ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ, ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Της φοιτήτριας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

Μάρρα Αφροδίτης του Χρήστου
Αριθμός Μητρώου: 5689

Θέμα

«Ανάλυση ευστάθειας τάσης υπό συνήθεις διαταραχές»

Επιβλέπων

Αντώνιος Αλεξανδρίδης, Καθηγητής

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:
Πάτρα, Μάρτιος 2011

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με θέμα

«Ανάλυση ευστάθειας τάσης υπό συνήθεις διαταραχές»

Της φοιτήτριας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

Μάρρα Αφροδίτης του Χρήστου

Αριθμός Μητρώου: 5689

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

3/3/2011

Ο Επιβλέπων	Ο Διευθυντής του Τομέα
Αντώνιος Αλεξανδρίδης	Αντώνιος Αλεξανδρίδης
Καθηγητής	Καθηγητής

Αριθμός Διπλωματικής
Εργασίας:

Θέμα: **«Ανάλυση ευστάθειας τάσης υπό συνήθεις διαταραχές»**

Φοιτήτρια: **Μάρρα Αφροδίτη**

Επιβλέπων: **Αντώνιος Αλεξανδρίδης, Καθηγητής**

Περίληψη

Η αστάθεια τάσης αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα σύστημα εισέρχεται σε κατάσταση αστάθειας τάσης λόγω αύξησης της ζήτησης, μιας ξαφνικής, ευρείας κλίμακας διαταραχής ή αλλαγής στην κατάσταση του, που μπορεί να προκαλέσει μια σταδιακή και ανεξέλεγκτη πτώση τάσης. Παρουσιάζει, λοιπόν, ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος σε σχέση με την ευστάθεια της τάσης. Επίσης, κατά τη λειτουργία ενός Σ.Η.Ε., είναι σημαντικό για το χειριστή να γνωρίζει το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο του συστήματος χωρίς να κινδυνεύει από αστάθεια τάσης.

Η δυναμική ευστάθεια τάσης μπορεί να διαιρεθεί σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα δώσουμε έμφαση στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης. Για το σκοπό αυτό, αναπτύσσονται δυναμικά μοντέλα που περιγράφουν τη λειτουργία απλών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον του MATLAB/SIMULINK. Διερευνάται η επίδραση του φορτίου επαγωγικού κινητήρα ενός απλού Σ.Η.Ε., όσον αφορά στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης, χρησιμοποιώντας τις P-V καμπύλες τόσο του κινητήρα όσο και του δικτύου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, κατόπιν επαληθεύονται παρατηρώντας τις καταστάσεις του συστήματος στο

πεδίο του χρόνου. Με την ανάλυση φαίνεται ότι με την ανάλυση φαίνεται ότι μετά από βραχυκύκλωμα η τάση του συστήματος μειώνεται δραστικά και αυτό μπορεί να προκαλέσει την κατάρρευση του συστήματος όταν αυτό έχει ως φορτίο επαγωγικό κινητήρα. Η κατάρρευση αυτή μπορεί να αποφευχθεί με την όσο το δυνατόν ταχύτερη εκκαθάριση του σφάλματος. Σημαντικός παράγων γι' αυτό είναι ο καθορισμός του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος με σκοπό την αποφυγή της εμφάνισης αστάθειας. Το πρόβλημα αυτό αναλύεται διεξοδικά και ορίζονται με αναλυτικό τρόπο τόσο ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης όσο και η κρίσιμη τιμή της ολίσθησης του επαγωγικού κινητήρα. Χρησιμοποιώντας επιπλέον χωρητική αντιστάθμιση αέργου ισχύος αναλύεται ο τρόπος που αυτή βελτιώνει τα περιθώρια ευσταθούς λειτουργίας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων.

Στη συνέχεια, για τον καθορισμό ενός δείκτη ευστάθειας τάσης σε σχέση με το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο σε ένα δίκτυο, περιγράφεται μία διαδικασία καθορισμού ενός τέτοιου δείκτη, η οποία βασίζεται στη σύνθετη τιμή της τάσης όλων των ζυγών ενός συστήματος. Ο προτεινόμενος δείκτης χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μέγιστης φόρτισης του συστήματος. Επιπροσθέτως, καθορίζονται τα πιο «αδύναμα» τμήματα του συστήματος (κρίσιμος ζυγός και κρίσιμη γραμμή) για κατάλληλη άεργο αντιστάθμιση προς αποφυγή κατάρρευσης της τάσης.

Abstract

Voltage instability has been a great concern for quite a long time in electric power industry. A system enters a state of voltage instability due to increase in demand, a sudden large disturbance or a change in system condition that causes a progressive and uncontrollable decline in voltage. It is therefore interesting to study both the dynamic and static aspects of voltage stability. Dynamic voltage stability can be divided into short-term and long-term based on the dynamics of the components that affect the voltage stability. In this project, we will emphasize on short-term stability.

In this study, dynamic models of various power system components are successfully developed in MATLAB/SIMULINK platform. The effect of induction motor load on short-term voltage stability of a simple power system is investigated using the network and motor P-V curves and the results are found and then verified by observing the system states in time domain. Once the reason of voltage instability is identified, a remedial action using fixed capacitive reactive support is suggested to prevent the voltage instability. During a fault, the system voltage reduces drastically and that may cause to stall the induction motors. Stalling of induction motor can be prevented by clearing the fault as quickly as possible. A technique of determining the critical fault clearing time to prevent stalling of induction motor is also presented.

In power system operation, it is important for the dispatcher to have knowledge on the maximum permissible loading of the system without reaching voltage instability. In this study, a method of determining the voltage stability index of a system based on the complex voltage of all buses in the system is described. The proposed index is then used in estimating the maximum loading of the system and is based on the information of present and past operating points. In addition, the weakest segments (critical bus and

critical line) of the system are also identified for appropriate reactive compensations to avoid voltage collapse. The correctness of the identified critical bus and critical line is then verified by placing shunt/series capacitors at various locations and comparing the corresponding critical load multiplier factors

Ευχαριστίες

Αυτή η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε σε συνεργασία με το συνάδελφο Μαθιανάκη Γεώργιο. Καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της μελέτης η συνεργασία μας ήταν άψογη.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Αντώνιο Αλεξανδρίδη για την εποικοδομητική συνεργασία και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα που καλύπτει πλήρως τα ενδιαφέροντά μου. Η καθοδήγησή του ήταν ουσιαστική ενώ η διάθεση που έδειξε σε συνδυασμό με την επιστημονική του γνώση συνέβαλαν τα μέγιστα στην επιτυχή πραγματοποίηση της εργασίας μου.

Επίσης ευχαριστώ τον καθηγητή Νικόλαο Βοβό που δέχθηκε να αξιολογήσει την παρούσα μελέτη.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω θερμά την υποψήφια διδάκτορα του τμήματος Φυσικής Κοτζαγιάννη Μαρία και την αξιότιμη φίλη Λία Μιχαλάκη, για την πολύτιμη βοήθεια τους και την αμέριστη συμπαράστασή.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την ηθική και υλική υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια, τόσο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας μελέτης όσο και καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΆΛΑΙΟ 1ΕΙΣΑΓΩΓΉ 1

1.1 Ιστορικό, Κίνητρο και Σκοπός..... 1

1.1.1 Ιστορικό 1

1.1.2 Κίνητρο..... 4

1.1.3 Σκοπός..... 6

1.2 Οργάνωση εργασίας..... 7

ΚΕΦΆΛΑΙΟ 2ΣΥΣΤΉΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΉΣ ΕΝΈΡΓΕΙΑΣ..... 8

2.1 Εισαγωγή 8

2.2 Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας 12

2.2.1 Μελέτη ροής φορτίου 14

2.2.2 Οικονομική λειτουργία ΣΗΕ..... 17

2.2.3 Μελέτες σφαλμάτων 18

2.2.4 Μελέτες μεταβατικής ευστάθειας..... 21

2.2.5 Αστάθεια τάσης 24

2.3 Ρόλος των υπολογιστών στην ανάλυση ΣΗΕ..... 26

2.4 Βασικές συνιστώσες των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας 29

2.4.1 Σύγχρονες μηχανές 29

2.4.2 Μετασχηματιστές 33

2.4.3 Γραμμές Μεταφοράς 34

2.4.4 Φορτία..... 36

ΚΕΦΆΛΑΙΟ 3ΜΕΛΈΤΗ ΕΥΣΤΆΘΕΙΑΣ ΤΆΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΉ ΚΑΤΆΣΤΑΣΗ 37

3.1 Εισαγωγή 37

3.2 Βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης 40

3.2.1 Το υπό μελέτη σύστημα και το μαθηματικό του μοντέλο 41
3.2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα δύο ζυγών του υπό μελέτη συστήματος 44
3.2.3 Απώλεια γραμμής 51
3.2.4 Τριφασικό βραχυκύκλωμα 55
3.2.5 Καθορισμός κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης βραχυκυκλώματος 57
3.2.6 Καθορισμός της κρίσιμης τιμής ολίσθησης 59
3.3 Εξομοίωση μοντελοποίησης 63
3.4 Βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης - Αποτελέσματα της εξομοίωσης 65
3.4.1 Απόκριση συστήματος σε ξαφνική απώλεια γραμμής 65
3.4.2 Απόκριση συστήματος σε τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό Α 70
3.4.3 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος 75
ΚΕΦΆΛΑΙΟ 4ΜΕΛΈΤΗ ΕΥΣΤΆΘΕΙΑΣ ΤΆΣΗΣ ΣΤΗ ΜΌΝΙΜΗ ΚΑΤΆΣΤΑΣΗ 81
4.1 Εισαγωγή 81
4.2 Μελέτη Ροής Φορτίου 83
4.3 Στατικές Εξισώσεις Ροής Φορτίου – Γενική Θεώρηση 86
4.4 Τεχνικές επίλυσης προβλήματος ροών φορτίου 91
4.4.1 Μέθοδος Gauss-Seidel 92
4.4.2 Μέθοδος Newton-Raphson 97
4.5 Προτεινόμενη Μεθοδολογία 103
4.5.1 Εργαλεία 104

4.6 Καθορισμός του δείκτη ευστάθειας τάσης γραμμής (LVSI) 106

4.6.1 Σύστημα δύο ζυγών 106

4.6.2 Σύστημα δύο ζυγών με μετασχηματιστή με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού 110

4.6.3 Δείκτης ευστάθειας τάσης γραμμής μεταφοράς σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 114

4.7 Καθορισμός του δείκτη ευστάθειας τάσης VSI ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας 115

4.8 Αποτελέσματα και σχόλια 131

ΚΕΦΆΛΑΙΟ 5ΣΥΜΠΕΡΆΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΆΣΕΙΣ 138

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΊΑ 140

ΠΑΡΆΡΤΗΜΑ 142

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος t_{cr} 77

Πίνακας 3.2 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος t_{cr} με χωρητική αντιστάθμιση 77

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ροής φορτίου με τη μέθοδο Gauss - Seidel 118

Πίνακας 4.2 Ροές ισχύος γραμμών και απώλειες 123

Πίνακας 4.3 Μέτρο και φάση τάσης IEEE Συστήματος 30 ζυγών σε φορτίο βάσης 125

Πίνακας 4.4 Σύστημα IEEE 30 ζυγών - Μονοπάτια ροής ισχύος σε φορτίο βάσης 128

Πίνακας 4.5 Τιμές του δείκτη PVSI όλων των πιθανών μονοπατιών ισχύος του συστήματος 129

Πίνακας 4.6 Τιμές του LL ως δείκτη ευστάθειας του συστήματος στο κρίσιμο μονοπάτι ροής ισχύος 131

Πίνακας 4.7 Δείκτης ευστάθειας τάσης VSI και συντελεστής φόρτισης λ 133

Πίνακας 4.8 Υπολογισμός κρίσιμου συντελεστή φόρτισης λ_{cr} και ποσοστό σφάλματος 134

Πίνακας 4.9 VSI^2 και συντελεστής φόρτισης λ 135

Πίνακας 4.10 Υπολογισμός κρίσιμου συντελεστή φόρτισης λcr και ποσοστό σφάλματος 136

Πίνακας 4.11 Κρίσιμος συντελεστής φόρτισης με εν σειρά πυκνωτή αντιστάθμισης αέργου ισχύος 137

Πίνακας 4.12 Κρίσιμος συντελεστής φόρτισης με εγκάρσιο πυκνωτή αντιστάθμισης αέργου ισχύος 137

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Βασική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας 9

Σχήμα 2.2 Σχηματική παράσταση τομής σύγχρονης μηχανής 30

Σχήμα 2.3 Σχηματική παράσταση των δύο τύπων σύγχρονων μηχανών 32

Σχήμα 3.1 Ταξινόμηση τύπων ευστάθειας τάσης 37

Σχήμα 3.2 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του υπό μελέτη συστήματος για μεταβατική ευστάθεια τάσης 40

Σχήμα 3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος του σχήματος 3.2. 41

Σχήμα 3.4 Αναπαράσταση με δύο ζυγούς του υπό μελέτη συστήματος όπως δίνεται στο σχήμα 3.3 45

Σχήμα 3.5 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V του δικτύου 48

Σχήμα 3.6 Χαρακτηριστικές P-V καμπύλες του κινητήρα 49

Σχήμα 3.7 Αναπαράσταση των P-V καμπυλών του δικτύου και του κινητήρα, I: με δύο γραμμές μεταφοράς, II: με μία γραμμή μεταφοράς 52

Σχήμα 3.8 Αναπαράσταση των P-V καμπυλών του δικτύου και του κινητήρα, I: με δύο γραμμές μεταφοράς, II: με μία γραμμή μεταφοράς, III: μία γραμμή με πυκνωτή στα άκρα του κινητήρα 54

Σχήμα 3.9 Αναπαράσταση των P-V καμπυλών του δικτύου και του κινητήρα, I: με δύο γραμμές μεταφοράς, II: με μία γραμμή μεταφοράς, III: μία γραμμή με πυκνωτή στα άκρα του κινητήρα 56

Σχήμα 3.10 Χαρακτηριστικές ροπής ολίσθησης του επαγωγικού κινητήρα 60

Σχήμα 3.11 Simulink μοντελοποίηση συστήματος για μελέτη βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης 63

Σχήμα 3.12 Μεταβολή των τάσεων (V_t και V_r) και της ισχύος φορτίου P για ξαφνική απώλεια γραμμής 66

Σχήμα 3.13 Τοπολογία του σημείου λειτουργίας για απώλεια μίας γραμμής 67

Σχήμα 3.14 Μεταβολή των τάσεων (V_t και V_r) και της ισχύος φορτίου P για ξαφνική απώλεια γραμμής με αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε χρόνο t=6sec 68

Σχήμα 3.15 Τοπολογία του σημείου λειτουργίας για απώλεια μίας γραμμής με αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε χρόνο t=6sec 69

Σχήμα 3.16 Μεταβολή των τάσεων (V_t και V_r) και της ισχύος φορτίου P για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε χρόνο t=2sec και χρόνο εκκαθάρισης σε χρόνο t=2.15sec με αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε χρόνο t=6sec. 71

Σχήμα 3.17 Τοπολογία του σημείου λειτουργίας P για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε χρόνο t=2sec και χρόνο εκκαθάρισης σε χρόνο t=2.15sec με αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε χρόνο t=6sec. 72

Σχήμα 3.18 Μεταβολή των τάσεων (V_t και V_r) και της ισχύος φορτίου P για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε χρόνο t=2sec και χρόνο εκκαθάρισης σε χρόνο t=2.25sec..... 73

Σχήμα 3.19 Τοπολογία του σημείου λειτουργίας για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε χρόνο t=2sec και χρόνο εκκαθάρισης σε χρόνο t=2.25sec..... 74

Σχήμα 3.20 Χαρακτηριστικές ροπής ολίσθησης του επαγωγικού κινητήρα, A: με μία γραμμή, B: με μία γραμμή και πυκνωτή στα άκρα της μηχανής..... 76

Σχήμα 3.21 Μεταβολή της ολίσθησης συναρτήσει του χρόνου. 79

Σχήμα 3.22 Μεταβολή της ολίσθησης συναρτήσει του χρόνου με χωρητική αντιστάθμιση 80

Σχήμα 4.1 Γενική μορφή ζυγού 86

Σχήμα 4.2 Αντικατάσταση παραγωγής και κατανάλωσης με ισοδύναμη πηγή ισχύος..... 87

Σχήμα 4.3 Παράσταση συστήματος n ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου..... 88

Σχήμα 4.4 Απλό σύστημα δύο ζυγών για τον καθορισμό του δείκτη LVSI 106

Σχήμα 4.5 Διαφοροποίηση των δεικτών ευστάθειας τάσης γραμμής ανάλογα με το φορτίο..... 109

Σχήμα 4.6 Απλό σύστημα δύο ζυγών με μετασχηματιστή με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού. 111

Σχήμα 4.7 Ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.6..... 112

Σχήμα 4.8 Ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.7..... 113

Σχήμα 4.9 Γραμμή μεταφοράς συνδεδεμένη ανάμεσα σε δύο ζυγούς σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας..... 114

Σχήμα 4.10 IEEE πειραματικό σύστημα 30 ζυγών 116

Σχήμα 4.11 Αναγνώριση μονοπατιών ροής ισχύος 126

Σχήμα 4.12 Μεταβολή του VSI συναρτήσει του λ 133

Σχήμα 4.13 Μεταβολή του VSI (καμπύλη a) και του VSI2 (καμπύλη b) σχετικά με τον συντελεστή πολλαπλασιασμού φορτίου 135

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
VSI	Δείκτης Ευστάθειας Τάσης (Voltage Stability Index)
LVSI	Δείκτης Ευστάθειας Τάσης Γραμμής (Line Voltage Stability Index)
PVSI	Δείκτης Ευστάθειας Τάσης Μονοπατιού Ροής Ισχύος (Power Flow Path Voltage Stability Index)

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό, Κίνητρο και Σκοπός

1.1.1 Ιστορικό

Η απελευθέρωση της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας επέφερε σοβαρές αλλαγές στις απαιτήσεις για την μεταφορά ενέργειας. Αυτές οι προκλήσεις έρχονται μαζί με μία ολοένα αυξανόμενη έλλειψη ανοχής στην φτωχής ποιότητας ενέργεια, η οποία προέρχεται από την συνεχώς εξελισσόμενη βιομηχανία, και την κοινωνία σαν σύνολο, η οποία δεν μπορεί πλέον να ανεχτεί διακοπές και άλλου είδους διαταραχές στην ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας διότι αυτή επηρεάζει την λειτουργία των μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πιθανά προβλήματα αθροίζονται περαιτέρω με κοινωνικά, περιβαλλοντικά, και οικονομικά προβλήματα τα οποία δυσχεραίνουν την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς. Η άνθιση της απελευθερωμένης αγοράς ενέργειας έχει οδηγήσει σε μεγάλη επιβάρυνση του δικτύου μεταφοράς εξαιτίας της λειτουργίας του δικτύου με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει το μικρότερο δυνατό κόστος. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα τα οποία συνδέονται με τα υπερφορτωμένα δίκτυα είναι η ευστάθεια τάσης ή η κατάρρευση τάσης. Η κατάρρευση τάσης είναι μία διαδικασία η οποία οδηγεί σε σημαντική μείωση της τάσης σε ένα μεγάλο τμήμα ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Προβλήματα στις γεννήτριες ή στις γραμμές μεταφοράς συχνά οδηγούν σε κατάρρευση τάσης. Τα τελευταία χρόνια η πτώση τάσης έχει εξελιχθεί σε έναν από τους σοβαρότερους λόγους για τους οποίους συμβαίνουν τα blackouts. Το 2003, συνέβησαν πέντε blackouts μέσα σε έξι εβδομάδες, τα οποία επηρέασαν 112 εκατομμύρια άτομα στις ΗΠΑ, στη Μεγάλη Βρετανία, τη Δανία, τη Σουηδία και την Ιταλία.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι προσέγγισης της ανάλυσης του προβλήματος της πτώσης τάσης, η στατική και η δυναμική. Οι στατικές μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη το στατικό μοντέλο των στοιχείων ενός ΣΗΕ, και αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά σημαντική στην λειτουργία ενός ΣΗΕ καθώς και στη φάση του σχεδιασμού του, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ικανοποιητικό σχέδιο για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων σε κάθε ενδεχόμενο. Οι δυναμικές μέθοδοι χρησιμοποιούν εξομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου για να αποκαλύψουν το μηχανισμό της πτώσης τάσης, δηλαδή πότε και πως συμβαίνει. Οι δυναμικές μέθοδοι αναλύουν την επίδραση των δυναμικών φορτίων, των συστημάτων αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ, on-load tap changers OLTC), συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ) των γεννητριών (over excitation limiters OXL) κ.τ.λ. στο φαινόμενο της κατάρρευσης της τάσης.

Η λειτουργία ενός ΣΗΕ στηρίζεται κυρίως στην αλληλεπίδραση τριών στοιχείων, όπως πηγές ισχύος, φορτία και δίκτυα. Σε κάποιες περιπτώσεις όπως η απώλεια μίας γεννήτριας, μίας γραμμής μεταφοράς, ή ενός μετασχηματιστή σε περίπτωση αύξησης φορτίου, είναι δυνατόν να προκληθεί βύθιση τάσης και ίσως κατάρρευση.

Κατά τη διάρκεια των είκοσι τελευταίων ετών έχει παρατηρηθεί ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον αλλά και εκπόνηση ερευνών πάνω στα φαινόμενα της πτώσης αλλά και της κατάρρευσης τάσης. Η πρώτη εργασία αναφορικά με την ευστάθεια τάσης παρουσιάστηκε το έτος 1968. Το 1975 ο Venikov et al., πρότεινε τα πρώτα κριτήρια βάσει των οποίων μπορούμε να εντοπίσουμε το κομβικό σημείο κατάρρευσης τάσης. Παρόλο που η έννοια της αστάθειας τάσης ήταν γνωστή για πολύ καιρό, η επισταμένη έρευνα πάνω σε αυτό το πεδίο άρχισε τη δεκαετία του ογδόντα.

Η ευστάθεια τάσης σε ένα ΣΗΕ βασίζεται κυρίως στη συμπεριφορά των στοιχείων που το αποτελούν μετά από μία ξαφνική διαταραχή. Στα συστήματα

ισχύος, τα στοιχεία τα οποία είναι κυρίως ευθυνόμενα για την αστάθεια τάσης είναι από τη φύση τους μη γραμμικά, όπως για παράδειγμα γεννήτριες, μηχανές, φορτία κτλ. Η ευστάθεια ενός ΣΗΕ εξαρτάται κυρίως από την αλληλεπίδραση των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε αυτό. Ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη η μοντελοποίηση όλων των στοιχείων του συστήματος μεμονωμένα προκειμένου να έχουμε μία σαφή εικόνα της συμπεριφοράς και της απόδοσής τους. Τα επίπεδα της τάσης μπορούν να ελεγχθούν με τρεις τρόπους, ήτοι:

1. Ρυθμίζοντας τη διέγερση της γεννήτριας
2. Με αντιστάθμιση της αέργου ισχύος
3. Με συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο

Η αστάθεια τάσης ή κατάρρευση τάσης σχετίζεται με την ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα στη τιμή της τάσης σε όλους τους ζυγούς του συστήματος τόσο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας όσο και μετά από διαταραχές. Ένα υπερφορτισμένο δίκτυο εισέρχεται σε κατάσταση αστάθειας τάσης λόγω μίας μεγάλης ξαφνικής διαταραχής ή μίας αλλαγής στην κατάσταση του συστήματος η οποία προκαλεί σταδιακή και ανεξέλεγκτη πτώση της τιμής της τάσης. Ο κύριος παράγοντας για την αστάθεια τάσης είναι η αδυναμία του συστήματος να καλύψει τις απαιτήσεις αέργου ισχύος.

1.1.2 Κίνητρο

Στις νέες αγορές ενέργειας η δυναμική απόδοση και η ευστάθεια αρχίζουν να γίνονται σημαντικός παράγοντας στο σχεδιασμό και τη λειτουργία μεγάλων ΣΗΕ λόγω της αυξημένης μεταφοράς ισχύος. Γι' αυτό το λόγο είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσα η ανάλυση της ευστάθειας τάσης και της μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος πέρα ανάλυση ευστάθειας τάσης στη μόνιμη κατάσταση υπό συνήθεις διαταραχές.

Για τη μελέτη ευστάθειας τάσης έχουν αναπτυχθεί πολλά είδη λογισμικού τόσο για ερευνητικούς όσο και για εμπορικούς σκοπούς. Για παράδειγμα η μέθοδος UWFLOW του Πανεπιστημίου του Waterloo στον Καναδά, η μέθοδος ASTRE του Πανεπιστημίου του Liege στο Βέλγιο, η μέθοδος CPF/EQTP του Πανεπιστημίου της Αϊόβα, η AVS του New South Wales στην Αυστραλία, η VOSTA του Πολυτεχνείου του Μιλάνου και του Πανεπιστημίου της Πάβια στην Ιταλία, η VSA της Siemens, η VSAT των Powertech labs στον Καναδά, η EUROSTAG από την Tractebel Engineering στο Βέλγιο, η ETMSP της EPRI, η μέθοδος NETOMAC της Siemens.

Κάποια από τα παραπάνω επαγγελματικά λογισμικά, αν και αποτελεσματικά, είναι πολύ δαπανηρά, ενώ αυτά με ενσωματωμένα μοντέλα μπορεί να στερούνται διαφάνειας. Η τροποποίηση των συγκεκριμένων λογισμικών για ερευνητικούς λόγους είναι ασύμφορη ενώ είναι εξαιρετικά χρονοβόρα η εξοικείωση με ένα τόσο πολύπλοκο λειτουργικό σύστημα. Το πρόγραμμα MATLAB χρησιμοποιείται κατά κόρον στα πανεπιστήμια και το SIMULINK είναι ένα ευρέως διαδεδομένο περιβάλλον για την εξομοίωση και την ανάπτυξη δυναμικών συστημάτων.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων στοιχείων ενός συστήματος ισχύος, στη ευστάθεια τάσης ενός ΣΗΕ. Επιπλέον, μία από τις βασικές παραμέτρους για το πρόβλημα ευστάθειας τάσης είναι το

έλλειμμα της αέργου ισχύος ιδιαίτερα σε κομμάτια του συστήματος πλησίον σε κέντρα φορτίου. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να περιοριστεί το πρόβλημα ευστάθειας τάσης παρέχοντας άεργο ισχύ σε περιοχές του συστήματος που είναι κρίσιμες όσον αφορά στην άεργο ισχύ. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι στη βιβλιογραφία προκειμένου να καθοριστεί το περιθώριο ευστάθειας τάσης βάσει της Ιακωβιανής μήτρας. Εντούτοις, κάποιες μέθοδοι, που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, υπονοούν ότι η σημειακή τάση και οι φάσορες της έντασης περιέχουν πληροφορίες για τον προσδιορισμό των περιοχών εκείνων που τείνουν προς αστάθεια τάσης. Η χρήση, λοιπόν, τέτοιων πληροφοριών προκειμένου να καθορίσουν το δείκτη ευστάθειας τάσης ενός ΣΗΕ, μας οδήγησε στην ανάπτυξη ενός αλγορίθμου, που μπορεί να προσδιορίσει τις περιοχές εκείνες που τείνουν περισσότερο προς αστάθεια τάσης, καθώς και στην πρόταση μίας μεθόδου για την αντιστάθμισή της.

1.1.3 Σκοπός

Η ευστάθεια τάσης ενός ΣΗΕ σε πραγματικό χρόνο εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφόρων στοιχείων όπως OLTC, OXL, AVR, γεννητριών, επαγωγικών κινητήρων, κτλ. Οι στόχοι της παρούσης εργασίας είναι:

- ✓ Η ανάπτυξη των μοντέλων διαφόρων στοιχείων ενός ΣΗΕ με τη βοήθεια του λογισμικού του MATLAB και του SIMULINK.

- ✓ Η διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων ειδών διαταραχών σε ένα απλό ΣΗΕ με φορτίο επαγωγικού κινητήρα, όσον αφορά στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης.

- ✓ Ο προσδιορισμός του χρόνου εκκαθάρισης ενός κρίσιμου σφάλματος σε ένα σύστημα έτσι ώστε να αποφευχθεί ο αποσυγχρονισμός ενός επαγωγικού κινητήρα λόγω της μείωσης της τάσης.

- ✓ Η μελέτη ευστάθειας τάσης ενός ενεργειακού συστήματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και ο προσδιορισμός του κρίσιμου ζυγού με βάση τις τιμές των τάσεων των ζυγών.

1.2 Οργάνωση εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται το ιστορικό, το κίνητρο και ο σκοπός μας. Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται μία γενική θεώρηση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και των βασικών στοιχείων αυτού, και αναλύονται συνοπτικά οι απαραίτητες μελέτες ανάλυσης ενός ΣΗΕ προκειμένου να εξασφαλισθεί ο σωστός σχεδιασμός του, καθώς και η καλή και αξιόπιστη λειτουργία του. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση ευστάθειας τάσης και εξετάζεται η μεταβατική συμπεριφορά ενός απλού ενεργειακού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται το φαινόμενο της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης ενός απλού συστήματος με μεγάλο φορτίο επαγωγικού κινητήρα, σε διάφορα είδη διαταραχών. Επίσης καθορίζεται ο μηχανισμός του φαινομένου της κατάρρευσης τάσης, δηλαδή πως και γιατί εμφανίζεται. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση ευστάθειας τάσης υπό συνήθεις διαταραχές για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ενός συστήματος. Επίσης προτείνεται μία μεθοδολογία για τον καθορισμό ενός δείκτη ευστάθειας τάσης του συστήματος ώστε να αναγνωρίζεται σε ένα δίκτυο το πιο κρίσιμο τμήμα του, όπου είναι πιθανότερο να εμφανιστεί το φαινόμενο της κατάρρευση τάσης. Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται γενικά συμπεράσματα σχετικά με την εκπόνηση της εν λόγω μελέτης.

Κεφάλαιο 2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

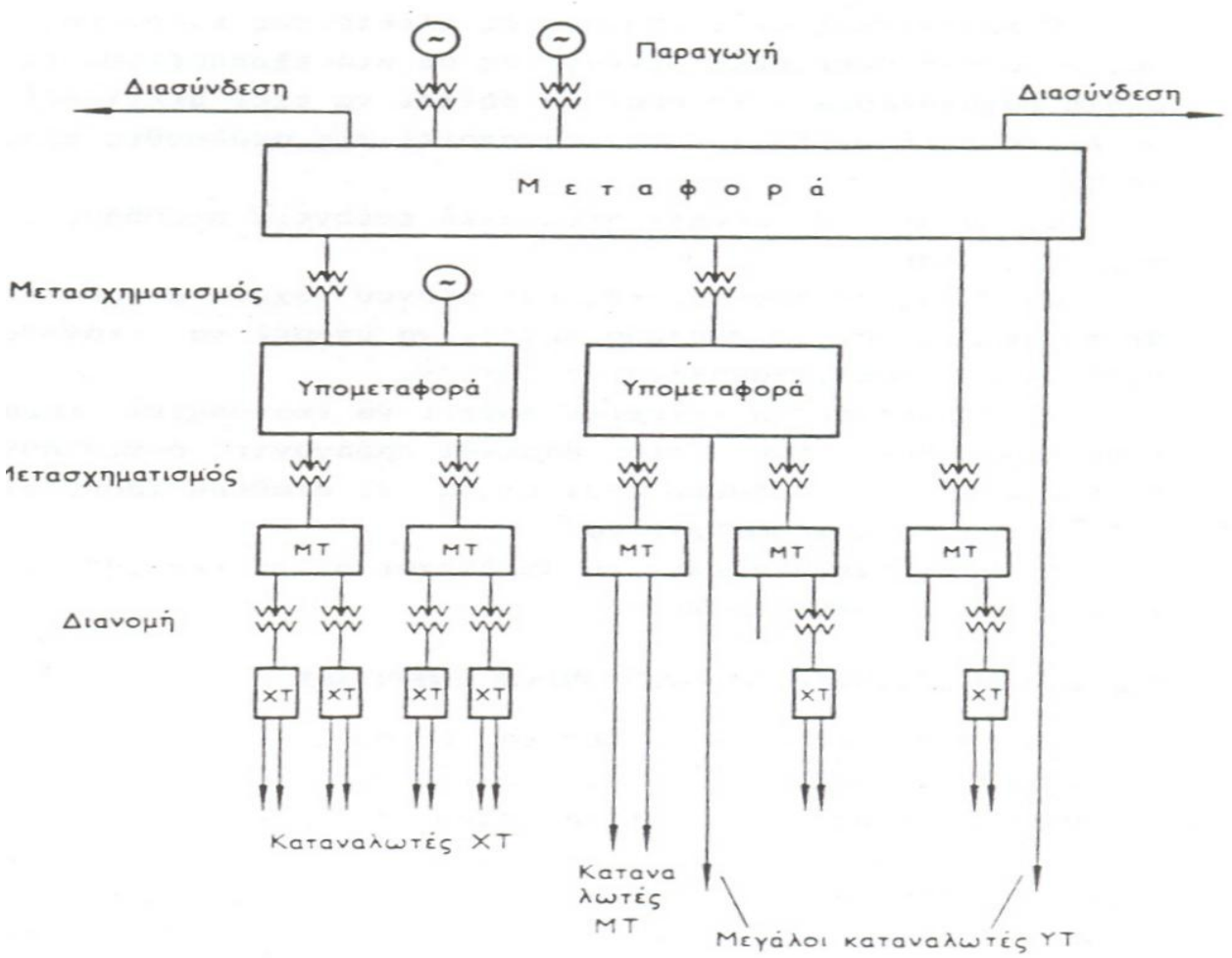
2.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ χρήσιμη μορφή ενέργειας, και παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα. Μπορεί εύκολα και χωρίς ιδιαίτερες απώλειες να μετατραπεί σε άλλες μορφές, είναι καθαρή, διαθέσιμη και μεταφέρεται εύκολα. Έτσι, αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μορφή, η οποία σήμερα καλύπτει το 15% των συνολικών αναγκών τελικής κατανάλωσης σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ένα **Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.)** αποτελείται από το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων, τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Προϋπόθεση καλής λειτουργίας είναι να παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια όπου υπάρχει ζήτηση, με το ελάχιστο κόστος σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο, και ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται σταθερή συχνότητα και τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης. Η δομή ενός Σ.Η.Ε. έχει κυρίαρχη σημασία για τη διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας σε γεωγραφικό επίπεδο. Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η βασική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι σταθμοί παραγωγής, οι γραμμές μεταφοράς και το σύστημα διανομής είναι οι κύριες συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σταθμοί παραγωγής και το σύστημα διανομής συνδέονται με γραμμές μεταφοράς, οι οποίες συνδέουν μεταξύ τους και διαφορετικά ηλεκτρικά συστήματα. Με τη λέξη μεταφορά εννοούμε τη διακίνηση μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας με γραμμές υψηλής τάσης. Το σύστημα διανομής συνδέει όλα τα φορτία με τις γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιώντας χαμηλή τάση. Για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους, μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα

οργανώνονται σε μορφή ηλεκτρικά συνδεδεμένων περιοχών, που συνδέονται μεταξύ τους και αποτελούν το εθνικό δίκτυο.



Σχήμα 2.1 Βασική δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η τελική τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει την ύπαρξη και των τριών λειτουργιών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: την Παραγωγή, τη Μεταφορά και τη Διανομή. Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, και τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης, για τη μεταφορά της ισχύος υπό υψηλή τάση. Η ηλεκτρική ενέργεια, από την παραγωγή της μέχρι την κατανάλωσή της, βρίσκεται σε συνεχή ροή και, στο βαθμό που δεν μπορεί να αποθηκευτεί, πρέπει να παράγεται ακριβώς όποτε χρειάζεται η κατανάλωσή. Το σύστημα μεταφοράς

περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου, και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης σε μέση τάση, για την τροφοδότηση των δικτύων διανομής. Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης, στα οποία υπάγονται και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων γίνεται ο υποβιβασμός της μέσης τάσης σε χαμηλή. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους, οπότε ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός πρέπει να είναι ενιαίος. Η διανομή σχεδιάζεται και αναπτύσσεται χωριστά και εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής την οποία εξυπηρετεί.

Τέλος, τα βασικά χαρακτηριστικά σχεδίασης ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι η τάση, η ισχύς βραχυκύκλωσης και η στάθμη μόνωσης του δικτύου. Τάση του δικτύου ορίζεται η μέγιστη τάση λειτουργίας των ηλεκτρικών γραμμών. Ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου είναι η συμβατική ισχύς που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ, η οποία αποδίδεται στο δίκτυο σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σε αυτό. Η στάθμη μόνωσης του δικτύου αναφέρεται στην τιμή της κρουστικής αντοχής του δικτύου, δηλαδή την τιμή της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης του εξοπλισμού των υποσταθμών σε κρουστικές υπερτάσεις.

Για το σωστό σχεδιασμό, την αξιόπιστη λειτουργία ενός ΣΗΕ, τη μελλοντική του βελτίωση, επέκταση ή τροποποίησή του, καθώς και τον εξοπλισμό του με τα κατάλληλα μέσα προστασίας και ελέγχου, είναι απαραίτητη μία σειρά μελετών που δίνουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τις παραπάνω ενέργειες. Οι μελέτες αυτές είναι μελέτες ροής φορτίου, μελέτες σφαλμάτων και μελέτες μεταβατικής ευστάθειας.

Για την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος, εξάλλου, είναι απαραίτητες μελέτες οικονομικής λειτουργίας, οι οποίες καθορίζουν τον τρόπο

με τον οποίο πρέπει να κατανεμηθεί η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των διαφόρων μονάδων παραγωγής, ώστε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργεί κατά βέλτιστο οικονομικά τρόπο.

Το σύνολο των παραπάνω μελετών, μέσω των οποίων εκτιμάται η συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στη μόνιμη όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας, χαρακτηρίζονται με τον όρο «Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας».

2.2 Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Προκειμένου να εξασφαλισθεί ο σωστός σχεδιασμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η καλή και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος, απαιτούνται εξειδικευμένες μελέτες. Αυτές είναι είτε **μελέτες μόνιμης κατάστασης** (μελέτη ροής φορτίου, οικονομική κατανομή φορτίου), είτε **μελέτες μεταβατικής κατάστασης** (ανάλυση βραχυκυκλωμάτων, μεταβατικών φαινομένων και ευστάθειας).

Η **μελέτη ροής φορτίου** αναφέρεται στον υπολογισμό των τάσεων, των ρευμάτων και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος στα διάφορα σημεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, κάτω από πραγματικές ή υποτιθέμενες συνθήκες φόρτισης και λειτουργίας. Η ανάλυση ροών φορτίου είναι αναγκαία για την καθημερινή λειτουργία, και για τις μελέτες επέκτασης και ανάπτυξης του συστήματος. Ακόμα, χρησιμεύει για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων από τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, την εισαγωγή νέων φορτίων, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς κλπ.

Η **μελέτη βραχυκυκλωμάτων** στοχεύει στον υπολογισμό των μέγιστων ρευμάτων που είναι πιθανό να σημειωθούν σε διάφορες θέσεις του δικτύου, σε περίπτωση που συμβεί βραχυκύκλωμα. Βραχυκύκλωμα ή σφάλμα, ονομάζεται η επαφή οποιουδήποτε υπό τάση τμήματος του δικτύου προς τη γη, ή προς γειωμένα μεταλλικά μέρη των εγκαταστάσεων, και η επαφή δύο διαφορετικών υπό τάση τμημάτων, με διαφορετικές τάσεις μεταξύ τους. Τα βραχυκυκλώματα εκδηλώνονται ως απότομες υπερεντάσεις πολλαπλάσιας τιμής από τα κανονικά ρεύματα λειτουργίας του δικτύου. Έτσι, η διέλευση των υψηλών ρευμάτων βραχυκύκλωσης από τους αγωγούς του συστήματος προκαλεί δυναμικές και θερμικές καταπονήσεις. Τα βραχυκυκλώματα είναι μονοφασικά (μεταξύ μίας φάσης και γης - η συνηθέστερη κατηγορία), διφασικά, διφασικά με γη και τριφασικά. Η μόνωση του αέρα προσβάλλεται

πιο εύκολα από την υγρή ή τη στερεά μόνωση (που χρησιμοποιείται στις συσκευές ισχύος ή στα καλώδια), οπότε οι εναέριες γραμμές υφίστανται τα περισσότερα βραχυκυκλώματα.

Τέλος, οι **μελέτες μεταβατικής ευστάθειας** γίνονται για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά των γεννητριών του συστήματος μετά από διαταραχές που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο, όπως σφάλματα ζυγών, αιφνίδιες μεταβολές φορτίου, απώλειες παραγωγής, βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς κ.λ.π. Με τις εν λόγω μελέτες, δηλαδή, υπολογίζουμε την ικανότητα ενός δικτύου να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από σημαντικές διαταραχές.

2.2.1 Μελέτη ροής φορτίου

Ο κύριος ρόλος ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι να ικανοποιεί τη ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων. Επομένως, για την εκπόνηση οποιασδήποτε μελέτης είναι αναγκαία η γνώση της ζήτησης των φορτίων και κατά συνέπεια θα πρέπει να προηγούνται μελέτες πρόβλεψης φορτίων ανά υποσταθμό μέσα στην εξεταζόμενη περίοδο. Η ροή ισχύος στο δίκτυο αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό πρόβλημα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Γενικά, η ζήτηση των καταναλωτών υπόκειται σε σημαντικές και απρόβλεπτες μεταβολές. Σε κάθε περίπτωση, η τάση και η συχνότητα των ζυγών θα πρέπει να παραμένει εντός προδιαγεγραμμένων ορίων. Το πρόβλημα της μελέτης ροής φορτίου προκύπτει κυρίως στα διασυνδεδεμένα δίκτυα μεταφοράς και λιγότερο στα ακτινικά δίκτυα διανομής.

Με τη μελέτη ροής φορτίου υπολογίζουμε τη συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, που υφίσταται κάποια φόρτιση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Οι ποσότητες που υπολογίζονται από τη ροή φορτίου είναι τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων σε κάθε ζυγό του συστήματος. Γνωρίζοντας τις ποσότητες αυτές είναι δυνατός ο υπολογισμός όλων των άλλων ποσοτήτων του συστήματος, όπως ροές πραγματικής και αέργου ισχύος, τα ρεύματα, τις πτώσεις τάσης, τις απώλειες ισχύος κ.λ.π. Η επίλυση προβλημάτων μεγάλων διαστάσεων είναι δυνατή σήμερα μέσω της χρησιμοποίησης ψηφιακών υπολογιστών

Για τις μελέτες ροής φορτίου οι καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος που πρέπει να επιλεγούν σε μια χρονική περίοδο εξαρτώνται και επηρεάζονται από:

- Τις συνθήκες φορτίσεως του συστήματος. Γενικά η συμπεριφορά του συστήματος μελετάται σε «ακραίες» καταστάσεις φόρτισης, όπως για παράδειγμα κατά τις ώρες της μέγιστης και ελάχιστης ζήτησης φορτίου.

