



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος
Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΘΕΜΑ 2ο

ΜΕΛΕΤΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΟΡΙΟ, ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ, ΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ & ΤΗ ΧΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ

Μεταπτυχιακή Εργασία
του
Γεώργιου Τσεκούρα

για το μεταπτυχιακό μάθημα «Ανάπτυξη Συστήματος Παραγωγής,
Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας»

Υπεύθυνος Εργασίας : Καθηγητής Κ.Βουρνάς

Αθήνα, Ιούνιος 2000

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | i |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ & ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ | 1 |
| 1.1 Ερωτήματα της Εξαμηνιαίας Εργασίας | 1 |
| 1.2 Βασικές Έννοιες | 2 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΟΡΙΑ ΙΣΧΥΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150 kV ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ | 4 |
| 2.1 Μελέτη Ορίων Γραμμής Μεταφοράς 150kV Βαρέως Τύπου Απλού Κυκλώματος | 4 |
| 2.2 Φυσική Φόρτιση | 4 |
| 2.3 Θερμικό Όριο | 4 |
| 2.4 Όριο Πτώση Τάσης | 5 |
| 2.4.1 Μαθηματική Τοποθέτηση του Προβλήματος | 5 |
| 2.4.2 Αριθμητική Επίλυση | 7 |
| 2.5 Κριτήριο Μεταφερόμενης Ισχύος - Όριο Στατικής Ευστάθειας | 8 |
| 2.5.1 Μαθηματική Τοποθέτηση του Προβλήματος | 9 |
| 2.5.2 Αριθμητική Επίλυση | 11 |
| 2.6 Σύγκριση Ορίων Μεταφερόμενης Ισχύος | 14 |
| 2.7 Τελικά Συμπεράσματα | 15 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΕ ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150 kV ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ | 16 |
| 3.1 Μελέτη Αντιστάθμισης Γραμμής Μεταφοράς 150 kV Βαρέως Τύπου Απλού Κυκλώματος με στόχο την Εφαρμογή του Κριτηρίου Στατικής Ευστάθειας | 16 |
| 3.2 Μαθηματική Τοποθέτηση του Προβλήματος | 16 |
| 3.3 Αριθμητική Επίλυση | 17 |
| 3.4 Τελικά Συμπεράσματα | 19 |

| | | |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 | ΚΟΣΤΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 100 km ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΟΡΙΟ | 20 |
| 4.1 | Μελέτη Κόστους Γραμμής Μεταφοράς 100 km συναρτήσει του Θερμικού Ορίου Ισχύος | 20 |
| 4.2 | Κόστος Γραμμής Μεταφοράς & Αντίστοιχα Θερμικά Όρια | 20 |
| 4.3 | Προσδιορισμός Οικονομικότερου Τύπου Γραμμής Μεταφοράς συναρτήσει Θερμικού Ορίου | 20 |
| 4.4 | Υπόλοιπα Κριτήρια | 21 |
| 4.5 | Τελικά Συμπεράσματα | 23 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 | ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 24 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 | ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MATLAB | 25 |
| Π 1.1 | Κώδικας σε MATLAB για το Κριτήριο Πτώσης Τάσης | 25 |
| Π 1.2 | Κώδικας σε MATLAB για το Κριτήριο Στατικής Ευστάθειας | 26 |
| Π 1.3 | Κώδικας σε MATLAB για την Εύρεση της Χωρητικής Αντιστάθμισης | 27 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 30 |
| Π 2.1 | ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 30 |
| Π 2.2 | ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 30 |
| Π 2.3 | ΑΡΘΡΑ | 30 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

&

ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

1.1 Ερωτήματα της Εξαμηνιαίας Εργασίας

Το θέμα της παρούσας εργασίας αφορά το δίκτυο μεταφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και διατυπώθηκε ως εξής :

«Δίνονται τα παρακάτω χαρακτηριστικά για τους βασικούς τύπους εναέριων γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιεί η Δ.Ε.Η.. Για τις γραμμές διπλού κυκλώματος τα χαρακτηριστικά της γραμμής, το μέγιστο ρεύμα και το κόστος δίνονται ανά κύκλωμα.

| Τύπος | R (Ω/km) | X (Ω/km) | B (μS/km) | I _{max} (A) | Κόστος (εκατ.δρχ/km) |
|----------------|----------|----------|-----------|----------------------|-------------------------|
| 150 kV Ε | 0,183 | 0,446 | 2,584 | 530 | 14 |
| 150 kV Ε διπλό | 0,183 | 0,404 | 2,826 | 530 | 10 |
| 150 kV Β | 0,097 | 0,422 | 2,738 | 775 | 18 |
| 150 kV Β διπλό | 0,097 | 0,391 | 2,919 | 775 | 13 |
| 400 kV διπλό | 0,033 | 0,318 | 3,570 | 2020 | 35 |

Ζητούνται :

α. Για τη γραμμή 150 kV βαρέως τύπου, απλού κυκλώματος να υπολογιστούν τα όρια φορτίσεως (MVA) συναρτήσει του μήκους (km). Να προσδιοριστούν συγκεκριμένα το θερμικό όριο, το όριο για πτώση τάσεως μικρότερη από το 20% θεωρώντας φορτίο με συντελεστή ισχύος 0.9 επαγωγικό, και τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (όριο ευστάθειας). Να γίνει σύγκριση με τις καμπύλες St. Clair(IEEE Trans. PAS-98, March/Apr 1979, pp.606-613). Η μελέτη θα φθάσει μέχρι τα 200 km.

β. Ποια είναι η αντιστάθμιση σε ποσοστό του 1/X για την οποία το όριο της μέγιστης πτώσης τάσης είναι μεγαλύτερο από το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για τη πιο πάνω γραμμή των 150 kV;

γ. Χρησιμοποιώντας τα ενδεικτικά κόστη του παραπάνω πίνακα να υπολογιστεί το συνολικό κόστος κατασκευής συναρτήσει της μεταφερόμενης ισχύος σε απόσταση 100 km. Για κάθε όριο να προσδιοριστεί ο οικονομικότερος τύπος γραμμής και να σχεδιαστεί σε διάγραμμα το ελάχιστο κόστος συναρτήσει της μεταφερόμενης ισχύος. Στο παρόν ερώτημα θα ληφθεί υπόψη μόνο το θερμικό όριο.»

1.2 Βασικές Έννοιες

Σκοπός της παρούσας εξαμηνιαίας εργασίας είναι να τονισθεί η σημασία των τεχνικών ορίων που καθορίζουν τα όρια λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς και των οικονομικών κριτηρίων που μπορούν να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην επέκταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Συγκεκριμένα υπάρχουν τέσσερα βασικά όρια που προσδιορίζουν το τελικό μέγεθος της ισχύος που δύναται να μεταφέρει μία γραμμή μεταφοράς :

◊ **Θερμικό Όριο** : επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τις μηχανικές ιδιότητες του αγωγού. Αναλυτικότερα είναι γνωστό ότι κάθε αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα έχει κάποιες απώλειες Joule, οι οποίες διαφεύγουν από την επιφάνειά του προς τον περιβάλλοντα αέρα με τη μορφή ακτινοβολούμενης θερμότητας. Αυτό έχει ως συνέπεια να ψύχεται ο αγωγός. Όμως σε κάθε περίπτωση εγκαθίσταται μία θερμική ισορροπία ανάλογα με το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό, τη διατομή του τελευταίου και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η ισορροπία αυτή εκφράζεται μέσω της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στον αγωγό, η οποία για κατασκευαστικούς λόγους –μηχανική αντοχή του αγωγού- δεν πρέπει να ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Αυτή η θερμοκρασία προκύπτει, όταν ο αγωγός διαρρέεται από το οριακό θερμικό ρεύμα I_{max} . Μέσω του τελευταίου ορίζεται το θερμικό όριο ισχύος S_{Θ} ενός αγωγού :

$$S_{\Theta} = V_{\phi} I_{max} \quad (1.2-1)$$

όπου V_{ϕ} η φασική τάση.

Κατ' επέκταση για μία γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος έχουμε ότι :

$$S_{\Theta} = \sqrt{3} V_N I_{max} \quad (1.2-2)$$

όπου V_N η πολική τάση. Στην περίπτωση διπλού κυκλώματος απλώς διπλασιάζεται το όριο.

◊ **Όριο Πτώσης Τάσης** : ορίζεται σαν το επί τοις εκατό ποσοστό της διαφοράς των μέτρων τάσης των άκρων της γραμμής μεταφοράς ως προς την ονομαστική τάση λειτουργίας της, δηλαδή δίνεται από τον τύπο :

$$\varepsilon(\%) = \frac{\|V_1| - |V_2\|}{V_{\phi}} 100\% \quad (1.2-3)$$

όπου V_1 είναι η φασική τάση στο άκρο αναχώρησης της γραμμής, V_2 είναι η φασική τάση στο άκρο άφιξης και V_{ϕ} είναι η φασική ονομαστική τάση λειτουργίας. Η απόλυτη τιμή στη διαφορά των τάσεων καλύπτει και την περίπτωση της υπέρτασης της γραμμής. Παράλληλα με τον ίδιο όρο εννοείται ότι οι δυνατές τιμές τάσης των δύο άκρων πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες ανισότητες :

$$\left(1 - \frac{100 * \varepsilon}{2}\right) V_{\phi} \leq V_1 \leq \left(1 + \frac{100 * \varepsilon}{2}\right) V_{\phi} \quad (1.2-4)$$

$$\left(1 - \frac{100 * \varepsilon}{2}\right) V_{\phi} \leq V_2 \leq \left(1 + \frac{100 * \varepsilon}{2}\right) V_{\phi} \quad (1.2-5)$$

◊ **Όριο Στατικής Ευστάθειας** : είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί σε ένα ορισμένο κύκλωμα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Πιο αναλυτικά ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε κατάσταση στατικής ευστάθειας, εαν μετά από μία

οποιαδήποτε διαταραχή απείρως μικρή επανέρχεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, την προηγούμενη, ή άλλη απείρως γειτονική. Η διαταραχή υποτίθεται ότι είναι αρκετά μικρή, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ηλεκτρικές εξισώσεις μόνιμης κατάστασης των μηχανών.

Σημειώνουμε ότι στην περίπτωση μίας γραμμής μεταφοράς πρέπει να προσδιοριστεί η θέση στην οποία θεωρούμε την ισχύ, καθώς η μέγιστη ισχύς στην αναχώρηση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην άφιξη λόγω των ωμικών απωλειών της γραμμής. Επειδή από πρακτική σκοπιά η αφικνούμενη ισχύς είναι σπουδαιότερη από την αναχωρούσα θεωρείται κατά κανόνα ότι η μέγιστη ισχύς και το όριο ευστάθειας αναφέρονται στο άκρο άφιξης.

◊ **Όριο Μεταβατικής Ευστάθειας** : είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να φέρει μία γεννήτρια πριν από μία μεγάλη διαταραχή χωρίς να κινδυνεύσει να αποσυγχρονιστεί, αν πραγματοποιηθεί αυτή η απότομη μεταβολή – μεγάλη αύξηση φορτίου, βραχυκύκλωμα. Γενικά το όριο μεταβατικής ευστάθειας είναι μικρότερο από το όριο στατικής ευστάθειας και η τιμή του εξαρτάται από το είδος και το μέγεθος της διαταραχής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δε θα μελετήσουμε το όριο της μεταβατικής ευστάθειας.

Με βάση τα τρία κριτήρια – όρια που αναφέραμε στην παρούσα παράγραφο μπορούμε να πραγματοποιήσουμε τη βασική τεχνικοοικονομική μελέτη της κατασκευής μίας γραμμής μεταφοράς λαμβάνοντας υπόψη μας το κόστος κατασκευής της.

Τέλος υπάρχει και η έννοια της **φυσικής φόρτισης**, η οποία είναι η μέγιστη δυνατή μεταφερόμενη ισχύς, αν θεωρήσουμε την ίδια γραμμή μεταφοράς χωρίς απώλειες ισοδύναμη με μία κυματική αντίσταση Z_C συνδεδεμένη σε σειρά με μία ωμική αντίσταση R . Συνεπώς, αν λάβουμε υπόψη μας ότι η κυματική αντίσταση είναι ίση με :

$$Z_C = \sqrt{\frac{x}{b}} \quad (1.2-6)$$

τότε, για να μεγιστοποιηθεί η μεταφερόμενη ισχύς, πρέπει η ωμική αντίσταση R να είναι ίση με την κυματική αντίσταση Z_C , οπότε η φυσική φόρτιση S_φ δίνεται από τη σχέση :

$$S_\varphi = \frac{V_N^2}{Z_C} \quad (1.2-7)$$

όπου x είναι η επαγωγική αντίδραση σε Ω/km , b η χωρητική αγωγιμότητα σε Ω^{-1}/km , V_N είναι η ονομαστική πολική τάση.

