



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ανάλυση και Μελέτη Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία

Πανούσης Σωτήριος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Σεπτέμβριος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

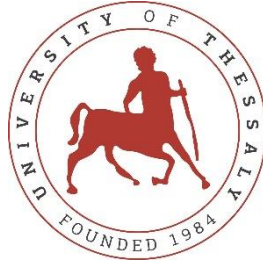
Ανάλυση και Μελέτη Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία

Πανούσης Σωτήριος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Σεπτέμβριος 2021



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Analysis and Study of Power Systems

Diploma Thesis

Panousis Sotirios

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

September 2021

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων	Μπαργιώτας Δημήτριος Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Τσουκαλάς Ελευθέριος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Δασκαλοπούλου Ασπασία Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους μου και τους καθηγητές μου για την βοήθεια που μου προσέφεραν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Πανούσης Σωτήριος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάλυση και την μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την μεταβατική ευστάθεια και πιο συγκεκριμένα μελετάται το σύστημα 9 ζυγών της IEEE με χρήση του λογισμικού προσομοίωσης PSS®EXplore της Siemens.

Στο 1^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα επιμέρους στοιχεία που απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με μία σύντομη περιγραφή τους, όπως είναι οι σύγχρονες γεννήτριες, οι μετασχηματιστές, οι γραμμές μεταφοράς και τα φορτία.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιλαμβάνεται μία σύντομη περιγραφή της ανάλυσης ροής φορτίου, τον τρόπο κατασκευής του πίνακα αγωγιμοτήτων (Y_{bus}), τον τρόπο με τον οποίο σχηματίζονται οι εξισώσεις ροής φορτίου, καθώς επίσης και οι μέθοδοι Gauss, Gauss-Seidel και Newton-Raphson για την επίλυση των εξισώσεων αυτών.

Στο 3^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η μελέτη των σφαλμάτων (συμμετρικών και ασύμμετρων), παρουσιάζοντας θεωρήματα και μεθόδους για την μελέτη τους, αλλά και η μέθοδος για την συστηματική ανάλυση των σφαλμάτων σε μεγάλα δίκτυα.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναλύεται η Ευστάθεια Μόνιμης Κατάστασης, η Ευστάθεια Μεταβατικής Κατάστασης, η Δυναμική Ευστάθεια, με ιδιαίτερη έμφαση στην Ευστάθεια Μεταβατικής Κατάστασης στην οποία περιλαμβάνεται το Κριτήριο των Ίσων Εμβαδών και άλλες μέθοδοι για την μελέτη της.

Στο 5^ο κεφάλαιο χρησιμοποιείται το λογισμικό προσομοίωσης PSS®EXplore για την μελέτη της μόνιμης και της μεταβατικής λειτουργίας του συστήματος 9 ζυγών της IEEE. Παρατίθενται τα ονομαστικά δεδομένα του δικτύου, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της ροής φορτίου, της μελέτη τριφασικών βραχυκυκλωμάτων και της δυναμικής προσομοίωσης του δικτύου και της εύρεσης του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφαλμάτων του δικτύου.

Στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται σύνοψη της παρούσας διπλωματικής εργασίας και γίνεται η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την χρησιμότητα της μελέτης των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the analysis and study of electricity systems in terms of steady state and transient stability and more specifically contains the study and analysis of the 9-bus system of IEEE using the simulation software PSS®EXplore by Siemens.

Chapter 1 describes the individual components that make up an electricity system with a brief description of them, such as modern generators, transformers, transmission lines and loads.

Chapter 2 contains a brief description of the load flow analysis, how the conduction table (Y_{bus}) is constructed, how the load flow equations are formed, as well as the Gauss, Gauss-Seidel and Newton-Raphson methods for solving of these equations.

Chapter 3 contains the study of the faults (symmetrical and unsymmetrical), theoretically and methods for their study are presented, but also the method for the systematic analysis of the faults in large networks.

Chapter 4 analyzes the Steady State Stability, the Transient Stability, the Dynamic Stability, with emphasis on the Transient Stability which includes the Criterion of Equal Areas and other methods for its study.

Chapter 5 uses the PSS®EXplore simulation software to study the steady state and transient operation of the IEEE 9-bus system. The nominal data of the network are presented, the results of the load flow, the study of three-phase short circuits and the dynamic simulation of the network and the finding of the critical time of clearing the faults of the network are presented and analyzed.

Chapter 6, the present diploma thesis is summarized and conclusions are drawn about the usefulness of the studies of power systems and electricity networks.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xiii
ABSTRACT	xv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	xvii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Σύγχρονες Γεννήτριες	2
1.3 Μετασηματιστές	6
1.3.1 Ιδανικός Μετασηματιστής	7
1.2.2 Τριφασικός Μετασηματιστής	10
1.3 Γραμμές Μεταφοράς	11
1.5 Φορτία	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	16
ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	16
2.1 Εισαγωγή	16
2.2 Ταξινόμηση Ζυγών	20
2.3 Κατασκευή Πίνακα Αγωγιμοτήτων Y_{bus}	21
2.4 Σχηματισμός Εξισώσεων Ροής Φορτίου	21
2.5 Μέθοδος Gauss	23
2.6 Μέθοδος Gauss – Seidel	24
2.7 Μέθοδος Newton – Raphson	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	30
ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ	30
3.1 Εισαγωγή	30
3.2 Συμμετρικά Βραχυκυκλώματα	32
3.2.1 Εισαγωγή	32
3.2.2 Αντοχή σε βραχυκύκλωμα (SCC)	32
3.2.4 Θεώρημα Thevenin	33
3.2.3 Υπολογισμός των Ρευμάτων του Τριφασικού Συμμετρικού Βραχυκυκλώματος	33
3.3 Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα	34
3.3.1 Εισαγωγή	34
3.3.2 Μέθοδος Συμμετρικών Συνιστωσών	34
3.3.3 Ισχύς Συμμετρικών Συνιστωσών	37
3.3.4 Αναπαράσταση Ακολουθιακών Κυκλωμάτων των Στοιχείων του Δικτύου	38

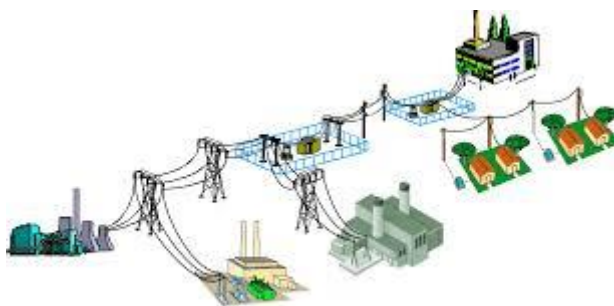
3.3.5	Τύποι Βραχυκυκλωμάτων	39
3.4	Μέθοδος για Συστηματική Ανάλυση Σφαλμάτων σε Μεγάλα Δίκτυα	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....		45
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		45
4.1	Εισαγωγή	45
4.2	Ευστάθεια Μόνιμης Κατάστασης	47
4.3	Ευστάθεια Μεταβατικής Κατάστασης	48
4.3.1	Μέθοδοι Μελέτης Μεταβατικής Ευστάθειας	50
4.3.2	Κριτήριο Ίσων Εμβαδών	51
4.4	Δυναμική Ευστάθεια	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....		56
ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ IEEE 9 ΖΥΓΩΝ		56
5.1	Εισαγωγή	56
5.2	Δεδομένα Συστήματος.....	56
5.3	Ανάλυση Ροής Φορτίου	57
5.4	Συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα.....	59
5.5	Μεταβατική Ευστάθεια	69
5.5.1	Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4	70
5.5.2	Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7	76
5.5.3	Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-7, κοντά στον ζυγό 8	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....		88
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Η εμπορική χρήση του ηλεκτρισμού ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1870 όταν λαμπτήρες τόξου χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά για τον φωτισμό των φάρων και των δρόμων. Το πρώτο ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που περιελάμβανε γεννήτρια, γραμμή μεταφοράς, ασφάλεια, μετρητή και φορτίο κατασκευάστηκε από τον Thomas Edison στην περιοχή της Νέας Υόρκης. Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι μια ευέλικτη και καθαρή πηγή ενέργειας, αρκετά φθηνή και επίσης είναι πάντα διαθέσιμο, καθώς χρησιμοποιείται για πάνω από 100 χρόνια, μπορεί σήμερα να θεωρείται ως αγαθό. Η ηλεκτρική παραγωγή ενέργειας επομένως είναι η ραχοκοκαλιά κάθε μοντέρνας κοινωνίας και θα επικρατούσε χάος αν η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σταματούσε για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η κοινωνία χρειάζεται μηχανικούς οι οποίοι θα ξέρουν και θα μπορούν να σχεδιάσουν, να χτίσουν και να λειτουργήσουν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 1.1. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Για να μπορέσει ένας μηχανικός να σχεδιάσει σωστά ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, να το λειτουργήσει αξιόπιστα, να προτείνει λύσεις για την μελλοντική του βελτίωση, επέκταση ή τροποποίηση και να το εξοπλίσει με τα κατάλληλα συστήματα προστασίας και ελέγχου, πρέπει να κάνει μια σειρά μελετών που θα του δώσουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για να φέρει σε πέρας αυτόν τον σκοπό. Τέτοιες μελέτες είναι οι μελέτες ροής φορτίου, οι μελέτες σφαλμάτων και οι μελέτες ευστάθειας. Για την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος, εξάλλου, είναι απαραίτητες μελέτες οικονομικής λειτουργίας που θα καθορίσουν τον τρόπο με τον οποίο πρέπει να κατανεμηθεί η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των διαφόρων μονάδων παραγωγής, ώστε το σύστημα να λειτουργεί κατά τον βέλτιστο τρόπο από άποψη οικονομίας, απόδοσης και φυσικά αξιοπιστίας. Το σύνολο των μελετών που προαναφέρθηκαν, μέσω των οποίων εκτιμάται η συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στη μόνιμη όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας, χαρακτηρίζονται με τον όρο «ανάλυση ηλεκτρικής ενέργειας».

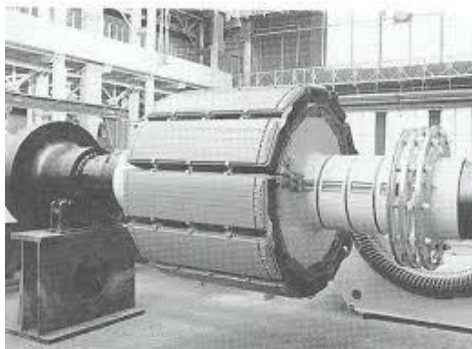
Ένας παραδοσιακός στόχος της ενεργειακής πολιτικής των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παροχή ασφαλούς, αξιόπιστης και με προσιτές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Ένας νέος στόχος πλέον είναι ο περιορισμός των αερίων του θερμοκηπίου, ιδίως CO₂, για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Ως εκ τούτου,

δίνεται αυξημένη έμφαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές με χαμηλές εκπομπές άνθρακα όπως τα εργοστάσια παραγωγής με πυρηνικά ή ορυκτά καύσιμα με εξοπλισμό δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα. Ο προφανής τρόπος ελέγχου του περιβαλλοντικού αντίκτυπου της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και η αύξηση της απόδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται. Επομένως, η εξοικονόμηση ενέργειας και τα μέτρα μείωσης της ζήτησης είναι σημαντικές πτυχές οποιαδήποτε σύγχρονης ενεργειακής πολιτικής.

Η σύγχρονη γεννήτρια, ο τριφασικός μετασχηματιστής, τα φορτία και οι γραμμές μεταφοράς αποτελούν τις βασικές συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια συνοψίζονται τα μοντέλα αυτών των συνιστωσών και να περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργείται το μοντέλο του συνολικού συστήματος από την σύνθεση των μοντέλων των επί μέρους συνιστωσών.

1.2 Σύγχρονες Γεννήτριες

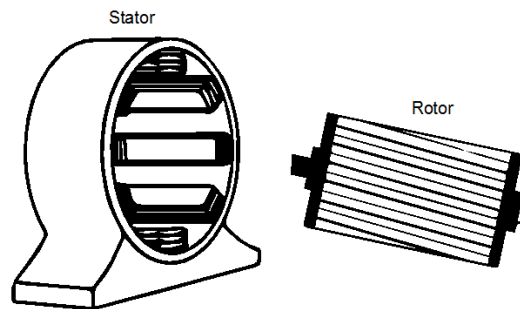
Γεννήτρια ονομάζεται η συσκευή η οποία μετατρέπει την μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική για να χρησιμοποιηθεί σε ένα εξωτερικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται σύγχρονη όταν λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα και συχνότητα στην μόνιμη κατάσταση. Η πρώτη ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια εφευρέθηκε το 1831 από τον Michael Faraday και ονομάστηκε, δίσκος του Faraday . Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας βασίζεται στον νόμο για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή που διατυπώθηκε από τον ίδιο. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες.



Εικόνα 1.2. Σύγχρονη γεννήτρια.

Η σύγχρονη γεννήτρια αποτελεί ένα αξιόπιστο και αποδοτικό μέσο για την μετατροπή άλλων μορφών ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια (Εικόνα 1.2). Σε συνθήκες σταθερής κατάστασης λειτουργούν με ταχύτητα που καθορίζεται από τη συχνότητα των συστημάτων ισχύος και επομένως ονομάζονται σύγχρονες μηχανές. Ως γεννήτριες, οι σύγχρονες μηχανές λειτουργούν παράλληλα στους μεγαλύτερους σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Γεννήτριες ονομαστικής ισχύος της τάξεως μερικών εκατοντάδων μέχρι και πάνω από 1000 MVA είναι κοινή πρακτική στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα. Η μετατροπή από μηχανική σε ηλεκτρική ενέργεια συμβαίνει στην γεννήτρια.

Τα δύο βασικά μέρη των σύγχρονων γεννητριών είναι ο στάτης και ο δρομέας ή ρότορας. Ο στάτης είναι το ακίνητο μέρος και φέρει το τύλιγμα της γεννήτριας, ενώ ο δρομέας που είναι το περιστρεφόμενο μέρος και περιστρέφεται από στρόβιλο ατμού, αερίου ή ύδατος. (Εικόνα 1.3)



Εικόνα 1.3. Στάτης (αριστερά) και δρομέας (δεξιά).

Ο στάτης διαθέτει τρία τυλίγματα που διευθετούνται σε τρεις συμμετρικές ζώνες (μία για κάθε φάση) και απέχουν μεταξύ τους 120° . Στο δρομέα υπάρχουν επίσης τυλίγματα, το τύλιγμα πεδίου ή το τύλιγμα διέγερσης, που τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς ρεύματος, τη διεγέρτρια. Το τύλιγμα αυτό παράγει ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο.

Για τη λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών είναι απαραίτητη η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα με συνεχές ρεύμα. Ο δρομέας είναι εφοδιασμένος με μια περιέλιξη DC που λειτουργεί σαν ηλεκτρομαγνήτης. Όταν ο δρομέας περιστρέφεται και η περιέλιξή του δρομέα διεγείρεται, εμφανίζεται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο αέρα μεταξύ του δρομέα και του σπλισμού. Ο σπλισμός έχει τριφασική περιέλιξη στην οποία μια ηλεκτρεγερτική δύναμη που διαφέρει από το χρόνο δημιουργείται από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Ο δρομέας είναι επομένως ένας μεγάλος περιστρεφόμενος μαγνήτης ο οποίος κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα. Οι δρομείς στις σύγχρονες μηχανές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στους κυλινδρικούς δρομείς που κινούνται από ατμοστρόβιλους στα 3000-3600 rpm και στους δρομείς με έκτυπους πόλους που οδηγούνται συνήθως από υδροστρόβιλους χαμηλής ταχύτητας.

Στον κυλινδρικό δρομέα η περιέλιξη του πεδίου τοποθετείται σε σχισμές, κόβει αξονικά κατά μήκος σε όλο το μήκος του δρομέα. Η διάμετρος του δρομέα είναι συνήθως μεταξύ 1 - 1,50 μέτρα και αυτό κάνει την μηχανή ικανή να λειτουργεί στις 3000 ή 3600 rpm. Αυτές οι γεννήτριες ονομάζονται τουρμπογεννήτριες. Ο δρομέας της τουρμπογεννήτριας έχει ένα ζεύγος πόλων. Αν οι γεννήτριες έχουν περισσότερους πόλους τότε επιλέγονται οι δρομείς έκτυπων πόλων.

Η τροφοδοσία του δρομέα με ρεύμα γίνεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος τροφοδοσίας γίνεται με εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, όπου στον στρεφόμενο δρομέα προσαρμόζονται ψήκτρες, στο κάθε άκρο του δρομέα αντιστοιχεί ένα δαχτυλίδι και έτσι μέσω των ψηκτρών επιτυγχάνεται συνεχόμενη τροφοδοσία του κυκλώματος. Η δεύτερη περίπτωση η τροφοδοσία του δρομέα γίνεται από μια διεγέρτρια μηχανή, η οποία είναι ουσιαστικά μια μικρή γεννήτρια

Η σχεδίαση με έκτυπους πόλους χρησιμοποιείται για γεννήτριες μικρής ταχύτητας. Επειδή οι υδροστρόβιλοι πιο αποδοτικά σε χαμηλες ταχύτητες, οι γεννήτριες που σχεδιάζονται για τέτοιες εφαρμογές έχουν γενικά πολλούς έκτυπους πόλους και περιστρέφονται ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Η σχεδίαση με κυλινδρικό δρομέα συνηθίζεται για

γεννήτριες υψηλής ταχύτητας. Επειδή οι ατμοστρόβιλοι λειτουργούν πιο αποδοτικά σε υψηλές ταχύτητες, οι γεννήτριες που σχεδιάζονται για αυτές τις εφαρμογές έχουν κυλινδρικούς δρομείς και περιστρέφονται ως προς οριζόντιο άξονα.

Οι μηχανές με έκτυπους πόλους έχουν συνήθως τυλίγματα απόσβεσης, που αποτελούνται από βραχυκυκλωμένες ράβδους χαλκού που είναι τοποθετημένες κατά μήκος της επιφάνειας των πόλων. Σκοπός αυτών των τυλιγμάτων είναι η μείωση των μηχανικών ταλαντώσεων του δρομέα που προκαλούνται κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων της μηχανής, όπως κατά την εκκίνησή της ή υπό την επίδραση μη κανονικών συνθηκών λειτουργίας. Οι μηχανές έκτυπων πόλων έχουν συνήθως περισσότερα ζεύγη πόλων και παράγουν συχνότητα 50 Hz ή 60 Hz, μπορούν να λειτουργήσουν με χαμηλότερη περιστροφική ταχύτητα. Η συχνότητα της ΗΕΔ που παράγεται από τα τυλίγματα του στάτη και η ταχύτητα του δρομέα είναι:

$$f = \frac{NP}{60}$$

όπου, f είναι η ηλεκτρική συχνότητα (Hz),

N η ταχύτητα του δρομέα (rpm),

P ο αριθμός από τα ζεύγη πόλων, δηλαδή ο αριθμός των πόλων διαιρεμένος διά δύο.

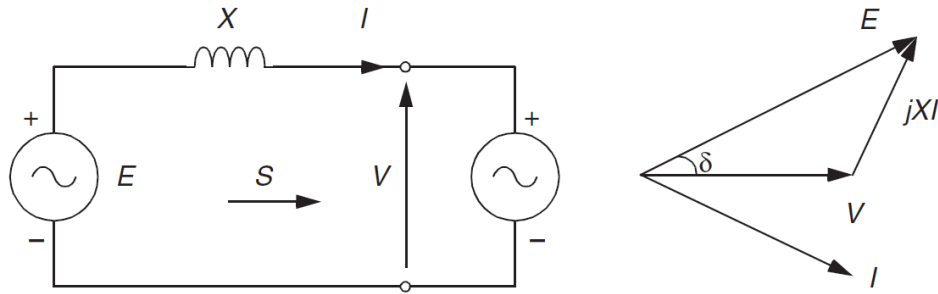
Οι υδροστρόβιλοι στις υδροηλεκτρικούς σταθμούς περιστρέφονται με μερικές εκατοντάδες rpm, ανάλογα με τον τύπο τους, χρειάζονται επομένως πολλά ζεύγη πόλων για να παράγουν 50 Hz ή 60 Hz. Η απόδοση των γεννητριών είναι πού σημαντική για αυτό τον λόγο οι γεννήτριες στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας έχουν απόδοση περίπου 99%. Οι μεγάλες τουρμπογεννήτριες ψύχονται συνήθως με υδρογόνο ή με νερό. Το υδρογόνο έχει επτά φορές την θερμική ικανότητα του αέρα και το νερό δώδεκα φορές. Το υδρογόνο ή το νερό ρέει μέσω των κοίλων περιελίξεων του στάτη. Η ψύξη εξισώνει την κατανομή θερμοκρασίας στην γεννήτρια, επειδή τα θερμά σημεία επηρεάζουν τον κύκλο ζωής της ηλεκτρικής μόνωσης. Η βελτίωση των υλικών, τα νέα τυλίγματα και οι εξελιγμένες τεχνικές ψύξης καθορίζουν την εξέλιξη των μεγάλων τουρμπογεννητριών. Οι γεννήτριες χαμηλής ταχύτητας σε υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι πάντα μεγαλύτερες από τις γεννήτριες υψηλής ταχύτητας ίσης ισχύος σε θερμικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και ένα καλό σύστημα ψύξης αέρα με εναλλάκτη θερμότητας χρησιμοποιείται συνήθως σε μηχανές χαμηλής ταχύτητας.

Προτού συνδεθεί μια σύγχρονη γεννήτρια στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να πληρούνται τέσσερις προϋποθέσεις, η τάση της γεννήτριας πρέπει:

- να έχει την ίδια ακολουθία φάσης με τις τάσεις του δικτύου,
- να έχει την ίδια συχνότητα με το δίκτυο,
- να έχει το ίδιο πλάτος στους ακροδέκτες του με το πλάτος της τάσης του δικτύου,
- να είναι συμφασική με την φάση του δικτύου.

Όταν μια γεννήτρια συνδέεται σε ένα μεγάλο δίκτυο, οι τιμές της τάση εξόδου και της συχνότητάς της είναι κλειδωμένες στις τιμές του συστήματος και δεν μπορούν να αλλάξουν με καμία δράση στη γεννήτρια. Ο άπειρος ζυγός είναι ένα πολύ μεγάλο σύστημα ισχύος του οποίου η τάση και η συχνότητα παραμένουν αμετάβλητες ανεξάρτητα από το ποσό της ενεργούς και της άεργου ισχύος παράγει ή καταναλώνει. Στη μόνιμη κατάσταση

λειτουργίας και υπό συμμετρική φόρτιση η γεννήτρια παρουσιάζει συμμετρική συμμετρία. Κάθε γεννήτρια ξεχωριστά θεωρεί το δίκτυο σαν μια ιδανική πηγή τάσης, με σταθερό πλάτος και με σταθερή συχνότητα και η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό. Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας γεννήτριας συνδεδεμένο στο κύκλωμα ηλεκτρικής ενέργειας με σταθερή τάση συστήματος V φαίνεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1. Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό (αριστερά) και το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα φάσεων (δεξιά).

Επιλέγουμε την κατεύθυνση του ρεύματος να πάει από την γεννήτρια και προς τον άπειρο ζυγό. Έτσι παίρνουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$E = j\omega LI + V = jXI + V$$

Όπου,

I : φασικό ρεύμα $I = |I| \angle -\varphi$ (A)

E : φασική εσωτερική ΗΕΔ της γεννήτριας $E = |E| \angle \delta$ (V)

V : φασική τάση του συστήματος $V = |V| \angle 0$ (V)

X : η αντίδραση της γεννήτριας (Ω)

Η εξίσωση για το ρεύμα είναι:

$$I = \frac{E - V}{jX}$$

Η τριφασική ισχύς που παρέχεται στο σύστημα είναι:

$$\begin{aligned} S &= 3VI^* = 3V \left(\frac{E - V}{jX} \right)^* = \frac{3VE^* - 3VV^*}{-jX} = 3j \frac{|V||E| \angle (-\delta)}{X} - 3j \frac{|V|^2}{X} \\ &= 3j \frac{|V||E|}{X} (\cos(\delta) - j \sin(\delta)) - 3j \frac{|V|^2}{X} = P + jQ \end{aligned}$$

Το πραγματικό μέρος της τριφασικής αυτής ισχύος ονομάζεται ενεργός ισχύς:

$$P = \text{Re}(S) = 3 \frac{|V||E|}{X} \sin(\delta)$$

Το φανταστικό μέρος της τριφασικής ισχύος ονομάζεται άεργος ισχύς:

$$Q = \text{Im}(S) = 3 \frac{|V||E|}{X} \cos(\delta) - 3 \frac{|V|^2}{X}$$

Όταν το ρεύμα διέγερσης I_f μένει σταθερό, τότε και η εσωτερική ΗΕΔ της σύγχρονης γεννήτριας παραμένει σταθερή. Στην περίπτωση που η γωνία ισχύος ισούται με μηδέν ($\delta=0$), τότε βρισκόμαστε στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει φορτίο και η καταναλισκόμενη ή η παραγόμενη ισχύς ισούται με μηδέν. Δεν υπάρχει ανταλλαγή ενεργής ισχύος μεταξύ της γεννήτριας και του συστήματος.

Αν αυξηθεί η μηχανική ισχύς που παρέχεται στην μηχανή, τότε εμφανίζεται μια σύντομη μεταβατική κατάσταση πριν το σύστημα καταλήξει σε μία καινούργια κατάσταση ισορροπίας. Αρχικά ο δρομέας της γεννήτριας επιταχύνει ελαφρά. Καθώς η γεννήτρια αναγκάζεται να περιστρέφεται με την ίδια συχνότητα όπως και οι άλλες γεννήτριες στο σύστημα, ο δρομέας επιβραδύνει σε αυτήν τη συχνότητα. Το αποτέλεσμα είναι μια νέα σταθερή κατάσταση με μία ελαφριά αύξηση της τιμής δ . Όταν το δ είναι θετικό, η εσωτερική ΗΕΔ και η ενεργός ισχύς που παρέχεται από την μηχανή στο σύστημα, είναι θετική, και έτσι η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια.

Αν είμαστε πάλι στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει φορτίο, δηλαδή $\delta = 0$, επιβραδύνουμε τον ρότορα αυξάνοντας το μηχανικό φορτίο που είναι συνδεδεμένο με τον άξονα, η εσωτερική ΗΕΔ ελαττώσει την τάση του συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση η γωνία ισχύος δ είναι αρνητική, η μηχανή καταναλώνει ενεργό ισχύ από το σύστημα και συμπεριφέρεται σαν κινητήρας.

Στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών όπου δεν υπάρχει φορτίο, $\delta = 0$, η ανταλλαγή ενεργούς ισχύος είναι μηδενική, αλλά η μηχανή μπορεί να ανταλλάξει άεργο ισχύ. Σύμφωνα με την εξίσωση ... μια μηχανή καταναλώνει άεργο ισχύ ($Q < 0$), όταν $|E| < |V|$ και η μηχανή ονομάζεται υποδιεγερμένη. Αντιθέτως, όταν μια μηχανή είναι υπερδιεγερμένη, δηλαδή $Q > 0$ και $|E| > |V|$, τότε παρέχει άεργο ισχύ. Η ανταλλαγή ενεργούς ισχύος μεταξύ των σύγχρονων μηχανών και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ελέγχεται από την ροπή του άξονα, ενώ η ανταλλαγή άεργου ισχύος ελέγχεται από την διέγερση. [1, 2]

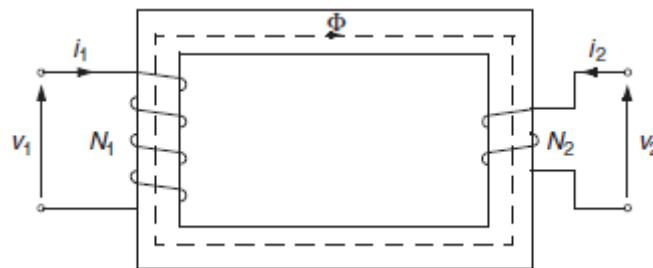
1.3 Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής είναι μια παθητική ηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιείται για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από ένα κύκλωμα σε ένα ή περισσότερα κυκλώματα. Ο πρώτος μετασχηματιστής σταθερού δυναμικού εφευρέθηκε το 1885 και από τότε έχουν γίνει απαραίτητοι για την μετάδοση, την διανομή και την χρήση του συνεχόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Ο σκοπός ενός μετασχηματιστή διανομής είναι η μείωση της πρωτογενούς τάσης του ηλεκτρικού συστήματος διανομής, στην τάση χρήσης που εξυπηρετεί τον πελάτη. Ένας μετασχηματιστής διανομής είναι μια στατική συσκευή κατασκευασμένη με δύο ή περισσότερα τυλίγματα που χρησιμοποιούνται για τη

μεταφορά εναλλασσόμενου ρεύματος ηλεκτρικής ισχύος με ηλεκτρομαγνητική επαγωγή από το ένα κύκλωμα στο άλλο με την ίδια συχνότητα αλλά με διαφορετικές τιμές τάσης και ρεύματος. Για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ισχύος και οι πτώσεις τάσης εξαιτίας της αντίστασης των αγωγών, η μετάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε επίπεδα υψηλής τάσης. Οι μετασχηματιστές ισχύος αυξάνουν την τάση από τα σχετικά χαμηλά επίπεδα της παραγωγής (10-25 kV, εξαρτάται από την μόνωση της γεννήτριας) στην υψηλή τάση (110-420 kV και άνω) για να μειώσουν τις απώλειες κατά την διάρκεια της μεταφοράς και επίσης χρησιμοποιούνται για την σύνδεση μεταξύ των δικτύων μετάδοσης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, που δουλεύουν σε διαφορετικές τάσεις. Οι μετασχηματιστές διανομής μειώνουν την τάση σε ασφαλείς τιμές (400 V και κάτω) ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους καταναλωτές. Οι μετασχηματιστές αποτελούνται ουσιαστικά από δύο πηνία σε έναν πυρήνα σιδήρου. Ο σιδηρένιος πυρήνας αυξάνει την μαγνητική ζεύξη μεταξύ των δύο πηνίων και εξασφαλίζει ότι σχεδόν όλη η μαγνητική ροή που δημιουργείται από το ένα πηνίο ρέει προς το άλλο πηνίο, με αποτέλεσμα να είναι μια αποδοτική συσκευή. Η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται στο νόμο της επαγωγής του Michael Faraday. Ο μετασχηματιστής δεν αποτελείται από κινούμενα μέρη, επομένως μπορούμε να πούμε ότι είναι μια σχετικά απλή συσκευή.

1.3.1 Ιδανικός Μετασχηματιστής

Το ισοδύναμο κύκλωμα του ιδανικού μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων φαίνεται στην εικόνα. Τα δύο πηνία είναι μαγνητικά συζευγμένα.



Σχήμα 1.2. Ιδανικός Μετασχηματιστής.

Το πρωτεύον συνδέεται με μια πηγή ημιτονοειδούς τάσης v_1 ενώ το δευτερεύον τροφοδοτεί με ρεύμα ένα φορτίο. Η αντίσταση του κάθε τυλιγματος καθώς επίσης και οι απώλειες στον πυρήνα του μετασχηματιστή προς το παρόν αμελούνται. Επιπλέον υποθέτουμε ότι η διαπερατότητα του πυρήνα είναι άπειρη και όλη η μαγνητική ροή κυκλοφορεί εντός του πυρήνα του μετασχηματιστή. Η τάση v_1 δημιουργεί ένα ρεύμα (i_1) στο πρωτεύον τύλιγμα και αυτό το ρεύμα δημιουργεί μια μαγνητική ροή στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Σύμφωνα με τον επαγωγικό νόμο του Faraday, η μαγνητική ροή στον πυρήνα δημιουργεί μια ΗΕΔ στο πρωτεύον που αντιτίθεται στην τάση που εφαρμόζεται και αυτό με την σειρά του δημιουργεί μια ΗΕΔ στο δευτερεύον. Ο μετασχηματιστής συνδέεται με ένα φορτίο, επομένως το ρεύμα του δευτερεύοντος (i_2) εξαρτάται από την αντίσταση του φορτίου. Από την στιγμή που δεν υπάρχει διαρροή στην ροή Φ , τότε η μαγνητική ροή Φ ενώνει το πρωτεύον με το δευτερεύον τύλιγμα. Σύμφωνα με το νόμο του

Ampere και επειδή γίνεται η υπόθεση ότι η διαπερατότητα του σιδερένιου πυρήνα είναι άπειρη, δίνεται η εξίσωση:

$$\oint_C H \tau ds = N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0$$

Όπου,

N_1 : αριθμός στροφών στο πρωτεύον τύλιγμα,

i_1 : ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα (A),

N_2 : αριθμός στροφών στο δευτερεύον τύλιγμα,

i_2 : ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα (A).

Οι τερματικές τάσεις δίνονται από τους τύπους:

$$v_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$v_2 = \frac{d\psi_2}{dt} = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Για να αποδειχθεί η ιδιότητα μετασχηματισμού της σύνθετης αντίστασης του ιδανικού μετασχηματιστή πρέπει η σύνθετη αντίσταση να μπορεί να μετασχηματιστεί και από τις δύο πλευρές στην άλλη πλευρά. Άρα θα ελεγχθεί η περίπτωση παράλληλης και εν σειρά σύνδεσης της σύνθετης αντίστασης.

Στην περίπτωση της παράλληλης σύνδεσης, Σχήμα 1.3 , δίνονται οι σχέσεις τάσης και ρεύματος του ιδανικού μετασχηματιστή με σύνθετη αντίσταση συνδεδεμένη στο δευτερεύον τύλιγμα:

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2$$

$$I_1 = -\frac{N_2}{N_1} \left(I_2 - \frac{V_2}{Z_2} \right)$$

Όταν η σύνθετη αντίσταση συνδέεται στο πρωτεύον τύλιγμα τότε οι τύποι τάσης και ρεύματος είναι:

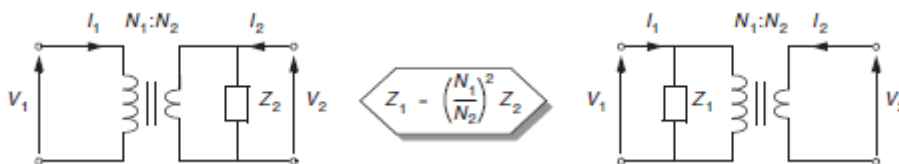
$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2$$

$$I_1 - \frac{V_1}{Z_1} = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

Για να ισχύει η ισότητα μεταξύ των εξισώσεων τάσεων και ρευμάτων θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω ισότητα:

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2$$

Άρα τα δύο κυκλώματα είναι ισότιμα όταν οι τιμές Z_1, Z_2 δίνονται από την παραπάνω σχέση.



Σχήμα 1.3 Μετασχηματισμός παράλληλης σύνδεσης σύνθετης αντίστασης.

Στην περίπτωση που οι σύνθετες αντιστάσεις συνδέονται σε σειρά (Σχήμα 1.4) με την σύνθετη αντίσταση να είναι συνδεδεμένη στο δευτερεύον οι εξισώσεις ρεύματος και τάσης είναι:

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2} (V_2 - Z_2 I_2)$$

$$I_1 = -\frac{N_2}{N_1} I_2$$

Οι εξισώσεις ρεύματος και τάσης αν η σύνθετη αντίσταση συνδεθεί στο πρωτεύον είναι:

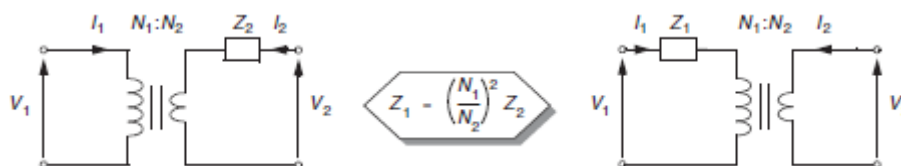
$$(V_1 - Z_1 I_1) = \frac{N_1}{N_2} V_2$$

$$I_1 = -\frac{N_2}{N_1} I_2$$

Οι εξισώσεις τάσης και ρεύματος ισχύουν μόνο αν ισχύει η εξίσωση:

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2$$

Άρα τα δύο κυκλώματα είναι ισότιμα όταν οι τιμές Z_1, Z_2 δίνονται από την παραπάνω σχέση. [2]

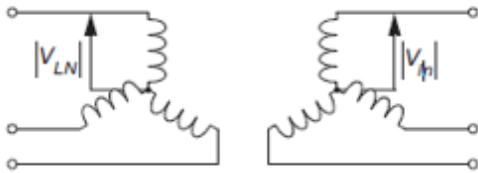
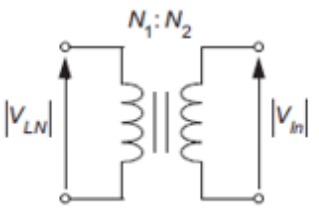
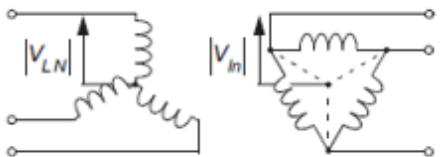
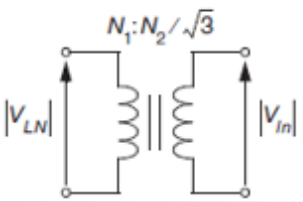
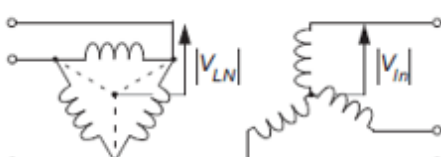
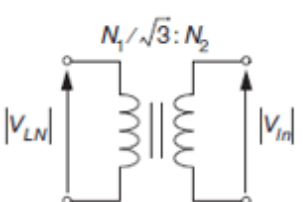
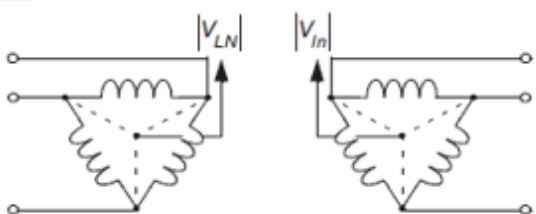
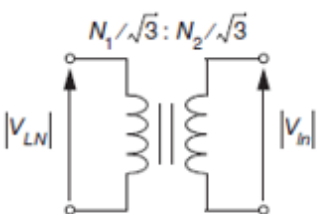


Σχήμα 1.4. Μετασχηματισμός εν σειρά σύνδεσης σύνθετης αντίστασης

1.2.2 Τριφασικός Μετασχηματιστής

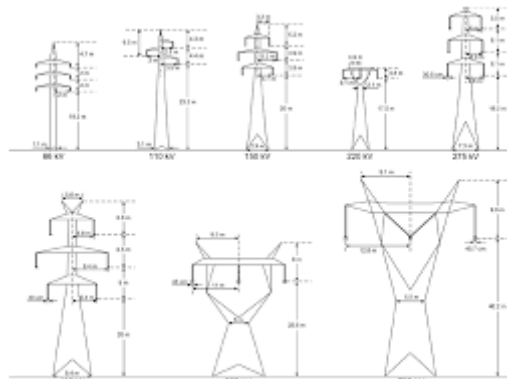
Στους μονοφασικούς μετασχηματιστές μπορεί να αλλάξει μόνο η αναλογία των μεγεθών της τάσης μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Επίσης ο αριθμός των στροφών είναι πραγματικός αριθμός που προκύπτει από την διαίρεση του αριθμού των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος με τον αριθμό των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος. Στους τριφασικούς όμως μετασχηματιστές τα τυλίγματα και η σύνδεση των ακροδεκτών μπορεί να υλοποιηθούν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε και το μέτρο της τάσης και οι φασικές γωνίες μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος να είναι διαφορετικές. Τα τρία πηνία στην πρωτεύουσα ή στην δευτερεύουσα πλευρά ενός τριφασικού μετασχηματιστή μπορούν να συνδεθούν σε αστέρα (Y) ή σε τρίγωνο (Δ). Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα μονοφασικά ισοδύναμα μοντέλα ενός τριφασικού μετασχηματιστή. [2]

Πίνακας 1.1. Μονοφασικά ισοδύναμα μοντέλα τριφασικών μετασχηματιστών.

Τύπος	Συνδεσμολογία τυλιγμάτων	Μονοφασικό ισοδύναμο
Y - Y		
Y - Δ		
Δ - Y		
Δ - Δ		

1.3 Γραμμές Μεταφοράς

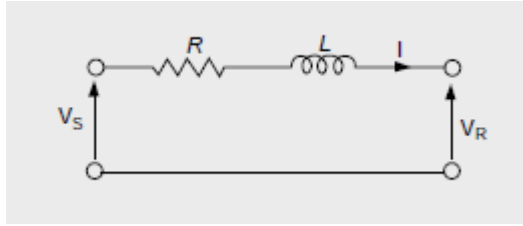
Οι γραμμές μεταφοράς χωρίζονται σε δύο είδη: τις υπέργειες ή εναέριας και τις υπόγειες, στην συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθούν εναέριας γραμμές για την μοντελοποίηση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εναέριας γραμμές μεταφοράς κρέμονται από μονωτές οι οποίοι είναι στερεωμένοι σε πυλώνες (Εικόνα 1.4). Η μόνωση μεταξύ των αγωγών είναι ο αέρας. Η απόσταση μεταξύ των πυλώνων εξαρτάται από το κρέμασμα της γραμμής. Για γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως χαλύβδινοι πύργοι των οποίων η απόσταση είναι συνήθως 370 – 460 μέτρα. Για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται δύο τύποι πύργων, αυτοί που χρησιμοποιούνται για ευθείες διαδρομές και οι πύργοι απόκλισης οι οποίοι χρησιμοποιούνται για μη ευθείες διαδρομές και αντέχουν τις δυνάμεις που προκύπτουν εξαιτίας της αλλαγής κατεύθυνσης των γραμμών μεταφοράς. Οι χρήσιμοι παράμετροι για την κυκλωματική ανάλυση των γραμμών μεταφοράς είναι η αυτεπαγωγή η χωρητικότητα και η αντίσταση. Οι αγωγοί στις εναέριας γραμμές μεταφοράς συνήθως αποτελούνται από ένα ατσάλινο πυρήνα, για μηχανική αντοχή, ο οποίος περιβάλλεται από σύρματα αλουμινίου. Στην ανάλυση ροής φορτίου καθώς επίσης και στην ανάλυση συμμετρικών σφαλμάτων σε ένα τριφασικό σύστημα, η μελέτη γίνεται για την μία φάση και τα αποτελέσματα για τις άλλες δύο φάσεις γίνεται με κατάλληλη μετατροπή των γωνιών. Ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιούνται οι γραμμές ή τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από το μήκος τους και από την απαιτούμενη ακρίβεια. Οι γραμμές μεταφοράς χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το μήκος τους: τις μικρές, τις μεσαίες και τις μεγάλες.



