



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Μελέτη αξιοπιστίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

**Γεωργιάδης Δημήτριος**

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος 2019



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

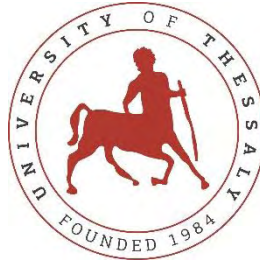
**Μελέτη αξιοπιστίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

**Γεωργιάδης Δημήτριος**

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος 2019



**UNIVERSITY OF THESSALY**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING**

## **Reliability studies for power systems**

Diploma Thesis

Georgiadis Dimitrios

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

Volos 2019

## **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. 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.

(Υπογραφή)

.....

Γεωργιάδης Δημήτριος

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όλα όσα μου έχει προσφέρει κατά τη διάρκεια των μαθητικών και φοιτητικών μου χρόνων με την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση σε κάθε επιλογή μου όλα αυτά τα χρόνια. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες καθηγητές της παρούσας διπλωματικής, Δημήτριο Μπαργιώτα και Ελευθέριο Τσουκαλά για την υποστήριξη, την υπομονή που έδειξαν προς το πρόσωπό μου και που μου εμπιστεύτηκαν την εν λόγω διπλωματική εργασία. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου για την συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα τον αδερφό μου Γεωργιάδη Κωνσταντίνο για την υποστήριξή του όλα αυτά τα χρόνια και για τις πολύτιμες συμβουλές του για την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της χρήσης λογισμικού. Πιο συγκεκριμένα γίνεται χρήση του λογισμικού PSS/E της Siemens στο οποίο προσομοιώνεται ένα τυποποιημένο δίκτυο 9 ζυγών της IEEE. Στο δίκτυο αυτό πραγματοποιείται μελέτη ανάλυσης ροής φορτίου, μελέτη τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε όλους τους ζυγούς καθώς και δυναμική προσομοίωση της συμπεριφοράς των στοιχείων του δικτύου σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σε επιλεγμένα σημεία του δικτύου.

Στο 1ο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή τους καθώς τα στοιχεία και τα υποσυστήματα από τα οποία αποτελούνται. Επιπλέον γίνεται περιγραφή του ανά μονάδα συστήματος (p.u.) το οποίο χρησιμοποιείται για την απλοποίηση των μελετών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και επισημαίνεται η αξία της χρήσης των Η/Υ στις συγκεκριμένες μελέτες.

Στο 2ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις μελέτες ροής φορτίου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι Gauss, Gauss-Sheidel και Newton-Raphson οι οποίες χρησιμοποιούνται από τους μελετητές και από τους Η/Υ για την εξαγωγή σημαντικών πληροφοριών για ένα δίκτυο.

Το 3ο κεφάλαιο ασχολείται με την ανάλυση των βραχυκυκλωμάτων και παρουσιάζονται ανά κατηγορία οι τύποι των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν σε ένα δίκτυο. Επίσης γίνεται διαχωρισμός των βραχυκυκλωμάτων σε συμμετρικά και ασύμμετρα και επεξηγείται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης αλλά και των υπολοίπων στοιχείων που κρίνονται απαραίτητα για την ολοκληρωμένη μελέτη ενός συστήματος.

Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το λογισμικό PSS που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του δικτύου των 9 ζυγών της IEEE. Επίσης παρατίθενται τα ονομαστικά δεδομένα του δικτύου αυτού και επεξηγούνται τα αποτελέσματα για τη μελέτη ροής φορτίου, τη μελέτη τριφασικών βραχυκυκλωμάτων και τη δυναμική προσομοίωση της συμπεριφοράς του δικτύου για την εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφαλμάτων κατά τη μεταβατική λειτουργία του δικτύου.

Τέλος στο 5ο κεφάλαιο γίνεται η σύνοψη της παρούσας εργασίας και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

## Abstract

This diploma thesis deals with the analysis of power systems through the use of software. More specifically, the use of Siemens PSS/E software, which simulates a 9 bus test case from IEEE, a system with 9 buses and three generators, is being used. On this system power flow analysis, short circuit analysis applying balanced faults in all buses and dynamic simulation of the behavior of the system in case of three-phase faults at selected points of the system.

The first chapter presents a historical review of the evolution of the power systems Their structure is presented in detail as the parts and the subsystems from which they are composed. In addition, the per unit system which is used to simplify studies in power systems, is being discribed and the value of PC usage in this type of studies is also noted.

The second Chapter refers to power flow studies in power systems and presents the Gauss-Sheidel and Newton-Raphson methods which are used by researchers and PCs to extract important information for a system.

Chapter 3 deals with the short circuit analysis and presents the types of faults that can occur in a power system as they are being categorized. Also, the types of short circuits are separated into symmetric and asymmetric and the way in which the fault currents are being calculated and all the other necessary quantities for the complete study of a power system is being explained.

Chapter 4 presents the PSS/E software which is used to analyse the 9 bus system of IEEE. It also lists the data of this network and explains the results for the power flow study, the short circuit analysis and the behavior of the system as is being dynamic simulated.

Finally, the 5th chapter summarizes the present work and draws conclusions.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	vi
Abstract .....	vii
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	1
1.1 Ιστορική Αναδρομή .....	1
1.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	3
1.2.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής ενέργειας .....	3
1.2.2 Αναπαράσταση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	7
1.3 Οι δύο βασικές συνιστώσες των ΣΗΕ .....	10
1.4 Ο ρόλος των Η/Υ στην ανάλυση των ΣΗΕ .....	11
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Ανάλυση ροής φορτίου .....	13
2.1 Εισαγωγή .....	13
2.2 Εξισώσεις Ροής Φορτίου .....	13
2.3 Θεμελίωση προβλήματος ροών φορτίου .....	16
2.4 Κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών YBus.....	18
2.5 Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου .....	18
2.5.1 Η μέθοδος Gauss.....	19
2.5.2 Η μέθοδος Gauss – Seidel .....	19
2.5.3 Η μέθοδος Newton – Raphson .....	20
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Ανάλυση βραχυκυκλωμάτων ΣΗΕ.....	24
3.1 Εισαγωγή .....	24
3.2 Μεταβατικά φαινόμενα .....	24
3.2.1 Κυματικά - Υπερταχεία .....	24
3.2.2 Μέσης ταχύτητας - Βραχυκυκλώματα.....	25
3.2.3 Βραδέα μεταβατικά φαινόμενα – Μεταβατική ευστάθεια.....	25
3.3 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα.....	26



3.3.1	Θεώρημα Thevenin .....	26
3.3.2	Τριφασικά βραχυκυκλώματα στα άκρα σύγχρονων μηχανών.....	27
3.3.3	Μεθοδολογία υπολογισμού συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων .....	30
3.3.4	Ανάλυση τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυο με χρήση λογισμικού .....	30
3.4	Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα .....	31
3.4.1	Συμμετρικές συνιστώσες.....	31
3.4.2	Αντιδράσεις ακολουθιακών κυκλωμάτων .....	34
3.4.3	Ακολουθιακά δίκτυα γεννητριών .....	35
3.4.4	Ακολουθιακά δίκτυα μετασχηματιστών.....	36
3.4.5	Μέθοδος υπολογισμού ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων .....	37
3.4.6	Μονοφασικό βραχυκύκλωμα (SLG – Single Line to Ground).....	37
3.4.7	Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων (LL – Line to Line).....	39
3.4.8	Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και γης (DLG – Double Line to Ground) .....	40
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> :	Αποτελέσματα μελέτης δικτύου 9 ζυγών – IEEE .....	43
4.1	Το λογισμικό PSS/E Xplore34.....	43
4.2	Το δίκτυο 9 ζυγών της IEEE.....	43
4.3	Ανάλυση ροής φορτίου .....	49
4.4	Μελέτη τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε σταθερή κατάσταση (steady state).....	51
4.5	Μεταβατική ευστάθεια για το δίκτυο των 9 ζυγών.....	62
4.5.1	Μεταβατική ευστάθεια του συστήματος μετά από σφάλμα στη γραμμή 7-5 κοντά στο ζυγό 763	
4.5.2	Μεταβατική ευστάθεια του συστήματος μετά από σφάλμα στη γραμμή 4-6 κοντά στο ζυγό 469	
4.5.3	Μεταβατική ευστάθεια του συστήματος μετά από σφάλμα στη γραμμή 7-8 κοντά στο ζυγό 875	
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> :	Συμπεράσματα .....	81
Βιβλιογραφία.....		83

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Στα μέσα της δεκαετίας του 1870 ο Αμερικανός Τόμας Έντισον (Thomas Alva Edison) πραγματοποιεί μια ιστορικής σημασίας εφεύρεση. Η επίτευξη διατήρησης της ροής ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα νήμα κλεισμένο μέσα σε μία γυάλινη αμπούλα χωρίς αέρα αποτέλεσε τον πρώτο ηλεκτρικό λαμπτήρα (Εικόνα 1). Η συγκεκριμένη ανακάλυψη ήταν η απαρχή για την μετέπειτα συμβολή του στην ανάπτυξη της μεγάλης κλίμακας διανομής ηλεκτρισμού σε εργοστάσια, γραφεία και σπίτια.



*Εικόνα 1: Ο πρώτος ηλεκτρικός λαμπτήρας από τον Τόμας Έντισον [6]*

Τρία χρόνια μετά την εφεύρεση του λαμπτήρα πυράκτωσης (1879) οι δύο πρώτοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εγκαταστάθηκαν στο Λονδίνο (Ιανουάριος 1882) και στην Νέα Υόρκη (Σεπτέμβριος 1882) από τον Έντισον, δίνοντας για πρώτη φορά φως στους καταναλωτές. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στον ιστορικό σταθμό της Pearl Street στην Νέα Υόρκη γινόταν μέσω μιας ατμομηχανής η οποία κινούσε μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (dc). Η γεννήτρια αυτή ήταν υπεύθυνη για την τροφοδοσία 59 καταναλωτών με συνεχές ρεύμα, σε τάση 110 Volt, περιοριζόμενη σε περιοχή ακτίνας που δεν ξεπερνούσε το 1,5km από τον σταθμό παραγωγής.[1]

Η αδυναμία μεταφοράς ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις με συστήματα συνεχούς ρεύματος βασιζόταν κυρίως σε δύο λόγους. Οι απώλειες μεταφοράς  $Rl^2$  και οι πτώσεις τάσης σε αποδεκτά επίπεδα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούσαν ταυτόχρονα και τη μεταφορά ρεύματος σε υψηλές τάσεις.[1] Η απουσία συσκευών με διακοπτική λειτουργία και προστασία

καθώς και συσκευών που να μεταβάλλουν τα επίπεδα τάσης σε δίκτυα συνεχούς ρεύματος έκανε ολοένα και περισσότερο επιτακτική την ανάγκη αντικατάστασής τους από τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (ac).

Στην κατεύθυνση αυτή σημαντικές λύσεις έδωσαν οι William Stanley και Nikola Tesla. Το 1886 ο Αμερικανός William Stanley δημιουργεί τον πρώτο εμπορικά πρακτικό μετασχηματιστή εναλλασσόμενου ρεύματος (ac) βασιζόμενος στην ιδέα των John Dixon Gibbs και Lucien Gaulard (1883 London's Royal Aquarium). Με την ανακάλυψη αυτή δίνεται η δυνατότητα στην ανάπτυξη των ηλεκτρικών δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος (ac) τα οποία αρχίζουν να υπερτερούν παρουσιάζοντας πολλά πλεονεκτήματα από τη στιγμή της εφεύρεσης των πολυφασικών συστημάτων και της επαγωγικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος από τον Σέρβο-Αμερικανό Nikola Tesla (1888).

Σταδιακά η επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος οδήγησε στην ανάπτυξη των τοπικών ηλεκτροπαραγωγών σταθμών και αργότερα στην ανάγκη διασύνδεσης μεταξύ τους με σκοπό την καλύτερη εξυπηρέτηση των καταναλωτών. Ανταλλαγή ενέργειας και καλύτερη εκμετάλλευση του συνολικού εξοπλισμού θα συνέθεταν με αυτόν τον τρόπο ένα ποιοτικότερο και αξιόπιστο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον λόγο αυτό και επειδή υπήρχαν συστήματα που λειτουργούσαν σε διαφορετικές συχνότητες όπως 25,50,60,133 Hz, στην Ευρώπη η συχνότητα τυποποιήθηκε στα 50Hz ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες, στον Καναδά, στην Βραζιλία και σε μέρος της Ιαπωνίας η τυποποίηση έγινε στα 60Hz.[1]

Η τεχνολογική πρόοδος και η είσοδος της ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία έκανε επιτακτική την ανάγκη μεταφοράς όλο και μεγαλύτερων ποσοτήτων ενέργειας σε ολοένα και μεγαλύτερες αποστάσεις. Το γεγονός αυτό είχε ως συνέπεια την διαρκή αύξηση των επιπέδων της τάσης με τιμές που κυμαινόταν από 12kV με μέγιστο επίπεδο αυτό των 765KV το 1966. Για να αποφευχθεί η ύπαρξη απεριόριστου αριθμού επιπέδων τάσης και τα προβλήματα που θα εμφανίζονταν σε θέματα που θα αφορούσαν την τυποποίηση του εξοπλισμού, επιλέχθηκαν τα εξής επίπεδα τάσης: 115,132,138,150,161,220,230 και 275 kV για τη βαθμίδα υψηλών τάσεων και 345,400,500,765 kV για τη βαθμίδα υπερυψηλών τάσεων.[1]

## 1.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

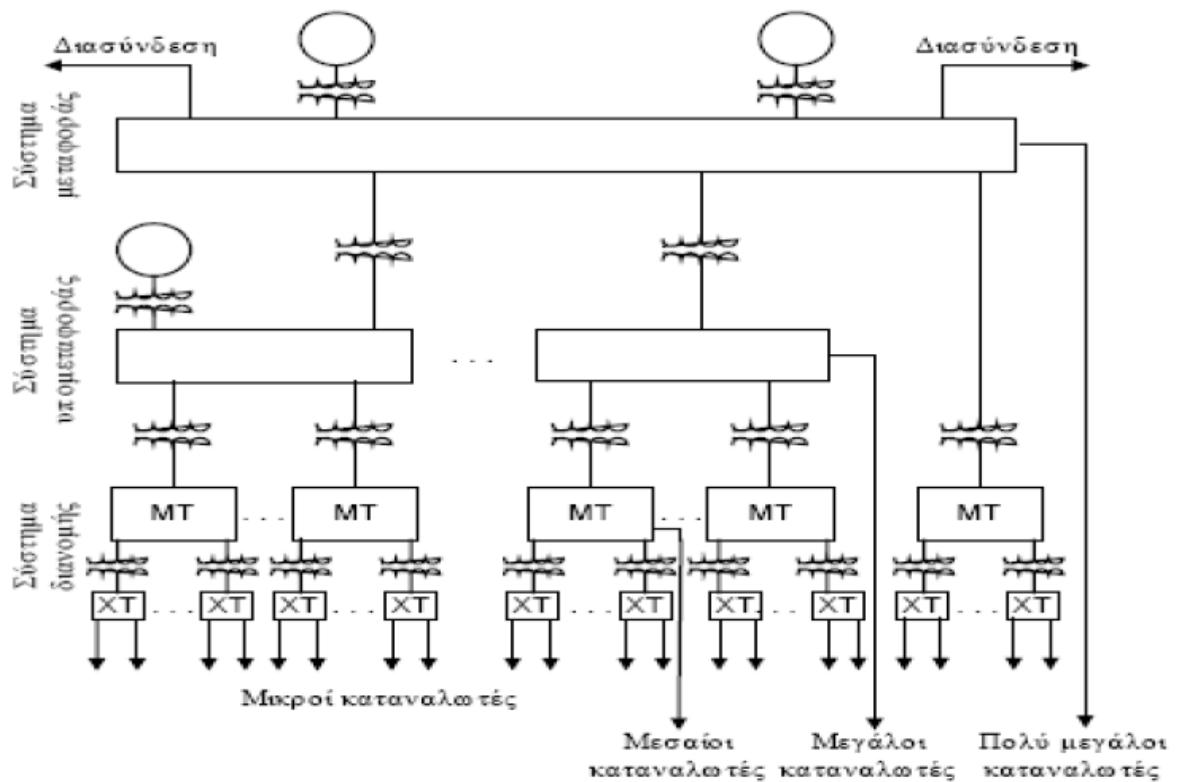
Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και του εξοπλισμού (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες, διατάξεις αντιστάθμισης) που συνδυάζονται με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές.

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας αν και διαφέρουν μεταξύ τους στο μέγεθος και στη δομή, παρουσιάζουν συγκεκριμένα κοινά χαρακτηριστικά:

- Αποτελούνται από τριφασικά συστήματα τα οποία λειτουργούν σε σταθερή τάση. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στις εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι τριφασικός και τα βιομηχανικά φορτία είναι επίσης τριφασικά.
- Η ενέργεια παράγεται μέσω της εκμετάλλευσης των φυσικών πόρων κάθε περιοχής. Από την αρχή η πρωτογενής ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική και στη συνέχεια με τη βοήθεια σύγχρονων μηχανών παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια.
- Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας απαρτίζονται από επιμέρους υποσυστήματα τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης γεγονός που επιτρέπει την αποδοτικότερη μεταφορά ισχύος.[3]

### 1.2.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις απαιτήσεις των καταναλωτών καθώς και από τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνει αποδοτικότερα η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας προς αυτούς. Η ύπαρξη διαφορετικών τύπων φορτίων, όπως οικιακά ή βιομηχανικά, καθώς και η μεταφορά σε υψηλές τάσεις που προσφέρει μικρότερες απώλειες, είναι δύο από τους λόγους για τους οποίους συναντάμε διαφορετικά επίπεδα τάσης και τρία διακριτά μέρη στη δομή των συστημάτων. Αναλύοντας τη δομή μπορούμε να διακρίνουμε τρεις βασικές λειτουργίες οι οποίες συνθέτουν την συνολική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση της δομής του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [7]

- Σύστημα Παραγωγής

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω της εκμετάλλευσης των φυσικών διαθέσιμων πόρων παρουσιάζοντας αρκετές διαφορές σε κάθε χώρα λόγω διαφορετικών γεωλογικών, γεωφυσικών και κλιματολογικών ιδιαιτεροτήτων. Οι σταθμοί παραγωγής διακρίνονται ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιούν σε ατμοηλεκτρικούς (κάρβουνο, λιγνίτη, φυσικό αέριο, πετρέλαιο), στους πυρηνικούς σταθμούς (πυρηνική ενέργεια) και σε αυτούς που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (άνεμος, ήλιος, νερό κλπ). Τα δύο βασικά στοιχεία στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν οι γεννήτριες και οι μετασχηματιστές.

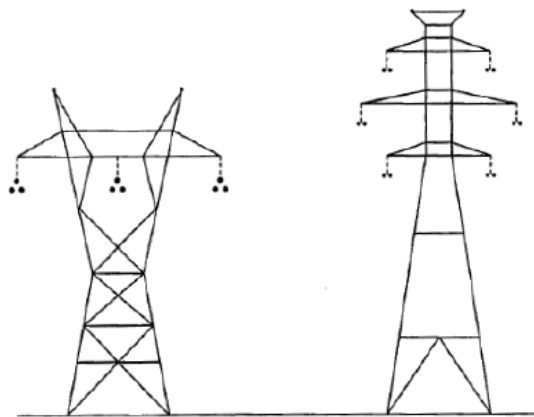
- Σύστημα Μεταφοράς - Υπομεταφοράς

Το σύστημα μεταφοράς αποτελεί τη ραχοκοκαλιά των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αφού διαχειρίζεται μεγάλα ποσά ισχύος και λειτουργεί σε υψηλές τάσεις (συνήθως από 150kV έως 400kV) για την βέλτιστη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Παραλαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια από

τους σταθμούς παραγωγής μέσω των μετασχηματιστών ανύψωσης τάσης και τη μεταφέρει στους υποσταθμούς μεταφοράς όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στην μέση τάση, δηλαδή στα 20kV. Εξυπηρετεί άμεσα μεγάλους καταναλωτές και ευθύνεται για τη διασύνδεση με γειτονικά δίκτυα. Για τους παραπάνω λόγους είναι προφανές ότι ο σχεδιασμός του συστήματος μεταφοράς απαιτεί μια δομή η οποία θα προσφέρει πολλές λύσεις στην κατεύθυνση διοχέτευσης της ηλεκτρικής ενέργειας και μονοπάτια εφεδρείας με σκοπό την βέλτιστη εξυπηρέτηση των καταναλωτών (δομή βρόχου).[1]

Οι γραμμές μεταφοράς αποτελούνται από:

- Πυλώνες, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών
- Μονωτήρες, οι οποίοι παρεμβάλλονται και συνδέουν της γραμμές με τους πυλώνες
- Αγωγοί από χαλκό ή αλουμίνιο



Εικόνα 3: Τύποι πυλώνων γραμμών μεταφοράς [7]

Το σύστημα υπομεταφοράς ευθύνεται για την διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης τα οποία κυμαίνονται μεταξύ 23kV και 150kV. Παραλαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια είτε από τους σταθμούς παραγωγής είτε μέσω των υποσταθμών του συστήματος μεταφοράς αφού η τάση μετασχηματιστεί σε χαμηλότερα επίπεδα. Η διαφορά μεταξύ του συστήματος υπομεταφοράς και του συστήματος μεταφοράς δεν είναι μεγάλη καθώς παρουσιάζουν παρόμοια λειτουργικότητα. Τα συστήματα υπομεταφοράς μπορούν να χαρακτηριστούν και ως τα συστήματα μεταφοράς του παρελθόντος αφού οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των καταναλωτών και η αύξηση της διάστασης των συστημάτων οδήγησαν στη δημιουργία μεγαλύτερων επιπέδων τάσης (σύστημα μεταφοράς).[1]

- Σύστημα Διανομής

Το σύστημα διανομής αποτελεί το τελευταίο στάδιο στην μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε βιομηχανικούς ή οικιακούς καταναλωτές και αποτελείται από δύο επίπεδα τάσης:

1. Μέση τάση (15kV,20kV)
2. Χαμηλή τάση (220V)

Τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης χρησιμοποιούν εναέριες γραμμές σε αραιοκατοικημένες περιοχές ενώ σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές γίνεται με υπόγειες γραμμές.