Σημειώνουμε ότι η θερμική φόρτιση είναι τριπλάσια περίπου από τη φυσική φόρτιση, (σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στο [Α 1]).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΟΡΙΑ ΙΣΧΥΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150 kV ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

2.1 Μελέτη Ορίων Γραμμής Μεταφοράς 150 kV Βαρέως Τύπου Απλού Κυκλώματος

Στην προκειμένη περίπτωση θα μελετήσουμε μία γραμμή μεταφοράς 150 kV βαρέως τύπου, απλού κυκλώματος σε σχέση με τα όρια φορτίσεως ισχύος σε συνάρτηση με το μήκος της. Συγκεκριμένα θα προσδιοριστούν το θερμικό όριο, το όριο για πτώση τάσεως μικρότερο από το 20% θεωρώντας φορτίο με συντελεστή ισχύος 0.9 επαγωγικό, και τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος –που ταυτόχρονα αποτελεί το όριο στατικής ευστάθειας. Παράλληλα θα συγκριθούν οι προκύπτουσες χαρακτηριστικές με τις τις καμπύλες St. Clair [A1].

2.2 Φυσική Φόρτιση

Σε αυτήν την παράγραφο θα προσδιορίσουμε τη φυσική φόρτιση της γραμμής μεταφοράς των 150 kV βαρέως τύπου απλού κυκλώματος μέσω των τύπων (1.2-6) και (1.2-7), όπου V_N είναι ίσο με 150 kV, η επαγωγική αντίδραση x είναι ίση με 0,422 Ω/km και η χωρητική αγωγιμότητα b είναι ίση με $2,738 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1}/\text{km}$. Συνεπώς προκύπτει ότι :

$$Z_C = \sqrt{\frac{0,422}{2,738 \cdot 10^{-6}}} = 392,59 \Omega \Rightarrow S_\varphi = (150 \text{ kV})^2 / 392,59 \Omega = 57,312 \text{ MVA} \Rightarrow S_\varphi \approx 57,3 \text{ MVA}$$

Οπότε η φυσική φόρτιση της γραμμής είναι 57,3 MVA, το οποίο θα είναι ισοδύναμο με 1 S.I.L. (Surge Impedance Loading).

2.3 Θερμικό Όριο

Σε αυτήν την παράγραφο θα προσδιορίσουμε το θερμικό όριο της γραμμής μεταφοράς των 150 kV βαρέως τύπου απλού κυκλώματος μέσω του τύπου (1.2-2), όπου V_N είναι ίσο με 150 kV και I_{\max} είναι ίσο με 775 A. Συνεπώς προκύπτει ότι :

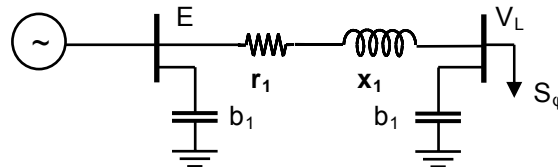
$$S_\theta = \sqrt{3} \cdot 150 \text{ kV} \cdot 775 \text{ A} = 201,351 \text{ MVA} = 3,513 \text{ S.I.L.} \Rightarrow S_\theta \approx 201 \text{ MVA} = 3,5 \text{ S.I.L.}$$

Οπότε το θερμικό όριο ισχύος της γραμμής είναι 201 MVA, το οποίο σημαίνει ότι για κατασκευαστικούς λόγους η γραμμή δε δύναται να λειτουργήσει σε υψηλότερες

φορτίσεις. Παράλληλα είναι 3,5 φορές μεγαλύτερο από τη φυσική φόρτιση της γραμμής έναντι των 3 που αναμέναμε από το άρθρο [Α 1].

2.4 Όριο Πτώση Τάσης

Σε αυτήν την παράγραφο θα προσδιορίσουμε το όριο πτώσης τάσης της γραμμής μεταφοράς των 150 kV βαρέως τύπου απλού κυκλώματος μέσω των τύπων (1.2-3) ως (1.2-5). Στην προκειμένη περίπτωση το ισοδύναμο κύκλωμα είναι το ακόλουθο :



Σχήμα 2.1 : Απλοποιημένο Ισοδύναμο Κύκλωμα Γραμμής Μεταφοράς

2.4.1 Μαθηματική Τοποθέτηση του Προβλήματος

Στη συνέχεια θα προσδιορίσουμε τον τύπο, ο οποίος θα μας δώσει το όριο ισχύος συναρτήσει του μήκους της γραμμής. Συγκεκριμένα θα ορίσουμε τη βάση αντίστασης :

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \quad (2.4.1-1)$$

όπου V_B είναι η βασική πολική τάση, S_B είναι η τριφασική βασική ισχύς.

Αν θεωρήσουμε μία γραμμή μεταφοράς μήκους L –σε km- με ωμική αντίσταση R ανά μονάδα μήκους –σε Ω/km -, με επαγωγική αντίδραση X ανά μονάδα μήκους –σε Ω/km - και με χωρητική αγωγιμότητα B ανά μονάδα μήκους –σε $\mu\text{S}/\text{km}$ -, τότε προκύπτει για το ισοδύναμο π της γραμμής μεταφοράς ότι η ωμική αντίσταση, η επαγωγική αντίδραση και η χωρητική αγωγιμότητα ισομοιρασμένη στα δύο άκρα της γραμμής δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις –σε ανά μονάδα- :

$$r_1 = \frac{R \cdot L}{Z_B} \quad (2.4.1-2)$$

$$x_1 = \frac{X \cdot L}{Z_B} \quad (2.4.1-3)$$

$$b_1 = \frac{1}{2} \frac{B}{10^6} L \cdot Z_B \quad (2.4.1-4)$$

Επίσης η φαινομένη ισχύς του φορτίου συνδέεται με την τάση άφιξης και την ένταση του φορτίου μέσω της σχέσης :

$$\tilde{S}_L = \tilde{V}_L \cdot \tilde{I}_L^* \quad (2.4.1-5)$$

Ακόμη η φαινομένη ισχύς φορτίου συνδέεται με το μέτρο της ισχύος και το συντελεστή ισχύος μέσω της σχέσης :

$$\tilde{S}_L = S_L (\cos \phi + j \cdot \sin \phi) \quad (2.4.1-6)$$

Παράλληλα οι τάσεις στους δύο ζυγούς ορίζονται ως εξής :

$$\tilde{V}_L = V_L \angle 0^\circ \quad (2.4.1-7)$$

$$\tilde{E} = E \angle \theta^\circ \quad (2.4.1-8)$$

Επίσης το ρεύμα που απορροφά η μισή χωρητική αγωγιμότητα της γραμμής είναι ίσο με :

$$\tilde{I}_C = j \cdot b_1 \cdot \tilde{V}_L \quad (2.4.1-9)$$

Συνεπώς το συνολικό ρεύμα της γραμμής μεταφοράς είναι ίσο με το άθροισμα του ρεύματος πυκνωτή και του ρεύματος φορτίου, δηλαδή :

$$\tilde{I}_{\gamma\phi} = \tilde{I}_C + \tilde{I}_\phi \quad (2.4.1-10)$$

Από το σχήμα 2.1 προκύπτει –αν εφαρμόσουμε το νόμο των τάσεων- ότι η τάση αναχώρησης είναι ίση με:

$$\tilde{E} = \tilde{V}_L + \tilde{I}_{\gamma\phi} \cdot (r_1 + j \cdot x_1) \quad (2.4.1-11)$$

Στηριζόμενοι στις σχέσεις (2.4.1-5) ως (2.4.1-8) και στη σχέση (2.4.1-10) προκύπτει ότι η ένταση της γραμμής μεταφοράς είναι ίση με :

$$\tilde{I}_{\gamma\phi} = \frac{S_L}{V_L} \cos \phi + j \cdot \left(b_1 \cdot V_L - \frac{S_L}{V_L} \sin \phi \right) \quad (2.4.1-12)$$

Από τις σχέσεις (2.4.1-11) και (2.4.1-12) προκύπτει ότι :

$$\tilde{E} = \left[V_L \cdot (1 - b_1 \cdot x_1) + \frac{S_L}{V_L} (r_1 \cos \phi + x_1 \sin \phi) \right] + j \cdot \left[b_1 \cdot r_1 \cdot V_L + \frac{S_L}{V_L} (x_1 \cos \phi - r_1 \sin \phi) \right] \quad (2.4.1-13)$$

Συνεπώς τελικά προκύπτει η ακόλουθη ισότητα, αν εφαρμόσουμε τους γνωστούς τύπους περί μέτρων των μιγαδικών αριθμών :

$$\left(\frac{r_1^2 + x_1^2}{V_L^2} \right) \cdot S_L^2 + 2 \cdot (r_1 \cos \phi + x_1 \sin \phi - b_1 (r_1^2 + x_1^2) \sin \phi) \cdot S_L + V_L^2 \cdot [(1 - b_1 x_1)^2 + (b_1 r_1)^2] - E^2 = 0 \quad (2.4.1-14)$$

Οπότε στηριζόμενοι στην πιο πάνω ισότητα σχηματίζουμε την ακόλουθη συνάρτηση, την οποία μπορούμε να λύσουμε μέσω της αριθμητικής ανάλυσης:

$$f(S) = \left(\frac{r_1^2 + x_1^2}{V_L^2} \right) \cdot S_L^2 + 2 \cdot (r_1 \cos \phi + x_1 \sin \phi - b_1 (r_1^2 + x_1^2) \sin \phi) \cdot S_L + V_L^2 \cdot [(1 - b_1 x_1)^2 + (b_1 r_1)^2] - E^2 \quad (2.4.1-15)$$

Επίσης υπάρχει και αναλυτική λύση, αν λύσουμε την αντίστοιχη δευτεροβάθμια εξίσωση :

$$S = \frac{-2\beta + \sqrt{\Delta}}{2\alpha} = \frac{-\beta + \sqrt{\delta}}{\alpha} \quad (2.4.1-16)$$

όπου

$$\alpha = \frac{r_1^2 + x_1^2}{V_L^2}$$

$$\beta = r_1 \cos \phi + x_1 \sin \phi - b_1 (r_1^2 + x_1^2) \sin \phi$$

$$\gamma = V_L^2 [(1 - b_1 x_1)^2 + (b_1 r_1)^2] - E^2$$

$$\Delta = 4\beta^2 - 4\alpha\gamma = 4\delta$$

$$\delta = \frac{E^2}{V_L^2} (r_1^2 + x_1^2) - r_1^2 \sin^2 \phi - x_1^2 \cos^2 \phi - b_1^2 r_1^4 \cos^2 \phi - b_1^2 x_1^4 \cos^2 \phi - 2b_1^2 r_1^2 x_1^2 + 2r_1 x_1 \cos \phi \sin \phi - 2b_1 r_1 x_1^2 \cos \phi \sin \phi - 2b_1 r_1^3 \cos \phi \sin \phi + 2b_1 x_1 r_1^2 \cos^2 \phi + 2b_1 x_1^3 \cos^2 \phi$$

Υπάρχει και η αρνητική ρίζα, η οποία απορρίπτεται, καθώς αναμένουμε -όπως έχει τεθεί το πρόβλημα- το μέτρο της φαινομένης ισχύος S να είναι θετικό.