Εικόνα 1.4. Πυλώνες για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Οι γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους έχουν μήκος έως 80 km, η χωρητική αγωγιμότητα και η αντίσταση διαρροής θεωρούνται αμελητέες (Σχήμα 1.5). Για το ισοδύναμο κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους δίνεται η παρακάτω εξίσωση πινάκων:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$



Σχήμα 1.5. Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους

Στις γραμμές μεταφοράς μεσαίου μήκους (80 – 240 km), εξαιτίας της αύξησης του μήκους η χωρητική αγωγιμότητα τώρα δεν είναι μηδενική και περιλαμβάνεται στο π-ισοδύναμο ή στο T-ισοδύναμο, Σχήμα 1.6.

Για το π-ισοδύναμο ισχύουν οι τύποι:

$$V_S = V_R + IZ$$

$$I = I_R + V_R \frac{Y}{2}$$

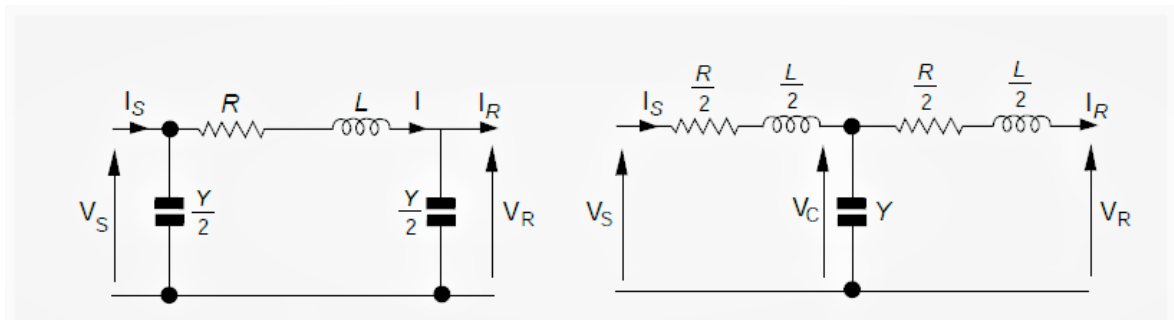
$$I_S = I + V_S \frac{Y}{2}$$

Ενώ, για το T-ισοδύναμο οι τύποι:

$$V_S = V_C + \frac{I_S Z}{2}$$

$$V_C = V_R + \frac{I_R Z}{2}$$

$$I_S = I_R + V_C Y$$



Σχήμα 1.6. π-ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους (αριστερά),

T-ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους (δεξιά).

Για τις γραμμές μεγάλου μήκους, δηλαδή από 240 km και πάνω, η μελέτη απαιτεί την χρήση κατανεμημένων μεταβλητών, και την παραδοχή ότι οι παράμετροι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το μήκος της γραμμής μεταφοράς, Σχήμα 1.7.

Για το π-ισοδύναμο χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$V_s = V_r \cosh \gamma l - I_r Z_c \sinh \gamma l$$

$$I_s = I_r \cosh \gamma l - \frac{V_r}{Z_c} \sinh \gamma l$$

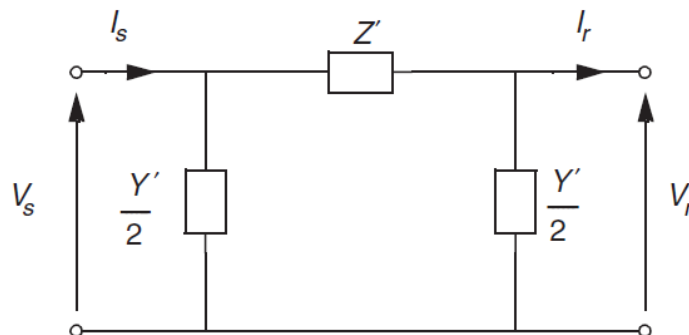
$$\gamma = \sqrt{zy}, \quad \text{σταθερά διάδοσης [m}^{-1}\text{]}$$

$Z = zl$, *συνολική εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής [Ω]*

$$Z' = Z_c \sinh \gamma l = Z \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}$$

$Y = yl$, *συνολική εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής [Y]*

$$\frac{Y'}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{Z_c \sinh \gamma l} = \frac{1}{Z_c} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) = \frac{Y \tanh(\gamma l/2)}{2 \gamma l/2}$$



Σχήμα 1.7. Π-ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους.

1.5 Φορτία

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας η μοντελοποίηση των φορτίων είναι απαραίτητη και αρκετά απαιτητική διαδικασία καθώς υπάρχουν φορτία που καταναλώνουν διαφορετικές τιμές ενεργούς και άεργου ισχύος με διαφορετικές τάσεις. Με τον όρο φορτίο ορίζεται μία ή περισσότερες συσκευές οι οποίες καταναλώνουν ισχύ από το δίκτυο. Επομένως, για την μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας το φορτίο στους υποσταθμούς αποτελείται και θεωρείται ως συνδυασμός βιομηχανικών και οικιακών καταναλωτών. Μια τυπική σύνθεση του φορτίου των υποσταθμών είναι επαγωγικοί κινητήρες 50-70%, φωτισμός και

για θέρμανση 20-25%, σύγχρονες μηχανές 10% και τέλος στις γραμμές μεταφοράς και διανομής θεωρούμε απώλειες 10-12%.

Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική πραγματοποιείται από τις μηχανές. Οι μηχανές DC χρησιμοποιούνται κυρίως στους ηλεκτρικούς σιδηροδρόμους, ενώ οι μηχανές AC είτε σύγχρονες είτε επαγωγικές χρησιμοποιούνται στην πλειοψηφία των εφαρμογών. Οι σύγχρονες τριφασικές μηχανές παράγουν το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας και στην σταθερή κατάσταση λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα. Ωστόσο όταν οι μηχανές λειτουργούν σαν κινητήρες τότε μπορούν να λειτουργούν είτε με σταθερή είτε με μεταβαλλόμενη ταχύτητα. Όταν η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας τότε απορροφά ενεργό ισχύ από το σύστημα. Το 60% της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα δίκτυο καταναλώνεται από τους επαγωγικούς κινητήρες, αυτό συμβαίνει γιατί είναι σχετικά φθινοί στην κατασκευή τους, αξιόπιστοι και η συντήρησή τους είναι αρκετά εύκολη. Το πρόβλημα με τους επαγωγικούς κινητήρες είναι ότι δεν δουλεύουν με σταθερή ταχύτητα όπως οι σύγχρονοι κινητήρες και ότι κάποιες φορές δημιουργούν δυναμικά προβλήματα όταν η μηχανή ξεκινάει, όταν σταματάει και όταν υφίσταται αλλαγές στο φορτίο. Οι επαγωγικοί κινητήρες έχουν ένα αρνητικό χαρακτηριστικό όσον αφορά το φορτίο, όταν η τάση τροφοδοσίας πέφτει, η παροχή ρεύματος αυξάνεται ραγδαία και προκαλεί μια επιπλέον πτώση τάσης που ελαττώνει την τάση τροφοδοσίας περισσότερο. Οι λαμπτήρες πυράκτωσης εξαρτώνται από την συχνότητα και δεν καταναλώνουν καθόλου άεργο ισχύ. Ωστόσο σε αρκετές χώρες η χρήση λαμπτήρων πυράκτωσης έχει αρχίσει να φθίνει εξαιτίας της χαμηλής τους απόδοσης και την θέση τους παίρνουν οι λαμπτήρες LED, γεγονός που θα επηρεάσει μελλοντικά το δίκτυο. Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται επίσης για θέρμανση, συνήθως μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω μιας αντίστασης. Αυτή η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα πραγματοποιείται από πολλές οικιακές συσκευές όπως θερμοσίφωνα, η κουζίνα, στις σόμπες και στους λέβητες. Οι μεγάλες βιομηχανίες χρησιμοποιούν επίσης την ηλεκτρική θέρμανση σε μεγάλη κλίμακα. Όσον αφορά την θέρμανση, τα φορτία μπορούν να θεωρηθούν στατικά.

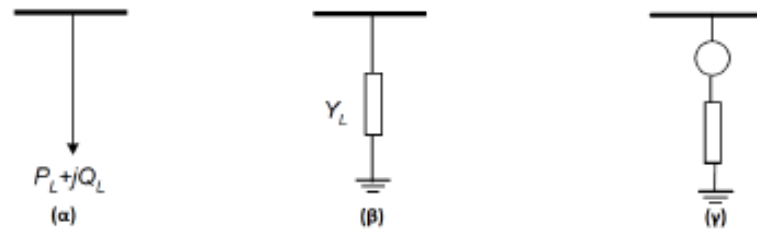
Ένας άλλος τύπος φορτίου είναι η ενέργεια που καταναλώνεται για να φορτιστούν οι μπαταρίες. Η μπαταρία είναι μια συσκευή η οποία μετατρέπει την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, μπορεί όμως να λειτουργήσει και ανάποδα. Οι συσκευές οι οποίες έχουν μπαταρίες και συνδέονται στην πρίζα για να φορτιστούν λειτουργούν σαν ένα είδος φορτίου.

Τα φορτία που καταναλώνουν ενέργεια από το δίκτυο χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Οικιακά φορτία που προορίζονται για οικιακούς χρήστες
- Εμπορικά και βιομηχανικά φορτία, κυρίως για επιχειρηματική χρήση και για εργοστάσια
- Για ηλεκτρικούς σιδηροδρόμους

Τα φορτία που χρησιμοποιούμε σαν μοντέλα για την μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά. Αρχικά το μέγεθος και η μεταβολή της ισχύος σε σχέση με τον χρόνο μπορούν να προβλεφθούν ως ένα βαθμό. Επίσης το φορτία μεταβάλλεται τόσο αργά σε σχέση με τις σταθερές χρόνου του ηλεκτρικού συστήματος, επομένως το φορτίο μπορεί να θεωρηθεί σταθερό. Είναι αλήθεια ότι το φορτίο καταναλώνει πάντα άεργο ισχύ και εξαρτάται από την τάση και την συχνότητα. Τέλος το φορτίο είναι πάντα συμμετρικό. [2]

Η παράσταση των φορτίων εξαρτάται από το είδος της κάθε μελέτης. Στις μελέτες ροής φορτίου, τα φορτία παριστάνονται ως το άθροισμα της πραγματικής και της αέργου ισχύος που λαμβάνονται στο σύστημα ($P_L + jQ_L$), Σχήμα 1.8α. Όταν ένα σύστημα μελετάται ως προς την ευστάθειά του ή γίνεται μελέτη βραχυκυκλωμάτων τα φορτία παριστάνονται ως μια σύνθετη αγωγιμότητα μεταξύ ζυγού και γείωσης (Y_L), Σχήμα 1.8β. Επίσης σε αυτές τις δύο περιπτώσεις αν το φορτίο είναι μια μεγάλη περιστρεφόμενη μηχανή, τότε το φορτίο παριστάνεται σαν μια πηγή τάσης σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση, Σχήμα 1.8γ.



Σχήμα 1.8. Μοντέλα για την παράσταση φορτίων. [3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Με την μελέτη ροής φορτίου υπολογίζεται η συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που υφίσταται μία συγκεκριμένη φόρτιση, στη μόνιμη ημιτονοειδή 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 δυνατόν να υπολογιστούν όλες οι άλλες ποσότητες του συστήματος, όπως τις ροές πραγματικής και άεργου ισχύος, τα ρεύματα, οι πτώσεις τάσης και οι απώλειες ισχύος. Οι μελέτες ροής φορτίου είναι πολύ χρήσιμες :

- Για τη σχεδίαση και τη μελλοντική ανάπτυξη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οπότε η μελέτη γίνεται προκειμένου να είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τυχόν επίδραση που 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 επιτευχθεί η λειτουργία του συστήματος σε ικανοποιητικά πλαίσια δοκιμάζοντας την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα διαφόρων εναλλακτικών λύσεων.
- Στην πράξη τα φορτία που τροφοδοτεί ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της ημέρας ή από μέρα σε μέρα, για να επιτευχθεί η καλύτερη ρύθμιση τάσης στους ζυγούς και η βέλτιστη οικονομική λειτουργία, πρέπει να είναι γνωστό από ποιες μονάδες τροφοδοτείται το κάθε φορτίο. Επομένως είναι σημαντική η γνώση και η ικανότητα να προσδιοριστεί η βέλτιστη διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για τη λειτουργία του συστήματος.
- Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης διαδικασίας λειτουργίας όταν για κάποιους λόγους τεθούν εκτός λειτουργίας μία ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς.
- Για την εύρεση αρχικών τιμών που είναι απαραίτητες για άλλες μελέτες, όπως για μελέτες βραχυκυκλωμάτων, μεταβατικής ευστάθειας κτλ.

Η ροή φορτίου η οποία επίσης αναφέρεται και ως ροή ισχύος, είναι μια τεχνική ορολογία για τον υπολογισμό της σταθερής κατάστασης ενός δικτύου ηλεκτρικής ισχύος. Δεν διαφέρει ουσιαστικά από την λύση όποιου άλλου τύπου δικτύου εκτός από ορισμένους περιορισμούς οι οποίοι είναι χαρακτηριστικοί των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μελέτες ροής φορτίου πραγματοποιούνται για την μελέτη των ακολούθων χαρακτηριστικών των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

- Η ροή ενεργούς και άεργου ισχύος που μετράται σε MW και MVA_r στους κλάδους του δικτύου.
- Οι τιμές των τάσεων κόμβων στους ζυγούς.

- Η επίδραση της αναδιάταξης των κυκλωμάτων με την εισαγωγή και την ενσωμάτωση νέων κυκλωμάτων και φορτίων στα ήδη υπάρχοντα φορτία του συστήματος.
- Η επίδραση της προσωρινής απώλειας κυκλωμάτων παραγωγής και μετάδοσης στα φορτία του συστήματος.
- Η επίδραση της έγχυσης σε φάση και ορθοκανονικής ενίσχυσης της τάσης στα φορτία του συστήματος.
- Ποιες είναι οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος και της κατανομής φορτίου.
- Προσπάθεια για ελαχιστοποίηση των απωλειών στο εκάστοτε σύστημα.
- Η εύρεση της βέλτιστης ονομαστικής τιμής και του εύρους σύνδεσης των μετασχηματιστών.
- Βελτιώσεις από αλλαγή μεγέθους αγωγού και τάσης του συστήματος. [1, 3]

Επειδή οι εξισώσεις ροής φορτίου είναι μη-γραμμικές δεν είναι δυνατόν να έχουν αναλυτικές λύσεις. Για το λόγο αυτό γίνεται προσπάθεια να υπολογιστούν αριθμητικές λύσεις οι οποίες μπορούν να ληφθούν εύκολα με τη βοήθεια ψηφιακών υπολογιστών. Για να είναι δυνατόν μια υπολογιστική τεχνική να χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου, η τεχνική αυτή θα πρέπει:

- Να μπορεί να χειρίζεται μη γραμμικές εξισώσεις
- Να μπορεί να χειρίζεται μεγάλα ενεργειακά συστήματα με εκατοντάδες ζυγούς και χιλιάδες γραμμές μεταφοράς.
- Να είναι ακριβής
- Να είναι γρήγορη, επειδή συνήθως στην πράξη συχνά συμβαίνει να πραγματοποιούνται μια ολόκληρη σειρά από υπολογισμούς ροής φορτίου με διάφορους συνδυασμούς τάσεων και ισχύων ζυγών για να την εύρεση της καλύτερης δυνατής κατανομής ισχύος σε ένα σύστημα.

Κατά την διάρκεια των ετών έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές για την επίλυση των μη-γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Δύο από αυτές έχουν ξεχωρίσει καθώς είναι οι πιο χρήσιμες, αυτές είναι η μέθοδος Gauss-Seidel (G-S), η οποία βασίζεται στην μέθοδο του Gauss και η μέθοδος Newton-Raphson (N-R). Οι δύο αυτές εξισώσεις προσεγγίζουν το πρόβλημα της επίλυσης των στατικών εξισώσεων της ροής φορτίου με τον εξής τρόπο:

- Κάνουν μια αρχική εκτίμηση για την λύση των εξισώσεων, τις $2n$ δηλαδή, άγνωστες ποσότητες που πρέπει να υπολογιστούν.
- Αυτή η αρχική εκτίμηση χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί, με την βοήθεια των εξισώσεων ροής φορτίου, μια καινούργια και καλύτερη δεύτερη εκτίμηση.
- Η δεύτερη εκτίμηση χρησιμοποιείται για να γίνει μια νέα εκτίμηση κ.ο.κ.

Παρατηρείται λοιπόν ότι για τον υπολογισμό της λύσης απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία στην οποία υπολογίζονται διαρκώς όλο και πιο ακριβείς εκτιμήσεις για τους αγνώστους, για αυτό και αυτές οι μέθοδοι ονομάζονται επαναληπτικές. Η διαφορά των μεθόδων έγκειται στην χρήση διαφορετικών αλγορίθμων για τον υπολογισμό των νέων εκτιμήσεων. Αλγόριθμος ονομάζεται μια λίστα υπολογιστικών εντολών που ορίζουν την

διαδοχή των πράξεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό την $n+1$ εκτίμησης από την n εκτίμηση, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

(n εκτίμηση) \rightarrow αλγόριθμος \rightarrow ($n+1$ εκτίμηση), $n = 0, 1, 2, \dots$

Η ποιότητα του κάθε αλγορίθμου κρίνεται με βάση την ταχύτητα με την οποία γίνεται η σύγκλιση, δηλαδή η εύρεση της τελικής λύσης. Οι δύο μέθοδοι που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια διαφέρουν σημαντικά ως προς αυτό το σημείο. Αρκετά συχνά η αύξηση της ταχύτητας σύγκλισης έχει το τίμημα της αύξησης της πολυπλοκότητας του αλγορίθμου. Για να ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία απαιτείται μια αρχική εκτίμηση για τις τάσεις των ζυγών του δικτύου. Είναι γνωστές οι τιμές:

- Της τάση $V_1 = |V_1|$ με γωνία δ_1 ($=1$ με γωνία 0) του ζυγού αναφοράς
- Τα μέτρα $|V_i|$ των τάσεων όλων των ζυγών στους οποίους υπάρχει έλεγχος τάσης.

Για την συμπλήρωση των αρχικών τιμών των τάσεων όλων των ζυγών του δικτύου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια αρχική εκτίμηση για όλη την πληροφορία όσον αφορά τις τάσεις των ζυγών, δηλαδή να γίνει εκτίμηση για:

- Τις φασικές γωνίες δ_i των τάσεων των ζυγών στους οποίους υπάρχει έλεγχος τάσης.
- Τα μέτρα $|V_i|$ και τις φασικές γωνίες δ_i των τάσεων των ζυγών φορτίου.

Επειδή σε ένα πραγματικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οι τάσεις των ζυγών δεν διαφέρουν πάρα πολύ αλλά έχουν τιμές περίπου ίσες με 1 pu, συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται αρχικές τιμές εκκίνησης ίση με $1 + 0j$ pu = 1 με γωνία 0 μοίρες.

Συνοψίζοντας η ανάλυση ροής ισχύος είναι μια διαδικασία αξιολόγησης για τη λειτουργία και τον προγραμματισμό για τον προσδιορισμό της κατάστασης σταθερής λειτουργίας ενός συστήματος ισχύος δεδομένης της κατάστασης του συστήματος. Η ανάλυση ροής ισχύος βασίζεται σε ένα μη γραμμικό σύνολο εξισώσεων μεγάλης κλίμακας που απαιτούν επαναληπτικές τεχνικές για την επίλυσή τους. Υπάρχουν πολλές παραδοσιακές επαναληπτικές τεχνικές για την επίλυση μεγάλων μη γραμμικών εξισώσεων. Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ισχύος είναι:

- Μέθοδος Gauss
- Μέθοδος Gauss-Seidel
- Μέθοδος Newton-Raphson

Η μέθοδος Gauss-Seidel είναι πολύ απλή αλλά συγκλίνει αργά και όσο το μέγεθος του συστήματος αυξάνεται, τόσο πιο αργά γίνεται η σύγκλιση. Αντιθέτως, η μέθοδος Newton-Raphson συγκλίνει εξίσου γρήγορα τόσο για μικρά όσο και για μεγάλα συστήματα, συνήθως η σύγκλιση επιτυγχάνεται ύστερα από μερικές επαναλήψεις. Για το λόγο αυτό η μέθοδος Newton-Raphson είναι η πλέον δημοφιλέστερη για την επίλυση μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αν και απαιτούνται περισσότερες και πιο πολύπλοκες πράξεις σε κάθε επανάληψη, σε σχέση με την μέθοδο Gauss-Seidel. Συχνά ωστόσο η μέθοδος Gauss-Seidel χρησιμοποιείται σε μεγάλα ενεργειακά συστήματα για να λάβουμε την πρώτη προσεγγιστική λύση η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια ως αρχική λύση για την μέθοδο Newton-Raphson. [4]

Η ευστάθεια ενός συστήματος ισχύος είναι η ικανότητά του να παραμένει ευσταθές όταν εμφανίζονται διαταραχές, οι οποίες είναι δεδομένο ότι εμφανίζονται σε δίκτυα στα οποία η ενέργεια παράγεται από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Οι διαταραχές μπορεί να είναι μικρές ή μεγαλύτερες, οι μικρές προκύπτουν κυρίως από αλλαγές στο φορτίο, ενώ οι μεγαλύτερες λόγω βλαβών. Μετά από την εμφάνιση μίας διαταραχής, αν το σύστημα καταλήξει σε νέες αποδεκτές τιμές λειτουργίας της τάσης και ισχύος τότε το σύστημα λέγεται ότι παρέμεινε ευσταθές.

Η σταθερότητα ενός συστήματος ισχύος μπορεί να χωριστεί σε ορισμένες κατηγορίες προκειμένου να διευκολυνθεί ο ορισμός και επομένως και η αντιμετώπιση του εκάστοτε προβλήματος. Αυτά περιλαμβάνουν την απώλεια του συγχρονισμού μεταξύ των σύγχρονων γεννητριών (σταθερότητα γωνίας) είτε λόγω βλαβών και μεγάλων διαταραχών (παροδική σταθερότητα) ή ταλαντώσεις που προκαλούνται από αλλαγές στο φορτίο και την έλλειψη απόσβεσης (δυναμική ή σταθερότητα μικρού σήματος). Η αστάθεια τάσης μπορεί να προκληθεί από μεγάλα επαγωγικά φορτία κινητήρα αντλώντας υπερβολικές ποσότητες άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια βλάβη στο δίκτυο όταν η τάση του δικτύου μειώνεται ή λόγω έλλειψης άεργης ισχύος όταν η υπερβολική πραγματική ισχύς ρέει σε ένα δίκτυο. Όταν ο ρότορας μιας σύγχρονης γεννήτριας προχωρά πέρα από ένα συγκεκριμένο κρίσιμο γωνία, ο μαγνητικός σύνδεσμος μεταξύ του ρότορα και του στάτορα αποτυγχάνει. Ο ρότορας, διατηρείται πλέον σε συγχρονισμό με το περιστρεφόμενο πεδίο των ρευμάτων στάτορα, περιστρέφεται σχετικά στο γήπεδο και εμφανίζεται ολίσθηση πόλου. Κάθε φορά που οι πόλοι διασχίζουν τη γωνιακή περιοχή εντός της οποίας θα μπορούσε να είναι σταθερή, οι δυνάμεις συγχρονισμού προσπαθούν να τραβήξουν τον ρότορα σε συγχρονισμό. Είναι συνήθης πρακτική να αποσυνδέετε τη γεννήτρια από το σύστημα εάν αρχίζει να γλιστρά τους πόλους, καθώς η ολίσθηση του πόλου προκαλεί τη ροή του μεγάλου ρεύματος και το υψηλό παροδικές ροπές. Η σύγχρονη ή γωνία, σταθερότητα μπορεί να χωριστεί σε: δυναμική και παροδική σταθερότητα. Η δυναμική σταθερότητα είναι η ικανότητα σύγχρονων γεννητριών, όταν λειτουργούν υπό δεδομένες συνθήκες φορτίου, για να διατηρηθεί ο συγχρονισμός (χωρίς υπερβολικές γωνιακές ταλαντώσεις) όταν υφίστανται μικρές διαταραχές, όπως οι συνεχείς αλλαγές στο φορτίο ή γενιά και την αλλαγή γραμμών. Είναι πιθανότερο να προκύψει από τις αλλαγές στην αντίσταση πηγής προς φόρτωση που προκύπτουν από αλλαγές στη διαμόρφωση του δικτύου ή κατάσταση συστήματος και είναι συνέπεια της έλλειψης απόσβεσης στο σύστημα ισχύος. Συχνά, Αυτό αναφέρεται ως σταθερότητα μικρού σήματος. Η παροδική σταθερότητα αφορά ξαφνικές και μεγάλες αλλαγές στο δίκτυο κατάσταση, όπως αυτές που προκαλούνται από σφάλματα βραχυκυκλώματος. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταδοθεί, το όριο σταθερότητας, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες σφάλματος είναι συνήθως μικρότερο από το μέγιστο σταθερό φορτίο σταθερής κατάστασης. Η σταθερότητα ενός ασύγχρονου φορτίου κινητήρα ελέγχεται από την τάση το; Αν αυτό γίνει χαμηλότερο από μια κρίσιμη τιμή, μπορεί να γίνουν κινητήρες επαγωγής ασταθής και στάσιμος. Αυτό είναι στην πραγματικότητα ένα πρόβλημα αστάθειας τάσης. Όταν η τάση στους ακροδέκτες μιας ασύγχρονης (επαγωγικής) γεννήτριας, ίσως λόγω ένα σφάλμα στο σύστημα ισχύος, μειώνεται η ικανότητά του να αναπτύσσει ροπή και το ο κινητήρας επιβραδύνεται. Εάν το σφάλμα στο δίκτυο επιμένει, οι στάβλοι κινητήρα και αντλεί πολύ μεγάλες ποσότητες άεργου ισχύος. Αυτές οι άεργες ροές μειώνουν η τάση στους ακροδέκτες κινητήρα περαιτέρω και το τμήμα του δικτύου πρέπει να είναι απομονωμένος. Αυτή η μορφή αστάθειας τάσης είναι ένας πολύ γνωστός κίνδυνος στα διυλιστήρια

πετρελαίου και χημικές εγκαταστάσεις που έχουν μεγάλα επαγωγικά φορτία. Αστάθεια τάσης μπορεί επίσης να συμβεί σε μεγάλα εθνικά συστήματα ισχύος. Η σύγχρονη αστάθεια θεωρείται παραδοσιακά η πιο σημαντική και ως εκ τούτου, δόθηκε μεγαλύτερη προσοχή και στο παρελθόν. Πρόσφατα, με την αύξηση χρήση στατικών αντισταθμιστών VAR και την εμπειρία μεγάλων εθνικών αποκλεισμών που προκαλείται από έλλειμμα άεργης ισχύος, δίνεται ιδιαίτερη βάση και στη μελέτη της κατάρρευσης τάσης.

2.2 Ταξινόμηση Ζυγών

Σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ο κάθε ζυγός ή κόμβος σχετίζεται με τέσσερις διαφορετικές ποσότητες, αυτές είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς, η τάση των ζυγών και η φασική γωνία. Ανάλογα με τις ποσότητες που είναι γνωστές οι ζυγοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες.

Ζυγός αναφοράς: Υπάρχει πάντα ένας μοναδικός ζυγός αναφοράς στο κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και είναι πάντοτε ζυγός παραγωγής. Για μεγαλύτερη ευκολία στους υπολογισμούς επιλέγεται συνήθως αυτός με τη μεγαλύτερη παραγωγή πραγματικής ισχύος και αριθμείται ως πρώτος ανάμεσα στους υπόλοιπους ζυγούς και αντιμετωπίζεται διαφορετικά από τους υπόλοιπους ζυγούς παραγωγής. Σε όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ισχύει πάντα ότι η συνολική παραγωγή ισούται με την συνολική ζήτηση συν τις απώλειες που προκύπτουν από την μεταφορά της ενέργειας.

Επειδή οι απώλειες μεταφοράς δεν μπορούν να προσδιοριστούν εκ των προτέρων καθώς είναι συναρτήσεις των αγνώστων ακόμα μεταβλητών κατάστασης x , η παραγωγή που απαιτείται για την τροφοδοσία συγκεκριμένου φορτίου του δικτύου δεν είναι δυνατόν να προκαθοριστεί στο σύνολό της. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, σε ένα ζυγό στον οποίο συνδέεται η γεννήτρια τις παραγωγές πραγματικής και άεργου ισχύος δεν προκαθορίζονται, αλλά παραμένουν ως άγνωστοι και ο υπολογισμός τους γίνεται μετά την επίλυση του προβλήματος της ροής φορτίου. Το αποτέλεσμα προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ των προκαθορισμένων ισχύων που εισέρχονται στο σύστημα στους άλλους ζυγούς παραγωγής και του συνολικού φορτίου συν τις απώλειες. Επομένως στο ζυγό αναφοράς ή ζυγό ταλάντωσης όπως ονομάζεται, προκαθορίζεται το μέτρο και τη φασική γωνία της τάσης. Είναι συνήθης πρακτική να θέτεται το μέτρο της τάσης αυτού του ζυγού ίσο με 1 pu και τη φασική γωνία της τάσης ίση με 0° και θεωρείται γνωστή, για τον λόγο αυτό στον αλγόριθμο Gauss-Seidel για τον υπολογισμό της ροής φορτίου η επαναληπτική διαδικασία υλοποιείται για $i \neq 1$ ($i=1$, είναι ο ζυγός αναφοράς). Με αυτήν την επιλογή μεταβλητών επιτυγχάνεται ταυτόχρονα η λύση προβλήματος του υπολογισμού των φασικών γωνιών αλλά και των τάσεων των ζυγών, οι οποίες θα ήταν διαφορετικά αδύνατο να προκύψουν αφού δεν εμφανίζονται ποτέ στις εξισώσεις ροής φορτίου μεμονωμένα αλλά πάντα σαν διαφορές για να είναι δυνατή η επίλυσή τους. Επιπλέον η φασική γωνία της τάσης του ζυγού αναφοράς χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις φασικές γωνίες των τάσεων όλων των άλλων ζυγών, έτσι ώστε $V_1 = |V_1| \angle \delta_1$ pu.

Ζυγός φορτίου ή ζυγός PQ: Στους ζυγούς αυτούς δεν υπάρχει παραγωγή ισχύος, αλλά μόνο φορτία, για αυτόν τον λόγο ονομάζονται και ζυγοί φορτίου. Σε αυτό τον τύπο ζυγού είναι γνωστές οι τιμές της ενεργού και άεργου ισχύος, δηλαδή τα P_i και Q_i . Επίσης οι ζυγοί φορτίου είναι οι περισσότεροι σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αποτελούν περίπου το 85% του συνόλου των ζυγών ενός δικτύου. Σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου βελτιώνεται η ακρίβεια της τιμής του μέτρου και της φάσης (δ_i) της τάσης (V_i) του κάθε ζυγού.

Ζυγός με ελεγχόμενη τάση ή ζυγός παραγωγής: Ως ζυγός με ελεγχόμενη τάση ορίζεται ο ζυγός ο οποίος ελέγχει (όπως αναφέρεται και στην ονομασία του) το μέτρο της τάσης σε έναν ζυγό $|V_i|$ και το διατηρεί σε μία σταθερή τιμή $|V_{i,spec}|$. Ο ζυγός αυτού του τύπου συνδέεται συνήθως με μία γεννήτρια, για τον λόγο αυτό ονομάζεται και ζυγός παραγωγής. Οι τιμές της παραγόμενης πραγματικής ισχύος (P_{Gi}) και του μέτρου της τάσης ($|V_i|$) μπορούν να καθοριστούν με την ανάλογη ρύθμιση της μηχανικής ισχύος στην είσοδο του στροβίλου και του ρεύματος διέγερσης αντίστοιχα. Επίσης ο έλεγχος του μέτρου της τάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί και στους ζυγούς οι οποίοι δεν είναι συνδεδεμένοι με γεννήτριες, σε αυτήν την περίπτωση ο έλεγχος γίνεται με την χρήση μετασχηματιστών ρύθμισης τάσης. [3, 4, 5]

2.3 Κατασκευή Πίνακα Αγωγιμοτήτων Y_{bus}

Για την μελέτη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και τον υπολογισμό των εξισώσεων ροής φορτίου είναι απαραίτητη η κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων, που συμβολίζεται Y_{bus} . Για την κατασκευή του πίνακα Y_{bus} χρησιμοποιείται η μέθοδος των κόμβων από τον 1^ο κανόνα του Kirchhoff στο εκάστοτε σύστημα. Ο πίνακας αυτός έχει μέγεθος $n \times n$, όπου n είναι ο αριθμός των ζυγών του δικτύου, και έχει την παρακάτω μορφή.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & \cdots & Y_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n,1} & \cdots & Y_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Αν στο σύστημα δίνονται όλες οι αγωγιμότητες μεταξύ των διασυνδεδεμένων κόμβων, τότε πίνακας συμπληρώνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

- Το κάθε διαγώνιο στοιχείο του πίνακα (Y_{ii}), είναι το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται με τον εκάστοτε κόμβο.
- Τα υπόλοιπα στοιχεία του πίνακα (Y_{ij}), έχουν τιμή την αρνητική αγωγιμότητα μεταξύ των κόμβων i και j .

Στην πραγματικότητα πολλά μη-διαγώνια στοιχεία του πίνακα μηδενίζονται διότι στην πράξη δεν υπάρχει μεγάλη διασύνδεση μεταξύ των ζυγών, επομένως ο πίνακας αγωγιμοτήτων έχει αρκετά μηδενικά στοιχεία.

2.4 Σχηματισμός Εξισώσεων Ροής Φορτίου

Το πρόβλημα της ροής φορτίου είναι ο υπολογισμός της τιμής της τάσης και της φασικής γωνίας σε όλους τους ζυγούς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε συνθήκες λειτουργίας σταθερής κατάστασης. Για να βρεθεί η λύση του συστήματος υπολογίζονται επίσης η ενεργός και η άεργος ισχύς, μπορούν επίσης να υπολογιστούν οι απώλειες του συστήματος. Τα δεδομένα που εισάγονται είναι πληροφορίες για τους ζυγούς, τις γραμμές μεταφοράς και για τους μετασχηματιστές. Για την υλοποίηση της μελέτης ροής ισχύος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αρχικά απαιτείται η κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων των κόμβων, που συμβολίζεται Y_{bus} . Επίσης απαραίτητος είναι ο πίνακας των ρευμάτων (I) που εισάγονται σε κάθε ζυγό, ο πίνακας αυτός αποτελείται από μία στήλη με n διανύσματα, καθώς και ο πίνακας (V) ο οποίος αποτελείται επίσης από μία στήλη n στοιχείων και περιγράφει την τάση του κάθε ζυγού του συστήματος. Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$I = Y_{bus}V \quad (2.2)$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \quad (2.3)$$

και η ισχύς που εισέρχεται στον ζυγό k δίνεται στις παρακάτω δύο εξισώσεις:

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (2.4)$$

$$S_i = V_i I_i^* = V_i \left[\sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \right] \quad (2.5)$$

Η ενεργός και η άεργος ισχύς μπορούν να γραφούν στην πολική τους μορφή ως:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.6)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2.7)$$

Και οι σχέσεις αυτές μπορούν να γραφούν συνδυαστικά ως:

$$S_i = V_k \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j e^{j(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})} \quad (2.8)$$

Οι σχέσεις (2.) και (2.) μπορούν επίσης να αναπαρασταθούν και με την μορφή ορθογώνιων συντεταγμένων:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (2.9)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (2.10)$$

όπου,

$$G_{ij} = |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) \quad (2.11)$$

$$B_{ij} = |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij}) \quad (2.12)$$

2.5 Μέθοδος Gauss

Η μέθοδος Gauss είναι μια από τις παλαιότερες επαναληπτικές τεχνικές που εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σε ορισμένες περιπτώσεις. Η επαναληπτική μέθοδος Gauss έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αυτή η τεχνική είναι απλό και εύκολο να υπολογιστεί. Ο χρόνος που απαιτείται για τη σύγκλιση της μεθόδου σε μια λύση είναι γενικά περισσότερος σε σύγκριση με άλλες επαναληπτικές μεθόδους. Εξετάστε ένα σύστημα n γραμμικών εξισώσεων με x άγνωστα:

$$Ax = b \quad (2.13)$$

όπου:

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Η μέθοδος Gauss – Seidel είναι μια επαναληπτική τεχνική που λύνει την αριστερή πλευρά αυτού έκφραση (2.1) για x , χρησιμοποιώντας την υποτιθέμενη τιμή για το x στη δεξιά πλευρά. Αναλυτικά, αυτό μπορεί να γραφτεί ως:

$$x_i^{k+1} = \frac{1}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n a_{ij} x_j^k \right) \quad (2.15)$$

όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου οι αλλαγές που έγιναν με την επανάληψη είναι μέσα σε κάποια προαποφασισμένη επιτρεπτή απόκλιση στην ακρίβεια, η οποία συμβολίζεται ως ϵ .

Ο αλγόριθμος Gauss εκφράζεται με την επαναληπτική σχέση:

$$x^{(v+1)} = F(x^{(v)}) \quad (2.16)$$

όπου,

$$f(x) = 0, \quad x = F(x) \quad (2.17)$$

Όπου v εκφράζεται ο αύξον αριθμός της επαναληπτικής διαδικασίας.

Αλγόριθμος για την μέθοδο Gauss:

Βήμα 1: Σχηματισμός πίνακα αγωγιμοτήτων των κόμβων (Y_{ij}).

Βήμα 2: Επιλογή της ανοχής, έστω τιμή ϵ .

Βήμα 3: Υπόθεση ότι όλοι οι ζυγοί έχουν αρχικές τάσεις έχουν τιμή $1 \angle 0^\circ$ pu, εκτός από τον άπειρο ζυγό.

Βήμα 4: Εκκίνηση επανάληψης για τον ζυγό $i=1$ με αρίθμηση 0.

Βήμα 5: Έλεγχος στον άπειρο ζυγό, αν ο μετρητής i δείχνει στον άπειρο ζυγό ή ενημέρωση των τιμών Q_i του κάθε ζυγού με χρήση της συνάρτησης (2.10).

Βήμα 6: Υπολογισμός των τάσεων των ζυγών από την εξίσωση ροής φορτίου (2.12).

Βήμα 7: Υπολογισμός των διαφορών των τάσεων.

$$V_i^{k+1} = V_i^{k+1} - V_i^k \quad (2.18)$$

Βήμα 8: Για το επόμενο ζυγό επανάλαβε τα βήματα 5 μέχρι 7 μέχρι να προκύψουν καινούργιες τιμές V_i^{k+1} τάσεων των ζυγών σε όλους τους ζυγούς.

Βήμα 9: Συνέχιση επανάληψης των βημάτων 5 μέχρι 9 μέχρι οι τιμές του V_i^k όλων των ζυγών να είναι μέσα στην επιτρεπτή απόκλιση.

$$V_i^{k+1} < \varepsilon \quad (2.19)$$

Όπου το k συμβολίζεται ως ο αριθμός των επαναλήψεων. [4]

2.6 Μέθοδος Gauss – Seidel

Αυτή είναι μια απλή επαναληπτική τεχνική που βασίζεται στη μέθοδο Gauss που ήταν δημοφιλής στις αρχές ημέρες ψηφιακού υπολογιστή. Ωστόσο, η πιο ισχυρή μέθοδος N-R χρησιμοποιείται αυτές τις μέρες. Η επαναληπτική τεχνική Gauss-Seidel χρησιμοποιείται ακόμη για μικρά συστήματα ισχύος όπου προγραμματίζονται. Η απλότητα είναι πιο σημαντική από το κόστος υπολογισμού, και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα συστήματα για την απόκτηση μιας αρχικής λύσης για τη συνέχιση της μεθόδου Newton-Raphson. Όλοι οι υπολογισμοί που γίνονται με τη μέθοδο Gauss-Seidel είναι ίδιοι με τη μέθοδο Gauss εκτός από το η προηγούμενη εξίσωση η τιμή του x που υπολογίζεται σε μία εξίσωση αντικαθιστά αμέσως το x που υπολογίστηκε από προηγούμενη επανάληψη.

Αλγόριθμος για την μέθοδο Gauss – Seidel:

Βήμα 1: Σχηματισμός του πίνακα αγωγιμοτήτων των κόμβων (Y_{bus}).

Βήμα 2: Επιλογή της ανοχής, έστω τιμή ε .

Βήμα 3: Υπόθεση ότι οι αρχικές τάσεις έχουν τιμή

Βήμα 4: Εκκίνηση επανάληψης για τον ζυγό $i=1$ με αρίθμηση 0.

Βήμα 5: Έλεγχος για τον ζυγό αναφοράς, αν i είναι ο ζυγός αναφοράς ή ο ζυγός PV τότε να ενημερώνεται η τιμή Q_i με χρήση της εξίσωσης (2.10).

Βήμα 6: Υπολογισμός της νέας τιμής τάσης του ζυγού V_i με χρήση της εξίσωσης της ροής φορτίου (2.12).

Βήμα 7: Υπολογισμός της διαφοράς τάσεων.

$$V_i^{k+1} = V_i^{k+1} - V_i^k \quad (2.20)$$

Βήμα 8: Η νέα τιμή της τάσης του ζυγού ανανεώνει την τιμή της τάσης του παλιού ζυγού και χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται στον επόμενο ζυγό.