Πίνακας 1: Είδη γραμμών μεταφοράς διασυνδεδεμένου συστήματος [8]

ΓΜ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (κλμ.)					
	400kV/DC	400kV/AC	150kV	66kV	Σύνολο
Εναέριες	107	2.535	8.044	39	10.725
Υποβρύχιες	160		140	15	315
Υπόγειες		4	48		52
Σύνολο	267	2.539	8.232	54	11.092

Ο σχεδιασμός των σύγχρονων ΣΗΕ γίνεται βάσει τεσσάρων βασικών αρχών :

1. Αξιοπιστία

Το κάθε σύστημα οφείλει να προσφέρει αξιόπιστα ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές εξασφαλίζοντας την αδιάλειπτη και σταθερή παροχή χωρίς την παρουσία σοβαρών σφαλμάτων. Οι επενδύσεις σε σύγχρονο και ποιοτικό εξοπλισμό, η στοχευμένη δημιουργία εναλλακτικών διασυνδέσεων καθώς και η ανάλυση και πρόβλεψη της απόκρισης του εκάστοτε συστήματος σε δυσμενείς συνθήκες είναι στοιχεία που καθιστούν ένα ΣΗΕ αξιόπιστο.

## 2. Ποιότητα

Η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας εξασφαλίζεται κυρίως από τις μικρές διακυμάνσεις στα επίπεδα τάσεως, συχνότητας καθώς και στο χαμηλό περιεχόμενο αρμονικών (τάσεις και ρεύματα υψηλότερων συχνοτήτων, πολλαπλάσιων της θεμελιώδους συχνότητας) στο δίκτυο.

## 3. Εξοικονόμηση

Μέσω των μελετών οικονομικής λειτουργίας γίνεται ο προσδιορισμός της κατάστασης λειτουργίας των ΣΗΕ κατά την οποία ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής ενώ ταυτόχρονα προβλέπεται η ικανοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (φορτίου και απωλειών). Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει την επίλυση προβλημάτων όπως:

- Ο καθορισμός του φορτίου προς ικανοποίηση
- Ο καθορισμός των αναγκών εφεδρείας του συστήματος
- Ο καθορισμός των μονάδων προς ένταξη
- Η βέλτιστη κατανομή φορτίου στις μονάδες που λειτουργούν

## 4. Σεβασμό στο Περιβάλλον

Η συνεισφορά της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) προκαλεί ολοένα και περισσότερες ανησυχίες για την υπερθέρμανση και την βιωσιμότητα του πλανήτη. Το γεγονός αυτό οδήγησε διεθνώς σε σημαντικές αποφάσεις που αφορούν τον σχεδιασμό της παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο φυσικό περιβάλλον. Μία τέτοια κίνηση ήταν και ο καθορισμός του ποσοστού της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές με κάτω όριο το 20%. [5]

### 1.2.2 Αναπαράσταση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

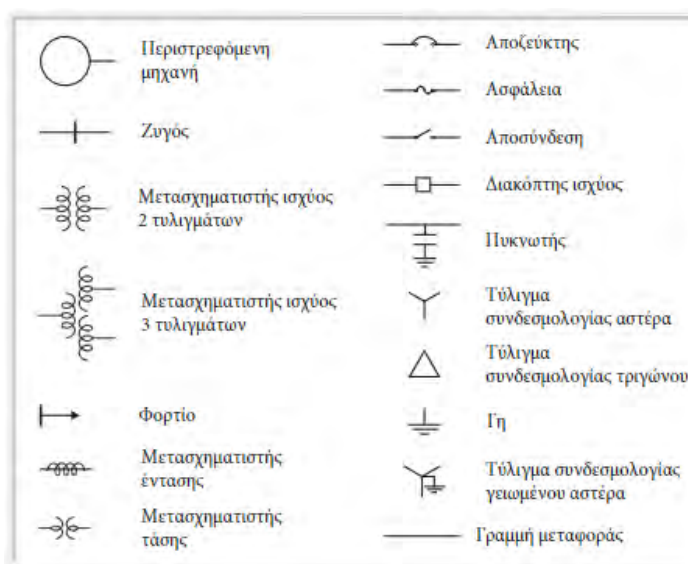
#### **Μονογραμμικό Διάγραμμα**

Η αναπαράσταση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά περίπλοκη επειδή χρησιμοποιούν τρεις φάσεις καθώς και λόγω του μεγάλου αριθμού των στοιχείων (γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς, μετασχηματιστές) από τα οποία αποτελούνται. Έτσι για την ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας τους και με σκοπό την καλύτερη ανάγνωση και μελέτη αυτών γίνεται η χρήση του μονογραμμικού διαγράμματος.



Το μονογραμμικό διάγραμμα αναπαριστά με μία γραμμή μία απλουστευμένη εκδοχή του εκάστοτε συστήματος ενέργειας. Η απλουστευμένη αυτή εκδοχή παρουσιάζει κάθε φορά τις πιο σημαντικές πληροφορίες για την μελέτη που προορίζεται και αγνοεί μη χρήσιμες για αυτή πληροφορίες οι οποίες μπορεί να κάνουν το δίκτυο ξανά περίπλοκο. Ως παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε τη θέση των διακοπών οι οποίες για μια μελέτη ροής φορτίου δεν παρουσιάζουν κάποια ουσιαστική αξία αν αγνοηθούν ενώ παρουσιάζουν μεγάλη σημασία στη εκπόνηση μελέτης μεταβατικής ευστάθειας. [1]

Στην Εικόνα 4 παρατίθενται τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στα μονογραμμικά διαγράμματα για το σύνολο των στοιχείων που συναντάμε σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 4: Σύμβολα για την αναπαράσταση των στοιχείων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [1]

### Το ανά μονάδα σύστημα – Per Unit System

Η χρήση του συστήματος per unit εφαρμόζεται κυρίως για την απλοποίηση των μεγεθών που χρησιμοποιούνται για την μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Μεγέθη όπως η τάση, η ισχύς, τα ρεύματα και οι αντιδράσεις των γραμμών μεταφοράς συνήθως επαναπροσδιορίζονται ανηγμένα σε συγκεκριμένη τιμή βάσης η οποία επιλέγεται ως αναφορά με τον τρόπο που εξηγείται στις παρακάτω εξισώσεις. Το ανά μονάδα σύστημα προσφέρει πλεονεκτήματα όπως το στενό εύρος τιμών που κάνει τα αποτελέσματα εύκολα συγκρίσιμα μεταξύ τους, η δυσκολία σύγχυσης πολικών - φασικών τάσεων και μονοφασικών – τριφασικών τιμών ισχύος ενώ περιορίζει τον υπολογιστικό φόρτο για την επίλυση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η συχνότητα και οι γωνίες είναι δύο μεγέθη στο δίκτυο τα οποία δεν

ανάγονται. Για την μετατροπή αυτή ορίζουμε συνήθως δύο ποσότητες βάσης και στη συνέχεια προσδιορίζουμε όλες τις προαναφερθείσες ποσότητες του δικτύου βάσει αυτών. Η τάση, το ρεύμα, η αντίδραση και η μιγαδική ισχύς συνδέονται μεταξύ τους και αρκεί να επιλέξουμε βάσεις οποιεσδήποτε δύο από αυτές τις ποσότητες. Συνηθίζουμε να επιλέγουμε ως αρχικές βάσεις  $S_B$  και  $V_B$  και σύμφωνα με αυτές υπολογίζουμε τις υπόλοιπες ποσότητες

$$I_B: \text{Βάση ρεύματος (A)} = \frac{\text{Βάση ισχύος}}{\text{Βάση τάσεως}}$$

$$Z_B: \text{Βάση αντίδρασης } (\Omega) = \frac{\text{Βάση τάσεως}}{\text{Βάση ρεύματος}} = \frac{(\text{Βάση τάσεως})^2}{\text{Βάση ισχύος}}$$

$$\text{Per unit τιμή αντίδρασης στοιχείου κυκλώματος} = \frac{\text{Τιμή αντίδρασης } (\Omega)}{\text{Βάση αντίδρασης } (\Omega)}$$

### Αλλαγή βάσεως σε σύστημα per unit

Σε περιπτώσεις που οι per unit αντιδράσεις του συστήματος που μελετάται δίνονται σε διαφορετική βάση από αυτή που έχει επιλεγεί θα πρέπει να γίνεται μετατροπή τους. Οι αντιδράσεις όλων των τμημάτων του κυκλώματος πρέπει να εκφράζονται μέσω της ίδιας βάσης αντίδρασης και η μετατροπή αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας τις παρακάτω εξισώσεις:

Έστω ότι η πρώτη βάση είναι  $V_B^{old}$ ,  $S_B^{old}$  και η δεύτερη είναι  $V_B^{new}$ ,  $S_B^{new}$  και  $X_{pu}^{old}$ ,  $X_{pu}^{new}$  οι αντιδράσεις εκπεφρασμένες σε per unit, τότε έχουμε στην πρώτη βάση:

$$X(\Omega) = X_{pu}^{old} \frac{(V_B^{old})^2}{S_B^{old}}$$

Η  $X(\Omega)$  εκπεφρασμένη στη δεύτερη βάση:

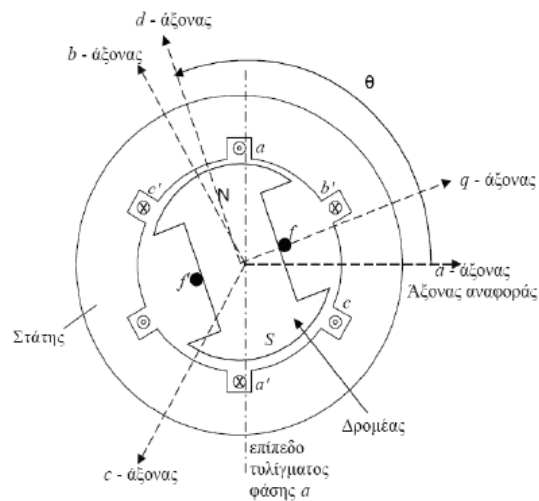
$$X_{pu}^{new} = X_{pu}^{old} \frac{(V_B^{old})^2}{(V_B^{new})^2} \frac{S_B^{new}}{S_B^{old}}$$

### 1.3 Οι δύο βασικές συνιστώσες των ΣΗΕ

Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 1.2.1 οι δύο βασικές συνιστώσες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι γεννήτριες και οι μετασχηματιστές.

#### Σύγχρονες μηχανές - Γεννήτριες

Η πρωτογενής ενέργεια μετατρέπεται στο τελικό στάδιο της μετατροπής ενέργειας από μηχανική σε ηλεκτρική μέσω περιστρεφόμενων γεννητριών (ισχύος από 100 kW έως και πάνω από 1300MW και τάσης λειτουργίας από 480 V μέχρι 25kV). Οι στρεφόμενες αυτές ηλεκτρικές μηχανές αποτελούνται από ένα σταθερό μέρος (στάτης) και ένα κινητό μέρος, το δρομέα (ρότορας). Τα τυλίγματα του στάτη (τυλίγματα τυμπάνου) είναι τρία και κατανέμονται στο σταθερό μέρος της μηχανής με τέτοιο τρόπο ώστε να απέχουν μεταξύ τους  $120^\circ$ . Το τύλιγμα του δρομέα (τύλιγμα πεδίου) τροφοδοτείται από μία εξωτερική πηγή (διεγέρτρια) με συνεχές ρεύμα (dc) ενώ ταυτόχρονα περιστρέφεται από την εκάστοτε πηγή μηχανικής ενέργειας. [4]



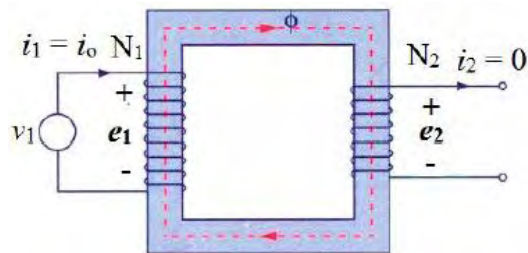
Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση τομής σύγχρονης μηχανής

Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει τάσεις στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου που βρίσκονται στον στάτη, η συχνότητα των οποίων είναι σε συγχρονισμό με την ταχύτητα του ρότορα. Ο ρυθμιστής ταχύτητας του στροβίλου που παράγει την μηχανική ενέργεια ευθύνεται για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής ή της ισχύος εξόδου. Ο χαρακτηρισμός «σύγχρονη» μηχανή αποδίδεται στο γεγονός ότι ο δρομέας περιστρέφεται σύγχρονα, με τον ίδιο τρόπο που περιστρέφεται το μαγνητικό πεδίο.

Η ισχύς που παράγεται με τον τρόπο αυτό παρέχεται στη συνέχεια μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης στο δίκτυο.

## Μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές είναι συσκευές οι οποίες αποτελούνται από δύο τυλίγματα γαλβανικά απομονωμένα και χρησιμοποιώντας το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δυο κυκλωμάτων. Η τροφοδοσία του πρωτεύοντος τυλίγματος με εναλλασσόμενη τάση (ac) δημιουργεί μαγνητική ροή στον πυρήνα του μετασχηματιστή με αποτέλεσμα την δημιουργία τάσης εξ' επαγωγής στο δευτερεύον τύλιγμα. Ο πυρήνας ενός μετασχηματιστή κατασκευάζεται από ελάσματα σιδήρου με σκοπό την εξάλειψη των δινορευμάτων που δημιουργούνται καθώς αυτά προκαλούν αυξημένες απώλειες.[4]



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση μετασχηματιστή

Η συμβολή των μετασχηματιστών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι καταλυτική λόγω της δυνατότητας που προσφέρουν στην εναλλαγή επιπέδων τάσης, δηλαδή τη μετατροπή χαμηλής τάσης σε υψηλή και αντίστροφα. Επιτρέπουν έτσι τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις και με λιγότερες απώλειες καθώς οι σταθμοί παραγωγής δεν βρίσκονται συνήθως στα μεγάλα αστικά κέντρα.

### 1.4 Ο ρόλος των Η/Υ στην ανάλυση των ΣΗΕ

Η ολοένα και μεγαλύτερη γεωγραφική εξάπλωση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η ανάγκη διασύνδεσης μεταξύ τους καθιστά περίπλοκη τη μελέτη τους. Η πολυπλοκότητα αυτή των ΣΗΕ κάνει επιτακτική την ανάγκη χρήσης των Η/Υ για την μελέτη και τη διαχείρισή τους. Η συνεισφορά των Η/Υ στην επίλυση προβλημάτων στο δίκτυο τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και στη μελλοντική συμπεριφορά του είναι αρκετά σημαντική για τους μηχανικούς οι οποίοι καλούνται να πάρουν αποφάσεις για την

αποδοτικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, την βέλτιστη εξυπηρέτηση των καταναλωτών καθώς και την άμεση αντιμετώπιση σφαλμάτων που συμβαίνουν στο δίκτυο. Αρχικά συμβάλλουν στην επεξεργασία και τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στο διαχειριστή να κάνει εγκυρότερες προβλέψεις που αφορούν τη ζήτηση των φορτίων. Επίσης σε συνθήκες πραγματικού χρόνου τα υπολογιστικά συστήματα λαμβάνουν ακριβείς πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του δικτύου και μέσω αυτών γίνεται ο έλεγχος σημαντικών στοιχείων όπως η συχνότητα, η λειτουργία των διακοπών, ενώ δίνονται εντολές για την κατανομή της παραγωγής με σκοπό την οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος. Εκτός πραγματικού χρόνου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται μελέτες όπως αναλύσεις ροής φορτίου, μελέτες σφαλμάτων και μελέτες μεταβατικής ευστάθειας. Οι μελέτες αυτές προϋποθέτουν τη χρήση πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων και συνεπώς είναι αρκετά χρονοβόρες για να εφαρμοστούν σε μεγάλα συστήματα από τους μηχανικούς χωρίς την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Η συλλογή στατιστικών στοιχείων, οι ακριβείς προβλέψεις των απαιτούμενων φορτίων που πρέπει να καλύψει η παραγωγή, ο άμεσος και αποτελεσματικός έλεγχος του δικτύου ανά πάσα στιγμή καθώς και η γνώση της συμπεριφοράς του σε οποιαδήποτε περίπτωση σφάλματος είναι πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρει η χρήση των Η/Υ. Έτσι δίνεται η δυνατότητα οικονομικότερης λειτουργίας για τον διαχειριστή και προσφορά αξιοπιστίας στην παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας για τους καταναλωτές.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Ανάλυση ροής φορτίου

### 2.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση ροής φορτίου είναι μελέτη η οποία εφαρμόζεται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι ο υπολογισμός των μεταβλητών οι οποίες είναι αναγκαίες για να εξετάσουμε ένα σύστημα και να προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά του σε συνθήκες βέλτιστης λειτουργίας. Το πρόβλημα της ανάλυσης ροής φορτίου ενός ΣΗΕ ξεκινά από τις ήδη γνωστές τιμές της ζήτησης ενεργού και άεργου ισχύος οι οποίες προκαθορίζονται από τις απαιτήσεις των καταναλωτών που εξυπηρετεί. Με γνώμονα την ικανοποίηση της ζήτησης ισχύος οι μεταβλητές οι οποίες υπολογίζονται είναι οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς και οι ροές ισχύος στις γραμμές και τους μετασχηματιστές του συστήματος. Οι λύσεις μέσω της μελέτης ροής φορτίου ποικίλουν, περιορίζονται όμως από συγκεκριμένα κριτήρια και προδιαγραφές όπως η προσέγγιση των ονομαστικών τάσεων στους ζυγούς και η αποφυγή υπερφόρτισης των γραμμών μεταφοράς.

Η ανάλυση ροής φορτίου είναι χρήσιμη για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την συμπεριφορά του εκάστοτε συστήματος σε περιπτώσεις όπως:

- Ενδεχόμενες μεταβολές συστήματος όπως η ένταξη νέων μονάδων παραγωγής, η προσθήκη επιπλέον φορτίου και η είσοδος νέων γραμμών μεταφοράς
- Ενδεχόμενες διαταραχές όπως η απώλεια γεννήτριας ή απώλεια γραμμής μεταφοράς
- Η οργάνωση ημερήσιου προγραμματισμού για την αποδοτικότερη και οικονομικότερη κάλυψη των δυναμικά μεταβαλλόμενων φορτίων έτσι ώστε να γίνεται βέλτιστη κατανομή ισχύος στις διαθέσιμες γεννήτριες.