2.4.2 Αριθμητική επίλυση

Με βάση το πρόγραμμα σε MATLAB που παρουσιάζεται στο παράρτημα 1 προσδιορίσαμε τη σχέση ανάμεσα στο όριο πτώση τάσης -που πρέπει να είναι μικρότερο ή το πολύ ίσο με 20%- και στο μήκος της γραμμής θέτοντας ως αρχικές τιμές τα ακόλουθα :

$$S_B = 57,312 \text{ MVA}$$

$$V_B = 150000 \text{ Volt}$$

$$R = 0,097 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \& \quad X = 0,422 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \& \quad B = 2,738 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}$$

$$E = 1,10 \text{ } \mu\text{m} \quad \& \quad V_L = 0,90 \text{ } \mu\text{m}$$

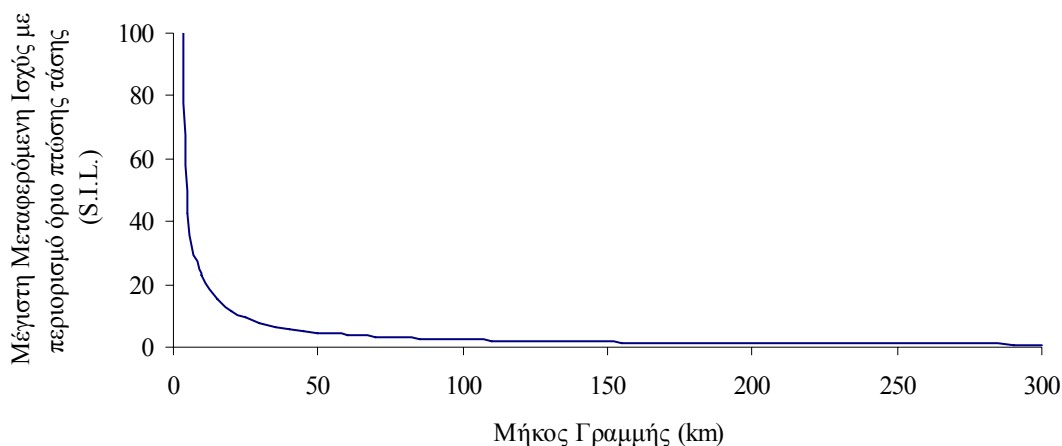
$$\Sigma.I. = \cos \phi = 0,9 \text{ επαγωγικό}$$

Στη συνέχεια μεταβάλλοντας το μήκος της γραμμής ανά 5 km από τα 5 km ως τα 200 km και ανά 10 km από τα 200 km ως τα 300 km προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας τιμών της μέγιστης φόρτισης της γραμμής σε S.I.L. ως προς το όριο πτώσης τάσης :

| Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) | Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) | Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) | Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) | Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) |
|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
| 5 | 42,466 | 55 | 4,234 | 105 | 2,257 | 155 | 1,571 | 210 | 1,208 |
| 10 | 23,137 | 60 | 3,886 | 110 | 2,159 | 160 | 1,527 | 220 | 1,163 |
| 15 | 15,429 | 65 | 3,592 | 115 | 2,070 | 165 | 1,486 | 230 | 1,122 |
| 20 | 11,576 | 70 | 3,341 | 120 | 1,989 | 170 | 1,447 | 240 | 1,085 |
| 25 | 9,2656 | 75 | 3,123 | 125 | 1,914 | 175 | 1,411 | 250 | 1,051 |
| 30 | 7,726 | 80 | 2,933 | 130 | 1,846 | 180 | 1,377 | 260 | 1,020 |
| 35 | 6,627 | 85 | 2,765 | 135 | 1,782 | 185 | 1,344 | 270 | 0,992 |
| 40 | 5,804 | 90 | 2,616 | 140 | 1,724 | 190 | 1,314 | 280 | 0,966 |
| 45 | 5,164 | 95 | 2,484 | 145 | 1,669 | 195 | 1,285 | 290 | 0,942 |
| 50 | 4,652 | 100 | 2,364 | 150 | 1,619 | 200 | 1,258 | 300 | 0,920 |

Πίνακας 2.1 : Τιμές Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με βάση το όριο τάσης 20% ως προς το μήκος της γραμμής

Στηριζόμενοι στον πιο πάνω πίνακα προκύπτει η χαρακτηριστική καμπύλη μέγιστης φόρτισης της γραμμής μεταφοράς λόγω του ορίου πτώσης τάσης συναρτήσει του μήκους, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Τονίζουμε όμως ότι η χρήση συγκεντρωμένων στοιχείων πάνω από τα 200 km είναι αρκετά προσεγγιστική –καθώς η γραμμή πλέον δρα σαν κυματική αντίσταση-, απλώς την παρουσιάζουμε ενδεικτικά.



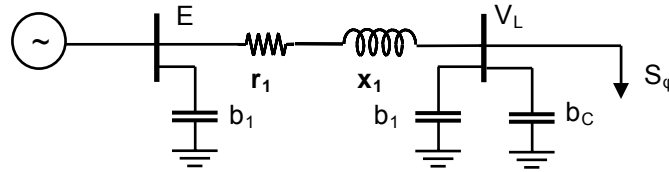
Σχήμα 2.2 : Γραφική Παράσταση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με βάση το όριο τάσης 20% ως προς το μήκος της γραμμής

Σημειώνουμε ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς λόγω περιορισμού πτώσης τάσης γίνεται πιο περιοριστική από το θερμικό όριο στα 66,74 km, καθώς τότε η ισχύς λαμβάνει την τιμή των 3,5 S.I.L.. Δηλαδή μέχρι εκείνο το σημείο η ισχύς περιορίζεται από το θερμικό όριο και από εκεί και πέρα από το όριο πτώσης τάσης στη γραμμή.

2.5 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς – Όριο Στατικής Ευστάθειας

Σε αυτήν την παράγραφο θα προσδιορίσουμε τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ ως προς το όριο στατικής ευστάθειας για τη γραμμή μεταφοράς των 150 kV βαρέως τύπου απλού κυκλώματος. Στην προκειμένη περίπτωση για να καλύψουμε και την περίπτωση της χωρητικής αντιστάθμισης, θα θεωρήσουμε ότι στο ζυγό άφιξης υπάρχει και χωρητική αντιστάθμιση –δηλαδή ένας επιπλέον πυκνωτής χωρητικής αγωγιμότητας b_c παράλληλα συνδεδεμένος με την αντίστοιχη χωρητική αγωγιμότητα του άκρου άφιξης του ισοδύναμου π της γραμμής.

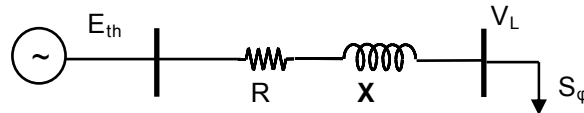
Συνεπώς το ισοδύναμο μονογραμμικό κύκλωμα είναι το ακόλουθο :



Σχήμα 2.3 : Απλοποιημένο Ισοδύναμο Κύκλωμα Γραμμής Μεταφοράς με δυνατότητα αντιστάθμισης

2.5.1 Μαθηματική Τοποθέτηση του Προβλήματος

Στη συνέχεια θα προσδιορίσουμε τον τύπο, ο οποίος θα μας δώσει το όριο ισχύος συναρτήσει του μήκους της γραμμής. Συγκεκριμένα θα προσδιορίσουμε αρχικά το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin, του οποίου η ισοδύναμη σχηματική μορφή του κυκλώματος θα είναι η ακόλουθη :



Σχήμα 2.4 : Ισοδύναμο Κύκλωμα Γραμμής Μεταφοράς κατά Thevenin με δυνατότητα αντιστάθμισης

Οπότε αν ανοικτοκυκλώσουμε το άκρο άφιξης της γραμμής μεταφοράς, η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin προκύπτει ίση με :

$$\tilde{E}_{th} = \tilde{E} \frac{1}{1 - b_o x_1 + j b_o r_1} \quad (2.5.1-1)$$

όπου b_o είναι η συνολική χωρητική αγωγιμότητα στο άκρο άφιξης, δηλαδή είναι ίση με :

$$b_o = b_C + b_I \quad (2.5.1-2)$$

Η ισοδύναμη αντίσταση κατά Thevenin προκύπτει από το βραχυκύκλωμα της πηγής τάσης υπολογίζοντας την ισοδύναμη αντίσταση στο άκρο άφιξης και προς τη μεριά τροφοδοσίας, οπότε έχουμε ότι :

$$\tilde{Z}_{th} = (r_1 + jx_1) // \frac{1}{jb_o} \quad (2.5.1-3)$$

Οπότε από τις σχέσεις (2.5.1-1) και (2.5.1-3) προκύπτουν ότι –αν χρησιμοποιήσουμε τους ορισμούς των μέτρων των μιγαδικών αριθμών – τα αντίστοιχα μέτρα τάσης E_{th} , ωμικής R και επαγωγικής αντίστασης X κατά Thevenin είναι τα εξής:

$$E_{th} = E \frac{1}{\sqrt{(1 - b_o x_1)^2 + (b_o r_1)^2}} \quad (2.5.1-4)$$

$$R = \frac{r_1}{(1 - b_o x_1)^2 + (b_o r_1)^2} \quad (2.5.1-5)$$

$$X = \frac{x_1(1 - b_o x_1) - b_o r_1^2}{(1 - b_o x_1)^2 + (b_o r_1)^2} \quad (2.5.1-6)$$

Στη συνέχεια, αν λάβουμε υπόψη μας ότι το φορτίο έχει σταθερό συντελεστή ισχύος, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι ίσο με :

$$\bar{Z}_l = R_l + X_l = R_l + R_l \tan \varphi \quad (2.5.1-7)$$

όπου \bar{Z}_l είναι η μιγαδική σύνθετη αντίσταση φορτίου, R_l είναι η ωμική αντίσταση φορτίου και X_l είναι η επαγωγική αντίδραση φορτίου.

Οπότε λαμβάνοντας υπόψη μας το ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin προκύπτει ότι το ρεύμα φορτίου είναι ίσο με :

$$\tilde{I}_\varphi = \frac{\tilde{E}_{th}}{(R + R_l) + j(X + R_l \tan \varphi)} \quad (2.5.1-8)$$

Συνεπώς η πραγματική αφικνούμενη ισχύς στο άκρο της γραμμής -που είναι συνδεδεμένο με το φορτίο- είναι ίση με :

$$P = I_\varphi^2 R_l = \frac{R_l}{(R + R_l)^2 + (X + R_l \tan \varphi)^2} E_{th}^2 \quad (2.5.1-9)$$

Αν προσπαθήσουμε να τη μεγιστοποιήσουμε, τότε πρέπει να απαιτήσουμε το μηδενισμό της παραγώγου της ισχύος ως προς την ωμική αντίσταση του φορτίου, οπότε :

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0 \quad (2.5.1-10)$$

Σ'αυτήν την περίπτωση προκύπτει ότι το μέτρο της αντίστασης φορτίου Z_l είναι ίσο με το μέτρο της ισοδύναμης αντίστασης κατά Thevenin Z , δηλαδή έχουμε ότι :

$$Z_l = Z \quad (2.5.1-11)$$

όπου η ισοδύναμη αντίσταση κατά Thevenin είναι ίση με :

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.5.1-12)$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε και την αντίστοιχη δεύτερη παράγωγο της ισχύος ως προς την ωμική αντίσταση φορτίου, ώστε να προσδιορίσουμε το είδος του ακρότατου, οπότε λαμβάνουμε ότι :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 R_l} = -2R_l(1 + \tan^2 \varphi) \quad (2.5.1-13)$$

Οπότε, επειδή η δεύτερη παράγωγος είναι αρνητική, προκύπτει ότι το ακρότατο στο ζητούμενο σημείο είναι μέγιστο. Άρα η ωμική αντίσταση φορτίου είναι ίση με :

$$R_{l_{\max P}} = Z \cdot \cos \varphi \quad (2.5.1-14)$$

Αντίστοιχα προσδιορίζουμε και την επαγωγική αντίδραση φορτίου ότι είναι ίση με :

$$X_{l_{\max P}} = Z \cdot \sin \varphi \quad (2.5.1-15)$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη μέγιστη ενεργό ισχύ φορτίου, που είναι ίση με :

$$P = \frac{R_{l_{\max P}}}{(R + R_{l_{\max P}})^2 + (X + R_{l_{\max P}} \tan \varphi)^2} E_{th}^2 \quad (2.5.1-16)$$

Παράλληλα η τάση στο ζυγό φορτίου είναι ίση με :

$$\tilde{V}_L = \tilde{E}_{th} \frac{R_{l_{\max P}} + jR_{l_{\max P}} \tan \varphi}{(R + R_{l_{\max P}}) + j(X + R_{l_{\max P}} \tan \varphi)} \quad (2.5.1-17)$$

Οπότε το αντίστοιχο μέτρο είναι :

$$V_L = E_{th} \frac{\sqrt{R_l^2 + (R_l \tan \varphi)^2}}{\sqrt{(R + R_l)^2 + (X + R_l \tan \varphi)^2}} \quad (2.5.1-18)$$

Αν λάβουμε υπόψη μας ότι η πραγματική ισχύς P συνδέεται με τη φαινομένη ισχύ S μέσω της ακόλουθης σχέσης :

$$P = S_L / \cos \varphi \quad (2.5.1-19)$$

τότε η μέγιστη φαινομένη μεταφερόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση :

$$S_L = \frac{R_{l_{\max P}}}{(R + R_{l_{\max P}})^2 + (X + R_{l_{\max P}} \tan \varphi)^2} E_{th}^2 \frac{1}{\cos \varphi} \quad (2.5.1-20)$$

Με βάση τις σχέσεις (2.4.1-1) ως (2.4.1-4), (2.5.1-2), (2.5.1-4) ως (2.5.1-6), (2.5.1-12), (2.5.1-14) και (2.5.1-20) είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε τη μέγιστη μεταφερόμενη φαινομένη ισχύ με κριτήριο τη στατική ευστάθεια του δικτύου συναρτήσει του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