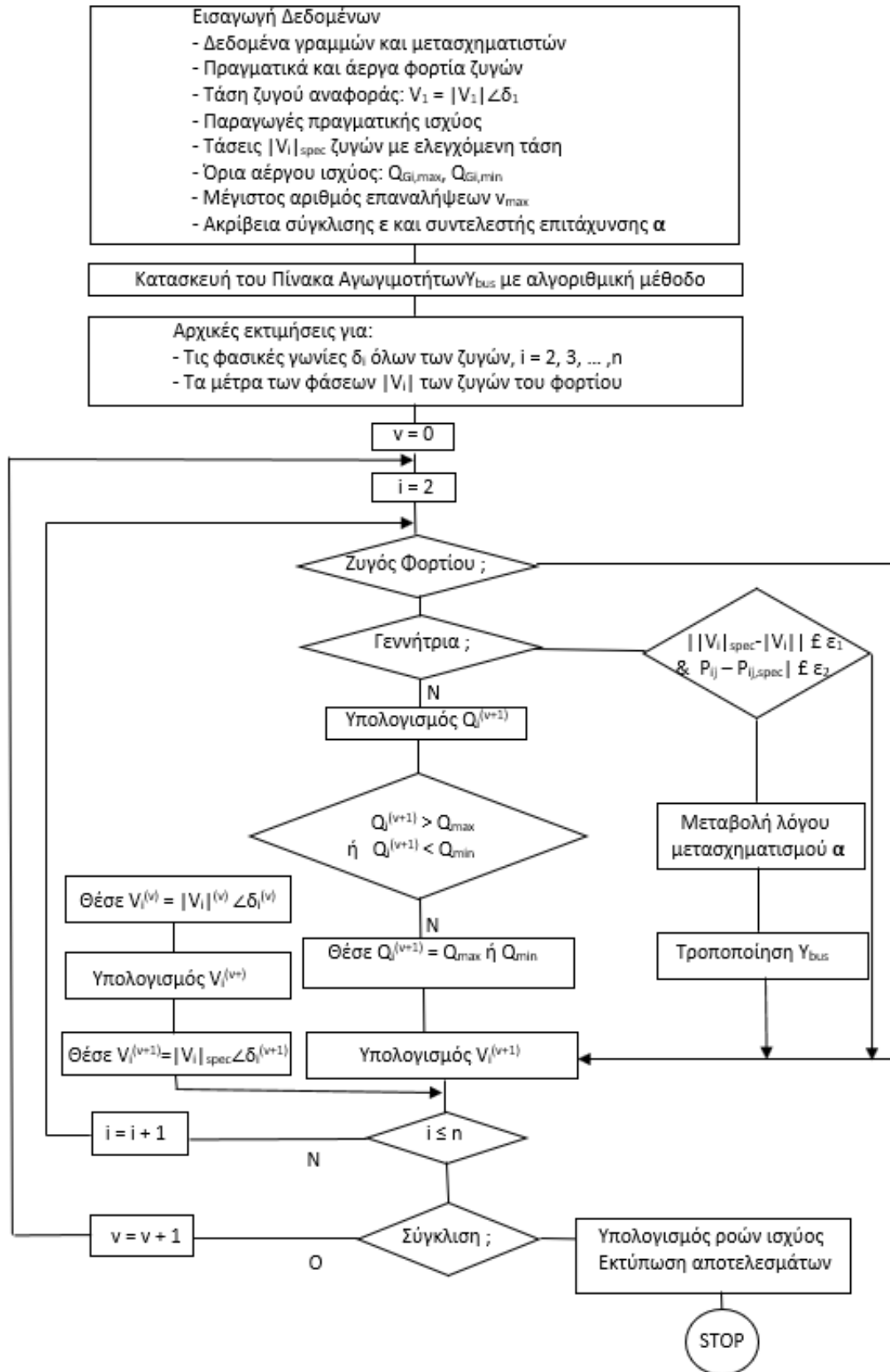
Βήμα 9: Πήγαινε στον επόμενο ζυγό και επανάλαβε τα βήματα 5 έως 7 μέχρι το καινούργιο σύνολο των τάσεων των ζυγών να περιλαμβάνει όλους τους ζυγούς.

Βήμα 10: Συνέχιση της επανάληψης από το Βήμα 5 έως το Βήμα 9 μέχρι η τιμή ΔV_i^k σε όλους τους ζυγούς να είναι μέσα στα όρια της επιτρεπτής ανοχής που έχει επιλεχθεί. Δηλαδή,

$$V_i^{k+1} < \varepsilon \quad (2.21)$$

όπου k είναι ο αριθμός των επαναλήψεων. [4]

Στο Σχήμα 2.1, παρουσιάζεται σχηματικά η μέθοδος Gauss - Seidel.



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Gauss-Seidel για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου. [3]

2.7 Μέθοδος Newton – Raphson

Η μέθοδος Gauss-Seidel είναι πολύ απλή, αλλά η σύγκλιση γίνεται όλο και πιο αργή το μέγεθος του συστήματος αυξάνεται. Η τεχνική Newton-Raphson συγκλίνει γρήγορα σε λιγότερο από 4-5 επαναλήψεις ανεξάρτητα από το μέγεθος του συστήματος. Αυτή η μέθοδος είναι κυρίως χρήσιμη για σύστημα αρκετά μεγάλου μεγέθους με χιλιάδες ζυγούς. Η μέθοδος Newton-Raphson έχει αρκετά πλεονεκτήματα, για τον λόγο αυτό εξάλλου προτιμάται σε σχέση με τους δύο προηγούμενους αλγορίθμους. Ο αλγόριθμος πραγματοποιεί τετραγωνική σύγκλιση, επομένως είναι πολύ γρήγορη, επίσης ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι ο αριθμός των επαναλήψεων είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος του συστήματος, επόμενος εξοικονομείται σημαντικός χρόνος λόγω του περιορισμένου αριθμού των επαναλήψεων. Τα μειονεκτήματα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι η λύση του θεωρείται αρκετά δύσκολη και απαιτεί αρκετή μνήμη για την υλοποίησή του. Τέλος ο υπολογισμός του Ιακομβιανού πίνακα σε κάθε επανάληψη καταναλώνει αρκετό χρόνο.

Έστω μια συνάρτηση $f(x) = 0$ και η παράγωγός της να είναι η συνάρτηση $f'(x)$, τότε αν η αρχική εκτίμηση είναι η τιμή x_0 , χρήση του τύπου:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)} \quad (2.22)$$

η επόμενη εκτίμηση συμβολίζεται με x_1 και είναι πιο βελτιωμένη σε σχέση με την x_0 , η διαδικασία επομένως συνεχίζεται μέχρι η λύση να ανήκει στα επιτρεπτά όρια ακρίβειας που έχουν προαποφασισθεί.

Έστω η αρχική εκτίμηση για το σφάλμα να συμβολίζεται Δx_0 τότε αν το αρχικό σφάλμα θεωρηθεί αρκετά μικρό τότε:

$$\Delta x_0 \approx -\frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (2.23)$$

Αν πραγματοποιηθούν αρκετές αρχικές εκτιμήσεις, έστω n σε αριθμό, τότε η εξίσωση (2.22) παίρνει την μορφή :

$$x_{k+1} = x_k - [J_k]^{-1}(x_k) \quad (2.24)$$

ή από την εξίσωση (2.23) την μορφή:

$$\Delta x_k = -[J_k]^{-1}f(x_k) \quad (2.25)$$

όπου ως J συμβολίζεται ο Ιακομβιανός πίνακας ο οποίος έχει την μορφή:

$$J_k = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)_k & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)_k \\ \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)_k & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)_k \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

ωστόσο η μέθοδος Newton-Raphson κάνει χρήση του αντιστρόφου πίνακα, δηλαδή του J^{-1} .

Η μέθοδος Newton-Raphson όπως και οι προηγούμενες δύο, είναι μια επαναληπτική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός συνόλου από διάφορες μη-γραμμικές εξισώσεις οι οποίες έχουν ίσο αριθμό αγνώστων. Υπάρχουν δύο πρακτικές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των λύσεων της ροής φορτίου με την μέθοδο αυτή. Στην πρώτη περίπτωση για τις μεταβλητές χρησιμοποιούνται ορθογώνιες συντεταγμένες ενώ στην δεύτερη χρησιμοποιούνται πολικές συντεταγμένες. Από αυτές τις δύο πρακτικές η δεύτερη είναι η πιο διαδεδομένη.

Για τον υπολογισμό της ροής φορτίου με χρήση του αλγορίθμου Newton-Raphson είναι απαραίτητο να αναφερθούν οι παρακάτω εξισώσεις οι οποίες παρουσιάζουν την μορφή και τα μεγέθη των μεταβλητών, των διανυσμάτων και των πινάκων που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για να πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς.

Το διάνυσμα δ που περιγράφει την φασική γωνία του κάθε ζυγού έχει την μορφή:

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Το διάνυσμα της απόλυτη τιμή της τάσης του κάθε ζυγού συμβολίζεται ως:

$$|V| = \begin{bmatrix} |V_2| \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Επομένως ο δείκτης x ορίζεται ως ο συνδυασμός των τιμών των εξισώσεων (2.23) και (2.24) και έχει την μορφή:

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Η συνάρτηση $f(x)$ έχει την μορφή:

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2,spec} - P_2(x) \\ \vdots \\ P_{n,spec} - P_n(x) \\ Q_{2,spec} - Q_2(x) \\ \vdots \\ Q_{n,spec} - Q_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Από τις εξισώσεις (2.25), (2.26), (2.30) χωρίς τον δείκτη της επανάληψης k η σχέση παίρνει την μορφή:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & H & \vdots & \vdots & N & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & M & \vdots & \vdots & L & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_2| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί συνοπτικά, όπου οι υποπίνακες H, N, M, L παίρνουν τις τιμές τους από την εξίσωση (2.31):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Επομένως ο αλγόριθμος Newton-Raphson μπορεί να γραφεί ως:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_k \\ \Delta |V|_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_k & N_k \\ M_k & L_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta_k \\ |V|_k \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Βήματα για την υλοποίηση του αλγορίθμου Newton-Raphson:

Βήμα 1: Σχηματισμός του πίνακα αγωγιμοτήτων των κόμβων (Y_{bus}).

Βήμα 2: Υπόθεση μιας αρχικής τιμής για το σύνολο των τάσεων των ζυγών και ορισμός ενός ζυγού n ως ζυγό αναφοράς.

Βήμα 3: Υπολογισμός της πραγματικής ισχύος P_i με χρήση της εξίσωσης (2.9).

Βήμα 4: Υπολογισμός της άεργου ισχύος Q_i με χρήση της εξίσωσης (2.10).

Βήμα 5: Σχηματισμός του Ιακομβιανού πίνακα (J).

Βήμα 6: Υπολογισμός των διαφορών ενεργούς και άεργου ισχύος, ΔP_i και ΔQ_i αντίστοιχα, για όλα τα i, με $i = 1, 2, \dots, n-1$.

Βήμα 7: Επιλογή μιας τιμής ανοχής ϵ .

Βήμα 8: Τέλος της επανάληψης αν όλες οι διαφορές ισχύος ΔP_i και ΔQ_i είναι μικρότερες από την επιλεγμένη τιμή ανοχής ϵ .

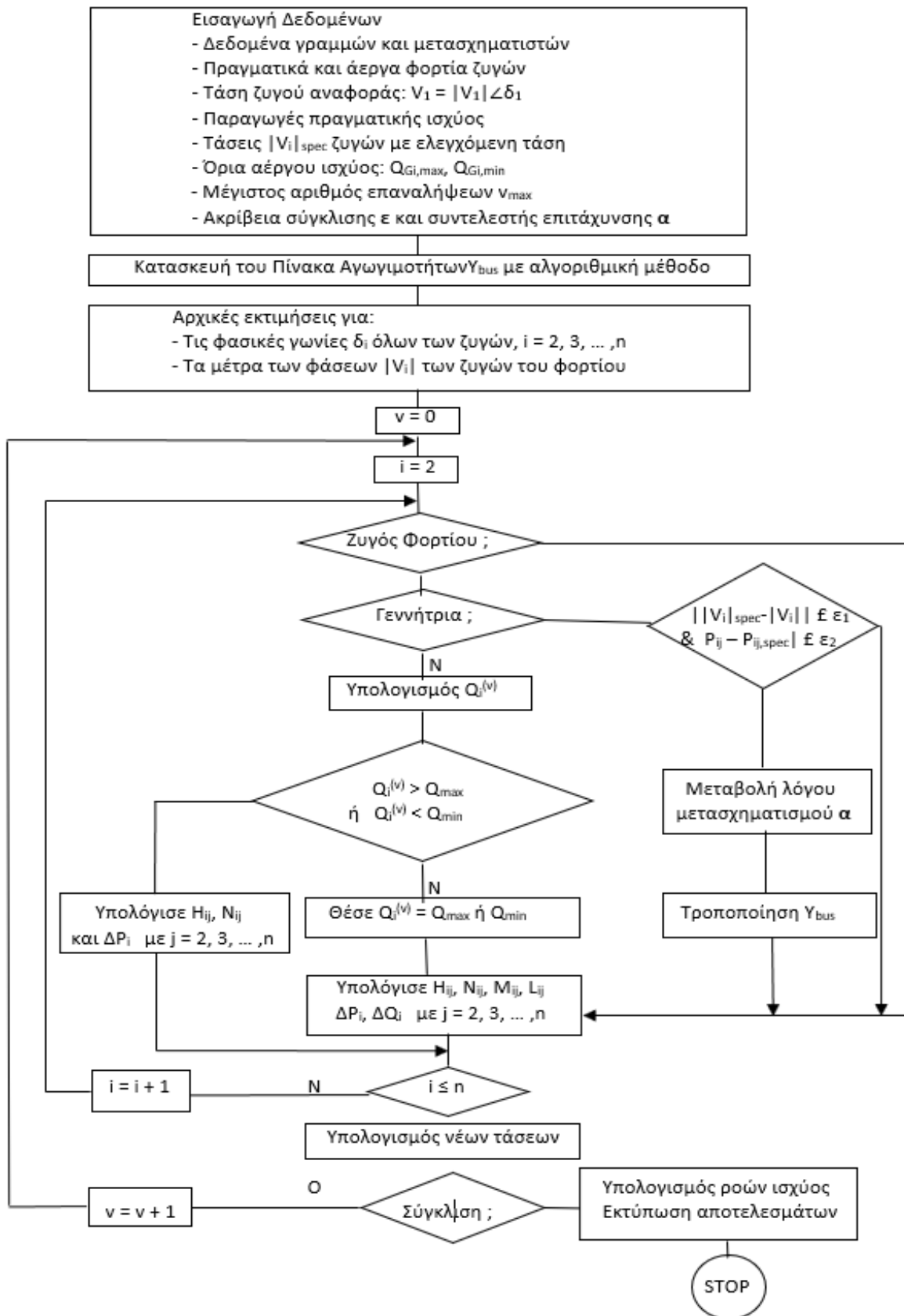
Βήμα 9: Αντικατάσταση των τιμών από τα βήματα 4 και 5 στην εξίσωση (2.33), και υπολογισμός των δεικτών $\Delta \theta$ και $\frac{\Delta |V_i|}{|V_i|}$.

Βήμα 10: Ανανέωση των τιμών $|V_i|$ και θ_i για όλες τιμές i, με χρήση του τύπου:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$$

Βήμα 11: Επανάληψη όλων των βημάτων από το Βήμα 3 και μετά. [3, 4]

Στο Σχήμα 2.2, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Newton-Raphson.



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Newton-Raphson για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου. [3]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Η ασφαλιστική μελέτη στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται για τον προσδιορισμό των ρευμάτων που ρέουν στις γραμμές μεταφοράς του εκάστοτε δικτύου και τις τάσεις των ζυγών του κατά τη διάρκεια της εμφάνισης διαφόρων τύπων βραχυκυκλωμάτων που συμβαίνουν σε διάφορες πιθανές θέσεις του συστήματος. Σε αυτά τα δίκτυα βραχυκύκλωμα ή σφάλμα συμβαίνει όταν διακοπεί η μόνωση σε κάποιο σημείο του συστήματος ή όταν κάποιο αγώγιμο αντικείμενο έρθει σε επαφή με κάποιον γυμνό αγωγό. Οι αιτίες για την πρόκληση των σφαλμάτων είναι πολλές και μπορεί να είναι φυσικές ή κάποιο ατύχημα, όπως κεραυνοί, δυνατοί άνεμοι, πτώσεις δένδρων σε γραμμές, καταστροφές στύλων από συγκρούσεις οχημάτων, διείσδυση μικρών ζώων σε διακοπτικούς μηχανισμούς κτλ. Τα σφάλματα κατά σειρά συχνότητας στην εμφάνιση είναι: το μονοφασικό προς γη, το διφασικό, το διφασικό προς γη, και το συμμετρικό τριφασικό και τέλος το τριφασικό βραχυκύκλωμα με την γείωση. Οι τρεις πρώτοι τύποι σφαλμάτων οδηγούν σε έντονα ασύμμετρες καταστάσεις λειτουργίας. Τα ρεύματα που ρέουν στις γραμμές μεταφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αμέσως μετά από ένα σφάλμα είναι πολύ μεγαλύτερη των κανονικών ρευμάτων που ρέουν πριν να συμβεί το σφάλμα, προκαλούν δυναμικές και θερμικές καταπονήσεις και αν δεν διακοπούν από τις τις συσκευές προστασίας δηλαδή τους διακόπτες, είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν την καταστροφή του εξοπλισμού. Επομένως το σύστημα προστασίας του εκάστοτε δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να αναγνωρίζει την ύπαρξη των σφαλμάτων και να θέτει σε λειτουργία τις κατάλληλες διαδικασίες ώστε, με την ελάχιστη δυνατή διακοπή των υπηρεσιών που παρέχονται στην κατανάλωση, να αποσυνδέονται τα μέρη του δικτύου στα οποία εμφανίζεται ένα σφάλμα προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή τους. Οι μελέτες βραχυκυκλωμάτων είναι χρήσιμες:

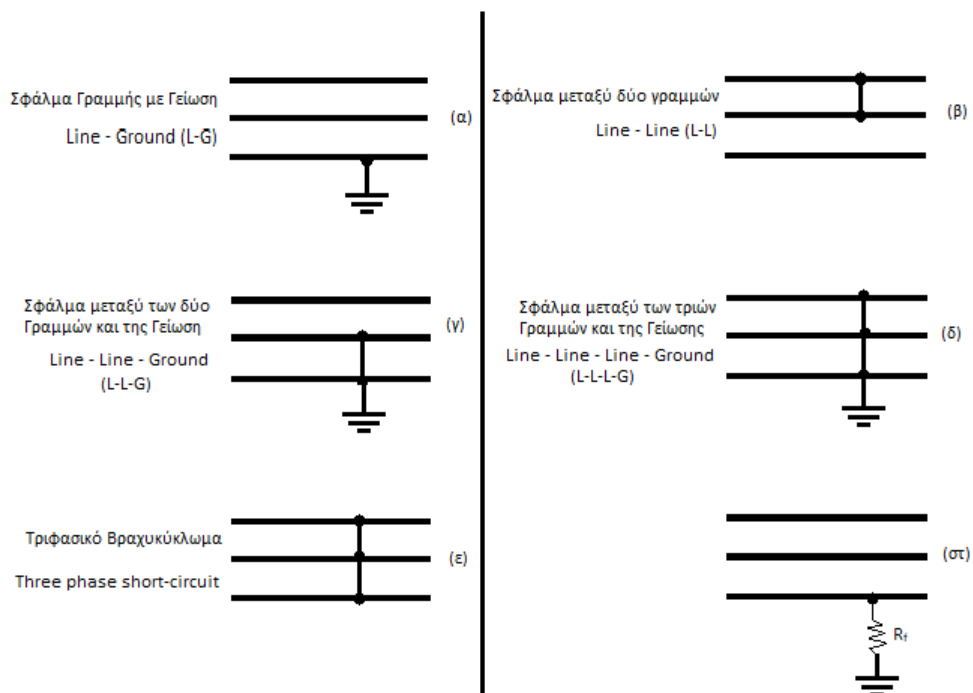
- Για τη σχεδίαση του κατάλληλου συστήματος προστασίας του ενεργειακού συστήματος
- Για τη σωστή επιλογή των διακοπών του συστήματος προστασίας, διότι δύο από τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η σωστή επιλογή τους είναι το ρεύμα που ρέει αμέσως μετά το σφάλμα και το ρεύμα που πρέπει αυτοί να διακόψουν.
- Για τον προσδιορισμό των αναγκαίων διακοπτικών λειτουργιών καθενός διακόπτη του συστήματος
- Για τον καθορισμό των ρυθμίσεων των ηλεκτρονόμων που ελέγχουν τους διακόπτες

Αρχικά, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται ως ευσταθές όταν λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες. Το σύστημα γίνεται ασταθές όταν εμφανιστούν προβλήματα και αστοχίες στην μόνωση σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος ή εξαιτίας της επαφής των καλωδίων, που ονομάζεται βραχυκύκλωμα ή σφάλμα, και εμφανίζεται στις γραμμές μεταφοράς των δικτύων. Τα σφάλματα στα συστήματα ισχύος προκύπτουν από σειρά αιτιών όπως είναι οι φυσικές καταστροφές (κεραυνοί, αστραπές, ισχυροί άνεμοι, σεισμοί), η αστοχία μιας μόνωσης, η πτώση ενός δέντρου ή ακόμα και η επαφή ενός πτηνού με τις γραμμές μεταφοράς. Σύμφωνα με τα παραπάνω τα σφάλματα που προκύπτουν στις γραμμές μεταφοράς χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα συμμετρικά και τα ασύμμετρα σφάλματα.

Τα σφάλματα που αφορούν και τις τρεις φάσεις ονομάζονται συμμετρικά σφάλματα. Όσον αφορά τα συμμετρικά σφάλματα, όλες οι φάσεις βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους και συχνά με την γείωση. Αυτά τα σφάλματα είναι ισορροπημένα με την έννοια ότι το σύστημα παραμένει συμμετρικό, ή αλλιώς ότι οι φασικές γωνίες επηρεάζονται και στις τρεις γραμμές κατά τον ίδιο βαθμό. Είναι ο πιο σοβαρός τύπος σφάλματος που εμφανίζεται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά τουλάχιστον εμφανίζεται αρκετά σπάνια.

Τα ασύμμετρα σφάλματα προκύπτουν μόνο μεταξύ μίας ή δύο φάσεων του κυκλώματος, επίσης στα σφάλματα αυτά χάνεται η συμμετρία μεταξύ των τριών φάσεων στις γραμμές μεταφοράς, καθώς διαφέρει η ένταση και η φασική γωνία, στις τρεις φάσεις του συστήματος. Το ασύμμετρο σφάλμα είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος βλάβης που συμβαίνει στα κυκλώματα τροφοδοσίας και χωρίζεται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- Σφάλμα μίας φάσης με την γείωση (L-G),
- Σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων (L-L),
- Σφάλμα δύο φάσεων μεταξύ τους και με την γείωση (L-L-G).



Σχήμα 3.1. Αναπαράσταση Βραχυκυκλωμάτων. [1]

Τα σφάλματα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να προκαλέσουν βλάβες ή διακοπές στην ισχύ ενός δικτύου. Τα σφάλματα αυξάνουν τις τιμές των τάσεων και τις εντάσεις των ρευμάτων σε διάφορα κομβικά σημεία του συστήματος. Οι μεγάλες τιμές

τάσεων και εντάσεων μπορούν να φθείρουν τις μονώσεις των καλωδίων στις γραμμές μεταφοράς και να μειώσουν το χρόνο ζωής του εξοπλισμού. Τα σφάλματα επίσης μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια της ευστάθειας του συστήματος. Για τον λόγο αυτό στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητος ο εντοπισμός των σφαλμάτων και η απομόνωση των γραμμών μεταφοράς, ώστε τα σφάλματα να μην επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του δικτύου. [1]

3.2 Συμμετρικά Βραχυκυκλώματα

3.2.1 Εισαγωγή

Το τριφασικό βραχυκύκλωμα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ουσιαστικά ένα συμμετρικό σφάλμα. Αν και το τριφασικό βραχυκύκλωμα είναι ισορροπημένο, η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών είναι χρήσιμη για την ανάλυση και την μελέτη των βραχυκυκλωμάτων. Με την εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος στο δίκτυο τότε το ρεύμα βραχυκύκλωσης καθορίζεται από την ΗΕΔ των μηχανών του δικτύου, από τις σύνθετες αντιστάσεις των γεννητριών αλλά και από τις σύνθετες αντιστάσεις που βρίσκονται στις γραμμές μεταφοράς, ανάμεσα στις γεννήτριες του συστήματος. Το ρεύμα μιας σύγχρονης μηχανής αμέσως μετά την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος και το ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης διαφέρουν μεταξύ τους εξαιτίας της επίδρασης του ρεύματος τυμπάνου στην ροή. Ένα συμμετρικό ή τριφασικό σφάλμα είναι πιο επικίνδυνο και σοβαρό από την άποψη της ικανότητας μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος καθώς σε αυτήν την περίπτωση αυτή επηρεάζονται και οι τρεις φάσεις ενός τριφασικού συστήματος, σε αντίθεση με τα ασύμμετρα σφάλματα. [2]

3.2.2 Αντοχή σε βραχυκύκλωμα (SCC)

Όταν εμφανίζεται ένα σφάλμα σε μία γραμμή μεταφοράς, η τάση των ζυγών στα άκρα αυτής της γραμμής αλλά και σε όλους τους ζυγούς του δικτύου ελαττώνονται κατά την διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Το μέγεθος αυτής της πτώσης τάσης είναι μια ένδειξη αντοχής του δικτύου. Χρειάζεται να υπάρχει ένα μέτρο για τον υπολογισμό αυτής της αντοχής, αλλά και ένα μέτρο της σοβαρότητας του βραχυκυκλώματος. Τα δύο αυτά μέτρα εκφράζονται από μία ποσότητα που λέγεται αντοχή σε βραχυκύκλωμα (Short Circuit Capacity (SCC)) ή επίπεδο σφάλματος του εξεταζόμενου ζυγού.

Η αντοχή σε βραχυκύκλωμα ενός ζυγού του δικτύου, ορίζεται σαν το γινόμενο των μέτρων της τάσης του ζυγού πριν το βραχυκύκλωμα και του ρεύματος με το βραχυκύκλωμα. Αν οι ποσότητες αυτές οριστούν στο ανά μονάδα (pu) σύστημα, τότε και η αντοχή σε βραχυκύκλωμα ορίζεται σε pu MVA δηλαδή:

$$|SCC| = |V_{\pi\beta}| |I_{\mu\beta}| \text{ pu MVA} \quad (3.1)$$

αν η πολική τάση εκφραστεί σε KV και το φασικό ρεύμα σε KA, τότε η αντοχή του βραχυκυκλώματος εκφράζεται σε τριφασικά MVA:

$$|SCC| = \sqrt{3} |V_{\pi\beta}| |I_{\mu\beta}| \text{ pu MVA} \quad (3.2)$$

Συνήθως η προσφαλαμτική φάση είναι 1 pu, τότε από την εξίσωση (3.2) προκύπτει ότι:

$$|SCC| \approx |V_{\pi\beta}| pu MVA \quad (3.3)$$

3.2.4 Θεώρημα Thevenin

Σύμφωνα με το θεώρημα Thevenin οποιοδήποτε μη-απλοποιημένο μέρος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος πέραν των ακροδεκτών των φορτίων μπορεί, να μπορεί να αντικατασταθεί από την εν σειρά σύνδεση μιας πηγής τάσης και μιας αντίστασης. Το θεώρημα του Thevenin βοηθάει στον υπολογισμό των ρευμάτων σε έναν κλάδο του δικτύου, όταν μεταβάλλονται οι αντιστάσεις σε αυτό τον κλάδο, αλλά το υπόλοιπο δίκτυο παραμένει σταθερό.

Η πιο γενική δήλωση του θεωρήματος Thevenin είναι ότι κάθε γραμμικό ενεργό δίκτυο που αποτελείται από ανεξάρτητη ή εξαρτημένη πηγή τάσης και ρεύματος, τα στοιχεία του κυκλώματος μπορούν να αντικατασταθούν από ένα ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο αποτελείται από μία πηγή τάσης η οποία είναι συνδεδεμένη σε σειρά με μία αντίσταση. Με άλλα λόγια, το ρεύμα που ρέει μεταξύ μιας αντίστασης η οποία είναι συνδεδεμένη μεταξύ δύο ακροδεκτών μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο έχει μια πηγή τάσης E_{TH} συνδεδεμένη σε σειρά με μια αντίσταση R_{TH} . Ως E_{TH} συμβολίζεται η τάση του ανοιχτοκυκλώματος μεταξύ των δύο ακροδεκτών και ονομάζεται τάση Thevenin. Ως R_{TH} συμβολίζεται η αντίσταση Thevenin και ορίζεται ως η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση η οποία προκύπτει από το άθροισμα όλων των εσωτερικών αντιστάσεων των πηγών που έχουν αντικατασταθεί.

Το θεώρημα αυτό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ρευμάτων και των τάσεων σε περιπτώσεις όπου εμφανίζονται βραχυκυκλώματα. Στην πράξη ένα βραχυκύκλωμα σημαίνει ότι εμφανίζεται μια νέα σύνθετη αντίσταση μεταξύ δύο κόμβων όπου πριν την εμφάνισή του ήταν συνδεδεμένοι. Με την χρήση του θεωρήματος Thevenin υπολογίζονται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που θα εμφανιστούν, καθώς είναι γνωστή η τάση μεταξύ των δύο κόμβων πριν την εμφάνιση του βραχυκυκλώματος.

3.2.3 Υπολογισμός των Ρευμάτων του Τριφασικού Συμμετρικού Βραχυκυκλώματος

Ανάλογα με την διάρκεια της ύπαρξης ενός σφάλματος στο δίκτυο τότε για την αναπαράσταση της γεννήτριας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μεταβατική ή η υπομεταβατική περίοδος. Για τον επιλογή του κατάλληλου διακόπτη λαμβάνεται υπόψη η τιμή του ρεύματος που ρέει την ακριβώς τη στιγμή κατά την οποία οι επαφές κυκλώματος είναι ανοιχτές. Το αρχικά υψηλό ρεύμα σφάλματος σχετίζεται με την υπομεταβατική περίοδο και έχει παρατηρηθεί ότι αυτό το ρεύμα ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου. Όσον αφορά τους διακόπτες, οι περισσότεροι διακόπτες αεριοέκρηξης λειτουργούν στους 2,5 κύκλους ενώ οι διακόπτες SF6 εντός 1,5 κύκλους με συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος στα 50 ή 60 Hz και λειτουργούν με εξαιρετικά γρήγορη προστασία. Οι παλαιότεροι διακόπτες του κυκλώματος και αυτοί που βρίσκονται σε δίκτυα χαμηλότερης τάσης που σχετίζονται συνήθως με προστασία από πιο ανθεκτικά υλικά μπορούν να χρειαστούν οκτώ κύκλους ή ακόμα και περισσότερους για την ενεργοποίησή τους.

Στον απλό υπολογισμό των ρευμάτων σφάλματος αγνοείται η συνιστώσα του συνεχούς ρεύματος, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από το ποια στιγμή κατά την διάρκεια του κύκλου εμφανίζεται το βραχυκύκλωμα. Σε περίπτωση που ο διακόπτης ανοίξει συγκεκριμένο χρόνο μετά από την εμφάνιση του σφάλματος, τότε η συνιστώσα του

συνεχούς ρεύματος θα έχει μειωθεί σημαντικά. Αντίθετα όσον αφορά τους διακόπτες ταχείας δράσης το πραγματικό ρεύμα που θα διακοπεί αυξάνεται από το συνεχές ρεύμα και πρέπει να ληφθεί υπόψη. Σε απλούς, μη αυτοματοποιημένους υπολογισμούς, οι συμμετρικές r.m.s. η τιμή μπορεί να τροποποιηθεί με τη χρήση πολλαπλασιαστών για να ληφθεί υπόψη η συνιστώσα συνεχούς ρεύματος του ρεύματος σφάλματος. Παρόλο που αυτοί οι συντελεστές καθορίζονται από τα πρότυπα και εξαρτώνται από την αναλογία X/R (όπου X συμβολίζεται η αντίδραση και R η αντίσταση) του κυκλώματος προς το σφάλμα, έχουν τη μορφή:

- Διακόπτης 8 κύκλων ή πιο αργός, πολλαπλασιασμός με 1.0,
- Διακόπτης 5 κύκλων, πολλαπλασιασμός με 1.1,
- Διακόπτης 3 κύκλων, πολλαπλασιασμός με 1.2,
- Διακόπτης 2 κύκλων, πολλαπλασιασμός με 1.4. [1]

3.3 Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα

3.3.1 Εισαγωγή

Τα περισσότερα σφάλματα που συμβαίνουν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ασύμμετρα. Αυτά μπορούν να είναι ασύμμετρα στερεά βραχυκυκλώματα δια μέσου αντιστάσεων ή ανοιχτοκυκλωμένοι αγωγοί. Τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα περιλαμβάνονται οι εξής κατηγορίες, βραχυκυκλώματα μίας φάσης με την γη, βραχυκυκλώματα δύο φάσεων και βραχυκυκλώματα δύο φάσεων με την γη. Ανοιχτοκυκλώματα ενός ή δύο αγωγών προκαλούνται από την λειτουργία των ασφαλειών ή από την αποτυχημένη διακοπή και των τριών φάσεων από διακόπτες ή από άλλες συσκευές, που μπορεί να μην διακόπτουν και τις τρεις φάσεις ταυτόχρονα, αλλά και το σπάσιμο των αγωγών από διάφορα ατυχήματα ή τα καιρικά φαινόμενα.

Όλα τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα που μπορούν να παρουσιαστούν σε ένα δίκτυο είναι αδύνατον να μελετηθούν χωρίς τη χρήση υπολογιστών οι οποίοι χρησιμοποιούν εξειδικευμένα προγράμματα. [3]

3.3.2 Μέθοδος Συμμετρικών Συνιστωσών

Όταν ένα σύστημα δεν είναι συμμετρικό τότε οι τιμές των τάσεων, των εντάσεων και των φασικών αντιστάσεων είναι σε γενικές γραμμές άνισες. Τέτοια συστήματα επιλύονται με την μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών ή αλλιώς των τριών συνιστωσών, η οποία εφαρμόζεται σε κάθε φάση ξεχωριστά. Η μέθοδος αυτή απλοποιεί τα προβλήματα που προκύπτουν από την απώλεια της ισορροπίας των τριφασικών συστημάτων, εφαρμόζεται κυρίως σε τριφασικά σύστημα, αλλά μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για συστήματα με οποιοδήποτε αριθμό φάσεων. Ένα τριφασικό κύκλωμα το οποίο είναι μη-συμμετρικό επιλύεται θεωρώντας ότι οι συνιστώσες του κυκλώματος είναι συμμετρικές και στην συνέχεια γίνεται αντικατάσταση αυτών στο κύκλωμα. Το σύνολο των συμμετρικών συνιστωσών μπορεί να δοθεί ως μία ακολουθία θετικών, αρνητικών και μηδενικών φασικών συνιστωσών.

Η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών δημιουργεί ένα σύστημα τριών διαφορετικών φασικών συστημάτων τα οποία όταν αυτά ταυτίζονται ταυτόχρονα δίνουν τις μη-

συμμετρικές συνθήκες του κυκλώματος. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή οποιοδήποτε τριφασικό σύστημα μη-συμμετρικών τάσεων και εντάσεων μπορεί να αναπαρασταθεί με τις τρία ακόλουθα σύνολα φασικών συνιστωσών:

- Σύνολο συνιστωσών θετικής φασικής ακολουθίας, το οποίο αποτελείται από τρία διανύσματα με ίσο μέτρο, φασική μετατόπισης 120° και φασική ακολουθία a, b, c (κόκκινο, κίτρινο, μπλε) και δείκτη + ή 1.
- Σύνολο συνιστωσών αρνητικής φασικής ακολουθίας, το οποίο αποτελείται από τρία διανύσματα, επίσης με ίσο μέτρο και με φασική μετατόπιση 120° , αλλά με φασική ακολουθία a, c, b (κόκκινο, μπλε, κίτρινο), η οποία είναι αντίθετη από την αρχική και δείκτη - ή 2.
- Σύνολο συνιστωσών μηδενικής φασικής ακολουθίας, το οποίο αποτελείται από τρία διανύσματα, ίσα σε μέγεθος και με μηδενική φασική γωνία μετατόπισης το ένα με το άλλο και δείκτη 0. [3]

Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η γραφική ανάλυση ενός συνόλου τριών ασύμμετρων διανυσμάτων ρεύματος I_a, I_b, I_c , ενός τριφασικού συστήματος, σε τρία συμμετρικά, τριφασικά συστήματα διανυσμάτων ρεύματος. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.2 κάθε ένα από τα ασύμμετρα διανύσματα ισούται με το άθροισμα των συνιστωσών του, οπότε:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a,1} + I_{a,2} + I_{a,0} \\ I_b &= I_{b,1} + I_{b,2} + I_{b,0} \\ I_c &= I_{c,1} + I_{c,2} + I_{c,0} \end{aligned} \quad (3.4)$$

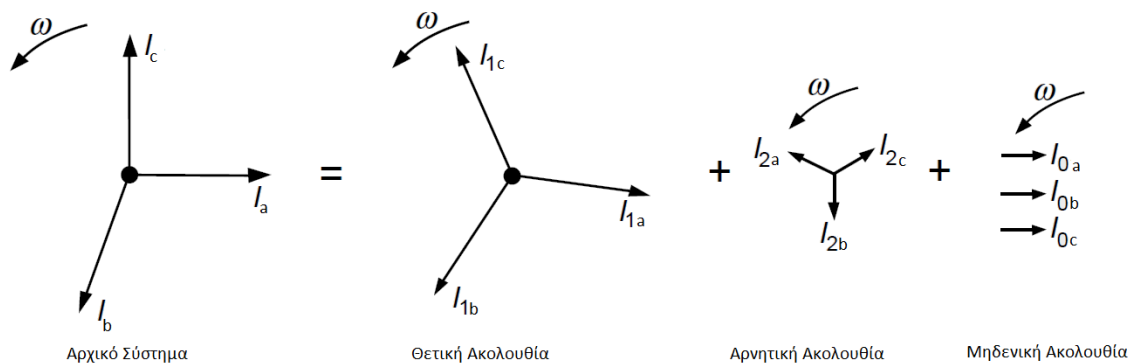
Για την αλγεβρική αναπαράσταση των φασοδιανυσμάτων, γίνεται η χρήση του συμβόλου 'α' το οποίο δηλώνει μια μετατόπιση φάσης κατά $+120^\circ$ και πολλαπλασιασμό του μεγέθους της μονάδας, δηλαδή:

$$V \angle \varphi \cdot a = V \angle \varphi \cdot 1 \angle 120^\circ = V \angle (\varphi + 120^\circ) \quad (3.5)$$

$$\alpha = e^{\frac{j2\pi}{3}} \quad (3.6. \alpha)$$

$$\alpha^3 = e^{j3 \cdot 2\pi/3} = 1 \quad (3.6. \beta)$$

$$\alpha^2 + \alpha = (-0.5 - j0.866) + (-0.5 + j0.866) = -1 \quad (3.6. \gamma)$$



Σχήμα 3.2 Ανάλυση τριφασικού συστήματος σε άθροισμα συμμετρικών συνιστωσών. [1]

Επίσης,

$$\therefore \alpha^3 + \alpha^2 + \alpha = 0 \quad (3.7.\alpha)$$

$$\therefore 1 + \alpha + \alpha^2 = 0 \quad (3.7.\beta)$$

Για την θετική ακολουθία φασεοδιανυσμάτων, ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} I_{a,1} &= I_{a,1}(1 + j0) \\ I_{b,1} &= I_{a,1}(-0.5 - j0.866) = a^2 I_{a,1} \\ I_{c,1} &= I_{a,1}(-0.5 + j0.866) = a I_{a,1} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Για την αρνητική ακολουθία φασεοδιανυσμάτων, ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} I_{a,2} &= I_{a,2}(1 + j0) \\ I_{b,2} &= I_{a,2}(-0.5 + j0.866) = \alpha I_{a,2} \\ I_{c,2} &= I_{a,2}(-0.5 - j0.866) = \alpha^2 I_{a,2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Οι εξισώσεις (3.4) με χρήσεις των σχέσεων (3.8) και (3.9) γίνεται:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a,1} + I_{a,2} + I_{a,0} \\ I_b &= I_{b,1} + I_{b,2} + I_{b,0} = a^2 I_{a,1} + I_{a,2} + I_{a,0} \\ I_c &= I_{c,1} + I_{c,2} + I_{c,0} = a I_{a,1} + \alpha^2 I_{a,2} + I_{a,0} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Έτσι σχηματίζεται ο παρακάτω πίνακας:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a,0} \\ I_{a,1} \\ I_{a,2} \end{bmatrix}$$

Αντιστρέφοντας τον παραπάνω πίνακα:

$$\begin{bmatrix} I_{a,0} \\ I_{a,1} \\ I_{a,2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Έστω T ο πίνακας των συμμετρικών συνιστωσών:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, I_p = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, I_s = \begin{bmatrix} I_{a,0} \\ I_{a,1} \\ I_{a,2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Και T⁻¹ ο αντίστροφος πίνακας:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Επομένως,

$$I_s = T^{-1}I_p \quad (3.14)$$

Παρόμοιες σχέσεις με τις προηγούμενες που συνδέουν τα ρεύματα, ισχύουν και για τις τάσεις, δηλαδή:

$$\begin{aligned} V_p &= TV_s \\ V_s &= T^{-1}V_p \end{aligned} \quad (3.15)$$

Όπου,

$$V_p = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, V_s = \begin{bmatrix} V_{a,1} \\ V_{a,2} \\ V_{a,0} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

3.3.3 Ισχύς Συμμετρικών Συνιστωσών

Η συνολική ισχύς στα τριφασικά συστήματα ισούται με το άθροισμα της ισχύος της κάθε μίας από τις τρεις φάσεις, δηλαδή:

$$\begin{aligned} S &= S_a + S_b + S_c \Rightarrow \\ S &= V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \end{aligned} \quad (3.17)$$

Όπου ως S συμβολίζεται η συνολική ισχύς των τριών φάσεων, ως V συμβολίζεται η τάση στην κάθε φάση και ως I συμβολίζεται η ένταση του ρεύματος στην κάθε φάση. Αναλύοντας την πρώτη φάση (a):

$$\begin{aligned} S_a &= P_a + jQ_a = (V_{a,0} + V_{a,1} + V_{a,2})(I_{a,0}^* + I_{a,1}^* + I_{a,2}^*) \Rightarrow \\ S_a &= (V_{a,0}I_{a,0}^* + V_{a,1}I_{a,1}^* + V_{a,2}I_{a,2}^*) + (V_{a,0}I_{a,1}^* + V_{a,1}I_{a,2}^* + V_{a,2}I_{a,0}^*) \\ &\quad + (V_{a,0}I_{a,2}^* + V_{a,1}I_{a,0}^* + V_{a,2}I_{a,1}^*) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Αντίστοιχοι τύποι ισχύουν και για τις φάσεις b, c.