### 2.2 Εξισώσεις Ροής Φορτίου

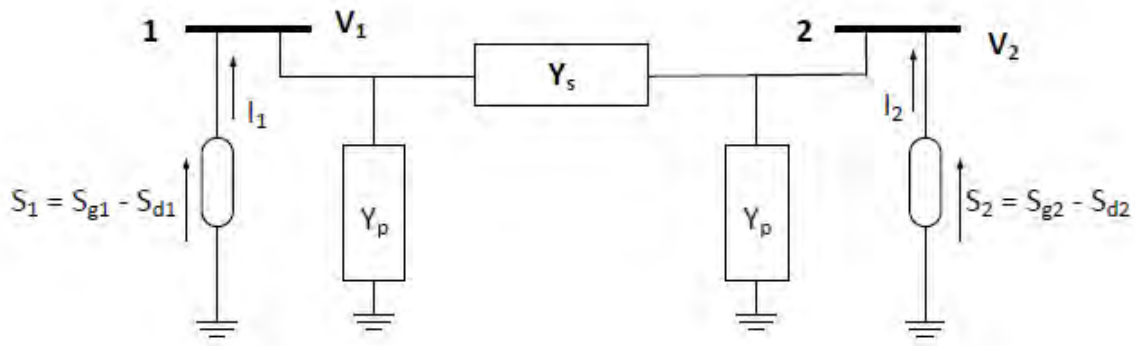
Για την ανάλυση ροής φορτίου ενός συστήματος χρησιμοποιούμε το μονοφασικό ισοδύναμό του και οι τιμές των μεταβλητών που υπολογίζουμε είναι πάντα μεγέθη μονοφασικά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 σε έναν οποιονδήποτε ζυγό ενός συστήματος μπορούν να συνδέονται γεννήτριες οι οποίες παράγουν ισχύ προς αυτόν είτε φορτία τα οποία καταναλώνουν ισχύ από το ζυγό. Στο Σχήμα 1 βλέπουμε και τις εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν την μιγαδική ισχύ στις δύο αυτές περιπτώσεις. Αν υποθέσουμε πως ένας ζυγός  $i$  τροφοδοτείται με μιγαδική ισχύ που περιγράφεται από την εξίσωση  $S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$  (2.1) και το

φορτίο καταναλώνει μιγαδική ισχύ που περιγράφεται από την εξίσωση  $S_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di}$  (2.2), τότε οι δύο αυτές εξισώσεις συνδέονται με μια τρίτη η οποία περιγράφει τη μιγαδική ισχύ που εισέρχεται στον ζυγό  $i$  (Σχήμα 2):

$$S_i = S_{Gi} + S_{Di} \quad (2.3)$$



Σχήμα 1: Δίκτυο δύο ζυγών για την εξαγωγή των εξισώσεων ροής φορτίου



Σχήμα 2: Δίκτυο δύο ζυγών για την εξαγωγή των εξισώσεων ροής φορτίου

Για να μπορέσουμε όμως να προσδιορίσουμε τη μιγαδική ισχύ  $S_i$  που εκφράζει τη διαφορά μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος σε ένα ζυγό πρέπει αρχικά να προσδιορίσουμε τις τάσεις στον κάθε ζυγό του συστήματος. Κάνοντας χρήση της μεθόδου των κόμβων προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$I_{BUS} = Y_{BUS} V_{BUS} \quad (2.4)$$

- $I_{BUS}$ : το διάνυσμα των ρευμάτων  $I_i$  που εισέρχονται στους ζυγούς, διαστάσεων  $n \times 1$
- $V_{BUS}$ : το διάνυσμα των τάσεων ζυγών ως προς έναν ζυγό αναφοράς, διαστάσεων  $n \times 1$  (με μορφή  $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ )
- $Y_{BUS}$ : ο πίνακας αγωγιμοτήτων ζυγών, διαστάσεων  $n \times n$  (με μορφή  $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$ ), η κατασκευή του πίνακα  $Y_{BUS}$  παρουσιάζεται αναλυτικά στην παράγραφο 2.4.

Από την παραπάνω εξίσωση το ρεύμα που εισέρχεται στον ζυγό  $i$  μπορεί να γραφτεί και ως:

$$I_i = \sum_{j=1}^n (Y_{ij} * V_j) \quad (2.5)$$

Έτσι και η μιγαδική ισχύς που εισέρχεται στον ζυγό  $i$  μπορεί να περιγραφεί μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$S_i = V_i \left( \sum_{j=1}^n (Y_{ij} * V_j) \right)^* \quad (2.6)$$

Έχοντας ως αρχική εξίσωση την εξ. 2.6 μπορούμε μέσω των εξισώσεων εξ. 2.1, 2.2, 2.3 και εκφράζοντας σε πολική μορφή τις τάσεις και τις αγωγιμότητες σε κάθε ζυγό ( $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ ,  $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$ ), να εξαγάγουμε δύο εξισώσεις οι οποίες εκφράζουν το ισοζύγιο πραγματικής και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό.

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^n (|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})) \quad (2.7\alpha)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = - \sum_{j=1}^n (|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})) \quad (2.7\beta)$$

Σε ένα σύστημα  $n$  ζυγών θα υπάρχουν  $n$  μιγαδικές εξισώσεις ροής φορτίου. Αφού διαχωριστούν στις παραπάνω εξισώσεις εξ. 2.7α, 2.7β θα έχουμε για κάθε σύστημα  $2n$  εξισώσεις ροής φορτίου υπό πραγματική μορφή.



### 2.3 Θεμελίωση προβλήματος ρών φορτίου

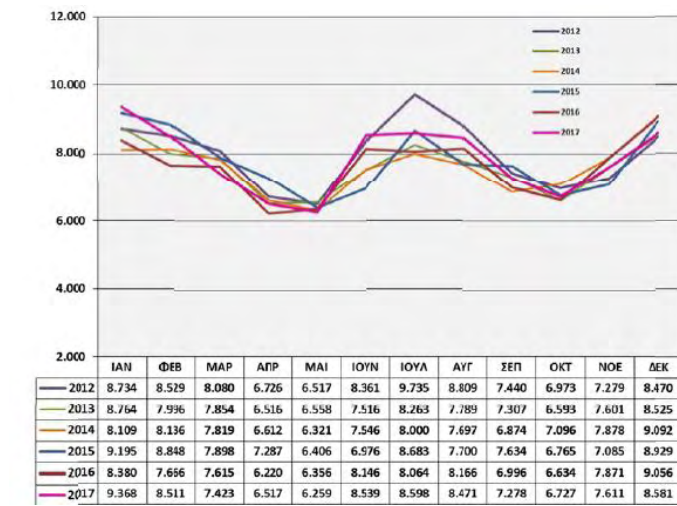
Για τη θεμελίωση του προβλήματος ρών φορτίου υπάρχουν έξι μεταβλητές που προσδιορίζουν τη συμπεριφορά κάθε ζυγού και είναι χρήσιμες για την ανάλυση του συστήματος. Για έναν ζυγό  $i$  οι μεταβλητές αυτές είναι οι εξής :

- $P_{Gi}$ : η ενεργός ισχύς που τροφοδοτείται στο ζυγό  $i$
- $Q_{Gi}$ : η άεργος ισχύς που τροφοδοτείται στον ζυγό  $i$
- $P_{Di}$ : η ενεργός ισχύς που καταναλώνεται στον ζυγό  $i$
- $Q_{Di}$ : η άεργος ισχύς που καταναλώνεται στον ζυγό  $i$
- $|V_i|$ : το μέτρο της τάσης στον ζυγό  $i$
- $\delta_i$ : η γωνία της τάσης στον ζυγό  $i$  ως προς τον ζυγό αναφοράς

Οι μεταβλητές αυτές διαχειρίζονται με διαφορετικό τρόπο στην ανάλυση ροής φορτίου και για το λόγο αυτό μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικές κατηγορίες:

#### Ι. Μη ελέγξιμες μεταβλητές:

Είναι οι μεταβλητές  $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$ , οι οποίες δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν καθώς οι τιμές τους μεταβάλλονται δυναμικά και καθορίζονται ανάλογα με τη ζήτηση που υπάρχει από τους καταναλωτές. Οι τιμές των συγκεκριμένων μεταβλητών προκαθορίζονται σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του παρελθόντος χρησιμοποιώντας προβλέψεις οι οποίες θα προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο την ζήτηση μιας μέρα ή και σε βάθος χρόνου.



Εικόνα 7: Μηνιαία μέγιστο φορτίο συστήματος για τα έτη 2012-2017 [8]

## II. Μεταβλητές ελέγχου:

Είναι οι μεταβλητές  $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ , οι οποίες χαρακτηρίζονται και ως ανεξάρτητες μεταβλητές, αντιπροσωπεύουν την παραγωγή ισχύος και είναι ελέγξιμες από τον διαχειριστή του δικτύου.

## III. Μεταβλητές κατάστασης:

Είναι οι μεταβλητές  $|V_i|$ ,  $\delta_i$ , για τις οποίες γίνεται η χρήση των εξισώσεων ροής φορτίου που περιγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο 2.2 έτσι ώστε μεταβάλλοντας τις μεταβλητές ελέγχου να βρούμε την βέλτιστη λύση για κάθε ζυγό του δικτύου.[2]

Όπως αναφέρθηκε από τις  $6n$  μεταβλητές σε ένα σύστημα  $n$  ζυγών, οι  $2n$  είναι αυτές που προκαθορίζονται ( $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$ ) συνεπώς οι υπόλοιπες  $4n$  ( $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ ,  $|V_i|$ ,  $\delta_i$ ) είναι αυτές οι οποίες πρέπει να λυθούν μέσω των  $2n$  εξισώσεων ροής φορτίου. Το γεγονός αυτό είναι προφανώς αδύνατο για αυτό χρειαζόμαστε και τον καθορισμό επιπλέον 2 μεταβλητών ανά ζυγό. Με το παραπάνω κριτήριο, δηλαδή τον καθορισμό διαφορετικών κάθε φορά μεταβλητών γίνεται και ο διαχωρισμός των τύπων ζυγών που συναντούμε σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

### 1. Ζυγός αναφοράς (Slack/Swing Bus)

Σε κάθε σύστημα υπάρχει ένας και μοναδικός ζυγός αναφοράς ο οποίος είναι πάντα ζυγός παραγωγής. Στον συγκεκριμένο ζυγό προκαθορίζονται το μέτρο και η φασική γωνία τάσης στα οποία συνηθίζουμε να δίνουμε τις τιμές 1 p.u. και  $0^\circ$ . ( $V_1 = |V_1| \angle \delta_1 = 1 \angle 0^\circ$ ). Μεταβλητές προς επίλυση στην περίπτωση αυτή είναι η παραγωγή της πραγματικής και άεργου ισχύος. Οι δύο αυτές μεταβλητές είναι εξαρχής άγνωστες επειδή δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τις απώλειες μεταφοράς για να προσδιορίσουμε ακριβώς την παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος έτσι ώστε να ισοσταθμίσουμε την κάλυψη της ζήτησης μαζί με τις απώλειες.

### 2. Ζυγός Φορτίου (PQ)

Στον ζυγό φορτίου οι ποσότητες παραγωγής πραγματικής και άεργου ισχύος προκαθορίζονται και είναι μηδενικές. Σε αυτό το είδος ζυγού υπάρχουν μόνο φορτία και η επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου γίνεται για τον υπολογισμό του μέτρου και της φασικής γωνίας τάσης.

### 3. Ζυγός Ελέγχου Τάσης (PV)

Στο ζυγό ελέγχου τάσης οι ποσότητες που προκαθορίζονται είναι η παραγόμενη πραγματική ισχύς και το μέτρο της τάσης του ζυγού. Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου υπολογίζουμε την παραγόμενη άεργο ισχύ  $Q_{Gi}$  και τη φασική γωνία τάσης  $\delta_i$ . Στους ζυγούς της συγκεκριμένης

κατηγορίας συνδέονται γεννήτριες, σύγχρονοι πυκνωτές και συσκευές όπως σύγχρονοι αντισταθμιστές άεργου ισχύος (Static VAR Compensators).

## 2.4 Κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών $Y_{BUS}$

Για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου και ξεκινώντας από την εξίσωση εξ. 2.4 θα πρέπει να γίνει σωστά η κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων των ζυγών. Ο πίνακας  $Y_{BUS}$  προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου των κόμβων (1<sup>ος</sup> Κανόνας Kirchhoff) στο δίκτυο. Αρχικά μετατρέπουμε τις αντιστάσεις στις ισοδύναμες αγωγιμότητές τους και στη συνέχεια κατασκευάζουμε τον πίνακα  $Y_{BUS}$  όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Όπου για ένα δίκτυο  $n$  ζυγών το μέγεθος του συμμετρικού πίνακα  $Y_{BUS}$  που προκύπτει θα είναι  $n \times n$  και κάθε στοιχείο του θα είναι το εξής:

- $Y_{ii}$ : αντιπροσωπεύει το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που εφάπτονται στον ζυγό  $i = 1, 2, \dots, n$
- $Y_{ij}$ : αντιπροσωπεύει την αρνητική τιμή της αγωγιμότητας μεταξύ των ζυγών  $i$  και  $j$

Στην πραγματικότητα ο πίνακας  $Y_{BUS}$  είναι ένας πίνακας με πολλά μηδενικά στα μη διαγώνια στοιχεία. Αυτό συμβαίνει διότι σε ένα δίκτυο ο αριθμός των συνδέσεων ενός ζυγού με άλλους ζυγούς είναι μικρός.

## 2.5 Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος ροής φορτίου

Η επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου δεν μπορεί να προσφέρει αναλυτικές λύσεις καθώς οι εξισώσεις αυτές είναι μη γραμμικές. Έτσι χρησιμοποιούνται υπολογιστικές τεχνικές με επαναληπτικές μεθόδους συνήθως μέσω εξειδικευμένων λογισμικών, οι οποίες μας επιτρέπουν να προσεγγίζουμε σε κάθε επανάληψη τη βέλτιστη επιθυμητή λύση. Δύο βασικές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις ροών φορτίου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μέθοδος Gauss-Seidel (G-S) και η μέθοδος Newton – Raphson οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους. Αν και διαφέρουν μεταξύ τους παρουσιάζοντας σε διαφορετικές περιπτώσεις πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, προσεγγίζουν ωστόσο το πρόβλημα με παρόμοιο τρόπο.

- Προκαθορίζουν τις άγνωστες ποσότητες μέσω αρχικών εκτιμήσεων.
- Οι αρχικές εκτιμήσεις χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις ροής φορτίου για την εύρεση καλύτερης δεύτερης λύσης.
- Επαναλαμβάνονται τα προηγούμενα βήματα μέχρι να βρεθεί η λύση που θα θεωρηθεί βέλτιστη.

### 2.5.1 Η μέθοδος Gauss

Στη συγκεκριμένη μέθοδο οι εξισώσεις ροής φορτίου γράφονται στη μορφή μιας συνηθισμένης εξίσωσης:

$$f(x) = 0 \quad (2.9)$$

Επιλέγουμε πάντα να τη φέρουμε στην παρακάτω μορφή:

$$x = F(x) \quad (2.10)$$

Έτσι μπορούμε να εκφράσουμε την παρακάτω επαναληπτική σχέση του αλγορίθμου Gauss στην οποία η μεταβλητή  $n$  υποδηλώνει τον αύξοντα αριθμό της επαναληπτικής διαδικασίας:

$$x^{(n+1)} = F(x^{(n)}) \quad (2.11)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση και ξεκινώντας αρχικά από μια εκτίμηση η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνει η ακολουθία  $x^{(n)}$ , δηλαδή όταν:

$$|x^{(n+1)} - x^{(n)}| < \varepsilon \quad (2.12)$$

Όπου το  $\varepsilon$  εκφράζει μια προκαθορισμένη τιμή απόκλισης από την λύση που θέλουμε να προσεγγίσουμε.

### 2.5.2 Η μέθοδος Gauss – Seidel

Η μέθοδος Gauss – Seidel στηρίζεται στη προηγούμενη μέθοδο Gauss, είναι όμως τροποποιημένη έτσι ώστε να επιταχύνεται η διαδικασία σύγκλισης αφού για ένα σύστημα  $n$  εξισώσεων:

$$x^{(n+1)} = F(x^{(n)}) \quad (2.13)$$

Το  $x$  μπορεί να παριστάνει ένα διάνυσμα με μεταβλητές  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,

$$x_1^{(n+1)} = F(x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \dots, x_n^{(n)})$$

$$x_2^{(n+1)} = F(x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \dots, x_n^{(n)})$$

$$\chi_n^{(v+1)} = F(\chi_1^{(v)}, \chi_2^{(v)}, \dots, \chi_n^{(v)})$$

και στην επανάληψη  $v+1$  για μία μεταβλητή  $\chi_i$  χρησιμοποιήσουμε τις τιμές που έχουμε βρει για τα στοιχεία  $i-1$  της ίδιας επανάληψης και όχι προηγούμενης όπως θα κάναμε σε διαφορετική περίπτωση. Οι παρακάτω εξισώσεις αποτελούν ένα παράδειγμα της επιτάχυνσης σύγκλισης του αλγορίθμου:

$$\chi_1^{(v+1)} = F(\chi_1^{(v)}, \chi_2^{(v)}, \dots, \chi_n^{(v)})$$

$$\chi_2^{(v+1)} = F(\chi_1^{(v+1)}, \chi_2^{(v)}, \dots, \chi_n^{(v)})$$

$$\chi_3^{(v+1)} = F(\chi_1^{(v+1)}, \chi_2^{(v+1)}, \dots, \chi_n^{(v)})$$

$$\chi_i^{(v+1)} = F(\chi_1^{(v+1)}, \dots, \chi_{i-1}^{(v+1)}, \chi_i^{(v)}, \dots, \chi_n^{(v)})$$

Η εφαρμογή της μεθόδου για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου ενός συστήματος αποτυπώνεται στις παρακάτω εξισώσεις για την τάση και την άεργο ισχύ. Η εξίσωση 2.14α αφορά τους ζυγούς φορτίου για τον υπολογισμό του μέτρου και της φασικής γωνίας της τάσης ενώ η εξίσωση 2.14β αφορά τους ζυγούς ελεγχόμενης τάσης για την παραγωγή άεργου ισχύος[2]:

$$V_i^{v+1} = \frac{1}{y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} y_{ij} V_j^{(v+1)} - \sum_{j=i+1}^n y_{ij} V_j^{(v)} \right] \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.14\alpha)$$

$$Q_i^{v+1} = -|V_{ispec}| \left[ \frac{\sum_{j=1}^{i-1} V_j^{(v+1)} |y_{ij}| \sin(\delta_j^{(v+1)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij}) + \sum_{j=i}^n V_j^{(v)} |y_{ij}| \sin(\delta_j^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij})}{\sum_{j=i}^n V_j^{(v)} |y_{ij}| \sin(\delta_j^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij})} \right] \quad (2.14\beta)$$

### 2.5.3 Η μέθοδος Newton – Raphson

Η μέθοδος Newton – Raphson είναι μια επαναληπτική διαδικασία στην οποία ο αλγόριθμος επίλυσης των εξισώσεων βασίζεται κυρίως στη διόρθωση των αρχικών εκτιμήσεων μέσω της προσθήκης του λάθους στην λύση των επόμενων επαναλήψεων. Έτσι για ένα σύστημα  $n$  εξισώσεων της μορφής:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

...

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

με αρχικές εκτιμήσεις τις  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$  και  $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$  τα λάθη που σχετίζονται με αυτές τις εκτιμήσεις τότε οι εξισώσεις μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) = 0$$

$$f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) = 0$$

...

$$f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) = 0$$

Χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor προκύπτει το παρακάτω σύστημα υπό τη μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\frac{\partial f_1}{\partial x_1})^{(0)} & \dots & (\frac{\partial f_1}{\partial x_n})^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (\frac{\partial f_n}{\partial x_1})^{(0)} & \dots & (\frac{\partial f_n}{\partial x_n})^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

ή αλλιώς  $f(x^{(0)}) + J(x^{(0)})\Delta x^{(0)} \approx 0$  και λύνοντας ως προς  $\Delta x^{(0)}$  μπορούμε να συνοψίσουμε την εξίσωση της επαναληπτικής διαδικασίας ως εξής:

$$x^{(v+1)} = x^{(v)} - [J^{(v)}]^{-1} f(x^{(v)}) \quad (2.16)$$

Ο πίνακας  $J(x)$  ονομάζεται Ιακωβιανός (Jacobian) και κάθε στοιχείο του προκύπτει από την εξίσωση εξ 2.17

$$J_{ij} = \left( \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.17)$$

### Εφαρμογή Newton – Raphson στις εξισώσεις ροής φορτίου

Για την ανάλυση ροής φορτίου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο N-R γίνεται η χρήση των εξισώσεων εξ. (2.7α, 2.7β) και ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικά για σύστημα  $n$  ζυγών ο αριθμός των εξισώσεων οι οποίες συνθέτουν το πρόβλημα θα είναι  $n-1$  επειδή θέλουμε να καταλήξουμε στην εξαγωγή αποτελεσμάτων για τον ζυγό αναφοράς.
2. Δίνουμε αρχικές τιμές στις τάσεις  $V_i$  και τις γωνίες  $\delta_i$  των  $n-1$  ζυγών (PV, PQ) και υπολογίζονται οι τιμές  $P_i, Q_i$
3. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι αποκλίσεις  $\Delta P, \Delta Q$ :

$$\Delta P_i^{(v)} = P_{i,spec} - P_i^{(v)} \quad i = 2,3, \dots, n \quad (2.18)$$

$$\Delta Q_i^{(v)} = Q_{i,spec} - Q_i^{(v)} \quad i = 2,3, \dots, n \quad (2.19)$$

Όπου  $P_{i,spec}$  και  $Q_{i,spec}$  είναι οι προκαθορισμένες τιμές πραγματικής και άεργου ισχύος στον ζυγό  $i$  ενώ οι τιμές  $P_i^{(v)}$ ,  $Q_i^{(v)}$  υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων (2.7α, 2.7β).