- Τα διάφορα σενάρια φόρτισης των μονάδων παραγωγής, όπως διαμορφώνονται από τη διαθεσιμότητα των μονάδων. Γενικά, η κατανομή της παραγόμενης ισχύος στις διάφορες μονάδες παραγωγής γίνεται με βάση τις συνήθεις πρακτικές, όπως προκύπτουν από τη σειρά ένταξης των μονάδων που ακολουθείται στην πράξη.
- Τα κριτήρια αξιοπιστίας.
- Τον καθορισμό του τρόπου λειτουργίας του συστήματος για την ελαχιστοποίηση των απωλειών και για την αποφυγή καταπόνησης του εξοπλισμού του (ισχύς βραχυκυκλώσεως, όρια φορτίσεως κ.λ.π.).
- Εναλλακτικές περιπτώσεις για τη χρονική βελτιστοποίηση ένταξης νέων έργων μεταφοράς.

Οι μελέτες ροής φορτίου είναι πολύ χρήσιμες:

- Για τη σχεδίαση της μελλοντικής ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε θέλουμε να γνωρίζουμε την επίδραση που τυχόν θα έχουν σε αυτό, προτού ακόμα εγκατασταθούν, διασυνδέσεις άλλων συστημάτων, νέων φορτίων, νέων μονάδων παραγωγής και νέων γραμμών μεταφοράς. Η γνώση αυτής της επίδρασης είναι σημαντική για να πετύχουμε ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος δοκιμάζοντας την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα διαφόρων εναλλακτικών λύσεων.
- Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαδικασίας που πρέπει να ακολουθήσουμε για τη λειτουργία του συστήματος. Καθώς τα φορτία που τροφοδοτεί ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας ή από μέρα σε μέρα, πρέπει να γνωρίζουμε από ποιες μονάδες τροφοδοτούνται τα φορτία, ώστε να πετύχουμε την καλύτερη ρύθμιση τάσης στους ζυγούς και τη βέλτιστη οικονομικά λειτουργία.
- Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαδικασίας λειτουργίας όταν για κάποιους λόγους τεθούν εκτός λειτουργίας μία ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς.

- Τον εντοπισμό των αδύνατων σημείων λειτουργίας του συστήματος
- Τον έλεγχο της τήρησης προκαθορισμένων ορίων των τάσεων και των ροών του συστήματος.
- Την ανάλυση διαταραχών.
- Τις μελέτες επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς, που περιλαμβάνουν:
  - την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς.
  - την εγκατάσταση εξοπλισμού αντισταθμίσεως άεργου ισχύος (πυκνωτές, πηνία).
- Για την εύρεση αρχικών τιμών που είναι απαραίτητες για άλλες μελέτες, όπως μελέτες βραχυκυκλωμάτων, μεταβατικής ευστάθειας κ.λ.π.

2.2.2 Οικονομική λειτουργία ΣΗΕ

Η οικονομική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών (ηλεκτρικό φορτίο) ικανοποιείται ελαχιστοποιώντας το κόστος παραγωγής, δηλαδή όταν επιτυγχάνουμε το μικρότερο κόστος ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας (kWh). Για να οδηγηθεί ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε οικονομική λειτουργία πρέπει να επιλυθούν τα εξής προβλήματα:

- Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου, του προσδιορισμού, δηλαδή, της ισχύος εξόδου των εν λειτουργία θερμικών μονάδων, έτσι ώστε να καλυφθεί η τρέχουσα ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών με το ελάχιστο συνολικό κόστος λειτουργίας των θερμικών μονάδων του συστήματος.
- Το πρόβλημα της υδροθερμικής συνεργασίας, του προσδιορισμού, δηλαδή, του προγράμματος λειτουργίας των θερμικών και υδροηλεκτρικών σταθμών ενός συστήματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος λειτουργίας του κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου.
- Το πρόβλημα του προγραμματισμού των ανταλλαγών ή αγορών/πωλήσεων ηλεκτρικής ενέργειας ενός συστήματος με τα γειτονικά διασυνδεδεμένα συστήματα.

2.2.3 Μελέτες σφαλμάτων

Με τις μελέτες σφαλμάτων (μελέτες βραχυκυκλωμάτων) προσδιορίζουμε τα ρεύματα που ρέουν στις γραμμές ενός ενεργειακού δικτύου και τις τάσεις που επικρατούν στους ζυγούς αυτού κατά τη διάρκεια διαφόρων τύπων βραχυκυκλωμάτων που συμβαίνουν σε διάφορες θέσεις του συστήματος. Το φαινόμενο του βραχυκυκλώματος συμβαίνει όταν διακοπεί η μόνωση του συστήματος σε κάποιο σημείο ή όταν κάποιο αγώγιμο αντικείμενο έλθει σε επαφή με γυμνό αγωγό. Με τη διακοπή της μόνωσης προκύπτει μικρή αντίσταση προς τη γ, η οποία επιτρέπει τη ροή μεγάλων ρευμάτων ισχύος από το ΣΗΕ προς τη γη. Οι αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν βραχυκυκλώματα είναι πολλές, όπως κεραυνοί, δυνατοί άνεμοι, πτώσεις δένδρων σε γραμμές, καταστροφές στύλων από συγκρούσεις οχημάτων, διείσδυση μικρών ζώων σε διακοπτικούς μηχανισμούς κ.λ.π. Τα βραχυκυκλώματα κατά σειρά μειούμενης συχνότητας στην εμφάνιση και αυξανόμενης σοβαρότητας είναι: το μονοφασικό προς γη, το διφασικό, το διφασικό προς γη, και το συμμετρικό τριφασικό. Οι τρεις πρώτοι τύποι βραχυκυκλωμάτων οδηγούν σε έντονα ασύμμετρες καταστάσεις λειτουργίας.

Το ρεύμα που ρέει σε ένα ΣΗΕ αμέσως μετά από ένα βραχυκύκλωμα είναι πολύ μεγαλύτερο από το ρεύμα μερικούς κύκλους αργότερα (λίγο πριν λειτουργήσουν οι διακόπτες ισχύος) και αυτά τα ρεύματα είναι πολλαπλάσια των κανονικών ρευμάτων φορτίου που ρέουν πριν συμβεί το βραχυκύκλωμα. Γι’ αυτό τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως προκαλούν μεγάλες δυναμικές και θερμικές καταπονήσεις και πρέπει να διακόπτονται το ταχύτερο δυνατόν, ώστε να προστατεύσουμε το προσωπικό και να αποφύγουμε την καταστροφή του εξοπλισμού. Αυτή η μεταβολή του ρεύματος οφείλεται στη μεταβολή της συνολικής ροής στο διάκενο των σύγχρονων γεννητριών. Στις σύγχρονες γεννήτριες η συνολική ροή στο διάκενό τους είναι μέγιστη αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό γίνεται για τον

ακόλουθο λόγο. Η ροή αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα δημιουργεί μεγάλα ρεύματα τυμπάνου, ενώ η μεταβαλλόμενη γωνιακή ταχύτητα των γεννητριών αναπτύσσει ρεύματα και στα πηνία απόσβεσης. Η μαγνητεγερτική δύναμη αυτών των ρευμάτων μειώνει τη συνολική ροή στο διάκενο, που προκύπτει από το συνδυασμό της μαγνητεγερτικής δύναμης των ρευμάτων στα τυλίγματα πεδίου, τυμπάνου και πηνίων απόσβεσης. Το φαινόμενο αυτό καλείται αντίδραση του τυμπάνου και χρειάζεται κάποιος χρόνος για να παρατηρηθεί η μείωση της ροής. Καθώς μειώνεται η ροή διακένου, μειώνεται βαθμιαία και το ρεύμα τυμπάνου, γιατί αυτό οφείλεται στην τάση που προκαλείται από τη συνολική ροή διακένου.

Σκοπός του συστήματος προστασίας του ΣΗΕ είναι να εντοπίσει το ταχύτερο δυνατό την έναρξη κάποιου βραχυκυκλώματος και το απομονώσει με το άνοιγμα εκείνων των διακοπτών που ισχύος που θέτουν εκτός λειτουργίας το μικρότερο τμήμα του ΣΗΕ. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε ελάχιστη δυνατή διακοπή των υπηρεσιών που παρέχονται στην κατανάλωση και αποφεύγεται η καταστροφή του εξοπλισμού. Όταν η διακοπή της μόνωσης γίνεται μέσω ιονισμένου δρόμου (οπότε λέμε ότι έχουμε παροδικό βραχυκύκλωμα) με το άνοιγμα των κατάλληλων διακοπτών διακόπτεται το ρεύμα στον ιονισμένο δρόμο και αρχίζει ο απιονισμός του. Μετά από ένα χρονικό διάστημα 100-120 ms που χρειάζονται για να ολοκληρωθεί ο απιονισμός, οι διακόπτες ισχύος συνήθως ξανακλείνουν χωρίς την επανεμφάνιση του τόξου και αποκαθιστούν την κανονική λειτουργία του ΣΗΕ. Το 70-80% των βραχυκυκλωμάτων γραμμών είναι αυτού του τύπου τα βραχυκυκλώματα. Οι μελέτες βραχυκυκλωμάτων συνίστανται στον υπολογισμό όλων των ρευμάτων βραχυκύκλωσης για διαφορετικούς τύπους βραχυκυκλωμάτων, σε διαφορετικές θέσεις του ΣΗΕ.

Με βάση τη θεωρητική ανάλυση του τρόπου υπολογισμού ρευμάτων και τάσεων που επικρατούν κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων αναπτύχθηκαν προγράμματα υπολογιστή για το γρήγορο, ασφαλή και ακριβή

τρόπο υπολογισμού αυτών των μεγεθών. Με την ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών οι υπολογισμοί στα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα γίνονται σχεδόν τόσο εύκολα όσο και των συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων και επιπλέον υπολογίζουμε τις συμμετρικές συνιστώσες των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν και είναι απαραίτητες σε πολλές εφαρμογές.

Οι μελέτες σφαλμάτων είναι χρήσιμες:

- Για τη σχεδίαση του κατάλληλου συστήματος προστασίας του ενεργειακού συστήματος.
- Για τη σωστή επιλογή των διακοπτών του συστήματος προστασίας, διότι δύο από τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η σωστή επιλογή τους είναι το ρεύμα που πρέπει αυτοί να διακόψουν και το ρεύμα που ρέει αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα. Το ρεύμα αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα είναι το μεγαλύτερο ρεύμα που δέχεται ο διακόπτης ισχύος, γι' αυτό προκαλεί τις μεγαλύτερες μηχανικές καταπονήσεις που πρέπει να αντέξει ο διακόπτης και είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του.
- Για τον προσδιορισμό των αναγκαίων διακοπτικών λειτουργιών καθενός διακόπτη του συστήματος.
- Για το καθορισμό των ρυθμίσεων του συστήματος προστασίας. Το σύστημα προστασίας παρακολουθεί συνεχώς χαρακτηριστικές μεταβλητές του ΣΗΕ (π.χ. τάσεις, ρεύματα κ.λ.π.) και αποφασίζει πότε έχουμε συνθήκες βραχυκυκλώματος για να ενεργοποιηθεί αξιοποιώντας τα αποτελέσματα που έχουμε από τις μελέτες βραχυκυκλωμάτων.

2.2.4 Μελέτες μεταβατικής ευστάθειας

Ένα ΣΗΕ για να βρίσκεται σε ευσταθή κατάσταση λειτουργίας πρέπει να εξασφαλίζει κάθε χρονική στιγμή ισότητα μεταξύ της μηχανικής ισχύος εισόδου (που παρέχεται από τους στροβίλους του) και του τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού φορτίου. Οποιαδήποτε διαταραχή προκαλεί ανισορροπία μεταξύ των δύο αυτών ισχύων δημιουργεί μηχανικές ταλαντώσεις στους δρομείς των ασύγχρονων γεννητριών και πιθανό αποσυγχρονισμό τους (αστάθεια). Τέτοιες διαταραχές είναι τα βραχυκυκλώματα σε κρίσιμες θέσεις του δικτύου, οπότε δημιουργείται αδυναμία μεταφοράς ισχύος για την τροφοδοσία κάποιων φορτίων, απότομες και μεγάλες μεταβολές φορτίων και απώλειες παραγωγής

Οι μελέτες μεταβατικής ευστάθειας γίνονται για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά των γεννητριών του συστήματος μετά από διαταραχές που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο, όπως σφάλματα ζυγών, αιφνίδιες μεταβολές φορτίου, απώλειες παραγωγής, βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς κ.λ.π. Με τις εν λόγω μελέτες, δηλαδή, υπολογίζουμε την ικανότητα ενός δικτύου να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από σημαντικές διαταραχές. . Μια σύγχρονη γεννήτρια λέμε ότι είναι συγχρονισμένη με το δίκτυο όταν η μηχανή μπορεί να αποδίδει ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται όταν η συχνότητα και το μέτρο, η γωνία και η φασική ακολουθία των τάσεών της είναι ίσες ή έχουν μικρές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες μεταβλητές του δικτύου στο σημείο σύνδεσης της σύγχρονης γεννήτριας.

Οι παραπάνω διαταραχές, που είναι πολύ συνηθισμένες σε μεγάλα ενεργειακά συστήματα, προκαλούν ισχυρές μεταβολές στα χαρακτηριστικά του συστήματος, ανακατανομή της ροής ισχύος και συνεπώς ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις στους δρομείς των γεννητριών. Κάποιες από τις γεννήτριες του συστήματος, είτε διότι οδηγήθηκαν σε μία νέα κατάσταση ισορροπίας, είτε διότι απομακρύνθηκε εγκαίρως το αίτιο που προκάλεσε τη διαταραχή, ξεπερνούν εύκολα αυτές τις ταλαντώσεις και παραμένουν συγχρονισμένες στο

δίκτυο. Κάποιες άλλες, όμως, από τις γεννήτριες οδηγούνται σε λόγω αυτών των ταλαντώσεων σε αποσυγχρονισμό. Όταν δε μία γεννήτρια αποσυγχρονίζεται, προκαλούνται μεγάλες διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου, τα ρεύματα και τις τάσεις της, με αποτέλεσμα το σύστημα προστασίας να την απομονώνει από το υπόλοιπο σύστημα. Αν μετά από μία διαταραχή το σύστημα μπορεί να παραμείνει σε συγχρονισμό και να καταλήξει σε μία νέα κατάσταση ισορροπίας, τότε χαρακτηρίζεται ως μεταβατικά ευσταθές. Αν όμως, συμβούν νέες διαταραχές σαν επακόλουθο της πρώτης, αποσυγχρονιστεί και καταρρεύσει, τότε λέμε ότι είναι μεταβατικά ασταθές.

Για οποιαδήποτε διαταραχή και συγκεκριμένη διαδικασία αντιμετώπισής της, το αν το σύστημα διατηρήσει την ευστάθειά του ή όχι, εξαρτάται από το ποσόν της ισχύος που διέρχεται από κάποιες θέσεις του δικτύου πριν τη διαταραχή. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να διέρχεται από αυτές τις θέσεις, ώστε μετά τη διαταραχή το ΣΗΕ να διατηρήσει την ευστάθειά του, ονομάζεται όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης. Υπάρχει και το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης, πουν είναι η μέγιστη ροή ισχύος που μπορεί να διέρχεται από κάποιες θέσεις; του ΣΗΕ στη μόνιμη κατάσταση, χωρίς να χαθεί η ευστάθειά του. Μεταβατική ευστάθεια ενός δικτύου είναι η ικανότητά του να αναπτύσσει δυνάμεις αποκατάστασης του συγχρονισμού των στοιχείων του ίσες ή μεγαλύτερες των δυνάμεων διαταραχής, έτσι ώστε να αποκαθιστά την ισορροπία του, δηλαδή να παραμένει σε συγχρονισμό, μετά τη διαταραχή.

Σε ένα κατάλληλα σχεδιασμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, λοιπόν, θα πρέπει να τίθενται εγκαίρως σε λειτουργία οι διακοπτικές εκείνες διαδικασίες που θα απομακρύνουν το αίτιο της διαταραχής, αλλά και τις γεννήτριες που οδηγούνται σε αποσυγχρονισμό, ώστε το υπόλοιπο σύστημα να διατηρείται σε ευσταθή κατάσταση λειτουργίας.

Οι μελέτες μεταβατικής ευστάθειας είναι απαραίτητες:

- Για να γίνει η σχεδίαση του ενεργειακού συστήματος κατά τέτοιο τρόπο, ώστε αυτό να παραμένει σε κατάσταση ευστάθειας μετά από κάθε διαταραχή.
- Για να καθοριστεί το πόσο γρήγορα πρέπει να δράσουν οι διακοπτικές διαδικασίες, ώστε να απομονωθεί εγκαίρως το τμήμα του συστήματος που βρίσκεται σε κατάσταση σφάλματος.
- Για να καθοριστούν οι χρόνοι ενεργοποίησης των διακοπτών καθώς επίσης και οι χρόνοι επανακλεισίματός τους, διότι από το σωστό υπολογισμό τους εξαρτάται η δυνατότητα του συστήματος να διατηρήσει την ευστάθειά του μετά από μία διαταραχή.

2.2.5 Αστάθεια τάσης

Σύμφωνα με τα παραπάνω οποιαδήποτε διαταραχή δημιουργεί ανισορροπία μεταξύ της παραγόμενης και της τροφοδοτούμενης πραγματικής ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε μία ή περισσότερες σύγχρονες γεννήτριες σε αποσυγχρονισμό από το δίκτυο. Κατά ανάλογο τρόπο, η αστάθεια τάσης είναι αποτέλεσμα της ανισορροπίας αέργου ισχύος στους ζυγούς των φορτίων. Το φαινόμενο της αστάθειας τάσης είναι αποτέλεσμα της διαφοροποίησης της φύσης των φορτίων και της έλλειψης αυστηρής πολιτικής για πλήρως ελεγχόμενη τοπική αντιστάθμιση των φορτίων αέργου ισχύος, τόσο από τους καταναλωτές όσο και από τις ηλεκτρικές εταιρείες.

Η αστάθεια τάσης είναι ένα δυναμικό φαινόμενο, που περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση των μεταβολών των φορτίων και του εξοπλισμού που διαθέτει το ΣΗΕ για τον έλεγχο της τάσης. Μετά από μία σημαντική διαταραχή ή βαθμιαία αλλά σχετικά γρήγορη αύξηση του φορτίου, λόγω έλλειψης αέργου ισχύος, προκαλείται βύθιση της τάσης στην περιοχή του φορτίου. Αυτό προκαλεί μερική απελευθέρωση πραγματικού φορτίου, λόγω εξάρτησης της πραγματικής ισχύος του φορτίου από την τάση, και προσωρινή ανακούφιση. Σε αυτές τις περιπτώσεις το ΣΗΕ είναι μεταβατικά ευσταθές λόγω της εξάρτησης του φορτίου από την τάση. Εν τούτοις σε λιγότερο από ένα λεπτό τα συστήματα αυτόματης αλλαγής του λόγου σπειρών των μετασχηματιστών αρχίζουν να αποκαθιστούν την τάση στα φορτία και επομένως την ισχύ που απορροφούν. Αυτή η αποκατάσταση των φορτίων προκαλεί περαιτέρω βύθισμα της τάσης μεταφοράς. Οι κοντινές γεννήτριες υπερδιεγείρονται και υπερφορτίζονται, αλλά οι περιοριστές υπερδιέγερσης επαναφέρουν το ρεύμα πεδίου στην ονομαστική του τιμή καθώς ο χρόνος υπερφόρτισης τελειώνει. Τότε μακρινές γεννήτριες υποχρεώνονται να παρέχουν την απαιτούμενη άεργο ισχύ, αλλά αυτό είναι ανεπαρκές και αναποτελεσματικό. Η παραγωγή και το σύστημα μεταφοράς δεν μπορούν πλέον να καλύψουν τα φορτία και τις

άεργες απώλειες και ακολουθεί μία συνεχής γρήγορη μείωση της τάσης, που οδηγεί σε μερική ή πλήρη κατάρρευσή της.

Για να αντιμετωπίσουμε την αστάθεια τάσης, αφού δεν μπορούμε να επηρεάσουμε τα χαρακτηριστικά του φορτίου, είναι απαραίτητη η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του ΣΗΕ. Αυτό επιτυγχάνεται με ενίσχυση της μεταφορικής ικανότητας του ΣΗΕ σε κρίσιμες θέσεις και εγκατάσταση σύγχρονων συσκευών αντιστάθμισης αέργου ισχύος με στατικούς διακόπτες στερεάς κατάστασης και γρήγορο, ηλεκτρονικό και συνεχή έλεγχο της παραγόμενης αέργου ισχύος.

2.3 Ρόλος των υπολογιστών στην ανάλυση ΣΗΕ

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι, όπως αναφέρθηκε, μεγάλα και περίπλοκα. Εξαιτίας συγκεκριμένων παραγόντων, η μελέτη και η λειτουργία τους αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα. Καταρχήν, η ηλεκτρική ενέργεια οφείλει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που ζητείται, καθώς δεν υπάρχει οικονομικός τρόπος αποθήκευσής της. Συνεπώς, απαιτούνται προηγμένες μελέτες πρόβλεψης της ζήτησης φορτίων και γρήγορες μέθοδοι ελέγχου. Έπειτα, απαιτείται 100% αξιοπιστία στην τροφοδότηση ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Παράλληλα, απαιτείται η βέλτιστη χρησιμοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού, καθώς το υψηλό κόστος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά απαγορευτική την κατασκευή πολλών εφεδρικών εγκαταστάσεων. Τέλος, για την κατασκευή θερμικών σταθμών απαιτούνται 8-10 χρόνια (ακόμα περισσότερο για πυρηνικούς σταθμούς), άρα, κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οφείλουν να ληφθούν αποφάσεις με ορίζοντα εικοσαετίας.

Για ένα μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η επίλυση ενός συστήματος περίπου 1500 μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Ακόμα, οι υπέρογκες οικονομικές απαιτήσεις για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εντείνουν την αναγκαιότητα για μείωση του κόστους. Έτσι, η χρήση υπολογιστών στα ΣΗΕ καθίσταται πλέον αναγκαία σε όλα τα επίπεδα του συστήματος.

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές χρησιμοποιούνται καταρχήν στο επίπεδο του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την παρακολούθηση και εκτέλεση λειτουργιών ελέγχου. Συγκεντρώνουν και επεξεργάζονται δεδομένα από όλα τα υποσυστήματα, προειδοποιούν όταν μεταβλητές του σταθμού (θερμοκρασίες, πιέσεις, ροές) είναι εκτός ορίων κανονικής λειτουργίας, υπολογίζουν δείκτες απόδοσης. Η βασικότερη, όμως, εφαρμογή τους αναφέρεται στον κεντρικό έλεγχο όλων των λειτουργιών του συστήματος,

που πραγματοποιείται στα Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας. Εκεί, χρησιμοποιούνται υπολογιστές για την κατανομή του φορτίου ανάμεσα στις γεννήτριες του συστήματος, για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του συστήματος μεταφοράς, για την αντιμετώπιση εκτάκτων συμβάντων (βλάβες στοιχείων, απότομες μεταβολές φορτίου), για τον προγραμματισμό της συντήρησης των στοιχείων του συστήματος (ώστε να αποφευχθεί μερική ή ολική διακοπή λειτουργίας), για την εκπαίδευση χειριστών (μέσω των προσομοιωτών εκπαίδευσης).

Στα Κέντρα Ελέγχου Διανομής, οι υπολογιστές είναι απαραίτητοι για την παρακολούθηση των δικτύων μέσης τάσης και των κέντρων διανομής, κάτω από ομαλές ή έκτακτες συνθήκες (π.χ. άσχημες καιρικές συνθήκες). Ακόμα, οι εφαρμογές των υπολογιστών επεκτείνονται στην ανάπτυξη και σχεδίαση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και στα επιμέρους στοιχεία των συστημάτων αυτών.

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε εφαρμογές δύο τύπων:

- ✓ Ανεξάρτητες από τη λειτουργία «off-line» (εφαρμογές εκτός πραγματικού χρόνου), και
- ✓ Συμβαδίζουσες με τη λειτουργία «on-line» (εφαρμογές πραγματικού χρόνου)

Στον πρώτο τύπο εφαρμογών, που χρειάζονται όταν σχεδιάζουμε και αναλύουμε τη συμπεριφορά του συστήματος, περιλαμβάνονται και οι μελέτες ροών φορτίου, σφαλμάτων και μεταβατικής ευστάθειας. Τα σύγχρονα προγράμματα που χρησιμοποιούνται για ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρουν πολύ μεγάλες δυνατότητες στο χρήστη ενεργειακό μηχανικό.

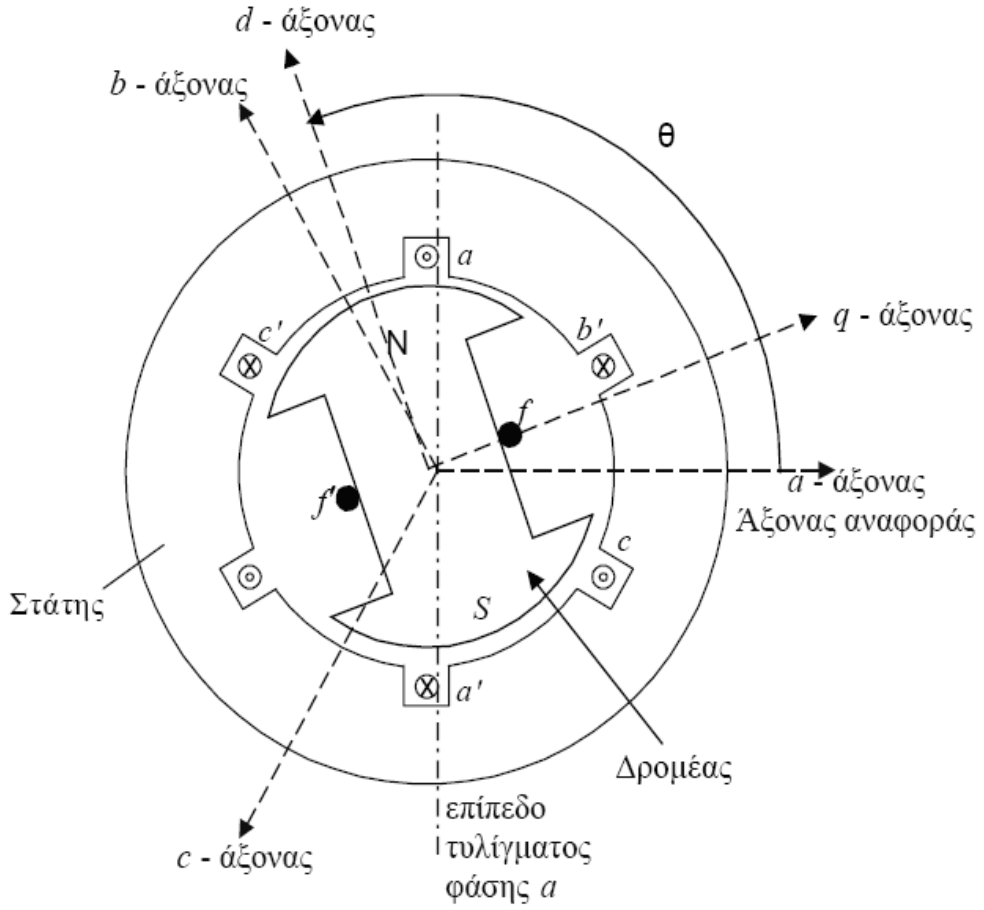
Στο δεύτερο τύπο εφαρμογών οι υπολογιστές είναι μέρος του συστήματος, δέχονται πληροφορίες κατευθείαν από το σύστημα και εκτελούν μία συγκεκριμένη εργασία που τους έχει ανατεθεί στα πλαίσια λειτουργίας του συστήματος. Παραδείγματα τέτοιου τύπου εφαρμογών είναι ο έλεγχος της συχνότητας του συστήματος, η κατανομή της παραγωγής για οικονομική λειτουργία του συστήματος κ.λ.π.

2.4 Βασικές συνιστώσες των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.4.1 Σύγχρονες μηχανές

Η σύγχρονη μηχανή (synchronous machine) χρησιμοποιούμενη ως γεννήτρια αποτελεί μια από τις βασικότερες συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αφού είναι η σπουδαιότερη μηχανή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σύγχρονες γεννήτριες ή αλλιώς εναλλακτήρες, είναι σύγχρονες μηχανές που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η σχηματική παράσταση της τομής μιας σύγχρονης μηχανής, όπου διακρίνονται τα δύο βασικά μέρη από τα οποία αυτή αποτελείται. Τον στάτη, που είναι το ακίνητο μέρος και το δρομέα, που είναι το περιστρεφόμενο μέρος. Αν η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, ο δρομέας περιστρέφεται από ένα στρόβιλο (ατμού, αερίου ή ύδατος), που συνδέεται με τον άξονα της μηχανής μέσω ενός συμπλέκτη.



Σχήμα 2.2 Σχηματική παράσταση τομής σύγχρονης μηχανής

Ο στάτης είναι μια κοίλη κυλινδρική κατασκευή από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων που φέρει διαμήκεις αύλακες στην εσωτερική του επιφάνεια. Στις αύλακες αυτές τοποθετούνται τα τυλίγματα του στάτη, που διευθετούνται σε τρεις συμμετρικές ζώνες (μια για κάθε φάση) που απέχουν μεταξύ τους στο χώρο 120°. Παρόλο που τα τυλίγματα του στάτη έχουν πολλές σπείρες που είναι κατανεμημένες σε έναν αριθμό αυλάκων της εσωτερικής του επιφάνειας, στο σχήμα 2.2 το τύλιγμα κάθε φάσης δείχνεται παραστατικά με μία μόνο σπείρα, οι δύο πλευρές της οποίας συμβολίζονται με ένα γράμμα και το τονούμενό του. Το τύλιγμα της φάσης α για παράδειγμα, που σχεδιάστηκε στο κατακόρυφο επίπεδο, συμβολίζεται με τα γράμματα α και α'. Σε κάθε τύλιγμα του στάτη αντιστοιχεί ένας άξονας, που είναι κάθετος

στο επίπεδο του αντίστοιχου τυλίγματος. Ο στάτης δηλαδή, έχει τρεις άξονες a, b και c που είναι ακίνητοι.

Ο δρομέας είναι μια συμπαγής σιδηρομαγνητική κατασκευή που τοποθετείται στον άξονα της μηχανής και περιστρέφεται μέσα στο στάτη. Στο δρομέα υπάρχει επίσης τύλιγμα, το τύλιγμα διέγερσης (τύλιγμα πεδίου), που τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος, τη διεγέρτρια. Σκοπός αυτού του τυλίγματος, που στο σχήμα δείχνεται επίσης με μία σπείρα, είναι η παραγωγή ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Η διεγέρτρια μπορεί να είναι μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που εφαρμόζεται στον ίδιο άξονα με αυτόν της μηχανής ή μια ξεχωριστή πηγή συνεχούς ρεύματος που συνδέεται στο τύλιγμα διέγερσης με ψήκτρες. Οι μεγάλες γεννήτριες έχουν συνήθως διεγέρτριες που αποτελούνται από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος με ανορθωτική διάταξη.

Το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα διέγερσης δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική κινητήρια μηχανή, το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Ο άξονας των πόλων του δρομέα ονομάζεται ευθύς άξονας (d-άξονας), ενώ ο κάθετος προς αυτόν, ονομάζεται εγκάρσιος άξονας (q-άξονας).

Ο στάτης και ο δρομέας σχεδιάζονται έτσι, ώστε όταν ο δρομέας κινείται με σταθερή ταχύτητα, να παράγεται μια ημιτονοειδής τάση σε κάθε ένα από τα τυλίγματα του στάτη. Οι τρεις αυτές τάσεις έχουν το ίδιο μέτρο, την ίδια συχνότητα και παρουσιάζουν φασική διαφορά 120°η μια από την άλλη. Συνδέοντας συνεπώς, τα τρία αυτά τυλίγματα σε τριφασική διάταξη, σχηματίζουμε μια τριφασική πηγή.

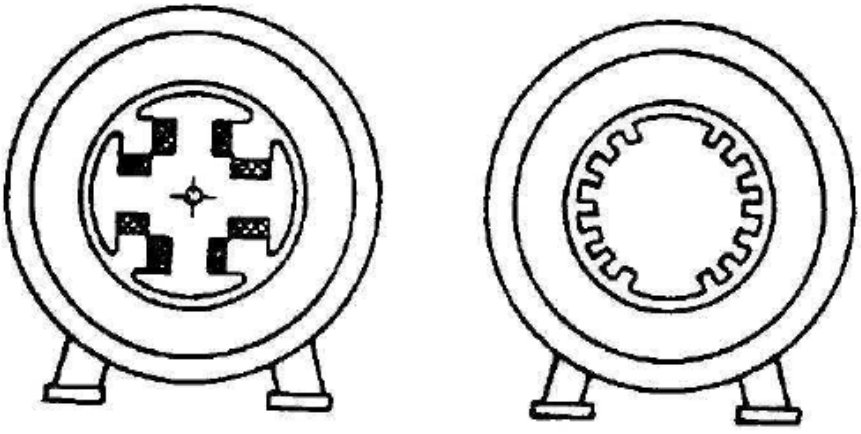
Ο χαρακτηρισμός της μηχανής ως «σύγχρονη» προέρχεται από το γεγονός ότι ο δρομέας στρέφεται σύγχρονα, δηλαδή με τη ίδια ταχύτητα, με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τη διέγερση

συνεχούς ρεύματος. Ο αριθμός στροφών του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου δίνεται από την εξίσωση 2.1.

$$f = \frac{P}{2}\frac{N}{60} = \frac{P}{2} f_m \quad \textbf{(2.1)}$$

Όπου, P είναι ο αριθμός των πόλων, N η ταχύτητα του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό, και f_m η μηχανική συχνότητα σε στροφές ανά δευτερόλεπτο.

Ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα μιας σύγχρονης μηχανής διακρίνουμε δυο είδη μηχανών, τη μηχανή με κυλινδρικό δρομέα και τη μηχανή με έκτυπους πόλους. Ο συμπαγής δρομέας του πρώτου τύπου φέρει αύλακες, μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα διέγερσης και προστατεύεται με σφήνες έναντι των φυγοκεντρικών δυνάμεων. Ο δεύτερος τύπος μηχανών έχει εξέχοντες πόλους γύρω από τους οποίους τυλίγεται το τύλιγμα διέγερσης. Οι μηχανές με έκτυπους πόλους έχουν αριθμό ζευγών πόλων που κυμαίνεται μεταξύ p=1 και p=40, πράγμα που σημαίνει ότι η ταχύτητα τους, n_s, είναι μικρή.



Σχήμα 2.3 Σχηματική παράσταση των δύο τύπων σύγχρονων μηχανών

Ο δρομέας των σύγχρονων μηχανών και των δύο τύπων που αναφέρθηκαν παραπάνω φέρει ως επί τω πλείστον ένα ακόμη τύλιγμα, εκτός του τυλίγματος διέγερσης, το τύλιγμα απόσβεσης. Το τύλιγμα απόσβεσης διαρρέεται από

ρεύμα όταν έχουμε μεταβολή του μαγνητικού πεδίου που το διαπερνά, και έχει ως κύριο σκοπό τη μείωση των μηχανικών ταλαντώσεων του δρομέα γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα, οι οποίες μπορούν να προέρχονται από μεταβολές φορτίου (ηλεκτρικού ή μηχανικού) ή από μεταβολές της τάσης του στάτη.

2.4.2 Μετασχηματιστές

Ο σπουδαιότερος σκοπός των μετασχηματιστών είναι η προσαρμογή της ηλεκτρικής ενέργειας στην εκάστοτε τάση. Χωρίς τη βοήθεια μετασχηματιστών θα ήταν αδύνατη η παροχή ενέργειας στους ποικίλους καταναλωτές από τις μονάδες παραγωγής τριφασικού ρεύματος μεγάλης ισχύος. Κι αυτό διότι η τάση στους ακροδέκτες μιας μεγάλης γεννήτριας φτάνει σήμερα μέχρι 27 kV και το ρεύμα μέχρι τα 5000 Α. Λόγω των απωλειών στη γραμμή μεταφοράς, το ρεύμα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υψωθεί η τάση για να μεταφερθεί η επιδιωκόμενη ισχύς. Οι καταναλωτές ομοίως δέχονται την ισχύ υπό μικρή τάση, επομένως πρέπει να μετασχηματιστεί από την υψηλή τιμή της γραμμής (π.χ. 220kV) σε μια χαμηλή τάση (π.χ. 15000V).

Ο μετασχηματιστής ισχύος είναι λοιπόν μία πολύ σημαντική συνιστώσα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, διότι μας παρέχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιούμε διαφορετικά επίπεδα τάσης στο σύστημα. Ο μετασχηματιστής έχει την ικανότητα να υψώσει την τάση της γεννήτριας σε μια επιθυμητή τιμή και έτσι να παρέχει την ικανότητα εύκολης μεταφοράς μεγάλης ισχύος (π.χ. 1500MVA) μιας σύγχρονης γεννήτριας. Επίσης, ο μετασχηματιστής παρέχει τη δυνατότητα της μαγνητικής ζεύξης δύο κυκλωμάτων και αποφεύγεται έτσι η ηλεκτρική (γαλβανική) σύνδεση. Στον ενεργειακό κλάδο ο μετασχηματιστής χρησιμοποιείται επίσης για τη σύνδεση δύο δικτύων.

Ένας μετασχηματιστής αποτελείται βασικά από έναν πυρήνα από σίδηρο, ο οποίος σχηματίζεται από λεπτά ελάσματα. Γύρω από τον πυρήνα, τυλίγονται το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα.

Ως πρωτεύον χαρακτηρίζεται το τύλιγμα, το οποίο προσλαμβάνει ενέργεια, ενώ ως δευτερεύον εκείνο, το οποίο αποδίδει ενέργεια. Ο πυρήνας είναι ο φορέας της εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής, η οποία διαρρέει και τα δύο τυλίγματα και επάγει σε αυτά τάσεις ανάλογες με τον αριθμό των σπειρών. Συνήθως κατασκευάζεται από ελάσματα σιδήρου πάχους 0.35 mm για περιορισμό των δινορευμάτων, τα οποία δημιουργούν αυξημένες απώλειες. Τα ελάσματα φέρουν στη μία τους πλευρά μονωτικό υλικό αποτελούμενο από λεπτό στρώμα χαρτιού ή μονωτικού βερνικιού και έτσι εξασφαλίζεται η μεταξύ τους μόνωση.

2.4.3 Γραμμές Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς αποτελούν τις αρτηρίες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα καλά σχεδιασμένο και με υψηλή ικανότητα μεταφοράς σύστημα γραμμών μεταφοράς καθιστά δυνατή τη μεταφορά μεγάλων ποσών ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

Τρία διαφορετικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία των γραμμών μεταφοράς δημιουργούν καταστάσεις που δεν μπορούν να αγνοηθούν. Αυτά, κατά σειρά σπουδαιότητας, είναι:

- Οι τάσεις σειράς που επάγονται στους αγωγούς και που προκαλούνται από τα μαγνητικά πεδία που τους περιβάλλουν.
- Τα εγκάρσια ρεύματα διαρροής μεταξύ των αγωγών που προκαλούνται από τα ηλεκτρικά πεδία που υπάρχουν στο μεταξύ των αγωγών χώρο.
- Η ωμική αντίσταση του υλικού των αγωγών.

Ένα τέταρτο φαινόμενο είναι το ρεύμα διαρροής μέσω του στρώματος ρύπου που επικάθεται στους μονωτήρες. Το φαινόμενο αυτό, όμως, είναι περιορισμένης σημασίας και ως τέτοιο συνήθως αγνοείται.

Για να ληφθούν υπ' όψιν τα τρία αυτά φαινόμενα στην παράσταση μιας γραμμής μεταφοράς θα πρέπει να είναι γνωστά τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της. Αυτά αποδεικνύεται ότι μπορούν να εκφραστούν αντίστοιχα μέσω των εξής τριών παραμέτρων της γραμμής:

- Εν σειρά επαγωγή L, σε H/m.
- Εγκάρσια χωρητικότητα C, σε F/m.
- Εν σειρά αντίσταση R, σε Ω/m.

Οι παράμετροι αυτές είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες καθ' όλο το μήκος της γραμμής και στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις εκφράζονται ανά μονάδα μήκους και ανά φάση της γραμμής μεταφοράς. Αν η γραμμή μεταφοράς είναι μη συμμετρική, τότε γενικά δεν είναι θεωρητικά δυνατόν να εκφραστούν μερικές από αυτές τις παραμέτρους ανά φάση. Στην πράξη, όμως, είναι δυνατόν να γίνει αυτό αν κάνουμε μερικές απλές προσεγγίσεις.

2.4.4 Φορτία

Γενικά, ο όρος φορτίο αναφέρεται σε μία συσκευή ή συγκρότημα συσκευών που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα. Στην πραγματικότητα οι συσκευές των φορτίων ποικίλουν από μία λάμπα φωτισμού νυκτός λίγων watt ως ένα κινητήρα επαγωγικό πολλών MW. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας κατάλληλα σχεδιασμένο μπορεί να παρέχει ενέργεια σε όλα αυτά τα διάφορα φορτία. Τα διάφορα φορτία μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες :

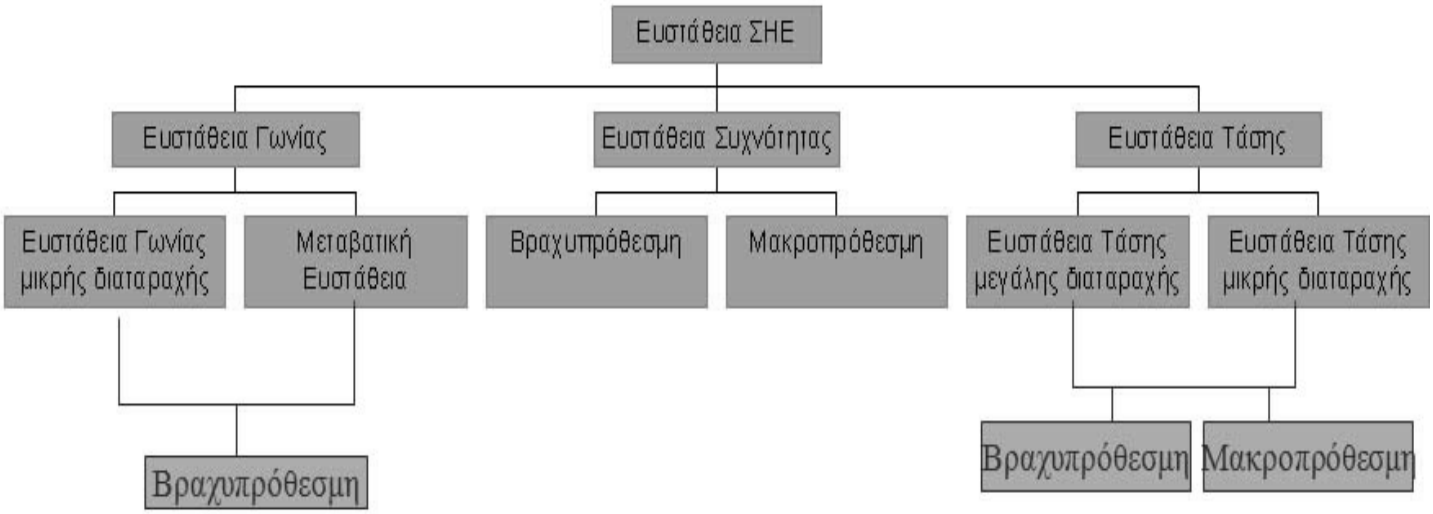
- Κινητήρες (πάσης φύσεως και τύπου)
- Συσκευές θερμάνσεως
- Ηλεκτρικές συσκευές
- Φωτιστικά σώματα

Από ηλεκτρική άποψη υπάρχουν τεράστιες διαφορές μεταξύ των διαφόρων φορτίων σε ότι αφορά το μέγεθος, τη συμμετρία (μονοφασικό ή τριφασικό), τη σταθερότητα (ως προς το χρόνο, τη συχνότητα και την τάση), και την περίοδο λειτουργίας (συστηματική ή τυχαία λειτουργία).