2.5.2 Αριθμητική επίλυση

Με βάση το πρόγραμμα σε MATLAB που παρουσιάζεται στο παράρτημα 1 προσδιορίσαμε τη σχέση ανάμεσα στη μέγιστη φόρτιση της γραμμής μεταφοράς -έχοντας ως κριτήριο τη στατική ευστάθεια- και στο μήκος της γραμμής θέτοντας ως αρχικές τιμές τα ακόλουθα :

$$S_B = 57,312 \text{ MVA} \quad \& \quad V_B = 150000 \text{ Volt}$$

$$R = 0,097 \Omega/\text{km} \quad \& \quad X = 0,422 \Omega/\text{km} \quad \& \quad B = 2,738 \mu\text{S}/\text{km}$$

$$B_C = 0 \Omega$$

$$E = 1,10 \text{ αμ}$$

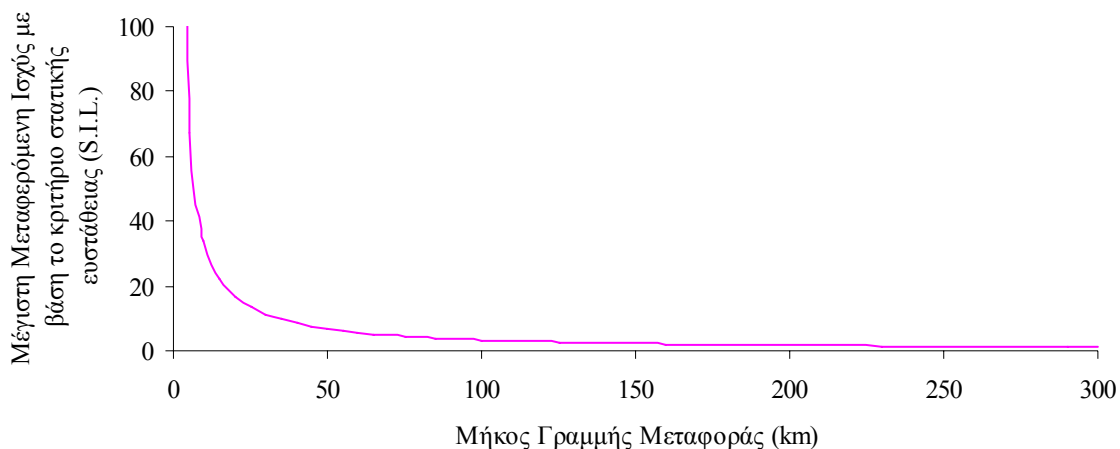
$$\Sigma.I. = \text{συνφ} = 0,9 \text{ επαγωγικό}$$

Στη συνέχεια μεταβάλλοντας το μήκος της γραμμής ανά 5 km από τα 5 km ως τα 200 km και ανά 10 km από τα 200 km ως τα 300 km προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας τιμών της μέγιστης φόρτισης της γραμμής σε S.I.L. με κριτήριο τη στατική ευστάθεια :

| Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) | Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) | Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) | Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) | Μήκος (km) | Μέγιστη Ισχύς (S.I.L.) |
|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|
| 5 | 67,453 | 55 | 6,142 | 105 | 3,230 | 155 | 2,203 | 210 | 1,643 |
| 10 | 33,728 | 60 | 5,631 | 110 | 3,085 | 160 | 2,136 | 220 | 1,572 |
| 15 | 22,487 | 65 | 5,200 | 115 | 2,953 | 165 | 2,073 | 230 | 1,507 |
| 20 | 16,867 | 70 | 4,830 | 120 | 2,831 | 170 | 2,014 | 240 | 1,448 |
| 25 | 13,494 | 75 | 4,510 | 125 | 2,720 | 175 | 1,958 | 250 | 1,394 |
| 30 | 11,248 | 80 | 4,230 | 130 | 2,617 | 180 | 1,905 | 260 | 1,344 |
| 35 | 9,642 | 85 | 3,983 | 135 | 2,522 | 185 | 1,856 | 270 | 1,298 |
| 40 | 8,439 | 90 | 3,763 | 140 | 2,434 | 190 | 1,809 | 280 | 1,255 |
| 45 | 7,502 | 95 | 3,567 | 145 | 2,351 | 195 | 1,764 | 290 | 1,215 |
| 50 | 6,754 | 100 | 3,390 | 150 | 2,275 | 200 | 1,722 | 300 | 1,179 |

Πίνακας 2.2 : Τιμές Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με βάση το κριτήριο στατικής ευστάθειας ως προς το μήκος της γραμμής

Στηριζόμενοι στον πιο πάνω πίνακα προκύπτει η χαρακτηριστική καμπύλη μέγιστης μεταφοράς ισχύος της γραμμής μεταφοράς με βάση το κριτήριο στατικής ευστάθειας συναρτήσει του μήκους, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Τονίζουμε όμως ότι η χρήση συγκεντρωμένων στοιχείων πάνω από τα 200 km δεν είναι τελείως ορθή –καθώς η γραμμή πλέον δρα σαν κυματική αντίσταση-, απλώς την παρουσιάζουμε ενδεικτικά.



Σχήμα 2.5 : Γραφική Παράσταση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με βάση το κριτήριο στατικής ευστάθειας ως προς το μήκος της γραμμής

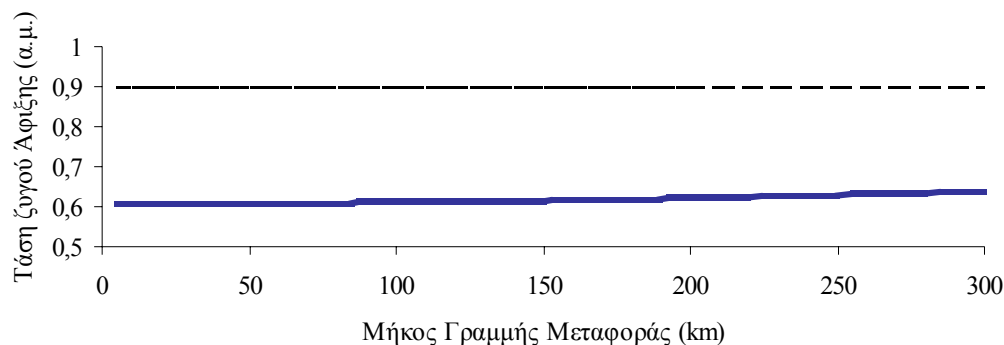
Σημειώνουμε ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς λόγω περιορισμού πτώσης τάσης είναι πιο περιοριστική από τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ λόγω του κριτηρίου στατικής ευστάθειας για όλο το μήκος των 300 km.

Για τον ίδιο λόγο θα παρουσιάσουμε τον πίνακα με την τάση ζυγού άφιξης σε ανά μονάδα συναρτήσεως του μήκους της γραμμής μεταφοράς, αν επιτρέπαμε τη διέλευση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος με βάση το κριτήριο της στατικής ευστάθειας μεταβάλλοντας το μήκος της γραμμής ανά 5 km από τα 5 km ως τα 200 km και ανά 10 km από τα 200 km ως τα 300 km.

| Μήκος (km) | Τάση σε Άφιξη (α.μ.) | Μήκος (km) | Τάση σε Άφιξη (α.μ.) | Μήκος (km) | Τάση σε Άφιξη (α.μ.) | Μήκος (km) | Τάση σε Άφιξη (α.μ.) | Μήκος (km) | Τάση σε Άφιξη (α.μ.) |
|------------|----------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|------------|----------------------|
| 5 | 0,6099 | 55 | 0,6109 | 105 | 0,6136 | 155 | 0,6180 | 210 | 0,6249 |
| 10 | 0,6099 | 60 | 0,6111 | 110 | 0,6140 | 160 | 0,6185 | 220 | 0,6264 |
| 15 | 0,6100 | 65 | 0,6113 | 115 | 0,6143 | 165 | 0,6191 | 230 | 0,6280 |
| 20 | 0,6100 | 70 | 0,6115 | 120 | 0,6147 | 170 | 0,6197 | 240 | 0,6297 |
| 25 | 0,6101 | 75 | 0,6118 | 125 | 0,6152 | 175 | 0,6203 | 250 | 0,6314 |
| 30 | 0,6102 | 80 | 0,6120 | 130 | 0,6156 | 180 | 0,6209 | 260 | 0,6333 |
| 35 | 0,6103 | 85 | 0,6123 | 135 | 0,6160 | 185 | 0,6215 | 270 | 0,6352 |
| 40 | 0,6104 | 90 | 0,6126 | 140 | 0,6165 | 190 | 0,6222 | 280 | 0,6371 |
| 45 | 0,6106 | 95 | 0,6129 | 145 | 0,6170 | 195 | 0,6228 | 290 | 0,6392 |
| 50 | 0,6107 | 100 | 0,6133 | 150 | 0,6175 | 200 | 0,6235 | 300 | 0,6414 |

Πίνακας 2.3 : Τιμές Τάσης Ζυγού Άφιξης υπό συνθήκες Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με βάση το κριτήριο στατικής ευστάθειας ως προς το μήκος της γραμμής

Οπότε λαμβάνοντας υπόψη μας τις πιο πάνω τιμές θα προκύψει η ακόλουθη γραφική παράσταση της τάσης του ζυγού συναρτήσεως του μήκους της γραμμής μεταφοράς σε σχέση με την επιτρεπτή στάθμη τάσης στο ζυγό άφιξης, που είναι 0,9 ανά μονάδα.



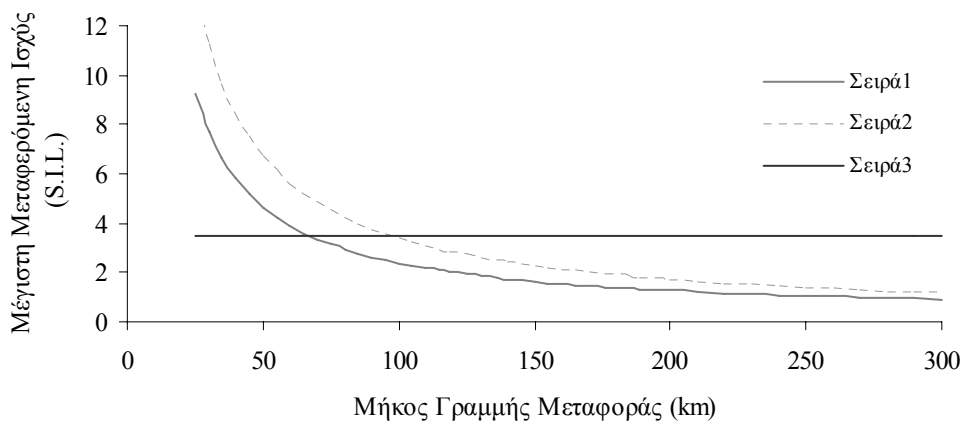
Σχήμα 2.6 : Γραφική Παράσταση Τιμές Τάσης Ζυγού Άφιξης υπό συνθήκες Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με βάση το κριτήριο στατικής ευστάθειας ως προς το μήκος της γραμμής όπου με λεπτή γραμμή παριστάνουμε τα 0,9 α.μ. και με παχιά την τάση του ζυγού

Από την πιο πάνω παράσταση προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τάση στο ζυγό άφιξης αυξάνεται με την αύξηση του μήκους της γραμμής μεταφοράς, αφού μειώνεται αντίστοιχα η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς λόγω του κριτηρίου της στατικής ευστάθειας. Ωστόσο απέχει πολύ από το όριο της πτώσης τάσης στο ζυγό άφιξης, γι'αυτό άλλωστε το κριτήριο της στατικής ευστάθειας δεν επιδρά για όλα τα μήκη των γραμμών που μελετήσαμε.

2.6 Σύγκριση Ορίων Μεταφερόμενης Ισχύος

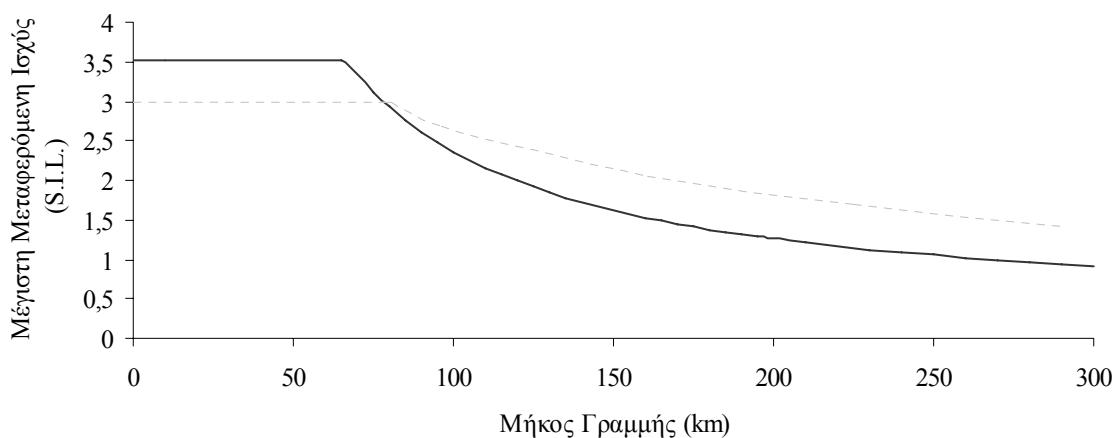
Με βάση τα όσα αναφέραμε στις προηγούμενες παραγράφους το θερμικό όριο περιορίζει τη λειτουργία της γραμμής μέχρι τα 66,74 km, το όριο πτώσης τάσης από τα 66,74 km μέχρι τα 300 km, ενώ το κριτήριο της στατικής ευστάθειας δεν επιδρά καθόλου. Από τα 200 km και πάνω –αν και παριστάνουμε το μήκος της γραμμής μεταφοράς μέχρι τα 300 km- δεν έχουμε ορθή απεικόνιση της πραγματικότητας, καθώς η γραμμή μεταφοράς προσομοιώνεται με το μοντέλο του ισοδύναμου π, ενώ πλέον λειτουργεί ως μία σύνθετη κυματική αντίσταση.

