



Παραδοτέο Π3.1

Έκθεση σχετικά με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την ευστάθεια του συστήματος

για το ερευνητικό έργο

«Πρωτοβουλία (Direct Current in Ship Initiative - DC-Ship)»

(πράξη ΑΡΙΣΤΕΙΑ - Ι, Κωδ. Έργου ΓΓΕΤ: 987, Κωδ. Έργου ΕΔΕΙΛ/ΕΜΠ: 68/1151)





ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΠΡΑΞΗΣ

Το συγκεκριμένο έργο στοχεύει στη διεξαγωγή έρευνας για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών και την ανάπτυξη αντίστοιχων μεθόδων αντιμετώπισης. Τα συστήματα ΣΡ εξαλείφουν την κυκλοφορία αέργου ισχύος και τις σχετικές απώλειες κι έτσι η εφαρμογή τους μπορεί να βελτιώσει τους δείκτες απόδοσης του πλοίου EEDI και EEOI. Ωστόσο, θα πρέπει πρώτα να διερευνηθεί μια σειρά θεμάτων, τα οποία σχετίζονται κυρίως με τη λειτουργία του συστήματος κατά τη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση, όπως η ευστάθεια τάσης, η ποιότητα ισχύος και τα σφάλματα. Κύριο στοιχείο καινοτομίας του συγκεκριμένου έργου αποτελεί η ενδεδειγμένη διερεύνηση των θεμάτων τα οποία σχετίζονται με την εφαρμογή συστημάτων διανομής ΣΡ σε εμπορικά πλοία και η ανάπτυξη λύσεων στοχευμένων στην εξοικονόμηση ενέργειας. Για το σκοπό αυτό προτείνεται ένα ερευνητικό σχέδιο το οποίο συνδυάζει μια πληθώρα επιστημονικών πεδίων του ηλεκτρολόγου και του ναυπηγού μηχανικού. Κατά τη διάρκεια της ερευνητικής δράσης τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων οι οποίες θα πραγματοποιηθούν, θα ενισχυθούν από αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα σε δύο πρότυπες διατάξεις. Μία για την εξομοίωση του δικτύου EP του πλοίου και μία για το αντίστοιχο δίκτυο ΣΡ. Οι επιδόσεις τους κατά τη λειτουργία θα καταγραφούν και θα συγκριθούν σε ό, τι αφορά την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας. Οι μελέτες αυτές θα συμπληρωθούν από αναλύσεις Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost, LCC) του πλοίου όταν αυτό χρησιμοποιεί δίκτυο ΣΡ, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κτήσης, λειτουργίας και συντήρησης. Το έργο υποδιαιρείται σε επτά (7) ενότητες έρευνας.

Η ενότητα εργασίας Ε.Ε. 3 αναφέρεται σε μελέτες ανάλυσης λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργεί με ΣΡ, ενώ, ειδικότερα, το παραδοτέο Π3.1 αποτελεί την έκθεση των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για την ηλεκτρική ευστάθεια του εν λόγω συστήματος. Παρ' ότι το κύκλωμα που επιλέχθηκε για ανάλυση/προσομοίωση είναι σχετικά, απλό όσον αφορά τα στοιχεία του, η συμπεριφορά του όσον αφορά τα φαινόμενα ευστάθειας, μοιάζει αρκετά με αυτή ενός δικτύου μεγαλύτερης κλίμακας. Εξάλλου, σημειώνεται ότι η διερεύνηση τέτοιων φαινομένων θα συνεχιστεί κατά την διάρκεια εκτέλεσης του έργου και σε πιο σύνθετης κλίμακας δίκτυα.