Κεφάλαιο 3 Μελέτη ευστάθειας τάσης στη μεταβατική κατάσταση

3.1 Εισαγωγή

Η ευστάθεια τάσης ή η αστάθεια τάσης είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα στη λειτουργία ενός συστήματος ισχύος. Ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου, τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος και του τύπου διαταραχής, διαφορετικά σύνολα αντιτιθέμενων δυνάμεων μπορεί να υποστούν παρατεταμένη ανισορροπία που οδηγεί σε διαφορετικούς τύπους αστάθειας. Η ευστάθεια ενός συστήματος ισχύος μπορεί να ταξινομείται λαμβάνοντας υπόψη τα εξής:



Σχήμα 3.1 Ταξινόμηση τύπων ευστάθειας τάσης

- Τη φύση της προκύπτουσας κατάστασης της αστάθειας όπως αυτή υποδεικνύεται από την κύρια μεταβλητή του συστήματος στην οποία παρατηρείται αστάθεια.

- Το μέγεθος της θεωρούμενης διαταραχής, που επηρεάζει τη μέθοδο υπολογισμού και πρόβλεψης της ευστάθειας.
- Τις συσκευές, τις διαδικασίες και το χρονικό διάστημα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να εκτιμηθεί η ευστάθεια.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η ευστάθεια του συστήματος ισχύος ταξινομείται σαν ευστάθεια τάσης, συχνότητας και γωνίας δρομέα. όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.

Η ευστάθεια τάσης ταξινομείται σε ευστάθεια τάσης μικρής και μεγάλης διαταραχής, αναλόγως του σφάλματος και σε μακροπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης, αναλόγως της χρονικής διάρκειας. Στη βραχυπρόθεσμη, η δυναμική των στοιχείων με γρήγορη απόκριση, όπως είναι οι γεννήτριες, οι επαγωγικοί κινητήρες, switched capacitors κτλ., καθορίζουν την απόκριση του συστήματος. Όμως στη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης σημαντικότερο ρόλο διαδραματίζουν τα στοιχεία του δικτύου με πιο αργή απόκριση, όπως συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ, on-load tap changers OLTC), συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ) των γεννητριών (over excitation limiters OXL) κ.τ.λ.

Αυτό το κεφάλαιο επικεντρώνεται κυρίως στη βραχυπρόθεσμη δυναμική διαφόρων στοιχείων ενός ενεργειακού συστήματος σε ακτινωτά δίκτυα. Όταν συμβαίνει μία σοβαρή διαταραχή, όπως βραχυκύκλωμα ή απώλεια γραμμής μεταφοράς κτλ., η τιμή της τάσης σε κάποιους ζυγούς μειώνεται δραματικά. Η μείωση της ισχύος του συστήματος μπορεί να προκαλέσει τον αποσυγχρονισμό και πιθανά την παύση λειτουργίας των επαγωγικών κινητήρων με μεγάλο φορτίο, πράγμα το οποίο μπορεί τελικά να οδηγήσει σε αστάθεια τάσης.

Η ευστάθεια τάσης μεγάλης διαταραχής αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί σταθερές τάσεις μετά από σοβαρές διαταραχές όπως

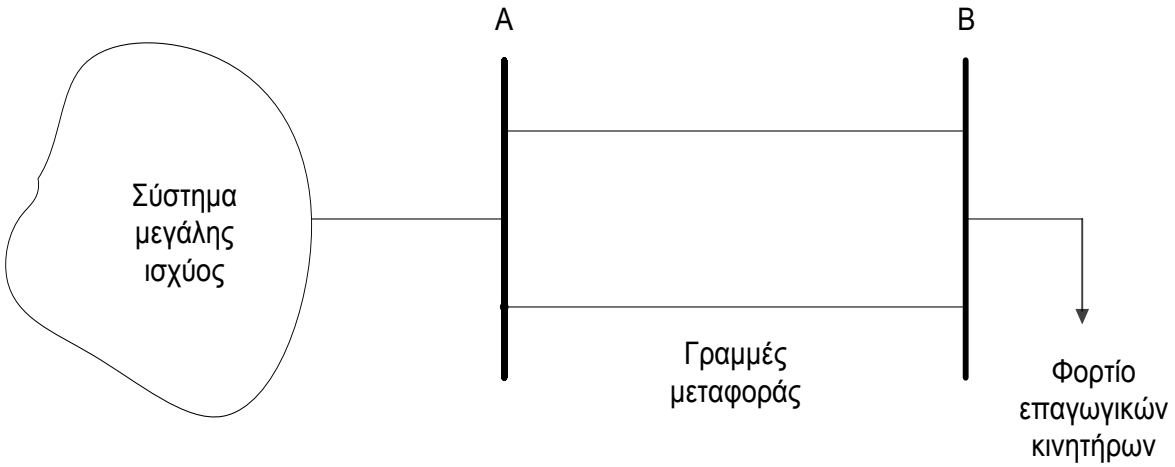
απώλεια φορτίου, διακοπτικά φαινόμενα και απώλεια μονάδων. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μεγάλης διαταραχής γίνεται με προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου. Η ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος να ελέγξει μικρές διακυμάνσεις της τάσης, που προκαλούνται από παράγοντες όπως η διακύμανση στο φορτίο του συστήματος, και μελετάται στη μόνιμη κατάσταση. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μικρής διαταραχής γίνεται με γραμμικοποίηση της λειτουργικής κατάστασης και βασίζεται στα ιδιοδιανύσματα και τις ιδιοτιμές.

Η αστάθεια τάσης η οποία έχει ξεκινήσει από ένα επαγωγικό κινητήρα ανήκει στην κατηγορία της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης τέτοιου είδους γίνεται με προσομοίωση και παραγωγή αποτελεσμάτων στο πεδίο του χρόνου, προκειμένου να κατανοηθεί ο μηχανισμός ή η αιτία της κατάρρευσης τάσης. Η ανάλυση του συστήματος στο πεδίο του χρόνου παρέχει επίσης πληροφορία για το χρόνο εμφάνισης του φαινομένου της αστάθειας.

Τα φορτία επαγωγικών κινητήρων είναι ένα σημαντικό μέρος του φορτίου του συστήματος, τα οποία συνεισφέρουν στην εμφάνιση του φαινομένου αστάθειας τάσης. Ωστόσο, είναι ένα φορτίο που αποκαθίσταται γρήγορα (σε χρόνο κάποιων δευτερόλεπτων) και απαιτεί άεργο ισχύ. Επίσης είναι αρκετά πιθανό οι κινητήρες να σταματήσουν, ιδίως σε περιπτώσεις μεγάλου μηχανικού φορτίου, όταν η τάση του συστήματος μειώνεται περισσότερο από ένα συγκεκριμένο επίπεδο για περισσότερο χρόνο. Η τάση στους ζυγούς φορτίου της μηχανής πρέπει να αποκαθίσταται γρήγορα πριν η ολίσθηση της μηχανής φτάσει μία απαγορευτική τιμή.

3.2 Βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης

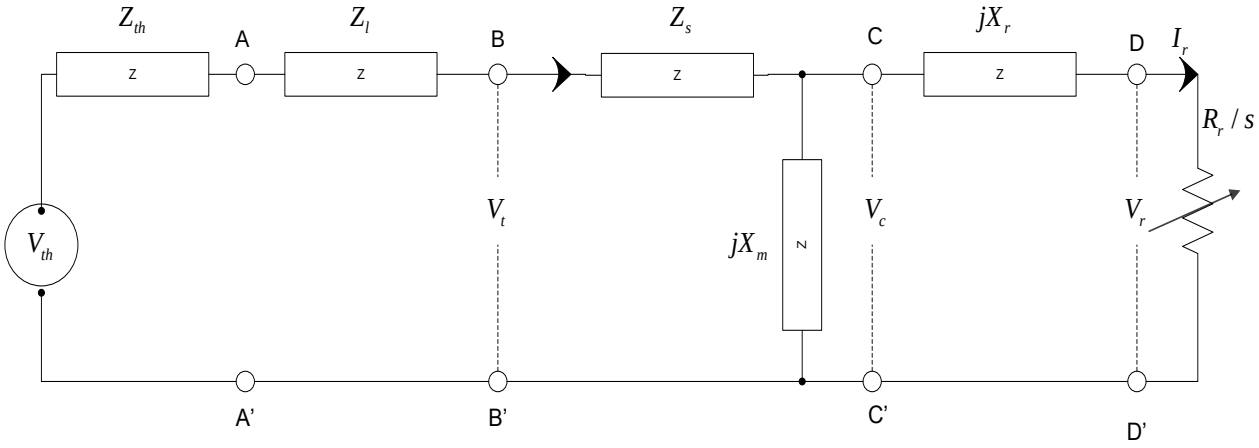
Στη συγκεκριμένη ενότητα εξετάζεται το φαινόμενο της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης ενός απλού συστήματος η οποία προκαλείται από έναν επαγωγικό κινητήρα με μεγάλο φορτίο. Επίσης καθορίζεται ο μηχανισμός του φαινομένου της κατάρρευσης τάσης, δηλαδή πώς και γιατί εμφανίζεται.



Σχήμα 3.2 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του υπό μελέτη συστήματος για μεταβατική ευστάθεια τάσης

3.2.1 Το υπό μελέτη σύστημα και το μαθηματικό του μοντέλο

Στο υπό μελέτη σύστημα, θεωρούμε ότι ένας ζυγός φορτίου 'Β' τροφοδοτείται από ένα μεγάλο σύστημα ισχύος διαμέσου μίας διπλής γραμμής μεταφοράς, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Το φορτίο μπορεί να αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό επαγωγικών κινητήρων. Ωστόσο, στις μελέτες ευστάθειας τάσης αυτοί οι κινητήρες συνήθως ομαδοποιούνται και αναπαρίστανται με έναν ισοδύναμο επαγωγικό κινητήρα. Το συνολικό ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος του σχήματος 3.2.

Το σύστημα ισχύος που τροφοδοτεί το ζυγό 'Α' αναπαρίσταται από το ισοδύναμό του κύκλωμα κατά Thevenin, το οποίο αποτελείται από μία γεννήτρια (V_{th}) σε σειρά με τη αντίσταση Thevenin (Z_{th}), ενώ οι γραμμές μεταφοράς από την εν σειρά σύνθετη αντίσταση (Z_l). Το κύκλωμα δεξιά του κλάδου ΒΒ' αναπαριστά το ισοδύναμο κύκλωμα του φορτίου των επαγωγικών κινητήρων. Οι ποσότητες Z_s, X_m, X_r, και R_r ισοδυναμούν με την αντίσταση

του τυλίγματος του στάτη, τη μαγνητική επαγωγή, την επαγωγική αντίσταση του δρομέα και την αντίσταση του δρομέα του επαγωγικού κινητήρα αντίστοιχα. Τα μεγέθη I_r και V_r είναι το ρεύμα και η αντίσταση στα άκρα της αντίστασης του δρομέα R_r / s, όπου s είναι η ολίσθηση της μηχανής.

Η τάση στα άκρα του δρομέα (στον κλάδο CC′) V_c στο σχήμα 3.3. μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$V_c = V_r + jI_r X_r \textbf{ (3.1)}$$

Η τερματική τάση (στον κλάδο ΒΒ′) V_t μπορεί να γραφτεί:

$$V_t = V_c + (I_r + \frac{V_c}{jX_m})Z_s \textbf{ (3.2)}$$

Συναρτήσει της τερματικής τάσης V_t και της σύνθετης αντίστασης Z_t της μηχανής, το ρεύμα I_s που απορροφά η μηχανή είναι:

$$I_s = \frac{V_t}{Z_t} \textbf{ (3.3)}$$

Όπου,

$$Z_t = \frac{(jX_m)(\frac{R_r}{s} + jX_r)}{\frac{R_r}{s} + j(X_r + X_m)} + Z_s$$

Η δυναμική συμπεριφορά ενός επαγωγικού κινητήρα μπορεί να παρασταθεί από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}(T_m - T_e) \textbf{ (3.4)}$$

όπου τα H, T_m, T_e, και s είναι η σταθερά αδράνειας, η μηχανική ροπή φορτίου, η αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ροπή, και η ολίσθηση αντίστοιχα της μηχανής.

Για μία δεδομένη τερματική τάση, η ισχύς διακένου P_{ag}, εξαρτάται από τις παραμέτρους της μηχανής και από την ολίσθηση λειτουργίας. Στο ανά μονάδα σύστημα η ισχύς διακένου P_{ag} ισούται με την αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ροπή T_e της μηχανής. Σημειώνεται ότι η P_{ag}, και κατ' επέκταση η ηλεκτρική ροπή, εξαρτώνται από τα μεγέθη στο σημείο DD', όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.

Στο σχήμα 3.3, η απορροφόμενη ισχύς από την αντίσταση R_r / s αναπαριστά την P_{ag} και μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$P_{ag} = \frac{R_r}{s} I_r^{\,2} = \frac{V_r^{\,2}}{R_r} s \textbf{ (3.5)}$$

Η μηχανική ροπή φορτίου T_m θεωρείται εμπειρικά:

$$T_m = T_c + T_s s + T_q (1-s)^2 \textbf{ (3.6)}$$

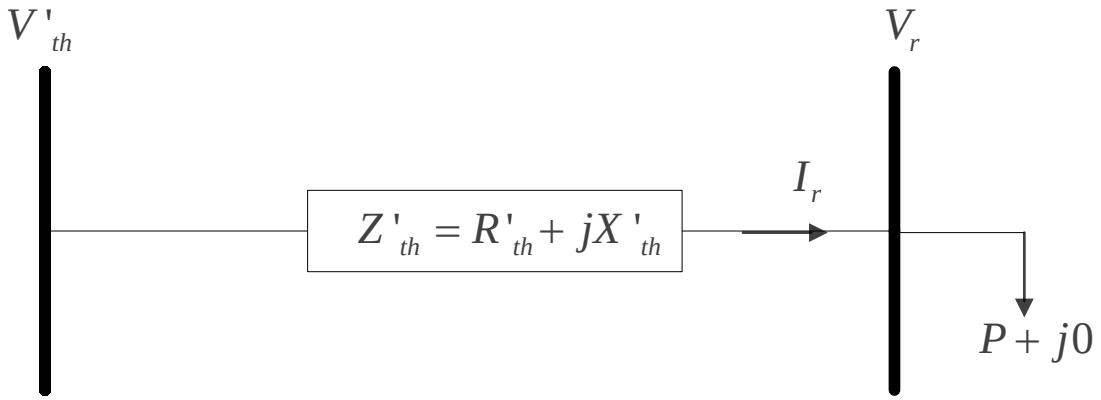
Στην παραπάνω σχέση τα μεγέθη T_c, T_s, και T_q είναι οι συντελεστές του σταθερού, του πρωτοβάθμιου και του δευτεροβάθμιου όρου αντίστοιχα, της εξίσωσης από την οποία δίνεται η μηχανική ροπή φορτίου T_m. Για μελέτες βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης οι συντελεστές του πρωτοβάθμιου και του

δευτεροβάθμιου όρου της μηχανικής ροπής φορτίου T_m, θεωρούνται ίσοι με το μηδέν. Για μελέτες μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης όλοι οι όροι λαμβάνονται υπόψη.

3.2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα δύο ζυγών του υπό μελέτη συστήματος

Υπό κανονικές συνθήκες η καμπύλη P-V στο σημείο φόρτισης κατασκευάζεται για ένα σταθερό συντελεστή ισχύος. Όμως, στα άκρα του κινητήρα ΒΒ', όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, ο συντελεστής ισχύος διαφοροποιείται ανάλογα με το μηχανικό φορτίο του κινητήρα. Επιπλέον, η κατανάλωση της αέργου ισχύος από τον επαγωγικό κινητήρα, εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος στον οποίο λειτουργεί. Έτσι καθίσταται δύσκολη η κατασκευή της καμπύλης P-V στα άκρα του κινητήρα ΒΒ'. Παρ' όλα αυτά, στα σημεία DD' ο συντελεστής ισχύος ισούται πάντα με τη μονάδα. Για το λόγο αυτό προκειμένου να προκύψει το P-V διάγραμμα, η ενεργός ισχύς P που καταναλώνεται από την αντίσταση του δρομέα θεωρείται ως φορτίο.

Το κομμάτι του κυκλώματος που βρίσκεται αριστερά του σημείου DD' μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin με παραμέτρους V_{th}' και Z_{th}'. Η ισχύς που απορροφάται από την R_r/s (που βρίσκεται δεξιά του σημείου DD') αναπαρίσταται ως P. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Αναπαράσταση με δύο ζυγούς του υπό μελέτη συστήματος όπως δίνεται στο σχήμα 3.3

Οι παράμετροι V_{th}' και Z_{th}' του ισοδύναμου κυκλώματος προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_{th}' = \frac{V_{th}(jX_m)}{Z_{th} + Z_l + Z_s + jX_m} \quad \textbf{(3.7)}$$

$$Z_{th}' = \frac{(Z_{th} + Z_l + Z_s)(jX_m)}{Z_{th} + Z_l + Z_s + jX_m} + jX_r = R_{th}' + jX_{th}' \quad \textbf{(3.8)}$$

Η σύνθετη εξίσωση τάσης του κυκλώματος 3.4 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$V_{th}' = V_r + \frac{(P - j0)}{V_r^*} Z_{th}' \quad \textbf{(3.9)}$$

$$V_{th}' V_r^* = V_r V_r^* + P R_{th}' + jP X_{th}'$$

Στην περίπτωση που το V θεωρείται ως τάση αναφοράς, τότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$V_{th}'V_r = V_r^2 + PR_{th}' + jPX_{th}' \quad \textbf{(3.10)}$$

Παίρνοντας τα μέτρα της παραπάνω εξίσωσης, αυτή γίνεται:

$$\left|V_{th}'V_r\right| = \left|\left(V_r^2 + PR_{th}'\right) + jPX_{th}'\right|$$

ή αλλιώς

$$V_r^4 + (2R_{th}'P - V_{th}')V_r^2 + P^2(R_{th}'^2 + X_{th}'^2) = 0 \quad \textbf{(3.11)}$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$aV_r^4 + bV_r^2 + c = 0 \quad \textbf{(3.12)}$$

Όπου $a = 1, b = 2R_{th}'P - V_{th}', c = P^2(R_{th}'^2 + X_{th}'^2)$

Εάν θεωρήσουμε $x = V_r^2$ τότε η σχέση (3.12) γίνεται:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad \textbf{(3.13)}$$

Οι λύσεις της ανωτέρω δευτεροβάθμιας εξίσωσης είναι ως γνωστόν:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{d}}{2a} \quad \textbf{(3.14)}$$

Όπου $d(=\sqrt{b^2-4ac})$ η διακρίνουσα. Η τιμή της διακρίνουσας πρέπει να είναι θετική όταν το σύστημα λειτουργεί μέσα στα όρια της ευστάθειας τάσης.

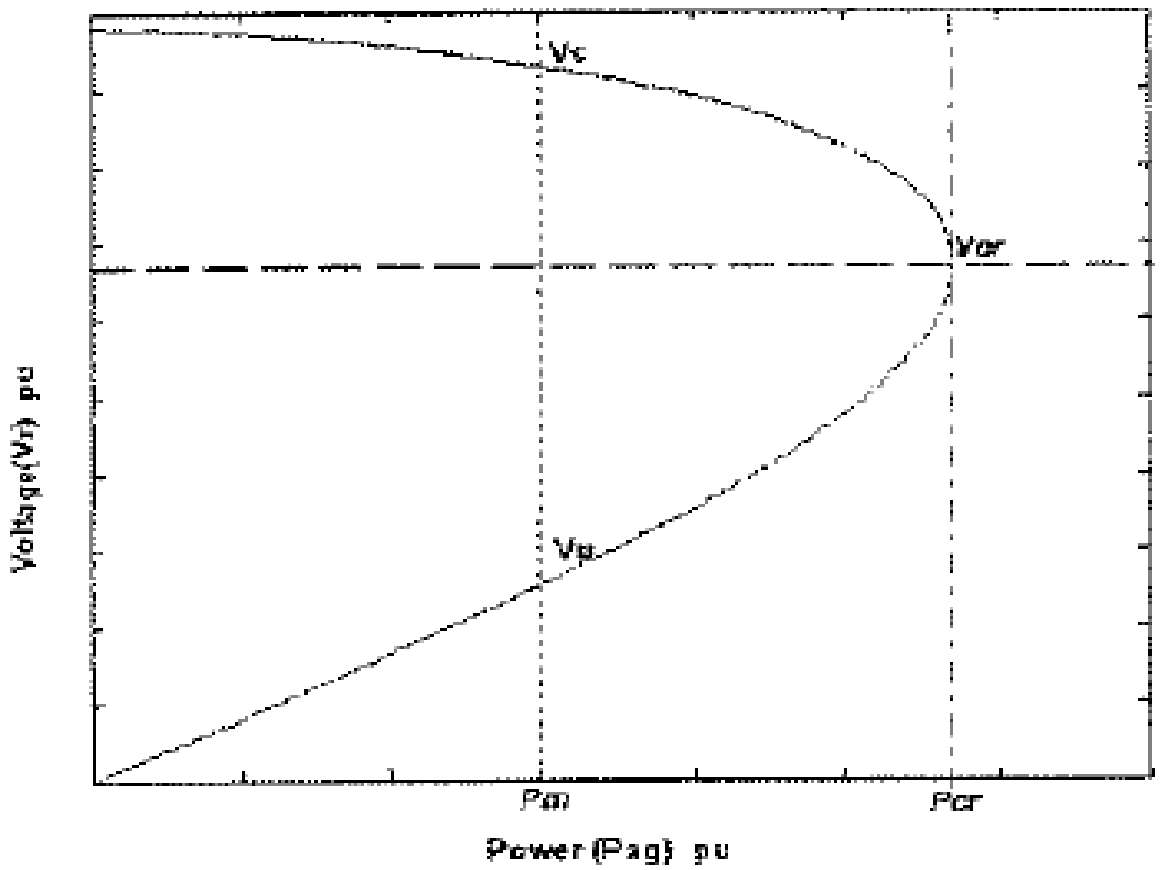
Όταν λοιπόν η τιμή της διακρίνουσας είναι θετική, η τάση φορτίου V_r γράφεται:

$$V_r = \pm\sqrt{x} = \pm\sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{d}}{2a}} \quad \textbf{(3.15)}$$

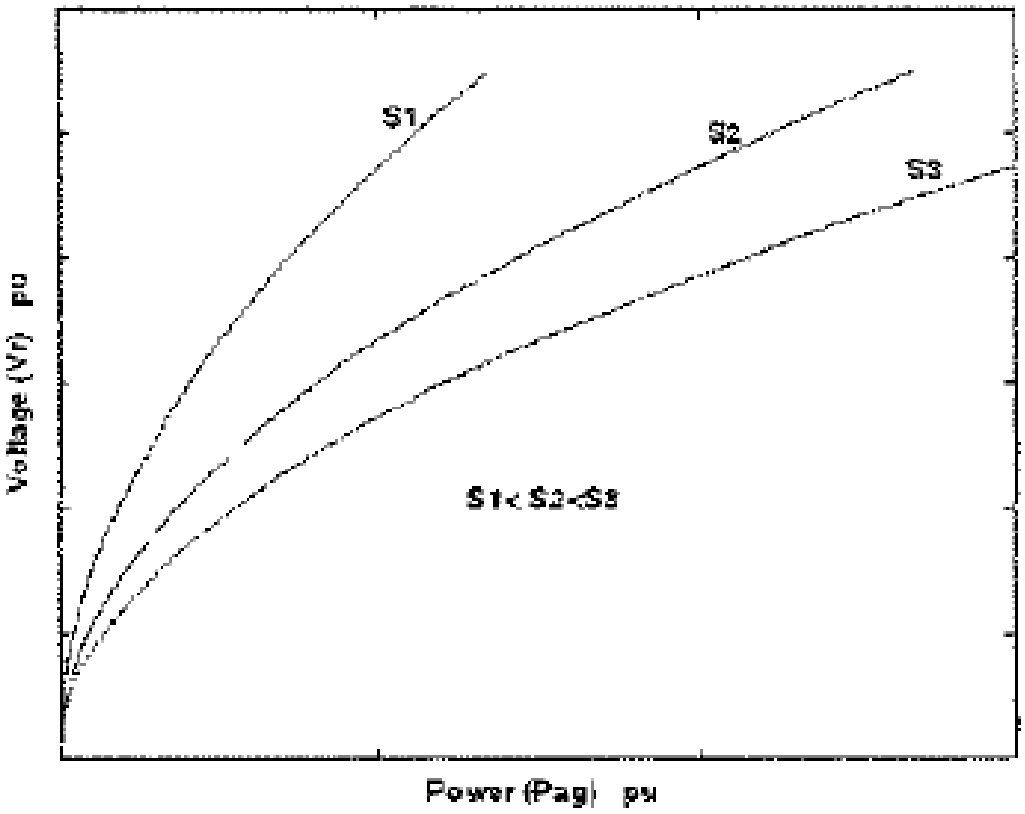
Σε περίπτωση που το φορτίο (ή η P_{ag}) βρίσκεται μέσα στα όρια της ευστάθειας τάσης, μόνο δύο από τις λύσεις της εξίσωσης (3.15), οι θετικές τιμές, είναι εφικτές και αυτές ακριβώς οι λύσεις χρησιμοποιούνται για να προκύψουν οι καμπύλες P-V του συστήματος. Η εφικτή λύση με την υψηλότερη τιμή καλείται ευσταθής τάση (V_s) ενώ η λύση με τη χαμηλότερη τιμή ονομάζεται ασταθής τάση (V_u). Οι εκφράσεις των V_s, V_u δίνονται παρακάτω:

$$V_s = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{d}}{2a}} \quad \textbf{(3.16)}$$

$$V_u = \sqrt{\frac{-b - \sqrt{d}}{2a}} \quad \textbf{(3.17)}$$



Σχήμα 3.5 Χαρακτηριστική καμπύλη P-V του δικτύου



Σχήμα 3.6 Χαρακτηριστικές P-V καμπύλες του κινητήρα

Οι P-V καμπύλες για το δίκτυο, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 3.5, προκύπτουν ως εξής:

I. Αρχικά θεωρούμε την τιμή της P ίση με 0.
II. Υπολογίζουμε τις V_s, V_u χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.16) και (3.17)
III. Αυξάνουμε την τιμή του P κατά ένα μικρό ποσοστό και επαναλαμβάνουμε το δεύτερο βήμα εωσότου η διακρίνουσα d να γίνει 0.

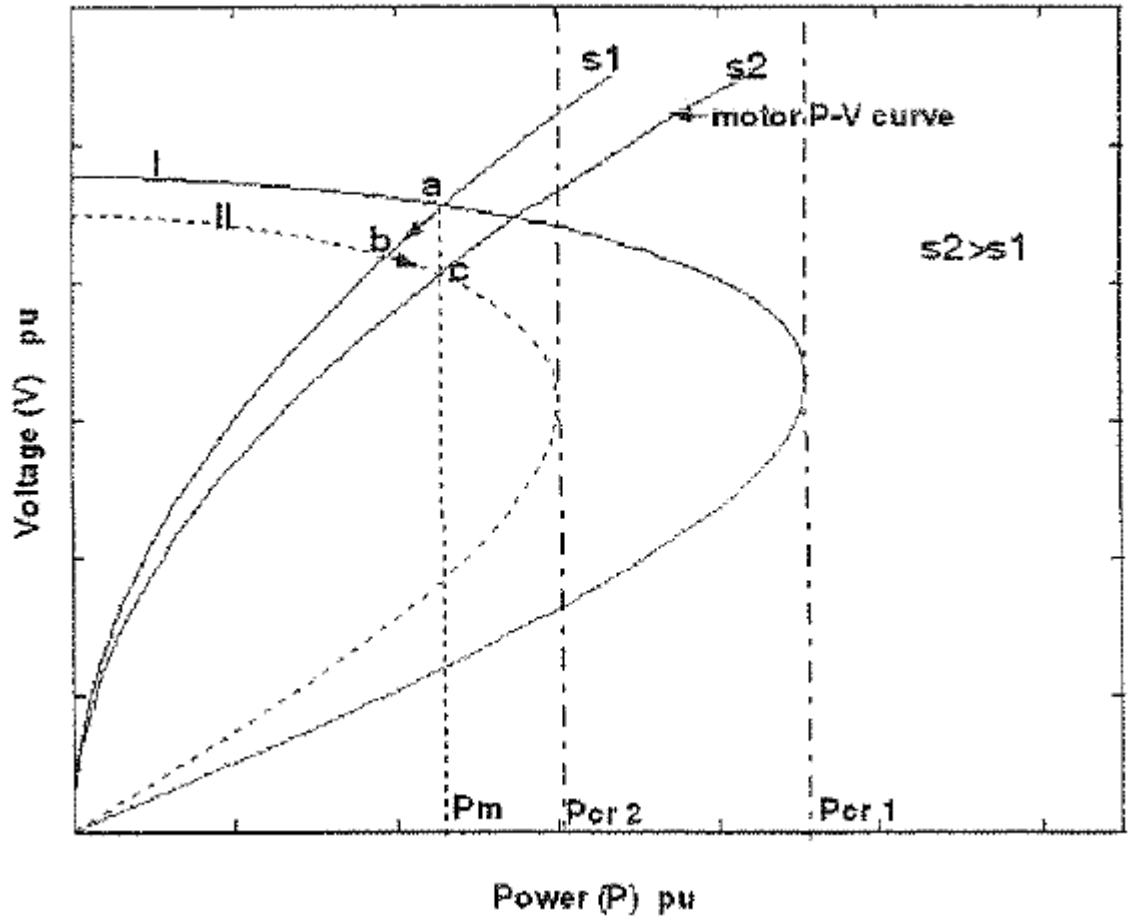
Όταν το φορτίο P αυξάνεται, τελικά το σύστημα φτάνει στο σημείο κατάρρευσης της τάσης, όπου οι τιμές V_s και V_u προσεγγίζουν την ίδια τιμή ($V_s \approx V_u$). Αυτή η τιμή ονομάζεται κρίσιμη τιμή της τάσης (V_{cr}) και η αντίστοιχη ισχύς καλείται κρίσιμη ισχύς (P_{cr}).

Από την εξίσωση (3.5), και για συγκεκριμένη ολίσθηση, προκύπτει ότι η P_{ag} ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται από την τάση V_r. Η σχέση της P_{ag} με την V_r (για σταθερή ολίσθηση) στο σημείο DD' αποτυπώνεται στο σχήμα 3.6.

Προκειμένου να ικανοποιηθεί το κριτήριο ισορροπίας της ισχύος στο σημείο DD', το σύστημα πρέπει να λειτουργήσει στο σημείο τομής των καμπυλών P-V του συνολικού συστήματος και της μηχανής. Η ισχύς στο σημείο της τομής αναπαριστά την ισχύ στο σημείο DD' του σχήματος 3.3 καθώς και την ισχύ διακένου του κινητήρα. Εάν θεωρήσουμε αμελητέες τις απώλειες χαλκού, τότε η ηλεκτρική ισχύς της μηχανής θα ισούται με τη μηχανική ισχύ της. Η παραπάνω παραδοχή χρησιμοποιείται για να επιβεβαιωθεί η ευστάθεια του κινητήρα καθώς και για τον καθορισμό του νέου σημείου ευσταθούς λειτουργίας μετά από κάποια διαταραχή.

3.2.3 Απώλεια γραμμής

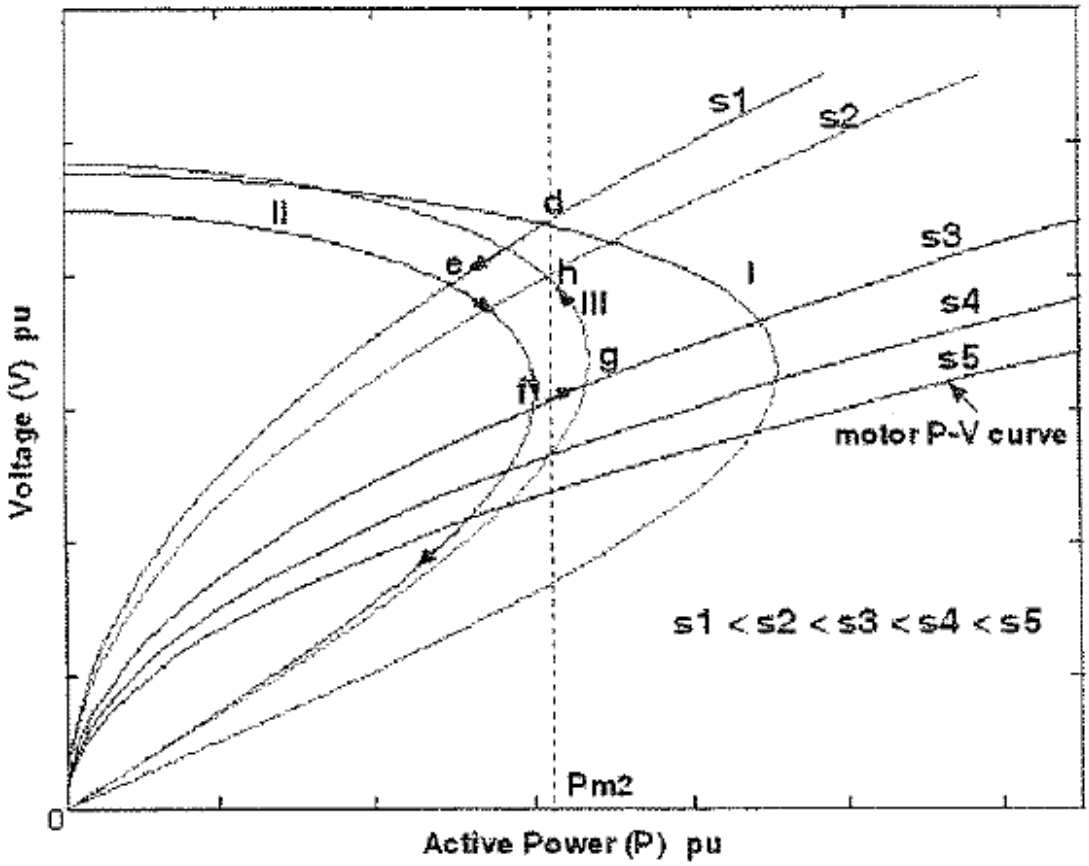
Θεωρούμε ότι μία από τις γραμμές μεταφοράς του σχήματος 3.2 ξαφνικά αποκόπτεται. Σ' αυτήν την περίπτωση, οι παράμετροι Thevenin του κυκλώματος 3.4 αλλάζουν ενώ διαφοροποιούνται οι καμπύλες P-V του συστήματος. Το σχήμα 3.7 δείχνει την καμπύλη P-V πριν και μετά την απώλεια της γραμμής. Υποθέτουμε ότι ο κινητήρας αποδίδει μια σταθερή ισχύ P_m όπως φαίνεται με μία κάθετη γραμμή στο σχήμα 3.7. Το αρχικό σημείο λειτουργίας (με τις 2 γραμμές μεταφοράς) είναι το 'a' που αντιστοιχεί σε ολίσθηση s_1. Μετά την αποκοπή της μίας εκ των δύο γραμμών, η μηχανή θα λειτουργεί τελικά στο σημείο 'c' (στην καμπύλη II) προκειμένου να ικανοποιεί τις ίδιες απαιτήσεις ισχύος. Η P-V καμπύλη του κινητήρα που περνά από το σημείο 'c' αντιστοιχεί σε ολίσθηση s_2. Παρ' όλα αυτά, η ολίσθηση ή η ταχύτητα της μηχανής δεν μπορεί να αλλάξει ακαριαία. Έτσι, το σημείο λειτουργίας του κινητήρα αρχικά «πηδάει» από το σημείο 'a' (στην καμπύλη I) στο 'b' (στην καμπύλη II) που αντιστοιχεί στην ίδια ολίσθηση. Αυτό συμβαίνει τη στιγμή που αποκόπτεται η γραμμή. Στο σημείο 'b' η ισχύς της μηχανής είναι μικρότερη από την ισχύ του φορτίου και γι' αυτό το λόγο η μηχανή επιβραδύνει και η ολίσθηση αυξάνεται. Έτσι, το σημείο λειτουργίας αρχίζει να «μετακινείται» κατά μήκος της καμπύλης 2 (που αντιστοιχεί στην P-V καμπύλη μετά την απώλεια) μέχρι να φτάσει το νέο σταθερό σημείο ισορροπίας 'c'. Εάν το αρχικό φορτίο του κινητήρα είναι μεγαλύτερο από P_{cr2}, τότε μετά την αποκοπή της γραμμής δε θα υπάρχει κοινό σημείο μεταξύ της νέας P-V καμπύλης του συστήματος και της καμπύλης της σταθερής ισχύος της μηχανής. Άρα δε θα μπορεί να υπάρξει νέο σημείο ισορροπίας και τελικά ο κινητήρας θα σταματήσει.



Σχήμα 3.7 Αναπαράσταση των P-V καμπυλών του δικτύου και του κινητήρα, I: με δύο γραμμές μεταφοράς, II: με μία γραμμή μεταφοράς

Ένας πιθανός τρόπος να λειτουργήσει ο κινητήρας σε υψηλότερα επίπεδα φορτίου, σε ένα εφικτό σταθερό σημείο λειτουργίας μετά τη διαταραχή, είναι η «επιμήκυνση» του ακραίου σημείου της P-V καμπύλης (της κρίσιμης ισχύος P_{cr}) προς τα δεξιά. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας τη σύνθετη αντίσταση Thevenin προσθέτοντας έναν εγκάρσιο πυκνωτή στα άκρα ΒΒ' της μηχανής (στο σχήμα 3.3). Ο εγκάρσιος πυκνωτής διαφοροποιεί τις παραμέτρους Thevenin και μετατοπίζει την P-V καμπύλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8 (καμπύλη III). Θεωρούμε ότι ο κινητήρας τώρα λειτουργεί σε υψηλότερα επίπεδα φορτίου (στο σημείο 'd') και λόγω της αποκοπής της μίας γραμμής το σημείο λειτουργίας ξαφνικά μετατοπίζεται στο σημείο 'e' και

κατόπιν κινείται κατά μήκος της P-V καμπύλης II. Μετά την προσθήκη του πυκνωτή, το σημείο λειτουργίας «πηγαίνει» από το σημείο 'f' (στην καμπύλη II) στο σημείο 'g' (στην καμπύλη III που συμπεριλαμβάνει την επίδραση του πυκνωτή). Στο σημείο 'g', η ισχύς του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από την ισχύ φορτίου και επομένως η μηχανή επιταχύνει και τελικά φτάνει το σταθερό σημείο ισορροπίας 'h'. Χωρίς τον εγκάρσιο πυκνωτή, το σημείο λειτουργίας κινείται κατά μήκος της P-V καμπύλης II (ακολουθώντας την αποκοπή της γραμμής) και δεν μπορεί να φτάσει το επίπεδο της ισχύος P_{m2} (πριν την αποκοπή). Κατ' επέκταση σταματά να λειτουργεί. Εάν καθυστερήσει η εκκίνηση της λειτουργίας του πυκνωτή (αφού φτάσει σε μία τιμή ολίσθησης ίση με s_4 όπου η P_{m2} και η P-V καμπύλη τέμνονται), είναι πιθανό ο κινητήρας να μη φτάσει το σταθερό σημείο ισορροπίας 'h'. Σε αυτήν την περίπτωση, η ισχύς της μηχανής (όταν ο πυκνωτής έχει τεθεί σε λειτουργία) θα φτάσει σε μία τιμή μικρότερη από την ισχύ του φορτίου και αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει την περαιτέρω επιβράδυνση του κινητήρα.



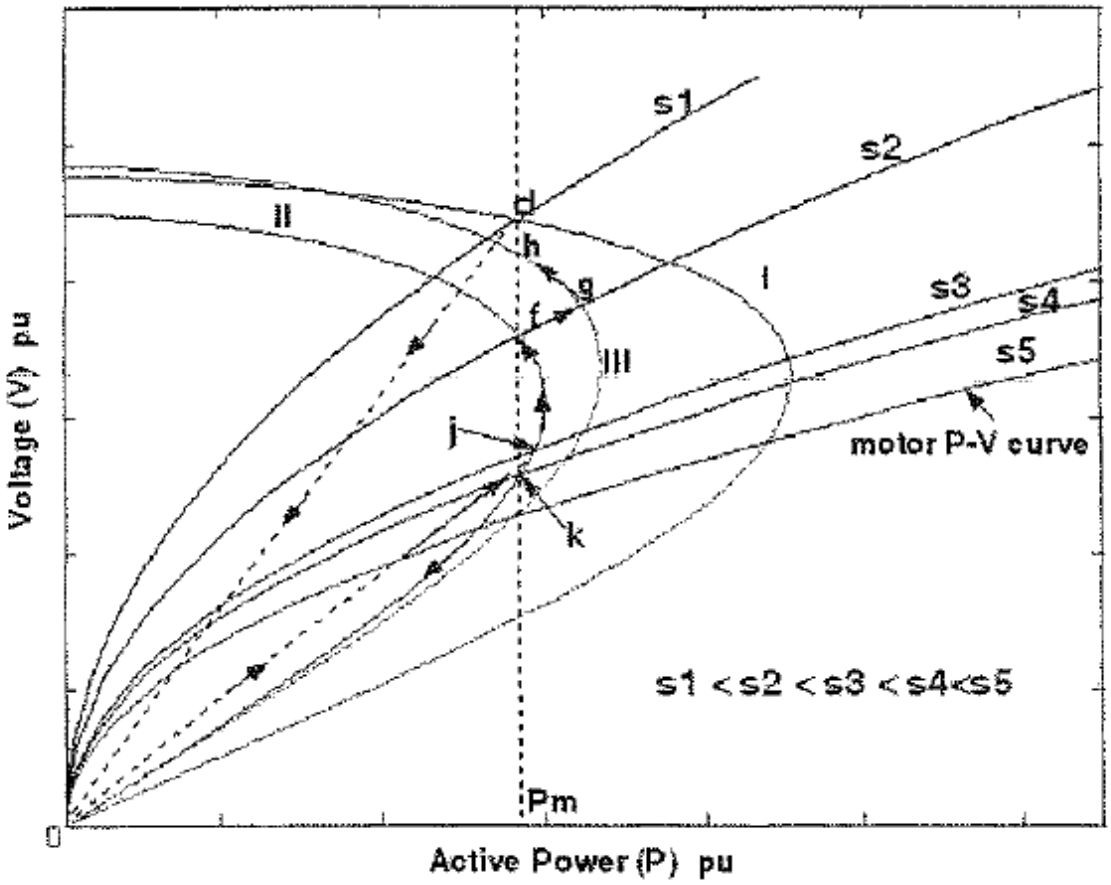
Σχήμα 3.8 Αναπαράσταση των P-V καμπυλών του δικτύου και του κινητήρα, I: με δύο γραμμές μεταφοράς, II: με μία γραμμή μεταφοράς, III: μία γραμμή με πυκνωτή στα άκρα του κινητήρα

3.2.4 Τριφασικό βραχυκύκλωμα

Για ένα τριφασικό σφάλμα στα άκρα της μηχανής, η τάση όπως και η ισχύς του κινητήρα γίνονται μηδέν. Σε αυτήν την περίπτωση, το σημείο λειτουργίας της μηχανής ξαφνικά μετατοπίζεται από το αρχικό σημείο λειτουργίας 'd' στο σχήμα 3.9 στο αρχικό (μηδενικής ισχύος) και τότε ο κινητήρας αρχίζει να επιβραδύνει. Θεωρούμε ότι το σφάλμα «καθαρίζει» (ανοίγοντας μία από τις γραμμές) όταν η ολίσθηση της μηχανής αυξάνεται σε s_3. Επομένως, με την εκκαθάριση του σφάλματος, το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται από το αρχικό σημείο στο σημείο 'j' όπου η ισχύς του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από την ισχύ του φορτίου. Άρα η μηχανή επιταχύνει και εν τέλει φτάνει το σταθερό σημείο λειτουργίας 'f'. Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος καθυστερήσει (όταν η ολίσθηση του κινητήρα φτάσει στην τιμή s_4), το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται από το αρχικό στο σημείο 'k' όπου η ισχύς του κινητήρα είναι ίση με την ισχύ του φορτίου. Αυτό αναπαριστά ένα κρίσιμο όριο. Εντούτοις, εάν η εκκαθάριση του σφάλματος καθυστερήσει περαιτέρω, η ολίσθηση του κινητήρα φτάνει σε μία τιμή ολίσθησης μεγαλύτερη της s_4 ,πράγμα που σημαίνει η ισχύς της μηχανής είναι μικρότερη από την ισχύ του φορτίου κατά την εκκαθάριση του σφάλματος. Συμπερασματικά ο κινητήρας αρχίζει να επιβραδύνει προκαλώντας την περαιτέρω αύξηση της ολίσθησης μέχρι να σταματήσει. Γι' αυτούς τους λόγους που περιγράφηκαν παραπάνω, το σημείο λειτουργίας 'k' (σημείο όπου η P_m και η P-V καμπύλη III τέμνονται στο σημείο s_4) ονομάζεται σημείο κρίσιμης ολίσθησης (s_{cr}). Τελικά, αποτελεί ενδιαφέρον να διερευνηθεί και να καθοριστεί ο κρίσιμος χρόνος για την εκκαθάριση του σφάλματος για τον οποίο ο κινητήρας θα καταλήξει σε ένα νέο ευσταθές σημείο λειτουργίας.