Τα όσα έχουμε αναφέρει περιγράφονται με το καλύτερο δυνατό τρόπο από την ακόλουθη γραφική παράσταση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος συναρτήσεως του μήκους της γραμμής μεταφοράς για τους τρεις περιοριστικούς όρους –θερμικό όριο, πτώση τάσης, στατική ευστάθεια.



Σχήμα 2.7 : Γραφική Παράσταση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος συναρτήσεως του Μήκους της Γραμμής Μεταφοράς για τα τρία όρια – θερμικό όριο (σειρά 3), πτώση τάσης (σειρά 1), στατική ευστάθεια (σειρά 2)

Στη συνέχεια παριστάνουμε τη συνολική καμπύλη της μεταφερόμενης ισχύος, όπως προκύπτει από τη λήψη των τριών περιοριστικών ορίων και τη συγκρίνουμε με την αντίστοιχη καμπύλη του Saint Clair [A 1] για βαρέως τύπου γραμμή μεταφοράς.



Σχήμα 2.8 : Γραφική Παράσταση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος συναρτήσεως του Μήκους της Γραμμής Μεταφοράς
 — συνολική από τα τρία όρια, ----- Saint Clair βαρέως τύπου

Σύμφωνα με την πιο πάνω γραφική παράσταση η γραμμή μεταφοράς των 150 kV βαρέως τύπου απλού κυκλώματος είναι πιο ισχυρή από την τυπική γραμμή βαρέως τύπου που προκύπτει από τις καμπύλες St. Clair μέχρι τα 77km. Συγκεκριμένα το θερμικό όριο είναι πιο υψηλό για τη γραμμή των 150 kV από την τυπική γραμμή κατά 0,5 S.I.L.. Επίσης, όταν επιδρά το όριο πτώσης τάσης, παρατηρούμε ότι η γραμμή των 150 kV περιορίζει τη μέγιστη ισχύ της αρκετά πιο γρήγορα από ότι η τυπική γραμμή, αφού από τη μία μεριά το θερμικό της όριο –οριζόντιο τμήμα– γίνεται λιγότερο περιοριστικό από την πτώση τάσης – στα 67 km- από ότι το αντίστοιχο όριο της τυπικής καμπύλης. που συμβαίνει γύρω στα 78 km.

Από την άλλη η κλίση της καμπύλης της μέγιστης ισχύος σε σχέση με το μήκος της γραμμής λόγω του κριτηρίου πτώσης τάσης είναι πιο μεγάλη για τη γραμμή των 150 kV από ότι για την τυπική γραμμή των καμπυλών St. Clair. Ακόμη η διαφορά μεταξύ των δύο για μεγάλα μήκη μεγαλώνει, αν και για μήκη άνω των 200 km δεν έχει νόημα η σύγκριση των καμπυλών, διότι το ισοδύναμο μοντέλο π της γραμμής που χρησιμοποιούμε παύει να είναι ακριβές, καθώς πλέον η γραμμή μεταφοράς μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά μόνο με κατανεμημένες ομοιόμορφα παραμέτρους κατά μήκος της γραμμής.

Βέβαια τονίζουμε ότι το κριτήριο πτώσης τάσης για την τυπική γραμμή μεταφοράς είναι 10% στις καμπύλες St. Clair, που είναι περισσότερο περιοριστικό από το 20% που υλοποιήσαμε στην παρούσα ενότητα.

Πάντως γενικά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι καμπύλες St. Clair, παρά τη γενικότητά τους, μπορούν να παραστήσουν ικανοποιητικά τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να φέρει μία γραμμή μεταφοράς. Με αυτόν τον τρόπο είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν για μία προμελέτη επέκτασης του δικτύου μεταφοράς, όταν δεν είναι διαθέσιμα πιο ακριβή στοιχεία.

2.7 Τελικά Συμπεράσματα

Με βάση τα όσα προαναφέραμε στις προηγούμενες παραγράφους προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Το θερμικό όριο επιδρά περιοριστικά στις γραμμές μεταφοράς για τα μικρά μήκη μέχρι τα 50 ως 100 km ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε γραμμής μεταφοράς.
- Το κριτήριο πτώσης τάσης επιδρά περιοριστικά για γραμμές με μεγαλύτερα μήκη. Συνήθως σε μικρές γραμμές κάτω των 50 km δεν παίζει σημαντικό ρόλο.
- Το κριτήριο στατικής ευστάθειας επιδρά κυρίως για γραμμές αρκετά μεγάλου μήκους και στην παρούσα περίπτωση δεν είδαμε να έχει καμία επίδραση μέχρι τα 200 km.
- Οι καμπύλες St. Clair μπορούν να παραστήσουν προσεγγιστικά σε ικανοποιητικό βαθμό τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να φέρει μία γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΕ ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150 kV ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

3.1 Μελέτη Αντιστάθμισης Γραμμής Μεταφοράς 150 kV Βαρέως Τύπου Απλού Κυκλώματος με στόχο την Εφαρμογή του Κριτηρίου Στατικής Ευστάθειας

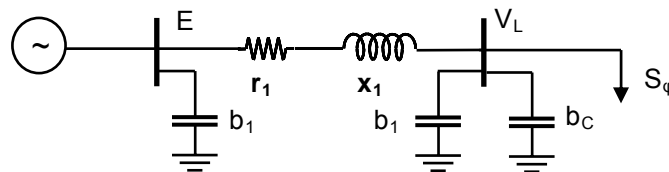
Στην προκειμένη περίπτωση θα μελετήσουμε μία γραμμή μεταφοράς 150 kV βαρέως τύπου, απλού κυκλώματος σε σχέση με τα κριτήρια πτώσης τάσης και στατικής ευστάθειας σε συνάρτηση με το μήκος της.

Συγκεκριμένα θα προσδιορίσουμε την αντιστάθμιση ως ποσοστό του 1/X για την οποία το όριο μέγιστης πτώσης τάσης είναι μεγαλύτερο από το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Σημειώνουμε ότι για τιμές κάτω των 66,74 km ενεργοποιείται το θερμικό όριο, οπότε δεν έχει άμεση σημασία η μελέτη αυτής της περίπτωσης.

3.2 Μαθηματική Τοποθέτηση του Προβλήματος

Το ισοδύναμο μονογραμμικό κύκλωμα είναι το ακόλουθο –ίδιο με το σχήμα 2.3- :



Σχήμα 3.1 : Απλοποιημένο Ισοδύναμο Κύκλωμα Γραμμής Μεταφοράς με δυνατότητα αντιστάθμισης

Στη συνέχεια με τη βοήθεια του ισοδύναμου κυκλώματος κατά Thevenin και με τη μαθηματική ανάλυση που πραγματοποιήσαμε στις παραγράφους 2.4.1 και 2.5.1 προκύπτει ότι το μέτρο της τάσης στο ζυγό άφιξης είναι από τη μια μεριά -λόγω του κριτηρίου στατικής ευστάθειας- ίσο με :

$$V_L = E_{th} \frac{\sqrt{R_l^2 + (R_l \tan \varphi)^2}}{\sqrt{(R + R_l)^2 + (X + R_l \tan \varphi)^2}} \quad (3.1-1)$$

Από την άλλη πρέπει να είναι ίσο με 0,9 ανά μονάδα λόγω του κριτηρίου πτώσης τάσης που είναι 20%. Δηλαδή :

$$V_L = 0,9 \text{ α.μ.} \quad (3.1-2)$$

Παράλληλα ορίζουμε ότι η χωρητική αντιστάθμιση δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$b_c = \frac{a(\%)}{100\% x_1} \quad (3.1-3)$$

όπου α το ποσοστό της επαγωγικής αντίδρασης x_1 της γραμμής μεταφοράς που θα πρέπει να τοποθετηθεί με τη μορφή πυκνωτή προς υλοποίηση της αντιστάθμισης της γραμμής.

Με βάση τις σχέσεις (2.4.1-1) ως (2.4.1-4), (2.5.1-2), (2.5.1-4) ως (2.5.1-6), (2.5.1-12), (2.5.1-14) και (2.5.1-20), (3.2-1) ως (3.1-3) είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε την αντιστάθμιση ως ποσοστό του $1/x_1$ για το οποίο το όριο πτώσης τάσης είναι ίσο με το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος συναρτήσει του μήκους της γραμμής μεταφοράς.

3.3 Αριθμητική Επίλυση

Με βάση το πρόγραμμα σε MATLAB που παρουσιάζεται στο παράρτημα 1 προσδιορίσαμε τη σχέση ανάμεσα στο μήκος της γραμμής μεταφοράς και στη μέγιστη φόρτισή της -έχοντας ως κριτήρια τη στατική ευστάθεια και την πτώση τάσης κατά 20%-θέτοντας ως αρχικές τιμές τα ακόλουθα :

$$S_B = 57,312 \text{ MVA} \quad \& \quad V_B = 150000 \text{ Volt}$$

$$R = 0,097 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \& \quad X = 0,422 \text{ } \Omega/\text{km} \quad \& \quad B = 2,738 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}$$

$$E = 1,10 \text{ αμ} \quad \& \quad V_L = 0,9 \text{ α.μ.}$$

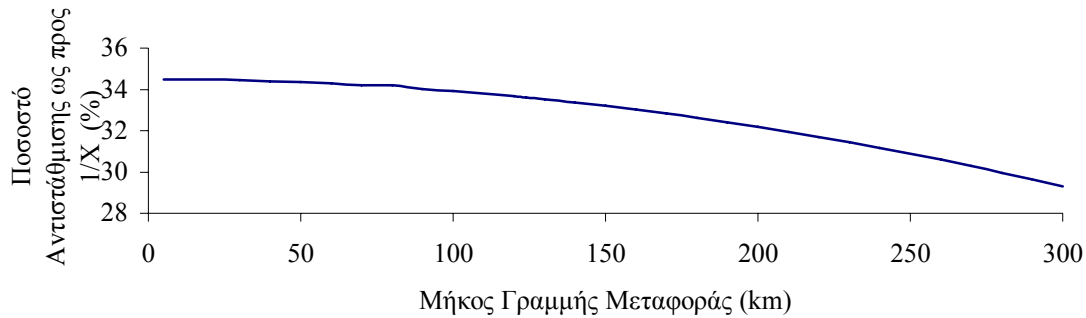
$$\Sigma.I. = \text{συνφ} = 0,9 \text{ επαγωγικό}$$

Στη συνέχεια μεταβάλλοντας το μήκος της γραμμής ανά 10 km από τα 10 km ως τα 300 km προέκυψε ο ακόλουθος πίνακας τιμών για την αντιστάθμιση ως ποσοστό της επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς x_1 -που επίσης μεταβάλλεται με την αλλαγή του μήκους της γραμμής μεταφοράς-

| Μήκος (km) | Αντιστάθμιση (%) | M.M.I. (S.I.L.) | Μήκος (km) | Αντιστάθμιση (%) | M.M.I. (S.I.L.) | Μήκος (km) | Αντιστάθμιση (%) | M.M.I. (S.I.L.) |
|------------|------------------|-----------------|------------|------------------|-----------------|------------|------------------|-----------------|
| 10 | 34,489 | 48,458 | 110 | 33,796 | 4,405 | 210 | 31,947 | 2,308 |
| 20 | 34,472 | 24,229 | 120 | 33,663 | 4,038 | 220 | 31,699 | 2,203 |
| 30 | 34,443 | 16,152 | 130 | 33,519 | 3,724 | 230 | 31,439 | 2,107 |
| 40 | 34,403 | 12,114 | 140 | 33,363 | 3,461 | 240 | 31,167 | 2,019 |
| 50 | 34,351 | 9,692 | 150 | 33,195 | 3,231 | 250 | 30,884 | 1,938 |
| 60 | 34,287 | 8,076 | 160 | 33,016 | 3,029 | 260 | 30,59 | 1,8638 |
| 70 | 34,212 | 6,923 | 170 | 32,825 | 2,850 | 270 | 30,283 | 1,795 |
| 80 | 34,215 | 6,057 | 180 | 32,623 | 2,692 | 280 | 29,966 | 1,731 |
| 90 | 34,027 | 5,384 | 190 | 32,409 | 2,550 | 290 | 29,636 | 1,671 |
| 100 | 33,917 | 4,846 | 200 | 32,184 | 2,423 | 300 | 29,296 | 1,615 |