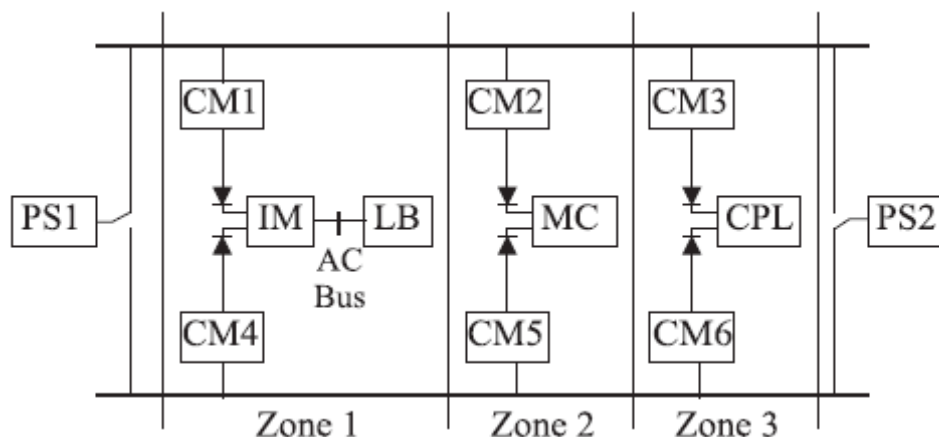
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

1. Γενικά

Το μοντέλο του ηλεκτρολογικού συστήματος ενός πλοίου περιλαμβάνει ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το δίκτυο διανομής της ισχύος καθώς και όλες τις ηλεκτρικές καταναλώσεις.

Η τάση που επικρατεί τα τελευταία χρόνια για πλήρη αυτοματοποίηση, την αυξανόμενη ανάγκη τροφοδότησης ειδικών φορτίων (RADAR, οπλικών συστημάτων κ.α.), χρήση ηλεκτρικής πρόωσης και υψηλή διαθεσιμότητα μετά από βλάβες επιτυγχάνεται με την κατακόρυφη διανομή της ηλεκτρικής ισχύος και με τη χρήση διαφορετικών και ανεξάρτητων μεταξύ τους συστημάτων παραγωγής ισχύος. Τα κυκλώματα και οι διατάξεις των συστημάτων αυτών είναι τοποθετημένα κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να περιορίζεται η συνέπεια μίας βλάβης στο μικρότερο κατά το δυνατό τμήμα του συστήματος. Το πλοίο είναι διαιρεμένο σε κατακόρυφους τομείς οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους σε ότι αφορά την παροχή ηλεκτρικής ισχύος. Για την υλοποίηση ενός δικτύου με βάση τις απαιτήσεις που περιγράφηκαν παραπάνω (παράλληλη και ανεξάρτητη λειτουργία διαφορετικών συστημάτων παραγωγής, διασύνδεση ειδικών φορτίων με το σύστημα, κατακόρυφη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας) μοντελοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (Integrated Power Systems) με τη χρήση συστήματος διανομής μέσης τάσης συνεχούς ρεύματος (Medium Voltage Direct Current) και ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος (Converter Modules) για τη διασύνδεση των πηγών ηλεκτρικής ενέργειας (Power Source) με τα φορτία (Constant Power Load). Παρακάτω στο σχήμα 1 παρουσιάζεται το μοντέλο του ηλεκτρολογικού δικτύου ενός πλοίου με ολοκληρωμένο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.





Εικόνα 1 : ΣΗΕ Πλοίου με DC διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