Όταν ένας εγκάρσιος πυκνωτής προστίθεται στα άκρα της μηχανής, θα αλλάξουν οι παράμετροι Thevenin, ακριβώς όπως συνέβη στην προηγούμενη περίπτωση με την αποκοπή μίας γραμμής. Το σημείο λειτουργίας και πάλι

μετακινείται ξαφνικά από το σημείο 'f' (στην καμπύλη II) στο σημείο 'g' (στην καμπύλη III με τον εγκάρσιο πυκνωτή). Στο σημείο 'g', η ισχύς του κινητήρα είναι υψηλότερη από την ισχύ του φορτίου και γι' αυτό η μηχανή επιταχύνει και τελικά φτάνει σε ένα νέο ευσταθές σημείο ισορροπίας 'h'.



Σχήμα 3.9 Αναπαράσταση των P-V καμπυλών του δικτύου και του κινητήρα, I: με δύο γραμμές μεταφοράς, II: με μία γραμμή μεταφοράς, III: μία γραμμή με πυκνωτή στα άκρα του κινητήρα

3.2.5 Καθορισμός κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης βραχυκυκλώματος

Σ' αυτό το κομμάτι της εργασίας περιγράφεται μια μέθοδος για τον καθορισμό του κρίσιμου χρόνου για την εκκαθάριση ενός σφάλματος. Η δυναμική εξίσωση ενός επαγωγικού κινητήρα μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}(T_m - T_e)$$

Κατά τη διάρκεια ενός τριφασικού σφάλματος, η τάση γίνεται ίση με μηδέν και κατ' επέκταση η ροπή που παράγεται από τη μηχανή (T_e) μηδενίζεται. Επομένως, η λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα κατά τη διάρκεια του σφάλματος χαρακτηρίζεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2H}(T_m) \quad \textbf{(3.18)}$$

Ολοκληρώνοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης (3.18) ως προς το χρόνο έχουμε:

$$\int\left(\frac{ds}{dt}\right)dt = \int\left(\frac{1}{2H}T_m\right)dt \quad \textbf{(3.19)}$$

Όταν η ροπή του φορτίου (T_m) θεωρείται σταθερή, η ολίσθηση του κινητήρα κατά τη διάρκεια της περιόδου του σφάλματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$s = \frac{T_m}{2H}t + C \quad \textbf{(3.20)}$$

Θεωρούμε προσφαλματική κατάσταση με παραμέτρους $t=0$, $s=s_0$ και άρα $C=s_0$. Αντικαθιστώντας το C στην εξίσωση (3.20) :

$$s=\frac{T_m}{2H}t+s_0 \quad \textbf{(3.21)}$$

Ο χρόνος κατά τον οποίο η ολίσθηση του κινητήρα φτάνει την κρίσιμη τιμή της (s_{cr}) ορίζεται ως κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος (t_{cr}):

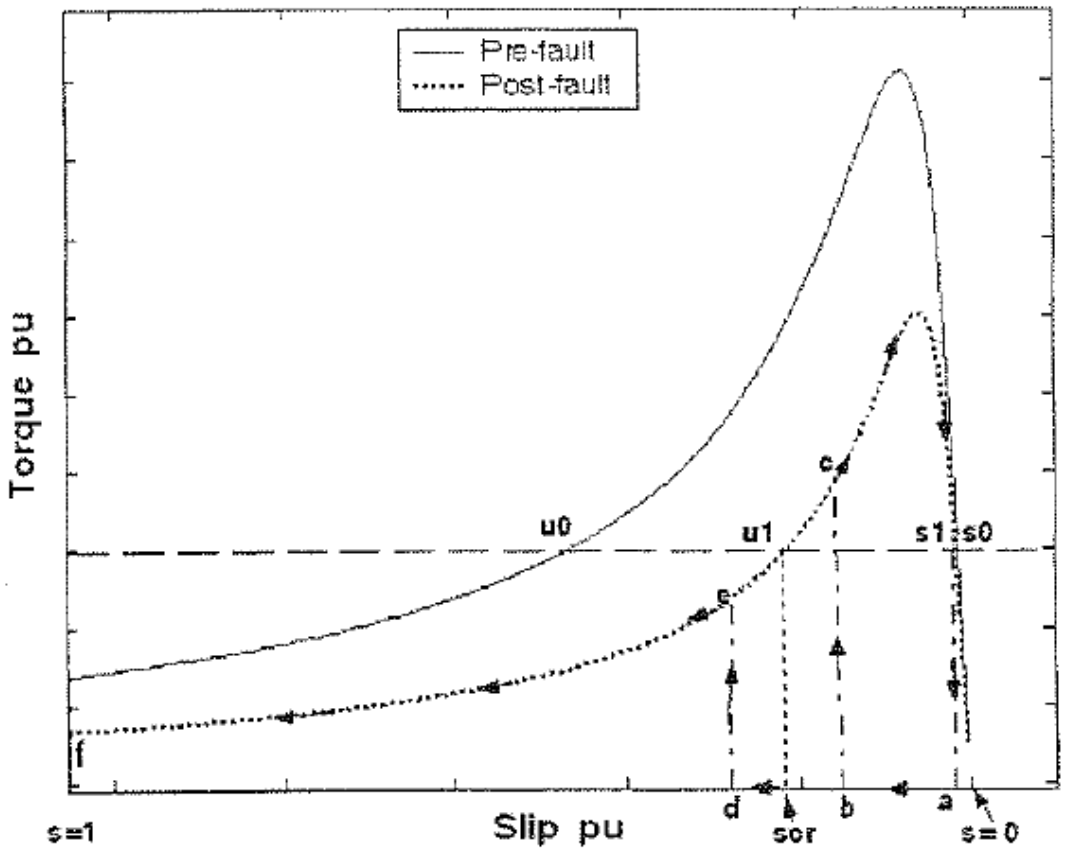
$$s_{cr}=\frac{T_m}{2H}t_{cr}+s_0 \quad \textbf{(3.22)}$$

Από την εξίσωση (3.22) προκύπτει η τιμή του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος t_{cr} :

$$t_{cr}=\frac{2H}{T_m}(s_{cr}-s_0) \quad \textbf{(3.23)}$$

3.2.6 Καθορισμός της κρίσιμης τιμής ολίσθησης

Τα χαρακτηριστικά της ροπής ολίσθησης του κινητήρα για προσφαλματικές (συμπαγής γραμμή) και μετασφαλματικές συνθήκες (διακεκομμένη γραμμή) φαίνονται στο διάγραμμα 3.10. Η σταθερή μηχανική ροπή του φορτίου στον κινητήρα αναπαρίσταται από την παράλληλη ως προς τον άξονα της ολίσθησης, διακεκομμένη γραμμή. Οι ευσταθείς τιμές της ροπής λειτουργίας (s_0 και s_1) καθώς και οι ασταθείς (u_0 και u_1) για προσφαλματικές και μετασφαλματικές συνθήκες φαίνονται επίσης στο διάγραμμα 3.10. Όταν συμβαίνει ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σύστημα, η τάση καθώς και η ηλεκτρική ροπή που παράγεται από τον κινητήρα γίνονται μηδέν και για το λόγο αυτό το σημείο λειτουργίας ξαφνικά «πηδάει» από το 's_0' στο 'a'. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, ο κινητήρας επιβραδύνεται και κατ' επέκταση η ολίσθηση αυξάνεται κατά μήκος της διαδρομής a-b. Εάν το σφάλμα «καθαριστεί» γρήγορα, πριν η ολίσθηση φτάσει στην ασταθή θέση ισορροπίας 'u_1' στο σχήμα 3.10, τότε η ηλεκτρική ροπή T_e που παράγεται από τον κινητήρα είναι μεγαλύτερη από τη μηχανική T_m και τελικά η μηχανή επιταχύνει και φτάνει στην ευσταθή θέση ισορροπίας 's_1'. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το σημείο λειτουργίας κινείται κατά μήκος της διαδρομής 's_0-a-b-c-s_1'. Εάν η εκκαθάριση του σφάλματος καθυστερήσει πέραν του σημείου 'u_1', τότε η ηλεκτρική ροπή T_e που παράγεται από τον κινητήρα είναι μικρότερη από τη μηχανική T_m και τελικά η μηχανή επιβραδύνει περαιτέρω και τελικά το σημείο λειτουργίας ακολουθεί το μονοπάτι 's_0-a-b-d-e-f'. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο ότι η ολίσθηση που αντιστοιχεί στο σημείο 'u_1' ταυτίζεται με την κρίσιμη ολίσθηση (s_{cr}) που είναι το ίδιο με το σημείο λειτουργίας 'k' στο διάγραμμα 3.9 όπου $P_e = P_m$ για την τιμή της ολίσθησης s_4.



Σχήμα 3.10 Χαρακτηριστικές ροπής ολίσθησης του επαγωγικού κινητήρα

Η ηλεκτρική ροπή T_e, η οποία εξαρτάται από τις ποσότητες που βρίσκονται στο σημείο DD' (στο σχήμα 3.3) και είναι το ίδιο με το P στο σχήμα 3.4, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$T_e = \frac{R_r}{s} I_r^2 \quad \textbf{(3.24)}$$

Η ένταση του ρεύματος του δρομέα (I_r) γράφεται:

$$I_r = \left| \frac{V_{th}^{'}}{Z_{th}^{'} + \frac{R_r}{s}} \right| = \left| \frac{V_{th}^{'}}{\left(R_{th}^{'} + \frac{R_r}{s} \right) + j(X_{th}^{'})} \right|$$

Άρα η ηλεκτρική ροπή του κινητήρα T_e της σχέσης (3.24) γίνεται:

$$T_e = \frac{(V_{th}^{'})^2}{\left(R_{th}^{'} + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_{th}^{'})^2} \frac{R_r}{s} \quad \textbf{(3.25a)}$$

Στην κρίσιμη ολίσθηση ή σε σημείο αστάθειας $T_e = T_m$ και επομένως η εξίσωση (3.25a) μπορεί να γραφτεί επίσης:

$$T_m = \frac{(V_{th}^{'})^2}{\left(R_{th}^{'} + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_{th}^{'})^2} \frac{R_r}{s} \quad \textbf{(3.25b)}$$

Η εξίσωση (3.25b) μπορεί να απλοποιηθεί περισσότερο και να γίνει:

$$s^2 (R_{th}^{'2} + X_{th}^{'2}) + s(2R_{th}^{'} R_r - \frac{V_{th}^{'2}}{T_m}) + R_r^2 = 0$$

Η παραπάνω έκφραση είναι της μορφής:

$$C_1 s^2 + C_2 s + C_3 = 0 \quad \textbf{(3.26)}$$

Όπου $C_1 = R_{th}^{'2} + X_{th}^{'2}$, $C_2 = 2R_{th}^{'} R_r - \frac{V_{th}^{'2}}{T_m}$ και $C_3 = R_r^2$

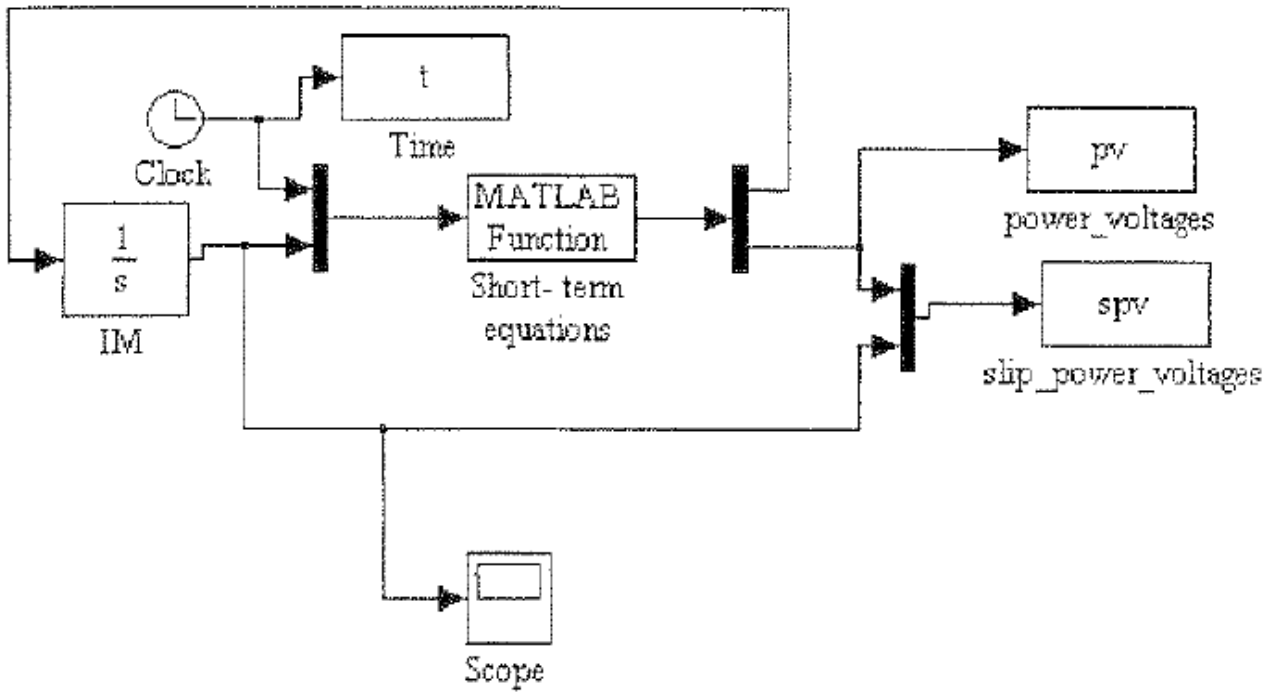
Η δευτεροβάθμια εξίσωση (3.26) έχει δύο πιθανές λύσεις:

$$s = \frac{-C_2 \pm \sqrt{C_2^2 - 4C_1C_3}}{2C_1} \quad \textbf{(3.27)}$$

Στην περίπτωση επαγωγικού κινητήρα, το 's' μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0 και 1. Εκτός αυτών των επιτρεπτών ορίων, η ολίσθηση με μεγαλύτερη τιμή από τη μονάδα θεωρείται ως ολίσθηση αστάθειας ενώ για αρνητικές τιμές θεωρείται ολίσθηση ευστάθειας.

3.3 Εξομοίωση μοντελοποίησης

Το μοντέλο MATLAB/SIMULINK για τη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης του συστήματος (σχήμα 3.3) φαίνεται στο σχήμα 3.11. Στην προκειμένη περίπτωση, όλες οι αλγεβρικές εξισώσεις (3.1) έως και (3.17), πλην της (3.4) (που αναφέρεται στη δυναμική εξίσωση του επαγωγικού κινητήρα) τροποποιήθηκαν σε "m-files" (αρχεία του MATLAB).



Σχήμα 3.11 Simulink μοντελοποίηση συστήματος για μελέτη βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης

Τα βήματα που ακολουθήσαμε για τη διερεύνηση της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας του συστήματος (σχήμα 3.3) παρουσιάζονται παρακάτω:

Βήμα 1. Θεωρούμε την αρχική ολίσθηση ίση με 1.

Βήμα 2. Προσδιορίζουμε το ρεύμα στάτη I_s και το ρεύμα του δρομέα I_r από το σχήμα 3.3

Βήμα 3. Υπολογίζουμε το P_{ag} που είναι προϊόν των I_r και R_r / s.

Βήμα 4. Βρίσκουμε το V_t χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.2).

Βήμα 5. Υπολογίζουμε την ενεργό ισχύ που καταναλώνεται (P_{ag}) από την αντίσταση του δρομέα βάσει της εξίσωσης (3.5) και έπειτα καθορίζουμε την ολίσθηση του επαγωγικού κινητήρα χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.4).

Βήμα 6. Επαναλαμβάνουμε τα βήματα 2 έως και 4 χρησιμοποιώντας την ολίσθηση που καθορίζεται στο βήμα 4 για ένα επαρκές χρονικό διάστημα.

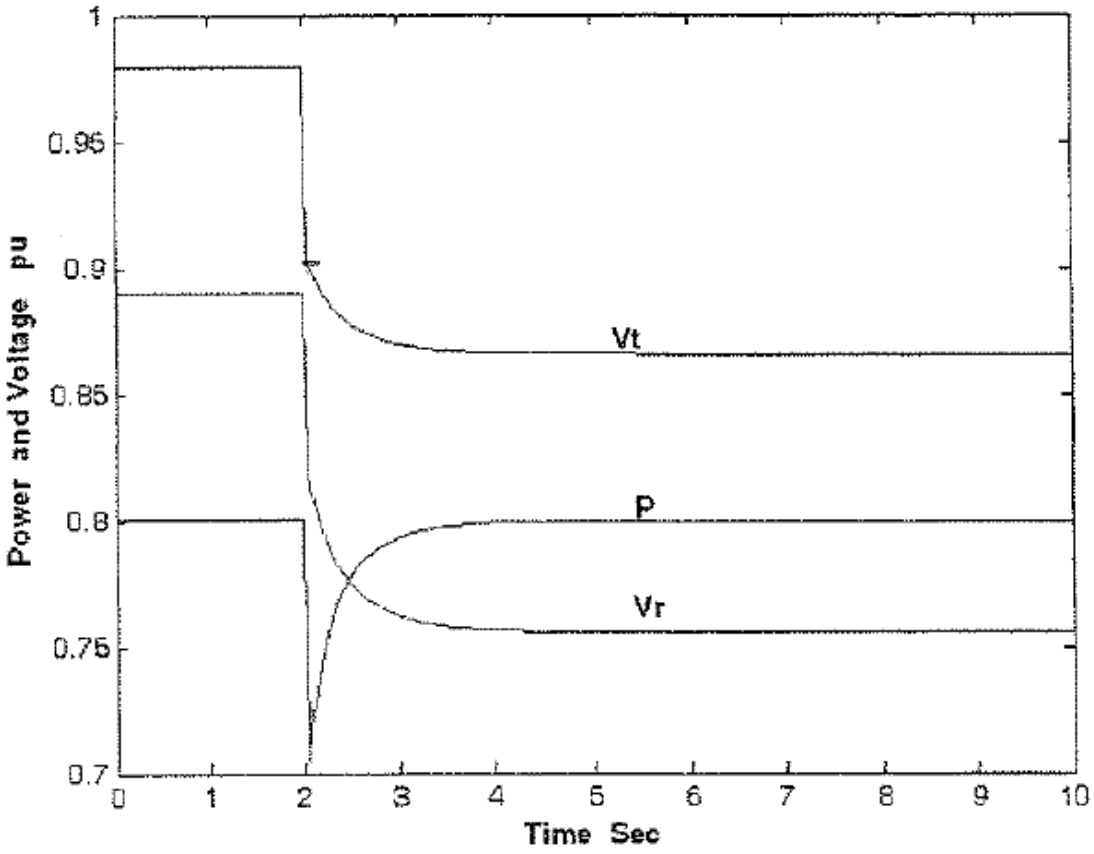
3.4 Βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης - Αποτελέσματα της εξομοίωσης

Το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης του συστήματος (σχήμα 3.3) εξετάζεται λεπτομερώς στο πεδίο του χρόνου για δύο διαφορετικά σφάλματα (αποκοπή της μίας γραμμής μεταφοράς και για τριφασικό σφάλμα). Θεωρούμε ότι η μηχανική ροπή του κινητήρα παραμένει σταθερή. Τα δεδομένα του συστήματος δίνονται στο παράρτημα. Τα αποτελέσματα για τους δύο τύπους σφαλμάτων περιγράφονται ακολούθως.

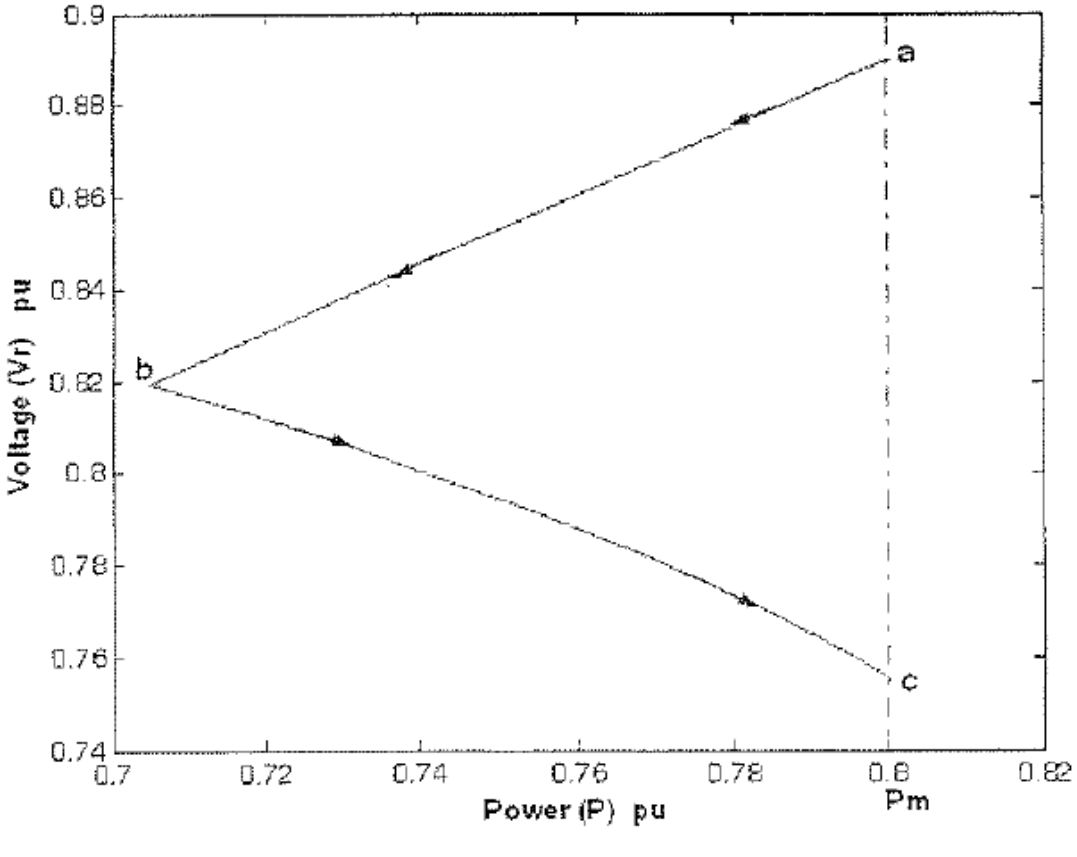
3.4.1 Απόκριση συστήματος σε ξαφνική απώλεια γραμμής

Θεωρούμε ότι μία από τις γραμμές μεταφοράς μεταξύ των ζυγών A και B στο σχήμα 3.3 αποκόπτεται μετά από χρόνο t=2.0 sec. Το σχήμα 3.12 δείχνει τη χρονική απόκριση της τερματικής τάσης της μηχανής V_t, της V_r και της P_{ag}.

Τη στιγμή που αποκόπτεται η γραμμή, η ισχύς της μηχανής ξαφνικά πέφτει από την αρχική τιμή των 0.8 pu σε 0.705 pu και κατ' επέκταση η μηχανή επιβραδύνεται. Αυτή η επιβραδυντική διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ολίσθησης 's', κάτι που προκαλεί την ανάκαμψη της ισχύος στην αρχική της τιμή. Η πλήρης ανάκαμψη της ισχύος στην αρχική τιμή των 0.8pu επιτυγχάνεται μετά από περίπου 2.4 sec. Επιπλέον, τη στιγμή που κόβεται η γραμμή, η τερματική τάση της μηχανής μειώνεται ξαφνικά από την αρχική τιμή των 0.979 pu σε 0.905 pu. Κατά τη διάρκεια της ανάκαμψης της ισχύος, η τερματική τάση της γεννήτριας μειώνεται περαιτέρω στα 0.865pu.



Σχήμα 3.12 Μεταβολή των τάσεων (V_t και V_r) και της ισχύος φορτίου P για ξαφνική απώλεια γραμμής

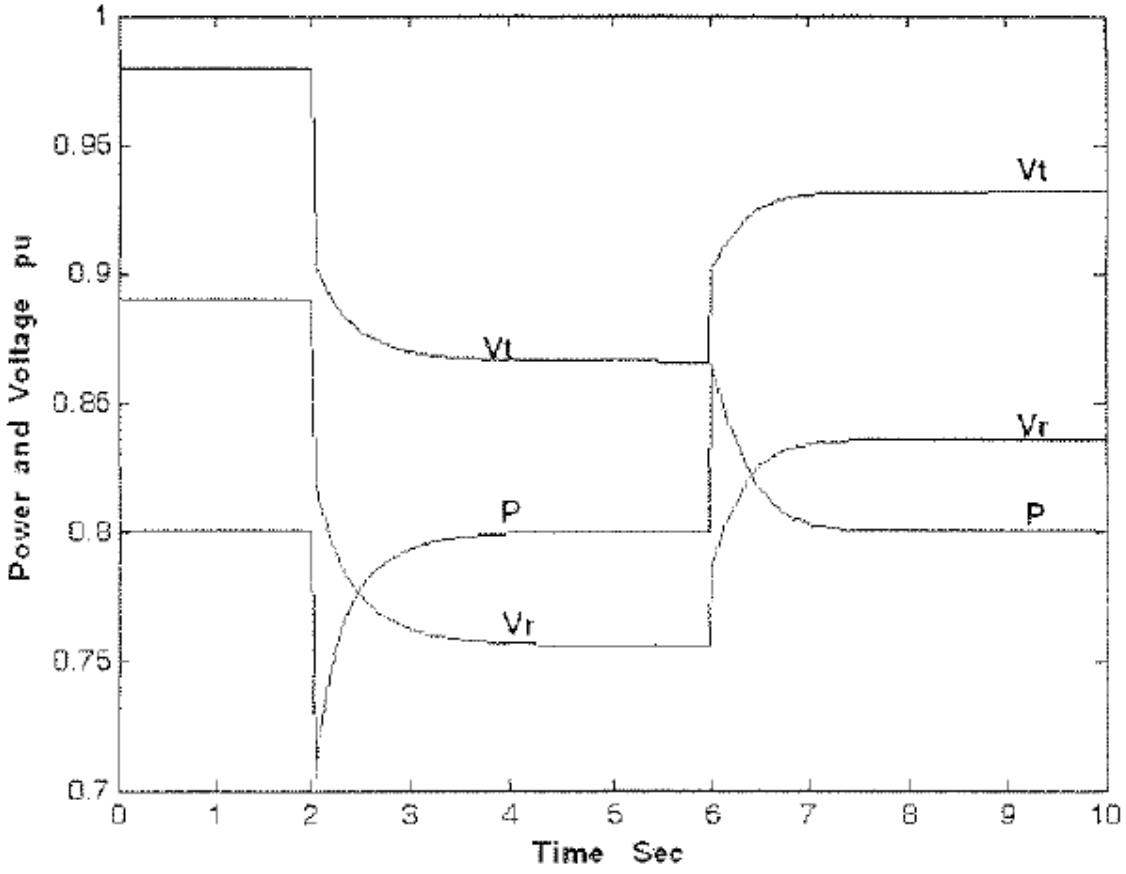


Σχήμα 3.13 Τοπολογία του σημείου λειτουργίας για απώλεια μίας γραμμής

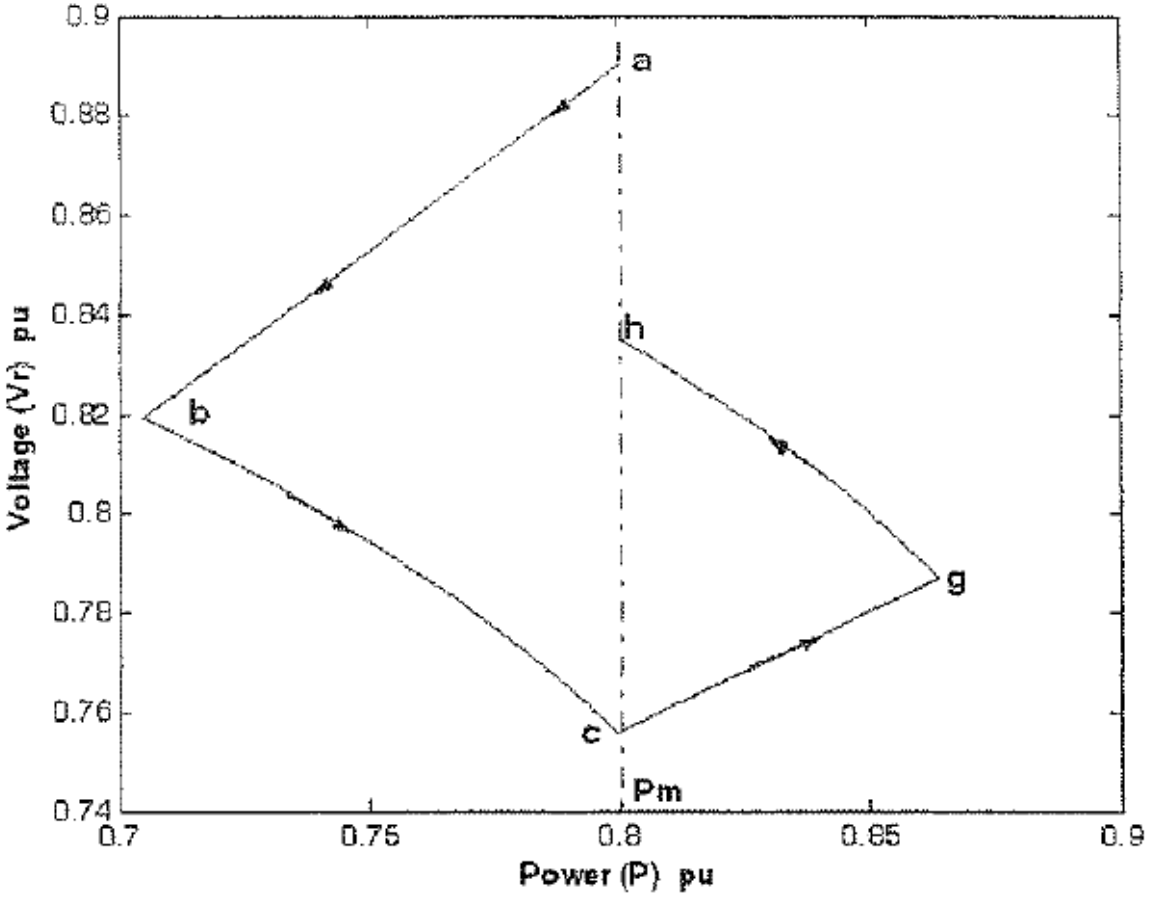
Η εξάρτηση της τάσης και της ισχύος της μηχανής δείχνεται στο σχήμα 3.13, όπου η μηχανή αρχικά λειτουργούσε στο σημείο 'a' (η P_{ag} είναι 0.8 pu και η V_r 0.89 pu). Με την αποκοπή της γραμμής, ξαφνικά πηγαίνει στο σημείο 'b' (P_{ag}=0.705 pu, V_r=0.82 pu) κατά μήκος της χαρακτηριστικής καμπύλης P-V (για σταθερή ολίσθηση). Έπειτα κινείται κατά μήκος του μονοπατιού 'b-c' (πάνω στην P-V καμπύλη μετά την αποκοπή της γραμμής) κατά τη διάρκεια της ανάκαμψης της ισχύος έως ότου φτάσει την ίδια ισχύ με την αρχική στο σημείο 'c'(P_{ag}=0.8 pu, V_r=0.755 pu).

Μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 3.12 ότι η τελική τιμή της τερματικής τάσης της μηχανής είναι 0.865 pu, κάτι που σημαίνει ότι πιθανώς να βρίσκεται κάτω από το αποδεκτό επίπεδο. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η

βελτίωση της τερματικής τάσης. Ένας τρόπος αύξησής της είναι η προσθήκη ενός εγκάρσιου πυκνωτή στο ζυγό Β του σχήματος 3.3. Το σχήμα 3.14 δείχνει τη χρονική απόκριση των V_t, V_r και P_{ag} για μια ξαφνική αποκοπή μιας γραμμής μεταφοράς στα 2 sec ακολουθούμενη από την προσθήκη ενός εγκάρσιου πυκνωτή 0.1875 pu στα 6 sec. Με την προσθήκη του πυκνωτή, η τάση καθώς και η ισχύς της μηχανής αυξάνονται ραγδαία. Η αύξηση της ισχύος προκαλεί την επιτάχυνση της μηχανής (ή την μείωση της ολίσθησης) μέχρι να φτάσει την ίδια ισχύ όπως στην προσφαλματική κατάσταση. Με τον πυκνωτή, η τερματική τιμή της τάσης στη μηχανή αυξάνεται στα 0.9315 pu.



Σχήμα 3.14 Μεταβολή των τάσεων (V_t και V_r) και της ισχύος φορτίου P για ξαφνική απώλεια γραμμής με αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε χρόνο t=6sec



Σχήμα 3.15 Τοπολογία του σημείου λειτουργίας για απώλεια μίας γραμμής με αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε χρόνο t=6sec

Η εξάρτηση της τάσης και της ισχύος της μηχανής δείχνεται στο σχήμα 3.15, όπου η μηχανή αρχικά λειτουργούσε στο σημείο 'a' (η P_{ag} είναι 0.8 pu και η V_r 0.89 pu). Με την αποκοπή της γραμμής, το σημείο λειτουργίας της μηχανής ακολουθά τη διαδρομή 'a-b-c' όπως περιγράφεται για το σχήμα 3.13. Με την προσθήκη του πυκνωτή, το σημείο λειτουργίας ξαφνικά πηγαίνει από το σημείο 'c' στο σημείο 'g' (P_{ag}=0.864 pu, V_r=0.787 pu) κατά μήκος της χαρακτηριστικής P-V (με σταθερή ολίσθηση). Όμως, στο σημείο 'g', η παραγόμενη ισχύς από τη μηχανή είναι μεγαλύτερη από το φορτίο και κατ' επέκταση η μηχανή επιταχύνεται και το σημείο λειτουργίας καταλήγει στο 'h' (P_{ag}=0.8pu, V_r=0.835pu) κατά μήκος της P-V καμπύλης

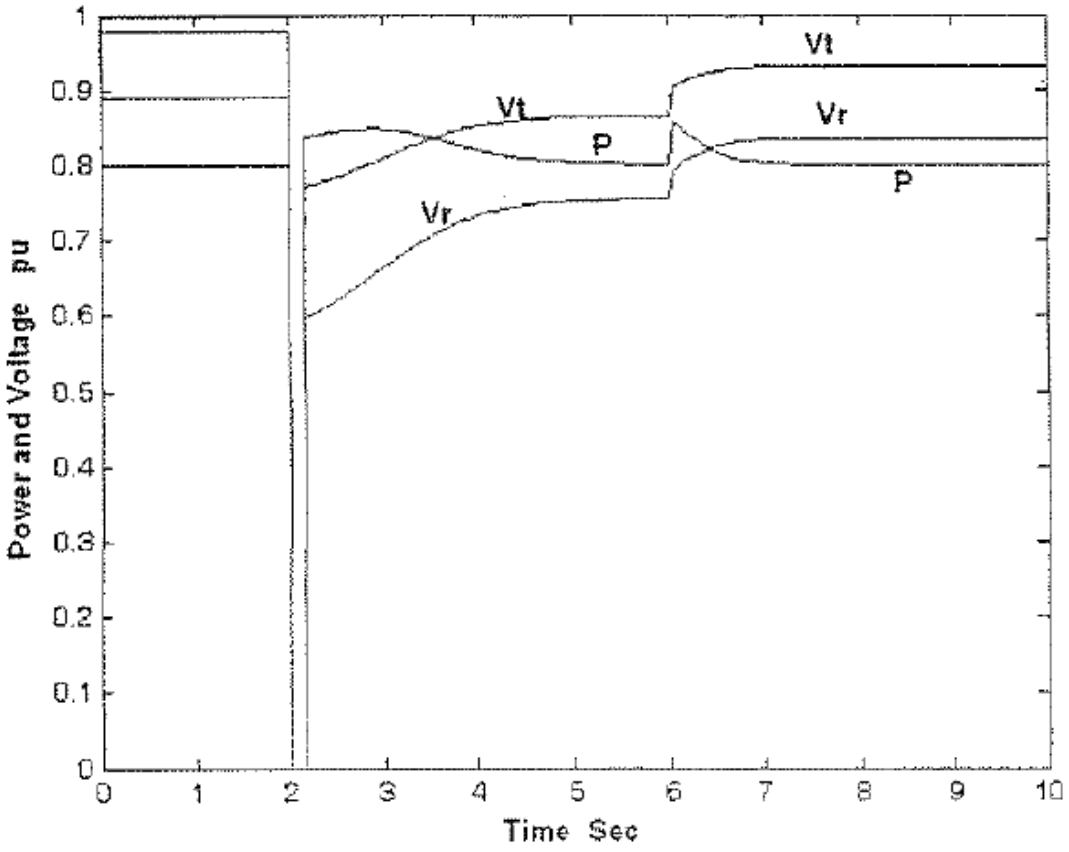
(συμπεριλαμβανομένου του πυκνωτή) προκειμένου να ανακτηθεί η αρχική ισχύς.

3.4.2 Απόκριση συστήματος σε τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό A

Ας θεωρήσουμε ότι ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα εμφανίζεται κοντά στα άκρα του κινητήρα στα 2 sec, το οποίο καθαρίζει με το άνοιγμα της μιας γραμμής στα 2.15 sec. Το διάγραμμα 3.16 παρουσιάζει τη χρονική απόκριση των V_t, V_r και P_{ag} και όπως φαίνεται τόσο η τάση όσο και η ισχύς της μηχανής μηδενίζονται κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος και ως εκ τούτου η μηχανή επιβραδύνεται. Εντούτοις, με την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος, η τερματική τάση και η ισχύς αυξάνονται σε 0.77 pu και 0.835 pu, αντίστοιχα, προτού ο κινητήρας φτάσει την προσφαλματική τιμή της ισχύος (0.8 pu) στα 5.5 sec. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί στο διάγραμμα 3.16 ότι η τερματική τάση του κινητήρα κατά τη μετασφαλματική περίοδο είναι μόνο 0.865 pu. Για τη βελτίωση της τιμής της τάσης, ένας εγκάρσιος πυκνωτής (0.1875 pu) προστίθεται στα 6 sec, πράγμα που συμβάλλει στην αύξηση της τάσης στα 0.9315 pu.

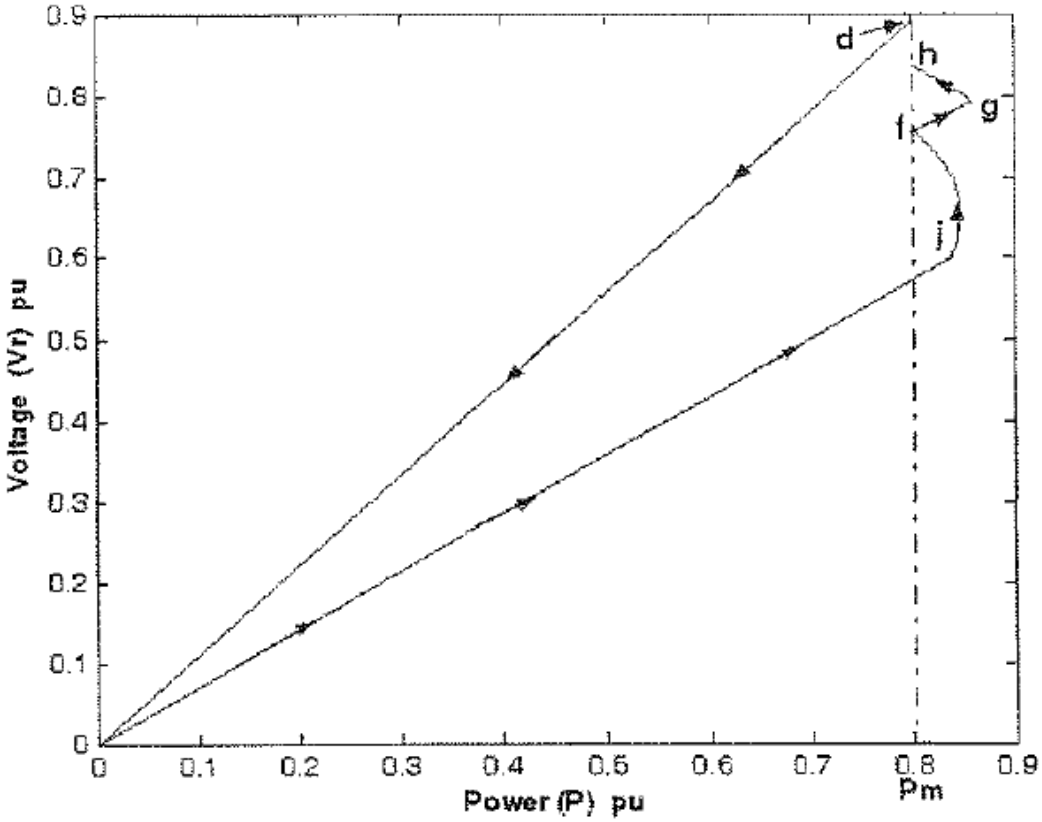
Η μεταβολή της τάσης σε σχέση με την ισχύ της μηχανής για την παραπάνω περίπτωση φαίνεται στο διάγραμμα 3.17. Στην προκειμένη περίπτωση, ο κινητήρας αρχικά λειτουργεί στο σημείο 'd' (P_{ag}=0.8 pu, V_r=0.89 pu). Όταν συμβεί το βραχυκύκλωμα, το σημείο λειτουργίας ξαφνικά πηγαίνει στο μηδέν. Με την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος, το σημείο λειτουργίας της μηχανής πηγαίνει στο σημείο 'j' (P_{ag}=0.835 pu, V_r=0.597 pu) όπου η παραγόμενη ισχύς της μηχανής είναι περισσότερη από το φορτίο. Η ολίσθηση του κινητήρα σταδιακά μειώνεται και το σημείο λειτουργίας κινείται κατά μήκος του μονοπατιού 'j-f' (πάνω στη μετασφαλματική καμπύλη P-V), όσο διαρκεί η

διαδικασία ανάκτησης της ισχύος, έως ότου φτάσει την ίδια ισχύ στο σημείο 'f' (P_{ag} =0.8 pu, V_r =0.755 pu).

