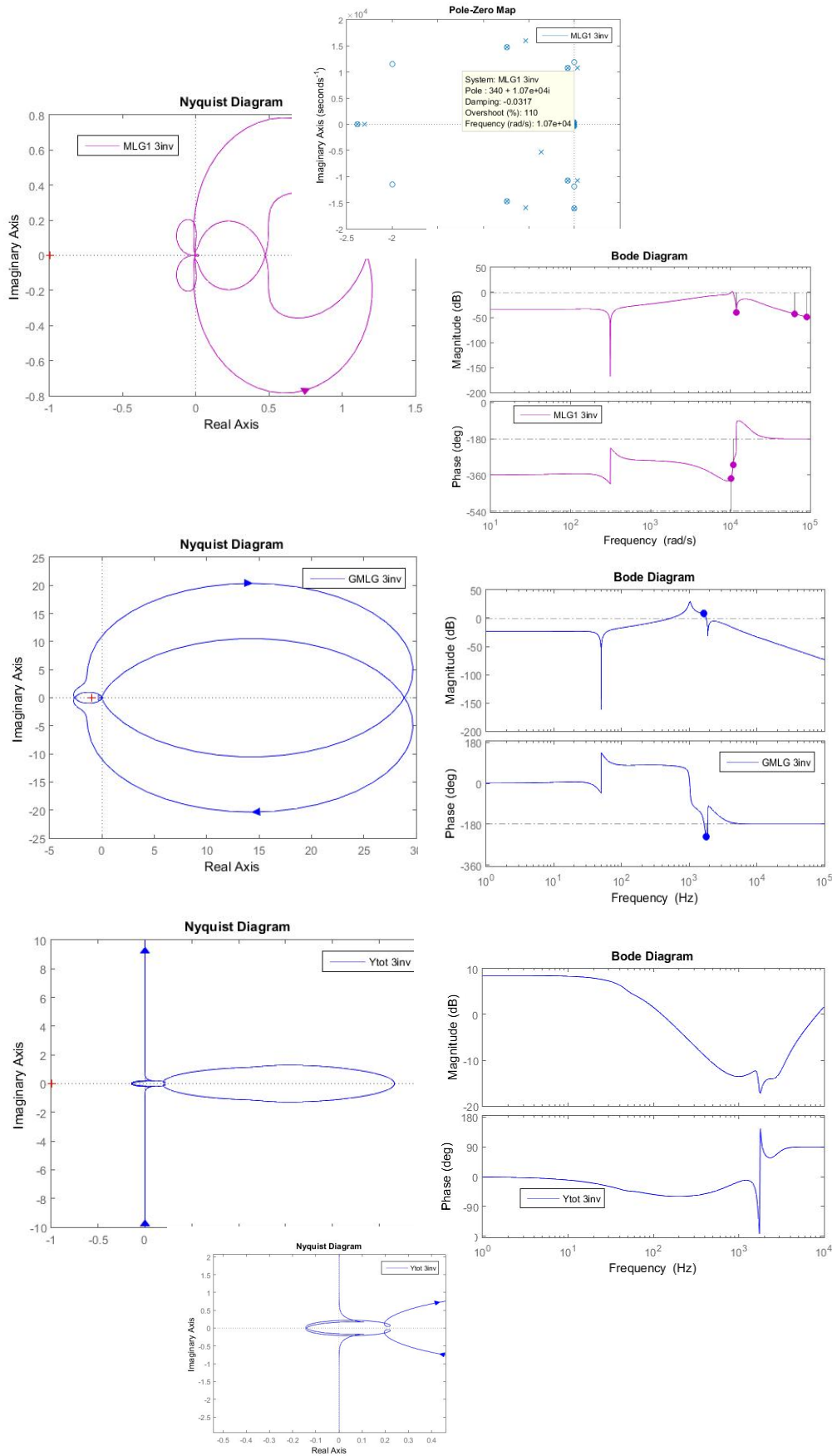
Περίπτωση (II)





Περίπτωση (III)





ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Υπουργείο Ενέργειας, “Μακροχρόνια Στρατηγική για το 2050 -.” <https://ypen.gov.gr/energeia/esek/lts/> (accessed Feb. 07, 2021).
- [2] Τομείς Δραστηριότητας “ ΔΕΗ Α.Ε.” <https://www.dei.gr/el/i-dei/i-etairia/tomeis-drastiriotitas> (accessed Feb. 07, 2021).
- [3] “ΥΠΕΝ Αρχική -.” <https://ypen.gov.gr/> (accessed Feb. 07, 2021).
- [4] “Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης Α.Ε. - ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε.” <https://www.dapeep.gr/> (accessed Feb. 07, 2021).
- [5] N. Hatziargyriou et al, “Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies.” https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/technical-reports/PES_TP_TR77_PSDP_stability_051320.html
- [6] P. Kotsampopoulos, N. Hatziargyriou, B. Bletterie, and G. Lauss, “Review, analysis and recommendations on recent guidelines for the provision of ancillary services by Distributed Generation,” in *Proceedings - 2013 IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems, IWIES 2013*, 2013, pp. 185–190, doi: 10.1109/IWIES.2013.6698583.
- [7] M. K. Bakhshizadeh *et al.*, “Harmonic modelling, propagation and mitigation for large wind power plants connected via long HVAC cables: Review and outlook of current research,” in *2016 IEEE International Energy Conference, ENERGYCON 2016*, Jul. 2016, doi: 10.1109/ENERGYCON.2016.7513982.
- [8] TECHNICAL BROCHURE CIGRE N. SHORE, Convenor , “AC side harmonics and appropriate harmonic limits for VSC HVDC.” <https://e-cigre.org/publication/754-ac-side-harmonics-and-appropriate-harmonic-limits-for-vsc-hvdc> (accessed Feb. 05, 2021).
- [9] X. Wang, F. Blaabjerg, M. Liserre, Z. Chen, J. He, and Y. Li, “An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 7, pp. 3318–3329, Jul. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2278716.
- [10] X. Wang and F. Blaabjerg, “Harmonic Stability in Power Electronic-Based Power Systems: Concept, Modeling, and Analysis,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2858–2870, May 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2812712.

- [11] W. Cao, S. Wang, H. Kang, K. Liu, Q. Wang, and J. Zhao, “Inherent interaction analysis for harmonic oscillations in the multi-paralleled grid-connected inverter system using a sum type criterion: Global admittance (GA),” *IEEE Access*, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2964330.
- [12] P. Kotsampopoulos *et al.*, “EMC Issues in the Interaction between Smart Meters and Power-Electronic Interfaces,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 2, pp. 822–831, Apr. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2561238.
- [13] X. Wang, F. Blaabjerg, and P. C. Loh, “Proportional derivative based stabilizing control of paralleled grid converters with cables in renewable power plants,” in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2014*, Nov. 2014, pp. 4917–4924, doi: 10.1109/ECCE.2014.6954075.
- [14] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, “Power Electronics Converters, Applications and Design” *Second Edition TK7881.15.M64 1995 621.317-dc20*.
- [15] J. Xu, B. Zhang and S. Xie, “Stability and improvement of ZCX-filtered inverters using only grid current feedback active damping for weak grid applications, ” 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, 2018, pp. 3301-3306, doi: 10.1109/APEC.2018.8341576.
- [16] X. Wang, F. Blaabjerg, and W. Wu, “Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-based power system,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 12, pp. 6421–6432, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2014.2306432.
- [17] K. Ogata, “Modern Control Engineering 5th Edition”. 2002 ISBN 10: 0-13-615673-8 ISBN 13: 978-0-13-615673-4
- [18] Σ. Α. Παπαθανασίου, “ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΝ Δ ΕΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ Δ ΙΚΤΥΑ Δ ΙΑΝΟΜΗΣ,” 2003.
- [19] W. Cao, K. Liu, S. Wang, H. Kang, D. Fan, and J. Zhao, “Harmonic stability analysis for multi-parallel inverter-based grid-connected renewable power system using global admittance †,” *Energies*, vol. 12, no. 14, 2019, doi: 10.3390/en12142687.
- [20] J. Sun, “Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 11, pp. 3075–3078, 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2136439.

- [21] Q. Ye, R. Mo, Y. Shi, and H. Li, “A unified Impedance-based Stability Criterion (UIBSC) for paralleled grid-tied inverters using global minor loop gain (GMLG),” in *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*, Oct. 2015, pp. 5816–5821, doi: 10.1109/ECCE.2015.7310476.
- [22] X. Wang, F. Blaabjerg, and P. C. Loh, “Passivity-Based Stability Analysis and Damping Injection for Multiparalleled VSCs with LCL Filters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 2017, doi: 10.1109/TPEL.2017.2651948.
- [23] J. Dannehl, M. Liserre, and F. W. Fuchs, “Filter-based active damping of voltage source converters with LCL filter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 8, pp. 3623–3633, Aug. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2081952.
- [24] J. He, Y. W. Li, D. Bosnjak, and B. Harris, “Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 234–246, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2195032.
- [25] X. Wang, F. Blaabjerg, and P. C. Loh, “Grid-current-feedback active damping for LCL resonance in grid-connected voltage-source converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 213–223, Jan. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2411851.
- [26] M. Hanif, V. Khadkikar, W. Xiao, and J. L. Kirtley, “Two degrees of freedom active damping technique for LCL filter-based grid connected PV Systems,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 6, pp. 2795–2803, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2274416.
- [27] Stojiljković, Milena & Petrovic, Sanja & Savic, Sasa & Stojiljkovic, Stanisa & Todorović, Bratislav. (2017). Removal of As³⁺ Ions from Water Solutions in Column by Adsorption on Activted Carbon. 107-115. 10.18690/978-961-286-064-6.11.