2. Ευστάθεια

2.1 Γενικά στοιχεία

Ένα σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με DC τάση απαιτεί τη χρήση μεγάλου αριθμού ηλεκτρονικών μετατροπών. Η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος σε συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται πλέον όλο και συχνότερη λόγω της δυνατότητας τους να παρέχουν μεγάλη ευελιξία ρύθμισης των παραμέτρων εξόδου τους και των μικρών απωλειών που πλέον έχει το στάδιο της μετατροπής. Για παράδειγμα ένας σύγχρονος DC/DC μετατροπέας μπορεί να διατηρεί μια αρκετά σταθερή τάση εξόδου σχεδόν ανεξάρτητα από τις διαταραχές που δέχεται στην είσοδο του. Από αυτή τη σκοπιά, δηλαδή την παραγωγή σταθερής τάσης εξόδου το αποτέλεσμα είναι αρκετά επιθυμητό. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν και κάποιες ανεπιθύμητες συνέπειες. Συγκεκριμένα, επειδή οι μετατροπείς έχουν πολύ υψηλή απόδοση και ιδανική ρύθμιση της κυματομορφή εξόδου, στην ανάλυση του συστήματος φαίνονται σα φορτία σταθερής ισχύος από την πλευρά της εισόδου. Τα φορτία σταθερής ισχύος, όπως θα αναλυθεί παρακάτω είναι παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν σε αστάθεια ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα άλλο πρόβλημα που δημιουργείται σε ένα μοντέλο όπου περιέχονται αρκετοί μετατροπείς, είναι πως ενώ ο κάθε ένας έχει ξεχωριστά ρυθμισμένο σύστημα ελέγχου, σα σύνολο οι ρυθμιστές των μετατροπών να ανταγωνίζονται πράγμα το οποίο επίσης μπορεί να οδηγήσει ένα σύστημα σε αστάθεια. Συνεπώς, η ανάλυση της ευστάθειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με ζυγό DC μέσης τάσης στη διανομή το οποίο χρησιμοποιεί μετατροπείς ισχύος κρίνεται αναγκαία.



2.2 Ανάλυση ευστάθειας

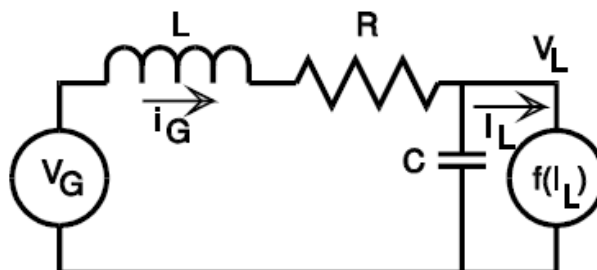
Η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως η δυνατότητα ενός δικτύου για μια δεδομένη αρχική συνθήκη λειτουργίας, να καταφέρει να ισορροπήσει σε μια νέα κατάσταση λειτουργίας μετά από μια οποιαδήποτε διαταραχή σε πεπερασμένο χρόνο. Η ευστάθεια ενός συμβατικού AC δικτύου εξαρτάται κυρίως από τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των στοιχείων του και από τη λειτουργία των σύγχρονων μηχανών και όχι τόσο από τα ηλεκτρονικά ισχύος που υπάρχουν, σε αντίθεση με ένα αντίστοιχο σύστημα το οποίο έχει DC διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνεπώς, προκειμένου να διασφαλιστεί η ευσταθής λειτουργία του υπό μελέτη δικτύου για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια μαθηματική ανάλυση ενός μοντέλου το οποίο να προσομοιάζει ένα δίκτυο με DC διανομή. Το ηλεκτρικό κύκλωμα που επιλέχθηκε για ανάλυση και μοντελοποίηση είναι ένα απλοποιημένο δίκτυο το οποίο όμως περιέχει όλα τα σημαντικά στοιχεία τα οποία θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ευστάθεια του. Έτσι ουσιαστικά γίνεται μια προκαταρκτική ανάλυση που θα κάνει ευκολότερη μελλοντική εργασία σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η πιο άμεση μελέτη ζητημάτων ευστάθειας σε σχέση με την απόδοση και τη λειτουργία ενός κυκλώματος είναι στο πεδίο του χρόνου γι αυτό και επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη μελέτη.

Το υπό ανάλυση κύκλωμα περιέχει μια πηγή DC τάσης V_g (την τάση δηλαδή που υπάρχει στο δίκτυο διανομής και δημιουργήθηκε είτε από ανόρθωτικές διατάξεις είτε από πηγές συνεχούς ρεύματος όπως μπαταρίες/κυψέλες καυσίμου κτλ), μια επαγωγική αντίδραση L η οποία προσομοιάζει το άθροισμα των επαγωγών των φίλτρων και των γραμμών, την ωμική αντίσταση της γραμμής R , έναν πυκνωτή C ο οποίος είναι ο πυκνωτής εξομάλυνσης της DC τάσης και ένα μη γραμμικό φορτίο το οποίο αναπαρίσταται σα μια πηγή τάσης εξαρτημένη από το ρεύμα της γραμμής. Το μη γραμμικό φορτίο μπορεί να είναι ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος δηλαδή ένας DC/DC μετατροπέας ή ένας DC/AC μετατροπέας για την οδήγηση ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Το κύκλωμα μπορεί να παρασταθεί όπως στο σχήμα 2.