Επίσης,

$$I_{b,1}^* = (a^2 I_{a,1})^* = (a^2)^* I_{a,1}^* = a I_{a,1}^* \quad (3.20)$$

Όμοια για $I_{b,2}^*$, $I_{c,1}^*$ και $I_{c,2}^*$.

Άρα η συνολική ισχύς ισούται με τον τριπλασιασμό μιας φάσης, οποιασδήποτε από τις τρεις, του συστήματος.

3.3.4 Αναπαράσταση Ακολουθιακών Κυκλωμάτων των Στοιχείων του Δικτύου

3.3.4.1 Σύγχρονη Γεννήτρια

Η θετική ακολουθία της σύνθετης αντίστασης Z_1 , είναι η κανονική μεταβατική τιμή. Στην αρνητική ακολουθία ρευμάτων δημιουργούν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στην αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με αυτό των ρευμάτων της θετικής ακολουθίας, και το οποίο περιστρέφεται γύρω από την επιφάνεια του ρότορα με την διπλάσια ταχύτητα από την σύγχρονη ταχύτητα, για τον λόγο αυτό η σύνθετη αντίσταση Z_2 είναι διαφορετική από την αρχική αντίσταση Z_1 . Η σύνθετη αντίσταση της μηδενικής ακολουθίας, που συμβολίζεται Z_0 , εξαρτάται από τον τρόπο της συνδεσμολογίας μεταξύ του σημείου τυλίγματος και της γης κατά αστέρα και του μονοφασικού τυλίγματος του στάτορα εν παράλληλο. Οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις συχνά συνδέονται μεταξύ του αστέρα και της γείωσης για λόγους προστασίας και τον περιορισμό των υπερτάσεων. Συνήθως στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζονται μόνο πηγές τάσεις με θετικές τιμές καθώς οι γεννήτριες παράγουν μόνο θετικές ακολουθίες ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων.

3.3.4.2 Γραμμές Μεταφοράς

Οι σύνθετες αντιστάσεις τόσο στις θετικές όσο και στις αρνητικές ακολουθίες είναι οι κανονικές συμμετρικές τιμές. Η σύνθετη αντίσταση της μηδενικής ακολουθίας εξαρτάται από τον τύπο του καλωδίου επιστροφής προς την γείωση αν δεν υπάρχει τέταρτο καλώδιο. Εξαρτάται επίσης από την ύπαρξη του καλωδίου της γείωσης που χρησιμοποιείται στην αντικεραυνική προστασία των πύργων χρησιμοποιούνται από τις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

3.3.4.3 Μετασχηματιστές

Οι σύνθετες αντιστάσεις στις θετικές αλλά και στις αρνητικές ακολουθίες είναι οι κανονικές συμμετρικές τιμές. Ωστόσο η σύνδεση μηδενικής ακολουθίας των μετασχηματιστών είναι πιο περίπλοκη και περιλαμβάνει αρκετές περιπτώσεις οι οποίες εξαρτώνται από τον τύπο της σύνδεσης των τυλιγμάτων. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι μηδενικές ακολουθίες για τους διαφορετικούς συνδυασμούς τυλιγμάτων.

Πίνακας 3.1 Αναπαράσταση μετασχηματιστών μηδενικής ακολουθίας. [1]

Σύνδεση των τυλιγμάτων		Αναπαράσταση ανά φάση	Σχολιασμός
Πρωτεύον	Δευτερεύον		
			Ρεύματα μηδενικής ακολουθίας που ρέουν ελεύθερα τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον κύκλωμα
			Δεν υπάρχει δίοδος για την ροή ρεύματος μηδενικής ακολουθίας στο πρωτεύον κύκλωμα
			Μονοφασικά ρεύματα που ρέουν μόνο μέσα στο τρίγωνο και όχι έξω από αυτό
			Δεν είναι δυνατή η ροή ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας
			Δεν είναι δυνατή η ροή ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας
			Το τριπλό τύλιγμα παρέχει δίοδο για την ροή των ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας

Τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας στα τυλίγματα της μιας μεριάς του μετασχηματιστή πρέπει να παράγουν την απαραίτητη ένταση σε Amperes στην άλλη μεριά των τυλιγμάτων, αλλά τρία διαφορετικά σε φάση ρεύματα, δεν μπορούν να ρέουν σε μια συνδεσμολογία αστέρα, χωρίς αυτή να είναι συνδεδεμένη μέσω της γείωσης με το έδαφος. Το ρεύμα μπορεί να ρέει στις εσωτερικές γραμμές του τυλιγματος με συνδεσμολογία αστέρα αλλά δεν μπορεί να κυκλοφορήσει στις εξωτερικές γραμμές του τυλιγματος. Τέλος εξαιτίας της διαφοράς της σύνθετης αντίστασης μεταξύ των φάσεων ισχύει ότι $Z_0 \neq Z_1$, αν ο μετασχηματιστής είναι τριών άκρων τότε ισχύει ότι $Z_0 < Z_1$, ενώ σε περίπτωση που ο μετασχηματιστής είναι 5 άκρων τότε ισχύει ότι $Z_0 > Z_1$. [1]

3.3.5 Τύποι Βραχυκυκλωμάτων

3.3.5.1 Σφάλμα μίας φάσης με την γείωση – Line to ground fault (L-G)

Το σφάλμα αυτό εμφανίζεται στις γραμμές μεταφοράς όταν ένας αγωγός πέσει στο έδαφος ή κάνει επαφή με την γείωση. Στην πράξη αυτό το σφάλμα προκύπτει εξαιτίας των καιρικών φαινομένων, όπως είναι οι ισχυρές βροχοπτώσεις ή οι χιονοθύελλες οι οποίες συνδυάζονται με ισχυρούς ανέμους, κεραυνούς, αστραπές, καθώς επίσης και από ατυχήματα, όπως είναι η πτώση ενός δέντρου πάνω σε μία γραμμή μεταφοράς.

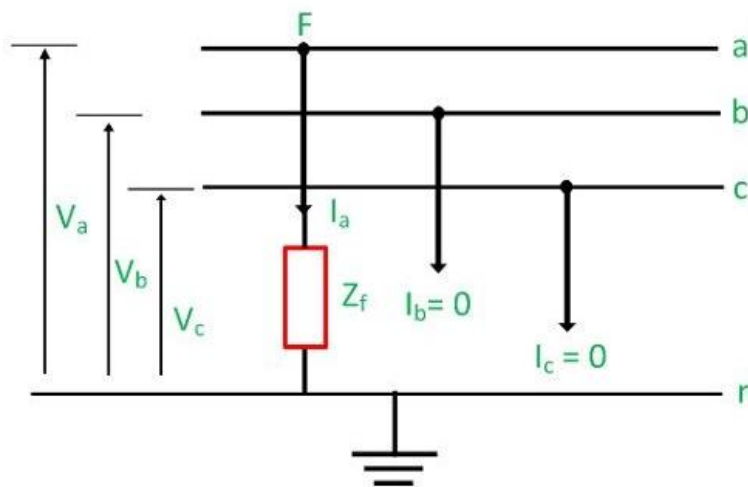
Το τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, όπου οι τρεις φάσεις είναι ανοιχτοκύκλωματα στο τέλος τους. Έστω ότι I_0, I_1, I_2 είναι οι συμμετρικές συνιστώσες του της φάσης I_a και V_0, V_1, V_2 οι συνιστώσες του V_a . Στην περίπτωση που V_a, I_b, I_c είναι μηδενικά.

Τότε από την εξίσωση (3.11) προκύπτει ότι:

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{I_a}{3} \quad (3.21)$$

και

$$V_a = E - I_1 Z_1 - I_2 Z_2 - I_0 Z_0$$



Σχήμα 3.3 Τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του σφάλματος μίας φάσης με την γείωση.

επειδή I_2 και I_0 είναι συμμετρικές συνιστώσες:

$$I_1(Z_1 + Z_2 + Z_3) = E$$

Άρα,

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad (3.22)$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:

$$I_{fault} = I_a = 3I_1$$

Άρα,

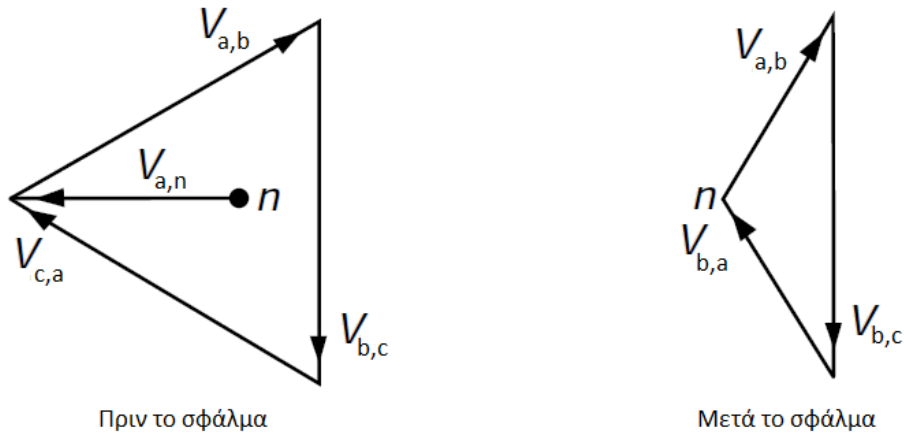
$$I_{fault} = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \quad (3.23)$$

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη της φάσης b ισούται με $a^2 E$ και από την εξίσωση (3.11) προκύπτει ότι:

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \quad (3.24. \alpha)$$

$$V_b = a^2 E - I_0 Z_0 - a^2 I_1 Z_1 - \alpha I_2 Z_2 \quad 3.24. \beta$$

Τα προσφαλματικά και τα μετασφαλματικά φασοδιανύσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Προσφαλματικά και μετασφαλματικά φασοδιανύσματα.

3.3.5.2 Σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων – Line to line fault (L-L)

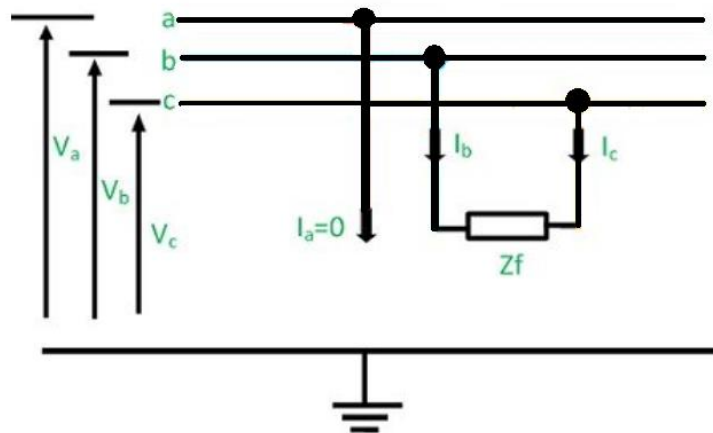
Στο Σχήμα 3.6 η Η.Ε.Δ. ανά φάση συμβολίζεται με E , για ανάλυση επιλέγεται η πρώτη φάση του τριφασικού συστήματος, δηλαδή η φάση a . Τα δεδομένα στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ότι $I_a = 0$, $I_b = -I_c$, $V_b = V_c$. Από την εξίσωση (3.11) προκύπτουν οι σχέσεις:

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = \frac{1}{3} I_b (\alpha - \alpha^2)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} I_b (\alpha^2 - \alpha)$$

$$I_1 = -I_2 \quad (3.25)$$



Σφάλμα μεταξύ των δύο φάσεων του δικτύου

Σχήμα 3.5 Σφάλμα μεταξύ των δύο φάσεων (b, c) του δικτύου.

Καθώς $V_b = V_c \neq 0$,

$$a^2 E - a^2 I_1 Z_1 - a I_2 Z_2 = a E - a I_1 Z_1 - a^2 I_2 Z_2$$

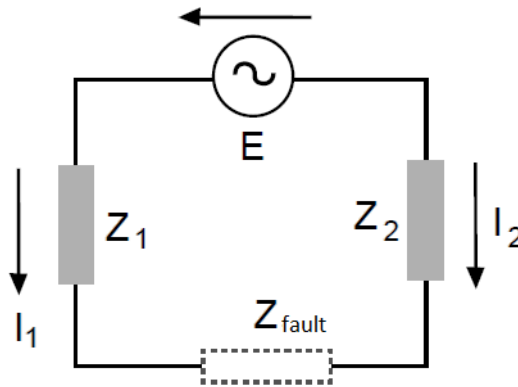
και λόγω της ισότητας (3.25)

$$E(a^2 - a) = I_1[Z_1(a^2 - a) + Z_2(a^2 - a)]$$

Τέλος,

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + Z_2} \quad (3.26)$$

Στο σφάλμα μεταξύ των δύο γραμμών δεν υπάρχει μηδενική ακολουθία. Έστω ότι η σύνθετη αντίσταση του σφάλματος συμβολίζεται ως Z_{fault} τότε το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6 Διασύνδεση ακολουθιακού δικτύου για σφάλμα που έχει εμφανιστεί μεταξύ των γραμμών

3.3.5.3 Σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων με την γείωση - Line to line to ground fault (L-L-G)

Έστω ότι υπάρχει σφάλμα μεταξύ των δύο φάσεων (b, c) και της γείωσης, τότε ισχύει ότι $I_a = 0$, $V_b = V_c = 0$. Η αναπαράσταση του κυκλώματος στο οποίο απεικονίζεται σφάλμα μεταξύ των δύο φάσεων του κυκλώματος με την γείωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.7. Σύμφωνα με την Εξίσωση 3.11 προκύπτει ότι:

$$I_a = I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (3.27.α)$$

$$a^2 E - a^2 I_1 Z_1 - a I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = V_b = 0 \quad (3.27.β)$$

$$a E - a I_1 Z_1 - a^2 I_2 Z_2 - I_0 Z_0 = V_c = 0 \quad (3.27.γ)$$

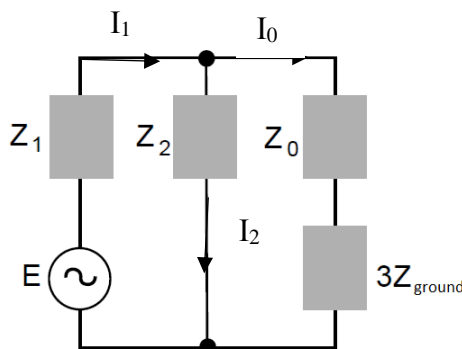
Τα ρεύματα των συμμετρικών συνιστωσών είναι:

$$I_1 = \frac{E}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}}$$

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0}$$

Τα ρεύματα αυτά μπορούν να αναπαρασταθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα στο Σχήμα 3.7. Η εισαγωγή της σύνθετης αντίστασης στην διαδρομή του κυκλώματος προς την γείωση, όπως είναι η ένωση της συνδεσμολογίας κατά αστέρα με την γείωση σε μια γεννήτρια ή σε έναν μετασχηματιστή, επηρεάζει την ακολουθία των διαγραμμάτων. Για ένα σφάλμα μεταξύ της μίας φάσης και της γείωσης το οποίο έχει σύνθετη αντίσταση Z_{ground} , τότε η σύνθετη αντίσταση στο δίκτυο μηδενικής ακολουθίας είναι $3Z_{ground}$. Επειδή $I_1 = I_2 = I_0$ και επειδή της σύνθετη αντίσταση Z_{ground} την διαπερνά ρεύμα έντασης $3I_1$, είναι απαραίτητη η χρήση της σύνθετης αντίστασης $3Z_{ground}$ για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{fault} .



Σχήμα 3.7 Διαμόρφωση του δικτύου για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης Z_{ground} .

$$I_{fault} = \frac{3E}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_{ground}} \quad (3.28)$$

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται ένα κύκλωμα στο οποίο υπάρχει σφάλμα μεταξύ των δύο φάσεων και της γείωσης και φαίνεται η σύνδεση της σύνθετης αντίστασης $3Z_{ground}$.

3.4 Μέθοδος για Συστηματική Ανάλυση Σφαλμάτων σε Μεγάλα Δίκτυα

Οι μέθοδοι που έχουν περιγράψει μέχρι τώρα δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγάλα δίκτυα, σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται επομένως η χρήση ειδικών προγραμμάτων και ηλεκτρονικών υπολογιστών. Οι γεννήτριες αναπαρίστανται από τις τάσεις πίσω από την επαγωγική αντίδραση και στις αρχικές συνθήκες το σύστημα δεν έχει φορτίο πριν την εμφάνιση του σφάλματος. Οι πηγές τάσης και οι μεταβατικές αντιδράσεις μετατρέπονται σε πηγές ρεύματος και σχηματίζεται ο πίνακας αγωγιμοτήτων. Η βασική εξίσωση $[I]=[Y][V]$ σχηματίζεται και επιλύεται σύμφωνα με τον περιορισμό ότι η τάση στον κόμβο σφάλματος είναι μηδέν. Είναι προτιμότερο, για λόγους αποθήκευσης και χρόνου, να μην γίνει

αντιστροφή του πίνακα αλλά να χρησιμοποιήσετε μεθόδους απαλοιφής Gauss. Η αποτελεσματικότητα του υπολογισμού μπορεί επίσης να βελτιωθεί με την χρήση της διασποράς του πίνακα Y . Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των βρόχων στον πίνακα των αγωγιμοτήτων, ωστόσο δεν είναι εύκολο να σχηματιστεί.

Η μέθοδος της αντίστασης των ζυγών, σε αντίθεση με την μέθοδο αγωγιμοτήτων των κόμβων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στην ανάλυση σφαλμάτων του υπολογιστή έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Αποφεύγεται η αντιστροφή του πίνακα, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση χώρου και χρόνου στον υπολογιστή.
- Οι πίνακες για την ακολουθία των ποσοτήτων ορίζονται μόνο μία φορά, αποθηκεύονται για επόμενη χρήση και είναι ήδη τροποποιημένες για αλλαγές στο σύστημα.
- Είναι εύκολα διαχειρίσιμες οι κοινές αντιστάσεις μεταξύ των γραμμών.
- Μπορούν να ενσωματωθούν υποδιαίρεσεις του κύριου συστήματος.

Το σύστημα συμβολίζεται από τα δίκτυα συμμετρικών συνιστωσών, όπου συχνά οι θετικές και αρνητικές αντιστάσεις θεωρούνται ότι είναι οι ίδιες. Υπολογίζονται οι συμμετρικές σύνθετες αντιστάσεις σε κάθε φάση για όλα τα μέρη του κυκλώματος, επίσης υπολογίζονται οι ίσες τάσεις για όλες τις γεννήτριες. Στην μέθοδο της αντίστασης των ζυγών, ο πίνακας των βρόχων του δικτύου ο οποίος είναι $[E] = [Z][I]$, ρυθμίζεται με βάση τα διάφορα ρεύματα του βρόχου. Αρχικά, οι ζυγοί ενδιαφέροντος είναι όλοι βραχυκυκλωμένοι με τον ουδέτερο. Έστω ότι εμφανιστεί ένα σφάλμα στον ζυγό k , τότε τα ρεύματα σε όλους τους άλλους ζυγούς βραχυκυκλώνονται στους ζυγούς και θα είναι μηδέν. Από την εξίσωση $[E]=[Z][I]$ και $Z_{kk}I_k = 1$, όπου I_k είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης όταν υπάρχει συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό k . Με αυτή την μεθοδολογία οι εντάσεις των ρευμάτων με συμμετρικά σφάλματα σε κάθε ένα από τους υπόλοιπους ζυγούς μπορούν να υπολογιστούν εύκολα. [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λέγεται ότι παραμένει ευσταθές όταν έχει την ικανότητα να παραμένει σε ισορροπία όταν δέχεται ορισμένες διαταραχές, οι οποίες είναι βέβαια είναι δεδομένο ότι θα εμφανιστούν σε ένα δίκτυο το οποίο δέχεται φορτία από γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ουσιαστικά ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λέγεται ότι είναι ευσταθές όταν και οι γεννήτριες του συστήματος είναι ευσταθείς. Όταν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του τότε αυτό σημαίνει ότι οι γεννήτριες που παράγουν ενέργεια λειτουργούν σε συγχρονισμό μεταξύ τους, στην περίπτωση αυτή η μεταφερόμενη ενεργή ισχύς τους προσδιορίζει τις σχετικές γωνίες των δρομέων των μηχανών. Όταν σε ένα δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας εμφανιστεί μία διαταραχή τότε μεταβάλλεται η ενεργή ισχύς σε όλες τις μηχανές, αλλάζουν όλες οι τάσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος ο δρομέας της κάθε γεννήτριας ταλαντώνεται σε σχέση με τους δρομείς των άλλων γεννητριών. Η διαταραχή που θα εμφανιστεί στο δίκτυο μπορεί να είναι μικρή και να προκληθεί από μια αυξομείωση του φορτίου ή να είναι μεγαλύτερη και να οφείλεται στην πρόκληση κάποιας βλάβης. Όταν ένα δίκτυο παραμένει ευσταθές μετά από την εμφάνιση μίας διαταραχής αυτό σημαίνει ότι όλες οι μηχανές επιστρέφουν σε συγχρονισμό μεταξύ τους, ύστερα από κάποιον συγκεκριμένο χρόνο. Αντίθετα ένα σύστημα γίνεται χάνει την ευστάθειά του και μετατρέπεται σε ασταθές αν μετά από την εμφάνιση της διαταραχής τουλάχιστον μία ή και περισσότερες από τις μηχανές χάσουν τον συγχρονισμό τους. Ύστερα από την εμφάνιση της διαταραχής, σε περίπτωση που το δίκτυο σταθεροποιηθεί σε ορισμένες νέες τιμές λειτουργίας, τότε λέγεται ότι το δίκτυο παρέμεινε ευσταθές. Η ευστάθεια ενός συστήματος ισχύος χωρίζεται σε ορισμένες υποκατηγορίες προκειμένου να διευκολυνθεί ο ορισμός και η αντιμετώπιση του προβλήματος. Οι κατηγορίες αυτές αφορούν την απώλεια του συγχρονισμού μεταξύ σύγχρονων γεννητριών ενός δικτύου, η οποία ονομάζεται γωνιακή αστάθεια, η οποία με την σειρά της χωρίζεται στην μεταβατική και την δυναμική αστάθεια. Η μεταβατική αστάθεια προκαλείται κυρίως λόγω της ξαφνικής εμφάνισης των βλαβών και των μεγάλων διαταραχών ενώ η δυναμική προκαλείται κυρίως από ταλαντώσεις που προκαλούνται από τις αυξομειώσεις του του φορτίου που ζητείται από τους καταναλωτές. Η αστάθεια τάσης μπορεί να προκληθεί από την εμφάνιση μεγάλων επαγωγικών φορτίων στον κινητήρα αντλώντας υπερβολικές ποσότητες άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια μιας βλάβης στο δίκτυο όταν η τάση του δικτύου μειώνεται ή λόγω έλλειψης άεργου ισχύος όταν σε ένα δίκτυο ρέουν μεγάλες ποσότητες πραγματικής ισχύος. Όταν ο ρότορας μιας σύγχρονης γεννήτριας περιστρέφεται πέρα από την κρίσιμη γωνία τότε αποτυγχάνει η μαγνητική σύνδεση μεταξύ του ρότορα και του στάτορα. Ο ρότορας παύει να λειτουργεί σε συγχρονισμό με το περιστρεφόμενο πεδίο του ρεύματος του στάτορα και περιστρέφεται σχετικά στο πεδίο με αποτέλεσμα την ολίσθηση των πόλων. Κάθε φορά που οι πόλοι της γεννήτριας περνάνε από τη γωνιακή περιοχή εντός της οποίας θα μπορούσε να είναι σταθερή, οι δυνάμεις συγχρονισμού προσπαθούν να τραβήξουν τον ρότορα σε συγχρονισμό. Συνήθως όταν σε ένα σύστημα οι πόλοι αρχίζουν να ολισθαίνουν η γεννήτρια αποσυνδέεται από το σύστημα, καθώς η ολίσθηση των πόλων μπορεί να προκαλέσει μεγάλη ροή ρεύματος με υψηλές μεταβατικές ροπές. Όπως προαναφέρθηκε η γωνιακή (ή σύγχρονη) ευστάθεια

χωρίζεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, στην δυναμική και στην μεταβατική ευστάθεια. Η δυναμική ευστάθεια αφορά την ικανότητα των σύγχρονων γεννητριών του δικτύου να διατηρούν τον συγχρονισμό τους, όταν λειτουργούν υπό δεδομένες συνθήκες φορτίου, για να διατηρηθεί ο συγχρονισμός (χωρίς υπερβολικές γωνιακές ταλαντώσεις) όταν υφίστανται μικρές διαταραχές, όπως είναι οι συνεχείς αλλαγές των φορτίων και η εναλλαγή γραμμών. Είναι πιθανότερο να προκύψει από τις αλλαγές στη σύνθετη αντίσταση προέλευσης φόρτωσης που προκύπτει από αλλαγές στη διαμόρφωση του δικτύου ή κατάσταση συστήματος και είναι συνέπεια της έλλειψης απόσβεσης στο σύστημα ισχύος. Η μεταβατική ευστάθεια αφορά τις ξαφνικές και μεγάλες αλλαγές στην κατάσταση του δικτύου, όπως είναι τα σφάλματα εξαιτίας των βραχυκυκλωμάτων. Το όριο μεταβατικής ευστάθειας είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταδοθεί, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι συνθήκες σφάλματος είναι συνήθως μικρότερη από το μέγιστο φορτίο της σταθερής κατάστασης. Η ευστάθεια ενός κινητήρα με ασύγχρονο φορτίο ελέγχεται από την τάση της μηχανής, καθώς αν η τάση της γίνει μικρότερη από μία προκαθορισμένη κρίσιμη τιμή, τότε οι επαγωγικός κινητήρας μπορεί να γίνει ασταθής. Αυτό ορίζεται ως πρόβλημα αστάθειας της τάσης. Όταν η τάση στους ακροδέκτες μιας ασύγχρονης (επαγωγικής) μηχανής μειώνεται, τότε επίσης μειώνεται και η ικανότητά της να αναπτύσσει ροπή με αποτέλεσμα την επιβράδυνση του κινητήρα. Εάν ένα σφάλμα παραμείνει στο δίκτυο, τότε ο κινητήρας και αντλεί πολύ μεγάλες ποσότητες άεργου ισχύος από το δίκτυο. Αυτές οι άεργες ροές ισχύος μειώνουν ακόμα περισσότερο την τάση στους ακροδέκτες κινητήρα, έτσι ο κινητήρας πρέπει να απομονωθεί από το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτός ο τύπος, της αστάθειας τάσης, εμφανίζεται κυρίως σε μονάδες που έχουν μεγάλα επαγωγικά φορτία, όπως είναι τα διυλιστήρια πετρελαίου και οι χημικές μονάδες. Επίσης η αστάθεια τάσης εμφανίζεται στα μεγάλα εθνικά συστήματα μεταφοράς ισχύος όταν οι γραμμές μεταφοράς υπερφορτώνονται, και υπερβαίνουν το σταθερό (οριζόντιο) τμήμα της γραφικής παράστασης ισχύος-τάσης ($P - V$). Στα συστήματα ισχύος είναι εξίσου πιθανό να εμφανιστεί γωνιακή αστάθεια ή αστάθεια τάσης και η μία μορφή αστάθειας μπορεί να επηρεάσει την άλλη. Στο παρελθόν η γωνιακή αστάθεια θεωρούνταν πιο επικίνδυνη και σημαντική, ωστόσο τα τελευταία χρόνια δίνεται αρκετή προσοχή και στην αστάθεια τάσης. [6, 7]

Η μηχανική είσοδος της γεννήτριας και η μηχανική έξοδος του κινητήρα, αν αφαιρεθούν ή προστεθούν αντίστοιχα οι απώλειες περιστροφής, θα είναι ίσες με την ηλεκτρική ισχύ P . Έστω σε ένα σύστημα δύο μηχανών πραγματοποιηθεί μια μικρή αύξηση στο φορτίο του κινητήρα και η ταχύτητα του κινητήρα παραμένει σταθερή. Τότε στιγμιαία η γωνιακή θέση του κινητήρα, ως προς την γεννήτρια, μένει αμετάβλητη και άρα η ισχύς εισόδου του κινητήρα δεν μεταβάλλεται ενώ η έξοδός του έχει αυξηθεί. Κατά συνέπεια υπάρχει μια καθαρή ροπή στον κινητήρα, που τείνει να το σταματήσει και η ταχύτητά του μειώνεται προσωρινά. Σαν αποτέλεσμα της ελάττωσης της ταχύτητας του κινητήρα, η γωνία δ αυξάνει και κατά συνέπεια η ισχύς εισόδου αυξάνει. Η αύξηση αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου η είσοδος και η έξοδος του κινητήρα γίνουν πάλι ίσες, οπότε αποκαθίσταται σταθερή λειτουργία σε ένα νέο σημείο που είναι ψηλότερα από το αρχικό στην καμπύλη ισχύος-γωνίας. Στην πραγματικότητα η ταχύτητα της γεννήτριας θα μειωθεί λίγο, έτσι ώστε ο ρυθμιστής ελέγχου της μηχανικής ισχύος εισόδου να λειτουργήσει και να αυξηθεί αρκετά την είσοδο της γεννήτριας, για να αντισταθμίσει την αυξημένη έξοδο. Έστω σε μία άλλη υπόθεση ότι η είσοδος του κινητήρα αυξάνει βαθμιαία ως το σημείο της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος P_{max} . Αν τώρα συμβεί μια επί πλέον αύξηση φορτίου στον

κινητήρα, η γωνία μετατόπισης δ θα αυξηθεί όπως και πριν, αλλά δεν θα αυξηθεί και η ισχύς εισόδου. Αντίθετα θα υπάρξει μια ελάττωση της εισόδου, που θα έχει σαν αποτέλεσμα μια επί πλέον αύξηση της διαφοράς μεταξύ εισόδου και εξόδου και μεγαλύτερη επιβράδυνση του κινητήρα. Ο κινητήρας θα αποσυγχρονισθεί και πιθανά θα σταματήσει (εκτός αν συνεχίσει να περιστρέφεται σαν επαγωγικός κινητήρας λόγω των τυλιγμάτων απόσβεσης που πιθανά να υπάρχουν). Η P_m είναι το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης του συστήματος. Είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί. Θα συμβεί αποσυγχρονισμός αν προσπαθήσουμε να μεταφέρουμε περισσότερη ισχύ από αυτό το όριο. Αν μια μεγάλη αύξηση του φορτίου του κινητήρα συμβεί ξαφνικά, αντί βαθμιαία, ο κινητήρας μπορεί να αποσυγχρονισθεί ακόμα και αν το νέο φορτίο δεν ξεπερνά το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης. Στην περίπτωση που η ξαφνική αύξηση του φορτίου δεν είναι πολύ μεγάλη, ο κινητήρας θα φθάσει στην ονομαστική του γωνιακή ταχύτητα πριν η γωνία μετατόπισης γίνει πολύ μεγάλη. Ένα ευσταθές σύστημα χαρακτηρίζεται από μια αποσβενύμενη ταλαντωτική κίνηση. [6]

4.2 Ευστάθεια Μόνιμης Κατάστασης

Αστάθεια μόνιμης κατάστασης είναι πιθανόν να συμβεί θεωρητικά αλλά ουσιαστικά είναι αδύνατον να συμβεί σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους των σύγχρονων δικτύων, της διασύνδεσης μεταξύ των κρατών και λόγω των συνεχόμενων μελετών και της παρακολούθησης των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Έστω ότι υπάρχει ένα θεωρητικό σύστημα με μόνο δύο μηχανές τότε η απώλεια του συγχρονισμού μεταξύ των δύο μηχανών στην μόνιμη κατάσταση μπορεί να συμβεί μόνο στην περίπτωση όπου οι δύο μηχανές προσπαθήσουν να λειτουργήσουν με γωνιακή διαφορά μεγαλύτερη από τις 90° . Μια γεννήτρια μπορεί να έχει μέγιστο φορτίο P_{max} που είναι επίσης γνωστό και σαν όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης. Θεωρητικά αν η γωνία ισχύος δ γίνει μεγαλύτερη από 90° τότε το σύστημα θα χάσει τον συγχρονισμό του. Στα πραγματικά δίκτυα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό γεννητριών, οι μεγάλες διαφορές στις γωνίες μεταξύ τους τείνουν να δημιουργήσουν αστάθεια μόνιμης κατάστασης. Ωστόσο στα μεγάλα συστήματα η αστάθεια μόνιμης κατάστασης δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί με ακρίβεια σε σχέσεις με τις γωνιακές διαφορές μεγαλύτερες των 90° , χωρίς φόβο για να προκληθεί αστάθεια μόνιμης κατάστασης. Παρ' όλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις, η αστάθεια μόνιμης κατάστασης μπορεί να εμφανιστεί και σε δίκτυα όπου δεν υπάρχει διαφορά μεγαλύτερη από τις 90° , αλλά σε αυτές τις περιπτώσεις σημαντικό ρόλο παίζουν η θέση και τα χαρακτηριστικά των φορτίων. Στην πραγματικότητα όμως το όριο της ευστάθειας είναι πιο δύσκολο να προκαθοριστεί εξαιτίας της των δυναμικών που περιλαμβάνονται σε ένα σύστημα ισχύος. Όταν στα συστήματα ξεπεραστούν κάποιοι προκαθορισμένοι δείκτες οι οποίοι αφορούν τις βαθμιαίες μεταβολές ορισμένων ποσοτήτων, όπως είναι το βύθισμα της τάσης, τότε σε αυτήν την περίπτωση η αστάθεια έρχεται σε μόλις λίγα δευτερόλεπτα. [6]

Το όριο της ευστάθειας της μόνιμης ευστάθειας είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταδοθεί σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των γεννητριών και των φορτίων όταν στο σύστημα εμφανίζονται διαταραχές μικρού μεγέθους. Εξάλλου είναι γεγονός ότι όλα τα συστήματα ισχύος υπόκεινται σε μικρές διαταραχές κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους, λόγω των συχνών μεταβολών των φορτίων. Στην περίπτωση που το ζητούμενο είναι να υπολογιστεί η οριακή τιμή της ισχύος, οι μικρές προσαιξήσεις του φορτίου προστίθενται σε ένα μεγαλύτερο μοντέλο σύμφωνα με το οποίο αναπαρίσταται

το όλο σύστημα. Σε περίπτωση που υπάρξει μια αύξηση του φορτίου στο σύστημα τότε η γεννήτρια κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις ούτως ώστε να διατηρηθεί σταθερή η τάση στους ακροδέκτες και τότε υπολογίζεται ξανά η ροή φορτίου στο σύστημα. Τελικά, επιτυγχάνεται μια νέα κατάσταση ευστάθειας. Συχνά, τα διαγράμματα απόδοσης δεν χρησιμοποιούνται άμεσα και χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας που χρησιμοποιεί τη σύγχρονη σύνθετη αντίσταση. Στις μελέτες των περίπλοκων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς η γωνία μίας γεννήτριας και με βάζει αυτή την μέτρηση μετρούνται όλες οι υπόλοιπες γωνίες φορτίου. Αυτό είναι συνήθως ένα σημείο όπου η κατεύθυνση της ροής ισχύος αντιστρέφεται. Το απλούστερο κριτήριο για τη σύγχρονη σταθερότητα σε σταθερή κατάσταση είναι ότι:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0 \quad (4.1)$$

δηλαδή ότι ο συντελεστής συγχρονισμού πρέπει να είναι θετικός. Η χρήση αυτού του κριτηρίου περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραδοχές. Αρχικά οι γεννήτριες συμβολίζονται με σταθερές σύνθετες αντιστάσεις οι οποίες συνδέονται σε σειρά με τις εσωτερικές αντιστάσεις των τάσεων, οι ροπές της εισόδου από τους στροβίλους είναι σταθερές. Οι αλλαγές που δέχεται η γωνία του φορτίου δ είναι αρκετά μικρές και τέλος οι αλλαγές στην ταχύτητα αλλά και η ηλεκτρομαγνητική απόσβεση των γεννητριών θεωρούνται αμελητέες και αμελούνται. Εξαιτίας του μεγάλου βαθμού πολυπλοκότητας που υπάρχει στις μελέτες ευστάθειας μόνιμης κατάστασης σε συστήματα με πολλές γεννήτριες και φορτία, είναι σημαντικό το ερώτημα σχετικά με το πού θα εφαρμοστεί η αύξηση του φορτίου. Μια άλλη πιο συντηρητική μέθοδος είναι γίνει η υπόθεση ότι η αύξηση ισχύει μόνο για μία γεννήτρια και στην συνέχεια η μελέτη να γίνει για όλες τις γεννήτριες με την σειρά. Όταν οι υπολογισμοί γίνονται για θεωρητικά κυρίως δίκτυα χωρίς της χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών τότε το εκάστοτε δίκτυο απλοποιείται πρώτα στην απλούστερή του μορφή. [1]

4.3 Ευστάθεια Μεταβατικής Κατάστασης

Η μεταβατική ευστάθεια αναφέρεται στη δυνατότητα των σύγχρονων μηχανών να διατηρήσουν τον συγχρονισμό τους κατά την διάρκεια των πρώτων ταλαντώσεων που ακολουθούν την εμφάνιση μιας απότομης και μεγάλης διαταραχής, όπως είναι η εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος. Ένα συγχρονισμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει ευστάθεια μεταβατικής κατάστασης αν και μόνο αν μετά από την εμφάνιση αυτής της διαταραχής μπορεί να επανακτήσει τον συγχρονισμό του και να τον διατηρήσει. Αυτές οι μεγάλες και απότομες διαταραχές συνήθως οφείλονται στην εμφάνιση σφαλμάτων, στην αποδέσμευση φορτίων από το δίκτυο, στην ξαφνική αυξομείωση του φορτίου του συστήματος και τέλος στους χειρισμούς μέσω των διακοπών του συστήματος. Το όριο της ευστάθειας του συστήματος εξαρτάται από το μέγεθος, την μορφή και την θέση στην οποία εμφανίζεται η διαταραχή. Η ευστάθεια του συστήματος κατά την διάρκεια της εμφάνισης των βραχυκυκλωμάτων, τα οποία αποτελούν τις σοβαρότερες από όλες τις διαταραχές και η σοβαρότητά τους εξαρτάται από το είδος του σφάλματος, από την θέση που εμφανίζεται, από την ταχύτητα και το είδος της εκκαθάρισης. Σε κάθε περίπτωση η ισχύς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει καθοριστική σημασία για την επίδραση που θα έχει η κάθε διαταραχή στο σύστημα. Ανάλογα με το είδος αλλά και την διάρκεια

της διαταραχής, τα μεταβατικά φαινόμενα που εμφανίζονται στους δρομείς των γεννητριών μπορούν να χρειαστούν μέσα σε μόνο ένα δευτερόλεπτο ή μπορεί να διατηρηθούν για αρκετά δευτερόλεπτα ίσως και για μερικά λεπτά. Συνήθως η πρώτη ταλάντωση του δρομέα της μηχανής πραγματοποιείται στο πρώτο δευτερόλεπτο μετά τη διαταραχή, αλλά φυσικά ο ακριβής χρόνος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των μηχανών και του συστήματος μεταφοράς. Στο χρονικό αυτό διάστημα λόγω των μεταβολών ισχύος που προκαλούν διαταραχές, παρατηρούνται σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις των γωνιακών ταχυτήτων και των διαφορών των γωνιών των δρομέων, από τις οποίες διαπιστώνεται η αστάθεια μεταβατικής κατάστασης. Η αντιμετώπισή της διευκολύνεται όταν διαθέτουμε επαρκή στρεφόμενη εφεδρεία. Η απώλεια συγχρονισμού μπορεί να συμβεί πολύ γρήγορα. Σε περίπτωση που δεν αποσβεσθούν τότε το σύστημα μπορεί να χάσει τον συγχρονισμό του και να οδηγηθεί ακόμα και σε κατάρρευση.