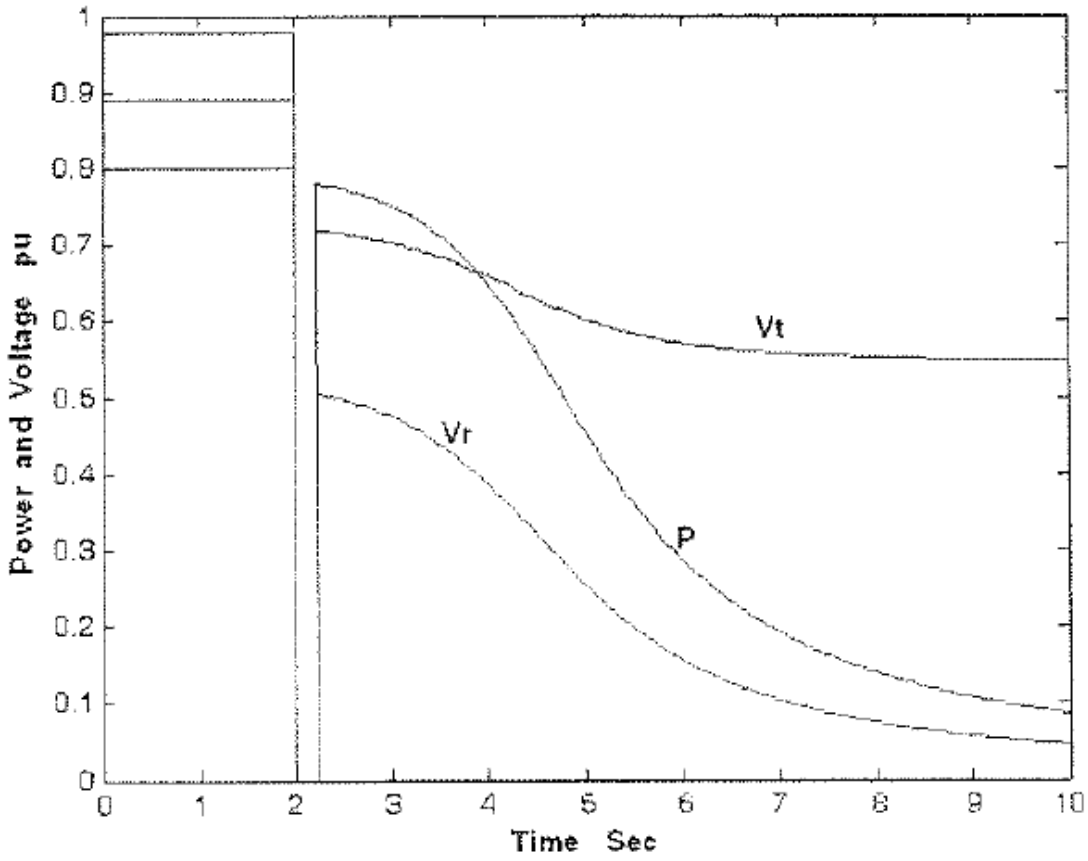


Σχήμα 3.16 Μεταβολή των τάσεων (V_t και V_r) και της ισχύος φορτίου P για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε χρόνο t=2sec και χρόνο εκκαθάρισης σε χρόνο t=2.15sec με αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε χρόνο t=6sec.

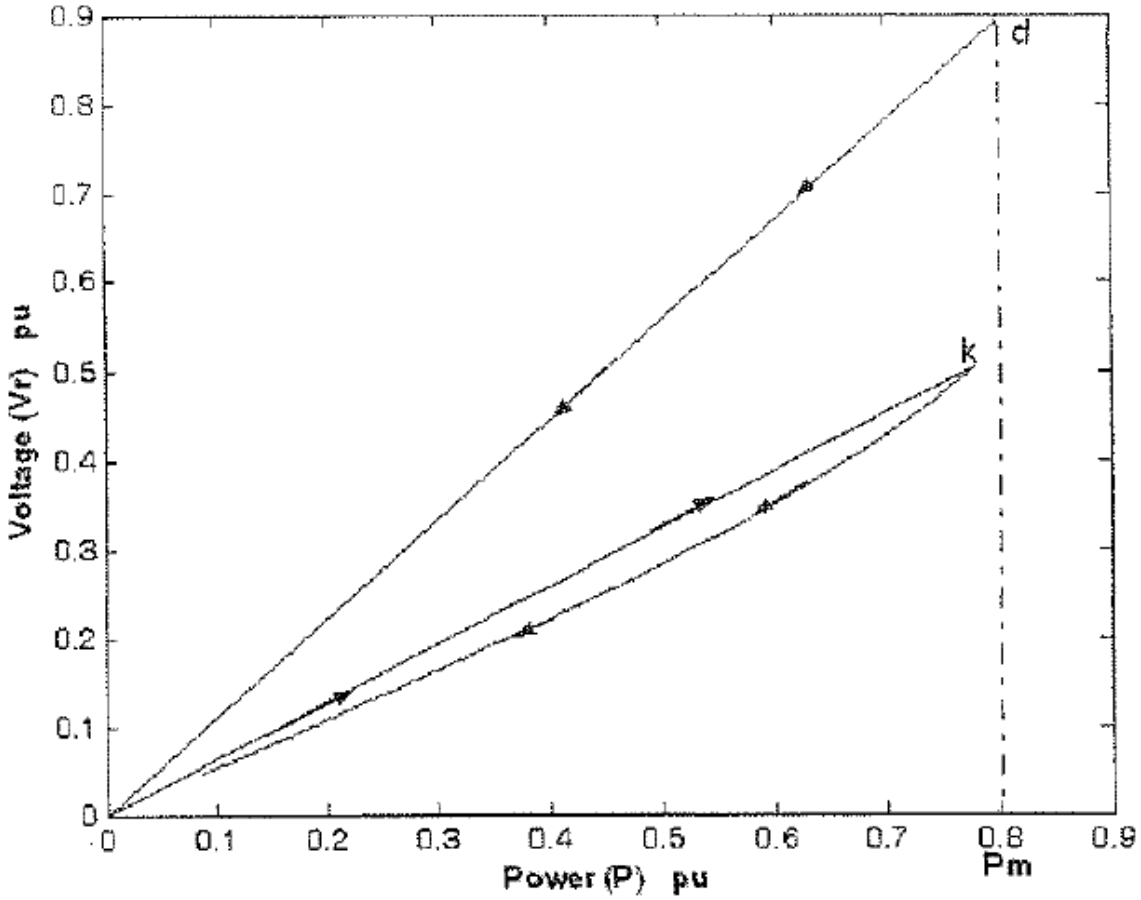
Με την προσθήκη του πυκνωτή, το σημείο λειτουργίας ξαφνικά πηγαίνει από το σημείο 'f' στο σημείο 'g'(P_{ag} =0.864 pu, V_r =0.787 pu). Σε αυτό το σημείο, η παραγόμενη ισχύς είναι και πάλι περισσότερη από το φορτίο και άρα, βάσει της εξίσωσης (3.4), το σημείο λειτουργίας θα κινηθεί στο 'h'(P_{ag} =0.8 pu, V_r =0.835 pu) κατά μήκος της χαρακτηριστικής καμπύλης τάσης-ισχύος με πυκνωτή (όπως εξηγήθηκε παραπάνω) προκειμένου να ανακτήσει την αρχική ισχύ.



Σχήμα 3.17 Τοπολογία του σημείου λειτουργίας P για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε χρόνο t=2sec και χρόνο εκκαθάρισης σε χρόνο t=2.15sec με αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε χρόνο t=6sec.



Σχήμα 3.18 Μεταβολή των τάσεων (V_t και V_r) και της ισχύος φορτίου P για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε χρόνο t=2sec και χρόνο εκκαθάρισης σε χρόνο t=2.25sec



Σχήμα 3.19 Τοπολογία του σημείου λειτουργίας για τριφασικό βραχυκύκλωμα σε χρόνο t=2sec και χρόνο εκκαθάρισης σε χρόνο t=2.25sec

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, εάν ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος καθυστερήσει, υπάρχει σοβαρό ενδεχόμενο ο κινητήρας να μη φτάσει σε ένα ευσταθές σημείο λειτουργίας στη μετασφαλματική περίοδο και εν τέλει να σταματήσει. Το διάγραμμα 3.18 δείχνει τη χρονική απόκριση της τάσης και της ισχύος της μηχανής όταν η εκκαθάριση του σφάλματος επιτυγχάνεται στα 2.25 sec. Σε αυτήν την περίπτωση, η ισχύς του κινητήρα αυξήθηκε στα 0.779 pu με την εκκαθάριση του σφάλματος αλλά και πάλι είναι μικρότερη από την ισχύ του φορτίου που είναι ίση με 0.8 pu. Έτσι, η μηχανή επιβραδύνεται στη μετασφαλματική περίοδο και τελικά παύει να λειτουργεί. Η πορεία του σημείου λειτουργίας για την παραπάνω περίπτωση σφάλματος φαίνεται στο διάγραμμα

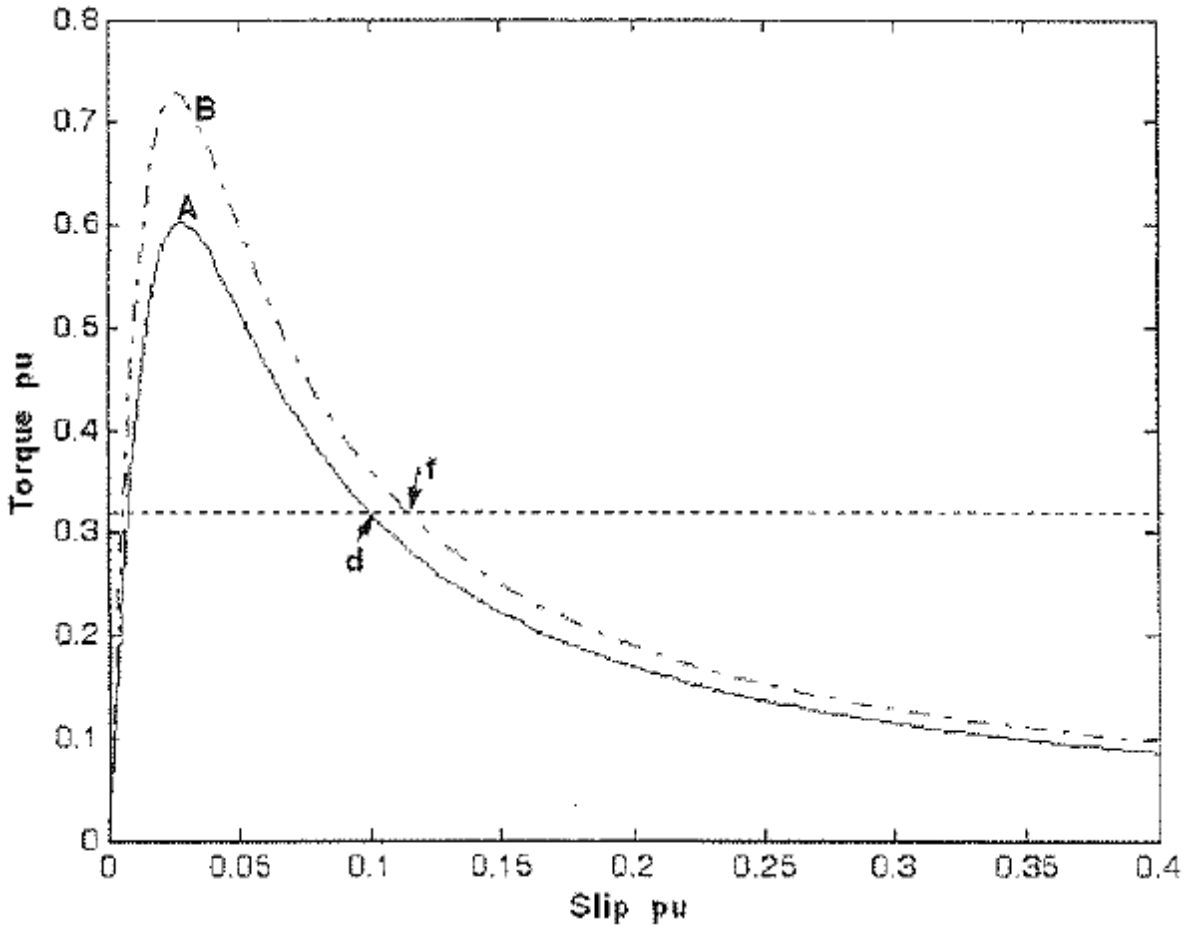
3.19 και διαπιστώνουμε ότι η μηχανή εν τέλει πλησιάζει το αρχικό σημείο λειτουργίας.

3.4.3 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος

Οι χαρακτηριστικές ροπής-ολίσθησης του κινητήρα με και χωρίς χωρητική συμβολή (0.3125 pu) στα άκρα της μηχανής παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3.20 με τις καμπύλες Β και Α, αντίστοιχα. Η μέγιστη τιμή της ροπής για περιπτώσεις με ή χωρίς χωρητική συμβολή είναι 0.727 pu και 0.603 pu, αντίστοιχα. Η διακεκομμένη οριζόντια γραμμή στο διάγραμμα 3.20 αναπαριστά τη μόνιμη ροπή φορτίου (0.4 pu) στη μηχανή.

Όπως εξηγήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, οι πίνακες 3.1 και 3.2 περιέχουν την τιμή του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης t_{cr} ,την προσφαλματική ολίσθηση ευστάθειας και μετασφαλματική ολίσθηση αστάθειας για διάφορες τιμές της ροπής φορτίου. Από τον πίνακα 3.1 μπορεί να παρατηρηθεί ότι, για μία σταθερή ροπή φορτίου (0.4 pu), η προσφαλματική σταθερή ολίσθηση, η μετασφαλματική ασταθής ολίσθηση και ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης t_{cr} είναι 0.0084954 pu, 0.074783 pu και 0.16572 sec αντίστοιχα. Για ευσταθή λειτουργία της μηχανής, με ροπή φορτίου ίση με 0.4 pu, το σφάλμα θα έπρεπε να καθαρίσει πριν η ολίσθηση φτάσει τα 0.074783 pu (σημείο 'd' στο διάγραμμα 3.20). Διαφορετικά, ο κινητήρας συνεχίζει να επιβραδύνει και να αυξάνει περαιτέρω την ολίσθησή του έως ότου παύσει να λειτουργεί. Από τον πίνακα 3.1 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η μετασφαλματική ολίσθηση αστάθειας και ο t_{cr} για ροπή φορτίου ίση με 0.65 pu παίρνουν μη πρακτικές τιμές, αφού η μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ροπή της μηχανής είναι 0.603 pu, τιμή μικρότερη από τη μηχανική ροπή της μηχανής (0.65 pu). Διαπιστώνουμε ότι δεν υπάρχει σημείο τομής μεταξύ της χαρακτηριστικής

ροπής-ολίσθησης του κινητήρα και της ροπής του φορτίου T_m και άρα η μηχανή δε θα μπορούσε να λειτουργήσει.



Σχήμα 3.20 Χαρακτηριστικές ροπής ολίσθησης του επαγωγικού κινητήρα, Α: με μία γραμμή, Β: με μία γραμμή και πυκνωτή στα άκρα της μηχανής

Ο πίνακας 3.2 παρουσιάζει την αύξηση στο t_{cr} με τη χωρητική αντιστάθμιση αέργου ισχύος των 0.3125 pu στα άκρα της μηχανής. Σε αυτήν την περίπτωση η μηχανή μπορούσε να λειτουργεί για τιμές ροπής του φορτίου έως και 0.727 pu, τιμή μεγαλύτερη από την αντίστοιχη περίπτωση χωρίς τη χωρητική υποστήριξη. Από τους πίνακες 3.1 και 3.2, μπορεί κανείς εύκολα να διαπιστώσει την αύξηση του εύρους των t_{cr} και της μετασφαλματικής ολίσθησης αστάθειας με τη χωρητική υποστήριξη.

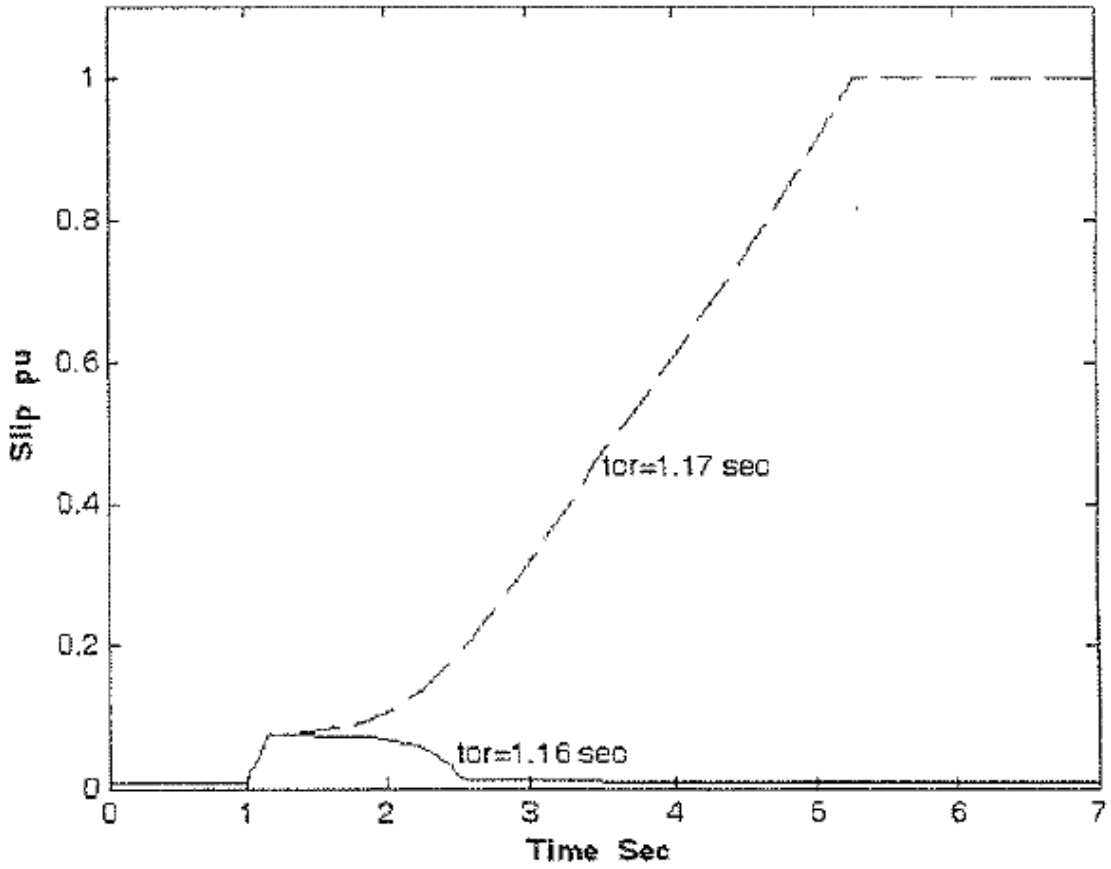
Ροπή φορτίου (pu)	**Προσφαλματική ολίσθηση ευστάθειας (pu)**	**Μετασφαλματική ολίσθηση αστάθειας (pu)**	**Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος t_{cr} (sec)**
0.1	0.0019941	0.34441	3.4242
0.2	0.0040451	0.16771	0.81834
0.3	0.0061941	0.10697	0.33592
0.4	0.0084954	0.074783	0.16572
0.5	0.011028	0.053097	0.084138
0.6	0.013924	0.031102	0.02863
0.65	0.0156	0.0258 – 0.0106i	0.0158 – 0.0162i

Πίνακας 3.1 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος t_{cr}

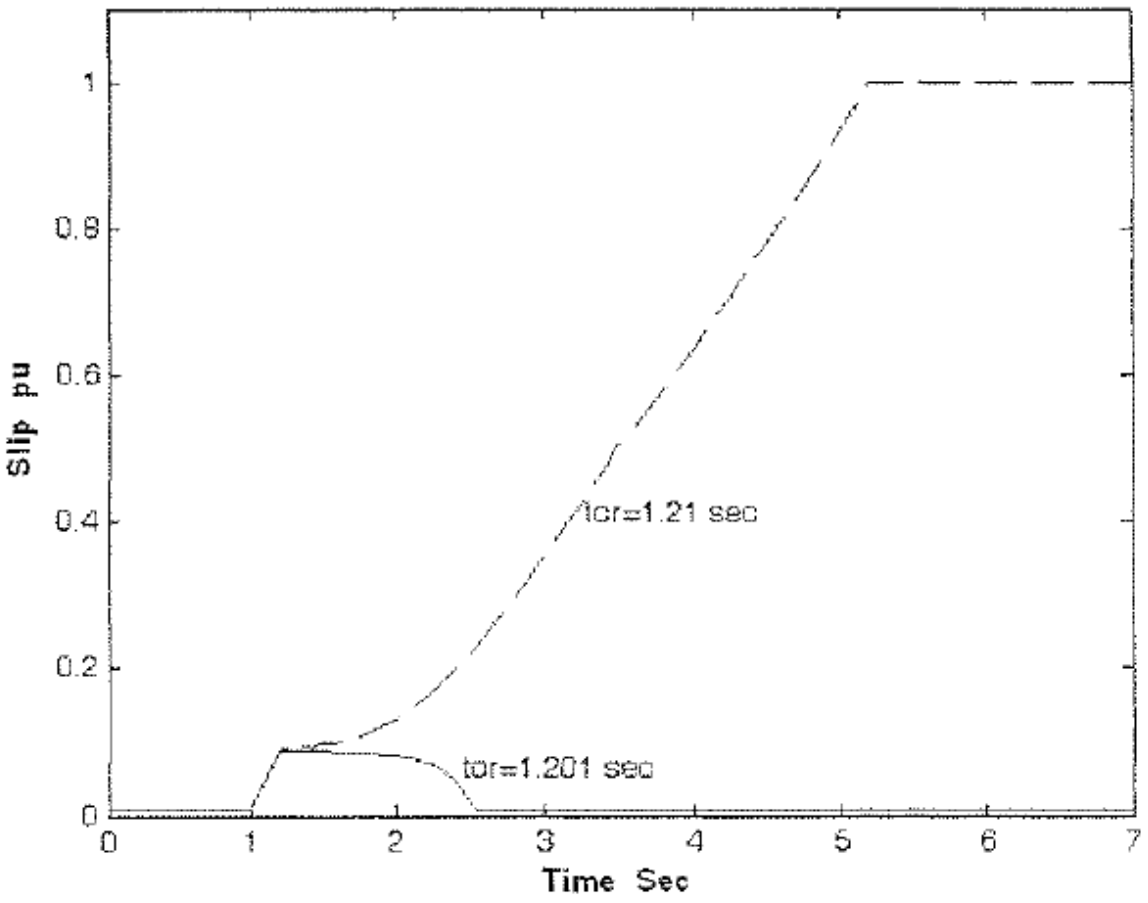
Ροπή φορτίου (pu)	**Προσφαλματική ολίσθηση ευστάθειας (pu)**	**Μετασφαλματική ολίσθηση αστάθειας (pu)**	**Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος t_{cr} (sec)**
0.1	0.0017415	0.3851	3.8335
0.2	0.003524	0.18907	0.92772
0.3	0.0053756	0.1224	0.39008
0.4	0.0073312	0.087881	0.20137
0.5	0.0094387	0.065923	0.11297
0.6	0.011769	0.049649	0.063133
0.7	0.014442	0.034465	0.028605
0.75	0.0160	0.0251 – 0.0063i	0.0122 – 0.0084i

Πίνακας 3.2 Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος t_{cr} με χωρητική αντιστάθμιση

Τα διαγράμματα 3.21 και 3.22 δείχνουν τη μεταβολή της ολίσθησης συναρτήσει του χρόνου για τις περιπτώσεις χωρίς και με χωρητική συμβολή, αντίστοιχα. Από τον πίνακα 3.1 μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο t_{cr} για ροπή φορτίου 0.4 pu είναι 0.16572 sec. Υποθέτουμε ότι το σφάλμα παρουσιάζεται μετά από χρόνο t=1 sec. Όταν λαμβάνει χώρα η εκκαθάριση του σφάλματος μέσα σε 1.16572 sec, η ολίσθηση του κινητήρα αρχικά αυξάνεται ελαφρά και έπειτα ελαττώνεται στη φυσιολογική σταθερή τιμή της, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.21 (συμπαγής γραμμή). Στην περίπτωση που το σφάλμα καθαρίζει μετά από 1.16572 sec (π.χ. εμείς θεωρούμε 1.7 sec) η ολίσθηση του κινητήρα αυξάνει μονότονα και η μηχανή σταματά, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.21 (διακεκομμένη γραμμή). Με την προσθήκη χωρητικής αντιστάθμισης (0.3125 pu) στα άκρα της μηχανής, η τιμή του t_{cr}, για την ίδια ροπή φορτίου (0.4 pu), αυξάνεται από 0.16572 sec σε 0.20137 sec. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο διάγραμμα 3.22, όπου η συμπαγής και η διακεκομμένη γραμμή δείχνουν τη μεταβολή της ολίσθησης συναρτήσει του χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος για 1.201 sec και 1.21 sec αντίστοιχα.



Σχήμα 3.21 Μεταβολή της ολίσθησης συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 3.22 Μεταβολή της ολίσθησης συναρτήσει του χρόνου με χωρητική αντιστάθμιση

Κεφάλαιο 4 Μελέτη ευστάθειας τάσης στη μόνιμη κατάσταση

4.1 Εισαγωγή

Η **ευστάθεια τάσης** (Voltage stability) αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτές τιμές τάσης σε όλους τους ζυγούς του, κάτω από συνθήκες κανονικής λειτουργίας και έπειτα από μια διαταραχή. Η αστάθεια εμφανίζεται υπό μορφή μιας σταδιακής πτώσης ή αύξησης της τάσης σε κάποιους ζυγούς. Η αστάθεια ή η κατάρρευση τάσης μπορεί να προκύψει είτε από μια ξαφνική αύξηση της ζήτησης ή από την εμφάνιση μιας διαταραχής όπως απώλεια μονάδας ή γραμμής μεταφοράς, καθώς και από σφάλματα, όπως βραχυκυκλώματα στη γραμμή. Ο κύριος παράγοντας που προκαλεί αστάθεια τάσης είναι η ανικανότητα του συστήματος ισχύος να διατηρεί ένα σωστό ισοζύγιο της αέργου ισχύος.

Γενικά, παρόλο που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, η αστάθεια τάσης σχετίζεται με τις απαιτήσεις των φορτίων σε άεργο ισχύ οι οποίες δεν ικανοποιούνται λόγω περιορισμών στην παραγωγή και διανομή αέργου ισχύος.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η στατική προσέγγιση του φαινομένου της ευστάθειας τάσης. Εδώ, προκειμένου να αναλυθεί το πρόβλημα της αστάθειας τάσης, χρησιμοποιείται το μοντέλο μόνιμης κατάστασης των στοιχείων του συστήματος. Η στατική προσέγγιση του προβλήματος είναι σημαντική κυρίως στο στάδιο του σχεδιασμού.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες βασίζονται στην χρήση της Ιακωβιανής μήτρας του συστήματος. Αυτές οι μέθοδοι είναι χρονοβόρες και επίσης έχουν μεγάλο υπολογιστικό φόρτο.

Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες μέθοδοι βασιζόμενες σε φάσορες, οι οποίες συναντώνται στην βιβλιογραφία και υποδεικνύουν ότι οι τοπικές ποσότητες, φάσορες τάσης και ρεύματος, περιέχουν αρκετές πληροφορίες για την αναγνώριση των περιοχών εκείνων, στις οποίες είναι δυνατόν να εμφανιστεί αστάθεια τάσης. Με βάση όλα τα παραπάνω, δίνεται το κίνητρο της πρότασης μίας μεθόδου η οποία έχει πολύ λιγότερο υπολογιστικό φόρτο ενώ παρέχει περισσότερες πληροφορίες στον χειριστή του συστήματος.

Γενικά, η αστάθεια τάσης σχετίζεται με την έλλειψη αέργου ισχύος για την διατήρηση της τιμής τάσης σε σταθερά επίπεδα. Γι' αυτό το λόγο, είναι πολύ σημαντική η αναγνώριση του πιο αδύναμου τμήματος ενός ΣΗΕ στο στάδιο σχεδιασμού, προκειμένου να καθορισθεί η απαραίτητη αντιστάθμιση αέργου ισχύος για την αποφυγή της κατάρρευσης τάσης.

Στις επόμενες ενότητες ακολουθεί μία θεωρητική και μαθηματική προσέγγιση στη μελέτη ανάλυσης ροής φορτίου, στις μεθόδους Gauss – Seidel και Newton – Raphson και τέλος προτείνεται μεθοδολογία, χρησιμοποιώντας τα παραπάνω εργαλεία, για την αναγνώριση του κρίσιμου μονοπατιού, γραμμής και ζυγού του συστήματος όπου είναι πιθανό να εμφανιστεί αστάθεια τάσης.

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται μία νέα μέθοδος για τον υπολογισμό του δείκτη στατικής ευστάθειας τάσης ενός συστήματος ισχύος, η οποία βασίζεται στις πληροφορίες για τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, οι τιμές των οποίων δίνονται από τη μελέτη ροής φορτίου. Η μέθοδος επικεντρώνεται κυρίως στον καθορισμό του κρίσιμου μονοπατιού ροής ισχύος και πιο συγκεκριμένα στην αναγνώριση του κρίσιμου ζυγού και της κρίσιμης γραμμής του συστήματος.

4.2 Μελέτη Ροής Φορτίου

Οι μελέτες ανάλυσης ισχύος, ευρύτερα γνωστές σαν ανάλυση ροής φορτίου – μελέτη ροής φορτίου, αποτελούν ένα βασικό τομέα της ανάλυσης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό, τον οικονομικό προγραμματισμό και τον έλεγχο ενός υπάρχοντος συστήματος αλλά και για τον σχεδιασμό μίας μελλοντικής επέκτασής του. Η μελέτη ροής φορτίου στα ΣΗΕ, αν ορισθεί ως μαθηματικό πρόβλημα, συνίσταται στην εύρεση της λύσης που προσδιορίζει τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του ΣΗΕ. Αυτό σημαίνει υπολογισμό των μεταβλητών μόνιμης κατάστασης του ΣΗΕ, όπου μεταβλητές κατάστασης είναι το ελάχιστο πλήθος των μεταβλητών του ΣΗΕ από τις οποίες είναι δυνατόν να υπολογιστούν όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές του (με γνωστές τις εξισώσεις που περιγράφουν το ΣΗΕ στην μόνιμη κατάσταση). Αν ένα ΣΗΕ έχει n κόμβους (ζυγούς) τότε αυτό χαρακτηρίζεται συνολικά από $4n$ μεταβλητές, καθώς με κάθε ζυγό i σχετίζονται 4 μεταβλητές (4 μεγέθη), που είναι οι παραγωγές πραγματικής και αέργου ισχύος P_{Gi} και Q_{Gi} και το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης του ζυγού $|V_i|$ και δ_i. Από αυτές, οι μεταβλητές κατάστασης είναι $2n$, δηλαδή το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης σε κάθε ζυγό. Στο ίδιο δίκτυο, το πλήθος των εξισώσεων που μπορούν να γραφούν και συνδέουν τις $4n$ μεταβλητές του είναι $2n$ (μία εξίσωση που δίνει το ισοζύγιο πραγματικής ισχύος σε κάθε ζυγό και μία που δίνει το ισοζύγιο αέργου ισχύος). Με βάση τα προηγούμενα δεδομένα, το μαθηματικό πρόβλημα της ανάλυσης ροής φορτίου δέχεται άπειρες λύσεις, επειδή μπορούμε να επιλέξουμε αυθαίρετα τις τιμές των $2n$ μεταβλητών και να υπολογίσουμε τις υπόλοιπες $2n$ μεταβλητές από τις εξισώσεις του ΣΗΕ.

Ωστόσο τα ΣΗΕ κατά τη λειτουργία τους στη μόνιμη κατάσταση πρέπει να πληρούν αυστηρές προδιαγραφές και περιορισμούς, για παράδειγμα οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς πρέπει να είναι περίπου ίσες με τις ονομαστικές (με απόκλιση που δε πρέπει να ξεπερνά ορισμένα όρια), η μέγιστη παραγωγή

πραγματικής και αέργου ισχύος των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι συγκεκριμένη, όπως καθορισμένη είναι και η ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας των γραμμών. Με βάση τους προηγούμενους περιορισμούς και τη γνώση της πρόβλεψης φορτίου που αναμένεται να αντιμετωπίσει το ΣΗΕ σε κάποια μελλοντική ώρα, είναι εξαιρετικά σημαντική η επιλογή της παραγωγής πραγματικής ισχύος και των μέτρων τάσεων σε όλους τους σταθμούς παραγωγής, ώστε τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή το ΣΗΕ να οδηγηθεί σε μία κατάσταση λειτουργίας που θα ικανοποιεί όλες τις προδιαγραφές και τους περιορισμούς.

Συνεπώς, σύμφωνα με τη μαθηματική ανάλυση του προβλήματος ροής φορτίου έχουμε άπειρες λύσεις, είναι όμως αναγκαία η επιλογή αυτών που είναι πρακτικά αποδεκτές, δηλαδή αυτές που πληρούν τους όρους και τις προδιαγραφές του ΣΗΕ. Τις περισσότερες φορές αυτές προσδιορίζονται σε μία μοναδική λύση, επειδή απαιτείται να πληρούνται και επιπρόσθετα κριτήρια π.χ. το σύστημα να λειτουργεί με ελάχιστο κόστος καυσίμων.

Σε αυτό το πλαίσιο, και με βάση τα παραπάνω, η ανάλυση ροής φορτίου είναι το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιείται:

- Όταν σχεδιάζονται μεταβολές ή μελλοντικές επεκτάσεις σε ένα υπάρχον σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ανάπτυξη νέων μονάδων παραγωγής, τροφοδοσία νέων φορτίων, όδευση νέων γραμμών μεταφοράς, διασύνδεση με άλλα γειτονικά ΣΗΕ. Δηλαδή, πριν από την αποδοχή οποιασδήποτε τροποποίησης του ΣΗΕ, με τη βοήθεια της ανάλυσης ροής φορτίου μελετούμε τις επιπτώσεις που αυτή θα έχει στη λειτουργία του συστήματος και συγκρίνουμε τα τεχνικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφορετικών λύσεων, ώστε να συγκρίνουμε την καλύτερη λύση.
- Για τον προσδιορισμό της αρχικής κατάστασης λειτουργίας συστήματος, πληροφορία που είναι απαραίτητη για την εκτέλεση άλλων μελετών. Έτσι, πριν από τη μελέτη για τον προσδιορισμό της επίδρασης διαφόρων

διαταραχών στη λειτουργία του συστήματος (π.χ. βραχυκυκλώματα, μεταβολές φορτίων και παραγωγών, κ.λ.π.) προηγείται η ανάλυση ροής φορτίου, ώστε να προσδιοριστεί η κατάσταση λειτουργίας του συστήματος πριν από τη διαταραχή.

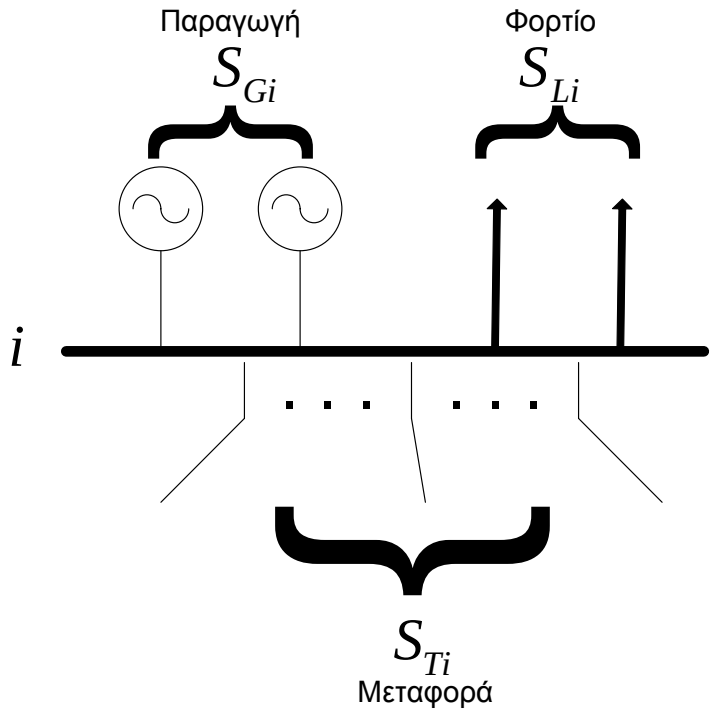
- Για την οργάνωση του ημερήσιου προγραμματισμού λειτουργίας του ΣΗΕ. Καθώς το φορτίο του ΣΗΕ μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας ή από μέρα σε μέρα, ο διαχειριστής (dispatcher) του συστήματος πρέπει να γνωρίζει από ποιους ηλεκτρικούς σταθμούς θα τροφοδοτήσει το επιπλέον φορτίο, ώστε να επιτύχει την ελάχιστη διακύμανση των τάσεων από τις ονομαστικές τους τιμές και την πιο οικονομική λειτουργία.
- Για τον προσδιορισμό των καλύτερων χειρισμών που πρέπει να γίνουν στην περίπτωση απώλειας ενός ή περισσότερων σημαντικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή γραμμών μεταφοράς (γνωστή και ως μελέτη ανάλυσης ενδεχόμενων επικίνδυνων διαταραχών "contingency analysis" του ΣΗΕ).

4.3 Στατικές Εξισώσεις Ροής Φορτίου – Γενική Θεώρηση

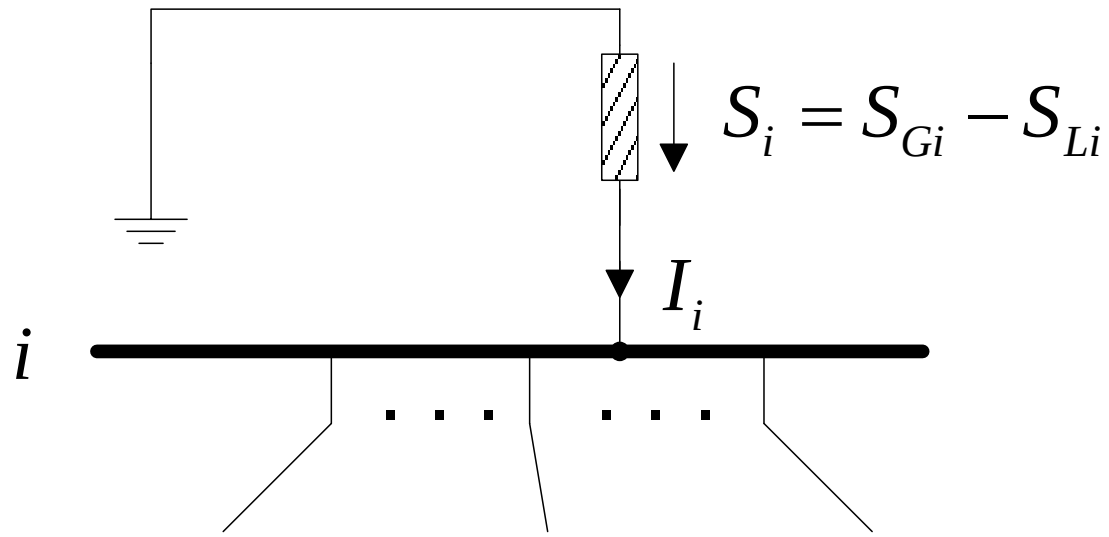
Επειδή τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι στη μόνιμη κατάσταση συνήθως ισοζυγισμένα, στην ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιούμε το μονοφασικό τους ισοδύναμο. Οι ποσότητες λοιπόν που εμπλέκονται στους υπολογισμούς είναι ποσότητες ανά φάση.

Θεωρούμε το ζυγό i ενός συστήματος n ζυγών. Γενικά σε αυτό το ζυγό συνδέονται, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, γεννήτριες που τροφοδοτούν μιγαδική ισχύ S_{Gi}, φορτία που καταναλώνουν μιγαδική ισχύ S_{Li}, και γραμμές μεταφοράς που μεταφέρουν εκτός του ζυγού μιγαδική ισχύ S_{Ti}. Οι ισχείς αυτές συνδέονται με τη σχέση

$$S_{Gi} = S_{Li} + S_{Ti} \quad \textbf{(4.1)}$$



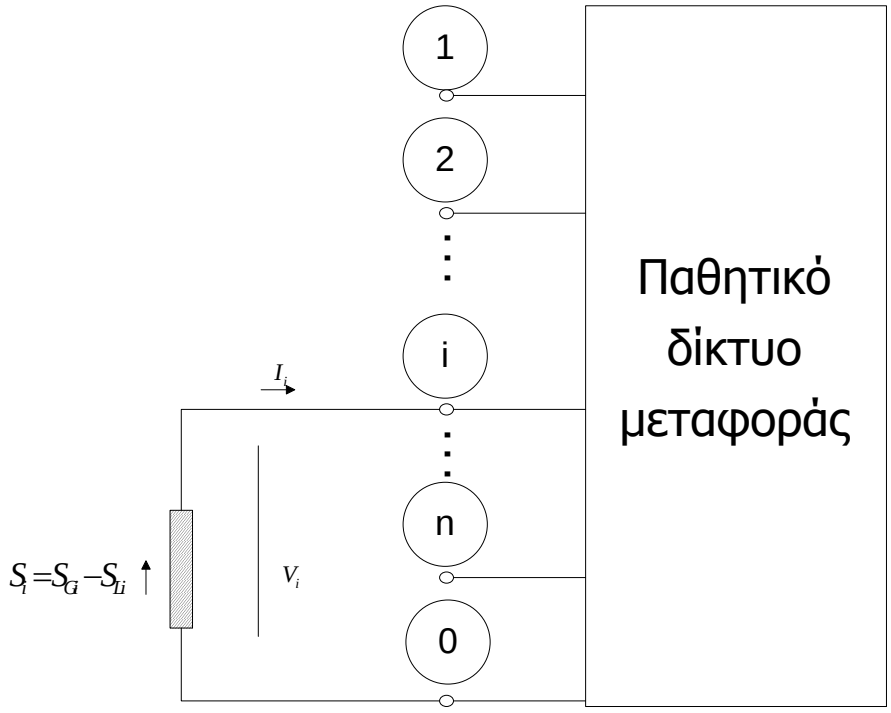
Σχήμα 4.1 Γενική μορφή ζυγού



Σχήμα 4.2 Αντικατάσταση παραγωγής και κατανάλωσης με ισοδύναμη πηγή ισχύος

Οι υπολογισμοί ροής φορτίου γίνονται για συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης του δικτύου. Το φορτίο S_{Li}, συνεπώς, που συνδέεται σε κάθε ζυγό i είναι γνωστό. Η παραγωγή S_{Gi} εξάλλου, δίνεται απ' ευθείας σε MW και MVar και δεν υπάρχει πρόβλημα στην έκφρασή της. Η μεταφερόμενη, όμως, εκτός του ζυγού ισχύς S_{Ti} δεν μπορεί να εκφραστεί άμεσα διότι για τον προσδιορισμό της απαιτείται η γνώση των τάσεων ζυγών.