Παραδοτέο Π3.1



Εικόνα 2 : Παράσταση του υπο μελέτη απλοποιημένου δικτύου

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι οι εξής :

$$i_G = i_L + C \frac{df(i_L)}{dt}$$

$$V_G = f(i_L) + i_G R + L \frac{di_G}{dt}$$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση (1) παίρνουμε :

$$\frac{di_G}{dt} = \frac{di_L}{dt} + C \frac{d^2 f(i_L)}{dt^2}$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (3) στην (2) έχουμε ως εξής :

$$V_G = f(i_L) + R \left(i_L + C \frac{df(i_L)}{dt} \right) + L \left(\frac{di_L}{dt} + C \frac{d^2 f(i_L)}{dt^2} \right)$$

Οι παράγωγοι της $f(i_L)$ μπορούν να αναπτυχθούν με χρήση του κανόνα του Leibniz ως ακολούθως :

$$\frac{df(i_L)}{dt} = \frac{df(i_L)}{di_L} \frac{di_L}{dt} \quad , \quad \frac{d^2 f(i_L)}{dt^2} = \frac{df(i_L)}{di_L} \frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{d^2 f(i_L)}{di_L^2} \left(\frac{di_L}{dt} \right)^2$$

Έτσι η εξίσωση της τάσης V_G με την αντικατάσταση γίνεται:

$$V_G = f(i_L) + R \left(i_L + C \frac{df(i_L)}{di_L} \frac{di_L}{dt} \right) + L \left[\frac{di_L}{dt} + C \left(\frac{df(i_L)}{di_L} \frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{d^2 f(i_L)}{di_L^2} \left(\frac{di_L}{dt} \right)^2 \right) \right]$$

Η μόνιμη κατάσταση της λύσης της εξίσωσης 7 μπορεί να δοθεί ως εξής : Θέτοντας όλες τις χρονικές παραγώγους ίσες με το 0. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παρακάτω λύση:

$$V_G = f(i_{L0}) + i_{L0}R$$

Στη συνέχεια ο μη γραμμικός όρος $f(i_L)$ μπορεί να αναπτυχθεί κατά Taylor γύρω από τον όρο i_{L0} όπως φαίνεται:

$$f(i_L) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(i_{L0})}{n!} (i_L)^n = f(i_{L0}) + \frac{df(i_{L0})}{di_L} (i_L - i_{L0}) + \dots$$

Ομως επειδή στη μόνιμη κατάσταση ισχύει $i_L = i_{L0} + i$ και λόγω της μικρης μεταβολής του ρεύματος επίσης ισχύει $di_L \cong di_{L0}$ έτσι το ανάπτυγμα Taylor μπορεί να γραφεί ως:

$$f(i_L) = f(i_{L0}) + \frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} i + \dots$$

Διατηρώντας μόνο τους 2 σημαντικότερους όρους της σειράς Taylor και αντικαθιστώντας στην εξίσωση (7) παίρνουμε:

$$0 = \frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} i + R \left(i + C \frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} \frac{di}{dt} \right) + L \left[\frac{di}{dt} + C \left(\frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} \frac{d^2i}{dt^2} + \frac{d^2f(i_{L0})}{di_{L0}^2} \left(\frac{di}{dt} \right)^2 \right) \right]$$

$$\Leftrightarrow LC \frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} \frac{d^2i}{dt^2} + \left(RC \frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} + L \right) \frac{di}{dt} + \left(\frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} + R \right) i + LC \frac{d^2f(i_{L0})}{di_{L0}^2} \left(\frac{di}{dt} \right)^2 = 0$$