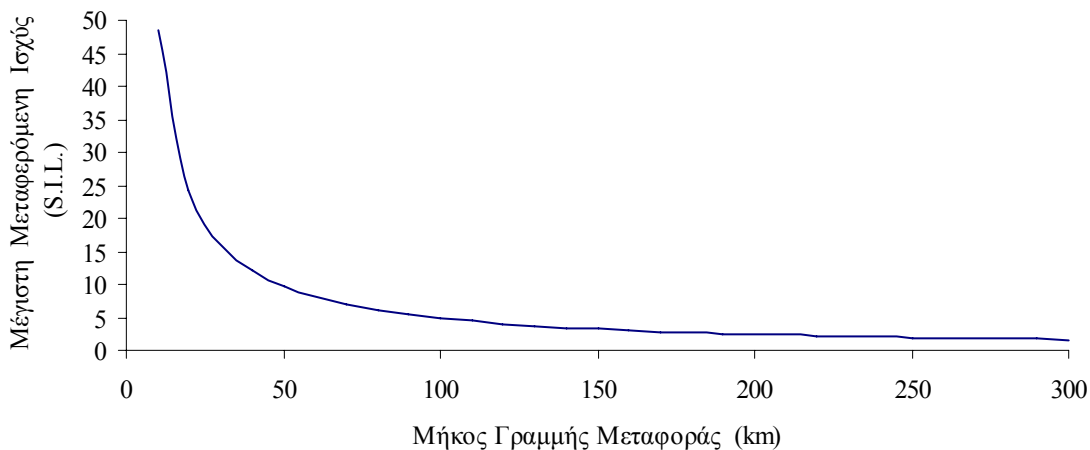
Πίνακας 3.1 : Τιμές Ποσοστού Αντιστάθμισης και Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με βάση το κριτήριο στατικής ευστάθειας και ορίου πτώσης τάσης να είναι ισοδύναμα ως προς το μήκος της γραμμής

Στηριζόμενοι στον πιο πάνω πίνακα προκύπτει η καμπύλη του ποσοστού αντιστάθμισης στην περίπτωση που τα κριτήρια στατικής ευστάθειας και πτώσης τάσης είναι το ίδιο περιοριστικά. Παρατηρούμε ότι το ποσοστό της αντιστάθμισης με πυκνωτή ως προς την επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς μειώνεται από το 34% που είναι για πολύ μικρά μήκη σε 32,1% για τα 200km. Τονίζουμε όμως ότι πέρα από τα 200 km πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μοντέλα γραμμών μεταφοράς με ομοιόμορφα κατανομημένες παραμέτρους κατά μήκος της γραμμής. Εξαιτίας τούτου το αντίστοιχο τμήμα άνω των 200 km παρουσιάζεται τελείως ενδεικτικά.



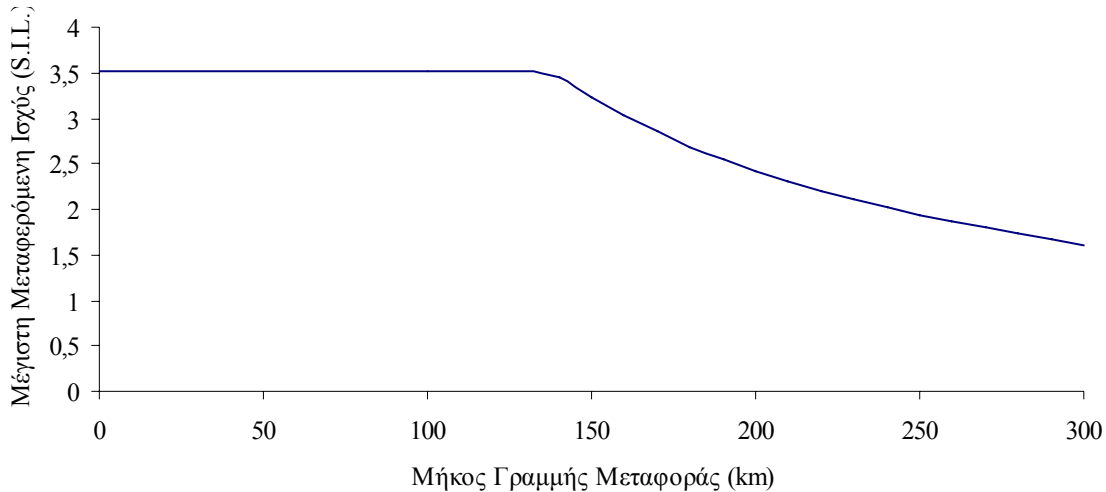
Σχήμα 3.2 : Γραφική Παράσταση Ποσοστού Αντιστάθμισης στην περίπτωση γραμμής μεταφοράς, ώστε τα κριτήρια στατικής ευστάθειας και μέγιστης πτώσης τάσης να είναι ισοδύναμα

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τη γραφική παράσταση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στην περίπτωση αντιστάθμισης της με κατάλληλο πυκνωτή έτσι, ώστε τα δύο κριτήρια –στατικής ευστάθειας και πτώσης τάσης να είναι ισοδύναμα. Για την παράσταση από τα 200 ως τα 300 km ισχύουν τα όσα προαναφέραμε.



Σχήμα 3.3 : Γραφική Παράσταση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος στην περίπτωση αντιστάθμισης της γραμμής μεταφοράς, ώστε τα κριτήρια στατικής ευστάθειας και μέγιστης πτώσης τάσης να είναι ισοδύναμα

Παράλληλα αν λάβουμε υπόψη μας το θερμοκό όριο, τότε προκύπτει η γραφική παράσταση του σχήματος 3.4, που μας δείχνει τις νέες δυνατές συνθήκες φόρτισης της γραμμής μεταφοράς, αρκεί να διαθέτουμε τον πυκνωτή που αντισταθμίζει κατάλληλα τη γραμμή, ώστε να είναι ισοδύναμα τα κριτήρια στατικής ευστάθειας και πτώσης τάσης.



Σχήμα 3.4 : Γραφική Παράσταση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος σε συνάρτηση με το μήκος της γραμμής μεταφοράς στην περίπτωση αντιστάθμισης της έτσι, ώστε τα κριτήρια στατικής ευστάθειας και μέγιστης πτώσης τάσης να είναι ισοδύναμα

Με βάση την πιο πάνω γραφική παράσταση προκύπτει το συμπέρασμα ότι το θερμικό όριο επεκτείνει τον περιοριστικό του ρόλο φθάνοντας στα 138 km, καθώς μετατοπίζονται και οι δύο καμπύλες της μέγιστης ισχύος –του κριτηρίου στατικής ευστάθειας και της μέγιστης πτώσης τάσης- προς τα πάνω και δεξιά, με συνέπεια να γίνονται λιγότερο περιοριστικά. Αυτή η κίνηση είναι πιο γρήγορη για την καμπύλη της πτώσης τάσης έναντι της αντίστοιχης για τη στατική ευστάθεια, γι’ αυτό και είναι εφικτό να ταυτιστούν.

3.4 Τελικά Συμπεράσματα

Με βάση τα όσα προαναφέραμε στις προηγούμενες παραγράφους προκύπτουν το συμπέρασμα ότι με την προσθήκη κατάλληλου πυκνωτή είναι δυνατό να περιορίσουμε σημαντικά τη δράση του κριτηρίου πτώσης τάσης, χωρίς όμως να μπορούμε να διαφύγουμε ούτε από το κριτήριο στατικής ευστάθειας –αν και η συμπεριφορά του τελευταίου επηρεάζεται ευεγερτικά από την προσθήκη πυκνωτή, αρκετά λιγότερο όμως σε σχέση με την πτώση τάσης-, ούτε από το θερμικό όριο, το οποίο δεν επηρεάζεται από την προσθήκη πυκνωτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΚΟΣΤΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 100 km ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΟΡΙΟ

4.1 Μελέτη Κόστους Γραμμής Μεταφοράς 100 km συναρτήσει του Θερμικού Ορίου Ισχύος

Χρησιμοποιώντας τα ενδεικτικά κόστη του πίνακα του θέματος –παράγραφος 1.1- θα υπολογίσουμε το συνολικό κόστος κατασκευής συναρτήσει της μεταφερόμενης ισχύος σε απόσταση 100 km λαμβάνοντας υπόψη μόνο το θερμικό όριο της γραμμής. Παράλληλα θα προσδιοριστεί ο οικονομικότερος τύπος γραμμής και θα σχεδιαστεί η γραφική παράσταση του ελάχιστου κόστους συναρτήσει της μεταφερόμενης ισχύος.

4.2 Κόστος Γραμμής Μεταφοράς & Αντίστοιχα Θερμικά Όρια

Το κόστος μίας γραμμής μεταφοράς n-κυκλωμάτων δίνεται σε σχέση με το μήκος L από τη σχέση :

$$\text{Συνολικό Κόστος} = n * \text{Κόστος ανά km και ανά κύκλωμα} * L \quad (4.2-1)$$

Αν εφαρμόσουμε τον τύπο για όλες τις γραμμές μεταφοράς που δίνονται στον πίνακα της παραγράφου 1.1, τότε για μήκος 100 km προκύπτει ο συγκεντρωτικός ακόλουθος πίνακας. Παράλληλα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα τα θερμικά όρια των γραμμών, όπως προκύπτουν από την κατάλληλη εφαρμογή του τύπου (1.2-2).

| Τύπος | I_{\max} -για όλα τα κυκλώματα (A) | P_{\max} (MVA) | Κόστος (εκατ.δρχ) |
|----------------|--------------------------------------|------------------|-------------------|
| 150 kV E | 530 | 137,70 | 1400 |
| 150 kV E διπλό | 1060 | 275,40 | 2000 |
| 150 kV B | 775 | 201,35 | 1800 |
| 150 kV B διπλό | 1550 | 402,70 | 2600 |
| 400 kV διπλό | 4040 | 2799,00 | 7000 |

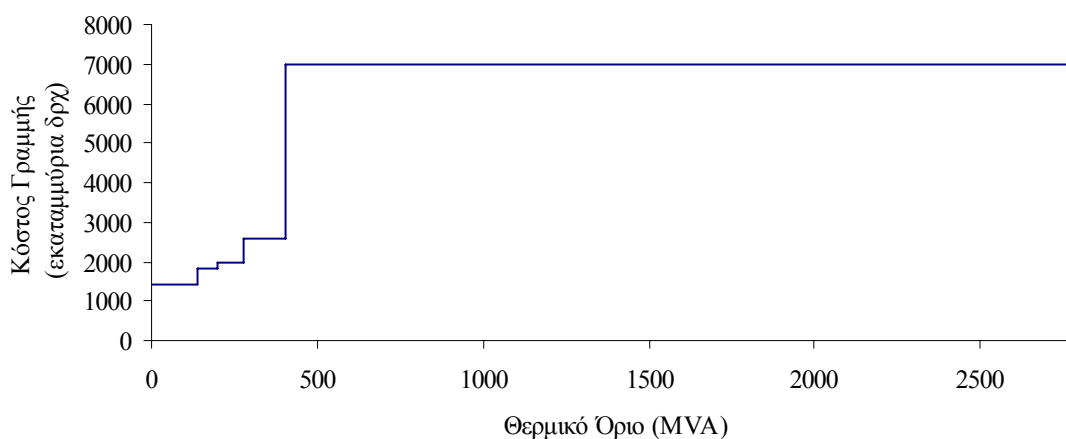
4.3 Προσδιορισμός Οικονομικότερου Τύπου Γραμμής Μεταφοράς συναρτήσει Θερμικού Ορίου

Στηριζόμενοι στον πιο πάνω πίνακα προκύπτει ότι ο οικονομικότερος τύπος γραμμής μεταφοράς είναι η 150 kV ελαφριού τύπου απλού κυκλώματος για 0 ως 137,70 MVA. Από 137,70 ως 201,35 MVA ο οικονομικότερος τύπος είναι η 150 kV βαρέως τύπου απλού κυκλώματος, από 201,35 ως 275,40 MVA είναι η 150 kV ελαφριού τύπου διπλού κυκλώματος, από 275,40 ως 402,70 MVA είναι η 150 kV βαρέως τύπου διπλού κυκλώματος και από 402,70 ως 2799,00 MVA είναι η 400 kV διπλού κυκλώματος. Από εκεί και πέρα δεν

έχει προχωρήσει η μελέτη της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς, αφού αυτές είναι οι γραμμές που χρησιμοποιούνται στον ελλαδικό χώρο. Πιο συγκεντρωτικά παρουσιάζονται καταναμημένα κατά αύξουσα σειρά στον ακόλουθο πίνακα. Παράλληλα παρουσιάζεται και το σχετικό κόστος κατασκευής της γραμμής μεταφοράς, δηλαδή το συνολικό κόστος προς το αντίστοιχο θερμικό όριο –υποθέτοντας ότι η γραμμή λειτουργεί στα όριά της.

| P_{\min} (MVA) | P_{\max} (MVA) | Κόστος (εκατ.δρχ) | Τύπος | Σχετικό Κόστος (εκατ.δρχ/MVA) |
|------------------|------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|
| 0,00 | 137,70 | 1400 | 150 kV E | 10,16 |
| 137,70 | 201,35 | 1800 | 150 kV B | 8,94 |
| 201,35 | 275,40 | 2000 | 150 kV E διπλό | 7,26 |
| 275,40 | 402,70 | 2600 | 150 kV B διπλό | 6,46 |
| 402,70 | 2799,00 | 7000 | 400 kV διπλό | 2,50 |

Με βάση τον πιο πάνω πίνακα προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα που δείχνει πιο παραστατικά το ελάχιστο κόστος συναρτήσει της μεταφερόμενης ισχύος.