Η παροδική ευστάθεια αφορά την επίδραση μεγάλων διαταραχών. Συνήθως οφείλονται σε σφάλματα, το πιο σοβαρό από τα οποία είναι το τριφασικό βραχυκύκλωμα που διέπει τα μεταβατικά όρια σταθερότητας στο Ηνωμένο Βασίλειο. Αλλού, τα όρια βασίζονται σε άλλους τύπους βλαβών, ιδίως το σφάλμα απλής γραμμής προς τη γη που είναι μακράν το πιο συχνό στην πράξη. Όταν συμβαίνει σφάλμα στους ακροδέκτες μιας σύγχρονης γεννήτριας, η πραγματική ισχύς της μηχανής μειώνεται πολύ, καθώς η τάση στο σημείο του σφάλματος πλησιάζει το μηδέν και το μόνο φορτίο στο μηχανήμα είναι αυτή των επαγωγικών κυκλωμάτων της γεννήτριας. Ωστόσο, η ισχύς εισόδου στη γεννήτρια από την τουρμπίνα δεν έχει χρόνο να αλλάξει κατά τη σύντομη περίοδο του σφάλματος και ο ρότορας κερδίζει ταχύτητα για να αποθηκεύσει την υπερβολική ενέργεια. Εάν το σφάλμα επιμένει αρκετά, η γωνία του ρότορα θα αυξάνεται συνεχώς και ο συγχρονισμός θα χαθεί. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο και ο χρόνος λειτουργίας της προστασίας και των διακοπών είναι σημαντικός. Έτσι στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης σημασίας είναι η χρήση αυτόματων κλειστών διακοπών. Οι διακόπτες αυτού ανοίγουν όταν εντοπιστεί το σφάλμα και ξανακλείνουν αυτόματα μετά από μια καθορισμένη περίοδο η οποία συνήθως διαρκεί λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο. Εάν το σφάλμα επιμένει και δεν εξαλειφθεί τότε ο διακόπτης ανοίγει ξανά και μετά ξανακλείνει όπως πριν. Αυτό επαναλαμβάνεται για άλλη μια φορά, όταν, εάν το σφάλμα παραμένει, ο διακόπτης παραμένει ανοιχτός. Λόγω της παροδικής φύσης των περισσότερων βλαβών, συχνά ο διακόπτης κυκλώματος κλείνει με επιτυχία και αποφεύγεται η αρκετά μακρά διαδικασία διερεύνησης του σφάλματος και αποκατάστασης της γραμμής. Η διάρκεια της λειτουργίας αυτόματης αποκλεισμού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση των ορίων προσωρινής σταθερότητας. Ειδικότερα, η ανάλυση πρέπει να περιλαμβάνει την κίνηση του δρομέα κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου και όχι μόνο την πρώτη ταλάντευση. Εάν το παραμείνουν σε συγχρονισμό κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής του συστήματος, ο ρότορας περιστρέφεται μέχρι τη γωνιακή του ταχύτητα να μηδενιστεί, αν όμως δεν γίνει μηδέν τότε το δρομέας θα συνεχίσει να περιστρέφεται και ο συγχρονισμός και κατ'επέκταση η ευστάθεια του συστήματος θα χαθεί. Αυτό είναι γνωστό ως το κριτήριο των ίσων εμβαδών το οποίο θα μελετηθεί αναλυτικότερα στην συνέχεια. [1]

Για την μελέτη ως προς την μεταβατική ευστάθεια κάθε δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση της μελέτης ακολουθώντας τα εξής στάδια. Αρχικά, πρέπει να υπολογιστεί η αρχική κατάσταση του συστήματος, δηλαδή ο υπολογισμός όλων των μεγεθών πριν την εμφάνιση της διαταραχής, όποια και αν είναι αυτή. Στην συνέχεια

πρέπει να επιλεγεί η επιθυμητή διαταραχή η οποία θα εφαρμοστεί στο σύστημα αφού πρώτα γίνει η κατάλληλη παραμετροποίησή της με το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο. Αφού γίνει η εισαγωγή της διαταραχής στο σύστημα τότε γίνεται ο υπολογισμός των μηχανικών ταλαντώσεων των δρομέων όλων των μηχανών του συστήματος που μελετάται για να παρατηρηθεί αν η διαταραχή οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια ή αν οι μηχανικές ταλαντώσεις τείνουν να αποσβένονται, επομένως και το σύστημα θα παραμείνει ευσταθές. Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι το βασικότερο σημείο της ανάλυσης είναι η ακρίβεια με την οποία πραγματοποιείται η πρόβλεψη της ταλάντωσης των δρομέων μετά την διαταραχή. Η ακρίβεια του μαθηματικού μοντέλου που θα επιλεγεί είναι καθοριστική για την ακρίβεια των μετρήσεων. Για το μαθηματικό μοντέλο γίνονται οι εξής υποθέσεις και παραδοχές. Όλες οι γεννήτριες μελετώνται ξεχωριστά και δεν γίνεται ομαδοποίηση και η μελέτη βασίζεται στον υπολογισμό των γωνιακών θέσεων των γεννητριών, αντίθετα με τον τρόπο που γίνεται η μελέτη στις περιοχές ελέγχου. Στις πρακτικές εφαρμογές στις οποίες γίνεται μελέτη του συστήματος ως προς την μεταβατική του ευστάθεια γίνονται οι παραδοχές ότι όλες οι γραμμές μεταφοράς αλλά και οι μετασχηματιστές βρίσκονται σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας στα 50 Hz. Επομένως όλες οι τάσεις και οι ισχύς υπολογίζονται με τις τιμές του συστήματος που ισχύουν για την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό οι γεννήτριες μπορούν να απλοποιηθούν και να αναπαρασταθούν με αλγεβρικές εξισώσεις. Αν υπάρχουν συμμετρικές διαταραχές τότε οι αλγεβρικές εξισώσεις είναι οι στατικές εξισώσεις ροής φορτίου. Η Y_{bus} αυτών των εξισώσεων περιλαμβάνει και τις ισοδύναμες αγωγιμότητες με τις οποίες εξομοιώνονται τα φορτία και τις μηχανές και αυτή είναι η διαφορά της με την Y_{bus} η οποία χρησιμοποιείται για την μελέτη ροής φορτίου. Αντίθετα στην περίπτωση των ασύμμετρων διαταραχών οι εξισώσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται είναι αυτές οι οποίες σχετίζουν τα ρεύματα και τις τάσεις της θετικής ακολουθίας στους διάφορους ζυγούς, ο λόγος είναι γιατί μόνο οι συνιστώσες της θετικής ακολουθίας δημιουργούν δυνάμεις συγχρονισμού μέσα στις γεννήτριες. [6]

4.3.1 Μέθοδοι Μελέτης Μεταβατικής Ευστάθειας

Στην πράξη χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μέθοδοι για την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας. Η πρώτη ονομάζεται μέθοδος της απευθείας ανάλυσης με την οποία εξετάζεται η ευστάθεια του συστήματος χωρίς ουσιαστικά να λύνονται κάποιες διαφορικές εξισώσεις. Αυτή η μέθοδος έχει μόνο θεωρητικό ενδιαφέρον καθώς είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν στην πράξη σε συστήματα πραγματικού μεγέθους. Μια από τις πιο γνωστές μεθόδους αυτής της κατηγορίας είναι η μέθοδος Lyapunov, η οποία ωστόσο είναι διαδεδομένη σε θεωρητικές κυρίως μελέτες και όχι σε μελέτες που αφορούν πραγματικά συστήματα. Μια από τις πιο ιστορικές μεθόδους είναι η μέθοδος των ίσων εμβαδών, η οποία είναι εξαιρετικά χρήσιμη για την κατανόηση και την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή της έμμεσης λύσης. Σε αυτή τη μέθοδο εξισώσεις του συστήματος, τόσο οι αλγεβρικές όσο και οι διαφορικές επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους και την βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Τα προηγούμενα χρόνια, πριν την καθολική χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η μελέτη της ευστάθειας γινόταν με αναλογικές εξομοιώσεις. Σύμφωνα με αυτές τις μεθόδους η ευστάθεια του συστήματος μελετάται από την μορφή που έχουν οι καμπύλες ταλάντωσης. Αυτό το είδος μελέτης είναι

η μόνη πρακτική λύση για την επίλυση πραγματικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. [6]

4.3.2 Κριτήριο Ίσων Εμβαδών

Για την ανάλυση της μεταβατικής ευστάθειας γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές σχετικά με την μεταβατική περίοδο. Αρχικά η ισχύς της εισόδου παραμένει σταθερή και συμβολίζεται ως P_m , επίσης θεωρείται ότι από τα τυλίγματα απόσβεσης προκύπτει αμελητέα απόσβεση. Τέλος η γεννήτρια παριστάνεται ως μια σταθερή ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) με αντίδραση X .

Έστω ότι μια σύγχρονη μηχανή είναι συνδεδεμένη σε ένα άπειρο ζυγό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1, η τάση στα άκρα της γεννήτριας συμβολίζεται ως $V = V\angle\delta$ και ο άπειρος ζυγός έχει τάση $E = E\angle 0^\circ$.

Με χρήση του τύπου για την μοντελοποίηση της γραμμής μεταφοράς χωρίς την ύπαρξη απωλειών η ανά μονάδα ενεργός ισχύς που παρέχει η γεννήτρια στο σύστημα είναι:

$$P_e = \frac{V \cdot E}{X} \sin \delta \quad (4.2)$$

όπου ως X συμβολίζεται η ανά μονάδα επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς. Υποθέτοντας ότι στο σύστημα υπάρχει μηδενική απόσβεση τότε η διαφορική εξίσωση της ταλάντωσης της σύγχρονης μηχανής είναι:

$$\frac{H}{\pi \cdot f_0} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (4.3)$$

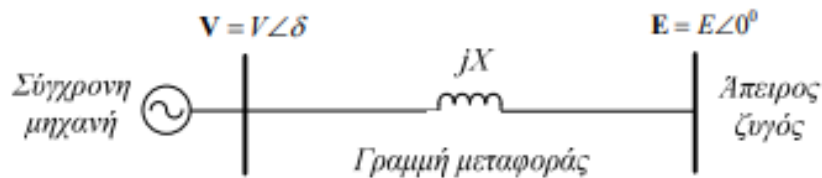
Όπου ως H συμβολίζεται η σταθερά αδράνειας της σύγχρονης γεννήτριας και η μονάδα μέτρησης είναι τα δευτερόλεπτα (s). Ως f_0 συμβολίζεται η ονομαστική συχνότητα και η μονάδα μέτρησης είναι τα Ηz. Ως P_m συμβολίζεται η ισχύς εισόδου, ως P_e συμβολίζεται η ενεργός ισχύς που παρέχει η γεννήτρια, ως P_a συμβολίζεται η ισχύς επιτάχυνσης και οι τρεις αυτές ισχύς μετριοούνται σε ανά μονάδα δηλαδή σε pu.

Λύνοντας την προηγούμενη εξίσωση προκύπτει ο τύπος:

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2\pi f_0}{H} \cdot \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) \cdot d\delta} \quad (4.4)$$

Η εξίσωση επομένως παρουσιάζει την σχετική ταχύτητα της γεννήτριας σε σχέση με ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα. Προκειμένου ένα σύστημα να είναι μεταβατικά ευσταθές η ταχύτητα ($d\delta/dt$) θα πρέπει να είναι μηδενική κάποια χρονική στιγμή μετά την διαταραχή. Έτσι θέτοντας στην παραπάνω σχέση ότι $d\delta/dt=0$ προκύπτει το κριτήριο της μεταβατικής ευστάθειας:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) \cdot d\delta = 0 \quad (4.5)$$



Σχήμα 4.1 Σύνδεση σύγχρονης γεννήτριας σε άπειρο ζυγό. [10]

Έστω ότι η γεννήτρια λειτουργεί στο σημείο ισορροπίας δ_0 , που αντιστοιχεί σε μηχανική ισχύ εισόδου $P_{m,0} = P_{e,0}$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2. Έστω ότι η μηχανική ισχύς εισόδου αυξάνει ξαφνικά από $P_{m,0}$ σε $P_{m,1}$. Επειδή $P_{m,1} > P_{e,0}$ η ισχύς επιτάχυνσης P_a στον δρομέα της γεννήτριας είναι θετική και η γωνία ισχύος δ αυξάνει. Η περίσσεια ενέργεια που αποθηκεύεται στον δρομέα κατά τη διάρκεια της αρχικής επιτάχυνσης είναι:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) = \text{εμβαδόν } abc = \text{εμβαδόν } A_1 \quad (4.6)$$

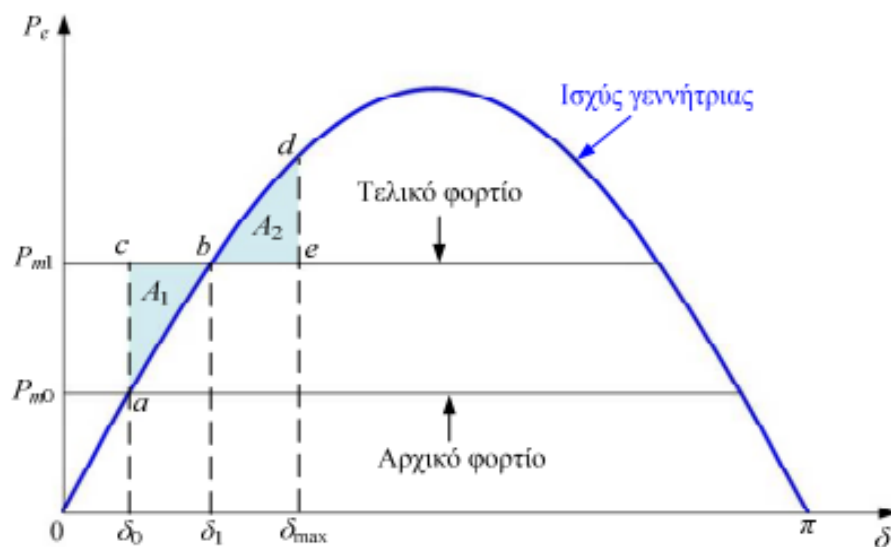
Με την αύξηση της γωνίας δ , η ηλεκτρική ισχύς αυξάνει και όταν η γωνία δ γίνει ίση με την γωνία δ_1 , τότε η ηλεκτρική ισχύς γίνεται ίση με τη νέα μηχανική ισχύ εισόδου $P_{m,1}$. Αν και η ισχύς επιτάχυνσης είναι μηδενική στο σημείο αυτό, ο δρομέας περιστρέφεται γρηγορότερα από την σύγχρονη ταχύτητα, οπότε η γωνία δ και η ηλεκτρική ισχύς P_e θα συνεχίσουν να αυξάνουν. Το γεγονός ότι η μηχανική ισχύς είναι μικρότερη από την ηλεκτρική ισχύ προκαλεί επιβράδυνση του δρομέα προς την σύγχρονη ταχύτητα μέχρι η γωνία δ να γίνει ίση με την δ_{max} . Η ενέργεια που αποδίδεται από τον δρομέα καθώς επιβραδύνεται προς την σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{m,1} - P_e) d\delta = \text{εμβαδόν } bde = \text{εμβαδόν } A_2 \quad (4.7)$$

Επομένως για τα εμβαδά πρέπει να ισχύει ο παρακάτω τύπος:

$$A_1 = A_2 \quad (4.8)$$

Η εισότητα αυτή ονομάζεται και κριτήριο των ίσων εμβαδών. Το εμβαδόν A_1 ονομάζεται εμβαδόν επιτάχυνσης, ενώ το A_2 ονομάζεται εμβαδόν επιβράδυνσης.



Σχήμα 4.2 Μέθοδος Ίσων εμβαδών με ξαφνική αύξηση του φορτίου. [10]

Το κριτήριο των ίσων εμβαδών μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες περιπτώσεις οι οποίες βέβαια δεν βρίσκουν πρακτική εφαρμογή στα σημερινά περίπλοκα συστήματα μεταφοράς ισχύος, αλλά η θεωρητική μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση του θεωρήματος των ίσων εμβαδών βελτιώνει την κατανόηση των συστημάτων ισχύος. Οι εφαρμογές αυτού του θεωρήματος αφορούν την μελέτη ενός ΣΗΕ όταν αποσυνδεθεί μια παράλληλη γραμμή ή όταν εμφανιστεί ένα συμπαγές τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία παράλληλη γραμμή του ΣΗΕ. Στην περίπτωση της εμφάνισης ενός βραχυκυκλώματος υπάρχουν οι έννοιες της κρίσιμης γωνίας εκκαθάρισης και του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης. Αν η εκκαθάριση του σφάλματος γίνει πριν αυτή την κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης τότε το σύστημα παραμένει ευσταθές, αντίθετα αν η εκκαθάριση γίνει μετά από την συγκεκριμένη γωνία τότε το σύστημα χάνει την ευστάθειά του. Για να φτάσει η γωνία της ισχύος στο κρίσιμο σημείο εκκαθάρισης περνάει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα t_k , ο χρόνος αυτός ονομάζεται κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης. Με άλλα λόγια ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης είναι ο μέγιστος χρόνος λειτουργίας κατά τον οποίο το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας διατηρείται σε ευστάθεια λειτουργίας. [7]

4.4 Δυναμική Ευστάθεια

Η περίπτωση της δυναμικής αστάθειας είναι η πιο πιθανή από αυτή της αστάθειας μόνιμης κατάστασης και έχει εμφανιστεί αρκετές φορές στα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αρκετών χωρών, όπως είναι και οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Λίγα μόνο δευτερόλεπτα, συνήθως 1 με 1,5 sec, μετά την εμφάνιση της διαταραχής ενεργοποιείται το σύστημα ελέγχου της πραγματικής ισχύος, για να αποκαταστήσει την ισορροπία μεταξύ της ισχύος στην είσοδο και στην έξοδο του δικτύου. Με άλλα λόγια δυναμική ευστάθεια είναι η ικανότητα ενός ηλεκτρικού συστήματος να διατηρήσει το συγχρονισμό του μετά την πρώτη αρχική ταλάντωση (περίοδος μεταβατικής ευστάθειας) και μέχρι να αποκατασταθεί μια νέα ισορροπία μόνιμης κατάστασης. Από τη

στιγμή, που θα ενεργοποιηθεί αυτό το σύστημα ελέγχου, μέχρι τη στιγμή που θα αποκατασταθεί η ευστάθεια, πιθανότατα σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας της μόνιμης κατάστασης, είναι η περίοδος που ενεργοποιούνται τα χαρακτηριστικά δυναμικής ευστάθειας του συστήματος. Αν δεν αποκατασταθεί μια νέα κατάσταση ισορροπίας, αλλά οι ταλαντώσεις αυξάνονται αντί να αποσβένονται, τότε έχουμε δυναμική αστάθεια. Η αστάθεια αυτού του τύπου οφείλεται κυρίως στη δράση των συστημάτων ελέγχου της συχνότητας και της ανταλλαγής ισχύος στις διασυνδεδετικές γραμμές.

Η κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και των υποσυστημάτων που τα απαρτίζουν είναι σημαντική προκειμένου να υπάρξει πρόβλεψη για το αν ένα σύστημα ή ένα μέρος αυτού του συστήματος μπορεί να παραμείνει σε ευστάθεια μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής. Η ικανότητα ενός συστήματος ισχύος να παραμείνει ευσταθές εξαρτάται από τους ελέγχους που γίνονται σε ένα σύστημα για να αποσβεστούν οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις των σύγχρονων γεννητριών.

Η δυναμική ευστάθεια ενός συστήματος σημαίνει την τεχνητή ευστάθεια που δίνεται σε ένα εγγενώς ασταθές σύστημα με αυτόματα ελεγχόμενα μέσα. Αφορά μικρές διαταραχές που διαρκούν περίπου 10 με 30 δευτερόλεπτα.

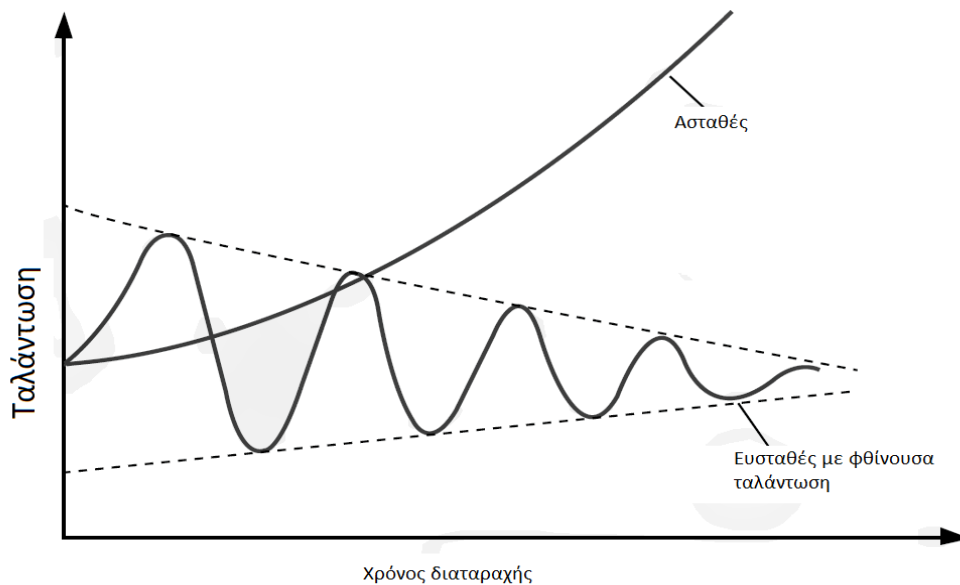
Σύμφωνα με τους προηγούμενους τύπους αστάθειας, είναι χρήσιμο να διαιρέσουμε τη μετασφαλματική περίοδο στα πιο κάτω τρία χρονικά διαστήματα:

- Το αρχικό διάστημα, που αρχίζει με την εφαρμογή της διαταραχής και τελειώνει μετά από ένα δευτερόλεπτο. Οι ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις των δρομέων των μηχανών σε αυτό το διάστημα δεν επηρεάζονται από τα συστήματα ελέγχου συχνότητας και τάσης. Σε αυτό το διάστημα έχουμε μόνο την επίδραση των πηνίων απόσβεσης, τη λειτουργία των συστημάτων προστασίας και διακοπών, την εισαγωγή πυκνωτών ενίσχυσης.
- Το ενδιάμεσο διάστημα, που ακολουθεί το αρχικό διάστημα και διαρκεί περίπου 5 δευτερόλεπτα. Σε αυτό το διάστημα έχουμε την επίδραση των συστημάτων ελέγχου συχνότητας και τάσης.
- Το τελικό διάστημα, που διαρκεί μερικά λεπτά. Σε αυτό το διάστημα έχουμε την επίδραση παραγόντων με μεγάλη χρονική σταθερά, όπως είναι η χρονική σταθερά του λέβητα και των κυκλωμάτων αναθέρμανσης ατμού για ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, μόνιμη απώλεια γεννητριών, απόρριψη φορτίων. [6]

Το σύστημα ισχύος σχηματίζει μια ομάδα διασυνδεδεμένων ηλεκτρομηχανικών στοιχείων, η κίνηση των οποίων μπορεί να αντιπροσωπεύεται από τις κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις. Όταν εμφανίζονται μεγάλες διαταραχές στο σύστημα οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές, αλλά όταν εμφανίζονται μικρές διαταραχές οι εξισώσεις μπορεί να γραμμικοποιηθούν με μικρή απώλεια στην ακρίβεια. Από την στιγμή που οι διαφορικές εξισώσεις μπορούν να οριστούν, σχηματίζεται η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος, από την οποία λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με τη σταθερότητα. Η λύση της διαφορικής εξίσωσης της κίνησης είναι της μορφής:

$$\delta = k_1 e^{a_1 t} + k_2 e^{a_2 t} + \dots + k_n e^{a_n t} \quad (4.9)$$

όπου τα k_1, k_2, \dots, k_n είναι σταθερές ολοκλήρωσης και τα a_1, a_2, \dots, a_n είναι οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης όπως προκύπτει μέσω των γνωστών μεθόδων ιδιοτιμής.



Σχήμα 4.3 Είδη αποκρίσεων μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής στο δίκτυο. [1]

Εάν κάποια από τις ρίζες έχει θετικούς πραγματικούς όρους, τότε η ποσότητα δ αυξάνεται συνεχώς με το χρόνο και η αρχική σταθερή κατάσταση δεν αποκαθίσταται. Το κριτήριο της σταθερότητας είναι ότι όλες οι ιδιοτιμές είναι αρνητικές. Τα φανταστικά μέρη δείχνουν την ύπαρξη και την μορφή των ταλαντώσεων. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι κίνησης. Ο προσδιορισμός των ριζών γίνεται εύκολα μέσω της ανάλυσης των ιδιοτιμών, αποδοτικές έχουν επίσης καθιερωθεί και άλλες έμμεσες μέθοδοι για την πρόβλεψη της σταθερότητας. Μία τέτοια μέθοδος είναι το κριτήριο Routh-Hurwitz στο οποίο προβλέπεται αν ένα σύστημα θα είναι ευσταθές χωρίς να υπολογίζεται η πραγματική λύση της χαρακτηριστικής εξίσωσης. Δεν λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με το βαθμό ευστάθειας είτε της αστάθειας, αλλά μόνο η πληροφορία ότι το σύστημα είναι ή δεν είναι σταθερό. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης ιδιοτιμών είναι ότι τα χαρακτηριστικά των βρόχων ελέγχου που σχετίζονται με τους ρυθμιστές και τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης μπορούν να ενσωματωθούν στη γενική επεξεργασία. [6, 7]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΙΕΕΕ 9 ΖΥΓΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Η μελέτη των σύγχρονων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, λόγω των μεγάλων μεγεθών τους και της πολυπλοκότητάς τους, πραγματοποιείται με τη βοήθεια λογισμικών προσομοίωσης όπως είναι το Power World Simulator ή το PSS®EXplore της Siemens. Τα προγράμματα αυτά χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό και για την γρήγορη, εύκολη και αξιόπιστη μελέτη των ΣΗΕ. Για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται η χρήση του λογισμικού PSS®EXplore της Siemens. Το λογισμικό αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε στην ολοκληρωμένη έκδοσή του, αλλά στο στην εκπαιδευτική έκδοση, η οποία χορηγείται δωρεάν από την Siemens για χρήση σε πανεπιστημιακά ιδρύματα. Το PSS/E είναι ευρέως διαδεδομένο στον χώρο της βιομηχανίας καθώς χρησιμοποιείται από πλήθος εταιρειών οι οποίες ασχολούνται με τον σχεδιασμό, την μελέτη και την διαχείριση δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας ανά τον κόσμο. Προσφέρει ποικίλες λειτουργίες και εφαρμογές για την αποδοτικότερη ανάλυση των συστημάτων ισχύος, τέτοιες εφαρμογές είναι:

- Μονογραμμική απεικόνιση του συστήματος προς ανάλυση,
- Ανάλυση και μελέτη ροής φορτίου,
- Ανάλυση σφαλμάτων (βραχυκυκλωμάτων) σε σταθερή κατάσταση (steady state),
- Δυναμική προσομοίωση,
- Προσομοίωση μεταβατικής ευστάθειας,
- Ανάλυση ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος.

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση όλων των παραπάνω λειτουργιών που προσφέρονται από το λογισμικό της Siemens, για την ολοκληρωμένη μελέτη του συστήματος 9 ζυγών της ΙΕΕΕ (Institute of Electricals and Electronics Engineers), τα δεδομένα του οποίου παρατίθενται αναλυτικά στα επόμενα υποκεφάλαια.

5.2 Δεδομένα Συστήματος

Τα δεδομένα των γεννητριών του συστήματος που εισήχθησαν στο λογισμικό παρατίθενται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Ονομαστικά Στοιχεία Γεννητριών.

ΖΥΓΟΣ	KV	MVA	R (pu)	X (pu)
1	16,5	260	0,0001	0,1000
2	18,0	310	0,0001	0,2100
3	13,8	280	0,0001	0,2100

Τα δεδομένα των Μετασχηματιστών που εισήχθησαν στο λογισμικό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Ονομαστικά Στοιχεία Μετασχηματιστών.

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	ΖΥΓΟΙ	kV	X (pu)
T1	1 - 4	16,5 / 230	0,0576
T2	2 - 7	18 / 230	0,0625
T3	3 - 9	13,8 / 230	0,0586

Τα δεδομένα των Γραμμών Μεταφοράς που εισήχθησαν στο λογισμικό παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3. Ονομαστικά Στοιχεία Γραμμών Μεταφοράς.

ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	kV	R (pu)	X (pu)	B (pu)
4 - 5	230	0,0100	0,0850	0,1760
4 - 6	230	0,0170	0,0920	0,1580
5 - 7	230	0,0320	0,1610	0,3060
6 - 9	230	0,0390	0,1700	0,3580
7 - 8	230	0,0085	0,0720	0,1490
8 - 9	230	0,0119	0,1008	0,2090

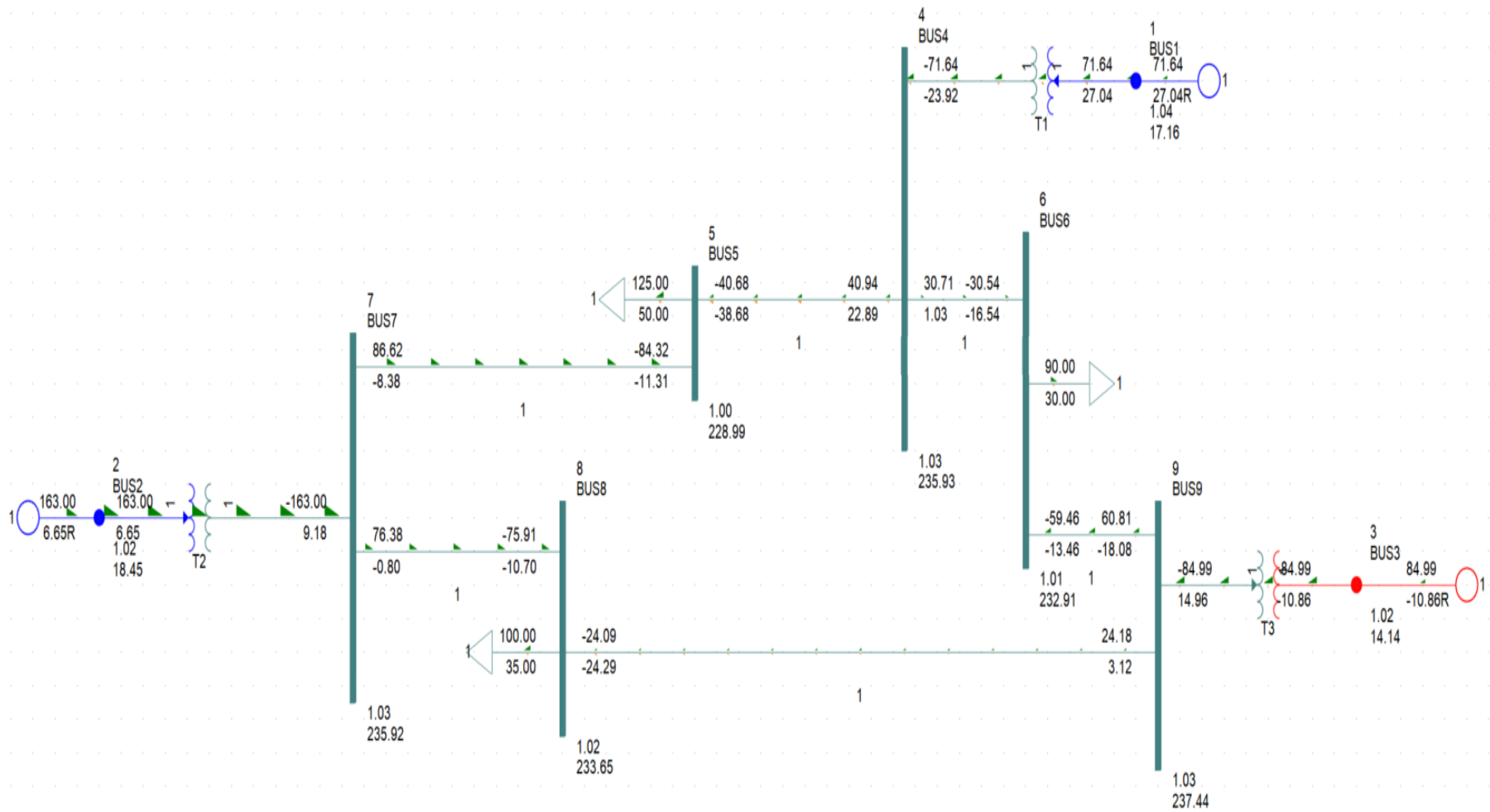
Τα δεδομένα των φορτίων τα οποία τροφοδοτεί το παρόν σύστημα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4. Στοιχεία Φορτίων.

ΖΥΓΟΣ	kV	P (MW)	Q (MVAR)
5	230	125	50
6	230	90	30
8	230	100	35

5.3 Ανάλυση Ροής Φορτίου

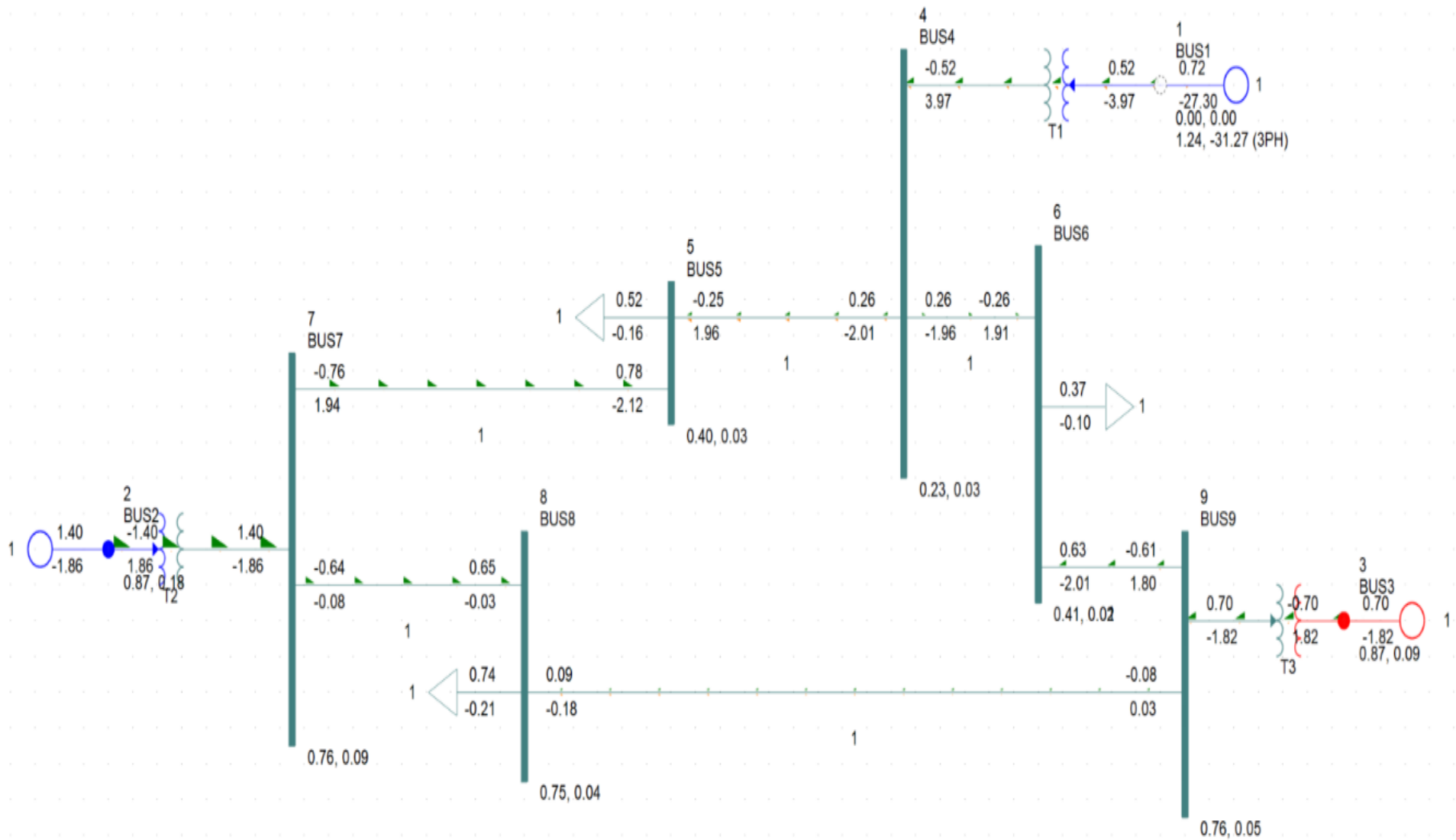
Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου του PSS®EXplore, για το σύστημα 9 ζυγών της IEEE το οποίο παρουσιάστηκε παραπάνω, απεικονίζονται στο παρακάτω Σχήμα 5.1. Σε κάθε ζυγό σημειώνεται η τάση του εκφρασμένη σε kV και pu, στις γεννήτριες η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος και στις γραμμές μεταφοράς η ισχύς που διακινείται. Τέλος, στα φορτία του συστήματος, σημειώνονται οι καταναλώσεις τους. (Η πραγματική ισχύς μετριέται σε MW και η άεργος ισχύς σε MVAR).



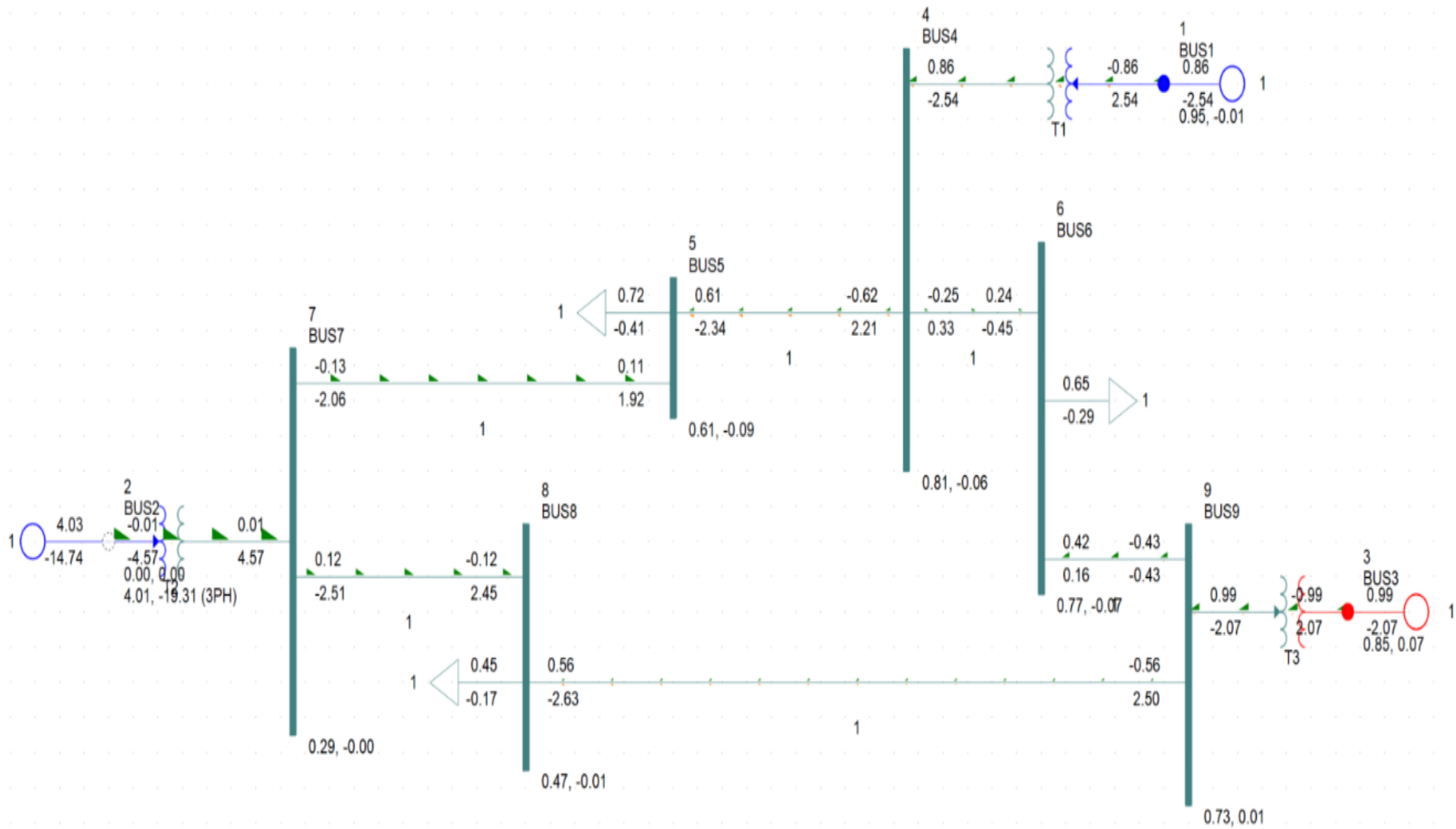
Σχήμα 5.1. Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος.

5.4 Συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα

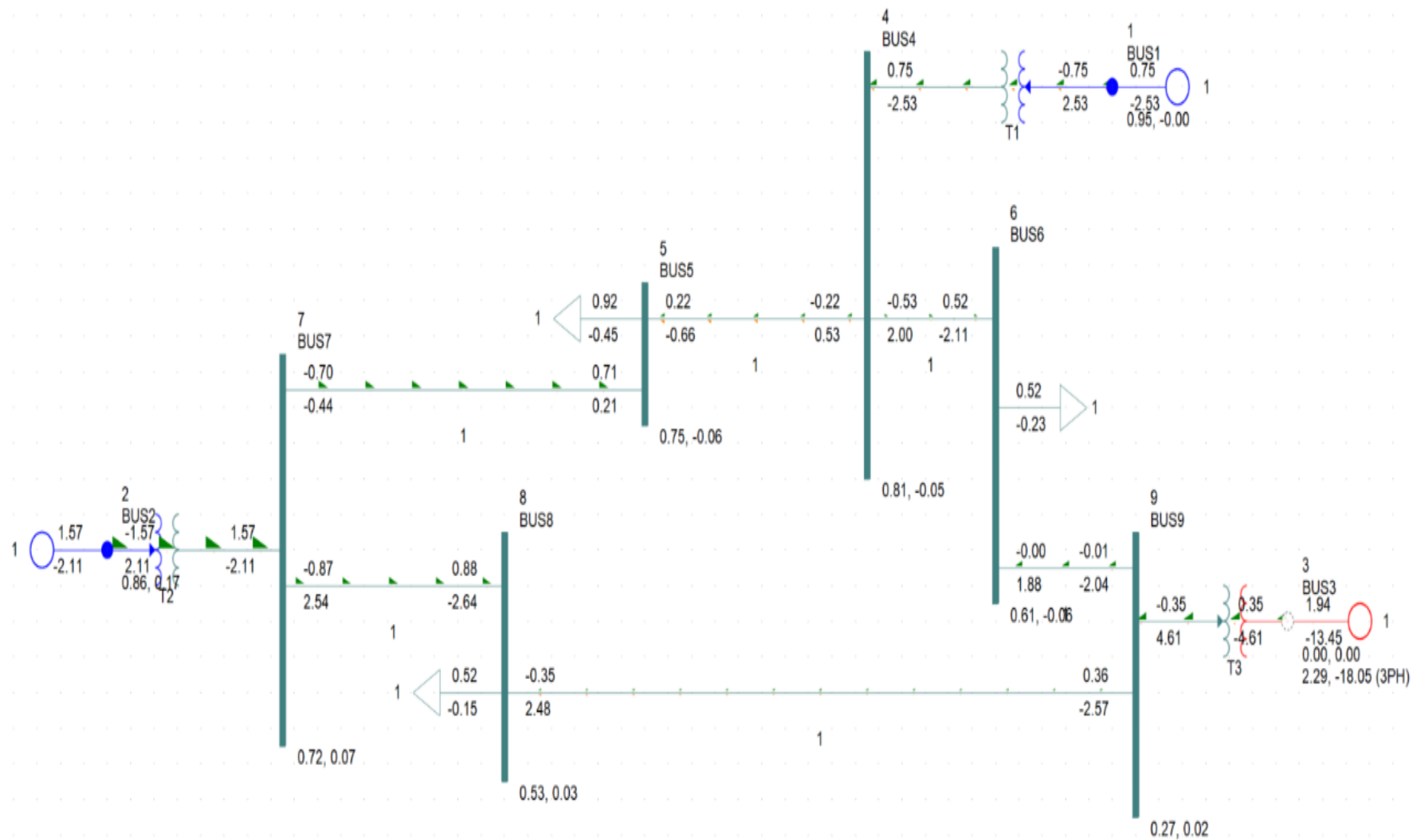
Στη συνέχεια αναλύεται η εφαρμογή στερεού συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος διαδοχικά σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, όπως παρουσιάζεται στα παρακάτω Σχήματα 5.2-5.10. Σε κάθε περίπτωση, στο Σχήμα του κάθε μονογραμμικού διαγράμματος, σημειώνονται το ρεύμα βραχυκύκλωσης στον ζυγό που έγινε το σφάλμα, οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών, καθώς και τα ρεύματα όλων των γραμμών και γεννητριών, εκφρασμένα όλα σε ρι.