Θεωρώντας ότι ο μη γραμμικός όρος είναι πολύ μικρός $LC \frac{d^2f(i_{L0})}{di_{L0}^2} \left(\frac{di}{dt} \right)^2 \rightarrow 0$ το εξαγόμενο αποτέλεσμα είναι η παρακάτω γραμμική διαφορική εξίσωση 2^{ης} τάξης:

$$LC \frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} \frac{d^2i}{dt^2} + \left(RC \frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} + L \right) \frac{di}{dt} + \left(\frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} + R \right) i = 0$$

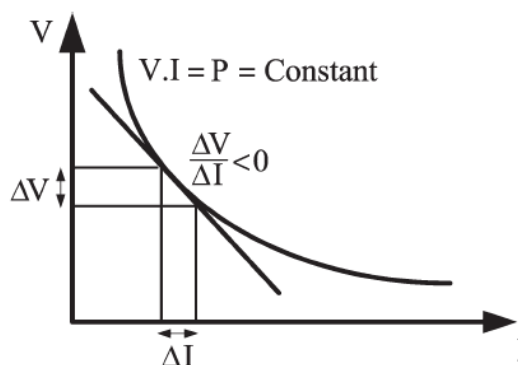
Σύμφωνα με τη θεωρία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, κύρια συνθήκη για την ευστάθεια του συστήματος είναι ότι όλοι οι συντελεστές θα πρέπει να έχουν το ίδιο πρόσημο. Αν το φορτίο έχει θετικό ρυθμό μεταβολής της αντίστασης του $\frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} > 0$ τότε όλοι οι συντελεστές είναι θετικοί οπότε το σύστημα είναι ευσταθές. Αν το φορτίο έχει

αρνητικό ρυθμό μεταβολής της αντιστάσης του, τότε αφού ο όρος $LC \frac{df(i_{L0})}{di_{L0}}$ είναι αρνητικός οι συνθήκες για την ευστάθεια είναι οι παρακάτω :

$$RC \frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} + L < 0 \text{ and}$$

$$\frac{df(i_{L0})}{di_{L0}} + R < 0$$

Όπως είχε αναφερθεί παραπάνω, οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος και οι οδηγοί ηλεκτρικών κινητήρων, σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της «σφιχτής» τους ρύθμισης και των μικρών απωλειών συμπεριφέρονται σα φορτία σταθερής ισχύος (CPL) και παρουσιάζουν το φαινόμενο της αρνητικής διαφορικής αντίστασης (εικόνα 3) από την πλευρά των ακροδεκτών της εισόδου. Αυτό το φαινόμενο έχει αρνητικές συνέπειες στην ποιότητα ισχύος του συστήματος και στην ευστάθεια του. Ένα παράδειγμα φορτίου σταθερής ισχύος από την πλευρά της εισόδου, είναι ένας DC/AC μετατροπέας, ο οποίος οδηγεί έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Στο μετατροπέα το ρεύμα εισόδου μειώνεται ή αυξάνεται όταν η εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του αντίστοιχα αυξάνεται ή μειώνεται. Σαν αποτέλεσμα, τα φορτία σταθερής ισχύος παρουσιάζουν χαρακτηριστικά αρνητικής διαφορικής αντίστασης όπως φαίνεται και στην παρακάτω γραφική παράσταση.



Negative impedance behavior of constant power loads.

Με βάση τα παραπάνω, φαίνεται πως είναι αρκετά σημαντικό στην ανάλυση ευστάθειας που πραγματοποιήθηκε, να αντιμετωπιστεί το μη γραμμικό φορτίο σα φορτίο σταθερής ισχύος. Όπως είχε οριστεί παραπάνω, η εξαρτημένη πηγή τάσης $f(i_L)$ αναπαριστά έναν μετατροπέα ισχύος.