4. Με παρόμοιο τρόπο όπως και στον πίνακα J (στην γενική μορφή της N-R) καταλήγουμε στο παρακάτω σύστημα με τη μορφή πινάκων.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta Q_2^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(v)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(v)} \\ \vdots & H & \vdots & \vdots & N & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(v)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(v)} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(v)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(v)} \\ \vdots & M & \vdots & \vdots & L & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(v)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(v)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta |V_2|^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ή πιο συνοπτικά

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

5. Αν από το παραπάνω σύστημα προκύψουν τιμές  $\Delta P^{(v)}$ ,  $\Delta Q^{(v)}$  οι οποίες δεν ικανοποιούν το επιθυμητό κριτήριο σύγκλισης τότε εφαρμόζουμε την επαναληπτική διαδικασία ως προς τις μεταβλητές  $\delta$ ,  $|V|$  μέσω του συστήματος που ακολουθεί:

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ |V|^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ |V|^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

6. Έτσι υπολογίζουμε καινούριες τιμές τάσεων και γωνιών μέχρι την σύγκλιση των αποτελεσμάτων.  
7. Τέλος γίνεται ο υπολογισμός  $P$ ,  $Q$  για τον ζυγό αναφοράς οι ροές φορτίου στις γραμμές και οι απώλειες.

Η μέθοδος Newton – Raphson είναι αρκετά δημοφιλής και χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό για την επίλυση μεγάλων ενεργειακών συστημάτων. Έχει το πλεονέκτημα της γρήγορης σύγκλισης είτε το μέγεθος του συστήματος είναι μεγάλο είτε μικρό. Το γεγονός αυτό υπερπηδά τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου που σχετίζονται με την πολυπλοκότητα των υπολογισμών σε κάθε επανάληψη σε σχέση με την

Gauss – Seidel καθώς και στην περιπλοκότητα του κώδικα που χρειάζεται για να υλοποιηθεί σε κάποιο λογισμικό. [2]



## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Ανάλυση βραχυκυκλωμάτων ΣΗΕ

### 3.1 Εισαγωγή

Η συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη σταθερή του κατάσταση ή ακόμα και σε περιπτώσεις σημαντικών μεταβολών μπορεί να προσδιοριστεί από τις μελέτες και αναλύσεις των σφαλμάτων/διαταραχών που μπορεί να εμφανιστούν σε αυτό. Οι διαταραχές αυτές μπορεί να ευθύνονται σε φυσικά φαινόμενα (κεραυνοί, πτώσεις δέντρων από δυνατούς ανέμους κτλ), στη λειτουργία του εξοπλισμού των συστημάτων (διακοπτικά στοιχεία), ή σε βραχυκυκλώματα. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν στο δίκτυο και παρουσιάζονται λεπτομερώς τα είδη των βραχυκυκλωμάτων.

### 3.2 Μεταβατικά φαινόμενα

#### 3.2.1 Κυματικά - Υπερταχέα

Ο συγκεκριμένος τύπος μεταβατικών φαινομένων έχει αυτή την ονομασία εξαιτίας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εμφανίζονται μέσω των διαταραχών στις γραμμές μεταφοράς. Τα φαινόμενα αυτά μπορούν να εμφανιστούν μόνο στις γραμμές μεταφοράς και είναι είτε αποτέλεσμα πτώσης κεραυνών σε αυτές είτε ευθύνονται στην εκούσια διακοπή συγκεκριμένων σημείων στο δίκτυο μέσω του διακοπτικού εξοπλισμού. Τα ρεύματα που προκαλούνται σε αυτές τις περιπτώσεις δεν ξεπερνούν τα 100kA ενώ η διάρκειά τους είναι μικρή έως και κάποιες δεκάδες μs. Τα ηλεκτρομαγνητικά



Εικόνα 8: Πτώση κεραυνού σε γραμμή μεταφοράς[9]

κύματα που προκύπτουν συνήθως ανακλώνται ή και διαθλώνται σε σημεία που το δίκτυο παρουσιάζει ασυνέχειες, γεγονός που οδηγεί στον πολλαπλασιασμό του αρχικού ρεύματος που έχει εισέλθει στην γραμμή. Σημαντική είναι όμως και η λειτουργία των μετασχηματιστών σε τέτοιου είδους φαινόμενα λόγω της ύπαρξης των πηνίων σε αυτούς, τα οποία δεν επιτρέπουν την απότομη αλλαγή ρευμάτων σε στιγμιαίες μεταβολές και έτσι εμποδίζουν τη γρήγορη μετάδοση τους σε όλο το σύστημα.[2]

### 3.2.2 Μέσης ταχύτητας - Βραχυκυκλώματα

Τα βραχυκυκλώματα είναι σφάλματα τα οποία συμβαίνουν σε περιπτώσεις που δημιουργείται αγωγή οδός μεταξύ δύο ή περισσότερων αγωγών είτε μεταξύ ενός αγωγού και της γης, κατά κύριο λόγο στις γραμμές μεταφοράς. Η πλειοψηφία των βραχυκυκλωμάτων που συμβαίνουν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι παροδικά και αντιμετωπίζονται συνήθως σε ένα διάστημα ορισμένων εκατοντάδων ms από τη λειτουργία των διακοπών. Μπορούμε να διακρίνουμε τα βραχυκυκλώματα ανάλογα με την αντίσταση βραχυκυκλώσεως σε στερεά (μεταλλικά) όταν  $Z_f = 0$  και σε μη στερεά όταν  $Z_f \neq 0$ . Τα παρακάτω είναι βραχυκυκλώματα τα οποία συναντάμε σε ένα ΣΗΕ [2]:

- Συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα. (3Φ)
- Βραχυκυκλώματα μίας φάσης με τη γη.(Line to ground - LG)
- Βραχυκυκλώματα 2 φάσεων μεταξύ τους.(Line to Line - LL )
- Βραχυκυκλώματα μεταξύ δύο φάσεων και γης.(Double Line to Ground - DLG)

Τα υψηλά ρεύματα, η μείωση της παραγωγής των γεννητριών λόγω βύθισης των τάσεων και ο αποσυγχρονισμός των γεννητριών είναι μερικές από τις συνέπειες που μπορεί να προκληθούν στο δίκτυο λόγω βραχυκυκλώματος. Για να μειωθούν όσο το δυνατό περισσότερο τέτοιου είδους αρνητικές εξελίξεις στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας φροντίζουμε για τον κατάλληλο σχεδιασμό του δικτύου, την εισαγωγή ικανοποιητικού αριθμού διακοπτικών συσκευών και την μελέτη για το σημείο τοποθέτησής τους καθώς και για την μελέτη ρύθμισής της λειτουργίας τους σε συγκεκριμένα χρονικά όρια ώστε να προσαρμόζονται στις ανάγκες του δικτύου.

### 3.2.3 Βραδέα μεταβατικά φαινόμενα – Μεταβατική ευστάθεια

Στις περιπτώσεις στις οποίες τα βραχυκυκλώματα που περιγράφονται στην προηγούμενη παράγραφο μείνουν στο δίκτυο και δεν καταφέρουν να καταπολεμηθούν μέσω της λειτουργίας των διακοπών τότε αυτό οδηγείται σε μια κατάσταση μεταβατικής ευστάθειας. Το όριο της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος αποτελεί αντικείμενο μελέτης των μηχανικών με σκοπό τον προσδιορισμό των αντοχών και

του σημείου εκείνου στο οποίο ένα ΣΗΕ αποκλίνει από τη φυσιολογική του λειτουργία παρουσιάζοντας σημαντικά προβλήματα στην εξυπηρέτηση των καταναλωτών.

Για να μπορεί να είναι ευσταθές ένα σύστημα είναι απαραίτητο η μηχανική ισχύς που προσφέρεται στους δρομείς των γεννητριών του να βρίσκεται σε ισορροπία με το ηλεκτρικό φορτίο που τροφοδοτείται από την κάθε μια. Η ισορροπία αυτή πρέπει να διατηρηθεί και σε περίπτωση προσθήκης επιπλέον φορτίου (επιβράδυνση δρομέα) για κάποια γεννήτρια αλλά και σε περίπτωση που χαθεί κάποιο φορτίο λόγω (επιτάχυνση δρομέα). Οι γεννήτριες έχουν την δυνατότητα να ανταποκρίνονται σε μικρές μεταβολές που συμβαίνουν και να βρίσκουν νέο σημείο ισορροπίας το οποίο θα προσφέρει ευστάθεια και πάλι στο σύστημα.

Όταν η διαταραχές που συμβαίνουν στο δίκτυο είναι μεγάλες και δεν μπορούν να υποστηριχθούν από κάποια γεννήτρια ή γεννήτριες, η ταλαντώσεις στο δρομέα οδηγούν στον αποσυγχρονισμό της και την θέτουν εκτός λειτουργίας. Είναι ένα κρίσιμο σημείο στη μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς η απώλεια κάποιας γεννήτριας μπορεί να οδηγήσει και άλλες στην ίδια κατάσταση δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα στην διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.3 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο κεφ.3.2.1 τα συμμετρικά βραχυκυκλώματα είναι αυτά κατά τα οποία οι τρεις φάσεις συνδέονται με οποιονδήποτε αγωγίμο τρόπο μεταξύ τους. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση όλων των στοιχείων και μεθόδων που βοηθούν στην μελέτη των τριφασικών βραχυκυκλωμάτων και τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

#### 3.3.1 Θεώρημα Thevenin

Το θεώρημα Thevenin χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ρευμάτων και τάσεων σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων. Όταν συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα σε κάποιο σημείο του συστήματος ουσιαστικά προστίθεται μία σύνθετη αντίσταση μεταξύ δύο κόμβων οι οποίοι πριν το σφάλμα ήταν συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Γνωρίζοντας την τάση που υπήρχε στο συγκεκριμένο σημείο πριν το σφάλμα, καθώς και την συνολική αντίσταση μπορούμε με τη βοήθεια του θεωρήματος να υπολογίσουμε τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που θα προκύψουν. Το θεώρημα ορίζεται ως εξής (σύμφωνα με τους Βοβός, Γιαννακόπουλος [2]):

«Οι μεταβολές που συμβαίνουν στις τάσεις και τα ρεύματα ενός δικτύου κατά την πρόσθεση μιας σύνθετης αντίστασης μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου, είναι ίδιες με τις τάσεις και τα ρεύματα που θα προκαλούνταν από μια πηγή τάσης, με μέτρο και πολικότητα ίσα με εκείνα της προσφαλματικής τάσης μεταξύ των δύο κόμβων, τοποθετημένη σε σειρά με τη σύνθετη αντίσταση και την εσωτερική αντίσταση του κυκλώματος που παίρνουμε όταν μηδενίσουμε όλες τις πηγές του (μηδενισμός πηγών σημαίνει να βραχυκυκλώσουμε τις πηγές τάσης και να ανοιχτοκυκλώσουμε τις πηγές ρεύματος)»[2]

Το τελικό κύκλωμα μέσω του οποίου υπολογίζουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ένα απλό κύκλωμα το οποίο περιέχει σε σειρά τα εξής στοιχεία:

- $V_{\text{προσφ}}$ : μία πηγή της οποίας η τάση είναι η ίδια με αυτή που είχαμε στο σημείο πριν το σφάλμα
- $Z_{TH}$  ή  $Z_{\text{ισ}}$ : την συνολική ισοδύναμη αντίσταση στο συγκεκριμένο σημείο
- $Z_f$ : την αντίσταση του βραχυκυκλώματος

και περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

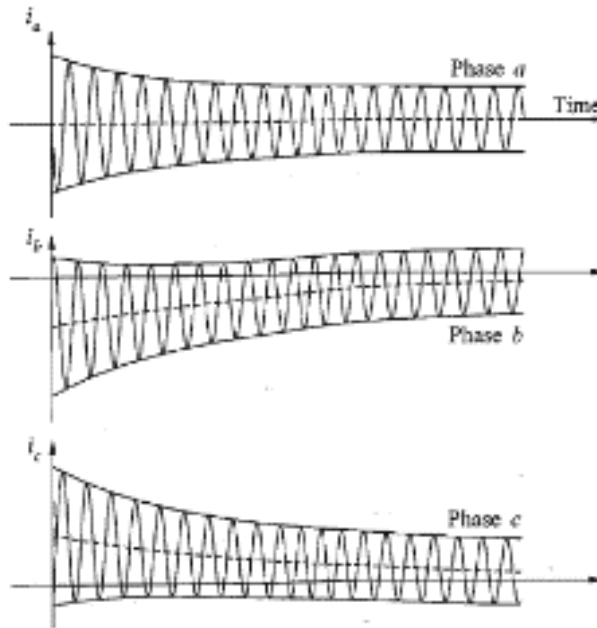
$$I_f = \frac{V_{\text{προσφ}}}{Z_{TH} + Z_f} \quad (3.1)$$

### 3.3.2 Τριφασικά βραχυκυκλώματα στα άκρα σύγχρονων μηχανών

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε μία σύγχρονη μηχανή παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με αυτό που συναντάμε σε ένα απλό κύκλωμα RL. Η λύση της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το πρόβλημα για ένα κύκλωμα RL, ως προς το ρεύμα:

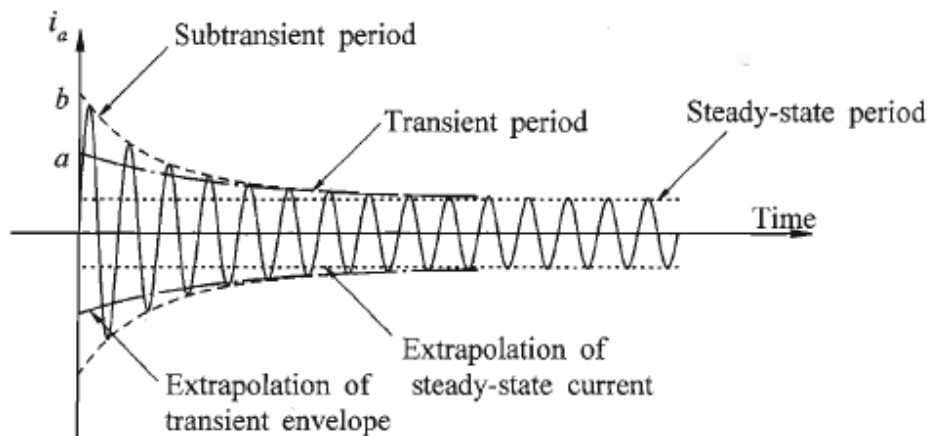
$$i = \frac{\sqrt{2}|V|}{|Z|} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-\frac{Rt}{L}} \sin(\alpha - \theta) \right] \quad (3.2)$$

μας δείχνει ότι αποτελείται από δύο συνιστώσες, μία που παρουσιάζει ημιτονοειδή συμπεριφορά και αντιπροσωπεύει το ρεύμα σε σταθερή κατάσταση και μία που παρουσιάζει φθίνουσα εκθετική συμπεριφορά η οποία αντιπροσωπεύει τη συνιστώσα του συνεχούς ρεύματος. Αν παρατηρήσουμε τη συμπεριφορά του ρεύματος στις τρεις διαφορετικές φάσεις θα δούμε ότι υπάρχει διαφορά όπως φαίνεται στο Σχήμα 3:



Σχήμα 3: Κυματομορφή ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε σύγχρονη μηχανή στις τρεις φάσεις[3]

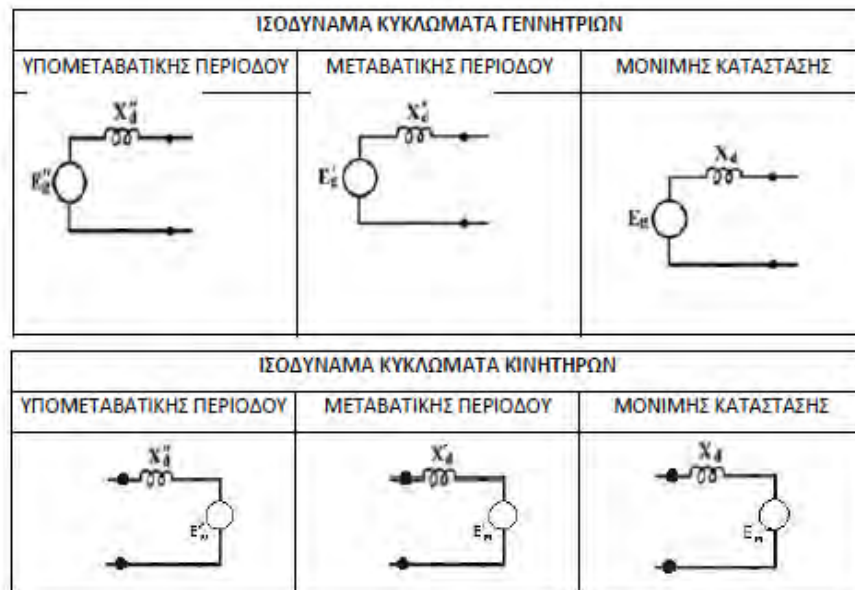
Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι την ώρα που συμβαίνει ένα βραχυκύκλωμα η κυματομορφή της τάσης σε κάθε φάση βρίσκεται σε διαφορετικό σημείο λόγω τις διαφοράς των  $120^\circ$  μεταξύ των φάσεων[2]. Έτσι δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα κατά τη μελέτη περισσότερο στη συμμετρική και όχι στη συνεχή συνιστώσα του ρεύματος μπορούμε να διακρίνουμε τρεις διαφορετικές περιόδους στην κυματομορφή του ρεύματος βραχυκύκλωσης:



Σχήμα 4: Κυματομορφή τριφασικού ρεύματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης μηχανής χωρίς τη συνιστώσα συνεχούς ρεύματος [3]

- Υπομεταβατική περίοδος (συνήθως διάρκειας 0-3 κύκλων )
- Μεταβατικής περιόδου (συνήθως διάρκειας 3-30 κύκλων )
- Μόνιμη κατάσταση (steady state)

Πολλές φορές η πολυπλοκότητα των διαφορικών εξισώσεων για τη μελέτη των βραχυκυκλωμάτων στις σύγχρονες μηχανές οδηγεί στην απλούστευση του προβλήματος και στην χρήση ισοδύναμων κυκλωμάτων για κάθε μία χρονική περίοδο. Τα χαρακτηριστικά ισοδύναμα κυκλώματα για τις γεννήτριες και τους κινητήρες παρουσιάζονται παρακάτω μαζί με τις σχετικές εξισώσεις που τα περιγράφουν.



Σχήμα 5: Ισοδύναμα κυκλώματα γεννητριών και κινητήρων για την υπομεταβατική περίοδο, την μεταβατική περίοδο και για τη μόνιμη κατάσταση

- Γεννήτριες
  - $E'' = V_t + jX''_d I_L$  (Υπομεταβατική)
  - $E' = V_t + jX'_d I_L$  (Μεταβατική)
  - $E = V_t + jX_d I_L$  (Μόνιμη)

- Κινητήρες
  - ο  $E'' = V_t - jX_d'' I_L$  (Υπομεταβατική)
  - ο  $E' = V_t - jX_d' I_L$  (Μεταβατική)
  - ο  $E = V_t - jX_d I_L$  (Μόνιμη)

Όπου  $V_t$  είναι η προσφαιματική τάση σε περίπτωση που το δίκτυο είναι φορτισμένο και  $I_L$  το ρεύμα που απορροφά το φορτίο στην περίπτωση της γεννήτριας και το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας στην περίπτωση του κινητήρα.

### 3.3.3 Μεθοδολογία υπολογισμού συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων

Ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε σφάλματα τριφασικά σύμφωνα με τις προηγούμενες δύο παραγράφους μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος, πιο άμεσος και πιο γρήγορος τρόπος είναι με την χρήση του θεωρήματος Thevenin και ο δεύτερος μελετώντας το δίκτυο ως ένα ηλεκτρικό κύκλωμα πριν και μετά το σφάλμα καταλήγοντας στα τελικά ρεύματα σφάλματος με τη χρήση των ισοδύναμων κυκλωμάτων. Γενικά στην μελέτη του συγκεκριμένου τύπου βραχυκυκλωμάτων χρησιμοποιείται μόνο η συνιστώσα του ρεύματος της θεμελιώδους συχνότητας των 50Hz, οι αντιστάσεις αναπαριστώνται όλες ως άεργες ενώ όπως αναφέρθηκε η συνιστώσα του συνεχούς ρεύματος λαμβάνεται εμπειρικά υπόψη στους υπολογισμούς και ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα.