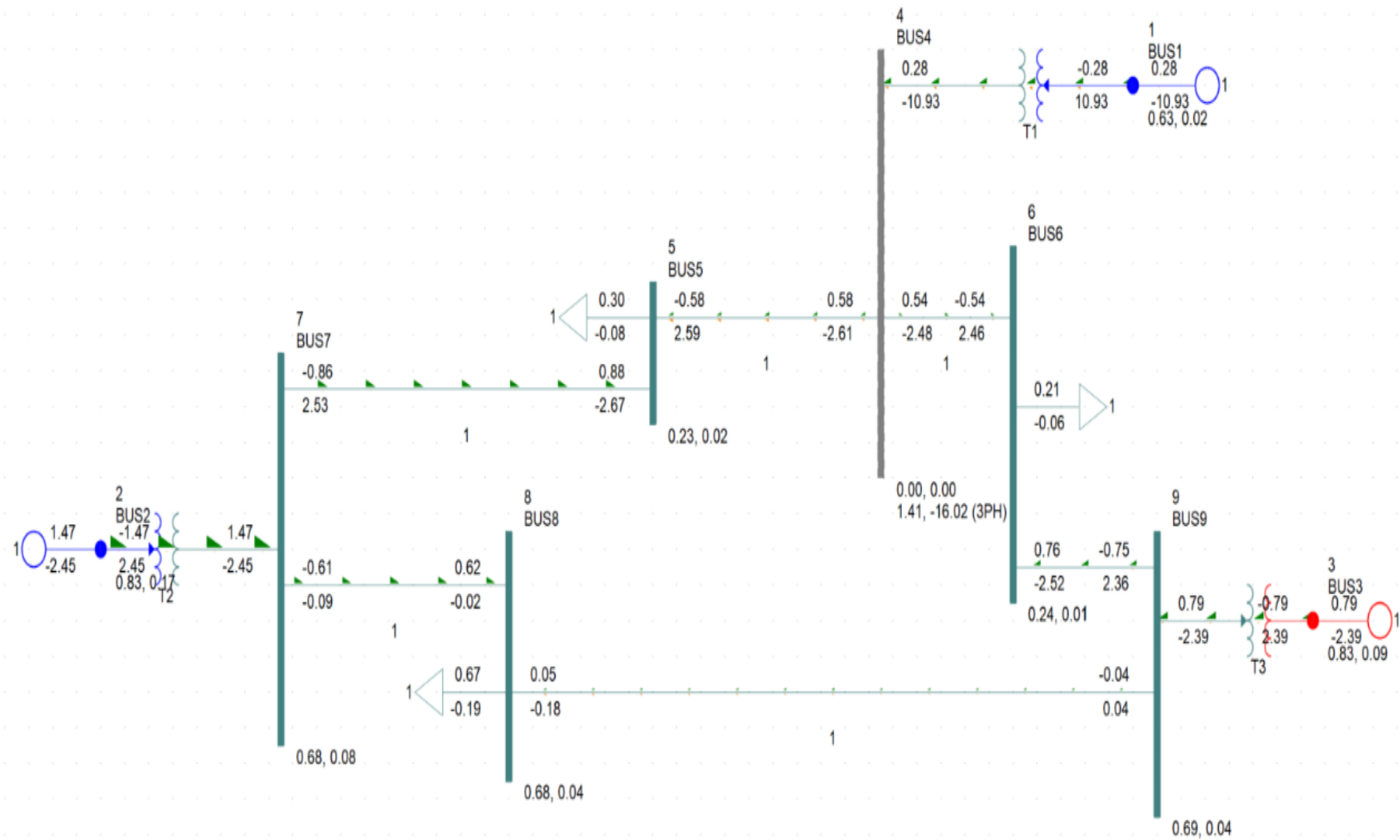
Σχήμα 5.2. Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 1.



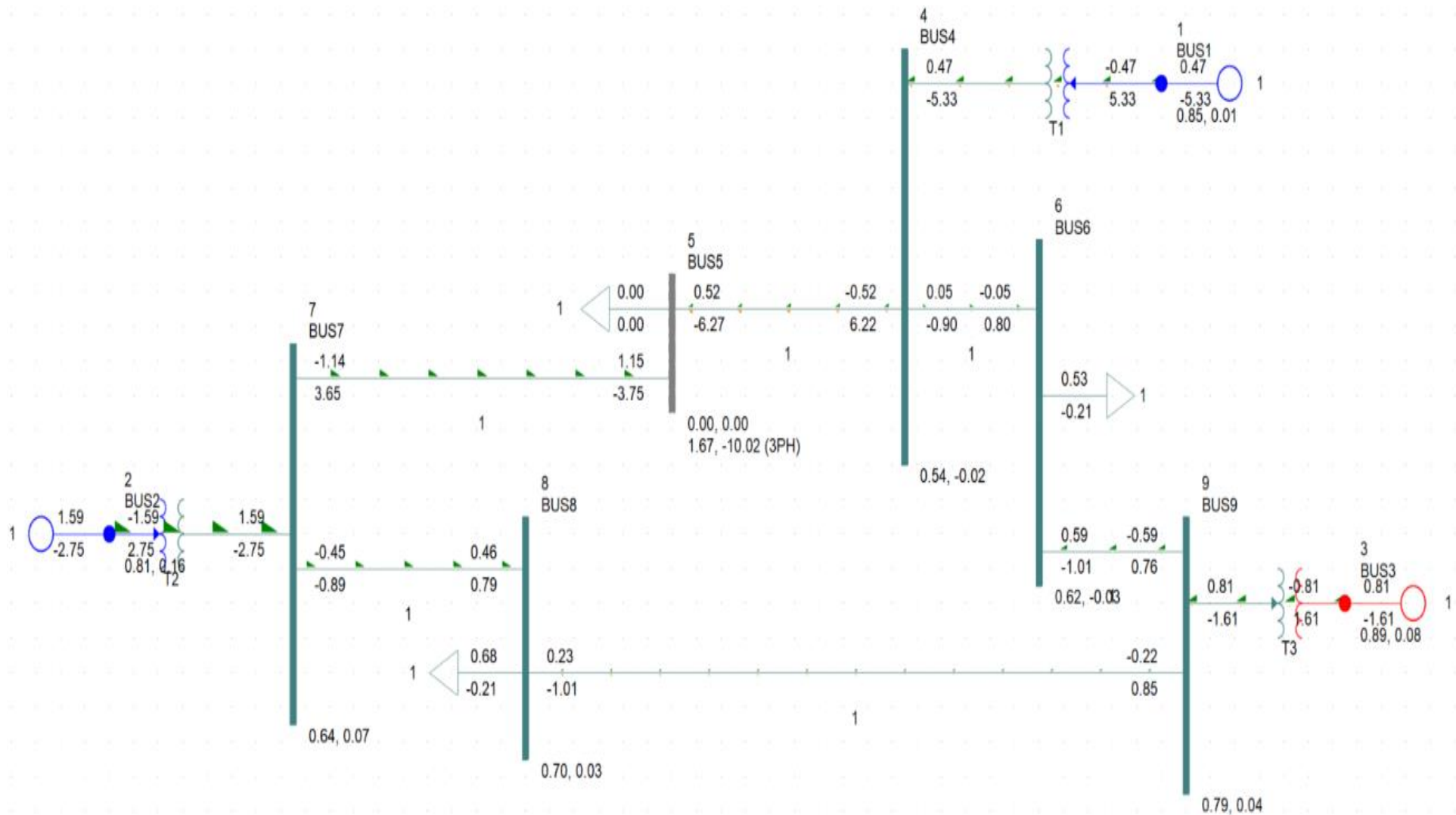
Σχήμα 5.3. Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 2.



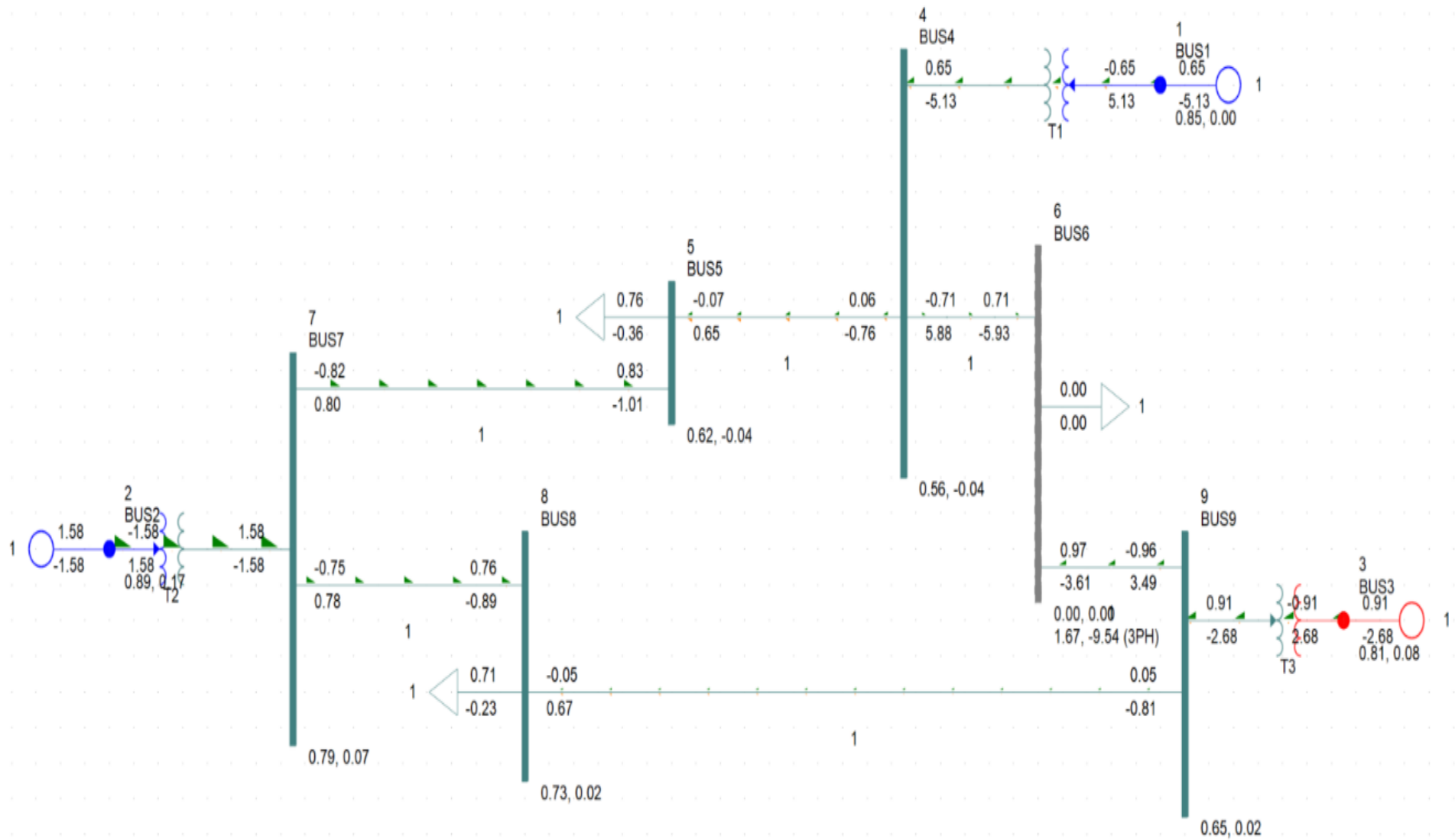
Σχήμα 5.4. Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 3.



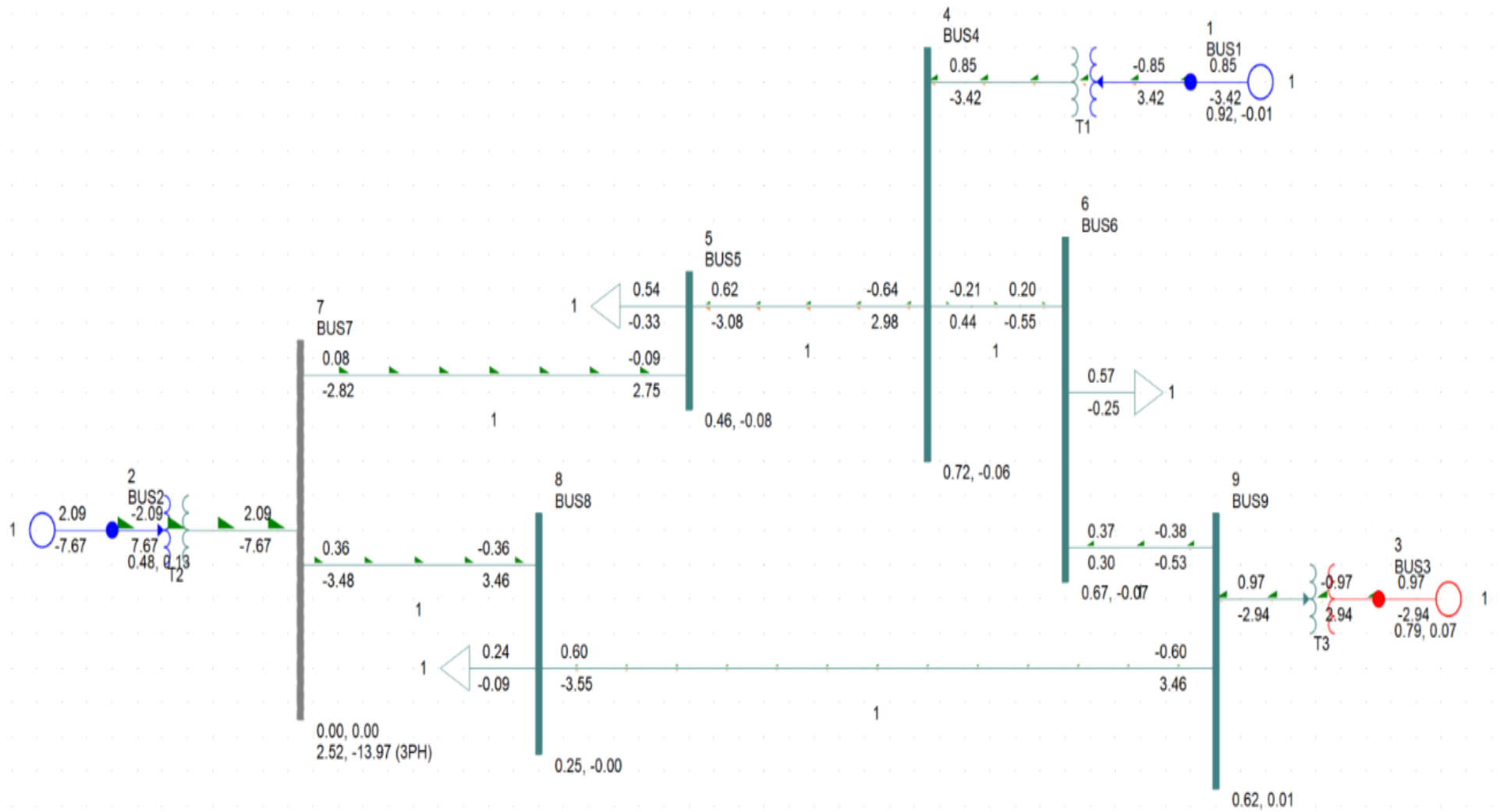
Σχήμα 5.5. Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 4.



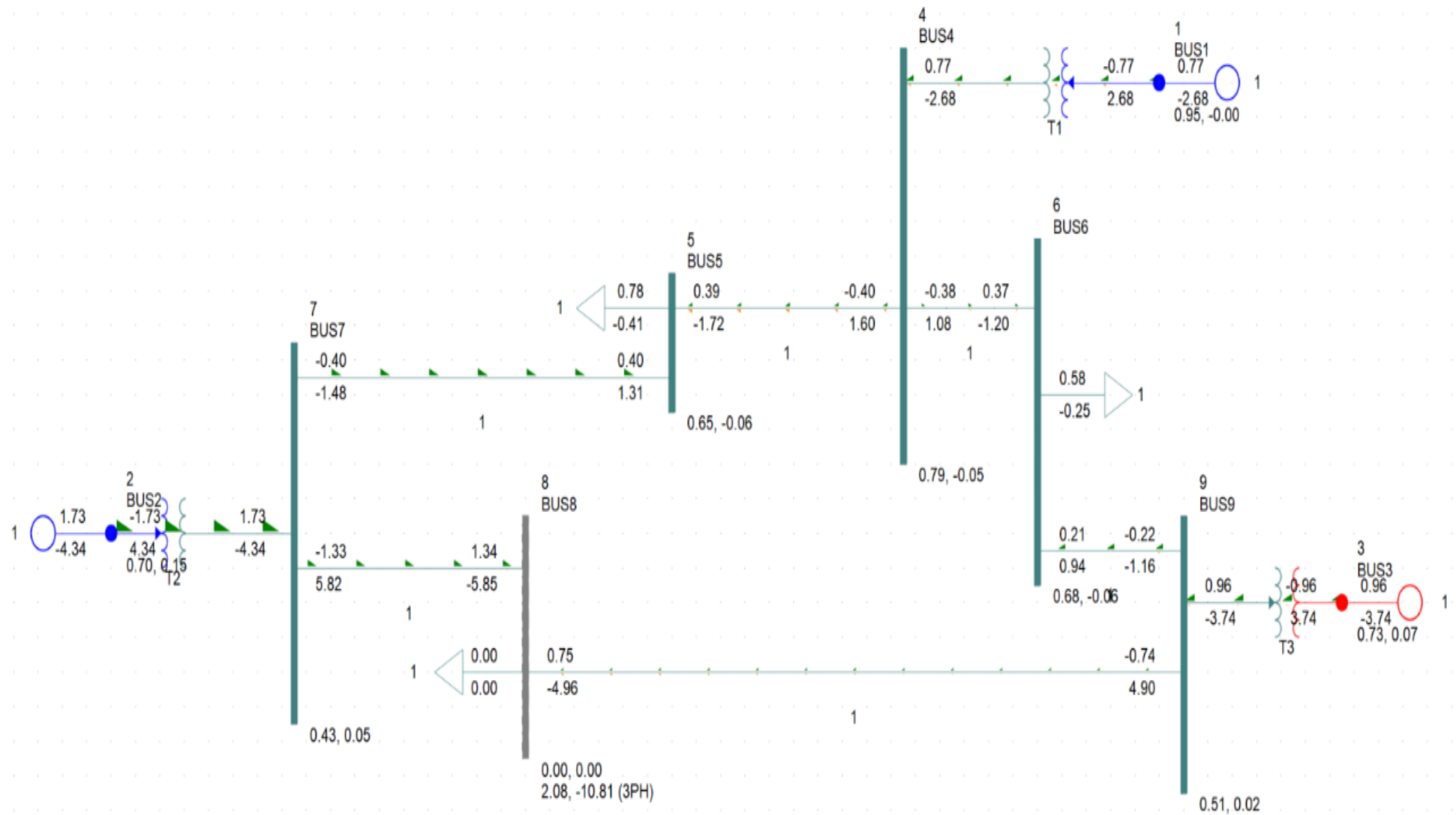
Σχήμα 5.6. Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5.



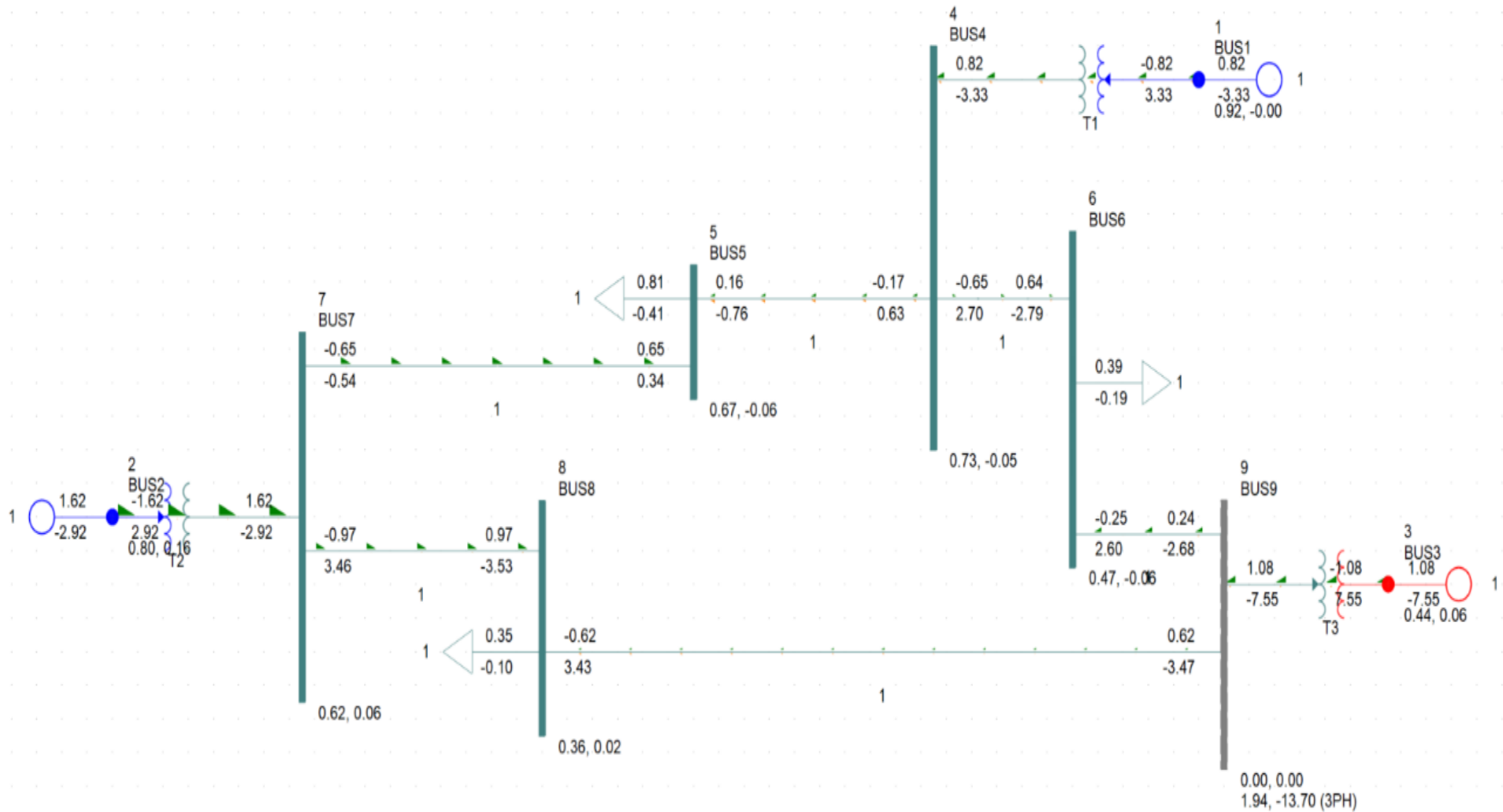
Σχήμα 5.7. Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6.



Σχήμα 5.8. Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7.



Σχήμα 5.9. Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8.



Σχήμα 5.10. Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9.

5.5 Μεταβατική Ευστάθεια

Η μεταβατική ευστάθεια του δικτύου πραγματοποιείται με σκοπό την ανάδειξη της συμπεριφοράς του συστήματος σε περιπτώσεις σφάλματος καθώς και για τον υπολογισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης του συστήματος, μέσα στον οποίο το δίκτυο παραμένει ευσταθές. Το σφάλμα του εφαρμόζεται είναι στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα και εφαρμόζεται σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις, σε τρία διαφορετικά σημεία του συστήματος. Πιο αναλυτικά εφαρμόζεται:

- Στην γραμμή μεταφοράς 4-6, κοντά στον ζυγό 4,
- Στην γραμμή μεταφοράς 7-5, κοντά στον ζυγό 7,
- Στην γραμμή μεταφοράς 8-7, κοντά στον ζυγό 8.

Η διαδικασία που ακολουθείται για κάθε χρόνο εκκαθάρισης είναι η εξής:

- Λειτουργία του συστήματος χωρίς την ύπαρξη σφάλματος για 1 δευτερόλεπτο (1sec).
- Εφαρμογή σφάλματος σε ένα ζυγό κάθε φορά τη στιγμή 1sec (το σφάλμα χαρακτηρίζεται ως σφάλμα στη γραμμή κοντά στον εκάστοτε ζυγό) για διαφορετική χρονική διάρκεια κάθε φορά.
- Η γραμμή σφάλματος έπειτα από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα τίθεται εκτός λειτουργίας και το σφάλμα εκκαθαρίζεται.
- Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η γραμμή τίθεται σε λειτουργία σε 0.5sec.
- Λειτουργία του συστήματος μέχρι τα 10sec.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης είναι η εξής:

- Η χρονική διάρκεια παραμονής του σφάλματος δεν είναι συγκεκριμένη και προκαθορισμένη καθώς σκοπός μελέτης είναι η εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης του κάθε σφάλματος όταν αυτό εμφανίζεται σε μία γραμμή μεταφοράς κοντά σε κάποιο ζυγό, όπου σε αυτή την περίπτωση η επίδρασή του είναι και η πιο ισχυρή. Επομένως, στις προσομοιώσεις η χρονική διάρκεια παραμονής του σφάλματος αυξάνεται ή μειώνεται με τη μέθοδο της διχοτόμησης έτσι ώστε να βρεθεί ο κρίσιμος χρόνος.
- Αρχικά στην παρούσα διπλωματική εργασία ορίστηκε ο ζυγός 1 ως ζυγός αναφοράς (ζυγός της γεννήτριας 1). Στην συνέχεια οι γωνίες των γεννητριών 2 και 3 εκφράζονται ως συνάρτηση της γεννήτριας 1.
- Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις των γωνιών των γεννητριών, αν οι γραφικές παραστάσεις δεν συγκλίνουν αλλά οδηγούνται στο άπειρο, τότε το σύστημα γίνεται ασταθές. Επομένως, ο χρόνος εκκαθάρισης πρέπει να μειωθεί για την εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης.
- Αν οι γραφικές παραστάσεις των γωνιών των γεννητριών συγκλίνουν σε μία νέα τιμή τότε το σύστημα παραμένει ευσταθές. Τότε γίνεται δοκιμή με νέο χρόνο εκκαθάρισης με μεγαλύτερη τιμή.
- Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέχρι να βρεθεί ο χρόνος εκκαθάρισης στον οποίο το σύστημα παραμένει ευσταθές και αν αυτός ο χρόνος αυξηθεί κατά 0,05 sec, τότε το σύστημα γίνεται ασταθές. Τότε και μόνο τότε ο χρόνος εκκαθάρισης ονομάζεται κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του συστήματος.

Στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν, παρουσιάζεται η συμπεριφορά των γωνιών των γεννητριών για τα 10 δευτερόλεπτα λειτουργίας του δικτύου. Σε κάθε ζυγό που εφαρμόζεται το σφάλμα υπάρχουν δύο γραφικές παραστάσεις, η μία για χρόνο παραμονής του σφάλματος έως τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης του και η άλλη για χρόνο μεγαλύτερο από τον κρίσιμο χρόνο. Επίσης παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις που αφορούν τη συχνότητα στους ζυγούς των

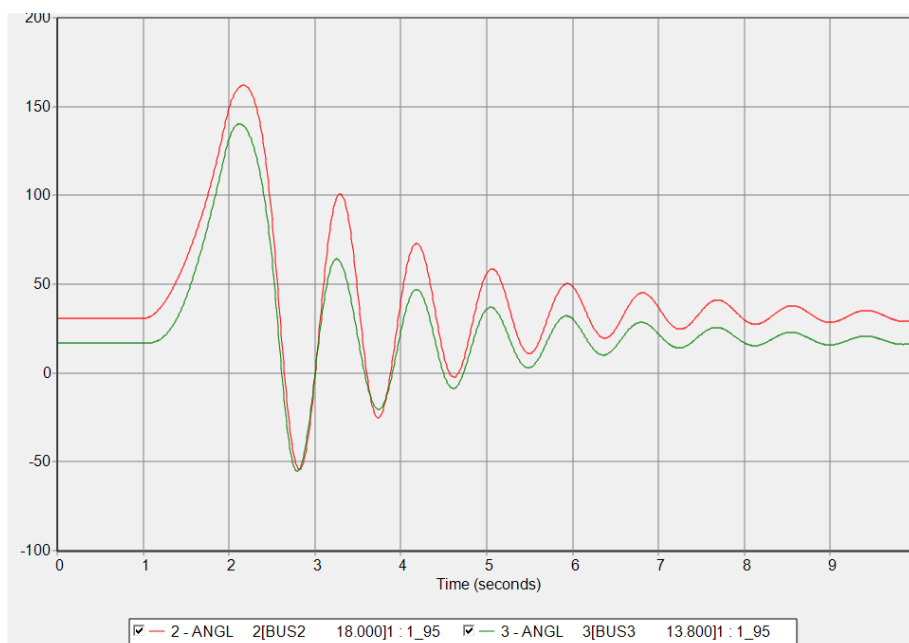
γεννητριών και στο ζυγό σφάλματος, την ενεργό και άεργο ισχύ στους ζυγούς των γεννητριών καθώς και την τάση στους ζυγούς των γεννητριών και στον ζυγό σφάλματος.

5.5.1 Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4

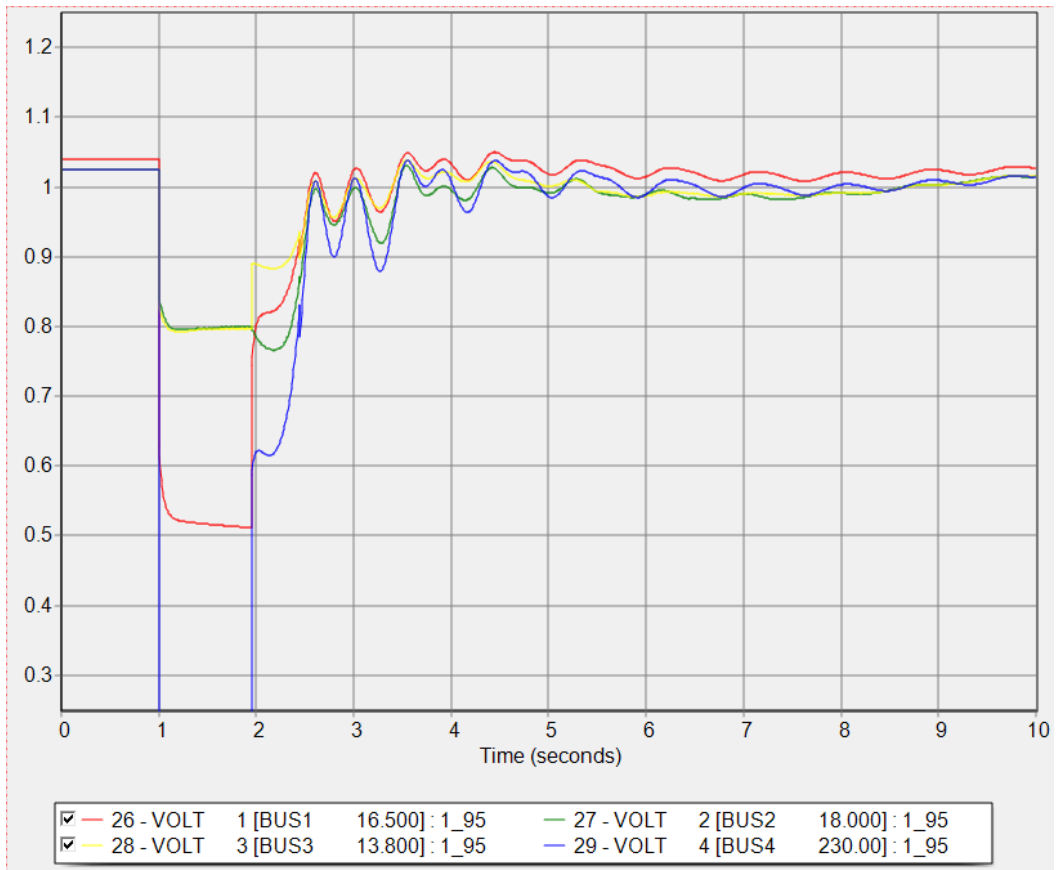
5.5.1.1 Ευστάθεια συστήματος

- Λειτουργία συστήματος χωρίς σφάλμα από το 0 sec μέχρι 1 sec, διάρκεια 1 sec,
- Εισαγωγή σφάλματος στο 1 sec,
- Λειτουργία με σφάλμα από 1 sec μέχρι 1,95 sec, διάρκεια 0,95 sec,
- Γραμμή 4-6 εκτός λειτουργίας στο 1,95 sec,
- Εκκαθάριση σφάλματος στο 1,95 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 1,95 sec μέχρι 2,45 sec, διάρκεια 0,50 sec,
- Επαναφορά γραμμής 4-6 στο 2,45 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 2,45 sec μέχρι 10 sec, διάρκεια 7,55 sec.

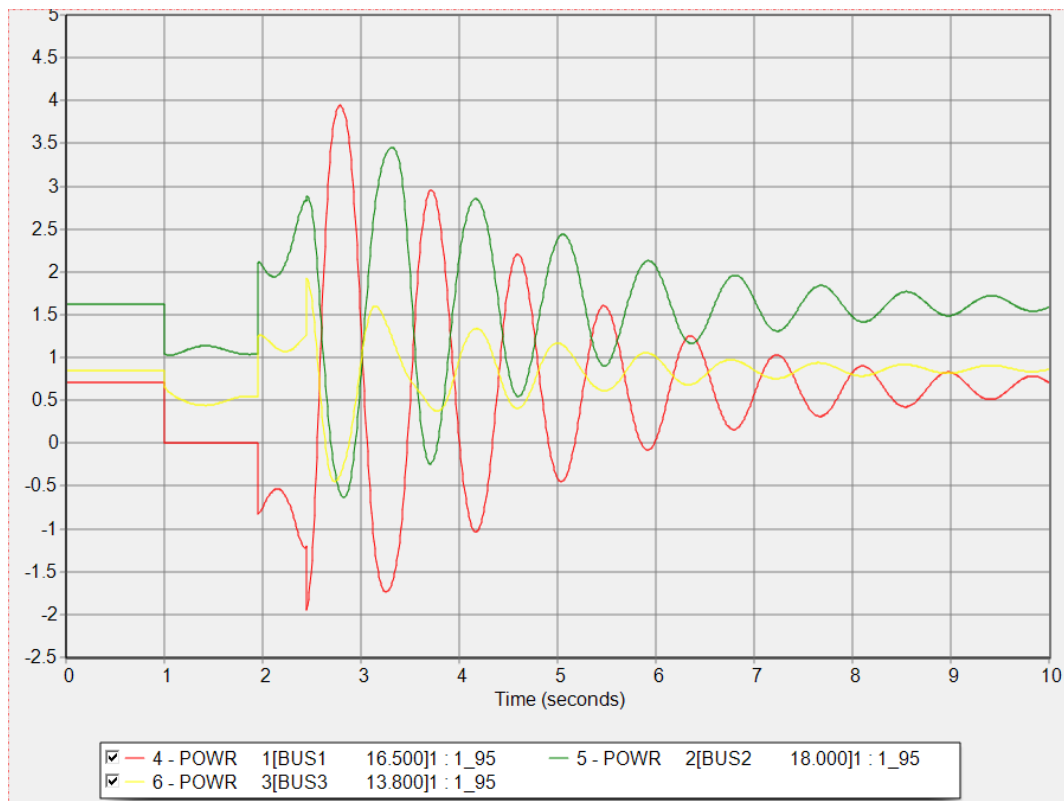
Στο διάγραμμα των γωνιών ισχύος των γεννητριών 2 και 3 για τις οποίες ζυγός αναφοράς έχει θεωρηθεί ο ζυγός 1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11, παρατηρείται ότι οι γωνίες συγκλίνουν, επομένως το σύστημα παραμένει ευσταθές ύστερα από την διαταραχή. Από το διάγραμμα της τάσης, Σχήμα 5.12 και από τα διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται η ενεργός, Σχήμα 5.13 και η άεργος ισχύς των γεννητριών, Σχήμα 5.14 παρατηρείται ότι οι νέες τιμές επανέρχονται στις προσφαλματικές τιμές. Στο διάγραμμα όπου παρουσιάζονται οι συχνότητες των ζυγών, Σχήμα 5.15, παρατηρείται ότι οι καμπύλες συγκλίνουν σε μία νέα τιμή. Από την εμφάνιση του σφάλματος δεν προκύπτει αστάθεια στο σύστημα, ωστόσο οι μεγάλης διάρκειας πτώση τάσης των γεννητριών και η σύγκλιση σε νέα τιμή των συχνοτήτων των ζυγών είναι μη αποδεκτές συνθήκες για την σωστή και εύρυθμη λειτουργία του συστήματος, οπότε η εκκαθάριση του σφάλματος πρέπει να πραγματοποιηθεί όσο το δυνατόν το γρηγορότερο.



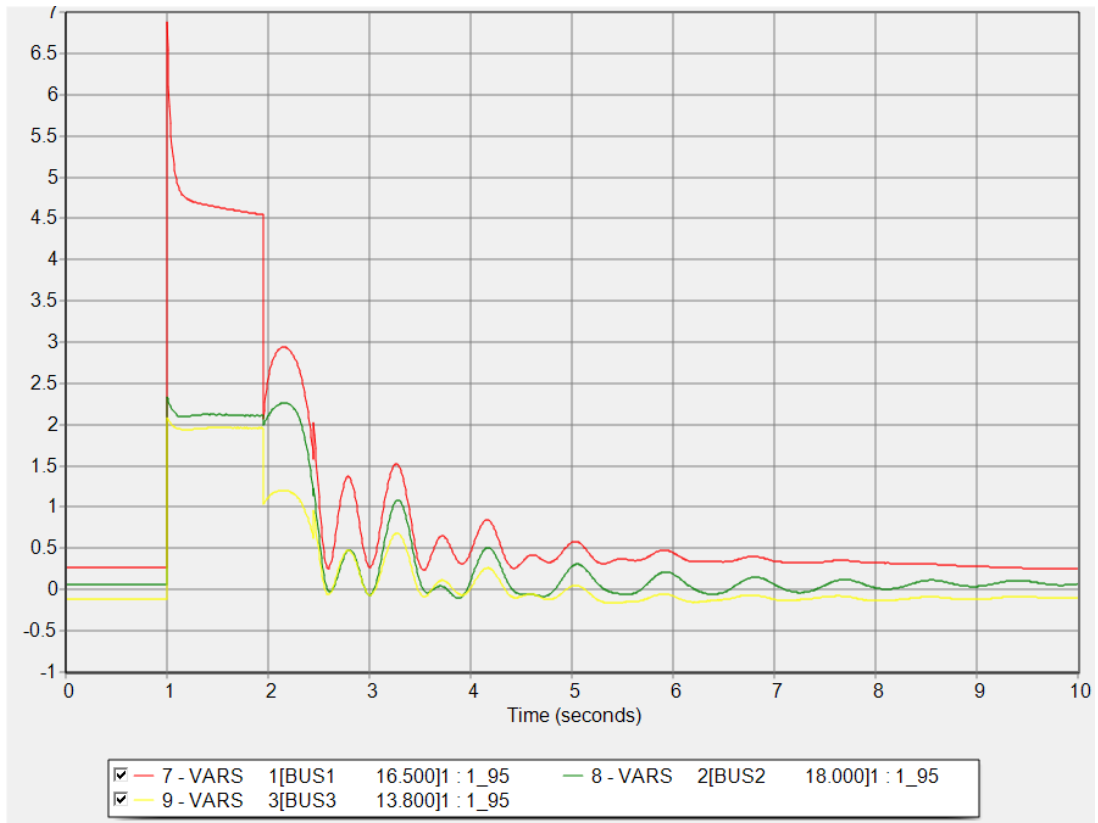
Σχήμα 5.11. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, γωνίες ισχύος γεννητριών 2 και 3, σε σχέση με την γωνία της γεννήτριας 1.



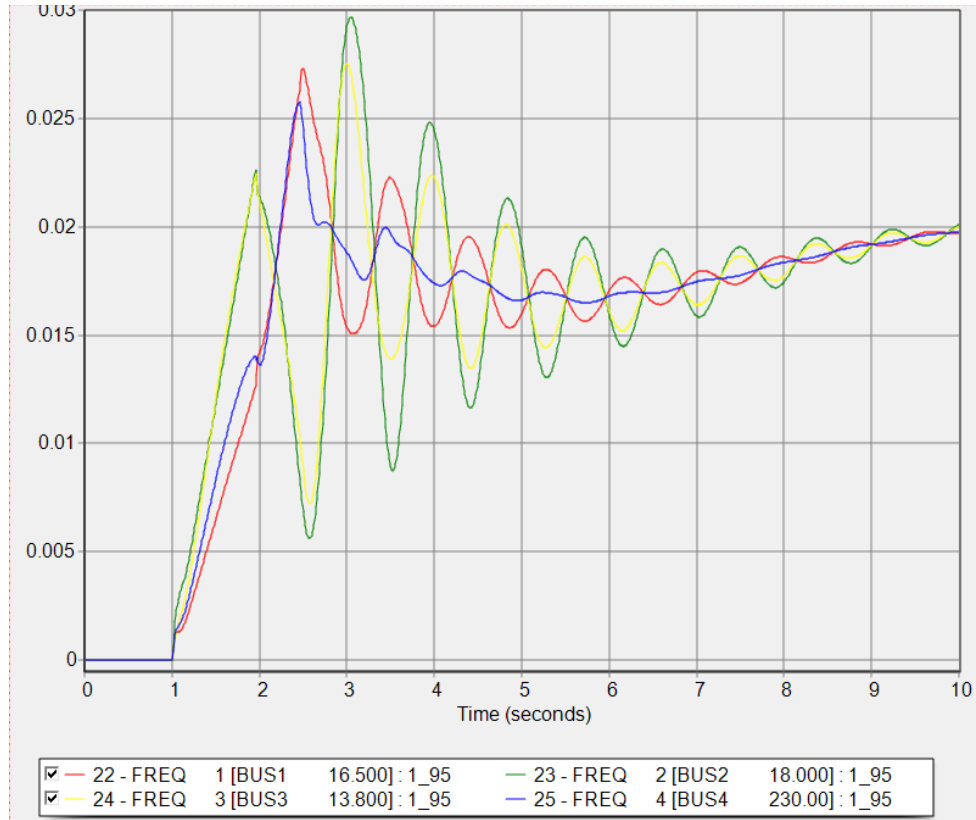
Σχήμα 5.12. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος.