Αν θεωρηθεί ότι ο μετατροπέας έχει αυστηρό έλεγχο και σταθερή τάση στην έξοδο του, τότε συμπεριφέρεται ως φορτίο σταθερής ισχύος και ισχύει:

$$f(i_L) = \frac{P}{i_L}$$

Οι παράγωγοι της $f(i_L)$ είναι :

$$\frac{df(i_L)}{di_L} = -\frac{P}{i_L^2} = -\frac{V_L^2}{P} \text{ and } \frac{d^2f(i_L)}{di_L^2} = \frac{2P}{i_L^3} = \frac{2V_L^3}{P^2}$$

Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο σταθερής ισχύος, οι συνθήκες για ευστάθεια τώρα γίνονται:

$$-\frac{P}{i_{L0}^2} + R < 0 \text{ or } -\frac{V_{L0}^2}{P} + R < 0 \quad (1)$$

$$-RC \frac{P}{i_{L0}^2} + L < 0 \text{ or } -RC \frac{V_{L0}^2}{P} + L < 0 \quad (2)$$

Εξετάζοντας τις 2 παραπάνω συνθήκες, είναι ξεκάθαρο πως η ευστάθεια του συστήματος είναι δυσκολότερο να επιτευχθεί όσο η ισχύς P του συστήματος αυξάνεται. Αν θεωρηθεί ότι η τάση V_{L0} παραμένει σταθερή, από τη συνθήκη [1] φαίνεται πως η αντίσταση R πρέπει να μειωθεί όσο η ισχύς αυξάνεται. Από τη συνθήκη [2] τώρα, για να υπάρχει ευστάθεια για δεδομένη ισχύ πρέπει η χωρητικότητα C να αυξηθεί και η συνολική επαγωγική αντίδραση να μειωθεί. Αυτό βέβαια σημαίνει πως για ένα δεδομένο πραγματικό σύστημα, υπάρχει πεπερασμένη ισχύς P για την οποία η ευστάθεια μπορεί να διασφαλιστεί. Παρ' όλα αυτά οι συνθήκες [1] & [2] είναι ξεκάθαρο ότι πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Υπάρχει περίπτωση να παρουσιαστεί ασταθής συμπεριφορά στο σύστημα αν παρ' ότι και οι 2 εξισώσεις είναι αρνητικές, η μια βρίσκεται πολύ κοντά στο μηδέν. Αυτή η ασταθής συμπεριφορά όταν οι συνθήκες γίνονται οριακές, παρουσιάζεται λόγω του μη γραμμικού όρου που είχε αγνοηθεί στην ανάλυση παραπάνω για λόγους απλότητας. Από την πλευρά βέβαια ενός ολοκληρωμένου και μεγάλου σε κλίμακα συστήματος η ευστάθεια μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας την δεδομένη τάση του κυκλώματος αγνοώντας με ασφάλεια το μη γραμμικό όρο που είχε παραβλεφθεί.

Λόγω των ζητημάτων που παρατηρήθηκαν όταν οι παραπάνω συνθήκες είναι οριακές, αν συμπεριλάβουμε τον μη γραμμικό όρο $LC \frac{d^2f(i_{L0})}{di_{L0}^2} \left(\frac{di}{dt}\right)^2$ που αγνοήσαμε παραπάνω, τα

αποτελέσματα για ένα μη γραμμικό φορτίο που συμπεριφέρεται ως φορτίο σταθερής ισχύος είναι τα εξής:

$$LC \frac{2P}{i_L^3} \left(\frac{di}{dt} \right)^2 \text{ or } LC \frac{2V_L^3}{P^2} \left(\frac{di}{dt} \right)^2$$