Ορίζοντας τη διαφορά μεταξύ των ζυγών παραγωγής και φορτίου $S_{Gi} - S_{Li} = S_i$ ως την καθαρή ισχύ που χύνεται στο ζυγό i και θεωρώντας ότι αυτή παρέχεται από ισοδύναμη πηγή ισχύος, ο ζυγός μπορεί να παρασταθεί ισοδύναμα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Με βάση αυτή την παράσταση το παθητικό τμήμα του συστήματος των n ζυγών, δηλαδή, του δικτύου (γραμμές μεταφοράς και μετασχηματιστές) παρίσταται με σύστημα n ακροδεκτών, που αντιστοιχούν στους ζυγούς, σε κάθε ένα από τους οποίους γίνεται έγχυση ρεύματος I_i που αντιστοιχεί στην ισχύ $S_{Gi} - S_{Li} = S_i$.



Σχήμα 4.3 Παράσταση συστήματος n ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των κόμβων, οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του παραπάνω δικτύου γράφονται ως εξής:

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad \textbf{(4.2)}$$

Όπου:

I_{bus} : το διάνυσμα των ρευμάτων I_i που εισέρχονται στους ζυγούς διαστάσεων $n \times 1$.

V_{bus} :το διάνυσμα των τάσεων ζυγών που μετρούνται ως προς το ζυγό αναφοράς, διαστάσεων $n \times 1$, με στοιχεία της μορφής $V_i = |V_i| \angle \delta_i$.

Y_{bus} : ο πίνακας αγωγιμοτήτων ζυγών, διαστάσεων $n \times n$, με στοιχεία της μορφής $y_{ij} = |y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$.

Ως ζυγός αναφοράς για το σχηματισμό του Y_{bus} λαμβάνεται η γη, οπότε κατά την κατασκευή της λαμβάνοντας υπ' όψιν και τα εγκάρσια στοιχεία που συνδέονται προς τη γη, όπως στατικοί πυκνωτές και εγκάρσιοι κλάδοι των ισοδύναμων κυκλωμάτων των μετασχηματιστών και των γραμμών.

Από την εξίσωση (4.2) διαπιστώνουμε ότι το ρεύμα I_i που εισέρχεται στο ζυγό i μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των στοιχείων του πίνακα Y_{bus} και των τάσεων ζυγών ως εξής:

$$I_i = \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j \quad \textbf{(4.3)}$$

Η ισχύς S_{Ti} συνεπώς προκύπτει

$$S_{Ti} = V_i I_i^* = V_i \left(\sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j \right) \quad \textbf{(4.4)}$$

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η ισχύς S_{Ti} μπορεί να αντικατασταθεί μέσω της εξίσωσης (4.4) με τις τάσεις V_i. Η εξίσωση (4.4) δείχνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος ροής φορτίου, αφού η ισχύς S_{Ti} που μεταφέρεται εκτός του ζυγού i είναι συνάρτηση των τάσεων όλων των άλλων ζυγών του συστήματος.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την εξίσωση (4.4), η εξίσωση (4.1) γίνεται

$$S_{Gi} - S_{Li} = V_i \left(\sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j \right) \quad \textbf{(4.5)}$$

Αν λάβουμε τις συζυγείς παραστάσεις αμφοτέρων των μελών και θέσουμε $S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$ και $S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$ η σχέση (4.5) γίνεται

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left(\sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j \right) \textbf{(4.6)}$$

Όπου $P_i = P_{Gi} - P_{Li}$ και $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$.

Εξισώσεις της μορφής (4.6) μπορούν να γραφτούν για όλους τους ζυγούς του δικτύου. Οι εξισώσεις αυτές εκφράζουν το ισοζύγιο μιγαδικής ισχύος σε κάθε ζυγό του δικτύου. Ονομάζονται στατικές εξισώσεις ροής φορτίου (ΣΕΡΦ) υπό μιγαδική μορφή.

Χρησιμοποιώντας πολικές συντεταγμένες για τις τάσεις και τις αγωγιμότητες, δηλαδή $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ και $y_{ij} = |y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$, οι μιγαδικές εξισώσεις (4.6) μπορούν να διασπαστούν εξισώνοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, σε $2n$ πραγματικές εξισώσεις ως εξής:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||y_{ij}| \cos\left(\delta_j - \delta_\iota + \gamma_{ij}\right) \textbf{(4.7)}$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = -\sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||y_{ij}| \cos\left(\delta_j - \delta_\iota + \gamma_{ij}\right) \textbf{(4.8)}$$

Οι εξισώσεις (4.7) και (4.8) εκφράζουν το ισοζύγιο πραγματικής και αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό του δικτύου. Αναφέρονται και ως στατικές εξισώσεις ροής φορτίου υπό πραγματική μορφή.

4.4 Τεχνικές επίλυσης προβλήματος ροών φορτίου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αν ένα ΣΗΕ έχει n κόμβους (ζυγούς) τότε αυτό χαρακτηρίζεται συνολικά από $4n$ μεταβλητές, καθώς με κάθε ζυγό i σχετίζονται 4 μεταβλητές (4 μεγέθη), που είναι οι παραγωγές πραγματικής και αέργου ισχύος P_{Gi} και Q_{Gi} και το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης του ζυγού $|V_i|$ και δ_i. Από αυτές, οι μεταβλητές κατάστασης είναι $2n$, δηλαδή το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης σε κάθε ζυγό. Στο ίδιο δίκτυο, το πλήθος των εξισώσεων που μπορούν να γραφούν και συνδέουν τις $4n$ μεταβλητές του είναι $2n$ (μία εξίσωση που δίνει το ισοζύγιο πραγματικής ισχύος σε κάθε ζυγό και μία που δίνει το ισοζύγιο αέργου ισχύος). Για να προχωρήσουμε στην επίλυση του συστήματος των $2n$ εξισώσεων θα πρέπει να μειώσουμε τον αριθμό των αγνώστων μεταβλητών που συνδέονται με κάθε ζυγό. Έτσι, προκαθορίζουμε τις τιμές των μεταβλητών τις οποίες μπορούμε να ελέγξουμε. Η επιλογή των μεταβλητών αυτών προκαθορίζεται από το είδος των συσκευών που είναι συνδεδεμένες σε κάθε αντίστοιχο ζυγό.

Ανάλογα με το ποιες ποσότητες από τις τέσσερις (P_{Gi}, Q_{Gi}, $|V_i|$, δ_i) προκαθορίζονται μπορούμε να διακρίνουμε τρεις τύπους ζυγών, ήτοι:

4. ***Ζυγοί φορτίου.*** Είναι οι ζυγοί στους οποίους δεν υπάρχει παραγωγή, οπότε P_{Gi} και Q_{Gi} είναι μηδέν. Στους ζυγούς αυτούς υπάρχουν μόνο φορτία και αυτός είναι και ο λόγος που ονομάζονται ζυγού φορτίου. Ο ζυγός αυτός είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος ζυγού. Περίπου το 85% του συνόλου των ζυγών ενός δικτύου είναι ζυγοί φορτίου. Οι ποσότητες που υπολογίζονται από την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου σε αυτούς τους ζυγούς είναι το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης $|V_i|$ και δ_i.
5. ***Ζυγοί παραγωγής (ζυγοί με ελεγχόμενη τάση).*** Είναι οι ζυγοί στους οποίους ελέγχεται το μέτρο της τάσης $|V_i|$ ώστε να κρατείται σταθερό σε μία προκαθορισμένη τιμή. Συνήθως είναι ζυγοί στους οποίους συνδέονται

γεννήτριες γι' αυτό και ονομάζονται συχνά ζυγοί παραγωγής. Επειδή οι δύο ποσότητες που απ' ευθείας ελέγχονται σε μία γεννήτρια είναι οι παραγόμενη πραγματική ισχύς P_{Gi}, με ρύθμιση της μηχανικής ισχύος στην είσοδο του στροβίλου, και το μέτρο της τάσης $|V_i|$, με ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης, είναι δυνατόν σε αυτούς τους ζυγούς αυτές οι ποσότητες να προκαθοριστούν. Από την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου θα προκύψουν τα Q_{Gi} και δ_i.

6. ***Ζυγός αναφοράς (ζυγός ταλάντωσης).*** Ο ζυγός αυτός είναι ένας ζυγός παραγωγής, τον οποίο όμως αντιμετωπίζουμε με διαφορετικό τρόπο από ότι τους άλλους ζυγούς παραγωγής. Ο ζυγός ταλάντωσης ή ζυγός αναφοράς, χρησιμεύει για να αντισταθμίζει τις άγνωστες αρχικά απώλειες του δικτύου και για την άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Σ' αυτόν το ζυγό επιβάλλουμε σταθερή κατά μέτρο και γωνία τάση.

4.4.1 Μέθοδος Gauss-Seidel

Για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου με τη μέθοδο G-S χρησιμοποιούμε τη μιγαδική μορφή αυτών των εξισώσεων. Για να εφαρμόσουμε τη μέθοδο πρέπει πρώτα να φέρουμε τις n-1 εξισώσεις (4.6), που γράφονται για όλους τους ζυγούς εκτός του ζυγού αναφοράς, στη μορφή των παρακάτω εξισώσεων:

$$\begin{aligned} x_1 &= F_1(x_1, x_2, ..., x_n) \\ x_2 &= F_2(x_1, x_2, ..., x_n) \\ &..... \\ x_n &= F_n(x_1, x_2, ..., x_n) \end{aligned} \quad \textbf{(4.9)}$$

Αυτό γίνεται γράφοντας τις εξισώσεις (4.6) ως εξής:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = y_{ii}V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}V_j \qquad \text{i=2,3,...,n} \quad \textbf{(4.10)}$$

Οπότε

$$V_i = \frac{1}{y_{ii}}\left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{n} y_{ij}V_j\right] \qquad \text{i=2,3,...,n} \quad \textbf{(4.11)}$$

Ο αλγόριθμος Gauss - Seidel διαμορφώνεται, σύμφωνα με τις σχέσεις (4.12) ως εξής:

$$\begin{aligned}
&x_1^{(v+1)} = F_1(x_1^{(v)}, x_2^{(v)}, ..., x_n^{(v)}) \\
&x_2^{(v+1)} = F_2(x_1^{(v+1)}, x_2^{(v)}, ..., x_n^{(v)}) \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&x_i^{(v+1)} = F_i(x_1^{(v+1)}, ..., x_{i-1}^{(v+1)}, x_i^{(v)}, ..., x_n^{(v)}) \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&x_n^{(v+1)} = F_n(x_1^{(v+1)}, x_2^{(v+1)}, ..., x_{n-1}^{(v+1)}, x_n^{(v)})
\end{aligned} \qquad \textbf{(4.12)}$$

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{y_{ii}}\left[\frac{P_i - jQ_i}{\left(V_i^{(v)}\right)^*} - \sum_{j=1}^{i-1} y_{ij}V_j^{(v+1)} - \sum_{j=i+1}^{n} y_{ij}V_j^{(v)}\right] \qquad \text{i=2,3,...,n} \quad \textbf{(4.13)}$$

Τους τρεις τύπους ζυγών κατά την εφαρμογή της μεθόδου G-S, τους αντιμετωπίζουμε με τον εξής τρόπο:

- ***Ζυγός αναφοράς:*** Η τάση αυτού του ζυγού είναι ήδη γνωστή ($V_1 = |V_1| \angle \delta_1 = 1 \angle 0^o \, pu$), οπότε δεν χρειάζεται να γίνει κανένας υπολογισμός. Παρακάμπτουμε, λοιπόν, αυτόν τον ζυγό και προχωρούμε

στον επόμενο. Γι' αυτό το λόγο η επαναληπτική σχέση (4.13) εφαρμόζεται για i≠1.

- ***Ζυγός φορτίου****:* Σε αυτόν τον τύπο ζυγού αμφότερα τα P_i και Q_i είναι γνωστά (P_i=-P_{Li} και Q_i=-Q_{Li}), οπότε το δεύτερο μέλος της επαναληπτικής σχέσης (4.13) ορίζεται πλήρως. Εκτελώντας, συνεπώς, τις σημειούμενες πράξεις υπολογίζουμε σε κάθε επανάληψη νέες βελτιωμένες τιμές για το μέτρο και τη φασική γωνία της τάσης.

- ***Ζυγός με ελεγχόμενη τάση****:* Επειδή η παραγωγή αέργου ισχύος Q_{Gi} είναι γι' αυτό τον τύπο ζυγού άγνωστη, η ποσότητα Q_i ($Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$) δεν μπορεί να υπολογιστεί άμεσα ως διαφορά μεταξύ της παραγόμενης και καταναλισκόμενης αέργου ισχύος και ως εκ τούτου το δεύτερο μέλος της επαναληπτικής σχέσης (4.13) δεν μπορεί να οριστεί σαφώς. Για να ξεπεράσουμε αυτό το πρόβλημα και να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε τη σχέση (4.13) μπορούμε να υπολογίσουμε το Q_i έμμεσα από τις τάσεις ζυγών χρησιμοποιώντας τις πιο πρόσφατες κάθε φορά τιμές τους. Είναι γνωστό ότι το μόνο μέσο που έχουμε στη διάθεσή μας για να κρατήσουμε το μέτρο της τάσης ενός ζυγού παραγωγής σταθερό στην προκαθορισμένη τιμή $|V_i|_{spec}$ είναι η καθαρή άεργος ισχύς Q_i που χύνεται σε αυτόν. Η τιμή, λοιπόν, που θα υπολογίσουμε για το Q_i και θα χρησιμοποιήσουμε στη σχέση (4.13), δεν μπορεί να είναι άλλη από εκείνη που εξασφαλίζει σταθερό μέτρο τάσης $|V_i|_{spec}$ σε αυτόν το ζυγό. Ευρισκόμενοι στην επανάληψη v+1, ο υπολογισμός αυτός του Q_i θα γίνει με βάση τις τιμές των τάσεων στην επανάληψη v (που είναι ήδη γνωστές) ή στην επανάληψη v+1 για όσες από αυτές έχουν ήδη υπολογιστεί. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.8) η τιμή αυτή του Q_i (που συμβολίζεται $Q_i^{(v+1)}$) εκφράζεται υπό αλγοριθμική μορφή ως εξής

$$Q_i^{(v+1)} = -|V_i|_{spec}\left[\sum_{j=1}^{i-1}|V_j|^{(v+1)}|y_{ij}|\sin(\delta_j^{(v+1)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij}) + \sum_{j=1}^{n}|V_j|^{(v)}|y_{ij}|\sin(\delta_j^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij})\right] \quad \textbf{(4.14)}$$

Για να είναι βέβαια αυτή η τιμή της αέργου ισχύος αποδεκτή, θα πρέπει προηγουμένως να ελέγξουμε αν βρίσκεται εντός των ορίων που καθορίζονται από τον περιορισμό $Q_{Gi,min}<Q_{Gi}<Q_{Gi,max}$, που αφορά την άεργο παραγωγή Q_{Gi} και τα οποία είναι $Q_{i,max}=Q_{Gi,max}-Q_{Li}$ και $Q_{i,min}=Q_{Gi,min}-Q_{Li}$. Αν συμβαίνει αυτό, δηλαδή

$$Q_{i\min} \langle Q_i^{(v+1)} \langle Q_{i\max} \quad \textbf{(4.15)}$$

τότε το μέτρο της τάσης του ζυγού μπορεί να κρατηθεί στην προκαθορισμένη τιμή $|V_i|_{spec}$, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούμε να θέσουμε $|V_i|^{v} = |V_i|_{spec}$. Στην περίπτωση αυτή, συνεπώς, η τιμή του V_i^{v} που χρησιμοποιείται στη σχέση (4.13) είναι $V_i^{v} = |V_i|_{spec} \angle \delta_i^{(v)}$. Από το αποτέλεσμα που λαμβάνουμε από την (4.13) κρατάμε μόνο τη γωνία $\delta_i^{(v+1)}$, ενώ θέτουμε το μέτρο της τάσης $|V_i|^{v+1}$ ίσο με $|V_i|_{spec}$, οπότε η τάση στον υπόψη ζυγό στην επανάληψη v+1 γίνεται

$$V_i^{(v+1)} = |V_i|_{spec} \angle \delta_i^{(v+1)} \quad \textbf{(4.16)}$$

Αν η τιμή $Q_i^{(v+1)}$ που υπολογίσαμε υπερβαίνει τη μέγιστη δυνατότητα $Q_{i,max}$ της ισοδύναμης πηγής ισχύος ($Q_i^{(v+1)}>Q_{i,max}$), τότε αυτή η μέγιστη τιμή λαμβάνεται ως καθαρή άεργος ισχύς του ζυγού, δηλαδή $Q_i^{(v+1)}=Q_{i,max}$. Αν, αντίστοιχα, η τιμή που υπολογίσαμε είναι μικρότερη από την ελάχιστη δυνατότητα Q_i,min της ισοδύναμης πηγής ($Q_i^{(v+1)}<Q_{i,min}$), τότε λαμβάνεται ως καθαρή άεργος ισχύς του ζυγού η ελάχιστη αυτή τιμή, δηλαδή $Q_{i(v+1)=}Q_{i,min}$.

Και στις δύο αυτές περιπτώσεις είναι αδύνατο να κρατήσουμε την τάση του ζυγού στην προκαθορισμένη τιμή $|V_i|_{spec}$. Επειδή η άεργος ισχύς Q_i είναι πλέον γνωστή και έχει σταθερή τιμή, ο ζυγός συμπεριφέρεται στην ουσία ως ζυγός φορτίου και αντιμετωπίζεται ως τέτοιος. Από την τιμή της τάσης, δηλαδή, στην επανάληψη ν+1, που υπολογίζεται από τη σχέση (4.13) με $V_i^{\nu} = |V_i|^{\nu} \angle \delta_i^{(\nu)}$, κρατάμε τώρα τόσο το μέτρο όσο και τη φασική γωνία.

Αν ο έλεγχος του μέτρου της τάσης γίνεται με μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης, τότε θα πρέπει να υπολογίσουμε και το λόγο μετασχηματισμού $\alpha = \alpha \angle \theta$. Επειδή στην περίπτωση αυτή η παραγωγή πραγματικής και αέργου ισχύος είναι μηδέν, δηλ. $P_{Gi}=0$ και $Q_{Gi}=0$, ο ζυγός αντιμετωπίζεται όπως ακριβώς ένας ζυγός φορτίου. Η μόνη διαφορά είναι ότι θα πρέπει σε κάθε επανάληψη να ελέγχουμε:

1. Αν το μέτρο $|V_i|$ της τάσης του ζυγού είναι πλησίον της προκαθορισμένης τιμής $|V_i|_{spec}$, δηλαδή

$$\left| |V_i|_{spec} - |V_i| \right| \langle \varepsilon 1 \quad \textbf{(4.17)}$$

2. Αν η πραγματική ισχύς P_{ij}, που μεταφέρεται δια της γραμμής στο άκρο της οποίας υπάρχει ο μετασχηματιστής, βρίσκεται πλησίον του προκαθορισμένου ορίου φόρτισης $P_{ij,spec}$, δηλαδή

$$\left| P_{ij} - P_{ij,spec} \right| \langle \varepsilon 2 \quad \textbf{(4.18)}$$

Αν η συνθήκη (4.17) δεν ικανοποιείται, τότε μεταβάλλουμε το μέτρο του λόγου μετασχηματισμού $|a|$ προς την κατάλληλη κατεύθυνση κατά βήμα Δα μέχρι να ικανοποιηθεί, ή μέχρι να φτάσουμε στα όρια λήψης του μετασχηματιστή. Αν, αντίστοιχα, δεν ικανοποιείται η σχέση (4.18), τότε

μεταβάλλουμε προς την κατάλληλη κατεύθυνση κατά βήμα Δθ τη φασική γωνία θ του μετασχηματιστή. Και στις δύο περιπτώσεις μεταβάλλεται ο μιγαδικός λόγος μετασχηματισμού α, οπότε θα πρέπει να μεταβληθούν τα στοιχεία του πίνακα Y_{bus}.

Η επαναληπτική διαδικασία σταματά όταν οι τάσεις όλων των ζυγών (εκτός βέβαια του ζυγού αναφοράς) στην ν+1 επανάληψη δεν διαφέρουν από εκείνες της ν επανάληψης περισσότερο από μία μικρή ποσότητα ε, μία τυπική τιμή της οποίας είναι 10^{-4} pu, δηλαδή όταν

$$\left|\Delta V^{(\nu+1)}\right| = \left|V_i^{(\nu+1)} - V_i^{(\nu)}\right| \langle \varepsilon, i = 1,2,3....n \quad \textbf{(4.19)}$$

4.4.2 Μέθοδος Newton-Raphson

Για μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η μέθοδος Newton–Raphson είναι πιο αποτελεσματική και πρακτική. Ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτείται για να αποκτήσουμε μια λύση, είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος του συστήματος, αλλά απαιτείται πιο λειτουργική αξιολόγηση σε κάθε επανάληψη. Αφού στο πρόβλημα ροής ισχύος η ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης είναι καθορισμένες για τους ζυγούς που ελέγχονται από τις τάσεις, η εξίσωση ροής ισχύος μετασχηματίζεται σε πολική μορφή. Για ένα τυπικό ζυγό του συστήματος το ρεύμα που εισέρχεται στο ζυγό i δίνεται από την εξίσωση:

$$I_i = V_i \sum_{j=u}^{n} y_{ij} - \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j \qquad \text{j} \neq \text{i} \quad \textbf{(4.20)}$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να γραφεί ξανά λαμβάνοντας υπόψη την μήτρα αγωγιμοτήτων ως εξής:

$$I_t = \sum_{j=1}^{n} y_{ij} V_j \quad \textbf{(4.21)}$$

όπου στην εξίσωση αυτή, το j περιλαμβάνει το ζυγό . Σε πολική μορφή η εξίσωση γράφεται:

$$I_t = \sum_{j=1}^{n} |y_{ij}||V_j| \prec \theta_{ij} + \delta_j \quad \textbf{(4.22)}$$

Η μιγαδική ισχύς στο ζυγό i είναι:

$$P_t - jQ_i = V_i^* I_i \quad \textbf{(4.23)}$$

Αντικαθιστώντας από την (4.22) το I_i στην (4.23) έχουμε:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \prec -\delta_i \sum_{j=1}^{n} |Y_{ij}||V_j| \prec \theta_{ij} + \delta_j \quad \textbf{(4.24)}$$

Χωρίζοντας τα πραγματικά και φανταστικά μέρη έχουμε

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \textbf{(4.25)}$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \textbf{(4.26)}$$

Οι εξισώσεις 4.25 και 4.26 αποτελούν ένα σύνολο από μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις ανεξάρτητων μεταβλητών, όπου οι τιμές των τάσεων είναι σε ανά μονάδα τιμές και γωνίες φάσης σε rad. Έχουμε δύο εξισώσεις για κάθε ζυγό φορτίου, οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις 4.25 και 4.26, και μία εξίσωση για κάθε ζυγό σταθερής τάσης (PV), που δίνεται από την 4.24.

Αναπτύσσοντας τις 4.25 και 4.26 σε σειρά Taylor για την αρχική εκτίμηση και παραλείποντας όλους τους όρους μεγαλύτερης τάξης καταλήγουμε στο παρακάτω σύνολο γραμμικών εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \dfrac{\Delta P_n^{(\kappa)}}{\Delta Q_2^{(\kappa)}} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \dfrac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \dfrac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \dfrac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \dfrac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dfrac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \dfrac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \dfrac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \dfrac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \dfrac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \dfrac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \dfrac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \dfrac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dfrac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \dfrac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \dfrac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \dfrac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{array}\right] \bullet \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(\kappa)} \\ \vdots \\ \dfrac{\Delta \delta_n^{(\kappa)}}{\Delta |V_2^{(\kappa)}|} \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(\kappa)}| \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.27)}$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ο ζυγός 1 θεωρείται ο ζυγός αναφοράς. Ο Ιακωβιανός πίνακας δίνει την γραμμική σχέση μεταξύ των μικρών αλλαγών στην γωνία της τάσης $\Delta\delta_i^{(k)}$ και στην τιμή της τάσης $\Delta|V_i^{(k)}|$ με τις αλλαγές στην πραγματική και άεργο ισχύ $\Delta P_i^{(k)}$και $\Delta Q_i^{(k)}$. Τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας είναι οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων 4.25 και 4.26, υπολογισμένες στα $\Delta\delta_i^{(k)}$ και $\Delta|V_i^{(k)}|$. Σε πιο σύντομη μορφή μπορεί να γραφεί ως εξής :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.28)}$$

Για ζυγούς PV, τα μέτρα των τάσεων είναι γνωστά. Επομένως, αν m ζυγοί του συστήματος είναι ελεγχόμενης τάσης, τότε m εξισώσεις που περιλαμβάνουν τα ΔQ και ΔV και τις αντίστοιχες στήλες της Ιακωβιανής μήτρας, διαγράφονται. Έτσι, υπάρχουν n–1 περιορισμοί πραγματικής ισχύος και n–1– m περιορισμοί αέργου ισχύος, και ο Ιακωβιανός πίνακας είναι τάξης $(2n–2-m)^{\times}(2n-2-m)$. Ο

πίνακας J_1 είναι τάξης (n–1)ˣ(n–1), ο πίνακας J_2 είναι τάξης (n–1)ˣ(n–1–m), ο J_3 τάξης (n–1–m)ˣ(n–1) και ο J_4 τάξης (n–1–m)ˣ(n-1-m).

Τα διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα J_1 είναι :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \textbf{(4.29)}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i \quad \textbf{(4.30)}$$

Τα διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα J_2 είναι :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ij}|\cos\theta_{ij} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \textbf{(4.31)}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i \quad \textbf{(4.32)}$$

Τα διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα J_3 είναι :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \textbf{(4.33)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i \quad \textbf{(4.34)}$$

Τα διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα J_4 είναι :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ij}|\sin\theta_{ij} - \sum_{j\neq i}|V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \textbf{(4.35)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||V_j||Y_{ij}|\sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \qquad j \neq i \quad \textbf{(4.36)}$$

Οι όροι ισχύ $\Delta P_i^{(k)}$και $\Delta Q_i^{(k)}$ είναι η διαφορά μεταξύ των αρχικών (επιθυμητών ή προγραμματισμένων) και υπολογιζόμενων τιμών, γνωστών σαν υπόλοιπα ισχύος, και δίνονται από:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad \textbf{(4.37)}$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad \textbf{(4.38)}$$

Οι νέες εκτιμήσεις των τάσεων των ζυγών είναι :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(\kappa)} - \Delta\delta_i^{(k)} \quad \textbf{(4.39)}$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(\kappa)}| - \Delta|V_i^{(k)}| \quad \textbf{(4.40)}$$

Η διαδικασία για τη λύση των εξισώσεων ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson είναι η ακόλουθη:

1. Για τους ζυγούς φορτίου, όπου οι ισχείς P_i^{sch} και Q_i^{sch} είναι γνωστές, το μέτρο των τάσεων και οι γωνίες των φάσεων τίθενται ίσες με τις τιμές των ζυγών αναφοράς ή 1.0 και 0.0 αντίστοιχα, δηλαδή $|V_i^{(0)}|$= 1.0 και $\delta_i^{(0)}$=0.0. Για τους ζυγούς PV, όπου τα |Vi| και P_i^{sch} είναι γνωστά, οι γωνίες των

φάσεων τίθενται ίσες με τη φάση του ζυγού αναφοράς ή 0, δηλαδή $\delta_i^{(0)}=0$.

2. Για ζυγούς φορτίου, οι $P_i^{(k)}$και $Q_i^{(k)}$ υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.25) και (4.26), ενώ οι $\Delta P_i^{(k)}$και $\Delta Q_i^{(k)}$ υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.37) και (4.38).
3. Για ζυγούς PV, οι $P_i^{(k)}$ και $\Delta P_i^{(k)}$ υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.25) και (4.26) αντίστοιχα.
4. Τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας (J_1, J_2, J_3, J_4) υπολογίζονται από τις (4.29) - (4.36).
5. Η γραμμική εξίσωση (4.27) λύνεται απευθείας με τη μέθοδο της τριγωνοποίησης και απαλοιφής Gauss.
6. Τα νέα μέτρα των τάσεων και οι νέες γωνίες φάσεων υπολογίζονται από τις (4.39) και (4.40).
7. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι οι $\Delta P_i^{(k)}$και $\Delta Q_i^{(k)}$ να είναι μικρότερες από την προσδιορισμένη ακρίβεια, δηλαδή :

$$\begin{aligned} \left|\Delta P_i^{(k)}\right| &\le \varepsilon \\ \left|\Delta Q_i^{(k)}\right| &\le \varepsilon \end{aligned} \quad \textbf{(4.41)}$$

4.5 Προτεινόμενη Μεθοδολογία

Η προτεινόμενη μεθοδολογία στοχεύει στην ανάπτυξη μίας διαδικασίας για τον καθορισμό του **Δείκτη Ευστάθειας Τάσης** (Voltage Stability Index **VSI**) ενός οποιουδήποτε ενεργειακού συστήματος. Στην παρούσα εργασία ως εργαλείο για τον καθορισμό του δείκτη ευστάθειας τάσης χρησιμοποιείται το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος. Αρχικά παράγεται μία έκφραση για τον **Δείκτη Ευστάθειας Τάσης Γραμμής** (Line Voltage Stability Index **LVSI**) σε ένα απλό σύστημα δύο ζυγών. Στη συνέχεια αυτή η έκφραση επαναπροσδιορίζεται για να συμπεριλάβει την επίδραση ενός μετασχηματιστή με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού. Για την γενική περίπτωση ενός συστήματος ισχύος ο LVSI όλων των γραμμών καθορίζεται χρησιμοποιώντας τις τιμές των μέτρων και τις φασικές γωνίες των τάσεων των ζυγών. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται με υπολογιστικά προγράμματα ανάλυσης ροής φορτίου. Στη συνέχεια αναγνωρίζονται όλα τα πιθανά μονοπάτια ροής ισχύος με βάση τις τιμές των LVSI των γραμμών. Ακολουθεί ο καθορισμός ενός δείκτη για κάθε μονοπάτι ροής ισχύος ο οποίος ονομάζεται **Δείκτης Ευστάθειας Τάσης Μονοπατιού Ροής Ισχύος** (Power Flow Path Voltage Stability Index **PVSI**). Το μονοπάτι ροής ισχύος με το μικρότερο PVSI θεωρείται το κρίσιμο μονοπάτι του συστήματος. Έτσι ο PVSI του κρίσιμου μονοπατιού θεωρείται σαν δείκτης VSI του γενικού συστήματος. Τέλος αναγνωρίζονται ο κρίσιμος ζυγός και η κρίσιμη γραμμή βάσει των τιμών των LVSI των γραμμών στο κρίσιμο μονοπάτι ροής ισχύος.

4.5.1 Εργαλεία

Έχουν αναπτυχθεί αρκετά υπολογιστικά προγράμματα για την ανάλυση ροής φορτίου πραγματικών συστημάτων. Κάθε μέθοδος επίλυσης χρησιμοποιεί τέσσερα προγράμματα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος **Gauss – Seidel**. Τα προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται είναι τα lfgauss, το οποίο ακολουθεί του lfybus, και προηγείται των busout και lineflow. Τα εν λόγω προγράμματα παρατίθενται στο Παράρτημα. Ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή των παραπάνω αλγορίθμων.

- **lfybus** Αυτό το πρόγραμμα απαιτεί τις παραμέτρους των γραμμών και των μετασχηματιστών, οι οποίες έχουν καταχωρηθεί σε ένα αρχείο με την ονομασία **linedata**. Μετατρέπει τις σύνθετες αντιστάσεις σε αγωγιμότητες και λαμβάνει τη μήτρα αγωγιμοτήτων του συστήματος. Το πρόγραμμα αυτό είναι σχεδιασμένο ώστε να χειρίζεται παράλληλες γραμμές.
- **lfgauss** το πρόγραμμα αυτό παίρνει την ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Gauss – Seidel και απαιτεί ως είσοδο τα αρχεία ονόματι **busdata** και **linedata.** Είναι έτσι σχεδιασμένο για την απ' ευθείας χρήση των φορτίων και των γεννητριών σε MW και Mvar, των τάσεων των ζυγών σε ανά μονάδα σύστημα, και των φάσεων σε μοίρες. Οι τιμές φορτίων και των γεννητριών μετατρέπονται σε ανά μονάδα ποσότητες σε μία επιλεγμένη βάση Mvar. Γίνεται ακόμα μία παραδοχή, προκειμένου οι τιμές της ενεργού ισχύος των γεννητριών των ζυγών παραγωγής να διατηρούνται μέσα σε ορισμένα όρια. Η παραβίαση του ορίου της αέργου ισχύος μπορεί να γίνει είτε αν η τάση είναι υψηλή είτε χαμηλή. Μετά από κάποιο αριθμό επαναλήψεων ($10^{η}$ επανάληψη για τη μέθοδο Gauss - Seidel), εξετάζονται και υπολογίζονται τα var στους ζυγούς παραγωγής. Αν έχουν φθάσει το όριο, τα επίπεδα της τάσης ρυθμίζονται με ακρίβεια 0,5 τοις εκατό μέχρι το όριο ±5 τοις εκατό ώστε να επαναφέρει τη ζήτηση της αέργου ισχύος στα επιτρεπτά επίπεδα.

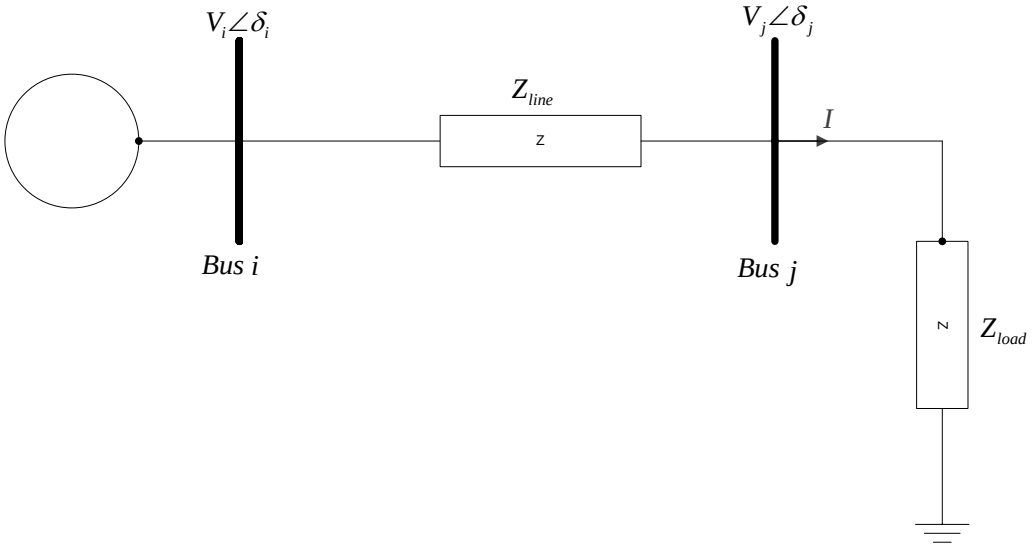
- **busout** Αυτό το πρόγραμμα παράγει το αποτέλεσμα της εξόδου των ζυγών σε μορφή πίνακα. Αυτός ο πίνακας συμπεριλαμβάνει την τιμή του μέτρου και της γωνίας της τάσης των ζυγών, την ενεργό και άεργο ισχύ των γεννητριών και των φορτίων, και τα Mvar των εγκάρσιων πυκνωτών. Επίσης περιλαμβάνονται η ολική παραγωγή αλλά και το ολικό φορτίο.
- **lineflow** Αυτό το πρόγραμμα παράγει το αποτέλεσμα της εξόδου των γραμμών. Είναι σχεδιασμένο ώστε να παρουσιάζει την ροή της ενεργού και αέργου ισχύος στη γραμμή, τις απώλειες κάθε γραμμής καθώς επίσης και την καθαρή ισχύ σε κάθε ζυγό. Επίσης περιλαμβάνονται οι ολικές απώλειες ενεργού και αέργου ισχύος στο σύστημα.

Οι παραπάνω αλγόριθμοι παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας.

4.6 Καθορισμός του δείκτη ευστάθειας τάσης γραμμής (LVSI)

4.6.1 Σύστημα δύο ζυγών

Θεωρούμε ένα απλό σύστημα δύο ζυγών όπου ο ζυγός γεννήτριας «i» συνδέεται με τον ζυγό φορτίου «j» μέσω μίας γραμμής μεταφοράς με σύνθετη αντίσταση Z_{line} όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Το ρεύμα που διαρρέει την γραμμή καθώς και την αντίσταση φορτίου Z_{load} συμβολίζεται με I. Η σύνθετη τάση στους ζυγούς i και j θεωρείται σαν $V_i\angle\delta_i$ και $V_j\angle\delta_j$ αντίστοιχα.



Σχήμα 4.4 Απλό σύστημα δύο ζυγών για τον καθορισμό του δείκτη LVSI

Σύμφωνα με το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος, όταν το μέτρο της αντίστασης φορτίου Z_{load} γίνεται ίσο με το μέτρο της αντίστασης της γραμμής Z_{line}, το σύστημα φτάνει στο σημείο μέγιστης ισχύος ή στο κρίσιμο σημείο που επέρχεται κατάρρευση τάσης. Έτσι στο σημείο κατάρρευσης ισχύος ισχύει:

$$Z_{line} = Z_{load} \textbf{ (4.42)}$$

Σε συνθήκες κανονικής φόρτισης, το μέτρο της πτώσης τάσης σε όλο το μήκος της γραμμής μεταφοράς είναι μικρότερο σχετικά με το μέτρο της τάσης του ζυγού φορτίου. Όταν το σύστημα φτάνει το επίπεδο της μέγιστης μεταφοράς ισχύος, το μέτρο της πτώσης τάσης στην γραμμή μεταφοράς γίνεται ίσο με το μέτρο της τάσης του ζυγού φορτίου. Γι' αυτό το λόγο μέσα στα όρια της ευστάθειας τάσης, η σχέση μεταξύ της τάσης φορτίου και της πτώσης τάσης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\left|V_i - V_j\right| \le \left|V_j\right| \textbf{ (4.43)}$$

Στην Εξίσωση (4.43) οι μεταβλητές χρησιμοποιούνται στην μιγαδική μορφή τους. Η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί χρησιμοποιώντας μόνο τα μέτρα τους. Έτσι γράφεται

$$V_i^2 + V_j{}^2 - 2V_iV_j\cos(\delta_i - \delta_j) \le V_j{}^2 \textbf{ (4.44)}$$

Φέρνοντας το δεύτερο μέλος στο πρώτο, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί:

$$V_i^2 - 2V_iV_j\cos(\delta_i - \delta_j) \le 0 \textbf{ (4.45)}$$

Διαιρώντας την παραπάνω σχέση με V_i^2 έχουμε:

$$2\frac{V_j}{V_i}\cos(\delta_i - \delta_j) - 1 \ge 0 \textbf{ (4.46)}$$

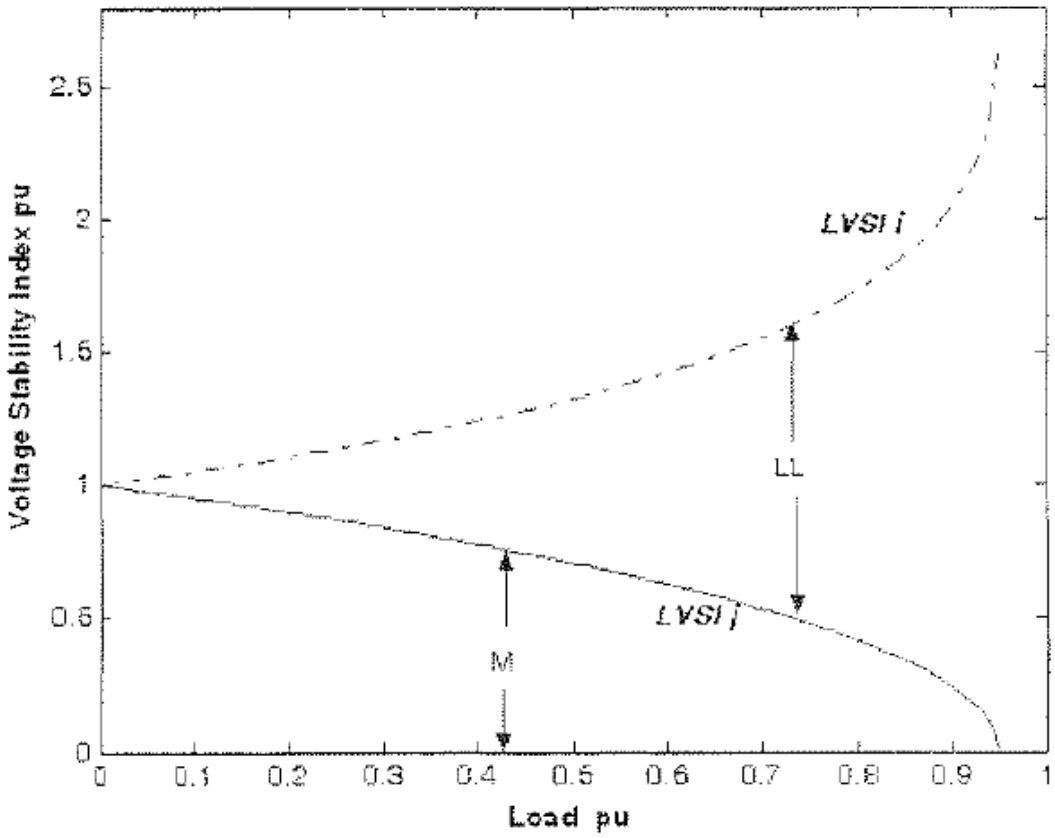
Στην εν κενώ κατάσταση για τις τιμές των μέτρων της τάσης στους δύο ζυγούς ισχύει η σχέση $V_i = V_j$ και για τις φασικές γωνίες αντίστοιχα $\delta_i = \delta_j$, και συνεπώς το πρώτο μέλος της εξίσωσης (4.46) γίνεται μονάδα. Σε κανονική κατάσταση λειτουργίας (δηλαδή ανάμεσα στην εν κενώ λειτουργία και λειτουργία με μέγιστο φορτίο) το αριστερό μέλος της (4.46) θα είναι μεγαλύτερο του μηδενός αλλά μικρότερο της μονάδας. Σε συνθήκες πλήρους φόρτισης (κατάρρευσης τάσης) αποκτά την τιμή μηδέν και ισχύει το σύμβολο της ισότητας. Με βάση το πιο πάνω σκεπτικό, ο δείκτης ευστάθειας τάσης της γραμμής στον ζυγό j μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$LVSI_j = 2\frac{V_j}{V_i}\cos(\delta_i - \delta_j) - 1 \quad \textbf{(4.47)}$$

Όμοια το μέτρο του $LVSI$ στον ζυγό i μπορεί να εκφραστεί ως:

$$LVSI_i = 2\frac{V_i}{V_j}\cos(\delta_j - \delta_i) - 1 \quad \textbf{(4.48)}$$

Το μέτρο των $LVSI_i$ και $LVSI_j$ εξαρτάται από την διεύθυνση καθώς και την ποσότητα της ροής ισχύος.