Σχήμα 4.1 : Γραφική Παράσταση Ελαχίστου Κόστους συναρτήσει του Θερμικού Ορίου

Στηριζόμενοι στα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η γραμμή μεταφοράς των 400 kV διπλού κυκλώματος είναι μεν αρκετά ακριβότερη, αλλά πολύ πιο ισχυρή ως προς το θερμικό της όριο σε σχέση με τις υπόλοιπες. Στο ίδιο συμπέρασμα θα καταλήξουμε, αν συγκρίνουμε και τη γραμμή μεταφοράς 150 kV βαρέως τύπου διπλού κυκλώματος με όλες τις υπόλοιπες των 150 kV.

Γενικότερα αυτή η ταξινόμηση της αποδοτικότερης γραμμής μεταφοράς –εφόσον λειτουργεί στα όριά της- μπορεί να εκφραστεί μέσω του σχετικού κόστους κατασκευής της γραμμής μεταφοράς, όπου από τον πίνακα της παραγράφου 4.3 προκύπτει η χαρακτηριστική φθίνουσα σειρά κόστους από τη γραμμή με το μικρότερο θερμικό όριο προς τη γραμμή με το μεγαλύτερο όριο.

4.4 Υπόλοιπα Κριτήρια

Όμως ήδη στα 100 km για τη γραμμή μεταφοράς 150 kV βαρέως τύπου απλού κυκλώματος είναι πιο περιοριστικό το κριτήριο πτώσης τάσης από το θερμικό όριο. Δηλαδή η μελέτη σχεδίασης εμπεριέχει ένα βασικό σφάλμα ότι δεν λαμβάνουμε υπόψη μας το αληθινό όριο μέγιστης ισχύος. Βέβαια στην παρούσα περίπτωση πρόκειται για δοθείσα

παραδοχή του ερωτήματος, ωστόσο για λόγους πληρότητας θα αναφέρουμε συνοπτικά τη σύγκριση των ορίων πτώσης τάσης, στατικής ευστάθειας και θερμικού ορίου.

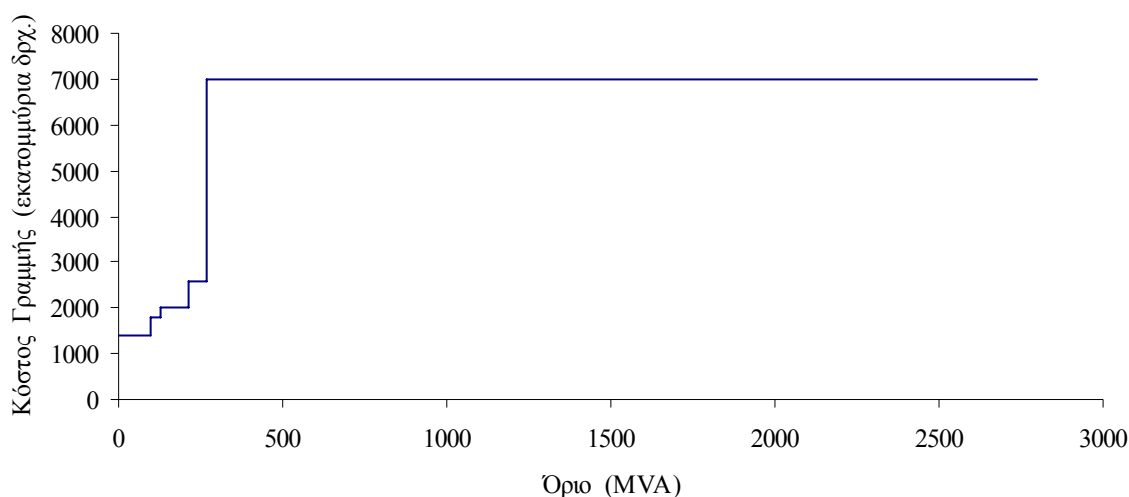
Με κατάλληλη μεταβολή των δεδομένων των προγραμμάτων του παραρτήματος 1 – αλλάζοντας την ωμική αντίσταση, την επαγωγική αντίδραση και τη χωρητική αγωγιμότητα ανά χιλιόμετρο ανά είδος γραμμής και θέτοντας το μήκος ίσο με 100 km- λάβαμε συγκεντρωτικά για τις γραμμές μεταφοράς τα ακόλουθα αποτελέσματα.

| Τύπος | Πτώση Τάσης | | Κριτήριο Στατικής Ευστάθειας | | |
|----------------|-----------------|------------|------------------------------|------------|------------------|
| | Ανά Κύκλωμα MVA | Σύνολο MVA | Ανά Κύκλωμα MVA | Σύνολο MVA | Τάση Αφίξης α.μ. |
| 150 kV E | 100,402 | 100,402 | 136,138 | 136,138 | 0,59197 |
| 150 kV E διπλό | 107,050 | 214,101 | 146,000 | 292,000 | 0,58799 |
| 150 kV B | 126,030 | 126,030 | 162,655 | 162,655 | 0,61331 |
| 150 kV B διπλό | 133,563 | 267,125 | 168,748 | 337,497 | 0,61192 |
| 400 kV διπλό | 1455,438 | 2910,876 | 1794,783 | 3589,565 | 0,63305 |

Αυτό έχει ως συνέπεια να γίνει μία νέα ταξινόμηση, οπότε προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας που τελικά μεταξύ των τριών ορίων κυριαρχεί το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος με βάση το κριτήριο πτώσης τάσης – αν εξαιρέσουμε τη γραμμή διπλού κυκλώματος 400 kV που συνεχίζει να είναι πιο περιοριστικό το θερμικό όριο :

| P_{\min} (MVA) | P_{\max} (MVA) | Κόστος (εκατ.δρχ) | Τύπος | Σχετικό Κόστος (εκατ.δρχ/MVA) |
|------------------|------------------|-------------------|----------------|-------------------------------|
| 0,00 | 100,402 | 1400 | 150 kV E | 13,94 |
| 100,402 | 126,030 | 1800 | 150 kV B | 14,28 |
| 126,030 | 214,101 | 2000 | 150 kV E διπλό | 9,34 |
| 214,101 | 267,125 | 2600 | 150 kV B διπλό | 9,73 |
| 267,125 | 2799,00 | 7000 | 400 kV διπλό | 2,50 |

Με βάση τον πιο πάνω πίνακα προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα που δείχνει πιο παραστατικά το ελάχιστο κόστος συναρτήσει της μεταφερόμενης ισχύος.



Σχήμα 4.2 : Γραφική Παράσταση Ελαχίστου Κόστους με βάση όλα τα όρια

Στηριζόμενοι στα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η γραμμή μεταφοράς των 400 kV διπλού κυκλώματος είναι μεν αρκετά ακριβότερη, αλλά πολύ πιο

ισχυρή ως προς το όριο της σε σχέση με τις υπόλοιπες. Στο ίδιο συμπέρασμα θα καταλήξουμε, αν συγκρίνουμε και τη γραμμή μεταφοράς 150 kV βαρέως τύπου διπλού κυκλώματος με όλες τις υπόλοιπες των 150 kV.

Από την άλλη μεριά αυτή η ταξινόμηση της αποδοτικότερης γραμμής μεταφοράς – εφόσον λειτουργεί στα όριά της- μπορεί να εκφραστεί μέσω του σχετικού κόστους κατασκευής της γραμμής μεταφοράς, όπου από τον πίνακα της παραγράφου 4.4 προκύπτει μία έντονη μεταβολή του σχετικού κόστους ως προς το τελικό όριο μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής, καθώς αναδεικνύεται από πλευράς εγκατάστασης ότι η γραμμή μεταφοράς 400 kV διπλού κυκλώματος είναι η πιο οικονομική. Βέβαια δεν έχουν ληφθεί υπόψη τα λειτουργικά κόστη, τα επίπεδα φόρτισης και τα υπόλοιπα κόστη εγκατάστασης του δικτύου μεταφοράς, όπως υποσταθμοί κτλ. για να καταλήξουμε στην τελική επιλογή της γραμμής.

4.5 Τελικά Συμπεράσματα

Η σειρά επιλογής με βάση το συνολικό κόστος της γραμμής μεταφοράς ως προς το όριο φόρτισής της δεν μεταβάλλεται είτε επιλέγουμε στηριζόμενοι στο θερμικό όριο, είτε στηριζόμενοι στο δυσμενέστερο κριτήριο –που στην παρούσα περίπτωση είναι το όριο πτώσης τάσης. Απλώς μεταβάλλονται τα σημεία αλλαγής της επιλογής μας, καθώς στη δεύτερη περίπτωση τα όρια είναι αρκετά πιο περιορισμένα. Επίσης τίθεται το πρόβλημα του σχετικού κόστους της γραμμής μεταφοράς, εφόσον αυτή λειτουργεί στο όριό της, καθώς παρατηρούμε μία έντονη μεταβλητότητα, η οποία στη δεύτερη περίπτωση δεν ακολουθεί την ταξινόμηση του συνολικού κόστους, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του θερμικού ορίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα όσα αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια συνοπτικά μπορούμε να αναφέρουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Το θερμικό όριο επιδρά περιοριστικά στις γραμμές μεταφοράς για τα μικρά μήκη μέχρι τα 50 ως 100 km ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε γραμμής μεταφοράς.

- Το κριτήριο πτώσης τάσης επιδρά περιοριστικά για γραμμές με μεγαλύτερα μήκη. Συνήθως σε μικρές γραμμές κάτω των 50 km δεν παίζει σημαντικό ρόλο.

- Το κριτήριο στατικής ευστάθειας επιδρά κυρίως για γραμμές αρκετά μεγάλου μήκους και στην παρούσα περίπτωση δεν είδαμε να έχει καμία επίδραση μέχρι τα 200 km.

- Οι καμπύλες St. Clair μπορούν να παραστήσουν προσεγγιστικά σε ικανοποιητικό βαθμό τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να φέρει μία γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης.

- Με την προσθήκη κατάλληλου πυκνωτή είναι δυνατό να περιορίσουμε σημαντικά τη δράση του κριτηρίου πτώσης τάσης, χωρίς όμως να μπορούμε να διαφύγουμε ούτε από το κριτήριο στατικής ευστάθειας –αν και η συμπεριφορά του τελευταίου επηρεάζεται ευεγερτικά από την προσθήκη πυκνωτή, αρκετά λιγότερο όμως σε σχέση με την πτώση τάσης-, ούτε από το θερμικό όριο, το οποίο δεν επηρεάζεται από την προσθήκη πυκνωτών.

- Η σειρά επιλογής εγκατάστασης γραμμής μεταφοράς με βάση το συνολικό κόστος ως προς το όριο φόρτισής της δεν μεταβάλλεται είτε αν στηριζόμαστε μόνο στο θερμικό όριο, είτε αν στηριζόμαστε στο δυσμενέστερο κριτήριο –που στην παρούσα περίπτωση είναι το όριο πτώσης τάσης. Απλώς μεταβάλλονται τα σημεία αλλαγής της επιλογής μας, καθώς στη δεύτερη περίπτωση τα όρια είναι αρκετά πιο περιορισμένα.

- Το σχετικό κόστος εγκατάστασης μίας γραμμής μεταφοράς, εφόσον αυτή λειτουργεί στο όριό της, επηρεάζεται σημαντικά από ποιο κριτήριο θα χρησιμοποιήσουμε, όπως προκύπτει και από τους αντίστοιχους πίνακες του τέταρτου κεφαλαίου, καθώς άλλη ταξινόμηση προκύπτει αν χρησιμοποιήσουμε μόνο το θερμικό όριο και άλλη αν χρησιμοποιήσουμε το δυσμενέστερο όριο ανάμεσα σε θερμικό, πτώσης τάσης και στατική ευστάθεια.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MATLAB

Τα κυκλωματικά μοντέλα που χρησιμοποιήσαμε για την επίλυση των κριτηρίων πτώσης τάσης –παράγραφος 2.4-, στατικής ευστάθειας –παράγραφος 2.5- και την επιλογή της κατάλληλης αντιστάθμισης για τη γραμμή μεταφοράς έτσι, ώστε να έχουμε ταύτιση των κριτηρίων στατικής ευστάθειας και πτώσης τάσης –κεφάλαιο 3- αναπτύχθηκαν ως κώδικας με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB.