Υπό την προϋπόθεση ότι η τάση V_{L0} είναι σταθερή, τότε όσο η ισχύς αυξάνεται, ο όρος αυτός μικραίνει σημαντικά και ισχύει η υπόθεση που έγινε στην ανάλυση παραπάνω ότι μπορεί να αγνοηθεί. Παρά ταύτα, σε χαμηλά επίπεδα ισχύος ο μη γραμμικός όρος παίρνει πολύ μεγάλες τιμές. Συνεπώς το ζήτημα είναι να προσδιοριστεί το επίπεδο ισχύος, όπου για μια δεδομένη τάση λειτουργίας ο μη γραμμικός αυτός όρος αποσταθεροποιεί τη λειτουργία του κυκλώματος. Αν θεωρήσουμε τώρα ότι στο κύκλωμα του σχήματος 2, το μη γραμμικό φορτίο είναι ένα φορτίο σταθερό και μπορεί να παρασταθεί με μια αντίσταση R_1 η ανάλυση του κυκλώματος γίνεται απλούστερη. Η συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει τη συμπεριφορά του δικτύου του σχήματος 2 είναι :

$$\frac{V(s)}{V_0} = \frac{1}{CLs^2 + \left(CR - \frac{L}{R_1} \right) s + \left(1 - \frac{R}{R_1} \right)}$$

Από την παραπάνω συνάρτηση εύκολα μπορεί να προκύψει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο το οποίο είναι $P(s) = CLs^2 + \left(CR - \frac{L}{R_1} \right) s + \left(1 - \frac{R}{R_1} \right)$. Εφαρμόζοντας το κριτήριο του Routh παίρνουμε :

$$\begin{array}{l|ll} s^2 & CL & 1 - \frac{R}{R_1} \\ s^1 & CR - \frac{L}{R_1} & 0 \\ s^0 & 1 - \frac{R}{R_1} & 0 \end{array}$$

Προκειμένου το σύστημα να είναι ευσταθές, οι συνθήκες που πρέπει να τηρούνται είναι οι εξής :

$$CR - \frac{L}{R_1} > 0 \Leftrightarrow C > \frac{L}{R_1 R} \quad (1)$$

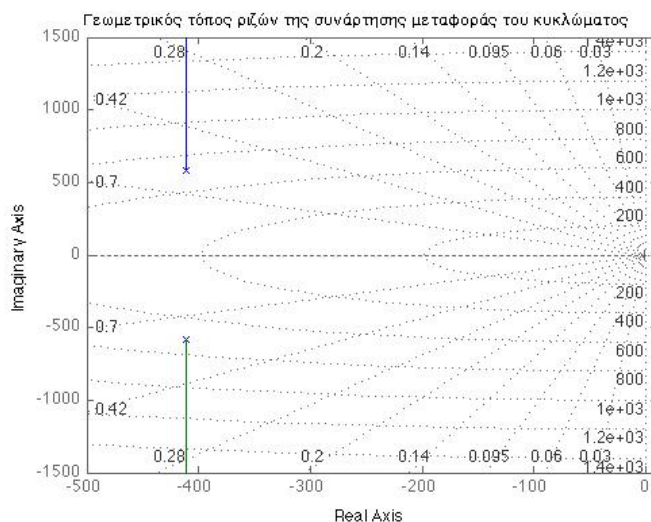
$$1 - \frac{R}{R_1} > 0 \quad (2)$$

Η συνθήκη (2) τηρείται λόγω της διαφοράς της αντίστασης φορτίου με την αντίσταση της γραμμής, αφού η τελευταία παίρνει πάντα πολύ χαμηλές τιμές, συνεπώς το αν ή όχι το σύστημα είναι ευσταθές καθορίζεται από την ανισότητα (1). Σε αυτή την ανισότητα, το μέγεθος που μπορεί ουσιαστικά να μεταβληθεί είναι η τιμή της χωρητικότητας C , εφόσον η αυτεπαγωγή L και οι τιμές των αντιστάσεων είναι καθορισμένα μεγέθη και έχουν σχέση με τη διαστασιολόγηση των γραμμών.