- Σχεδιασμός μονογραμμικού διαγράμματος
- Μετατροπή όλων των στοιχείων του δικτύου σε per unit μονάδες με τη χρήση κοινής βάσης  $S_B$ ,  $V_B$
- Εύρεση του ρεύματος σφάλματος στο σημείο που γίνεται η μελέτη
- Υπολογισμός των υπόλοιπων στοιχείων του δικτύου (τάσεις και ρεύματα ) που είναι προς εξέταση για την εξαγωγή απαραίτητων συμπερασμάτων

### 3.3.4 Ανάλυση τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυο με χρήση λογισμικού

Στην πραγματικότητα ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό ζυγών και οι μελέτες γίνονται με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών. Η μέθοδος που αναφέρθηκε με την απλοποίηση και τη χρήση ισοδύναμων κυκλωμάτων θα ήταν εξαιρετικά πολύπλοκη να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο δίκτυο. Για την ανάλυση πιο σύνθετων δικτύων χρησιμοποιούμε το θεώρημα Thevenin και πίνακες

για να υπολογίσουμε την μεταβολή των τάσεων στους ζυγούς του δικτύου χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$[\Delta V] = [Z_{BUS}][I] \quad (3.3)$$

Όπου ο πίνακας  $\Delta V$  αντιπροσωπεύει την μεταβολή (διαφορά) της τάσης μετά και πριν το σφάλμα σε κάθε ζυγό, ο πίνακας  $Z_{BUS}$  έχει μέγεθος  $n * n$ , περιέχει τις αντιδράσεις του δικτύου και προκύπτει από την αντιστροφή του αντίστοιχου πίνακα  $Y_{BUS}$ , ενώ ο πίνακας  $I$  είναι μηδενικός εκτός από ένα στοιχείο του το οποίο περιέχει την αρνητική τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώματος στον ζυγό που έχει γίνει [2]:

$$[I] = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ -I_f \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Η πορεία της λύσης ενός συστήματος μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου από ένα λογισμικό περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Υπολογισμός των τάσεων πριν το βραχυκύκλωμα μελετώντας τη ροή φορτίου
2. Σχηματισμός του πίνακα  $Z_{BUS}$  αντιστρέφοντας τον  $Y_{BUS}$
3. Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκυκλώματος χρησιμοποιώντας το θεώρημα Thevenin
4. Υπολογισμός των τάσεων του δικτύου μετά το βραχυκύκλωμα
5. Υπολογισμός των ρευμάτων σε κάθε γραμμή μέσω της εξίσωσης  $I_{12} = \frac{V_1 - V_2}{Z_{12}}$

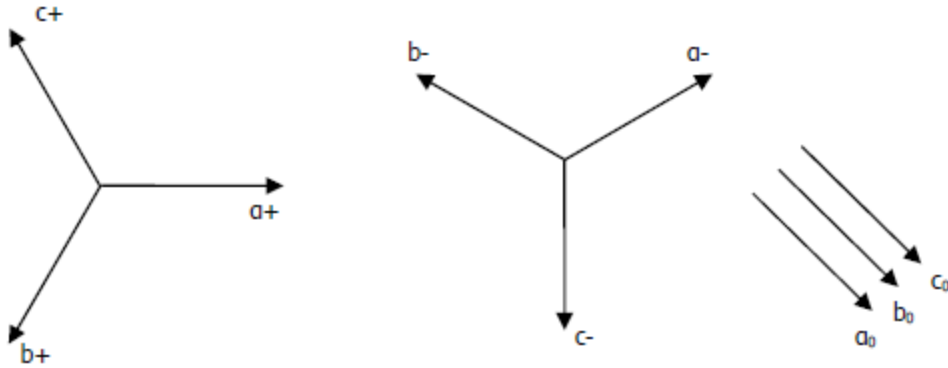
### 3.4 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα

Στα ασύμμετρα σφάλματα ο υπολογισμός των ρευμάτων γίνεται πιο περίπλοκος καθώς η τριφασική συμμετρία που ίσχυε στα συμμετρικά βραχυκυκλώματα δεν διατηρείται. Συνεπώς δεν μπορούμε να ανάγουμε ένα τριφασικό μη συμμετρικό σύστημα στο ισοδύναμο της μιας φάσης και να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς για οποιαδήποτε μελέτη. Για να επιλύσουμε προβλήματα για τα οποία ευθύνονται ασύμμετρα σφάλματα εφαρμόζουμε τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών.

#### 3.4.1 Συμμετρικές συνιστώσες

Σύμφωνα με τη μέθοδο που πρότεινε ο C.L. Fortescue το 1918 είναι δυνατό να μελετήσουμε τα ασύμμετρα σφάλματα αναλύοντας τα σε τρία συμμετρικά δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά ονομάζονται ακολουθιακά και αποτελούνται από τρεις συνιστώσες το καθένα όπως εξηγείται παρακάτω.





Σχήμα 6: Ανάλυση των ακολουθιακών συστημάτων στις συμμετρικές τους συνιστώσες

Τα τρία δίκτυα είναι τα εξής (Σχήμα 6):

- Δίκτυο θετικής ακολουθίας: Αποτελείται από τρία διανύσματα (συνιστώσες) ίδιου μέτρου, τα οποία ακολουθούν τη διαδοχή φάσεων abc και συνεπώς διαφέρουν μεταξύ τους κατά  $120^\circ$ . Ο δείκτης με τον οποίο θα γίνεται αναφορά στη συνέχεια στη συγκεκριμένη ακολουθία θα είναι το + ή το 1.
- Δίκτυο αρνητικής ακολουθίας: Αποτελείται από τρία διανύσματα (συνιστώσες) ίδιου μέτρου, τα οποία ακολουθούν τη διαδοχή φάσεων acb και διαφέρουν μεταξύ τους κατά  $120^\circ$ . Ο δείκτης με τον οποίο θα γίνεται αναφορά στη συνέχεια στη συγκεκριμένη ακολουθία θα είναι το - ή το 2.
- Δίκτυο μηδενικής ακολουθίας: Αποτελείται από τρία διανύσματα (συνιστώσες) ίδιου μέτρου, τα οποία έχουν και ίδια φάση. Ο δείκτης με τον οποίο θα γίνεται αναφορά στη συνέχεια στη συγκεκριμένη ακολουθία θα είναι το 0.[2]

Σύμφωνα με τα παραπάνω αν θέλουμε να εκφράσουμε τα φασικά ρεύματα ενός ασύμμετρου τριφασικού συστήματος με τη βοήθεια των τριών ακολουθιών, θα προκύψει το παρακάτω σύστημα:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$

Από τα στοιχεία (9) που αποτελείται το παραπάνω σύστημα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα 3 για να προσδιορίσουμε τα υπόλοιπα σύμφωνα με τις μοίρες που απέχουν μεταξύ τους τα στοιχεία που βρίσκονται στο ίδιο ακολουθιακό δίκτυο.

Έτσι χρησιμοποιούμε τον τελεστή  $a = 1\angle 120^\circ$  για να καταλήξουμε σε ένα σύστημα εξισώσεων στο οποίο γίνεται η μαθηματική σύνδεση των φασικών στοιχείων με τα ακολουθιακά.

Ιδιότητες τελεστή  $a$ :

- $a = 1\angle 120^\circ$
- $a^2 = 1\angle 240^\circ$
- $a^3 = 1\angle 0^\circ$
- $a + a^2 + a^3 = a + a^2 + 1 = 0$

Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε τα στοιχεία με τον παρακάτω τρόπο:

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$$

$$I_{b1} = a^2 I_{a1}, I_{c1} = a I_{a1}$$

$$I_{b2} = a I_{a2}, I_{c2} = a^2 I_{a2}$$

Οπότε προκύπτει το εξής σύστημα:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{a0} & I_{a1} & I_{a2} \\ I_{a0} & a^2 I_{a1} & a I_{a2} \\ I_{a0} & a I_{a1} & a^2 I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Το συγκεκριμένο σύστημα εξισώσεων (3.6) δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των φασικών ρευμάτων μέσω των ακολουθιακών ενός ασύμμετρου τριφασικού συστήματος και ταυτόχρονα με την αντιστροφή του ενδιάμεσου πίνακα (συνηθίζεται να αναφέρεται με το γράμμα T) μπορούμε να ακολουθήσουμε και την αντίστροφη διαδικασία (3.8):

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Οι συγκεκριμένες εξισώσεις μπορούν επίσης να εφαρμοστούν και για τον υπολογισμό των τάσεων

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Και

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

### 3.4.2 Αντιδράσεις ακολουθιακών κυκλωμάτων

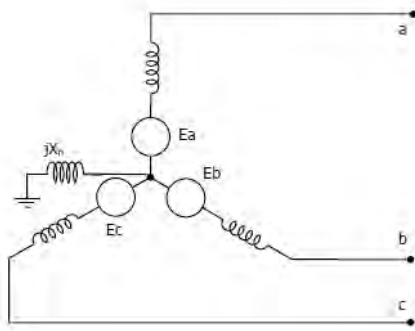
Αν περιγράψουμε τον πίνακα των φασικών πτώσεων τάσης ως  $[V_p]$  και τα φασικά ρεύματα με τον πίνακα  $[I_p]$  τότε στην εξίσωση  $[V_p] = [Z] [I_p]$  μπορούμε να αντικαταστήσουμε τις τάσεις και τα ρεύματα με τη χρήση του πίνακα  $T$  με τα αντίστοιχα ακολουθιακά  $[V_s]$  και  $[I_s]$ , οπότε θα προκύψει η εξίσωση:

$$[V_s] = [T]^{-1} [Z] [T] [I_s]$$

$$[V_s] = [Z] [I_s] \quad (3.11)$$

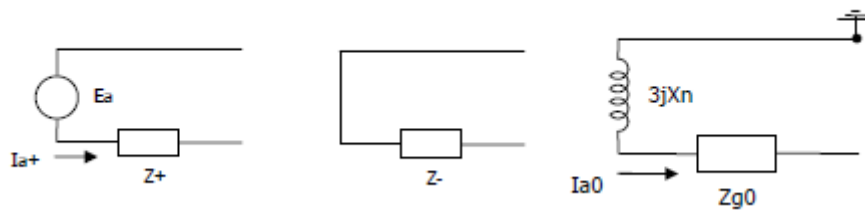
Διαπιστώνουμε ότι οι αντιδράσεις στα ακολουθιακά δίκτυα δεν παρουσιάζουν αλλαγές σε σχέση με τις φασικές αντιδράσεις γεγονός που σημαίνει ότι οι μεταβολές στα ακολουθιακά ρεύματα είναι αυτές που μπορεί να καθορίσουν τις ακολουθιακές πτώσεις τάσεις.

### 3.4.3 Ακολουθιακά δίκτυα γεννητριών



Σχήμα 7: Κύκλωμα σύγχρονης μηχανής – γεννήτριας

Οι γεννήτριες παράγουν τάσεις μόνο στο δίκτυο θετικής ακολουθίας συνεπώς θα έχουμε τάση μόνο στη θετική ακολουθία όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 στο οποίο απεικονίζονται τα ακολουθιακά κυκλώματα.



Σχήμα 8: Ακολουθιακά κυκλώματα σύγχρονης μηχανής – γεννήτριας (θετικής, αρνητικής, μηδενικής)

Τα δίκτυα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας δεν περιέχουν κάποια τάση ενώ σημαντική διαφορά παρουσιάζει το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας καθώς σε σειρά με την αντίδραση  $Z_{g0}$  είναι και το τριπλάσιο της αντίδρασης γείωσης της γεννήτριας. Αυτό συμβαίνει επειδή το ρεύμα που διαρρέει τον ουδέτερο της γεννήτριας είναι  $I_n = 3I_{a0}$  επειδή:

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

Και

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

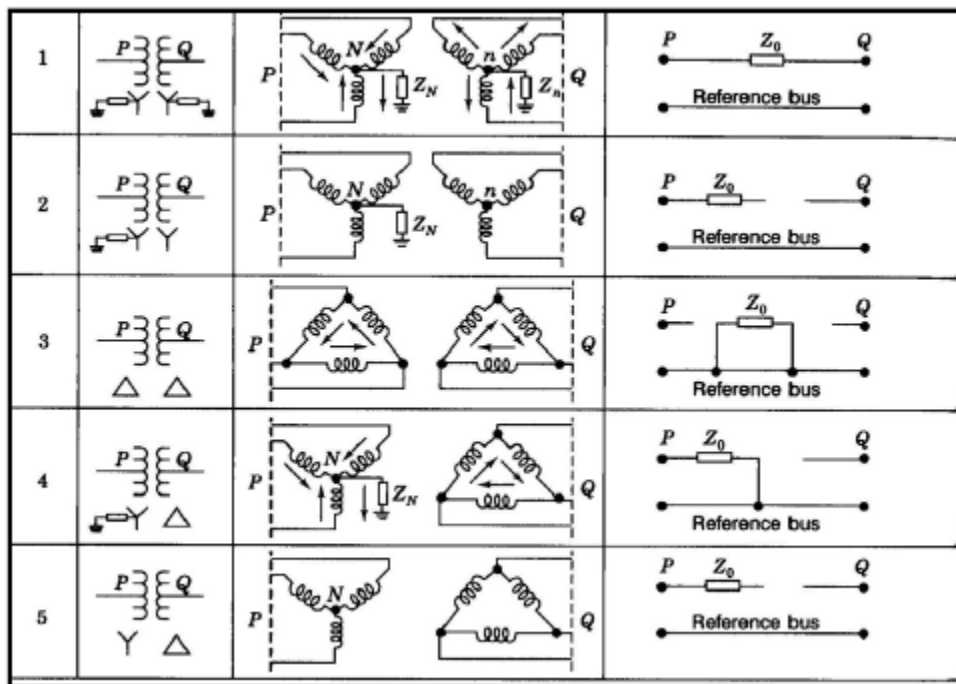
Οπότε

$$I_n = 3I_{a0} \quad (3.12)$$

Έτσι για να αναπαρασταθεί σωστά η πτώση τάσης στο δίκτυο μηδενικής ακολουθίας προστίθεται σε σειρά η αντίδραση γείωσης της γεννήτριας τριπλασιασμένη.

### 3.4.4 Ακολουθιακά δίκτυα μετασχηματιστών

Όσον αφορά τη δημιουργία των ακολουθιακών δικτύων στην περίπτωση των μετασχηματιστών παρουσιάζουν επίσης διαφορά στον σχηματισμό της μηδενικής ακολουθίας. Οι αντιδράσεις της θετικής και αρνητικής ακολουθίας παραμένουν ίδιες με την αντίδραση του μετασχηματιστή. Το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας διαφοροποιείται λόγω του τρόπου σύνδεσης των τυλιγμάτων του κάθε μετασχηματιστή ενώ λαμβάνεται υπόψη και η γείωση η όχι του ουδετέρου κάθε συνδεσμολογίας. Τα ισοδύναμα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας που προκύπτουν στις διαφορετικές περιπτώσεις περιγράφονται αναλυτικά στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Δίκτυα μηδενικής ακολουθίας μετασχηματιστών ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων

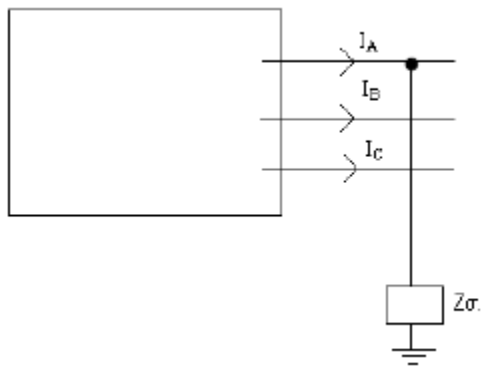
### 3.4.5 Μέθοδος υπολογισμού ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων

Σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια (παραγράφους) είμαστε σε θέση να εκφράσουμε τα στοιχεία ενός ασύμμετρου τριφασικού συστήματος αναπαριστώντας τα ισοδύναμα κυκλώματα των ακολουθιακών δικτύων. Για την ανάλυση και μελέτη του κάθε σφάλματος ξεχωριστά ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Αρχικά επιλέγουμε κοινές βάσεις  $S_B$ ,  $V_B$  και μετατρέπουμε τα στοιχεία στο ανά μονάδα σύστημα (ρ.υ)
- Σχεδιάζουμε τα δίκτυα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας
- Ανάλογα με το σημείο του σφάλματος στο σύστημα υπολογίζουμε τη  $Z_{TH}$
- Στη συνέχεια κάθε σφάλμα απαιτεί διαφορετική διασύνδεση των ακολουθιακών δικτύων μεταξύ τους όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.
- Από το ολοκληρωμένο δίκτυο το οποίο περιέχει τα συνδεδεμένα ακολουθιακά δίκτυα μεταξύ τους υπολογίζουμε τα ρεύματα και τις τάσεις των συμμετρικών συνιστωσών.
- Κάνοντας χρήση των εξισώσεων που έχουν αναλυθεί κάνουμε των υπολογισμό των φασικών ρευμάτων και φασικών τάσεων στο σημείο του βραχυκυκλώματος.

### 3.4.6 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα (SLG – Single Line to Ground)

Στο μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γη το σφάλμα συμβαίνει σε μία από τις τρεις φάσεις του συστήματος και συνήθως για τη μελέτη υποθέτουμε ότι συμβαίνει στην φάση a (Σχήμα 9). Εφόσον λοιπόν οι φάσεις b,c δεν συμμετέχουν στο βραχυκύκλωμα, τα φασικά ρεύματα βραχυκυκλώματος θα είναι μηδενικά:



Σχήμα 9: Αναπαράσταση μονοφασικού βραχυκυκλώματος

$$I_b = I_c = 0$$

Ενώ ισχύει και ότι  $V_a = I_a * Z_\sigma$  (όπου  $Z_\sigma$  ή  $Z_f$  η αντίσταση σφάλματος). Χρησιμοποιώντας τον πίνακα T για να λύσουμε ως προς τα ρεύματα των ακολουθιών ξεκινάμε από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

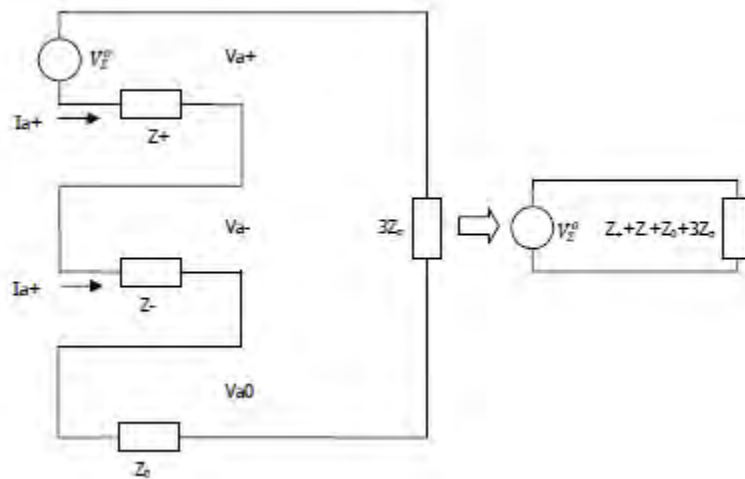
Επομένως διαπιστώνουμε ότι

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{3} I_a \quad \text{και} \quad I_{a0} = \frac{V_a}{3Z_\sigma} \quad (1)$$

και

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2)$$

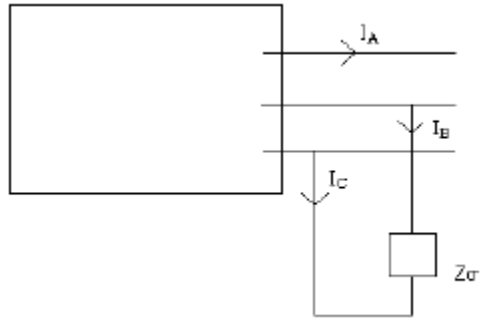
Για να ικανοποιούνται οι παραπάνω σχέσεις θα πρέπει τα ακολουθιακά δίκτυα να είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους και σε σειρά με το τριπλάσιο της αντίστασης σφάλματος. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται ο τρόπος σύνδεσης των ακολουθιακών κυκλωμάτων για ένα μονοφασικό βραχυκύκλωμα:



Σχήμα 10: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για μονοφασικό βραχυκύκλωμα

### 3.4.7 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων (LL – Line to Line)

Το συγκεκριμένο βραχυκύκλωμα εμφανίζεται όταν δημιουργηθεί αγώγιμος δρόμος μεταξύ δύο φάσεων. Για τη μελέτη του βραχυκυκλώματος μεταξύ δύο φάσεων υποθέτουμε ότι αυτό εφαρμόζεται στις φάσεις b,c (Σχήμα 11) οπότε ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:



Σχήμα 11: Αναπαράσταση βραχυκυκλώματος μεταξύ δύο φάσεων

$$I_a = 0 \quad (3.14)$$

$$I_b = -I_c \quad (3.15)$$

$$V_b - V_c = I_b * Z_{\sigma} \quad (3.16)$$

Κάνοντας χρήση του πίνακα T για να λύσουμε ως προς τα ρεύματα των ακολουθιών ξεκινάμε από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Επομένως καταλήγουμε για κάθε ακολουθιακό ρεύμα:

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (a - a^2) I_b$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (a^2 - a) I_b$$