Σχήμα 4.5 Διαφοροποίηση των δεικτών ευστάθειας τάσης γραμμής ανάλογα με το φορτίο

Στο σχήμα 4.5 φαίνονται τυπικές διακυμάνσεις των $LVSI_i$ και $LVSI_j$ σε σχέση με το φορτίο του συστήματος και είναι σχεδιασμένο για $V_i = 1.0$ pu και $Z_{line} = 0.0897 + 0.2752\,j$ pu. Το σχήμα 4.5 δείχνει ότι στην εν κενώ κατάσταση (χωρίς φορτίο) ο $LVSI_i$ και ο $LVSI_j$ έχουν την ίδια τιμή (μονάδα) επειδή $V_i = V_j$ και $\delta_i = \delta_j$. Όσο το φορτίο αυξάνει, ο $LVSI_j$ μειώνεται και φτάνει την τιμή μηδέν στο σημείο κατάρρευσης της τάσης. Από την άλλη ο $LVSI_i$ αυξάνει και στην προκειμένη περίπτωση φτάνει την τιμή 2.6335 pu στο σημείο κατάρρευσης τάσης. Στο σχήμα 4.5 η τιμή του $LVSI_j$ μπορεί να ερμηνευθεί σαν δείκτης ευστάθειας τάσης (Μ στο σχήμα 4.5). Ο Μ κυμαίνεται ανάμεσα στην τιμή ένα (με μηδέν φορτίο) και στην τιμή μηδέν (στο σημείο

κατάρρευσης τάσης). Συγχρόνως η διαφορά ανάμεσα στον $LVSI_i$ και στον $LVSI_j$ (LL στο σχήμα 4.5) μπορεί να θεωρηθεί σαν μέτρο φόρτισης της γραμμής. Εν κενώ, ο LL είναι μηδέν (καθώς $LVSI_i = LVSI_j$) και μεγαλώνει με την αύξηση του φορτίου.

4.6.2 Σύστημα δύο ζυγών με μετασχηματιστή με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού

Θεωρούμε ένα μετασχηματιστή με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού με σύνθετη αντίσταση Z_T συνδεδεμένο ανάμεσα στον ζυγό i (ζυγός παραγωγής) και στον ζυγό j (ζυγός φορτίου) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Το π-ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή με τις παραμέτρους του φαίνεται στο σχήμα 4.7 όπου Z_{ij}, Z_{ij1},και Z_{ij2} είναι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή, η σύνθετη αντίσταση του εγκάρσιου κλάδου στην πλευρά του ζυγού i και στην πλευρά του ζυγού j αντίστοιχα. Σε μη ονομαστική λήψη, και λόγο μετασχηματισμού a:1 και οι παράμετροι Z_{ij}, Z_{ij1} Z_{ij2} του π-ισοδύναμου δίνονται από τις σχέσεις:

$$Z_{ij} = (a) Z_T \quad \textbf{(4.49)}$$

$$Z_{ij1} = \left(\frac{a^2}{1-a} \right) Z_T \quad \textbf{(4.50)}$$

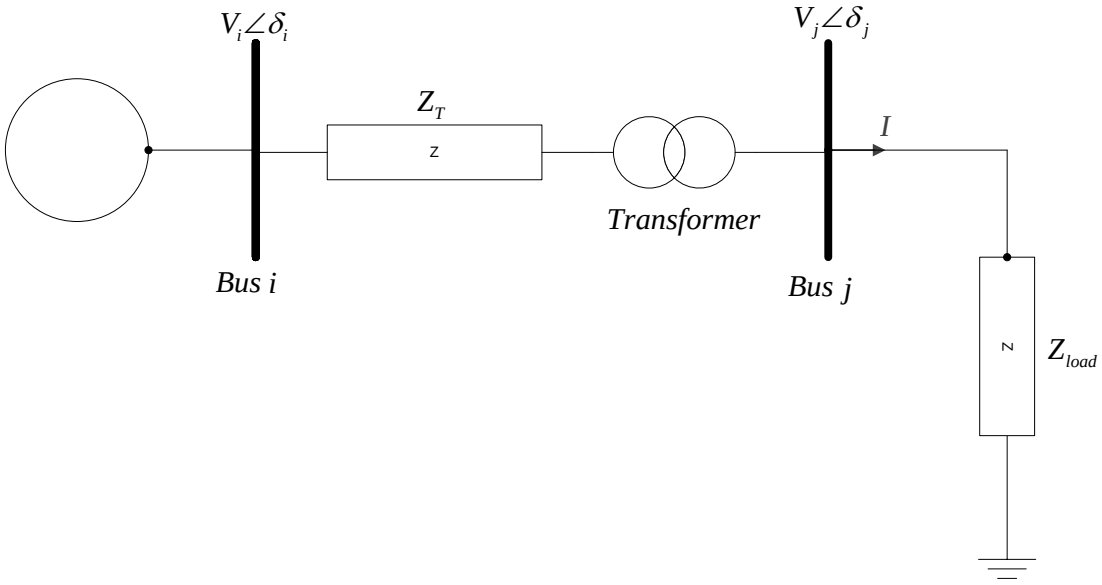
$$Z_{ij2} = \left(\frac{a}{a-1} \right) Z_T \quad \textbf{(4.51)}$$

Αν ο λόγος μετασχηματισμού είναι 1:a τότε οι παράμετροι του ισοδύναμου συστήματος θα δίνονται από τις σχέσεις:

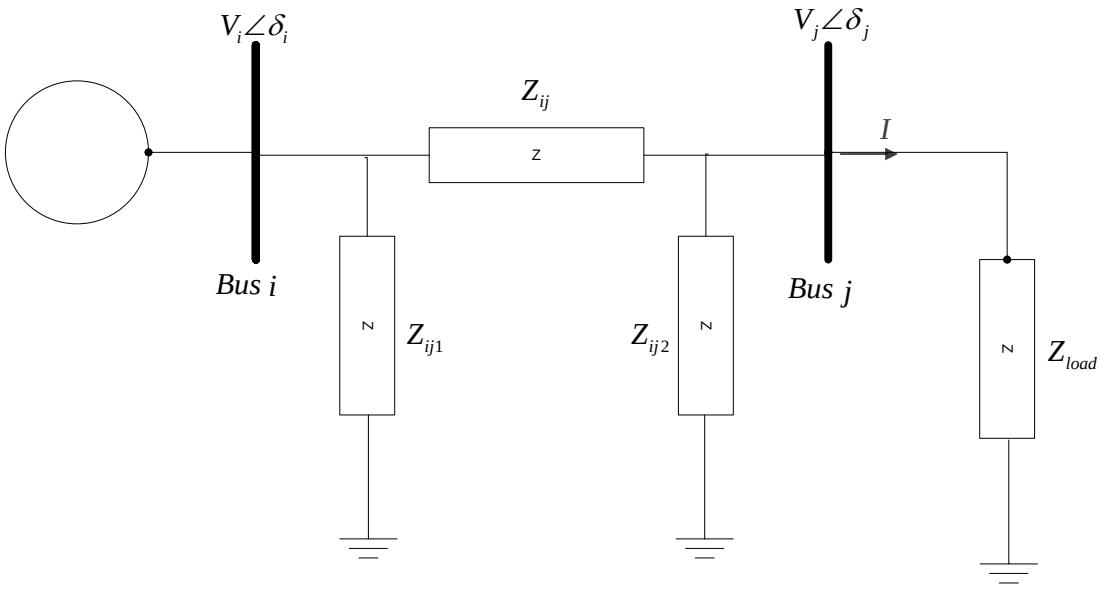
$$Z_{ij} = (a)Z_T \quad \textbf{(4.52)}$$

$$Z_{ij1} = \left(\frac{a}{a-1}\right)Z_T \quad \textbf{(4.53)}$$

$$Z_{ij2} = \left(\frac{a^2}{1-a}\right)Z_T \quad \textbf{(4.54)}$$



Σχήμα 4.6 Απλό σύστημα δύο ζυγών με μετασχηματιστή με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού.



Σχήμα 4.7 Ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.6

Αντικαθιστούμε την γεννήτρια και τον μετασχηματιστή με το ισοδύναμο Thevenin κύκλωμα. Όταν η πηγή του ζυγού "i" θεωρηθεί ιδανική, δηλαδή συνεχής τάση με μηδενική αντίσταση πηγής, οι παράμετροι του ισοδύναμου Thevenin κυκλώματος (Z_{th}, V_{th} και δ_{th}) με μετασχηματιστή με μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού α:1 δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$Z_{th} = Z_{ij} \left\| Z_{ij2} = \frac{Z_{ij} Z_{ij2}}{Z_{ij} + Z_{ij2}} \right. \quad \textbf{(4.55)}$$

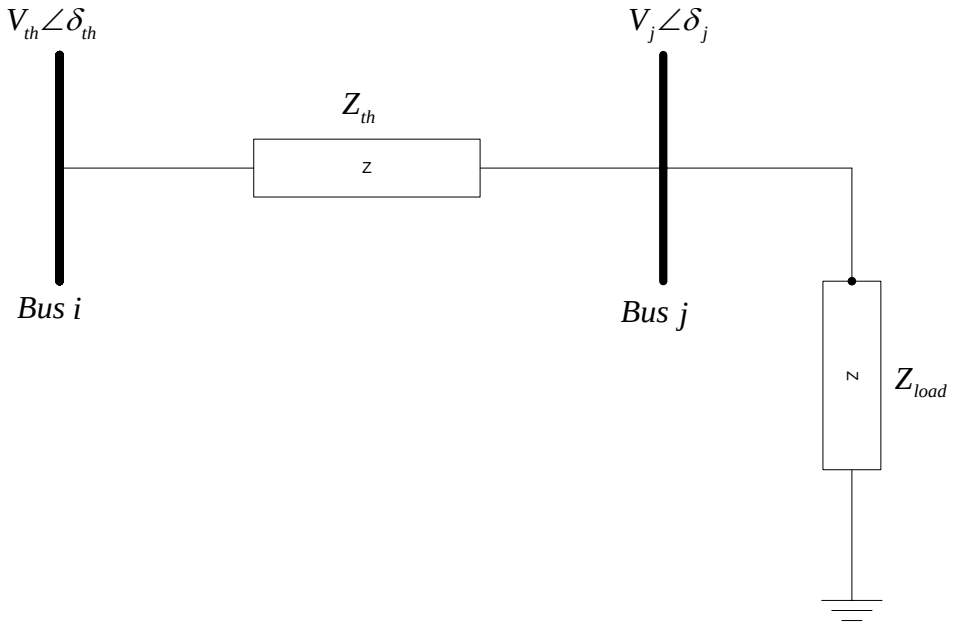
$$V_{th} = \frac{V_i}{Z_{ij} + Z_{ij2}} Z_{ij2} = \frac{V_i}{a} \quad \textbf{(4.56)}$$

Όταν αγνοηθεί η επίδραση της αντίδρασης του μετασχηματιστή, η γωνία δ_{th} έχει ίδια τιμή με την γωνία δ_i.

$$\delta_{th} = \delta_i \quad \textbf{(4.57)}$$

Ομοίως για μετασχηματιστές με λόγο μετασχηματισμού 1:α, οι εκφράσεις για τις ποσότητες Z_{th} και δ_{th} παραμένουν οι ίδιες, αλλά η τάση V_{th} δίνεται από τη σχέση:

$$V_{th} = \frac{V_i}{Z_{ij} + Z_{ij2}} Z_{ij2} = aV_i \quad \textbf{(4.58)}$$

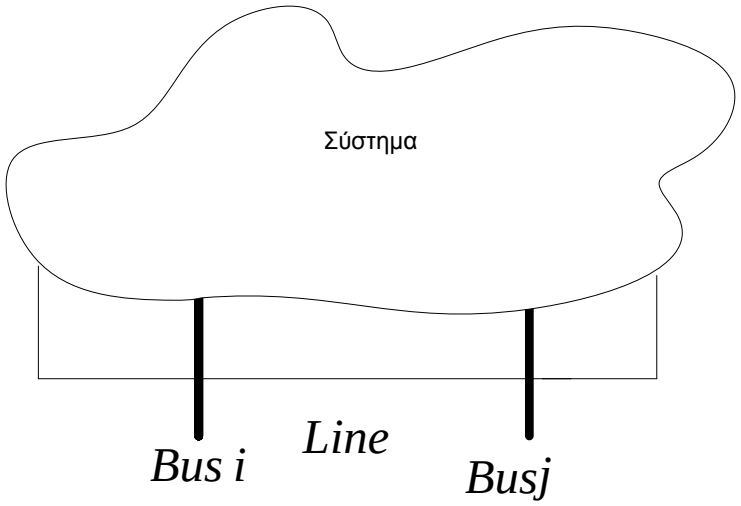


Σχήμα 4.8 Ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.7

Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του συστήματος (σύστημα σχήματος 4.7) φαίνεται στο σχήμα 4.8 και παρουσιάζει ομοιότητα με το σχήμα 4.4. Έτσι οι δείκτες $LVSI_j$ και $LVSI_i$ του σχήματος 4.5 μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις (4.47) και (4.48) αντίστοιχα, αντικαθιστώντας την τάση V_i με aV_i (για λόγο μετασχηματισμού 1:α) ή με $\frac{V_i}{a}$ (για λόγο α:1).

4.6.3 Δείκτης ευστάθειας τάσης γραμμής μεταφοράς σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η εκτίμηση του προτεινόμενου δείκτη ευστάθειας τάσης γραμμής μέσω των εξισώσεων (4.47) και (4.48) απαιτεί μόνο την γνώση των σύνθετων τάσεων των ζυγών και όχι των παραμέτρων της γεννήτριας, του φορτίου και της γραμμής. Αυτές τις μικρές απαιτήσεις μπορούμε να εκμεταλλευτούμε πλήρως για την εκτίμηση του δείκτη ευστάθειας τάσης μίας γραμμής μεταφοράς ενός γενικού ηλεκτρικού συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9. Απαιτούνται μόνο οι τάσεις των ζυγών i και j αντίστοιχα, στα δύο άκρα της γραμμής. Για την γραμμή μεταφοράς (μεταξύ των ζυγών i και j) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9, ο δείκτης $LVSI$ στην πλευρά του ζυγού j και ο $LVSI$ στην πλευρά του ζυγού i μπορούν πάλι να υπολογιστούν από τις εξισώσεις (4.47) και (4.48) αντίστοιχα.



Σχήμα 4.9 Γραμμή μεταφοράς συνδεδεμένη ανάμεσα σε δύο ζυγούς σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

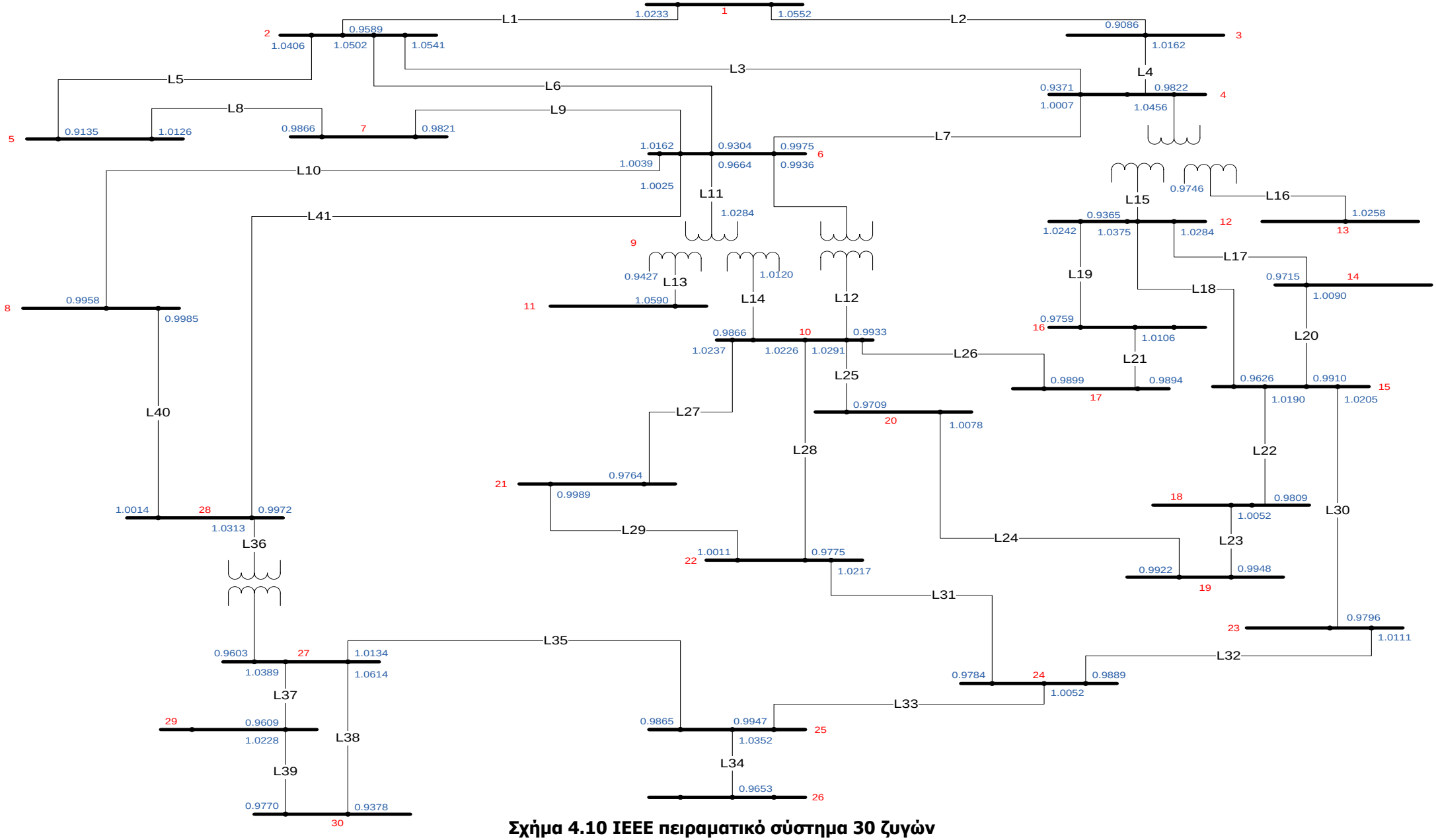
4.7 Καθορισμός του δείκτη ευστάθειας τάσης VSI ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Γενικά τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι τύπου πλέγματος και γι' αυτό είναι σημαντικό να καθορισθεί ο VSI ενός τέτοιου συστήματος. Αρχικά υπολογίζουμε τον δείκτη $LVSI$ στα δύο άκρα όλων των κλάδων (γραμμών και μετασχηματιστών) του συστήματος χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου.

Σε κάθε κλάδο η ισχύς ρέει από τον μεγαλύτερο δείκτη $LVSI$ στον μικρότερο. Η πλευρά με τον μεγαλύτερο $LVSI$ μπορεί να θεωρηθεί σαν η πιο δυνατή πλευρά ενώ αυτή με τον μικρότερο $LVSI$ θεωρείται σαν η πιο αδύναμη πλευρά. Με βάση τους $LVSI_j$ και $LVSI_i$ λοιπόν, το δίκτυο πλέγματος διαιρείται σε έναν αριθμό μονοπατιών ροής ισχύος.

Η αναγνώριση ενός μονοπατιού ροής ισχύος ξεκινάει σε ένα ζυγό πηγής (ή έναν ζυγό προς τα πάνω) και συνεχίζει σε όλους τους προς τα κάτω ζυγούς οι οποίοι συνδεδεμένοι μέσω ενός κλάδου στον πιο πάνω ζυγό με την προϋπόθεση ο δείκτης $LVSI$ του πάνω ζυγού να έχει μεγαλύτερη τιμή από αυτόν του κάτω ζυγού. Εάν ο κλάδος έχει μικρότερη τιμή $LVSI$ στην πιο πάνω πλευρά σε σχέση με την χαμηλότερη, τότε δεν θα πρέπει να συμπεριληφθεί στο μονοπάτι. Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται μέχρι εξαντληθούν οι κλάδοι που μπορούν να συμπεριληφθούν στο μονοπάτι (λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις τιμές των δεικτών για καθέναν από τους κλάδους).

Ας πάρουμε για παράδειγμα το IEEE πειραματικό σύστημα 30 ζυγών που φαίνεται στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10 IEEE πειραματικό σύστημα 30 ζυγών

Οι πληροφορίες γι' αυτό το σύστημα έχουν αποκτηθεί από τη βιβλιογραφία και δίνονται στο Παράρτημα Α. Σε αυτό το σύστημα υπάρχουν πέντε PV ζυγοί (ζυγοί 2, 5, 8, 11, 13) και εικοσιτέσσερις QV ζυγοί. Ο ζυγός 1 επιλέγεται σαν ζυγός αναφοράς.

Με τη βοήθεια των προγραμμάτων που αναλύθηκαν παραπάνω, δηλαδή των lfybus, lfgauss, busout, και lineflow, τα οποία παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα, παίρνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα στο περιβάλλον του MATLAB:

Power Flow Solution by Gauss-Seidel Method

Maximum Power Mismatch = 0.000951884

No. of Iterations = 34

Bus	*Voltage*	*Angle*	*Load*		*Generation*		*Injected*
No.	*Mag.*	*Degree*	*MW*	*Mvar*	*MW*	*Mvar*	*Mvar*
1	*1.060*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*260.950*	*-17.010*	*0.000*
2	*1.043*	*-5.496*	*21.700*	*12.700*	*40.000*	*48.826*	*0.000*
3	*1.022*	*-8.002*	*2.400*	*1.200*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
4	*1.013*	*-9.659*	*7.600*	*1.600*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
5	*1.010*	*-14.380*	*94.200*	*19.000*	*0.000*	*35.995*	*0.000*
6	*1.012*	*-11.396*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
7	*1.003*	*-13.149*	*22.800*	*10.900*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
8	*1.010*	*-12.114*	*30.000*	*30.000*	*0.000*	*30.759*	*0.000*
9	*1.051*	*-14.432*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
10	*1.044*	*-16.024*	*5.800*	*2.000*	*0.000*	*0.000*	*19.000*
11	*1.082*	*-14.432*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*16.113*	*0.000*
12	*1.057*	*-15.301*	*11.200*	*7.500*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
13	*1.071*	*-15.300*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*10.406*	*0.000*
14	*1.043*	*-16.190*	*6.200*	*1.600*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
15	*1.038*	*-16.276*	*8.200*	*2.500*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
16	*1.045*	*-15.879*	*3.500*	*1.800*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
17	*1.039*	*- 16.187*	*9.000*	*5.800*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
18	*1.028*	*-16.881*	*3.200*	*0.900*	*0.000*	*0.000*	*0.000*

19	*1.025*	*-17.049*	*9.500*	*3.400*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
20	*1.029*	*-16.851*	*2.200*	*0.700*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
21	*1.032*	*-16.468*	*17.500*	*11.200*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
22	*1.033*	*-16.455*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
23	*1.027*	*-16.660*	*3.200*	*1.600*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
24	*1.022*	*-16.829*	*8.700*	*6.700*	*0.000*	*0.000*	*4.300*
25	*1.019*	*-16.423*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
26	*1.001*	*-16.835*	*3.500*	*2.300*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
27	*1.026*	*-15.913*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
28	*1.011*	*-12.056*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
29	*1.006*	*-17.133*	*2.400*	*0.900*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
30	*0.994*	*-18.016*	*10.600*	*1.900*	*0.000*	*0.000*	*0.000*
Total			*283.400*	*126.200*	*300.950*	*125.089*	*23.300*

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ροής φορτίου με τη μέθοδο Gauss - Seidel

Line Flow and Losses

--Line--		Poweratbus&lineflow			--Lineloss--		Transformer
from	to	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	tap
1		260.950	-17.010	261.504			
	2	177.743	-22.140	179.117	5.461	10.517	
	3	83.197	5.125	83.354	2.807	7.079	
2		18.300	36.126	40.497			
	1	-172.282	32.657	175.350	5.461	10.517	
	4	45.702	2.720	45.783	1.106	-0.519	
	5	82.990	1.704	83.008	2.995	8.178	
	6	61.905	-0.966	61.913	2.047	2.263	
3		-2.400	-1.200	2.683			
	1	-80.390	1.954	80.414	2.807	7.079	
	4	78.034	-3.087	78.095	0.771	1.345	
4		-7.600	-1.600	7.767			
	2	-44.596	-3.239	44.713	1.106	-0.519	
	3	-77.263	4.432	77.390	0.771	1.345	
	6	70.132	-17.624	72.313	0.605	1.181	
	12	44.131	14.627	46.492	0.000	4.686	0.932
5		-94.200	16.995	95.721			
	2	-79.995	6.474	80.256	2.995	8.178	
	7	-14.210	10.467	17.649-	0.151	-1.687	
6		0.000	0.000	0.000			
	2	-59.858	3.229	59.945	2.047	2.263	
	4	-69.527	18.805	72.026	0.605	1.181	
	7	37.537	-1.915	37.586	0.368	-0.598	
	8	29.534	-3.712	29.766	0.103	-0.558	

	9	*27.687*	*-7.318*	*28.638*	*0.000*	*1.593*	*0.978*
	10	*15.828*	*0.656-*	*15.842*	*0.000*	*1.279*	*0.969*
	28	*18.840-*	*9.575*	*21.134*	*0.060-*	*13.085*	
7		*-22.800*	*-10.900*	*25.272*			
	5	*14.361*	*-12.154*	*18.814*	*0.151*	*-1.687*	
	6	*-37.170*	*1.317*	*37.193*	*0.368*	*-0.598*	
8		*-30.000*	*0.759*	*30.010*			
	6	*-29.431*	*3.154*	*29.599*	*0.103*	*-0.558*	
	28	*-0.570*	*-2.366*	*2.433*	*0.000*	*-4.368*	
9		*0.000*	*0.000*	*0.000*			
	6	*-27.687*	*8.911*	*29.086*	*0.000*	*1.593*	
	11	*0.003*	*-15.653*	*15.653*	*0.000*	*0.461*	
	10	*27.731*	*6.747*	*28.540*	*-0.000*	*0.811*	
10		*-5.800*	*17.000*	*17.962*			
	6	*-15.828*	*0.623*	*15.840-*	*0.000*	*1.279*	
	9	*-27.731*	*-5.936*	*28.359*	*-0.000*	*0.811*	
	20	*9.018*	*3.569*	*9.698*	*0.081*	*0.180*	
	17	*5.347*	*4.393*	*6.920*	*0.014*	*0.037*	
	21	*15.723*	*9.846*	*18.551*	*0.110*	*0.236*	
	22	*7.582*	*4.487*	*8.811*	*0.052*	*0.107*	
11		*0.000*	*16.113*	*16.113*			
	9	*-0.003*	*16.114*	*16.114*	*0.000*	*0.461*	
12		*-11.200*	*-7.500*	*13.479*			
	4	*-44.131*	*-9.941*	*45.237*	*0.000*	*4.686*	
	13	*-0.021*	*-10.274*	*10.274*	*0.000*	*0.132*	
	14	*7.852*	*2.428*	*8.219*	*0.074*	*0.155*	
	15	*17.852*	*6.968*	*19.164*	*0.217*	*0.428*	
	16	*7.206*	*3.370*	*7.955*	*0.053*	*0.112*	

13		*0.000*	*10.406*	*10.406*		
	12	*0.021*	*10.406*	*10.406*	*0.000*	*0.132*
14		*-6.200*	*-1.600*	*6.403*		
	12	*-7.778*	*-2.273*	*8.103*	*0.074*	*0.155*
	15	*1.592*	*0.708*	*1.742*	*0.006*	*0.006*
15		*-8.200*	*-2.500*	*8.573*		
	12	*-17.634*	*-6.540*	*18.808*	*0.217*	*0.428*
	14	*-1.586*	*-0.702*	*1.734*	*0.006*	*0.006*
	18	*6.009*	*1.741*	*6.256*	*0.039*	*0.079*
	23	*5.004*	*2.963*	*5.815*	*0.031*	*0.063*
16		*-3.500*	*-1.800*	*3.936*		
	12	*-7.152*	*-3.257*	*7.859*	*0.053*	*0.112*
	17	*3.658*	*1.440*	*3.931*	*0.012*	*0.027*
17		*-9.000*	*-5.800*	*10.707*		
	16	*-3.646*	*-1.413*	*3.910*	*0.012*	*0.027*
	10	*-5.332*	*-4.355*	*6.885*	*0.014*	*0.037*
18		*-3.200*	*-0.900*	*3.324*		
	15	*-5.970*	*-1.661*	*6.197*	*0.039*	*0.079*
	19	*2.779*	*0.787*	*2.888*	*0.005*	*0.010*
19		*-9.500*	*-3.400*	*10.090*		
	18	*-2.774*	*-0.777*	*2.881*	*0.005*	*0.010*
	20	*-6.703*	*-2.675*	*7.217*	*0.017*	*0.034*
20		*2.200*	*-0.700*	*2.309*		
	19	*6.720*	*2.709*	*7.245*	*0.017*	*0.034*
	10	*-8.937*	*-3.389*	*9.558*	*0.081*	*0.180*

21		*-17.500*	*-11.200*	*20.777*			
	10	*-15.613*	*-9.609*	*18.333*	*0.110*	*0.236*	
	22	*-1.849*	*-1.627*	*2.463*	*0.001*	*0.001*	
22		*0.000*	*0.000*	*0.000*			
	10	*-7.531*	*-4.380*	*8.712*	*0.052*	*0.107*	
	21	*1.850*	*1.628*	*2.464*	*0.001*	*0.001*	
	24	*5.643*	*2.795*	*6.297*	*0.043*	*0.067*	
23		*-3.200*	*-1.600*	*3.578*			
	15	*-4.972*	*-2.900*	*5.756*	*0.031*	*0.063*	
	24	*1.771*	*1.282*	*2.186*	*0.006*	*0.012*	
24		*-8.700*	*-2.400*	*9.025*			
	22	*-5.601*	*-2.728*	*6.230*	*0.043*	*0.067*	
	23	*-1.765*	*-1.270*	*2.174*	*0.006*	*0.012*	
	25	*-1.322*	*1.604*	*2.079*	*0.008*	*0.014*	
25		*0.000*	*0.000*	*0.000*			
	24	*1.330*	*-1.590*	*2.073*	*0.008*	*0.014*	
	26	*3.520*	*2.372*	*4.244*	*0.044*	*0.066*	
	27	*-4.866*	*-0.786*	*4.929*	*0.026*	*0.049*	
26		*-3.500*	*-2.300*	*4.188*			
	25	*-3.476*	*-2.306*	*4.171*	*0.044*	*0.066*	
27		*0.000*	*0.000*	*0.000*			
	25	*4.892*	*0.835*	*4.963*	*0.026*	*0.049*	
	28	*-18.192*	*-4.152*	*18.660*	*-0.000*	*1.310*	
	29	*6.178*	*1.675*	*6.401*	*0.086*	*0.162*	
	30	*7.093*	*1.663*	*7.286*	*0.162*	*0.304*	
28		*0.000*	*0.000*	*0.000*			
	27	*18.192*	*5.463*	*18.994*	*-0.000*	*1.310*	*0.968*

	8	*0.570*	*-2.003*	*2.082*	*0.000*	*-4.368*
	6	*-18.780*	*-3.510*	*19.106*	*0.060*	*-13.085*
29		*-2.400*	*-0.900*	*2.563*		
	27	*-6.093*	*-1.513*	*6.278*	*0.086*	*0.162*
	30	*3.716*	*0.601*	*3.764*	*0.034*	*0.063*
30		*-10.600*	*-1.900*	*10.769*		
	27	*-6.932*	*-1.359*	*7.064*	*0.162*	*0.304*
	29	*-3.683*	*-0.537*	*3.722*	*0.034*	*0.063*
Totalloss					*17.594*	*22.233*

Πίνακας 4.2 Ροές ισχύος γραμμών και απώλειες

Συγκεντρωτικά, τα μέτρα και οι φάσεις των τάσεων των ζυγών του συστήματος σε κατάσταση φορτίου βάσης δίνονται στον Πίνακα 4.3. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου για φορτίο βάσης, όπως αυτά δίνονται στον παρακάτω πίνακα, ο δείκτης LVSI και στα δύο άκρα όλων των κλάδων υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων (4.47), (4.48) και οι τιμές που προκύπτουν παρουσιάζονται επίσης στο Σχήμα 4.10.

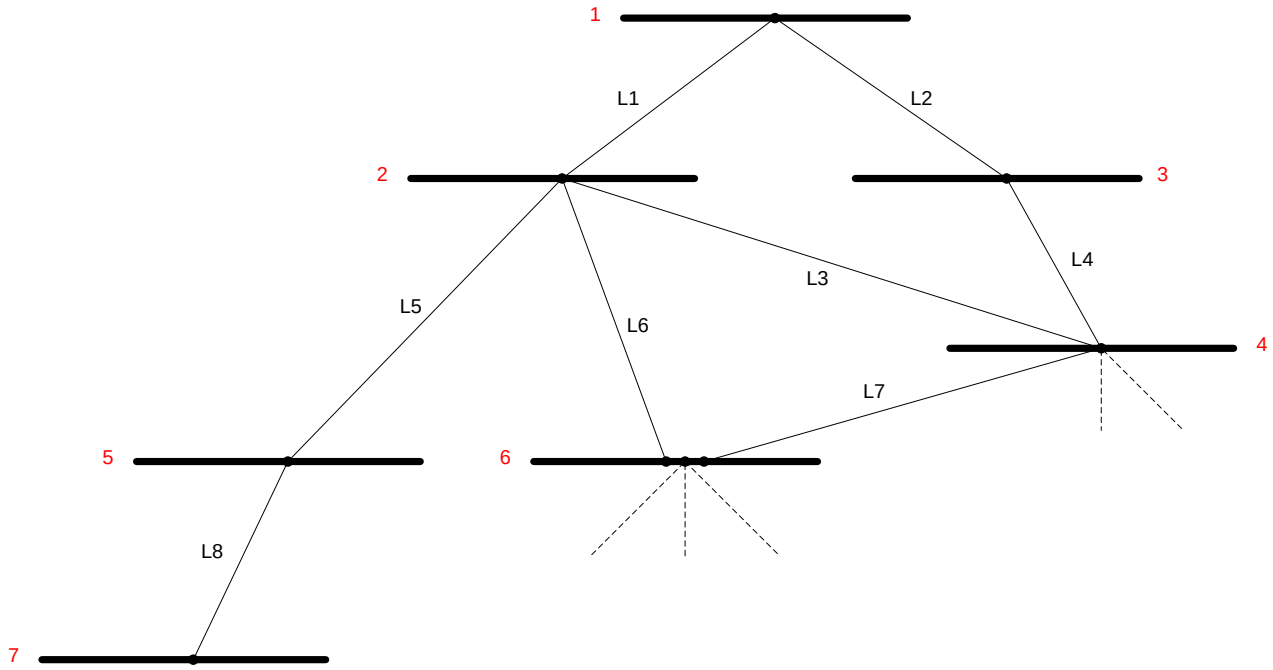
Ζυγός	**Μέτρο τάσης (pu)**	**Φασική Γωνία Τάσης**
1	1.060	0
2	1.043	-5.497
3	1.022	-8.004
4	1.013	-96.615
5	1.010	-14.381
6	1.012	-11.398
7	1.003	-13.150
8	1.010	-12.115
9	1.051	-14.434
10	1.044	-16.024
11	1.082	-14.434
12	1.057	-15.302
13	1.071	-15.302
14	1.042	-16.191
15	1.038	-16.278
16	1.045	-15.880
17	1.039	-16.188
18	1.028	-16.884
19	1.025	-17.052
20	1.029	-16.852
21	1.032	-16.468

Ζυγός	Μέτρο τάσης (pu)	Φασική Γωνία Τάσης
22	1.033	-16.455
23	1.027	-16.662
24	1.022	-16.830
25	1.018	-16.424
26	1.001	-16.842
27	1.026	-15.912
28	1.011	-12.057
29	1.006	-17.136
30	0.994	-18.015

Πίνακας 4.3 Μέτρο και φάση τάσης IEEE Συστήματος 30 ζυγών σε φορτίο βάσης

Κατόπιν, αρχίζουμε την αναγνώριση των μονοπατιών ροής ισχύος από τον ζυγό πηγής 1 ο οποίος συνδέεται με τους ζυγούς 2 και 3 μέσω των γραμμών L_1 και L_2 αντίστοιχα. Η γραμμή L_1 έχει LVSI 1.0233 (κοντά στον ζυγό 1) και 0.9589 (κοντά στον ζυγό 2). Αφού ο LVSI στην πάνω πλευρά (ζυγός 1) είναι μεγαλύτερος από αυτόν στην κάτω πλευρά της γραμμής (ζυγός 2), η γραμμή θα πρέπει να συμπεριληφθεί στον μονοπάτι. Τώρα ξεκινάμε από τον ζυγό 2, ο οποίος συνδέεται με τους ζυγούς 4, 5 και 6 μέσω των γραμμών L_3, L_5 και L_6 αντίστοιχα. Και σε αυτή την περίπτωση όλες οι γραμμές έχουν μεγαλύτερο LVSI στο πάνω άκρο τους σε σχέση με το κάτω και έτσι συμπεριλαμβάνονται στο μονοπάτι. Ο ζυγός 5 συνδέεται με τον ζυγό 7 μέσω της γραμμής L_8, η οποία έχει τιμή $LVSI$ 1.0126 (κοντά στον ζυγό 5) και 0.9886 (κοντά στον ζυγό 7). Εφόσον λοιπόν ο $LVSI$ στην πάνω πλευρά της γραμμής (ζυγός 5) είναι μεγαλύτερος από τον $LVSI$ της κατώτερης πλευράς, συμπεριλαμβάνεται λοιπόν και η γραμμή L_8 στο μονοπάτι ροής ισχύος. Αντίθετα ο ζυγός 7 συνδέεται με τον ζυγό 6 μέσω της γραμμής L_9 που έχει μικρότερο $LVSI$ (0.9821) στην πλευρά του ζυγού 7 σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή στη

πλευρά του ζυγού 6 (1.0126) και γι' αυτό το λόγο δεν συμπεριλαμβάνεται στο μονοπάτι. Σε αυτή την περίπτωση το μονοπάτι τερματίζει στον ζυγό 7 όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11. Η παραπάνω τεχνική επαναλαμβάνεται όσες φορές χρειαστεί προκειμένου να εντοπισθούν όλα τα πιθανά μονοπάτια του συστήματος. Όλα τα μονοπάτια που ξεκινούν από τον ζυγό 1 είναι καταγραμμένα στον πίνακα 4.4.



Σχήμα 4.11 Αναγνώριση μονοπατιών ροής ισχύος

Αφού καθορίσουμε όλα τα πιθανά μονοπάτια του συστήματος, είναι απαραίτητο να υπολογίσουμε τον δείκτη $PVSI$ καθενός από αυτά. Στην παρούσα μελέτη ο $PVSI$ υποθέτεται σαν αποτέλεσμα του γινομένου των $LVSI_j$ όλων των γραμμών που αποτελούν το μονοπάτι. Έτσι ο $PVSI$ μπορεί να γραφεί σαν

$$PVSI = \prod_{k \in \zeta} LVSI_{kj} \quad \textbf{(4.59)}$$

Όπου ζ είναι ένα σετ γραμμών που αποτελούν ένα μονοπάτι ισχύος και j είναι η κάτω πλευρά των γραμμών.

Αριθμός μονοπατιού (Path No)	**Ζυγοί που συμπεριλαμβάνονται στο μονοπάτι ροής ισχύος**								
P1	1	2	4	6	7				
P2	1	2	4	6	8				
P3	1	2	4	6	10	17			
P4	1	2	4	6	10	20			
P5	1	2	4	6	10	20	19		
P6	1	2	4	6	10	21			
P7	1	2	4	6	10	22	21		
P8	1	2	4	6	10	22	24		
P9	1	2	4	6	10	22	24	25	26
P10	1	2	4	6	28	8			
P11	1	2	4	6	28	27	25	26	
P12	1	2	4	6	28	27	29	30	
P13	1	2	4	6	28	27	30		
P14	1	2	4	12	16	17			
P15	1	2	5	7					
P16	1	2	6	7					
P17	1	2	6	10	17				
P18	1	2	6	10	20	19			
P19	1	2	6	10	22	21			
P20	1	2	6	28	8				
P21	1	2	6	28	27	25	26		
P22	1	2	6	28	27	29	30		
P23	1	2	6	28	27	30			

Αριθμός μονοπατιού (Path No)	**Ζυγοί που συμπεριλαμβάνονται στο μονοπάτι ροής ισχύος**								
P24	1	3	4	6	7				
P25	1	3	4	6	8				
P26	1	3	4	6	10	17			
P27	1	3	4	6	10	20	19		
P28	1	3	4	6	10	21			
P29	1	3	4	6	10	22	24	25	26
P30	1	3	4	6	28	8			
P31	1	3	4	6	28	27	25	26	
P32	1	3	4	6	28	27	29	30	
P33	1	3	4	6	28	27	30		
P34	1	3	4	12	16	17			

Πίνακας 4.4 Σύστημα IEEE 30 ζυγών - Μονοπάτια ροής ισχύος σε φορτίο βάσης

Θεωρούμε το μονοπάτι P_{33} όπως φαίνεται στον πίνακα 4.4, το οποίο ξεκινάει από τον ζυγό 1 και καταλήγει στον ζυγό 30. Οι ενδιάμεσοι ζυγοί είναι οι 3, 4, 6, 28 και 27. Οι γραμμές που αποτελούν το μονοπάτι είναι οι L_2,L_4, L_7,L_{41}, L_{36} και L_{38} οπότε και το σετ ζ είναι {L_2, L_4, L_7, L_{41}, L_{36}, L_{38}}. Ο $PVSI$ του μονοπατιού μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned} PVSI_{P33} &= (LVSI_{L2,3} \times LVSI_{L4,4} \times LVSI_{L7,6} \times LVSI_{L41,28} \times LVSI_{L36,27} \times LVSI_{L38,30}) \\ &= (0.9086 \times 0.9822 \times 0.9975 \times 0.9972 \times 0.9603 \times 0.9378) \\ &= 0.7995 \end{aligned}$$

Ακολούθως ο $PVSI$ όλων των μονοπατιών ροής ισχύος υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (4.59) όπως εξηγείται και στο πιο πάνω παράδειγμα και τα αποτελέσματα που προκύπτουν καταγράφονται στον πίνακα 4.5.