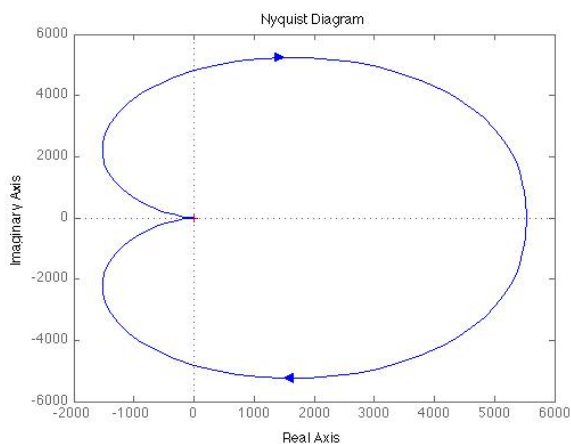
Με βάση το μοντέλο αυτό, πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση για να διαπιστωθεί αν το σύστημα παρουσιάζει ή όχι ευσταθή συμπεριφορά. Οι τιμές που δόθηκαν στις παραμέτρους του κυκλώματος 2 είναι :

R	0.575Ω
L	0.766mH
C	2.3mF
RI	6Ω

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται παρακάτω για μια δεδομένη τάση $V=5kV$, στα σχήματα 3 και 4.



Εικόνα 3: Παράσταση του ΓΤΡ για το κύκλωμα.



Εικόνα 4: Διάγραμμα Nyquist του κυκλώματος

Από την παράσταση του γεωμετρικού τόπου ριζών αλλά και του διαγράμματος Nyquist του αναλυθέντος δικτύου, προκύπτει ξεκάθαρα πως το σύστημα είναι ευσταθές. Το σύστημα θα παρουσίαζε οριακή ευστάθεια στην περίπτωση κατά την οποία θα ίσχυε: $C = \frac{L}{R_1 R} = 2.22mF$ ενώ για τιμές μικρότερης χωρητικότητας θα παρουσίαζε ασταθή συμπεριφορά.

Εν κατακλείδι, διαπιστώνεται πως η ανάλυση ευστάθειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει δίκτυο διανομής με DC τάση, παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες και είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Ο λόγος είναι πως υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη ταυτόχρονα, όπως η συμπεριφορά των μετατροπέων ισχύος και η επιλογή κατάλληλων τιμών για τις αυτεπαγωγές και τις χωρητικότητες των φίλτρων. Από τη μελέτη που έγινε στο συγκεκριμένο μοντέλο, δόθηκε η δυνατότητα να διαπιστωθούν τα παραπάνω ζητήματα και να υποδειχθούν τρόποι που οδηγούν στην επίλυση τους. Παρ' ότι το κύκλωμα που επιλέχθηκε για ανάλυση/προσομοίωση είναι απλό όσον αφορά τα στοιχεία του, η συμπεριφορά του μοιάζει αρκετά με αυτή ενός δικτύου μεγαλύτερης κλίμακας. Συνεπώς τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης εργασίας μπορούν να οδηγήσουν εύκολα σε μελλοντική ανάλυση ενός πλήρους δικτύου πλοίου που να χρησιμοποιεί συνεχή τάση. Είναι ασφαλές να υποτεθεί, ότι στο τέλος του προγράμματος η έρευνα στο συγκεκριμένο τομέα θα έχει προχωρήσει πολύ περισσότερο και θα υπάρχουν ακόμα περισσότερα στοιχεία να παρατεθούν και να συζητηθούν.



Βιβλιογραφία

- [1] Hodge, C.G. and Mattick, D.J. "The electric warship", Trans IMarE, Vol 108, part 2, pages 109 to 125, 1996
- [2] Hodge, C.G. and Mattick, D.J. "The electric warship II", Trans IMarE, Vo1 109, part 2, pages 127 to 137, 1997
- [3] Sudhoff, S.D., Glover, S.F., Lamm, P.T. Schmacher, D.H. and Delisle, D.E. "Stability analysis of power electronic distribution systems using admittance space constraints", IEEE Trans. on Aero and Elect. Sys., Vol. 36, pp 995-973, 2000.
- [4] Flower, J.O., Hodge C G "Stability and transient-behavioural assessment of power-electronics based dc-distribution systems. Part 4: simple compensation to improve system performance", to be published by the IMarEST 2007