Σχήμα 5.13. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, πραγματική ισχύς γεννητριών.



Σχήμα 5.14. Στερό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, άεργος ισχύς γεννητριών.

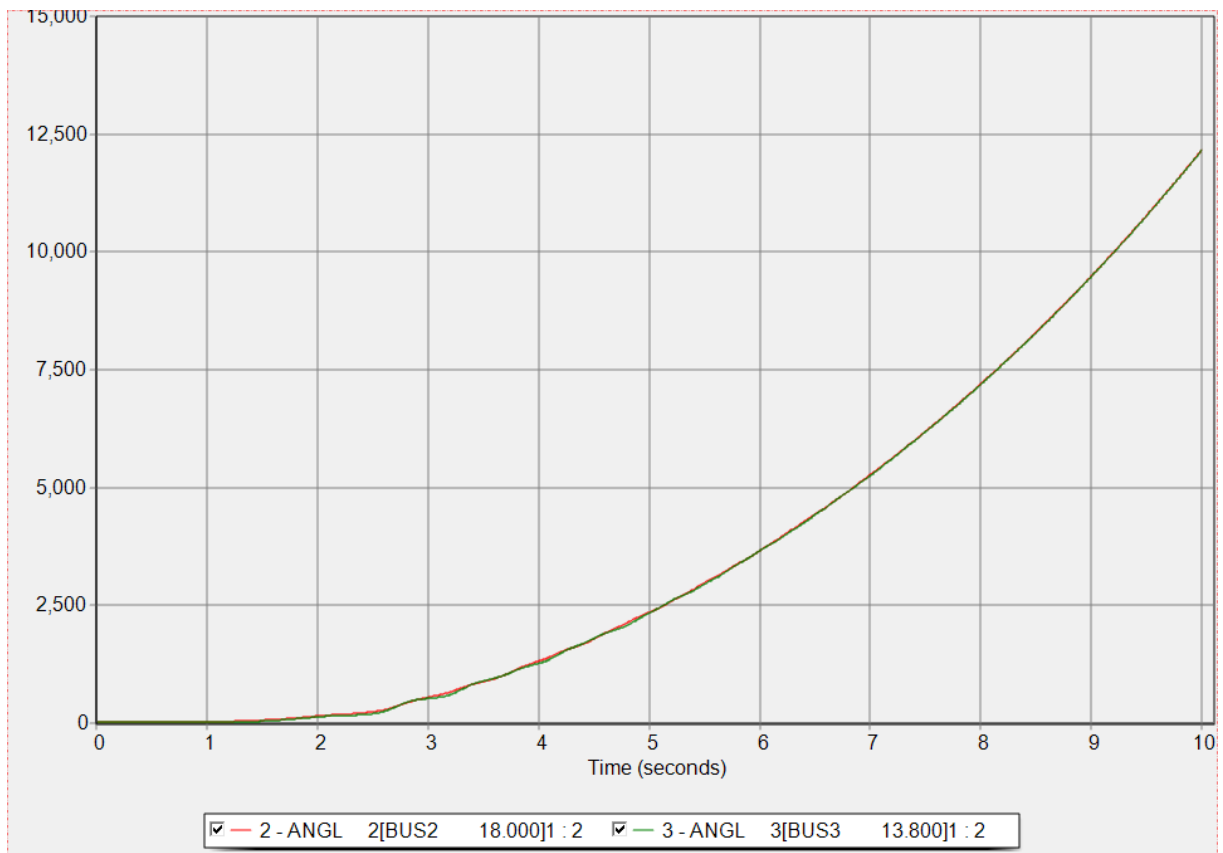


Σχήμα 5.15. Στερό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος.

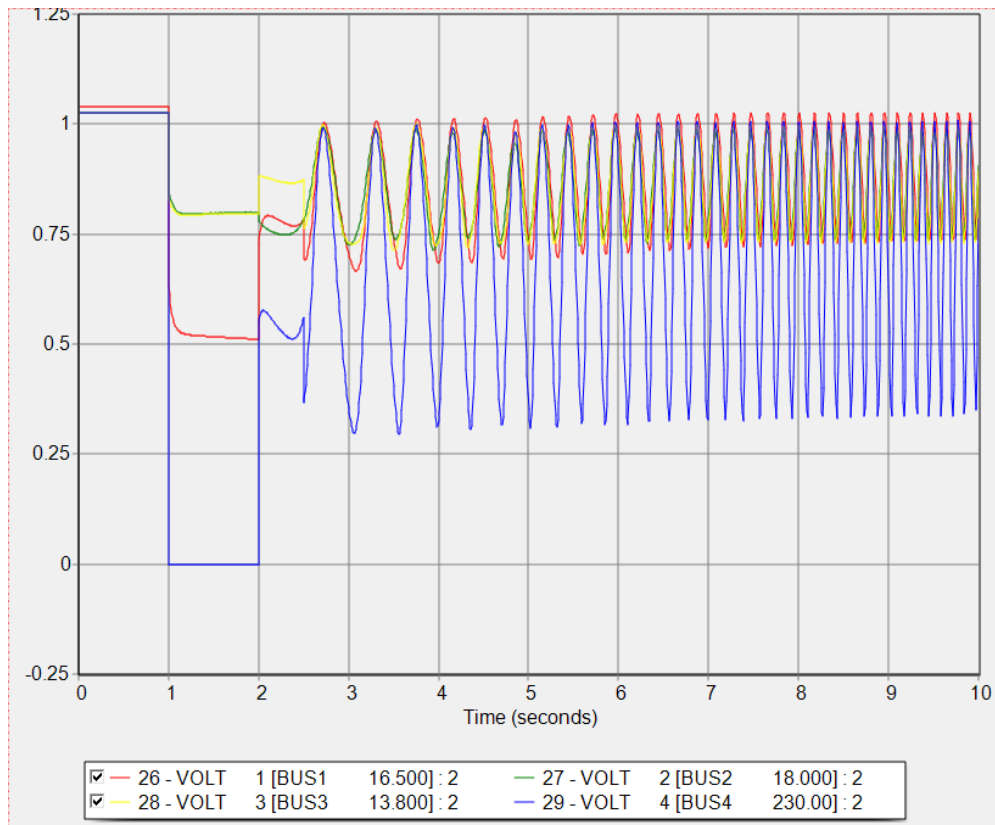
5.5.1.1 Αστάθεια συστήματος

- Λειτουργία συστήματος χωρίς σφάλμα από το 0 sec μέχρι 1 sec, διάρκεια 1 sec,
- Εισαγωγή σφάλματος στο 1 sec,
- Λειτουργία με σφάλμα από 1 sec μέχρι 2,00 sec, διάρκεια 1,00 sec,
- Γραμμή 4-6 εκτός λειτουργίας στο 2,00 sec,
- Εκκαθάριση σφάλματος στο 2,00 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 2,00 sec μέχρι 2,50 sec, διάρκεια 0,50 sec,
- Επαναφορά γραμμής 4-6 στο 2,50 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 2,50 sec μέχρι 10 sec, διάρκεια 7,50 sec.

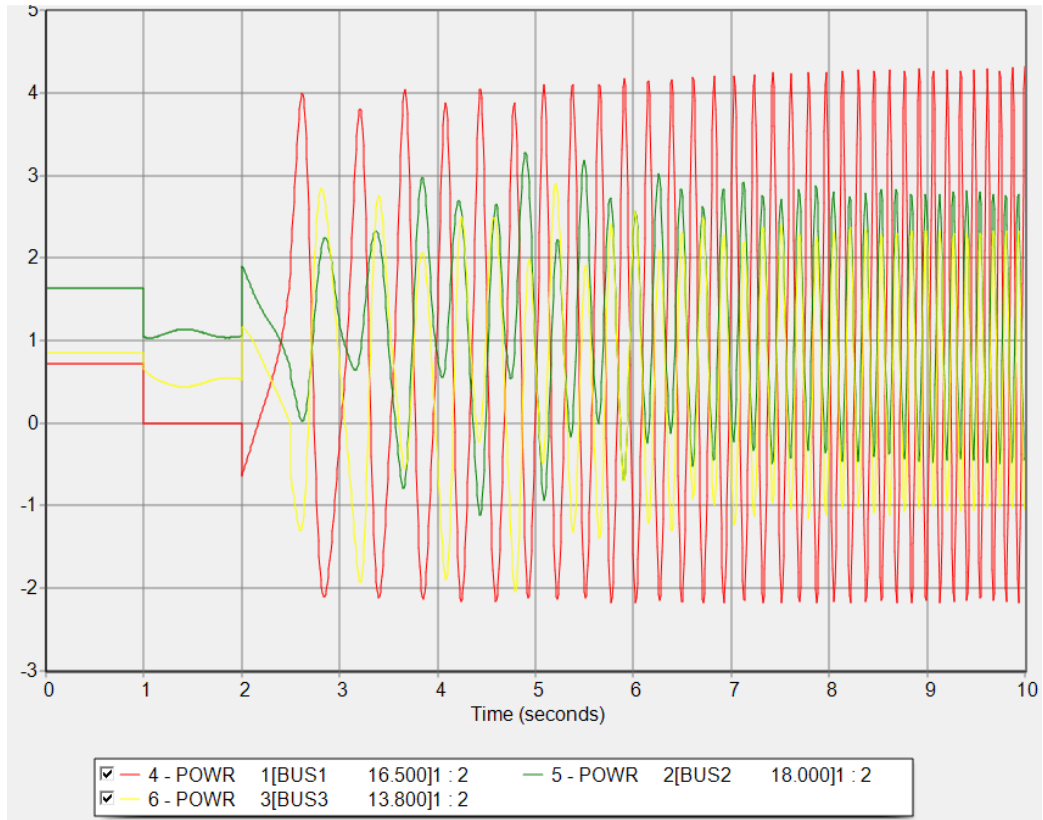
Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος πραγματοποιηθεί μετά τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης, δηλαδή το σφάλμα εκκαθαριστεί στο 2,00 sec τότε το σύστημα γίνεται ασταθές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.16 καθώς δεν πραγματοποιείται σύγκλιση σε κάποια τιμή, αλλά οι γραφικές παραστάσεις τείνουν στο άπειρο. Στις γραφικές παραστάσεις στις οποίες παρουσιάζονται οι τάσεις, Σχήμα 5.17, η πραγματική ισχύς των γεννητριών, Σχήμα 5.18, η άεργος ισχύς των γεννητριών, Σχήμα 5.19 και οι συχνότητες, Σχήμα 5.20, παρουσιάζονται μη αποσβενόμενες ταλαντώσεις, οπότε το σύστημα είναι ασταθές.



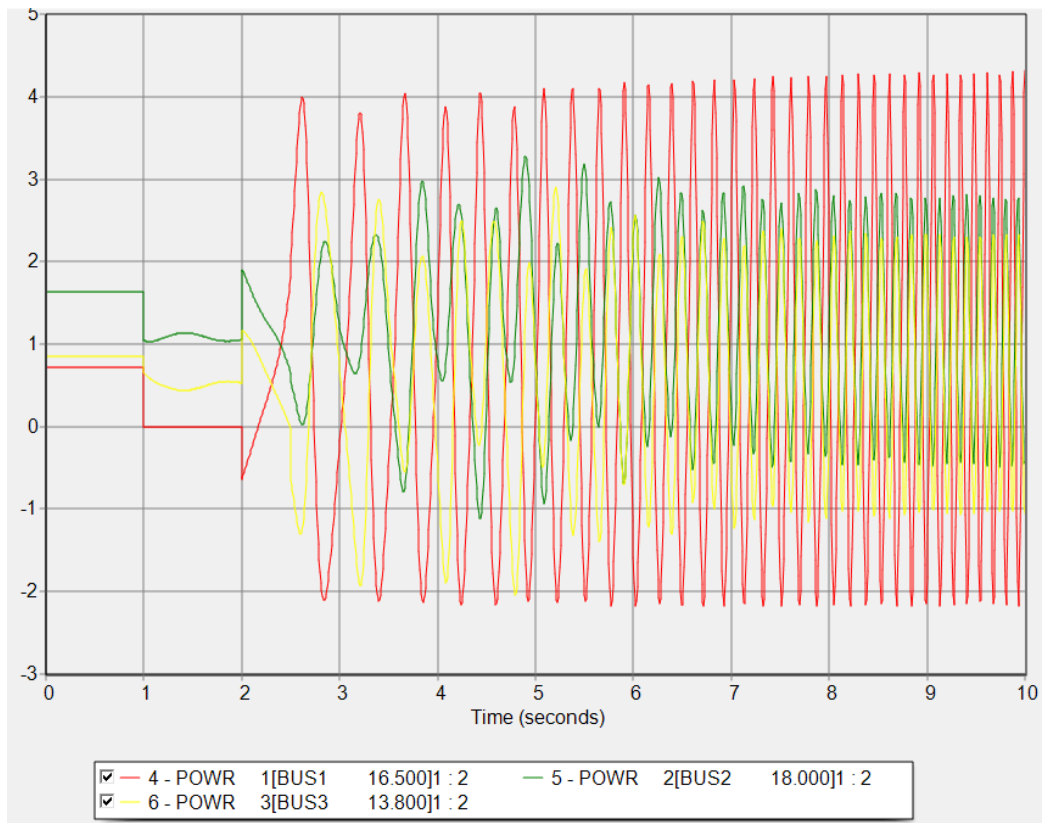
Σχήμα 5.16. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, γωνίες ισχύος γεννητριών 2 και 3, σε σχέση με την γωνία της γεννήτριας 1.



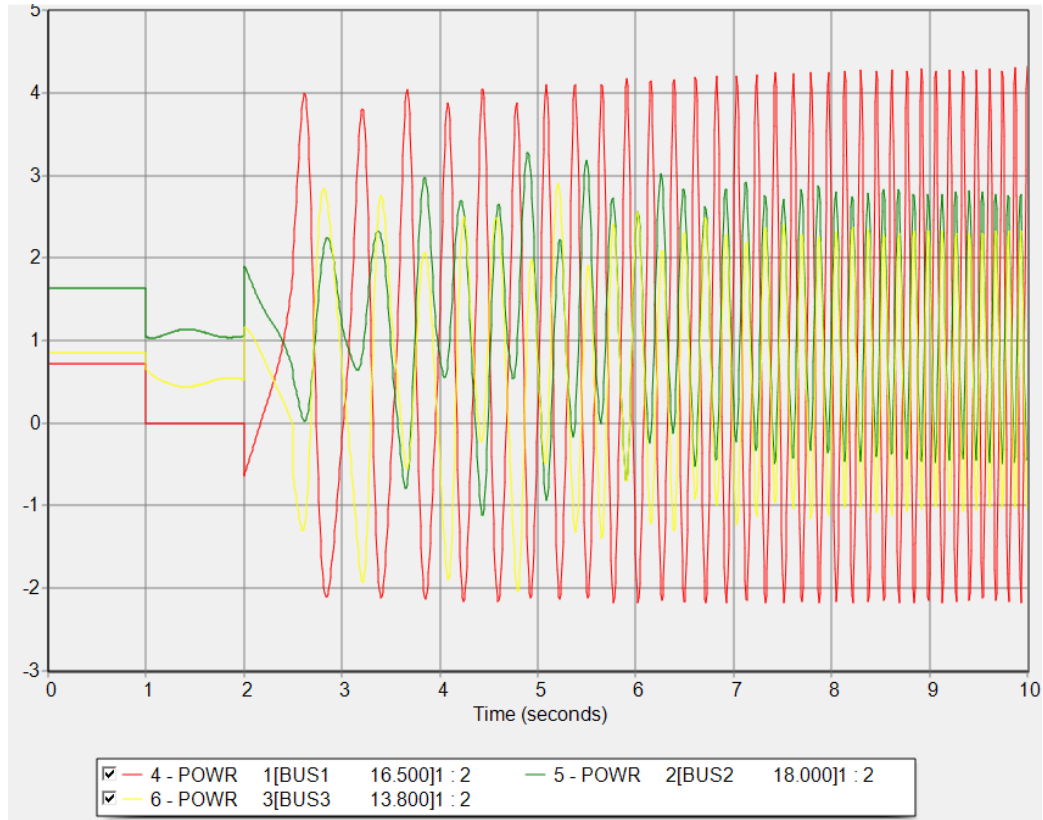
Σχήμα 5.17. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος.



Σχήμα 5.18. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, πραγματική ισχύς γεννητριών.



Σχήμα 5.19. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, άεργος ισχύς γεννητριών.



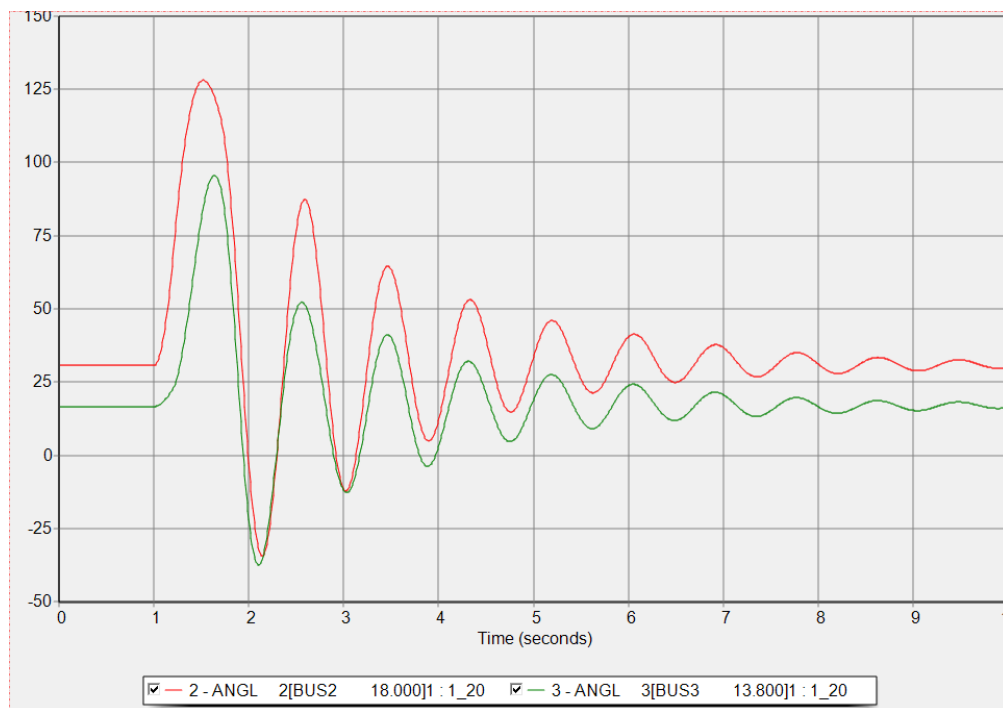
Σχήμα 5.20. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4-6, κοντά στον ζυγό 4, συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος.

5.5.2 Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7

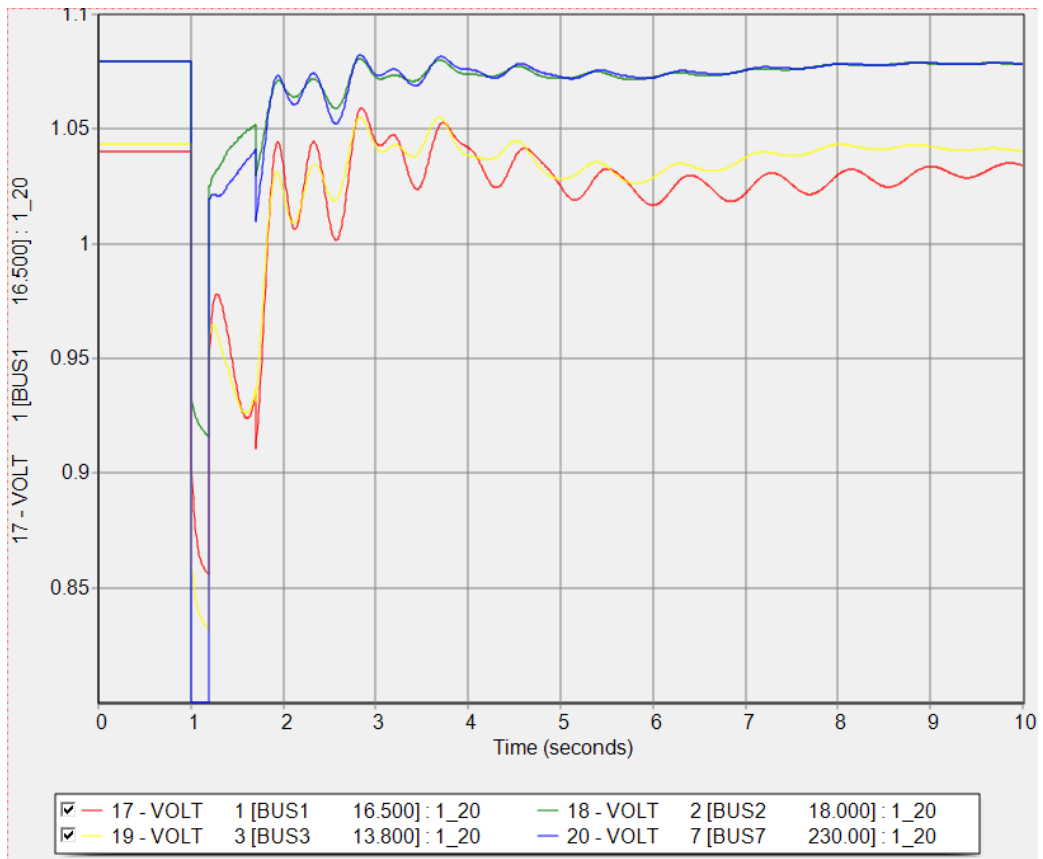
5.5.2.1 Ευστάθεια συστήματος

- Λειτουργία συστήματος χωρίς σφάλμα από το 0 sec μέχρι 1 sec, διάρκεια 1 sec,
- Εισαγωγή σφάλματος στο 1 sec,
- Λειτουργία με σφάλμα από 1 sec μέχρι 1,20 sec, διάρκεια 0,20 sec,
- Γραμμή 4-6 εκτός λειτουργίας στο 1,20 sec,
- Εκκαθάριση σφάλματος στο 1,20 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 1,20 sec μέχρι 1,70 sec, διάρκεια 0,50 sec,
- Επαναφορά γραμμής 4-6 στο 1,70 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 1,70 sec μέχρι 10 sec, διάρκεια 8,30 sec.

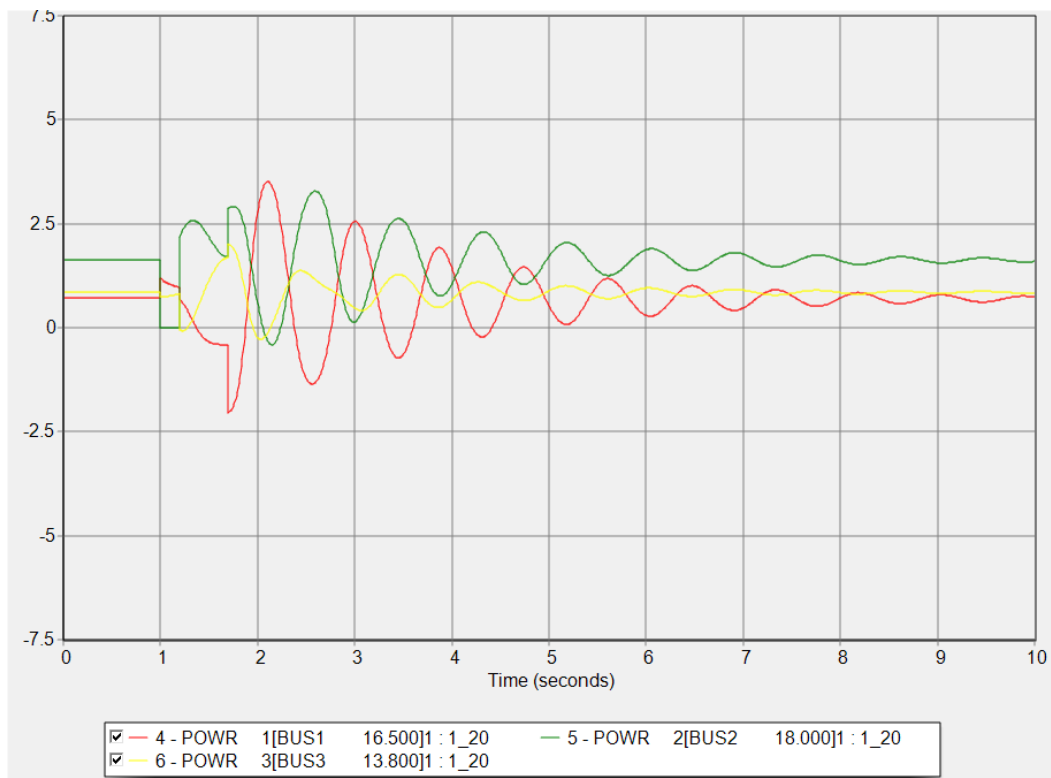
Στο διάγραμμα των γωνιών ισχύος των γεννητριών 2 και 3 για τις οποίες ζυγός αναφοράς έχει θεωρηθεί ο ζυγός 1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21, παρατηρείται ότι οι γωνίες συγκλίνουν, επομένως το σύστημα παραμένει ευσταθές ύστερα από την διαταραχή. Από το διάγραμμα της τάσης, Σχήμα 5.22 και από τα διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται η ενεργός, Σχήμα 5.23 και η άεργος ισχύς των γεννητριών, Σχήμα 5.24 παρατηρείται ότι οι νέες τιμές επανέρχονται στις προσφαλματικές τιμές. Στο διάγραμμα όπου παρουσιάζονται οι συχνότητες των ζυγών, Σχήμα 5.25, παρατηρείται ότι οι καμπύλες συγκλίνουν σε μία νέα τιμή. Από την εμφάνιση του σφάλματος δεν προκύπτει αστάθεια στο σύστημα, ωστόσο η εκκαθάριση του σφάλματος πρέπει να πραγματοποιηθεί όσο το δυνατόν το γρηγορότερο.



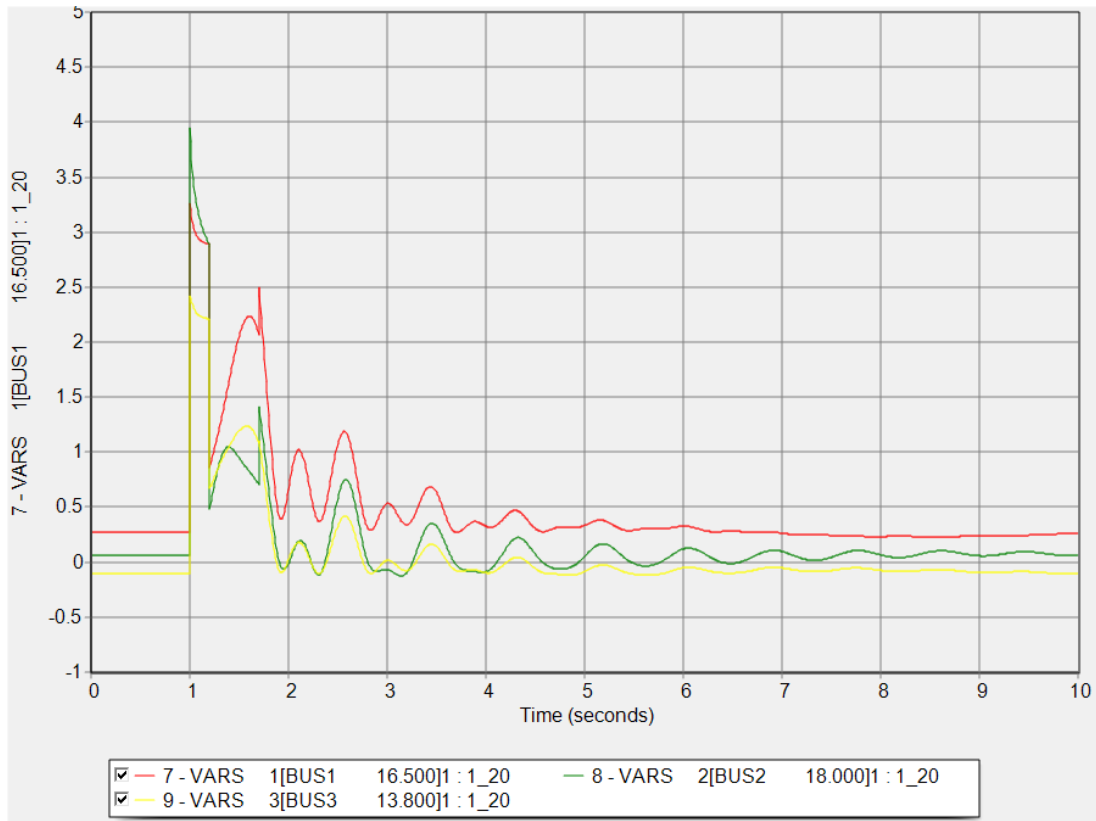
Σχήμα 5.21. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, γωνίες ισχύος γεννητριών 2 και 3, σε σχέση με την γωνία της γεννήτριας 1.



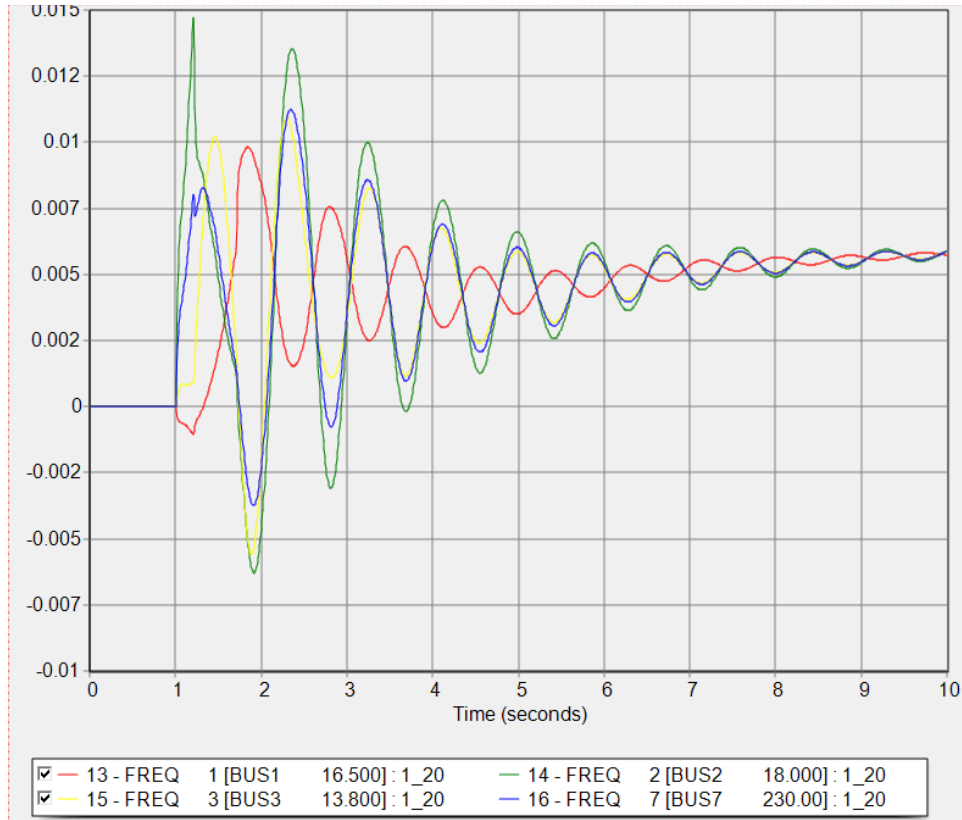
Σχήμα 5.22. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος.



Σχήμα 5.23. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, πραγματική ισχύς γεννητριών.



Σχήμα 5.24. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, άεργος ισχύς γεννητριών.

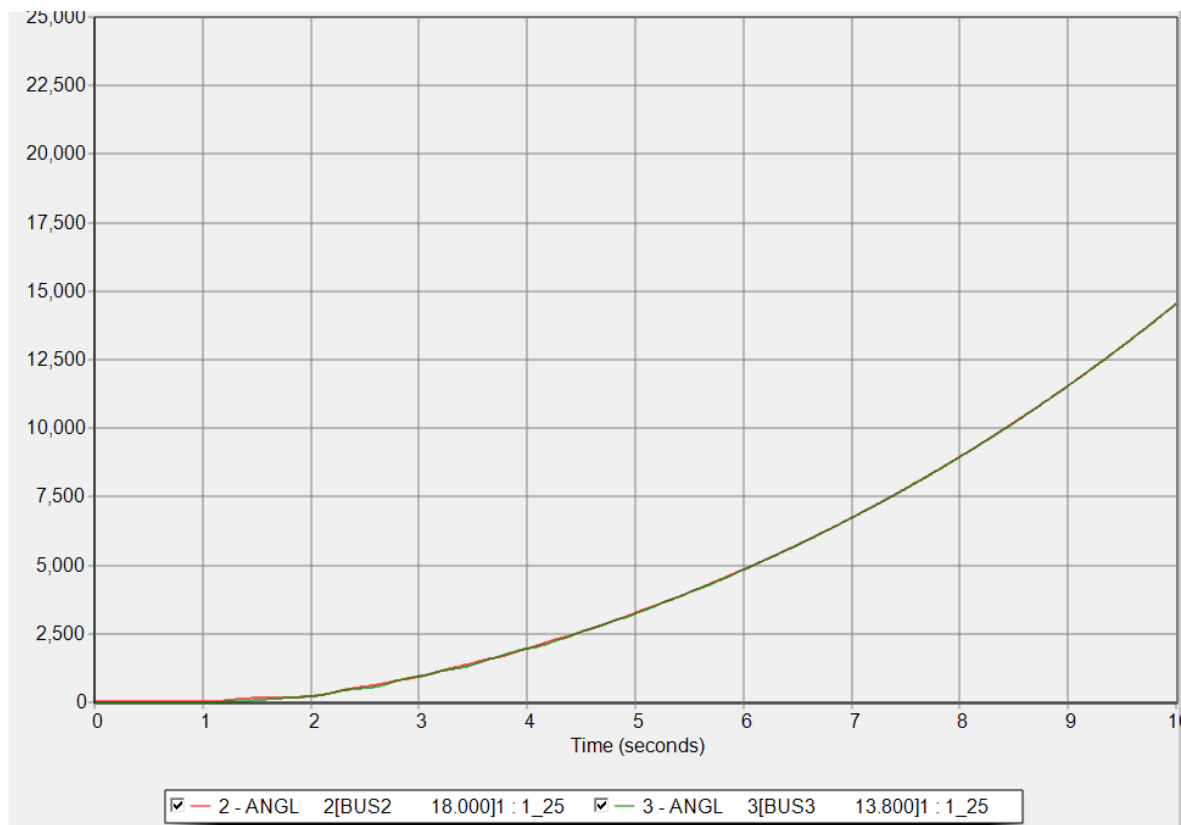


Σχήμα 5.25. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 4, συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος.

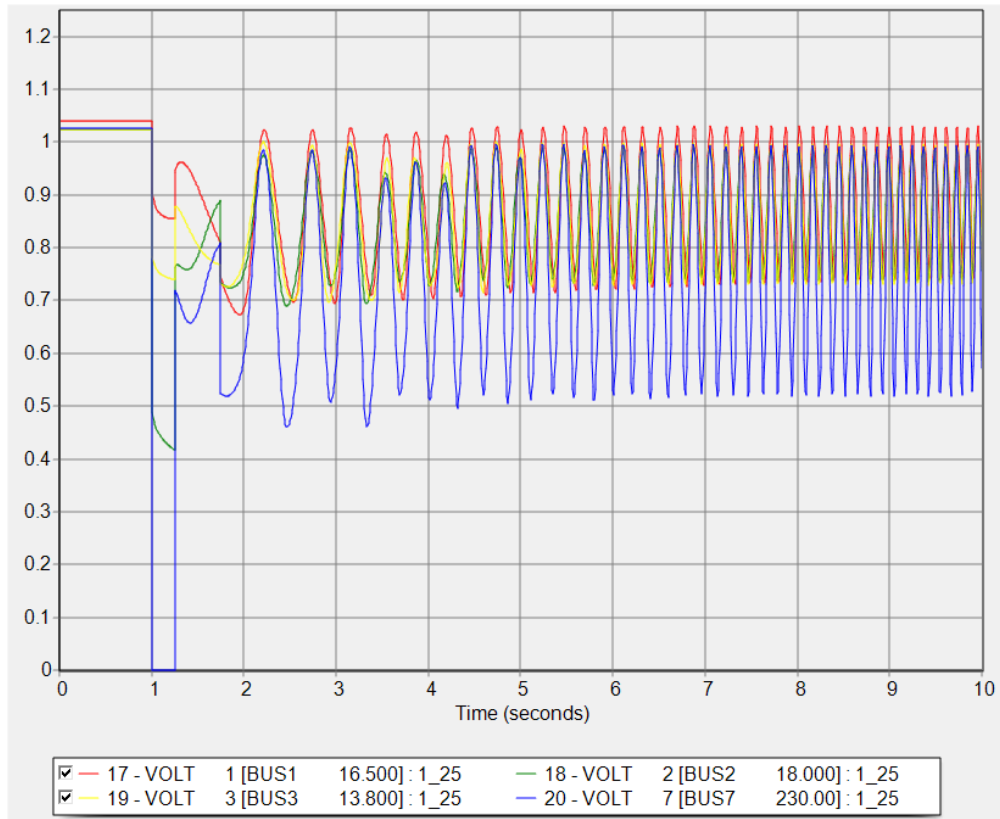
5.5.2.2 Ασταθία συστήματος

- Λειτουργία συστήματος χωρίς σφάλμα από το 0 sec μέχρι 1 sec, διάρκεια 1 sec,
- Εισαγωγή σφάλματος στο 1 sec,
- Λειτουργία με σφάλμα από 1 sec μέχρι 1,25 sec, διάρκεια 0,25 sec,
- Γραμμή 4-6 εκτός λειτουργίας στο 1,25 sec,
- Εκκαθάριση σφάλματος στο 1,25 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 1,25 sec μέχρι 1,75 sec, διάρκεια 0,50 sec,
- Επαναφορά γραμμής 4-6 στο 1,75 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 1,75 sec μέχρι 10 sec, διάρκεια 8,25 sec.

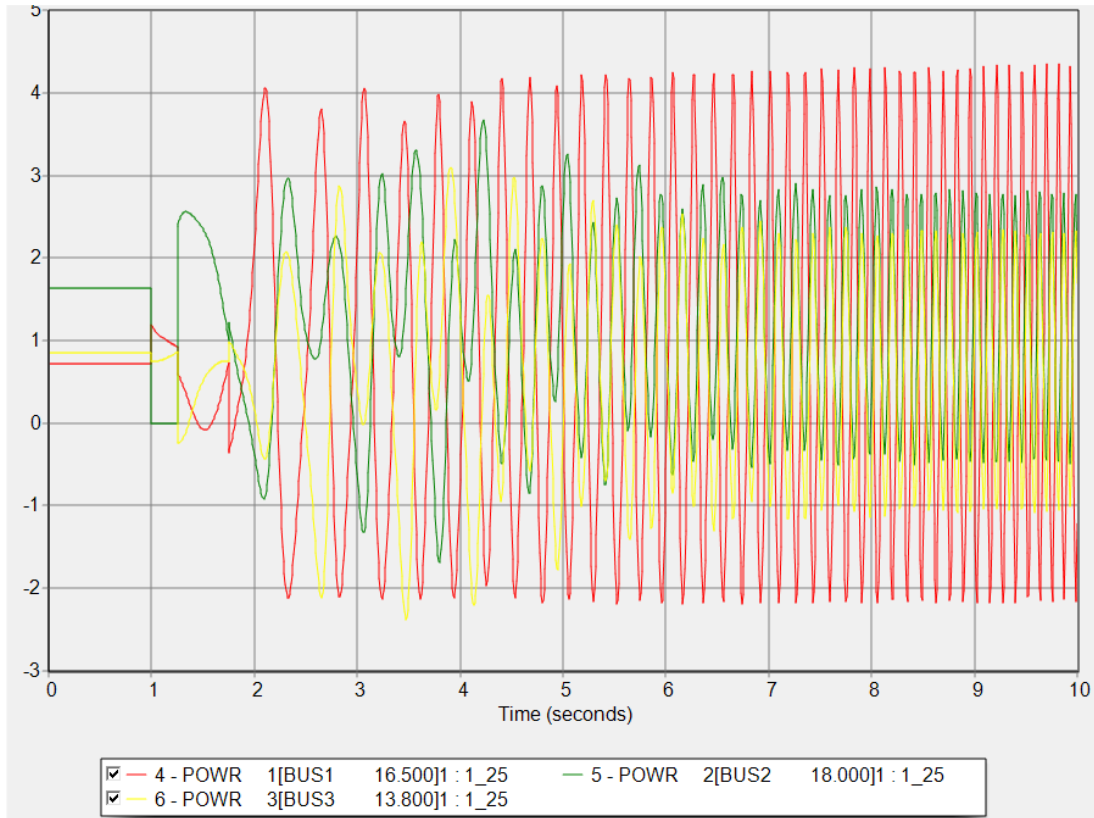
Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος πραγματοποιηθεί μετά τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης, δηλαδή το σφάλμα εκκαθαριστεί στο 2,00 sec τότε το σύστημα γίνεται ασταθές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.26 καθώς δεν πραγματοποιείται σύγκλιση σε κάποια τιμή, αλλά οι γραφικές παραστάσεις τείνουν στο άπειρο. Στις γραφικές παραστάσεις στις οποίες παρουσιάζονται οι τάσεις, Σχήμα 5.27, η πραγματική ισχύς των γεννητριών, Σχήμα 5.28, η άεργος ισχύς των γεννητριών, Σχήμα 5.29 και οι συχνότητες, Σχήμα 5.30, παρουσιάζονται μη αποσβενόμενες ταλαντώσεις, οπότε το σύστημα είναι ασταθές.