Αριθμός μονοπατιού (Path No)	PVSI
P1	0.8802
P2	0.8925
P3	0.8814
P4	0.8644
P5	0.8576
P6	0.8694
P7	0.8694
P8	0.8516
P9	0.8177
P10	0.8925
P11	0.8174
P12	0.8059
P13	0.8049
P14	0.8124
P15	0.8641
P16	0.8761
P17	0.8773

Αριθμός μονοπατιού (Path No)	PVSI
P18	0.8537
P19	0.8653
P20	0.8884
P21	0.8136
P22	0.8021
P23	0.8012
P24	0.8742
P25	0.8865
P26	0.8754
P27	0.8518
P28	0.8635
P29	0.8121
P30	0.8865
P31	0.8119
P32	0.8004
P33	**0.7995**
P34	0.8068

Πίνακας 4.5 Τιμές του δείκτη PVSI όλων των πιθανών μονοπατιών ισχύος του συστήματος

Σε αυτή την μελέτη το μονοπάτι ροής ισχύος που έχει την μικρότερη τιμή $PVSI$ θεωρείται ως το μονοπάτι με το μεγαλύτερο φορτίο, ή σαν κρίσιμο μονοπάτι το οποίο είναι ευάλωτο σε κατάρρευση τάσης. Η τιμή του $PVSI$ του μονοπατιού με το μεγαλύτερο φορτίο θεωρείται ως ο γενικός δείκτης

ευστάθειας τάσης του συστήματος. Γι' αυτό ο δείκτης ευστάθειας τάσης (VSI) του συστήματος ισχύος μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως

$$VSI = \min(PVSI_m) \quad \textbf{(4.60)}$$

όπου η μεταβλητή m κυμαίνεται μεταξύ 1 και n,με n τον ολικό αριθμό των πιθανών μονοπατιών ροής ισχύος που ξεκινούν από όλους τους ζυγούς (ζυγό αναφοράς και ζυγούς PV).

Από όλα τα πιθανά μονοπάτια ροής ισχύος το μονοπάτι P_{33} έχει τον μικρότερο $PVSI$ (0.7995). Εξαιτίας αυτού του γεγονότος το μονοπάτι P_{33} (1-3-4-6-28-27-30) μπορεί να θεωρηθεί σαν το κρίσιμο μονοπάτι σε κατάσταση φορτίου βάσης. Ο τελευταίος ζυγός του κρίσιμου μονοπατιού θεωρείται ως ο πιο αδύναμος ή κρίσιμος ζυγός του συστήματος. Ο κλάδος που συμπεριλαμβάνεται στο κρίσιμο μονοπάτι και έχει την μεγαλύτερη τιμή LL θεωρείται ως ο πιο φορτισμένος κλάδος. Σε κατάσταση φορτίου βάσης, ο ζυγός 30 είναι ο κρίσιμος ζυγός γιατί είναι ο τελευταίος ζυγός του κρίσιμου μονοπατιού ροής ισχύος (P_{33}). Οι τιμές των LL όλων των γραμμών στο μονοπάτι αυτό που έχει αναγνωριστεί σαν κρίσιμο δίνονται στον πίνακα 4.6 ο οποίος υποδεικνύει ότι η γραμμή L_2 που συνδέεται ανάμεσα στους ζυγούς 1 και 3 έχει την μεγαλύτερη τιμή LL (0.1466). Η γραμμή L_2 λοιπόν θεωρείται η κρίσιμη γραμμή. Ωστόσο, όσο αλλάζει η κατάσταση φόρτισης, τα μονοπάτια ροής ισχύος μπορεί επίσης να αλλάξουν με βάση το μέγεθος του φορτίου και τους $LVSI$ των γραμμών. Έτσι και η κρίσιμη γραμμή αλλά και ο κρίσιμος ζυγός μπορεί να εξαρτώνται από το επίπεδο φόρτισης στο οποίο αναγνωρίζονται.

Γραμμή k	$LVSI_{ki}$	LVSIkj	LL_k
L_2	1.0552	0.90859	**0.1466**
L_4	1.0162	0.98224	0.0339
L_7	1.0058	0.9913	0.0145
L_{41}	1.0025	0.99725	0.0052
L_{36}	1.0313	0.96029	0.0710
L_{38}	1.0614	0.9378	0.1236

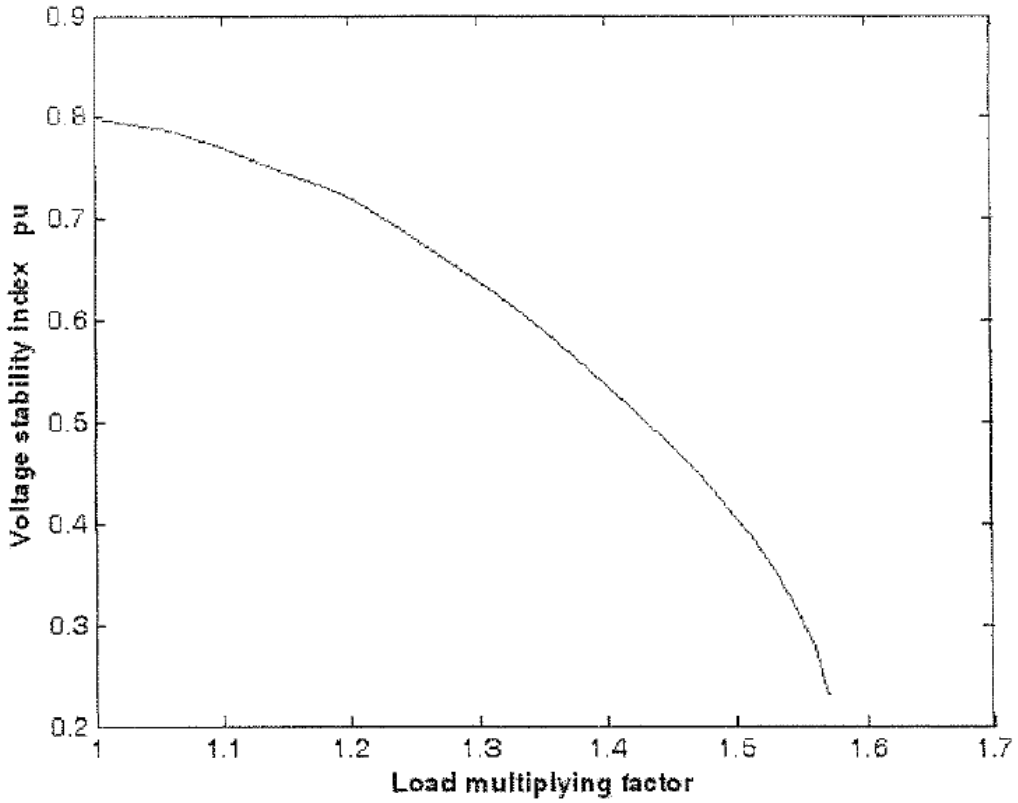
Πίνακας 4.6 Τιμές του LL ως δείκτη ευστάθειας του συστήματος στο κρίσιμο μονοπάτι ροής ισχύος

4.8 Αποτελέσματα και σχόλια

Η προτεινόμενη μέθοδος του καθορισμού του δείκτη ευστάθειας τάσης VSI πραγματοποιείται στο IEEE σύστημα 30 ζυγών. Ο δείκτης VSI καθορίζεται για διάφορα επίπεδα φόρτισης και οι σύνθετες τάσεις ζυγών που χρειάζονται γι' αυτό τον σκοπό υπολογίζονται μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου. Το πρόβλημα ροής φορτίου του συστήματος λύνεται αυξάνοντας σταδιακά το φορτίο όλων των ζυγών με μία βηματική αύξηση περίπου 1% του φορτίου βάσης, ώσπου ο αλγόριθμος ροής φορτίου αποκλίνει. Υποθέτουμε ότι η απόκλιση του αλγόριθμου σε μεγαλύτερα επίπεδα φόρτισης οφείλεται στο φαινόμενο της κατάρρευσης τάσης. Το φορτίο βάσης του συστήματος είναι 310.23 MVA και ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ροής φορτίου συγκλίνει σε έναν συντελεστή φόρτισης λ=1.57. Στο πλαίσιο αυτό το σημείο κρίσιμης φόρτισης του δικτύου υπολογίζεται στα 310.23 x 1.57=487.061 MVA. Για τιμή του συντελεστή φόρτισης πέρα της τιμής 1.24, όλοι οι PV ζυγοί φτάνουν το όριο αέργου ισχύος και μετατρέπονται σε ζυγούς QV. Κατά συνέπεια, σα ζυγός παραγωγής αέργου ισχύος απομένει μόνο ο ζυγός αναφοράς του συστήματος. Όταν το φορτίο του συστήματος αυξάνεται από την τιμή του φορτίου βάσης

στη τιμή του κρίσιμου φορτίου, το κρίσιμο μονοπάτι ροής ισχύος του δίκτυο παραμένει και πάλι το ίδιο, όπως και στην περίπτωση του φορτίου βάσης (δηλαδή το μονοπάτι 1-3-4-6-28-27-30). Καθ' όλη τη διάρκεια αύξησης φορτίου παρατηρούμε ότι η γραμμή L_2, η οποία συνδέει τους ζυγούς 1 και 3 είναι η κρίσιμη γραμμή του δικτύου ή η γραμμή με τη μεγαλύτερη φόρτιση καθώς ο δείκτης 'LL' αυτής της γραμμής έχει τη μεγαλύτερη τιμή. Παρατηρούμε επίσης ότι ο ζυγός με τον αριθμό 30, είναι ο τελευταίος ζυγός του κρίσιμου μονοπατιού ροής ισχύος. Ωστόσο σε άλλα συστήματα η κρίσιμη γραμμή και ο κρίσιμος ζυγός μπορούν να διαφοροποιούνται καθώς μεταβάλλονται τα επίπεδα φόρτισης του δικτύου.

Κατά το σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων, το σημείο μέγιστης φόρτισης μπορεί να καθοριστεί με σταδιακή αύξηση του φορτίου και συνεχή έλεγχο ύπαρξης λύσεων της μελέτης ροής φορτίου. Όμως κατά τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος είναι πολύ σημαντικό να υπολογιστεί το μέγιστο φορτίο το οποίο θα μπορούσε να τροφοδοτήσει το σύστημα χρησιμοποιώντας τα δεδομένα λειτουργίας του δικτύου στην παρούσα φάση αλλά και στο παρελθόν. Η διαφοροποίηση του δείκτη VSI σχετικά με το συντελεστή φόρτισης φαίνεται στο διάγραμμα 4.12. Από αυτό το σχήμα μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η σχέση αυτών των μεγεθών είναι σαφώς μη γραμμική. Μία τέτοια κατά προσέγγιση χαρακτηριστική μπορεί να μην παρέχει σωστό υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου. Η τιμή του λ η οποία βρίσκεται με γραμμικό υπολογισμό του VSI (χρησιμοποιώντας το παρόν και το αμέσως προηγούμενο σημείο λειτουργίας) φαίνεται στον πίνακα 4.7. Η ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton – Raphson καταλήγει σε λ_{cr}=1.57. Από τον πίνακα 4.8 μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το σφάλμα στο εκτιμώμενο κρίσιμο φορτίο είναι πολύ μεγάλο.



Σχήμα 4.12 Μεταβολή του VSI συναρτήσει του λ

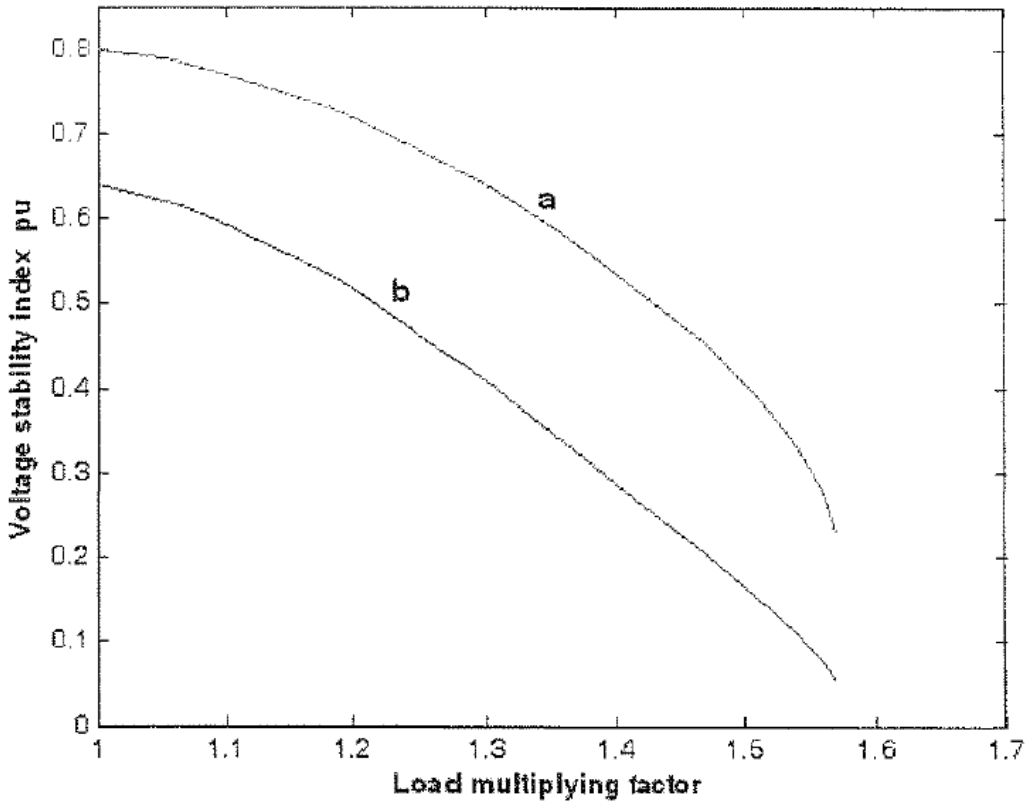
λ	VSI
1	0.7995
1.1	0.7693
1.2	0.7204
1.3	0.6388
1.4	0.5364
1.5	0.4057
1.57	0.2303

Πίνακας 4.7 Δείκτης ευστάθειας τάσης VSI και συντελεστής φόρτισης λ

Υπολογισμός λ_{cr}	**Ποσοστό σφάλματος (%)**
3.64	132.29
2.67	70.26
2.08	32.66
1.92	22.54
1.81	15.31
1.73	10.27

Πίνακας 4.8 Υπολογισμός κρίσιμου συντελεστή φόρτισης λ_{cr} και ποσοστό σφάλματος

Η εναλλακτική λύση προκειμένου να μειωθεί το ποσοστό του σφάλματος είναι παράγοντας ένα περισσότερο ή λιγότερο γραμμικό δείκτη ευστάθειας. Αν ο δείκτης VSI υψωθεί στο τετράγωνο, παρατηρείται ότι η χαρακτηριστική VSI^2-λ μπορεί να παρέχει πιο ακριβή τρόπο υπολογισμού του κρίσιμου φορτίου με γραμμική προσέγγιση συγκριτικά με τη χρήση της χαρακτηριστικής VSI – λ. Οι τιμές του συντελεστή φόρτισης οι οποίες υπολογίζονται από τη γραμμική προσέγγιση της χαρακτηριστικής VSI^2-λ φαίνονται στον πίνακα 4.9. Το παραγόμενο σφάλμα φαίνεται επίσης στον πίνακα 4.10. Τα αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων, μας δείχνουν σαφώς ότι τα επίπεδα σφάλματος μειώνονται και για λ μεγαλύτερο από 1.3, το μεγαλύτερο σφάλμα που παρατηρείται κυμαίνεται περίπου σε ποσοστό 5%.



Σχήμα 4.13 Μεταβολή του VSI (καμπύλη a) και του VSI2 (καμπύλη b) σχετικά με τον συντελεστή πολλαπλασιασμού φορτίου

λ	VSI
1	0.6392
1.1	0.5919
1.2	0.5189
1.3	0.4081
1.4	0.2877
1.5	0.1646
1.57	0.0531

Πίνακας 4.9 VSI^2 και συντελεστής φόρτισης λ

Υπολογισμός λ_{cr}	**Ποσοστό σφάλματος (%)**
2.35	49.68
1.91	21.60
1.66	5.70
1.63	3.82
1.64	4.46

Πίνακας 4.10 Υπολογισμός κρίσιμου συντελεστή φόρτισης λcr και ποσοστό σφάλματος

Για κάθε ενεργειακό σύστημα είναι εξαιρετικά σημαντικός ο καθορισμός του κατάλληλου σημείου στην τοπολογία του δικτύου για την τοποθέτηση είτε σειριακής είτε εγκάρσιας αντιστάθμισης αέργου ισχύος. Η φόρτιση της γραμμής και κατά συνέπεια ο 'LL' μπορεί να μειωθεί με την προσθήκη ενός εν σειρά πυκνωτή. Για σκοπούς επαλήθευσης του παραπάνω σκεπτικού, ένας πυκνωτής τοποθετείται σε σειρά σε διαφορετικές γραμμές γύρω από την κρίσιμη γραμμή του δικτύου ($L_{2.}$). Ο κρίσιμος συντελεστής φόρτισης του συστήματος καθορίζεται στη συνέχεια με αναλύσεις ροής φορτίου με μία σταθερή χωρητική αντίσταση της τάξεως των 0.1 pu στις γραμμές ανάμεσα στους ζυγούς 1&3, 2&4, 2&5 και 2&6, δηλαδή στις γραμμές L_2, L_3, L_5 και L_6. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στον πίνακα 4.11, απ' όπου παρατηρούμε ότι η εν σειρά χωρητική αντίδραση στη γραμμή L_2 παρέχει τη μέγιστη τιμή του λ_{cr} και το αντίστοιχο κρίσιμο φορτίο υπολογίζεται στα (1.67*310.23) 518.08 MVA. Ως εκ τούτου, από τα αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η τεχνική η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, αναγνώρισε ορθά την κρίσιμη γραμμή του συστήματος.

Θέση εν σειρά χωρητικότητας	**Ζυγοί (από - σε)**	**λ_{cr}**
Χωρίς πυκνωτή	-	1.57
Γραμμή L_2	1-3	1.67
Γραμμή L_3	2-4	1.59
Γραμμή L_5	2-5	1.64
Γραμμή L_6	2-6	1.61

Πίνακας 4.11 Κρίσιμος συντελεστής φόρτισης με εν σειρά πυκνωτή αντιστάθμισης αέργου ισχύος

Ομοίως, χρησιμοποιούμε αντιστάθμιση με εγκάρσιο πυκνωτή με χωρητικότητα 0.5 pu σε διαφορετικούς ζυγούς του δικτύου, γύρω από τον κρίσιμο ζυγό (30). Οι τιμές του λ_{cr} που παίρνουμε με τον πυκνωτή στους ζυγούς φορτίου 5, 7, 26 και 30, δίνονται στον πίνακα 4.12. Παρατηρούμε ότι η αντιστάθμιση στο ζυγό 30 δίνει τη μεγαλύτερη τιμή του λ_{cr} και κατά συνέπεια καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο ζυγός 30 είναι πράγματι ο πιο κρίσιμος ζυγός του δικτύου.

Θέση εγκάρσιου πυκνωτή	**λ_{cr}**
Χωρίς πυκνωτή	1.57
Ζυγός 5	1.65
Ζυγός 7	1.66
Ζυγός 26	1.65
Ζυγός 30	1.67

Πίνακας 4.12 Κρίσιμος συντελεστής φόρτισης με εγκάρσιο πυκνωτή αντιστάθμισης αέργου ισχύος

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Αρχικά μας απασχόλησε το πρόβλημα της ανάλυσης ευστάθειας τάσης και η μεταβατική συμπεριφορά ενός απλού Σ.Η.Ε., ενώ στη συνέχεια προβήκαμε στην πρόταση μιας μεθοδολογίας που αναφέρεται στην ανάλυση ευστάθειας τάσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Όσον αφορά στο πρώτο κομμάτι της εργασίας μας, μελετήθηκε το φαινόμενο της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης ενός απλού Σ.Η.Ε. με φορτίο επαγωγικού κινητήρα έπειτα από μεγάλης κλίμακας διαταραχές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή της χρήσης φορτίου επαγωγικού κινητήρα έγινε λόγω των ιδιαίτερων προβλημάτων που παρουσιάζει, αφού οι απαιτήσεις του σε άεργο ισχύ, το καθιστούν εξαιρετικά «ευπαθές» και ένα από τους δυσκολότερους τύπους φορτίων. Η μελέτη της βραχυπρόθεσμης ευστάθειας τάσης διεκπεραιώθηκε κυρίως μέσω της μελέτης των χαρακτηριστικών P-V καμπυλών τόσο του δικτύου όσο και της επαγωγικής μηχανής. Για ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στα άκρα της μηχανής, τόσο η τάση όσο και η ισχύς του κινητήρα μηδενίζονται, ενώ παραμένουν μηδενικές καθ' όλη τη διάρκεια του σφάλματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή επιβράδυνση της μηχανής. Εντούτοις, με την εκκαθάριση του σφάλματος, η τερματική τάση του κινητήρα και η ισχύς του αυξάνονται απότομα. Ανάλογα με το χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος, η μηχανή μπορεί να οδηγηθεί σε ένα νέο ευσταθές σημείο λειτουργίας στη μετασφαλματική περίοδο ή υπάρχει περίπτωση το σύστημα να «καταρρεύσει». Αναπτύχθηκε, λοιπόν, μια τεχνική καθορισμού αυτού του **κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος** t_{cr}, που μπορεί να εξασφαλίσει ευσταθή μετασφαλματική λειτουργία του συστήματος. Πράγματι, τα αποτελέσματα της εξομοίωσης μας έδειξαν ότι, εάν η εκκαθάριση του σφάλματος γίνει σε χρόνο $t \le t_{cr}$, τότε η ολίσθηση του κινητήρα αρχικά αυξάνεται ελαφρά προτού μειωθεί σε μία νέα ευσταθή τιμή.

Αντίθετα, όταν το σφάλμα «καθαρίζει» σε χρόνο $t > t_{cr}$, η ολίσθηση αυξάνεται μονότονα και τελικά ο κινητήρας σταματά να λειτουργεί. Επίσης, μελετήθηκε **η κρίσιμη τιμή ολίσθησης του κινητήρα** s_{cr}, που μας δείχνει τη μέγιστη τιμή της ολίσθησης προτού ο κινητήρας οδηγηθεί σε αστάθεια. Τέλος, παρατηρήθηκε η επίδραση της χρήσης πυκνωτών στην τιμή του t_{cr}.

Στο δεύτερο σκέλος της μελέτης μας παρουσιάστηκε μια μέθοδος καθορισμού ενός **δείκτη ευστάθειας τάσης (VSI)** ενός ενεργειακού συστήματος. Αναπτύχθηκε αρχικά μία έκφραση για τον **δείκτη ευστάθειας τάσης γραμμής (LVSI)** ενός απλού συστήματος δύο ζυγών. Κατόπιν, η μεθοδολογία μας επεκτάθηκε σε ένα γενικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον LVSI είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε μόνο τις σύνθετες τάσεις των ζυγών και όχι τις παραμέτρους των γεννητριών, των γραμμών και του φορτίου. Γι' αυτό, σε ένα γενικό σύστημα ισχύος, ο LVSI των γραμμών μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας τις σύνθετες τάσεις ζυγών που εξάγονται από την μελέτη ροής φορτίου. Με βάση τις τιμές LVSI των γραμμών αναγνωρίζονται όλα τα πιθανά μονοπάτια ροής ισχύος του δικτύου. Ακολούθως, καθορίστηκε ένας **δείκτης ευστάθειας τάσης μονοπατιού ροής ισχύος (PVSI)**. Ο δρόμος του δικτύου με τον μικρότερο PVSI θεωρείται το **κρίσιμο μονοπάτι** του συστήματος. Επίσης ο δείκτης PVSI του κρίσιμου μονοπατιού αποτελεί τον δείκτη ευστάθειας τάσης VSI όλου του συστήματος. Η ορθότητα της επιλογής της κρίσιμης γραμμής και του κρίσιμου ζυγού μπορεί να επιβεβαιωθεί με γνωστές μεθόδους. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε ένα μεγάλο σύστημα 30 ζυγών (IEEE πειραματικό σύστημα 30 ζυγών) όπου προσδιορίστηκαν ο κρίσιμος ζυγός και η κρίσιμη γραμμή, δηλαδή τα πιο αδύναμα τμήματα του δικτύου. Τέλος, μελετήθηκες βιβλιογραφικά η τοποθέτηση πυκνωτών για αντιστάθμιση αέργου ισχύος γύρω από την κρίσιμη γραμμή και τον κρίσιμο ζυγό. Διαπιστώνεται έτσι η σημασία της τοπικής αντιστάθμισης αέργου ισχύος, που αποτελεί τη συμπληρωματική μέθοδο κάλυψης των απαιτήσεων του συστήματος σε άεργο ισχύ και ελέγχου της τάσης.

Βιβλιογραφία

- "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλου, Νικολάου Α. Βοβού, Καθηγητών Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2005.
- "Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλου, Καθηγητή Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2007.
- "Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Νικολάου Α. Βοβού, Καθηγητή Πανεπιστημίου Πατρών, Σεπτέμβριος 2004.
- "Ηλεκτρικές Μηχανές Α' Τόμος 1", Αθανασίου Ν. Σαφάκα, Καθηγητή Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2005
- "Power System Analysis", Hadi Saadat, Milwaukee School of Engineering, June 2002.
- Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π., Ειρήνη Δ. Γαϊτάνου, "Μοντελοποίηση και Ανάλυση λειτουργίας αυτόνομου ηλεκτρικού συστήματος Νήσου Ρόδου", Επιβλέπων :Γεώργιος Κορρές, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π., "Μελέτη Ροής Φορτίου σε Δίκτυο Μέσης Τάσης με Διεσπαρμένη Παραγωγή", Επιβλέπων Νικόλαος Χατζηαργυρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π. Αθήνα, Οκτώβριος 2008
- http://electrica.uc3m.es/pablole/new_england.raw
- http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/search.pl?handle=DT2007-0086
- http://www.buildnet.gr/default.asp?pid=160&la=1&catid=140&artid=299
- C.W. Taylor, "Power System Voltage Stability", New York: McGraw Hill, 1994.
- P. Kundur, "Power System Stability and Control" New York: McGraw Hill, 1994.

- T.V. Cutsem and C. Vournas, "Voltage Stability of electric power system", Norwell, MA: Kluwer, 1998.
- V. Ajjarapu and B. Lee, "Biobliography on voltage stability", IEEE Transaction on Power Systems, 1998.
- T.V. Cutsem, "Voltage instability: phenomena, countermeasures and analysis methods", Proccedings of the IEEE, February 2000
- C.D. Vournas, E.G. Potamianakis, C. Moors and T.V. Cutsem, "An educational simulation tool for power system control and stability", IEEE Transaction on power systems, Vol.19, 2004
- F. Gubina and B. Strmcnik, "Voltage collapse proximity index determination using voltage phasors approach", IEEE Transaction on power systems, Vol. 10, May 1995

Παράρτημα

Δεδομένα του υπό μελέτη συστήματος για βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης

Αντίδραση του συστήματος σε pu (με βάση τα 800MVA)

Στην περίπτωση του σχήματος 3.2:

$V_{th} = 1.05$

$X_{th} = 0.08$

$X_{14} = 0.128$ (διπλή γραμμή)

$X_{14} = 0.256$

$X_c = 0.1875$

Στην περίπτωση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος:

$V_{th} = 1.05$

$X_{th} = 0.08$

$X_{14} = 0.2216$

$X_{24} = 0.128$

$X_{34} = 0.032$

$X_c = 0.3125$

Δεδομένα για τον επαγωγικό κινητήρα σε pu (με βάση τα 800MVA):

$R_s = 0$

$X_s = 0.1$

$X_m = 3.2$

$R_r = 0.018$

$X_r = 0.18$

$t_m = 0.8\,pu$

$H = 0.5s$ για τον καθορισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος

$H = 2.5$ για την περίπτωση της βραχυπρόθεσμης μελέτης ευστάθειας τάσης

Στοιχεία του υπό μελέτη συστήματος IEEE 30 ζυγών

Bus data

```
basemva = 100;  accuracy = 0.001; accel = 1.8; maxiter = 100;

%        IEEE 30-BUS TEST SYSTEM (American Electric Power)
%        Bus Bus  Voltage Angle   ---Load---- -------Generator-----
Static Mvar
%        No  code Mag.    Degree  MW    Mvar  MW  Mvar Qmin Qmax
+Qc/-Ql
busdata=[1   1    1.06    0.0     0.0   0.0    0.0  0.0   0   0
0
         2   2    1.043   0.0   21.70  12.7   40.0  0.0 -40  50
0
         3   0    1.0     0.0     2.4   1.2    0.0  0.0   0   0
0
         4   0    1.06    0.0     7.6   1.6    0.0  0.0   0   0
0
         5   2    1.01    0.0    94.2  19.0    0.0  0.0 -40  40
0
         6   0    1.0     0.0     0.0   0.0    0.0  0.0   0   0
0
         7   0    1.0     0.0    22.8  10.9    0.0  0.0   0   0
0
         8   2    1.01    0.0    30.0  30.0    0.0  0.0 -30  40
0
         9   0    1.0     0.0     0.0   0.0    0.0  0.0   0   0
0
        10   0    1.0     0.0     5.8   2.0    0.0  0.0  -6  24
19
        11   2    1.082   0.0     0.0   0.0    0.0  0.0   0   0
0
        12   0    1.0     0       11.2  7.5    0    0     0   0
0
        13   2    1.071   0         0    0.0    0    0    -6  24
0
        14   0    1       0       6.2   1.6    0    0     0   0
0
        15   0    1       0       8.2   2.5    0    0     0   0
0
        16   0    1       0       3.5   1.8    0    0     0   0
0
        17   0    1       0       9.0   5.8    0    0     0   0
0
        18   0    1       0       3.2   0.9    0    0     0   0
0
        19   0    1       0       9.5   3.4    0    0     0   0
0
        20   0    1       0       2.2   0.7    0    0     0   0
0
        21   0    1       0      17.5  11.2    0    0     0   0
0
        22   0    1       0       0     0.0    0    0     0   0
0
        23   0    1       0       3.2   1.6    0    0     0   0
0
```

```
        24    0    1        0        8.7    6.7    0    0      0    0
4.3
        25    0    1        0        0      0.0    0    0      0    0
0
        26    0    1        0        3.5    2.3    0    0      0    0
0
        27    0    1        0        0      0.0    0    0      0    0
0
        28    0    1        0        0      0.0    0    0      0    0
0
        29    0    1        0        2.4    0.9    0    0      0    0
0
        30    0    1        0       10.6    1.9    0    0      0    0
0];
```

Line data

```
%                                          Line code
%          Bus bus    R       X     1/2 B   = 1 for lines
%          nl  nr  p.u.   p.u.   p.u.     > 1 or < 1 tr. tap at bus nl
linedata=[1   2   0.0192   0.0575   0.02640    1
          1   3   0.0452   0.1852   0.02040    1
          2   4   0.0570   0.1737   0.01840    1
          3   4   0.0132   0.0379   0.00420    1
          2   5   0.0472   0.1983   0.02090    1
          2   6   0.0581   0.1763   0.01870    1
          4   6   0.0119   0.0414   0.00450    1
          5   7   0.0460   0.1160   0.01020    1
          6   7   0.0267   0.0820   0.00850    1
          6   8   0.0120   0.0420   0.00450    1
          6   9   0.0      0.2080   0.0    0.978
          6  10   0         .5560   0      0.969
          9  11   0         .2080   0          1
          9  10   0         .1100   0          1
          4  12   0         .2560   0      0.932
         12  13   0         .1400   0          1
         12  14    .1231    .2559   0          1
         12  15    .0662    .1304   0          1
         12  16    .0945    .1987   0          1
         14  15    .2210    .1997   0          1
         16  17    .0824    .1923   0          1
         15  18    .1073    .2185   0          1
         18  19    .0639    .1292   0          1
         19  20    .0340    .0680   0          1
         10  20    .0936    .2090   0          1
         10  17    .0324    .0845   0          1
         10  21    .0348    .0749   0          1
         10  22    .0727    .1499   0          1
         21  22    .0116    .0236   0          1
         15  23    .1000    .2020   0          1
         22  24    .1150    .1790   0          1
         23  24    .1320    .2700   0          1
         24  25    .1885    .3292   0          1
         25  26    .2544    .3800   0          1
         25  27    .1093    .2087   0          1
         28  27     0       .3960   0      0.968
         27  29    .2198    .4153   0          1
         27  30    .3202    .6027   0          1
         29  30    .2399    .4533   0          1
          8  28    .0636    .2000   0.0214     1
          6  28    .0169    .0599   0.065      1];

lfybus                          % form the bus admittance matrix
lfgauss               % Load flow solution by Gauss-Seidel method
busout              % Prints the power flow solution on the screen
lineflow          % Computes and displays the line flow and losses
```

Πρόγραμμα 'lfybus'

```
%  This program obtains th Bus Admittance Matrix for power flow
solution
%  Copyright (c) 1998 by H. Saadat

j=sqrt(-1); i = sqrt(-1);
nl = linedata(:,1); nr = linedata(:,2); R = linedata(:,3);
X = linedata(:,4); Bc = j*linedata(:,5); a = linedata(:, 6);
nbr=length(linedata(:,1)); nbus = max(max(nl), max(nr));
Z = R + j*X; y= ones(nbr,1)./Z;         %branch admittance
for n = 1:nbr
if a(n) <= 0  a(n) = 1; else end
Ybus=zeros(nbus,nbus);     % initialize Ybus to zero
                % formation of the off diagonal elements
for k=1:nbr;
       Ybus(nl(k),nr(k))=Ybus(nl(k),nr(k))-y(k)/a(k);
       Ybus(nr(k),nl(k))=Ybus(nl(k),nr(k));
    end
end
              % formation of the diagonal elements
for  n=1:nbus
     for k=1:nbr
         if nl(k)==n
         Ybus(n,n) = Ybus(n,n)+y(k)/(a(k)^2) + Bc(k);
         elseif nr(k)==n
         Ybus(n,n) = Ybus(n,n)+y(k) +Bc(k);
         else, end
     end
end
clear Pgg
```

Πρόγραμμα 'Lfgauss'

```
%   Power flow solution by Gauss-Seidel method
%   Copyright (c) 1998 by  H. Saadat
% Revision 1 (Aug. 99) Modified to include two or more parallel lines
Vm=0; delta=0; yload=0; deltad =0;
nbus = length(busdata(:,1));
kb=[];Vm=[]; delta=[]; Pd=[]; Qd=[]; Pg=[]; Qg=[]; Qmin=[]; Qmax=[];
% Added (6-8-00)
Pk=[]; P=[]; Qk=[]; Q=[]; S=[]; V=[]; % Added (6-8-00)
for k=1:nbus
n=busdata(k,1);
kb(n)=busdata(k,2); Vm(n)=busdata(k,3); delta(n)=busdata(k, 4);
Pd(n)=busdata(k,5); Qd(n)=busdata(k,6); Pg(n)=busdata(k,7); Qg(n) =
busdata(k,8);
Qmin(n)=busdata(k, 9); Qmax(n)=busdata(k, 10);
Qsh(n)=busdata(k, 11);
    if Vm(n) <= 0  Vm(n) = 1.0; V(n) = 1 + j*0;
    else delta(n) = pi/180*delta(n);
         V(n) = Vm(n)*(cos(delta(n)) + j*sin(delta(n)));
         P(n)=(Pg(n)-Pd(n))/basemva;
         Q(n)=(Qg(n)-Qd(n)+ Qsh(n))/basemva;
         S(n) = P(n) + j*Q(n);
    end
DV(n)=0;
end
num = 0; AcurBus = 0; converge = 1;
Vc = zeros(nbus,1)+j*zeros(nbus,1); Sc =
zeros(nbus,1)+j*zeros(nbus,1);

while exist('accel')~=1
   accel = 1.3;
end
while exist('accuracy')~=1
   accuracy = 0.001;
end
while exist('basemva')~=1
   basemva= 100;
end
while exist('maxiter')~=1
   maxiter = 100;
end
%%%% added for parallel lines (Aug. 99)
mline=ones(nbr,1);
for k=1:nbr
      for m=k+1:nbr
         if((nl(k)==nl(m)) & (nr(k)==nr(m)));
            mline(m)=2;
         elseif ((nl(k)==nr(m)) & (nr(k)==nl(m)));
         mline(m)=2;
         else, end
      end
   end
%%%   end of statements for parallel lines (Aug. 99)
iter=0;
maxerror=10;
while maxerror >= accuracy & iter <= maxiter
iter=iter+1;
  for n = 1:nbus;
  YV = 0+j*0;
```

```
    for L = 1:nbr;
            if (nl(L) == n & mline(L) == 1), k=nr(L);   %modified to
handle parallel lines (Aug. 99)
            YV = YV + Ybus(n,k)*V(k);
            elseif (nr(L) == n & mline(L)==1), k=nl(L); %modified to
handle parallel lines (Aug. 99)
                YV = YV + Ybus(n,k)*V(k);
            end
    end
       Sc = conj(V(n))*(Ybus(n,n)*V(n) + YV) ;
       Sc = conj(Sc);
       DP(n) = P(n) - real(Sc);
       DQ(n) = Q(n) - imag(Sc);
         if kb(n) == 1
         S(n) =Sc; P(n) = real(Sc); Q(n) = imag(Sc); DP(n) =0;
DQ(n)=0;
         Vc(n) = V(n);
         elseif kb(n) == 2
         Q(n) = imag(Sc); S(n) = P(n) + j*Q(n);

           if Qmax(n) ~= 0
             Qgc = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
             if abs(DQ(n)) <= .005 & iter >= 10 % After 10 iterations
               if DV(n) <= 0.045                % the Mvar of
generator buses are
                 if Qgc < Qmin(n),              % tested. If not
within limits Vm(n)
                 Vm(n) = Vm(n) + 0.005;         % is changed in steps
of 0.005 pu
                 DV(n) = DV(n)+.005;            % up to .05  pu in
order to bring
                 elseif Qgc > Qmax(n),          % the generator Mvar
within the
                 Vm(n) = Vm(n) - 0.005;         % specified limits.
                 DV(n)=DV(n)+.005; end
               else, end
             else,end
           else,end
         end
       if kb(n) ~= 1
       Vc(n) = (conj(S(n))/conj(V(n)) - YV )/ Ybus(n,n);
       else, end
          if kb(n) == 0
          V(n) = V(n) + accel*(Vc(n)-V(n));
          elseif kb(n) == 2
          VcI = imag(Vc(n));
          VcR = sqrt(Vm(n)^2 - VcI^2);
          Vc(n) = VcR + j*VcI;
           V(n) = V(n) + accel*(Vc(n) -V(n));
          end
   end
  maxerror=max( max(abs(real(DP))), max(abs(imag(DQ))) );
   if iter == maxiter & maxerror > accuracy
   fprintf('\nWARNING: Iterative solution did not converged after ')
   fprintf('%g', iter), fprintf(' iterations.\n\n')
   fprintf('Press Enter to terminate the iterations and print the
results \n')
   converge = 0; pause, else, end

end
```

```
if converge ~= 1
   tech= ('                          ITERATIVE SOLUTION DID NOT
CONVERGE'); else,
   tech=('                       Power Flow Solution by Gauss-Seidel
Method');
end
k=0;
for n = 1:nbus
  Vm(n) = abs(V(n)); deltad(n) = angle(V(n))*180/pi;
     if kb(n) == 1
     S(n)=P(n)+j*Q(n);
     Pg(n) = P(n)*basemva + Pd(n);
     Qg(n) = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
     k=k+1;
     Pgg(k)=Pg(n);
     elseif  kb(n) ==2
     k=k+1;
     Pgg(k)=Pg(n);
     S(n)=P(n)+j*Q(n);
     Qg(n) = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
     end
yload(n) = (Pd(n)- j*Qd(n)+j*Qsh(n))/(basemva*Vm(n)^2);
end
Pgt = sum(Pg);  Qgt = sum(Qg); Pdt = sum(Pd); Qdt = sum(Qd); Qsht =
sum(Qsh);
busdata(:,3)=Vm'; busdata(:,4)=deltad';
clear  AcurBus  DP  DQ  DV  L Sc Vc VcI VcR YV converge delta
```

Πρόγραμμα 'Busout'

```
%  This program prints the power flow solution in a tabulated form
%  on the screen.
%
%  Copyright (C) 1998 by H. Saadat.

%clc
disp(tech)
fprintf('                      Maximum Power Mismatch = %g \n',
maxerror)
fprintf('                              No. of Iterations = %g \n\n',
iter)
head =['    Bus  Voltage  Angle    ------Load------    ---Generation-
--   Injected'
       '    No.  Mag.     Degree     MW       Mvar       MW
Mvar       Mvar '
       '
'];
disp(head)
for n=1:nbus
     fprintf(' %5g', n), fprintf(' %7.3f', Vm(n)),
     fprintf(' %8.3f', deltad(n)), fprintf(' %9.3f', Pd(n)),
     fprintf(' %9.3f', Qd(n)),  fprintf(' %9.3f', Pg(n)),
     fprintf(' %9.3f ', Qg(n)), fprintf(' %8.3f\n', Qsh(n))
end
    fprintf('      \n'), fprintf('    Total              ')
    fprintf(' %9.3f', Pdt), fprintf(' %9.3f', Qdt),
    fprintf(' %9.3f', Pgt), fprintf(' %9.3f', Qgt), fprintf('
%9.3f\n\n', Qsht)
```

Πρόγραμμα 'lineflow'

```
%  This program is used in conjunction with lfgauss or lf Newton
%  for the computation of line flow and line losses.
%
%  Copyright (c) 1998 H. Saadat
SLT = 0;
fprintf('\n')
fprintf('                              Line Flow and Losses \n\n')
fprintf('     --Line--  Power at bus & line flow    --Line loss--
Transformer\n')
fprintf('     from  to    MW      Mvar     MVA       MW      Mvar
tap\n')

for n = 1:nbus
busprt = 0;
   for L = 1:nbr;
       if busprt == 0
       fprintf('   \n'), fprintf('%6g', n), fprintf('      %9.3f',
P(n)*basemva)
       fprintf('%9.3f', Q(n)*basemva), fprintf('%9.3f\n',
abs(S(n)*basemva))

       busprt = 1;
       else, end
       if nl(L)==n      k = nr(L);
       In = (V(n) - a(L)*V(k))*y(L)/a(L)^2 + Bc(L)/a(L)^2*V(n);
       Ik = (V(k) - V(n)/a(L))*y(L) + Bc(L)*V(k);
       Snk = V(n)*conj(In)*basemva;
       Skn = V(k)*conj(Ik)*basemva;
       SL  = Snk + Skn;
       SLT = SLT + SL;
       elseif nr(L)==n  k = nl(L);
       In = (V(n) - V(k)/a(L))*y(L) + Bc(L)*V(n);
       Ik = (V(k) - a(L)*V(n))*y(L)/a(L)^2 + Bc(L)/a(L)^2*V(k);
       Snk = V(n)*conj(In)*basemva;
       Skn = V(k)*conj(Ik)*basemva;
       SL  = Snk + Skn;
       SLT = SLT + SL;
       else, end
         if nl(L)==n | nr(L)==n
         fprintf('%12g', k),
         fprintf('%9.3f', real(Snk)), fprintf('%9.3f', imag(Snk))
         fprintf('%9.3f', abs(Snk)),
         fprintf('%9.3f', real(SL)),
             if nl(L) ==n & a(L) ~= 1
             fprintf('%9.3f', imag(SL)), fprintf('%9.3f\n', a(L))
             else, fprintf('%9.3f\n', imag(SL))
             end
         else, end
  end
end
SLT = SLT/2;
fprintf('   \n'), fprintf('    Total loss                          ')
fprintf('%9.3f', real(SLT)), fprintf('%9.3f\n', imag(SLT))
clear Ik In SL SLT Skn Snk
```