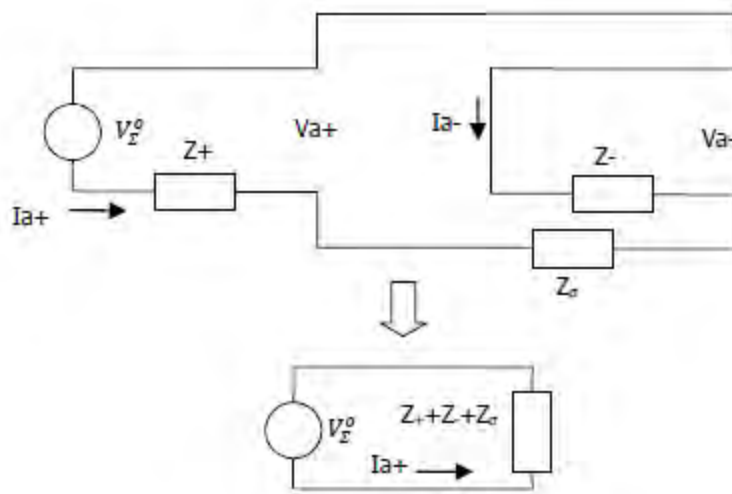
Άρα  $I_{a1} = -I_{a2}$  (3.18) οπότε ουσιαστικά η συνιστώσα της μηδενικής ακολουθίας δεν συμμετέχει στο σφάλμα. Αν στην παραπάνω σχέση αντικαταστήσουμε τα  $V_b, V_c, I_b$  συναρτήσει των ακολουθιακών στοιχείων τότε θα έχουμε:



$$(V_{a0} + a^2 V_{a1} + aV_{a2}) - (V_{a0} + aV_{a1} + a^2 V_{a2}) + (I_{a0} + a^2 I_{a1} + aI_{a2}) * Z_{\sigma} \Rightarrow$$

$$V_{a1} = V_{a2} + I_{a1} * Z_{\sigma} \quad (3.19)$$

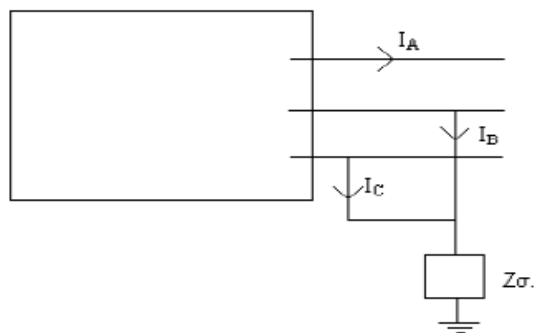
Όλες οι παραπάνω σχέσεις ικανοποιούνται μόνο στην περίπτωση που το δίκτυο θετικής και το δίκτυο αρνητικής ακολουθίας συνδεθούν με τον τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 12: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων

### 3.4.8 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και γης (DLG – Double Line to Ground)

Το βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και γης δημιουργείται στην περίπτωση που προκύψει αγώγιμο μονοπάτι μεταξύ δύο φάσεων (Για την μελέτη υποθέτουμε ότι αυτές είναι η b,c) και γης με αντίσταση ή και χωρίς αντίστασης βραχυκύκλωσης (Σχήμα 13). Από το σχήμα μπορούμε να εξάγουμε τρεις εξισώσεις που ισχύουν:



Σχήμα 13: Αναπαράσταση βραχυκυκλώματος μεταξύ δύο φάσεων και γης

$$V_b = V_c = (I_b + I_c) * Z_\sigma \quad (3.20)$$

$$I_a = 0 \quad (3.21)$$

$$I_\sigma = I_b + I_c \quad (3.22)$$

Επίσης κάνοντας χρήση των συμμετρικών συνιστωσών για τις μεταβλητές  $I_b, I_c$  και  $V_b$  προκύπτουν οι σχέσεις:

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (3.23)$$

$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \quad (3.24)$$

$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \quad (3.25)$$

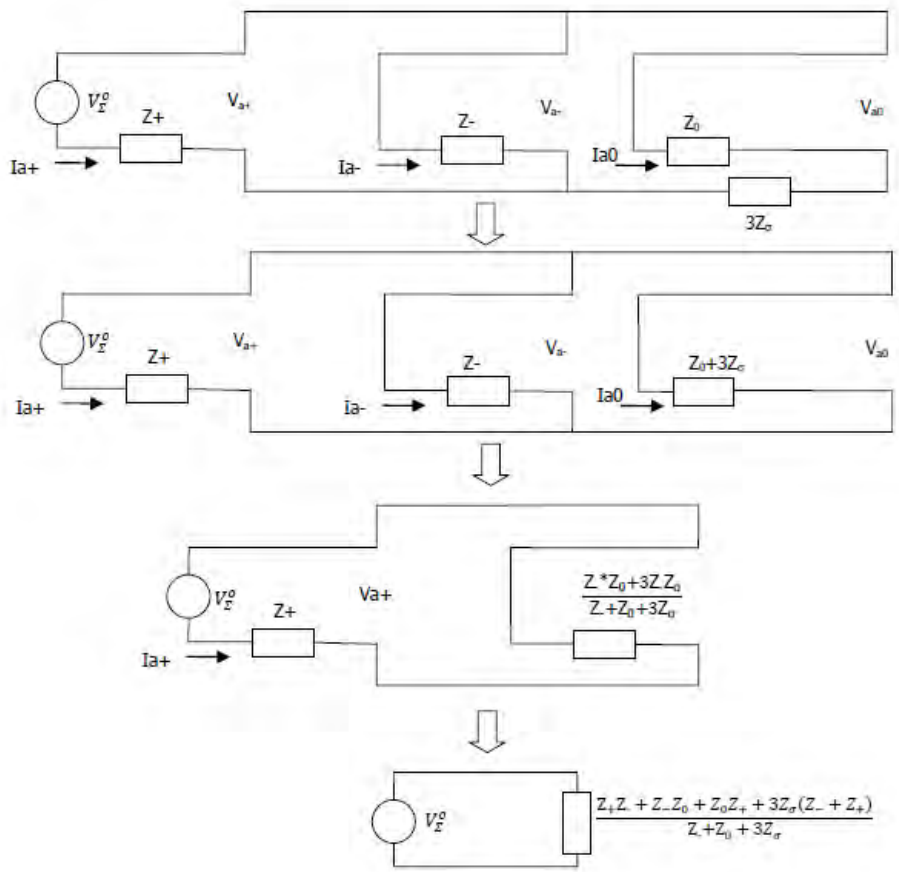
Αν κάνουμε αντικατάσταση στην πρώτη εξίσωση τότε θα έχουμε:

$$V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} = (I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}) * Z_\sigma \Rightarrow$$

$$V_{a0} - V_{a1} = 3I_{a0} * Z_\sigma \quad (3.26)$$

Και επειδή  $V_b = V_c$  μέσω συμμετρικών συνιστωσών θα έχουμε και  $V_{a2} = V_{a1}$

Για να ικανοποιηθούν οι παραπάνω σχέσεις το σχήμα που δίνει αυτή τη δυνατότητα διασύνδεσης των ακολουθιακών δικτύων είναι το παρακάτω:



Σχήμα 14: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και γης

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Αποτελέσματα μελέτης δικτύου 9 ζυγών – IEEE

### 4.1 Το λογισμικό PSS/E Xplore34

Η διατήρηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η συμμόρφωση του στα πρότυπα της βιομηχανίας και η άμεση ανταπόκρισή του στις απαιτήσεις των καταναλωτών είναι στοιχεία στα οποία μπορεί να προσφέρει λύσεις η χρήση ενός λογισμικού. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για τις μελέτες που έγιναν το λογισμικό PSS/E Xplore34 της Siemens. Το λογισμικό αυτό δεν χρησιμοποιήθηκε στην ολοκληρωμένη έκδοσή του αλλά παρέχεται δωρεάν από την Siemens για εκπαιδευτικό σκοπό και με συγκεκριμένους περιορισμούς.

Το PSS/E είναι ευρέως διαδεδομένο, χρησιμοποιείται από πολλές εταιρίες οι οποίες διαχειρίζονται δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και παρέχει ποικιλία λειτουργιών για την ανάλυση των συστημάτων όπως:

- Μονογραμμική απεικόνιση του συστήματος προς ανάλυση
- Ανάλυση ροής φορτίου με τη χρήση διαφορετικών μεθόδων
- Ανάλυση σφαλμάτων (βραχυκυκλωμάτων) σε σταθερή κατάσταση (steady state).
- Δυναμική προσομοίωση
- Προσομοίωση μεταβατικής ευστάθειας

Το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για όλες τις παραπάνω λειτουργίες σε ένα δίκτυο 9 ζυγών της IEEE του οποίου τα δεδομένα παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

### 4.2 Το δίκτυο 9 ζυγών της IEEE

#### BUS DATA

Bus Number	Base kV	Area Number	Zone Number	Owner Number	Code	Voltage (pu)	Angle (deg)	Normal Vmax(pu)	Normal Vmin(pu)	Emergency Vmax(pu)	Emergency Vmin(pu)
1	16.5	1	1	1	3	1.0400	0.00	1.1000	0.9000	1.1000	0.9000
2	18.0	2	2	1	2	1.0250	9.28	1.1000	0.9000	1.1000	0.9000

3	13.8	2	3	1	2	1.025 0	4.66	1.1000	0.9000	1.1000	0.9000
4	230. 0	1	1	1	1	1.025 8	- 2.22	1.1000	0.9000	1.1000	0.9000
5	230. 0	1	4	2	1	0.995 6	- 3.99	1.1000	0.9000	1.1000	0.9000
6	230. 0	1	5	2	1	1.012 7	- 3.69	1.1000	0.9000	1.1000	0.9000
7	230. 0	2	2	1	1	1.025 8	3.72	1.1000	0.9000	1.1000	0.9000
8	230. 0	2	6	2	1	1.015 9	0.73	1.1000	0.9000	1.1000	0.9000
9	230. 0	2	3	1	1	1.032 4	1.97	1.1000	0.9000	1.1000	0.9000

#### PLANT DATA

Bus Number	Area Number	Area Name	Code	PGen (MW)	QGen (MVar)	QMax (MVar)	QMin (MVar)	VSched (pu)	Remote Bus	Voltage (pu)	RMP CT
1	1	AREA 1	3	71.6	27.0	300.0	-300.0	1.040 0	0	1.0400	100. 00
2	2	AREA 2	2	163. 0	6.7	300.0	-300.0	1.025 0	0	1.0250	100. 00
3	3	AREA 3	2	85.0	-10.9	300.0	-300.0	1.025 0	0	1.0250	100. 00

**MACHINE DATA**

Bus Number	Id	Area Num	Code	VSched (pu)	In Service	PGen (MW)	PMax (MW)	PMin (MW)	QGen (Mvar)	QMax (Mvar)	QMin (Mvar)	Mbase (MVA)
1	1	1	3	1.0400	√	71.6410	250.00	10.00	27.0460	300.00	-300.00	260.00
2	1	2	2	1.0250	√	163.00	300.00	10.00	6.6540	300.00	-300.00	310.00
3	1	2	2	1.0250	√	85.0000	270.00	10.00	-10.8600	300.00	-300.00	280.00

R Source (pu)	X Source (pu)	Owner 3	Renewable Machine Power factor
0.000100	0.100000	0	1.000
0.000100	0.210000	0	1.000
0.000100	0.210000	0	1.000

**LOAD DATA**

Bus Number	l d	Cod e	Area Num	Zon e Num	Owne r Num	In Servic e	Scalabl e	Pload (MW)	Qload (Mvar)	IPloa d (MW)	IQloa d (Mvar )	YPI oad (MW)
5	1	1	1	1	1	√	√	125.00 00	50.000 0	0.000 0	0.000 0	0.0 000
6	1	1	1	1	1	√	√	90.000 0	30.000 0	0.000 0	0.000 0	0.0 000
8	1	1	1	1	1	√	√	100.00 00	35.000 0	0.000 0	0.000 0	0.0 000

YQload (Mvar)	Distributed Gen (Mvar)	Distributed Gen Mode
0.0000	0.0000	Off
0.0000	0.0000	Off
0.0000	0.0000	Off

**BRANCH AC LINE DATA**

From Bus Number	To Bus Number	Id	Line R (pu)	Line X (pu)	Charging B (pu)	In Service	Metered	Line G From (pu)
4	5	1	0.010000	0.085000	0.176000	√	√	0.00000
4	6	1	0.017000	0.092000	0.158000	√	√	0.00000
5	7	1	0.032000	0.161000	0.306000	√	√	0.00000
6	9	1	0.039000	0.170000	0.358000	√		0.00000
7	8	1	0.008500	0.072000	0.149000	√	√	0.00000
8	9	1	0.011900	0.100800	0.209000	√	√	0.00000

Line B From (pu)	Line G To (pu)	Line B To (pu)	RATE1 (I as MVA)	RATE2 (I as MVA)
0.00000	0.00000	0.00000	250.0	250.0
0.00000	0.00000	0.00000	250.0	250.0
0.00000	0.00000	0.00000	250.0	250.0
0.00000	0.00000	0.00000	150.0	150.0
0.00000	0.00000	0.00000	250.0	250.0
0.00000	0.00000	0.00000	150.0	150.0



**BRANCH 2 WINDING DATA**

From Bus Number	To Bus Number	Id	In Service	VSched (pu)	In Service	Metered	Tap Positions	Control Mode	Winding I/O Code	Impedance I/O Code	Admittance I/O Code
1	4	T1	1	1.0400	√	√	33	None	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)
2	7	T2	1	1.0250	√	√	33	None	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)
3	9	T3	1	1.0250	√	0	33	None	Turns ratio (pu on bus base kV)	Zpu (system base)	Y pu (system base)

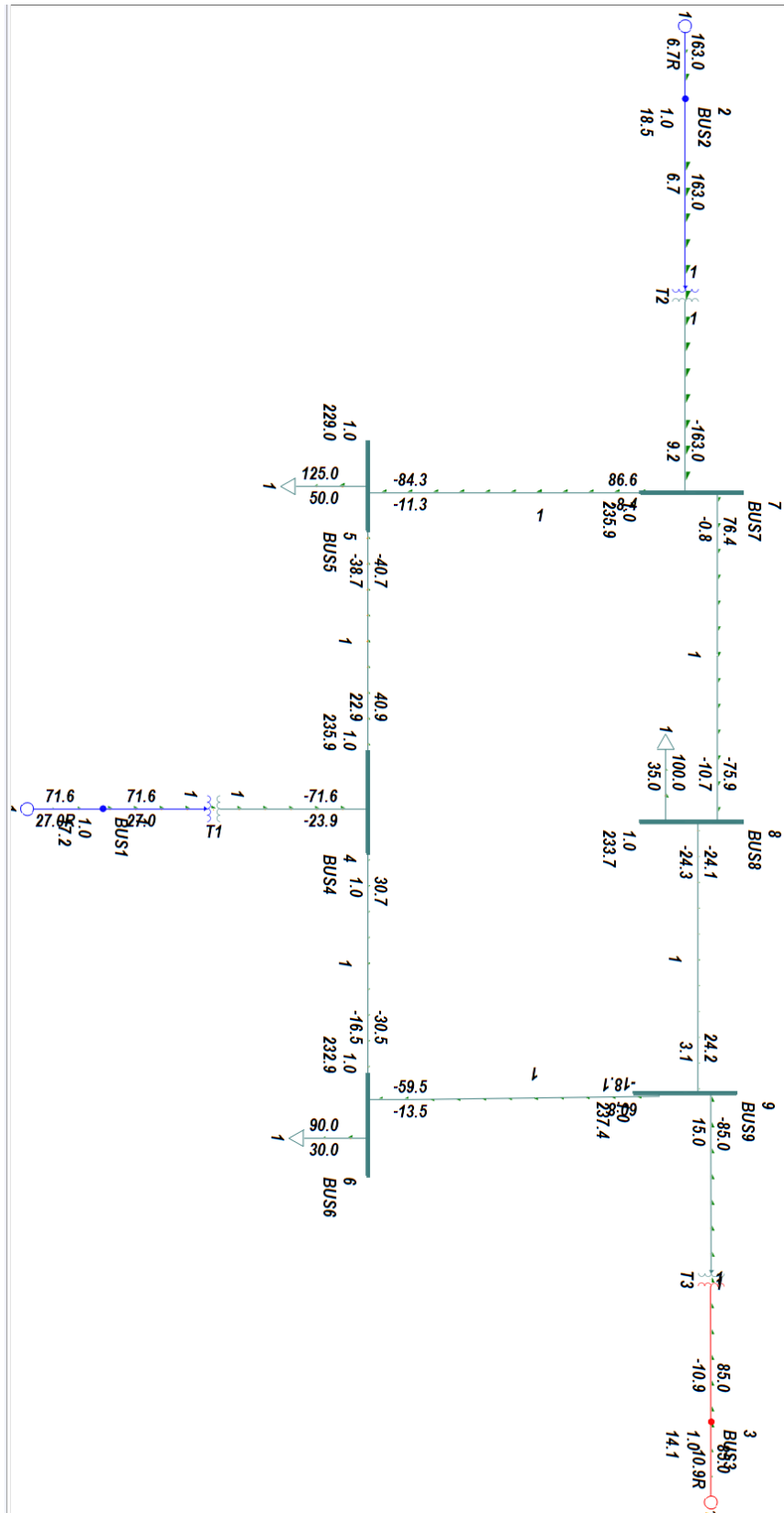
### 4.3 Ανάλυση ροής φορτίου

Στην ανάλυση ροής φορτίου που πραγματοποιήθηκε στο δίκτυο των 9 ζυγών επιλέχθηκε η μέθοδος Newton – Raphson. Στην Εικόνα 11 στην οποία απεικονίζεται το συγκεκριμένο δίκτυο, διακρίνουμε βέλη τα οποία υποδεικνύουν ροή πραγματικής και άεργου ισχύος. Τα διαφορετικά χρώματα σε περιοχές του συστήματος έχουν σχέση με την τάση στην οποία βρίσκεται ο κάθε ζυγό ανάλογα με τις ζώνες που σχηματίζονται από τους μετασχηματιστές. Πιο συγκεκριμένα οι ζυγοί με το μπλε χρώμα βρίσκονται στη ζώνη των 18kV, οι ζυγοί με το κόκκινο χρώμα στη ζώνη των 13,8kV και οι ζυγοί με το πράσινο χρώμα στη ζώνη των 230kV.

Από την ανάλυση ροής φορτίου μέσω του λογισμικού προκύπτουν έπειτα από δύο επαναλήψεις της μεθόδου Newton – Raphson, τα εξής αποτελέσματα για τον ζυγό αναφοράς (Ζυγός 1):