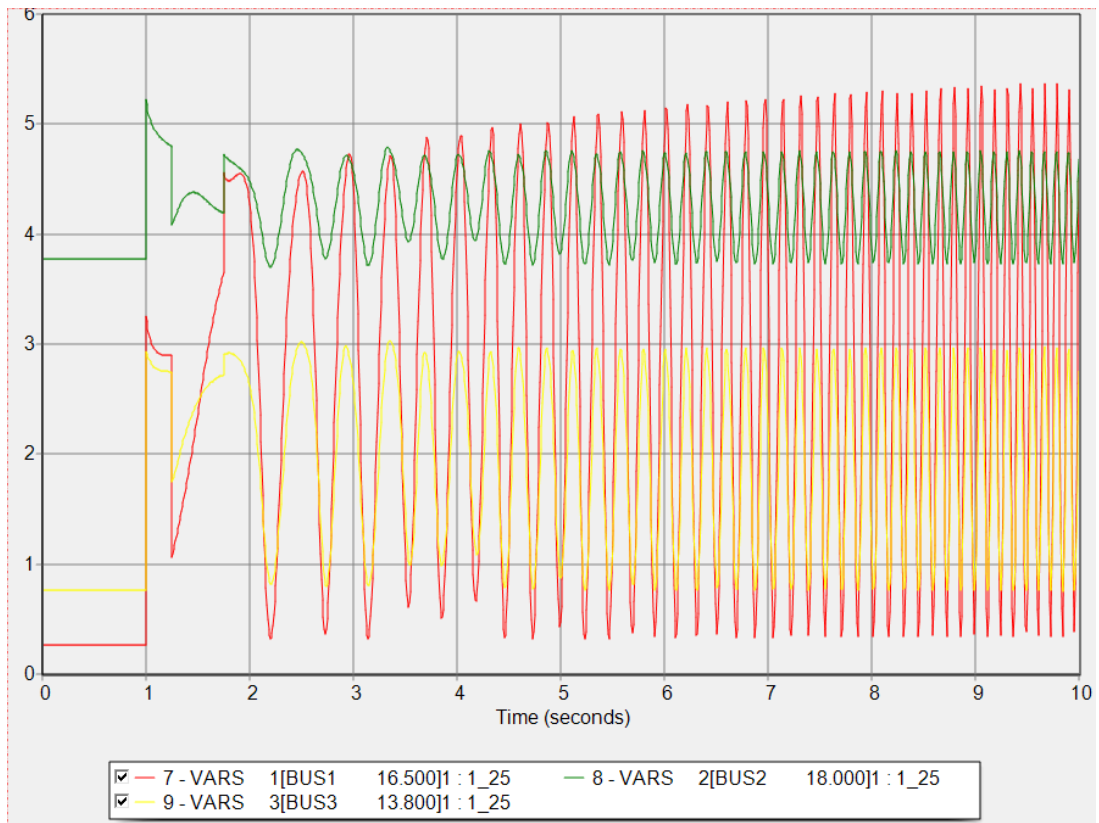
Σχήμα 5.26. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, γωνίες ισχύος γεννητριών 2 και 3, σε σχέση με την γωνία της γεννήτριας 1.



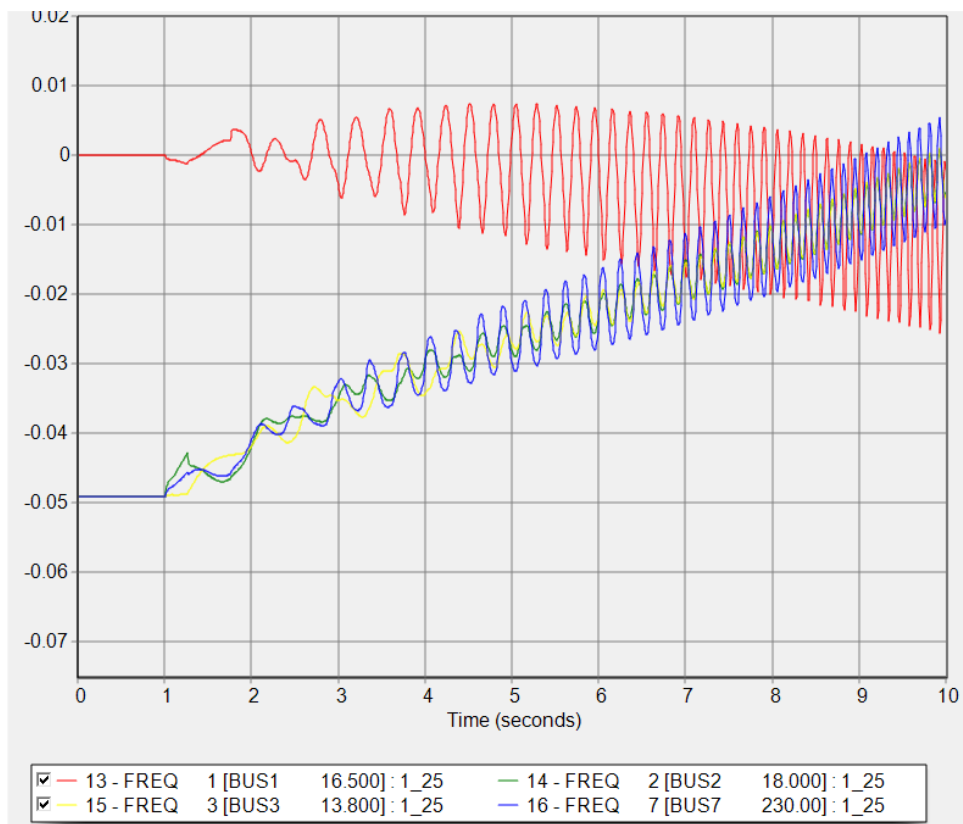
Σχήμα 5.27. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος.



Σχήμα 5.28. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, πραγματική ισχύς γεννητριών.



Σχήμα 5.29. Στερό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, άεργος ισχύς γεννητριών.



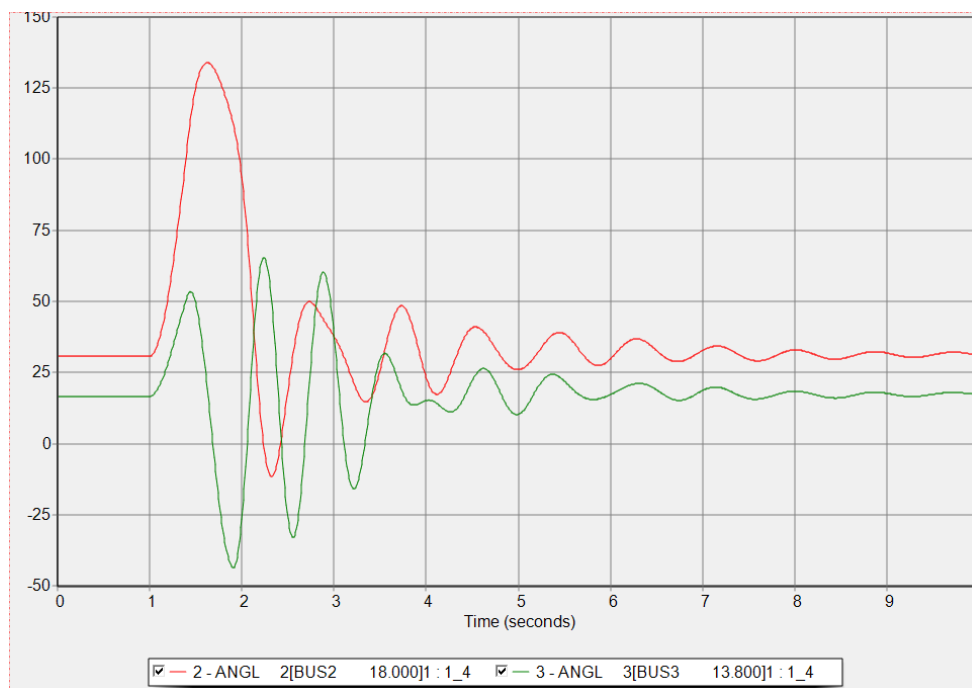
Σχήμα 5.30. Στερό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 4, συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος.

5.5.3 Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-7, κοντά στον ζυγό 8

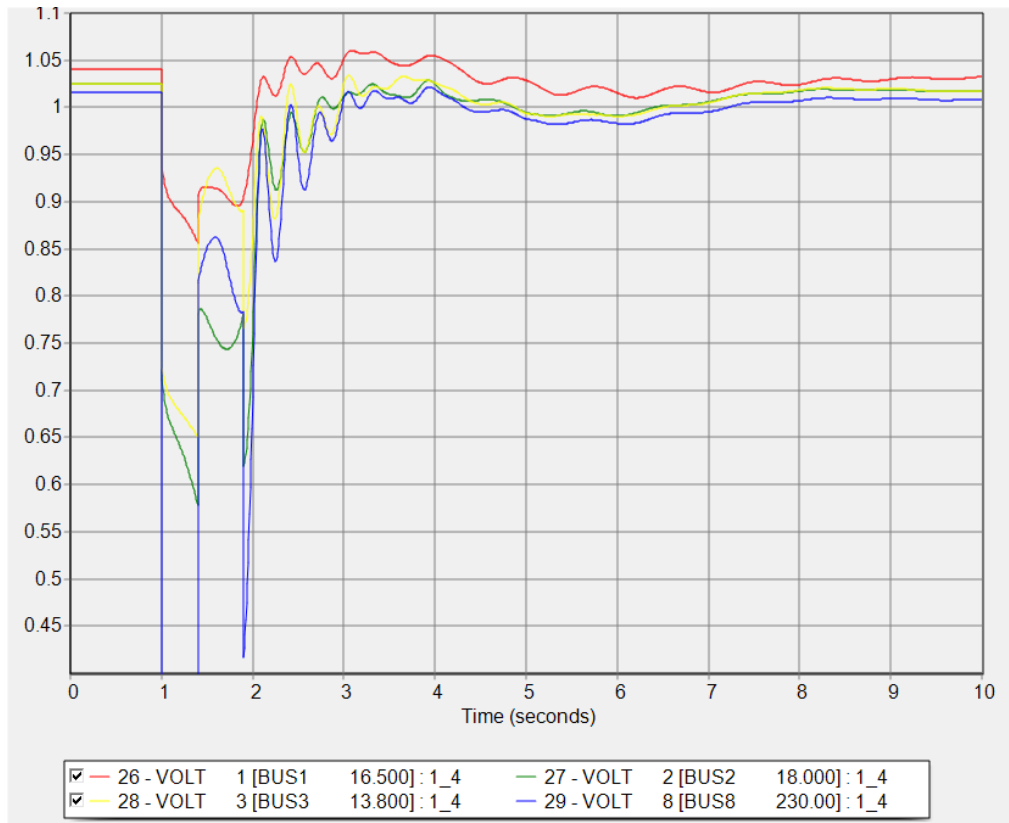
5.5.2.1 Ευστάθεια συστήματος

- Λειτουργία συστήματος χωρίς σφάλμα από το 0 sec μέχρι 1 sec, διάρκεια 1 sec,
- Εισαγωγή σφάλματος στο 1 sec,
- Λειτουργία με σφάλμα από 1 sec μέχρι 1,40 sec, διάρκεια 0,40 sec,
- Γραμμή 4-6 εκτός λειτουργίας στο 1,40 sec,
- Εκκαθάριση σφάλματος στο 1,40 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 1,40 sec μέχρι 1,90 sec, διάρκεια 0,50 sec,
- Επαναφορά γραμμής 4-6 στο 1,90 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 1,90 sec μέχρι 10 sec, διάρκεια 8,10 sec.

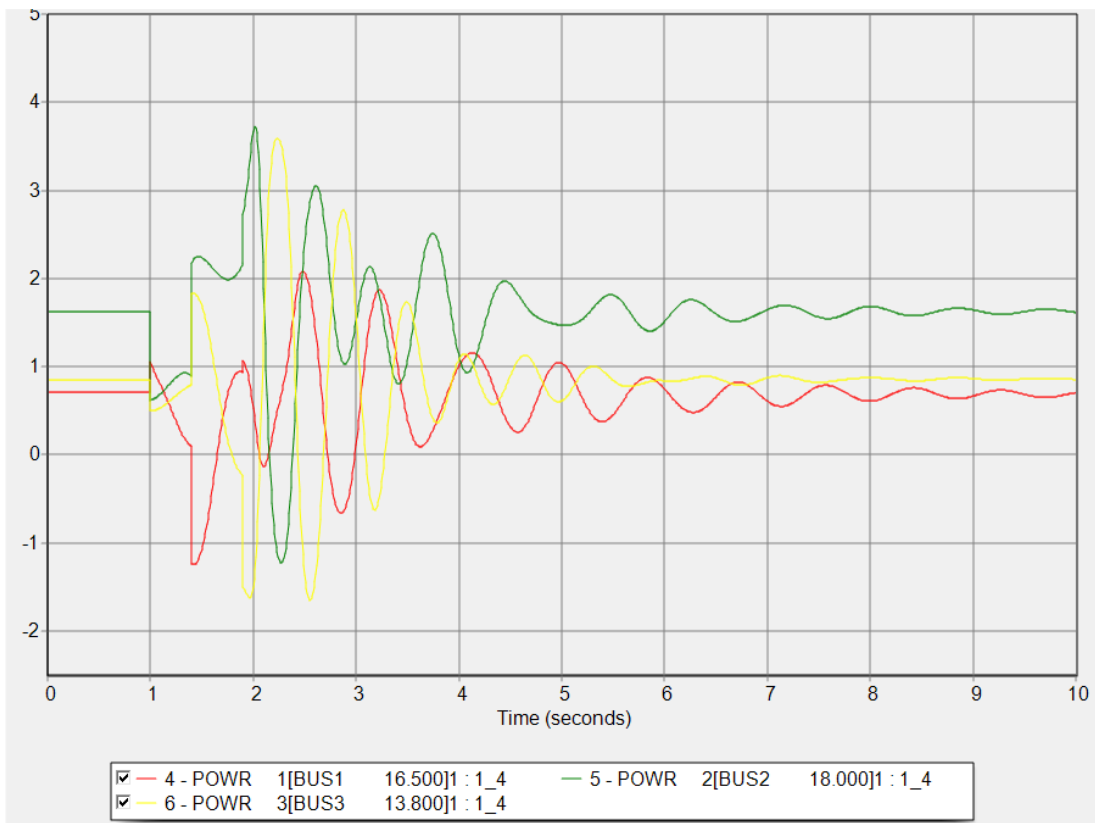
Στο διάγραμμα των γωνιών ισχύος των γεννητριών 2 και 3 για τις οποίες ζυγός αναφοράς έχει θεωρηθεί ο ζυγός 1, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.31, παρατηρείται ότι οι γωνίες συγκλίνουν, επομένως το σύστημα παραμένει ευσταθές ύστερα από την διαταραχή. Από το διάγραμμα της τάσης, Σχήμα 5.32 και από τα διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται η ενεργός, Σχήμα 5.33 και η άεργος ισχύς των γεννητριών, Σχήμα 5.34 παρατηρείται ότι οι νέες τιμές επανέρχονται στις προσφαιματικές τιμές. Στο διάγραμμα όπου παρουσιάζονται οι συχνότητες των ζυγών, Σχήμα 5.35, παρατηρείται ότι οι καμπύλες συγκλίνουν σε μία νέα τιμή. Από την εμφάνιση του σφάλματος δεν προκύπτει αστάθεια στο σύστημα, ωστόσο οι μεγάλης διάρκειας πτώση τάσης των γεννητριών και η σύγκλιση σε νέα τιμή των συχνοτήτων των ζυγών είναι μη αποδεκτές συνθήκες για την σωστή και εύρυθμη λειτουργία του συστήματος, οπότε η εκκαθάριση του σφάλματος πρέπει να πραγματοποιηθεί όσο το δυνατόν το γρηγορότερο.



Σχήμα 5.31. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, γωνίες ισχύος γεννητριών 2 και 3, σε σχέση με την γωνία της γεννήτριας 1.

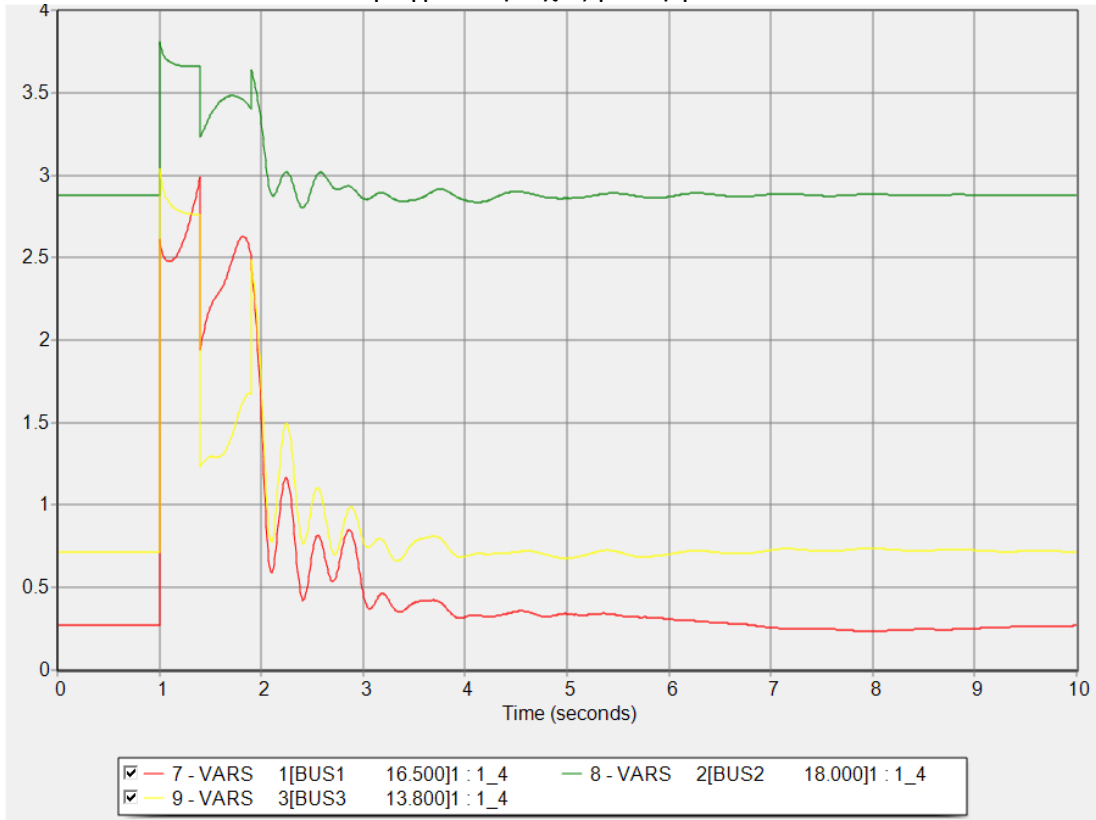


Σχήμα 5.32. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος.

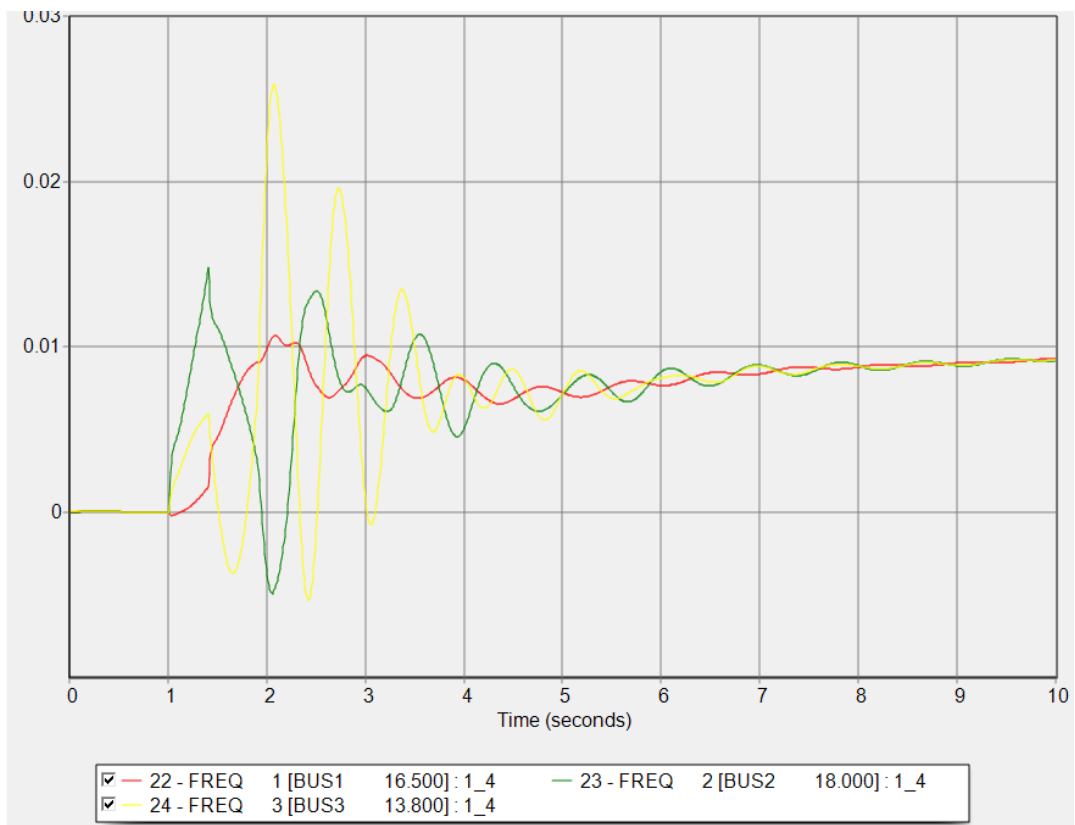


Σχήμα 5.33. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7,

πραγματική ισχύς γεννητριών.



Σχήμα 5.34. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, άεργος ισχύς γεννητριών.



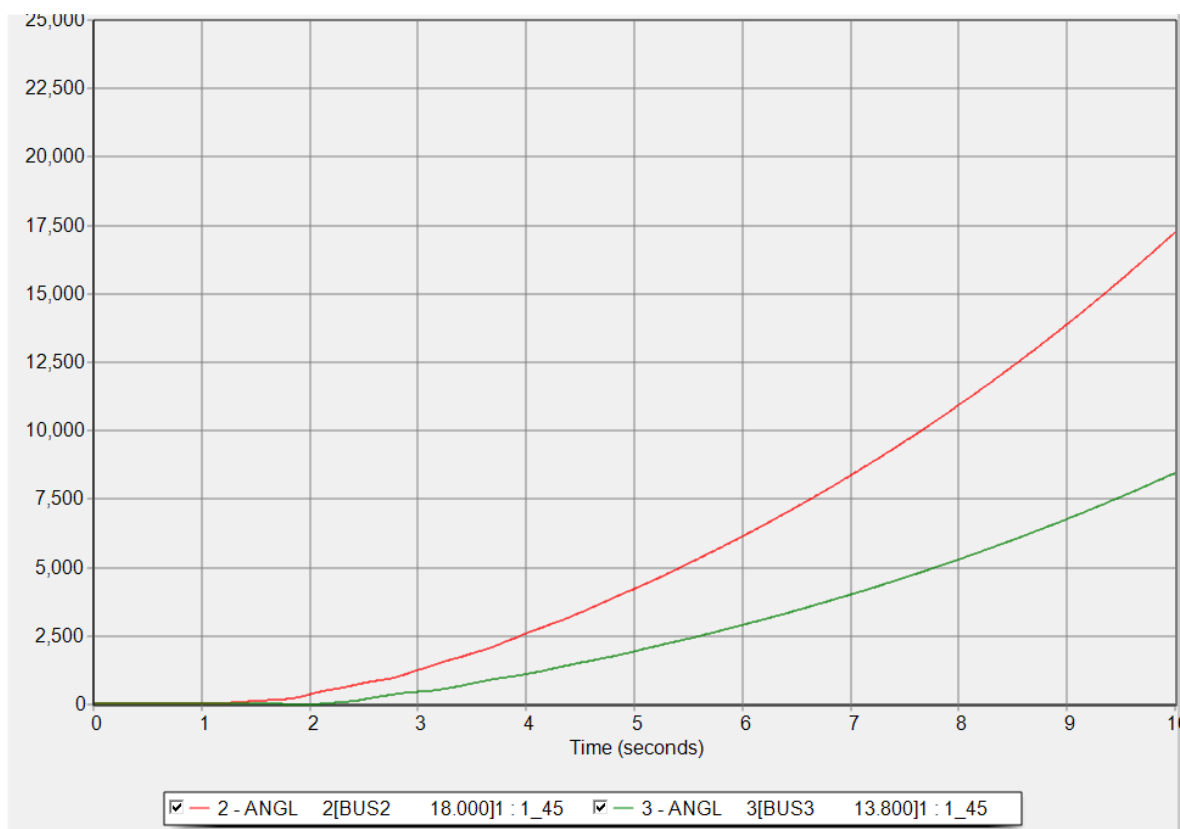
Σχήμα 5.35. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 4,

συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος.

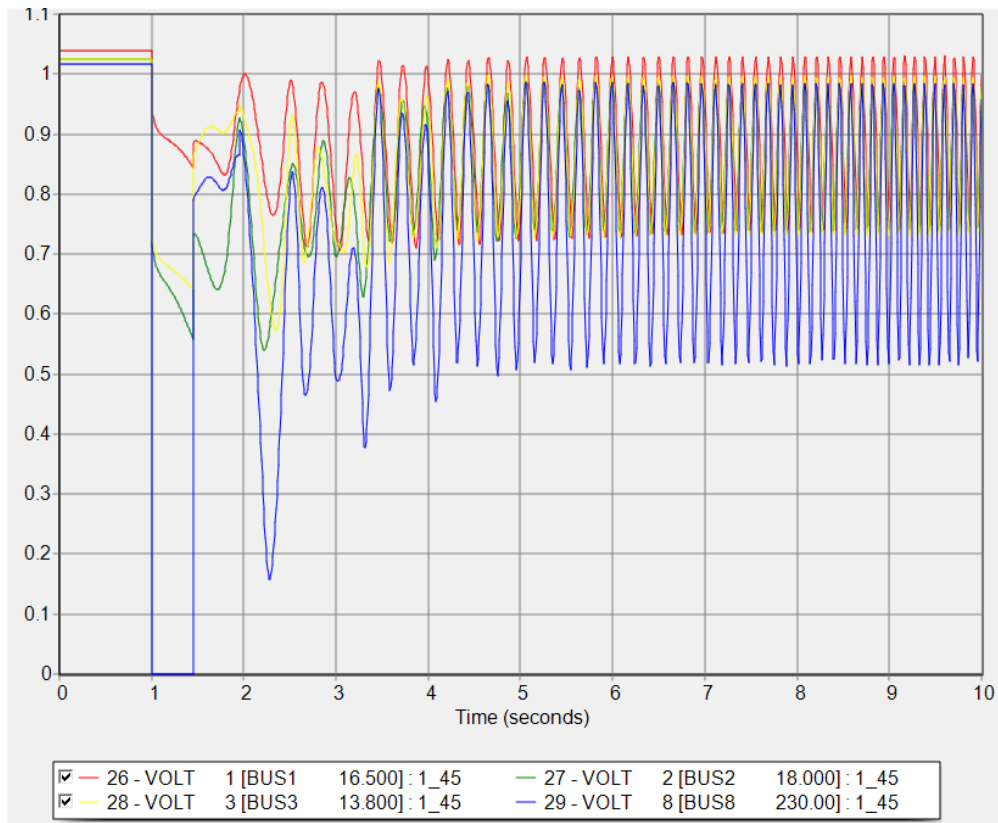
5.5.2.2 Αστάθεια συστήματος

- Λειτουργία συστήματος χωρίς σφάλμα από το 0 sec μέχρι 1 sec, διάρκεια 1 sec,
- Εισαγωγή σφάλματος στο 1 sec,
- Λειτουργία με σφάλμα από 1 sec μέχρι 1,45 sec, διάρκεια 0,45 sec,
- Γραμμή 4-6 εκτός λειτουργίας στο 1,45 sec,
- Εκκαθάριση σφάλματος στο 1,45 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 1,45 sec μέχρι 1,95 sec, διάρκεια 0,50 sec,
- Επαναφορά γραμμής 4-6 στο 1,95 sec,
- Λειτουργία συστήματος από 1,95 sec μέχρι 10 sec, διάρκεια 8,05 sec.

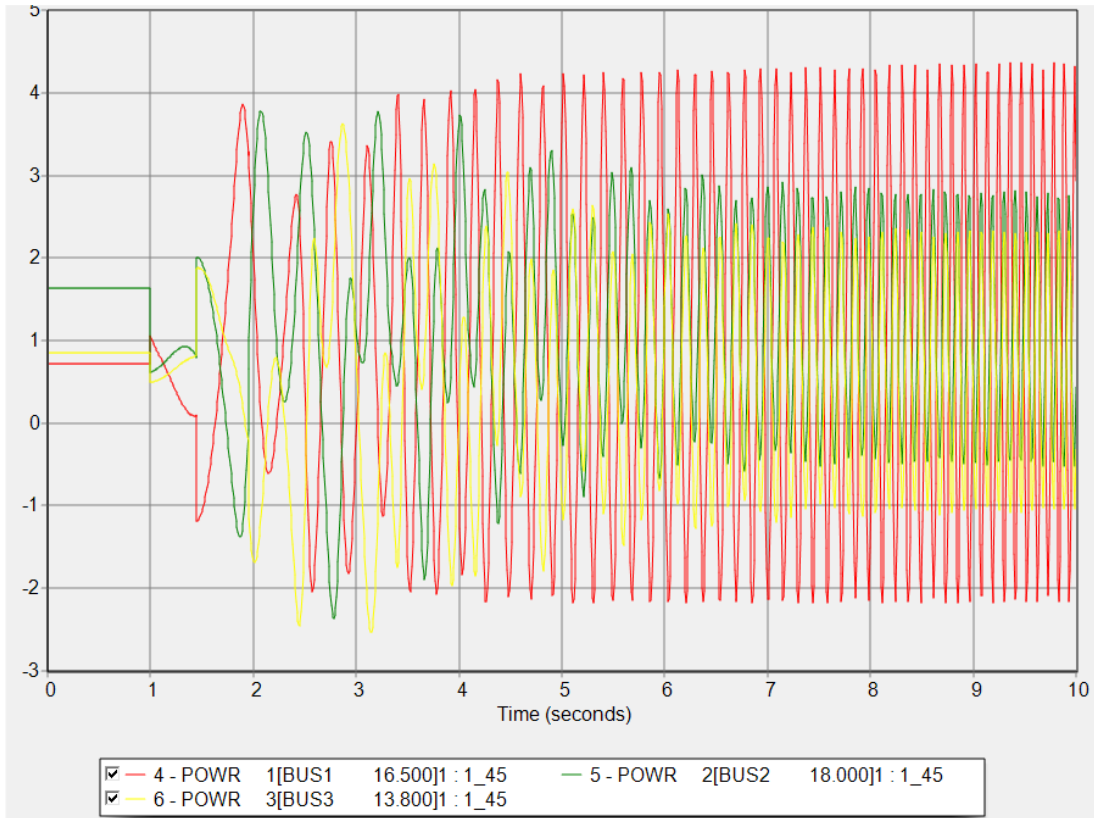
Σε περίπτωση που η εκκαθάριση του σφάλματος πραγματοποιηθεί μετά τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης, δηλαδή το σφάλμα εκκαθαριστεί στο 2,00 sec τότε το σύστημα γίνεται ασταθές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.36 καθώς δεν πραγματοποιείται σύγκλιση σε κάποια τιμή, αλλά οι γραφικές παραστάσεις τείνουν στο άπειρο. Στις γραφικές παραστάσεις στις οποίες παρουσιάζονται οι τάσεις, Σχήμα 5.37, η πραγματική ισχύς των γεννητριών, Σχήμα 5.38, η άεργος ισχύς των γεννητριών, Σχήμα 5.39 και οι συχνότητες, Σχήμα 5.40, παρουσιάζονται μη αποσβενόμενες ταλαντώσεις, οπότε το σύστημα είναι ασταθές.



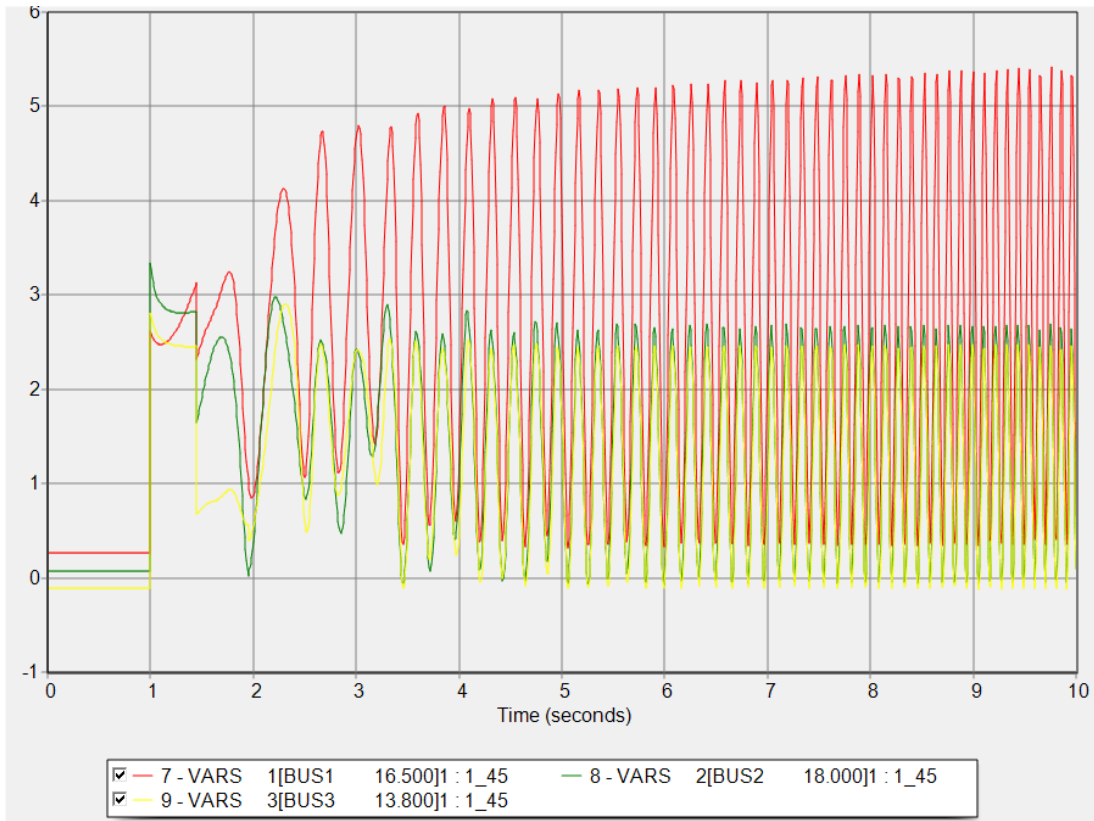
Σχήμα 5.36. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, γωνίες ισχύος γεννητριών 2 και 3, σε σχέση με την γωνία της γεννήτριας 1.



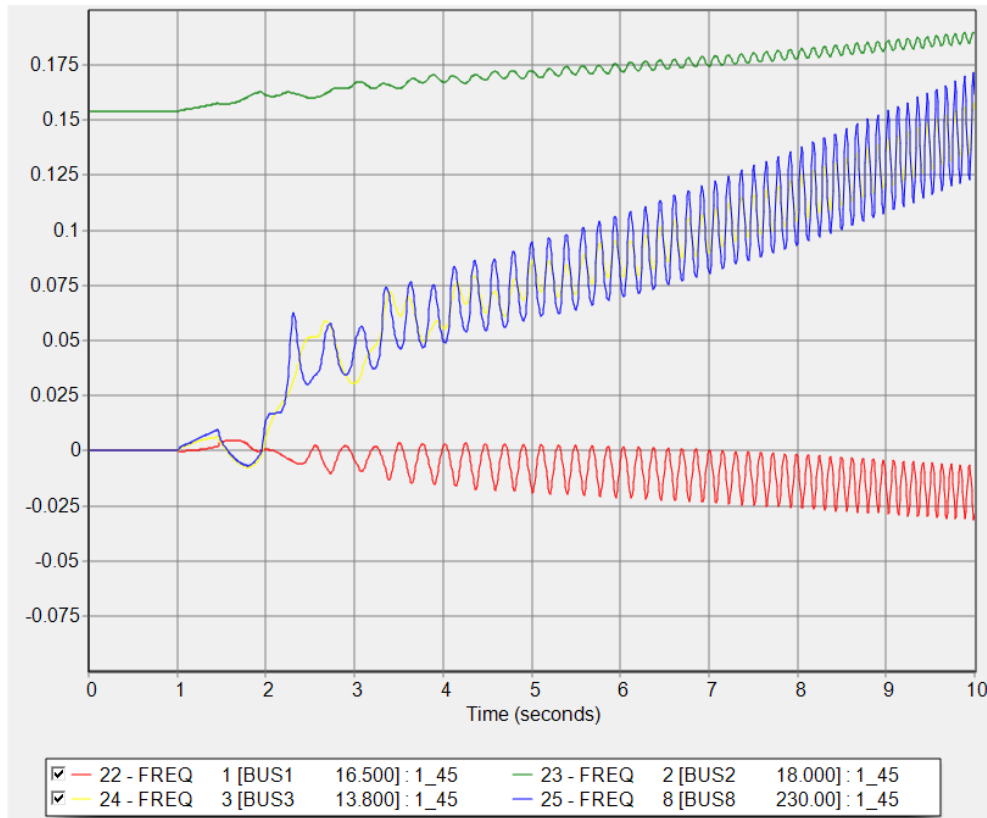
Σχήμα 5.37. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος.



Σχήμα 5.38. Στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, πραγματική ισχύς γεννητριών.



Σχήμα 5.39. Στερό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 7, άεργος ισχύς γεννητριών.



Σχήμα 5.40. Στερό τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-5, κοντά στον ζυγό 4, συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας έχουν καθοριστική σημασία στην ομαλή λειτουργία της σύγχρονης κοινωνίας. Η σταθερή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και η αξιόπιστή μεταφορά της είναι ζητήματα ζωτικής σημασίας για την ευημερία και την ομαλή λειτουργία της κάθε χώρας. Επομένως είναι επιτακτική ανάγκη η μελέτη, η συνεχής παρακολούθηση και η διαρκής βελτίωση των συστημάτων μεταφοράς ενέργειας καθώς της αξιοπιστίας τους. Εξαιτίας αυτής της ανάγκης πραγματοποιούνται μελέτες οι οποίες σκιαγραφούν την συμπεριφορά των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε περιπτώσεις εμφάνισης διαφόρων διαταραχών. Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία έγινε η μελέτη ενός θεωρητικού μοντέλου, του συστήματος 9 ζυγών της IEEE, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ροής φορτίου, μελέτη τριφασικών βραχυκυκλωμάτων και τέλος μελέτη μεταβατικής ευστάθειας.

Με την ανάλυση ροής φορτίου υπολογίζονται οι ποσότητες που αφορούν όλα τα επιμέρους στοιχεία του υπό μελέτη δικτύου, στη συγκεκριμένη περίπτωση του συστήματος 9 ζυγών της IEEE. Γνωρίζοντας το μέτρο και την γωνία της εκάστοτε τιμής υπολογίζονται οι υπόλοιπες τιμές του κάθε δικτύου στην σταθερή του κατάσταση, το ποσοστό της φόρτισής του καθώς επίσης και η συμπεριφορά του. Οι πληροφορίες αυτές αξιοποιούνται για τις μελέτες βραχυκυκλωμάτων και μεταβατικής ευστάθειας.

Μέσω της μελέτης τριφασικών βραχυκυκλωμάτων υπολογίστηκαν όλα τα ρεύματα βραχυκύκλωσης για κάθε ζυγό καθώς και η συνεισφορά των ρευμάτων από το υπόλοιπο δίκτυο σε κάθε ένα ζυγό ξεχωριστά. Τα ρεύματα αυτά συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερα από τα ρεύματα που εμφανίζονται σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, επομένως οι γραμμές μεταφοράς καταπονούνται με αποτέλεσμα την πιθανή καταστροφή του εξοπλισμού ενός δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον υπολογισμό των τιμών των ρευμάτων βραχυκύκλωσης του κάθε ζυγού γίνεται η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού στο δίκτυο και να γίνεται σωστός προγραμματισμός των λειτουργιών των διακοπών που θα προστατέψουν το σύστημα σε περίπτωση σφάλματος.

Η μελέτη μεταβατικής ευστάθειας στο δίκτυο των 9 ζυγών πραγματοποιείται με σκοπό τον υπολογισμό του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης για κάθε σφάλμα, έτσι ώστε να οριστεί ο κρίσιμος χρόνος μετά το πέρας του οποίου το σύστημα χάνει την ευστάθειά του (αστάθεια συστήματος), δηλαδή οι γεννήτριες χάνουν τον συγχρονισμό τους. Οι γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, που αφορούν την συχνότητα, την ισχύ (πραγματική και άεργη), τις τάσεις σχετίζονται άμεσα με τον χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος, μέσα στα χρονικά όρια του οποίου το σύστημα παραμένει ευσταθές. Από την παρατήρηση των γραφικών παραστάσεων προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις ταλαντώσεις της συχνότητας του δικτύου, τις βυθίσεις των τάσεων καθώς επίσης και φαίνεται η ποιότητα της ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο.

Σύμφωνα με τις παραπάνω πληροφορίες γίνεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση αξιόπιστων δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, με την χρήση κατάλληλου εξοπλισμού και την κατάλληλη ρύθμιση των χρόνων αντίδρασης των διακοπτικών μέσων ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η σωστή, εύρυθμη και ευσταθής λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] B.M. Weedy, B.J. Cory, N. Jenkins, J.B. Ekanayake, G. Strbac, Electric Power Systems, Fifth Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [2] Pieter Schavemaker and Lou Van der Sluis , Electrical Power System Essentials , Wiley, 2008.
- [3] Νικόλαος Α. Βοβός, Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2008.
- [4] Naveen Bokka, Comparison of Power Flow Algorithms for inclusion in On-line Power Systems Operation Tools, 2010.
- [5] Τζατζάνης Ανδρέας, Επίδραση του ζυγού αναφοράς στην ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με κατανεμημένη παραγωγή, Μάιος 2010.
- [6] Νικόλαος Α. Βοβός, Γαβριήλ Β Γιαννακόπουλος, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2008.
- [7] Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΣΕΑΒ, ΚΑΛΛΙΠΟΣ, 2015.