Π 1.1 Κώδικας σε MATLAB για το Κριτήριο Πτώσης Τάσης

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε τον κώδικα σε MATLAB, με τον οποίο υλοποιήθηκε η προσομοίωση του κυκλωματικού μοντέλου για τον προσδιορισμό της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε μονάδες φυσικής φόρτισης με βάση το κριτήριο πτώσης τάσης. Το αντίστοιχο θεωρητικό υπόβαθρο βρίσκεται στην παράγραφο 2.4.1, ενώ οι αρχικές συνθήκες και τα διάφορα αποτελέσματα που λάβαμε βρίσκονται στην παράγραφο 2.4.2.

Πρώτα από όλα γράφτηκε η συνάρτηση `diktio(x)`, η οποία περιέχει τη σχέση (2.4.1-15) συναρτήσει των μεγεθών της ωμικής αντίστασης της γραμμής ανά km, της αντίστοιχης επαγωγικής αντίδρασης, της αντίστοιχης χωρητικής αγωγιμότητας, του συντελεστή ισχύος, των τάσεων των δύο άκρων και του μήκους της γραμμής. Η συνάρτηση είναι η ακόλουθη :

```
function f = diktio(x)
% SB fisiki fortisi
SB=57311663.54;
% VB isxis basis poliki
VB=150000;
% ZB antistasi basis
ZB= VB*VB/SB;
% Zigos anaxwrisis
E=1.1;
% Zigos Afixis
V=0.9;
% Sintelestis isxios
SI=0.9;
% (1-SI**2)**1/2 => sinf
IMSI=sqrt(1-SI*SI);
% mikos grammis se km
L= 300;
% antistasi se ohm/Km
R=0.097;
% antistasi se pu
r1=R*L/ZB;
% epagwgiki antistasi X se ohm/Km
X=0.422;
% epagwgiki antistasi se pu
```

```
x1=X*L/ZB;
% xwritiki agwgimotia se microS/Km
B=2.738;
% antistasi se pu -prosoxi logw 10-6 & isodinamo p=> 1/(2*1000000)
b1=B*L*ZB/(2*1000000);
% blepe ejixwsi
B= (SI*r1+IMSI*x1-b1*IMSI*(r1*r1+x1*x1))*V^2/(r1*r1+x1*x1);
C=(V*V*((1-b1*x1)^2+(b1*r1)^2)-E^2)*V^2/(r1*r1+x1*x1);
f=x^2+2*B*x+C;
```

Προς επίλυση του προβλήματος καλούμε τη δική μας συνάρτηση μέσω της συνάρτησης `fzero`, η οποία βρίσκει με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης κοντά στο σημείο έναρξης της επίλυσης μία τιμή του x , η οποία μηδενίζει τη συνάρτηση `diktio`. Συγκεκριμένα την καλούμε με την ακόλουθη εντολή :

```
fzero('diktio',1)
```

όπου 1 είναι η αρχική τιμή δοκιμής εύρεσης λύσης, όπου από εκεί και πέρα μέσω της αριθμητικής μεθόδου που εφαρμόζει θα φθάσει σε μία ρίζα της συνάρτησης `diktio(x)`. Σημειώνουμε σ' αυτό το σημείο ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην αρχική τιμή για να μην λάβουμε άλλες ρίζες εκτός των επιθυμητών.

Π 1.2 Κώδικας σε MATLAB για το Κριτήριο Στατικής Ευστάθειας

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε τον κώδικα σε MATLAB, με τον οποίο υλοποιήθηκε η προσομοίωση του κυκλωματικού μοντέλου για τον προσδιορισμό της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε μονάδες φυσικής φόρτισης με βάση το κριτήριο στατικής ευστάθειας. Παράλληλα υπολογίζουμε και την τάση στο άκρο του ζυγού άφιξης. Το αντίστοιχο θεωρητικό υπόβαθρο βρίσκεται στην παράγραφο 2.5.1, ενώ οι αρχικές συνθήκες και τα διάφορα αποτελέσματα που λάβαμε βρίσκονται στην παράγραφο 2.5.2.

Πρώτα από όλα γράφτηκε η συνάρτηση `diktio2(L)`, η οποία περιέχει τις σχέσεις της παραγράφου 2.5.1 συναρτήσει των μεγεθών της ωμικής αντίστασης της γραμμής ανά km, της αντίστοιχης επαγωγικής αντίδρασης, της αντίστοιχης χωρητικής αγωγιμότητας, του συντελεστή ισχύος και της τάσης του άκρου αναχώρησης. Η συνάρτηση είναι η ακόλουθη :

```
function f = diktio2(L)
% S->x MEGISTH METAFEROMENH ISXYS ME KRITHRIO STATIKHS EYSTATHEIAS
% SB fisiki fortisi
SB=57311663.54;
% VB isxis basis poliki
VB=150000;
% ZB antistasi basis
ZB= VB*VB/SB;
% Zigos anaxwrisis
E=1.1;
% Sintelestis isxios
SI=0.9;
% (1-SI**2)**1/2 => sinf
```

```

IMSI=sqrt(1-SI*SI);
% mikos grammis se km => L
% antistasi se ohm/Km
R=0.097;
% antistasi se pu
r1=R*L/ZB;
% epagwgiki antistasi X se ohm/Km
X=0.422;
% epagwgiki antistasi se pu
x1=X*L/ZB;
% xwritiki agwgimotia se microS/Km
B=2.738;
% antistasi se pu -prosoxi logw 10-6 & isodinamo p=> 1/(2*1000000)
b1=B*L*ZB/(2*1000000);
% piknwtis se S
BC=0;
% piknwtis se am
bc=BC*ZB;
% xwritiki agwgimotita sinoliki
bo=b1+bc;
% blepe ejixwsi (2.5.1-4)
Eth=E/sqrt((1-bo*x1).^2+(bo*r1).^2);
% blepe ejixwsi (2.5.1-5)
Rth=r1/((1-bo*x1).^2+(bo*r1).^2);
% blepe ejixwsi (2.5.1-6)
Xth=(x1*(1-bo*x1)-bo*r1.^2)/((1-bo*x1).^2+(bo*r1).^2);
% Zth (2.5.1-12)
Zth=sqrt(Rth.^2+Xth.^2);
% RlmaxP (2.5.1-14)
Rlmax=Zth*SI;
% Xlmaxp (2.5.1-15)
Xlmax=Zth*IMSI;
% TASH ZYGOY
V=Eth*sqrt((Rlmax.^2+Xlmax.^2)/((Rth+Rlmax).^2+(Xth+Xlmax).^2))
% ISXYS ZYGOY
f=(Eth.^2)*Rlmax/((Rth+Rlmax).^2+(Xth+Xlmax).^2)/SI;

```

Προς επίλυση του προβλήματος καλούμε τη δική μας συνάρτηση $diktio2(L)$ θέτοντας την επιθυμητή τιμή του μήκους της γραμμής μεταφοράς σε km, για την οποία θέλουμε να προσδιορίσουμε τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ.

Π 1.3 Κώδικας σε MATLAB για την Εύρεση της Χωρητικής Αντιστάθμισης

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε τον κώδικα σε MATLAB, με τον οποίο υλοποιήθηκε η προσομοίωση του κυκλωματικού μοντέλου για τον προσδιορισμό της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε μονάδες φυσικής φόρτισης και του ποσοστού αντιστάθμισης σε σχέση με την επαγωγική αντίδραση της γραμμής, όταν το κριτήριο πτώσης τάσης και στατικής ευστάθειας είναι ισοδύναμα. Το αντίστοιχο θεωρητικό υπόβαθρο βρίσκεται στην παράγραφο 3.2, ενώ οι αρχικές συνθήκες και τα διάφορα αποτελέσματα που λάβαμε βρίσκονται στην παράγραφο 3.3.

Πρώτα από όλα γράφτηκε η συνάρτηση diktio3(x), η οποία περιέχει τις σχέσεις των παραγράφων 2.4.1, 2.5.1 και 3.2 συναρτήσει των μεγεθών της ωμικής αντίστασης της γραμμής ανά km, της αντίστοιχης επαγωγικής αντίδρασης, της αντίστοιχης χωρητικής αγωγιμότητας, του συντελεστή ισχύος, των τάσεων των δύο άκρων και του μήκους της γραμμής. Η συνάρτηση έχει ως άγνωστη μεταβλητή το ποσοστό x(%) της αντιστάθμισης ως προς την επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς και έχει την ακόλουθη μορφή:

```
function f = diktio3(x)
% S->x MEGISTH METAFEROMENH ISXYS ME KRITHRIO STATIKHS EYSTATHEIAS
% SB fisikiki fortisi
SB=57311663.54;
% VB isxis basis poliki
VB=150000;
% ZB antistasi basis
ZB= VB*VB/SB;
% Zigos anaxwrisis
E=1.1;
% Zigos afixis
V=0.9;
% Sintelestis isxios
SI=0.9;
% (1-SI**2)**1/2 => sinf
IMSI=sqrt(1-SI*SI);
% mikos grammis se km => L
L=300;
% antistasi se ohm/Km
R=0.097;
% antistasi se pu
r1=R*L/ZB;
% epagwgiki antistasi X se ohm/Km
X=0.422;
% epagwgiki antistasi se pu
x1=X*L/ZB;
% xwritiki agwgimotia se microS/Km
B=2.738;
% antistasi se pu -prosoxi logw 10-6 & isodinamo p=> 1/(2*1000000)
b1=B*L*ZB/(2*1000000);
% piknwtis se am
bc=x/(100*x1);
% xwritiki agwgimotita sinoliki
bo=b1+bc;
% blepe ejixwsi (2.5.1-4)
Eth=E/sqrt((1-bo*x1).^2+(bo*r1).^2);
% blepe ejixwsi (2.5.1-5)
Rth=r1/((1-bo*x1).^2+(bo*r1).^2);
% blepe ejixwsi (2.5.1-6)
Xth=(x1*(1-bo*x1)-bo*r1.^2)/((1-bo*x1).^2+(bo*r1).^2);
% Zth (2.5.1-12)
Zth=sqrt(Rth.^2+Xth.^2);
% RlmaxP (2.5.1-14)
Rlmax=Zth*SI;
% Xlmaxp (2.5.1-15)
Xlmax=Zth*IMSI;
% EJISWSH TASHS ZYGOY
f=-V+Eth*sqrt((Rlmax.^2+Xlmax.^2)/((Rth+Rlmax).^2+(Xth+Xlmax).^2));
% ISXYS ZYGOY
P=(Eth.^2)*Rlmax/((Rth+Rlmax).^2+(Xth+Xlmax).^2)/SI
```

Προς επίλυση του προβλήματος καλούμε τη δική μας συνάρτηση μέσω της συνάρτησης `fzero`, η οποία βρίσκει με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης κοντά στο σημείο έναρξης της επίλυσης μία τιμή του x , η οποία μηδενίζει τη συνάρτηση `diktio3`. Συγκεκριμένα την καλούμε με την ακόλουθη εντολή :

```
fzero('diktio3',35)
```

όπου 35 είναι η αρχική τιμή δοκιμής εύρεσης λύσης, όπου από εκεί και πέρα μέσω της αριθμητικής μεθόδου που εφαρμόζει θα φθάσει σε μία ρίζα της συνάρτησης `diktio3(x)`. Σημειώνουμε σ' αυτό το σημείο ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην αρχική τιμή, για να μην λάβουμε άλλες ρίζες εκτός των επιθυμητών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζουμε τα ελληνικά και ξένα συγγράμματα και τα άρθρα από τα οποία αντλήθηκαν πληροφορίες κατά τη συγγραφή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Μέσα στο κείμενο γίνεται αναφορά σε ορισμένα από αυτά, όταν πρόκειται να γίνει χρήση πινάκων ή ειδικών γραφημάτων, χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη αρίθμηση.

Π 4.1 ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [E1] Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξής : « Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας », Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1997
- [E2] Β.Κ.Παπαδιάς : « Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Μόνιμη Κατάσταση», Τόμος Ι, Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Συμμετρία, 1985
- [E3] Β.Κ.Παπαδιάς : « Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ασύμμετρες και Μεταβατικές Κατάστασεις », Τόμος ΙΙ, Πρώτη Έκδοση, Εκδόσεις Συμμετρία, 1985
- [E4] Β.Κ.Παπαδιάς : « Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας », Δεύτερη Έκδοση, Εκδόσεις Συμμετρία, 1991
- [E5] Κ.Βουρνάς, Β.Κ.Παπαδιάς : «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας », Δεύτερη Έκδοση, Εκδόσεις Συμμετρία, 1991

Π 4.2 ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [Ξ1] Thierry Van Cutsem, Costas Vournas : « Voltage Stability of Electric Power Systems », Kluwer Academic Publishers
- [Ξ2] User's Guide : « Matlab, High-Performance Numeric Computation and Visualization Software », first edition, The MATHWORKS Inc., 1992

Π 4.3 ΑΡΘΡΑ

- [Α1] R. D. Dunlop, R. Gutman, P. P. Marchenko : « Analytical Development of Loadability Characteristics for EHV and UHV Transmission Lines », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.2 March/April 1979, pp.606-613