$$P_{GEN} = 71.6 \text{ MW}$$

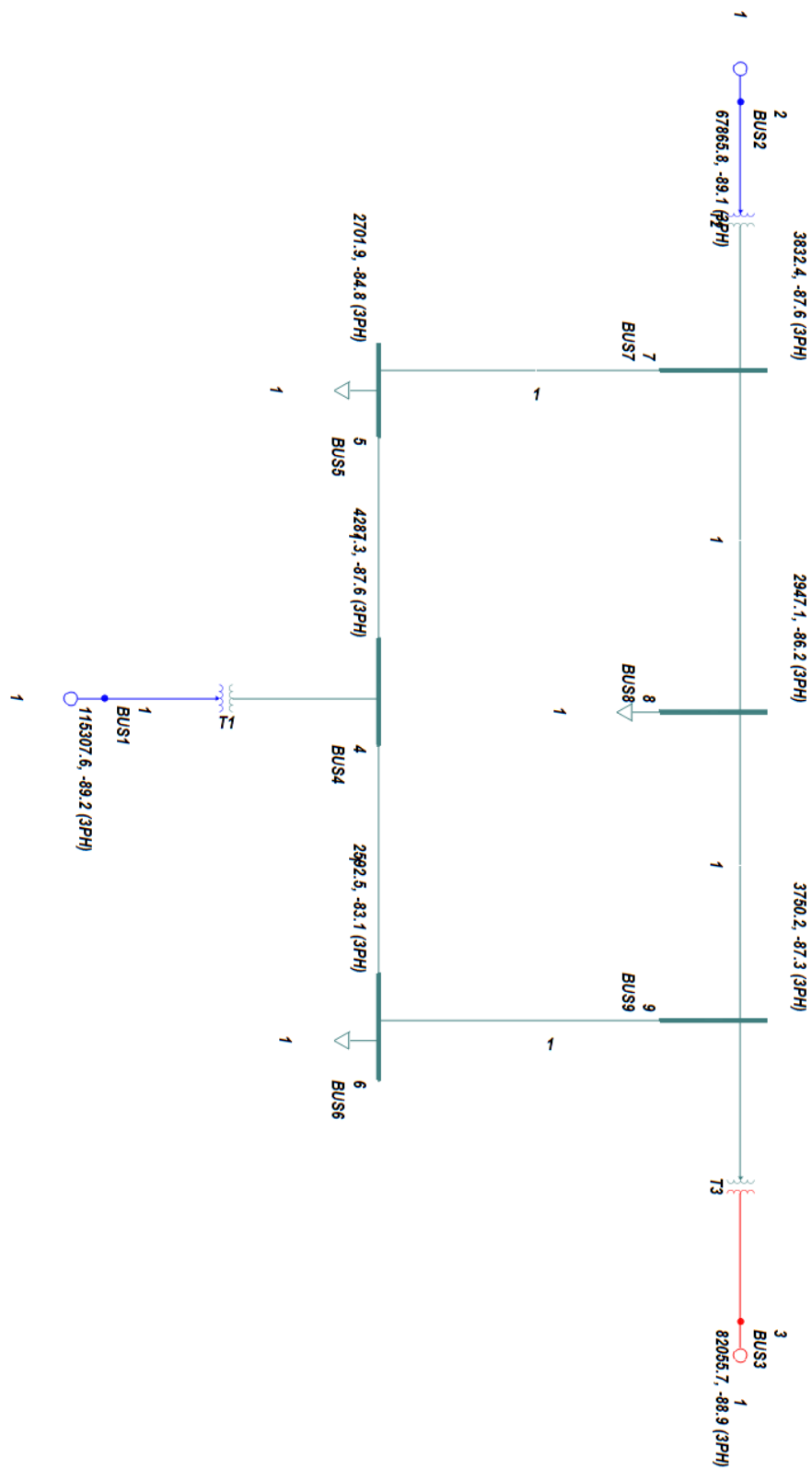
$$Q_{GEN} = 27.0 \text{ MVar}$$



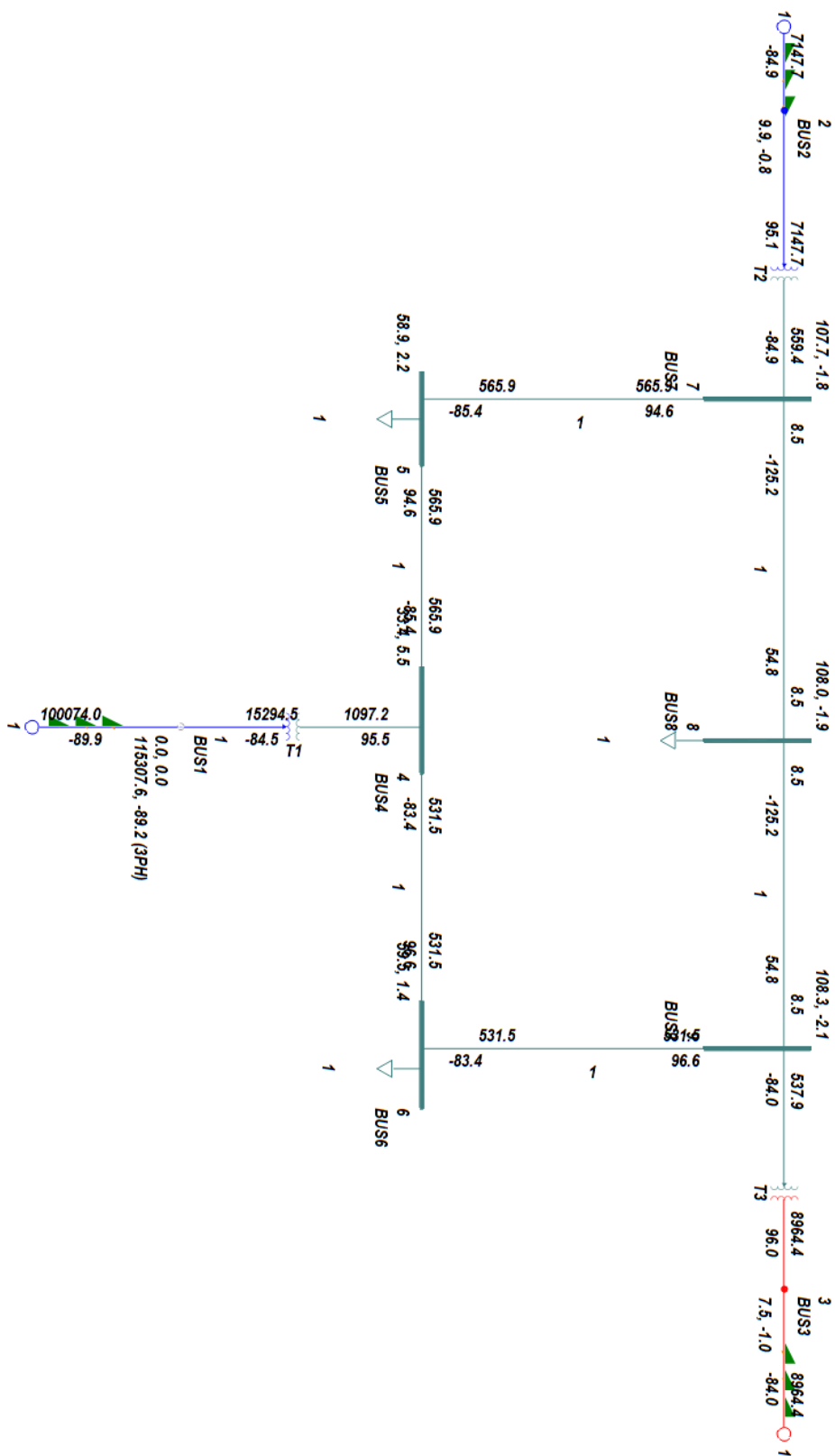
Εικόνα 11: Απεικόνιση του δικτύου των 9 ζυγών

#### 4.4 Μελέτη τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε σταθερή κατάσταση (steady state)

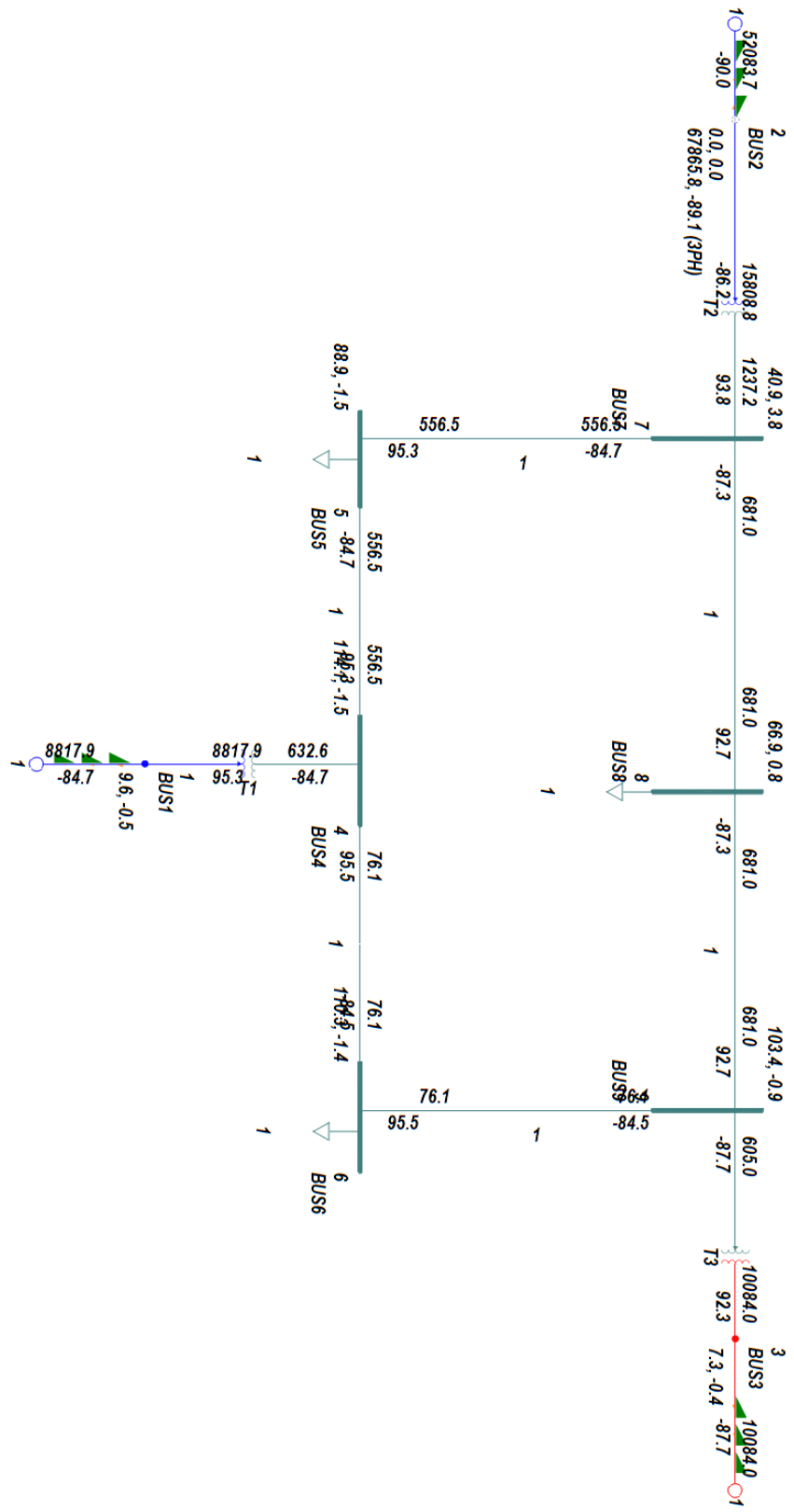
Στη συγκεκριμένη μελέτη υπολογίζονται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης για κάθε ζυγό του δικτύου ξεχωριστά. Αρχικά στην Εικόνα 12 διακρίνουμε τα ρεύματα βραχυκύκλωσης έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα πάνω σε κάθε ζυγό. Στη συνέχεια οι Εικόνες 13-21 δείχνουν την συνεισφορά των ρευμάτων από κάθε σημείο του δικτύου στο ρεύμα βραχυκύκλωσης σε κάθε ζυγό ξεχωριστά.



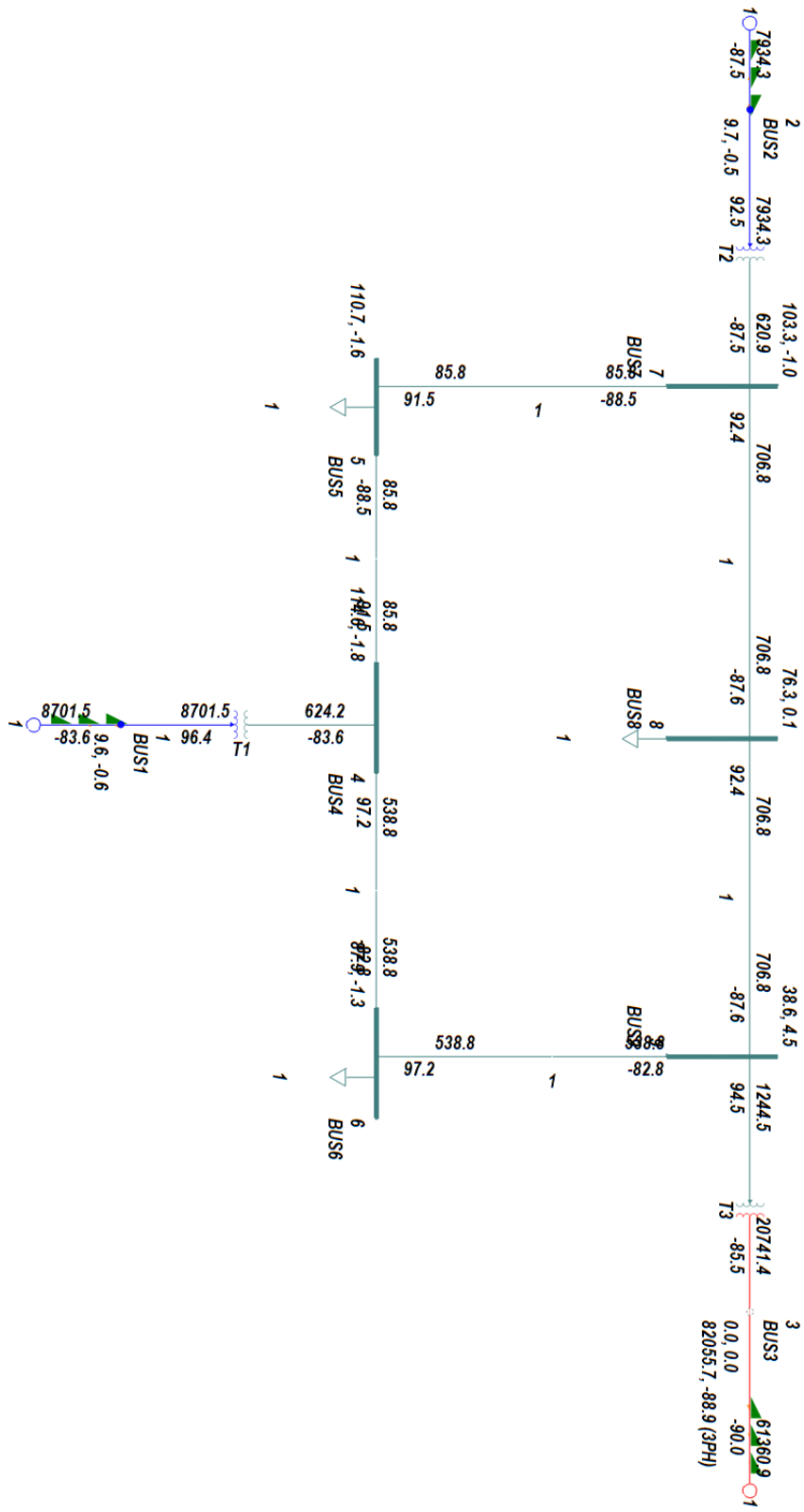
Εικόνα 12: Συνολικά ρεύματα βραχυκύκλωσης για κάθε ζυγό έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα



Εικόνα 13: Συνεισφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον ζυγό 1 έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα

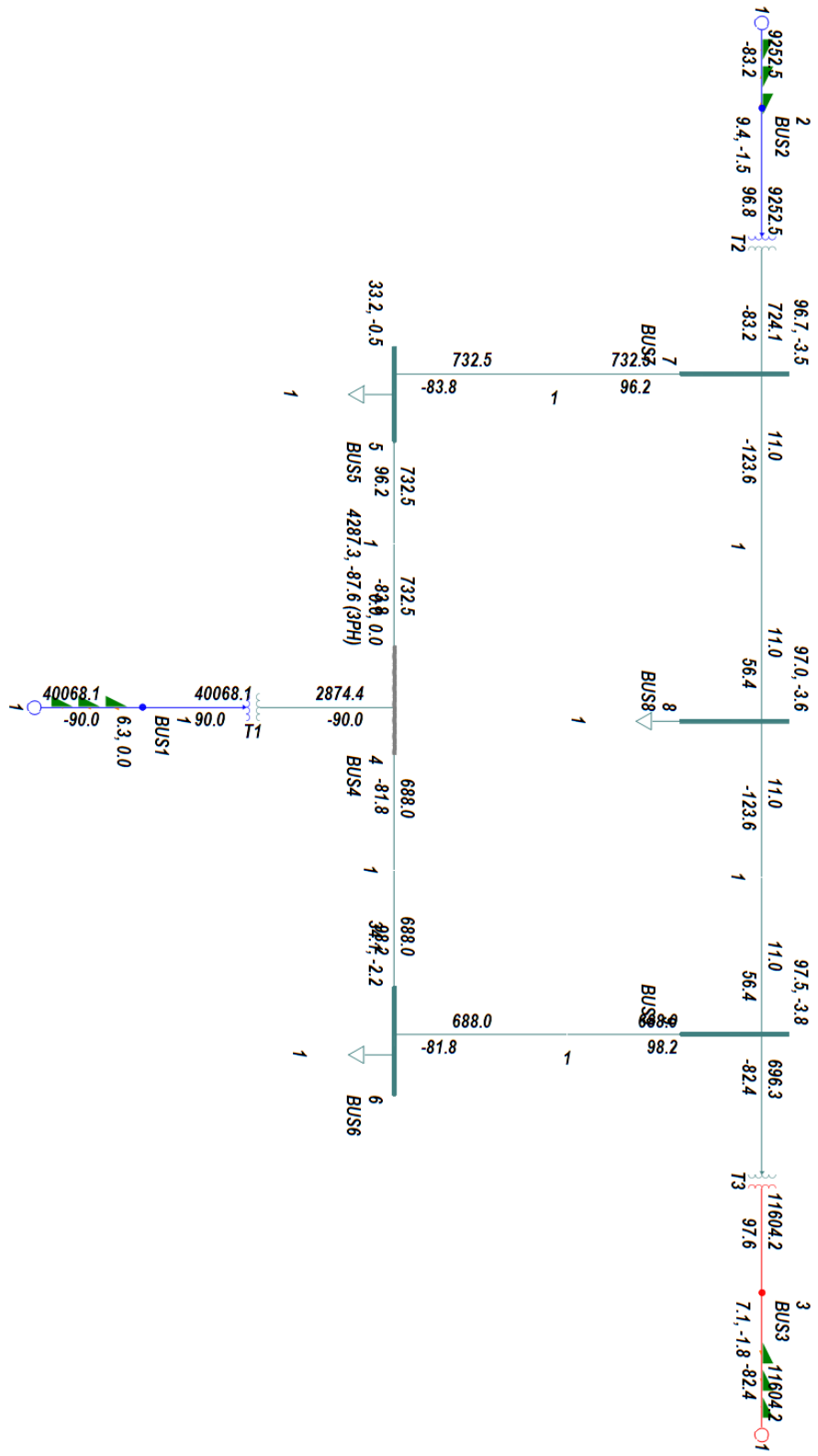


Εικόνα 14: Συνεισφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον ζυγό 2 έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα

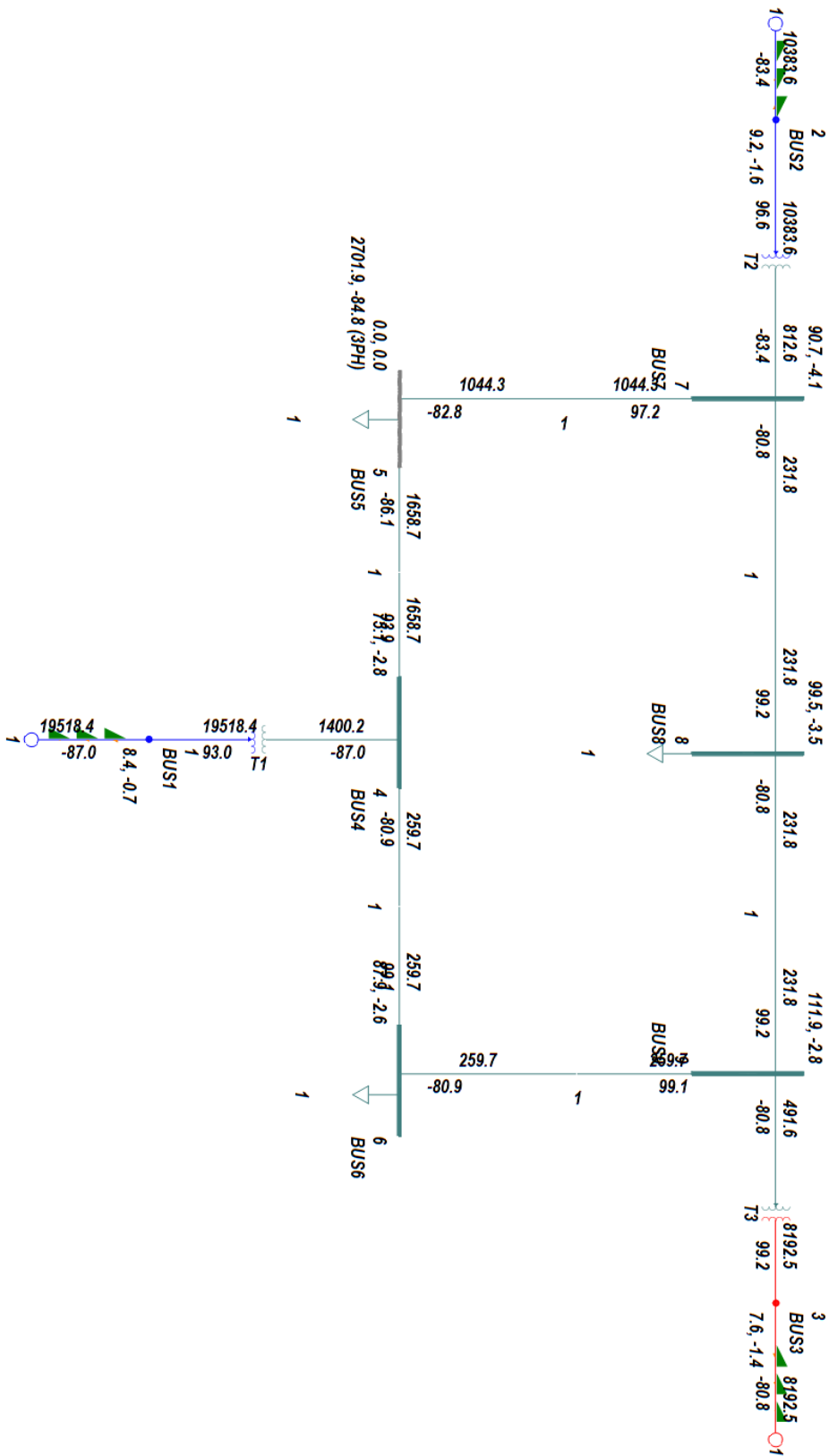


Εικόνα 15: Συνεισφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον ζυγό 3 έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα

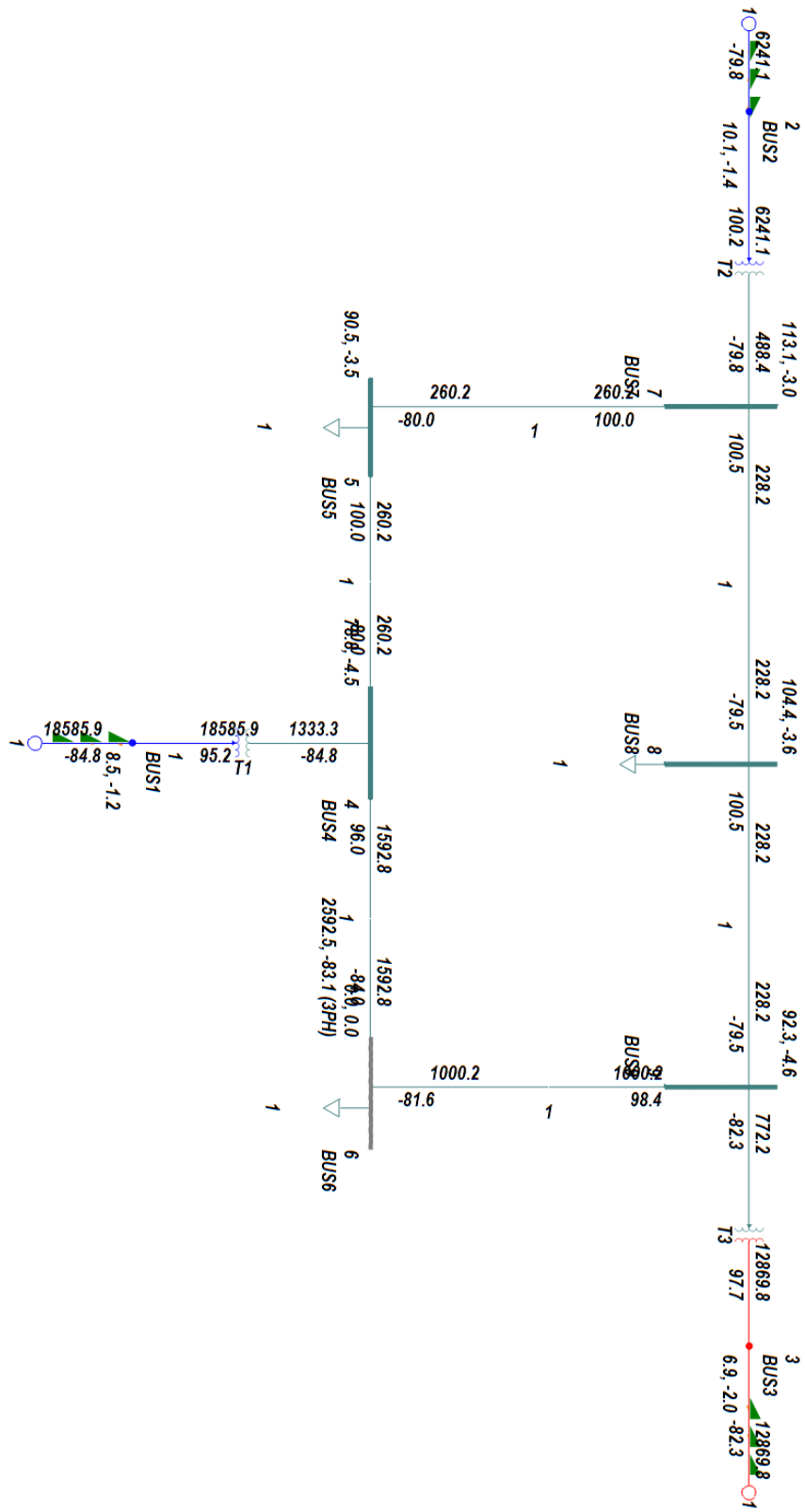




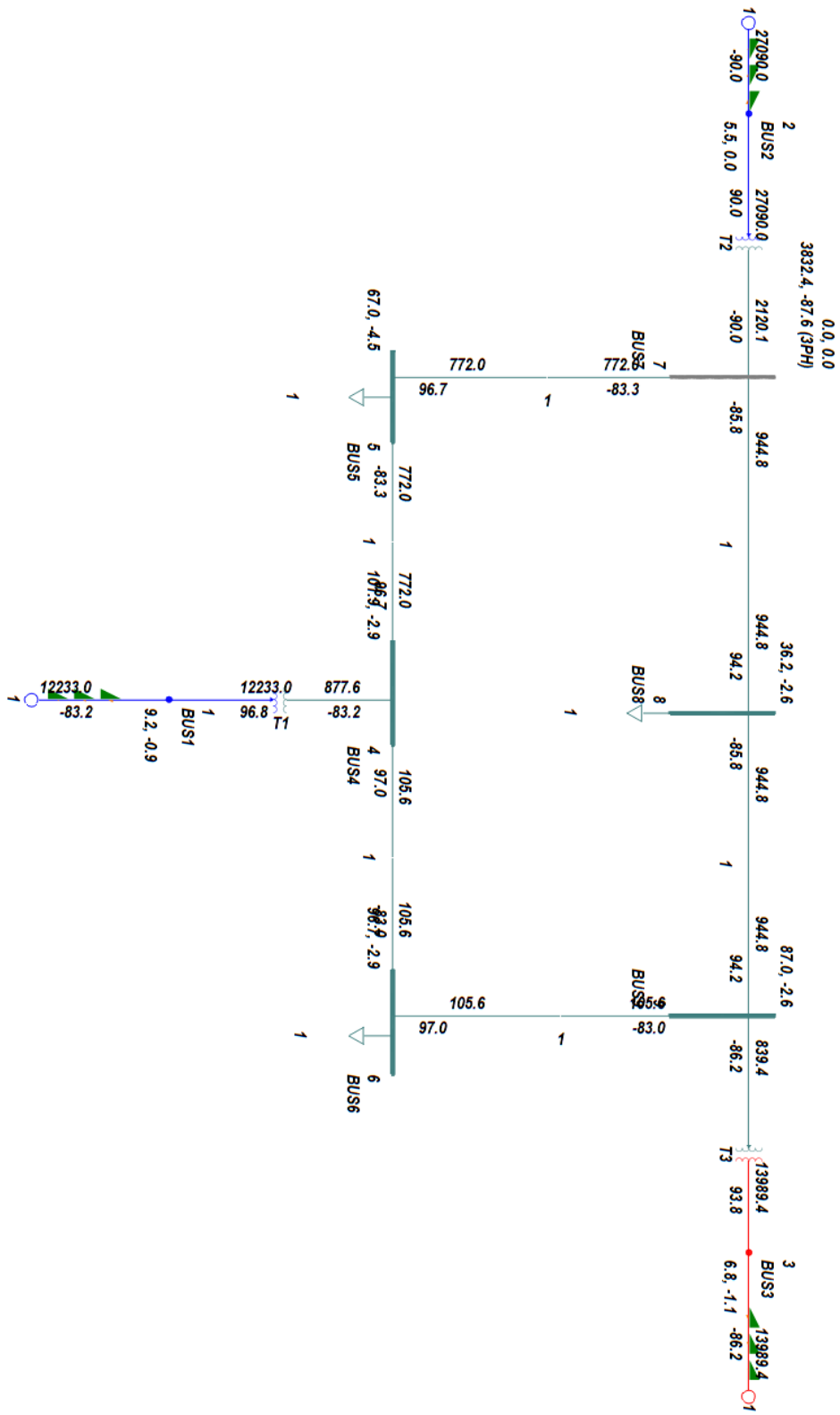
Εικόνα 16: Συνεισφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον ζυγό 4 έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα



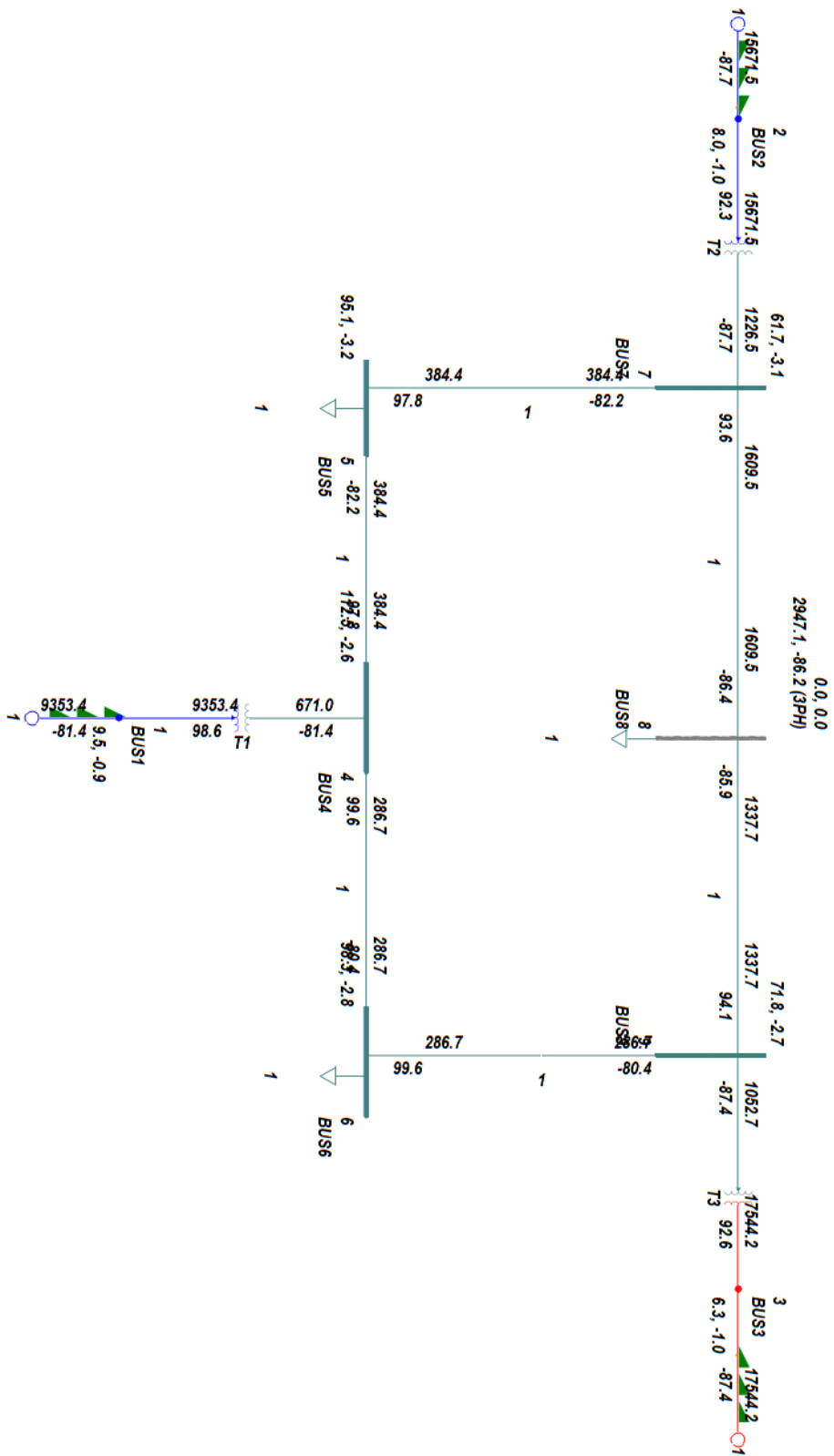
Εικόνα 17: Συνεισφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον ζυγό 5 έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα



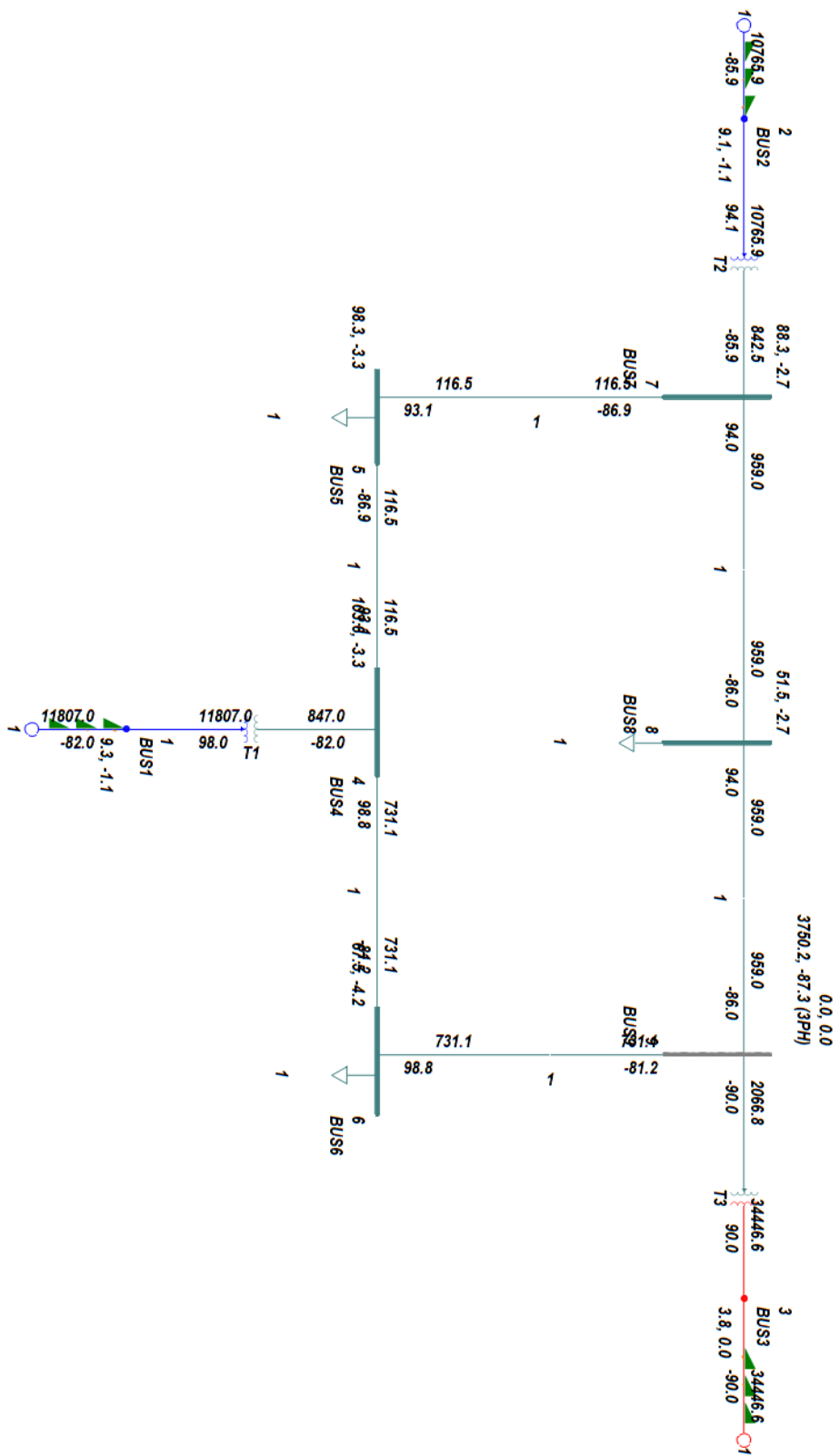
Εικόνα 18: Συνεισφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον ζυγό 6 έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα



Εικόνα 19: Συνεισφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον ζυγό 7 έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα



Εικόνα 20: Συνεισφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον ζυγό 8 έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα



Εικόνα 21: Συνεισφορά ρευμάτων βραχυκύκλωσης στον ζυγό 9 έπειτα από συμμετρικό τριφασικό σφάλμα

#### 4.5 Μεταβατική ευστάθεια για το δίκτυο των 9 ζυγών

Η μεταβατική ευστάθεια του δικτύου πραγματοποιήθηκε με σκοπό την ανάδειξη της συμπεριφοράς του συστήματος σε περιπτώσεις σφαλμάτων. Τα σφάλματα πραγματοποιήθηκαν στους ζυγούς 4,7 και 8 και η διαδικασία που ακολουθήθηκε 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 χρονική διάρκεια παραμονής του σφάλματος δεν ήταν συγκεκριμένη καθώς σκοπός μας ήταν η εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης του σφάλματος. Για το λόγο αυτό στις προσομοιώσεις που έγιναν η χρονική διάρκεια παραμονής του σφάλματος αυξανόταν ή μειωνόταν με τη μέθοδο της διχοτόμησης έτσι ώστε να βρεθεί ο κρίσιμος χρόνος. Αυτό γινόταν προφανές παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις των γωνιών των γεννητριών στις οποίες βρισκόταν το χρονικό σημείο στο οποίο έστω μία ή και παραπάνω γωνίες γεννητριών απέκλιναν από τις υπόλοιπες.

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. Τα γραφήματα της συχνότητας, της ισχύος, της άεργου ισχύος και της τάσης παρουσιάζονται σε κάθε περίπτωση για δοκιμή κατά την οποία το σύστημα παραμένει ευσταθές και όχι για αυτή στην οποία αποσταθεροποιείται.

#### 4.5.1 Μεταβατική ευστάθεια του συστήματος μετά από σφάλμα στη γραμμή 7-5 κοντά στο ζυγό 7

Λειτουργία χωρίς το σφάλμα: 1sec

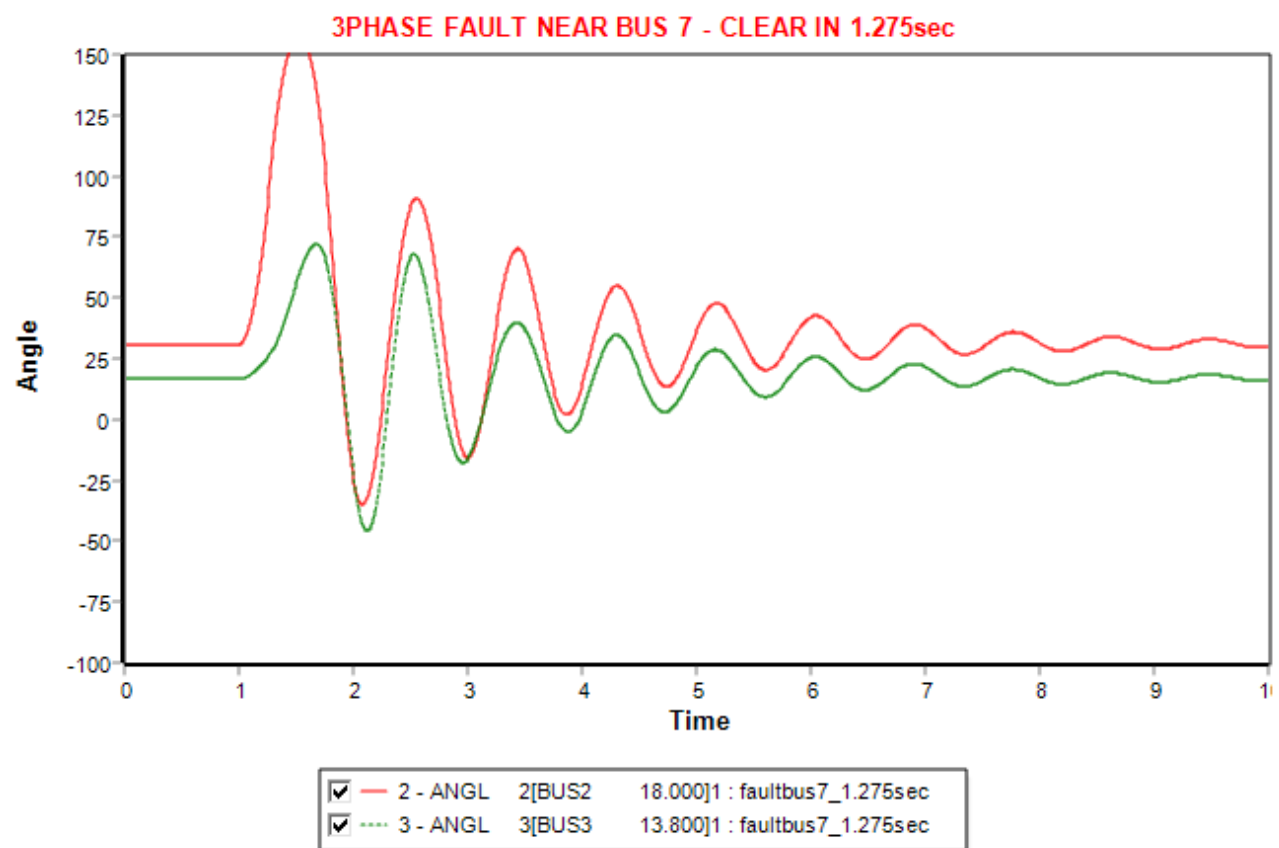
Εφαρμογή σφάλματος στο: 1sec

Γραμμή 7-5 εκτός λειτουργίας: 1.275sec

Εκκαθάριση σφάλματος: 1.275sec

Επαναφορά γραμμής 7-5 εντός λειτουργίας: 1.775sec

Λειτουργία έως: 10sec



Εικόνα 22: Σφάλμα στη γραμμή 7-5 κοντά στο ζυγό 7. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1275msec. Γωνίες ισχύος γεννητριών (Γωνία αναφοράς η γωνία της γεννήτριας στο ζυγό 1).



Λειτουργία χωρίς το σφάλμα: 1sec

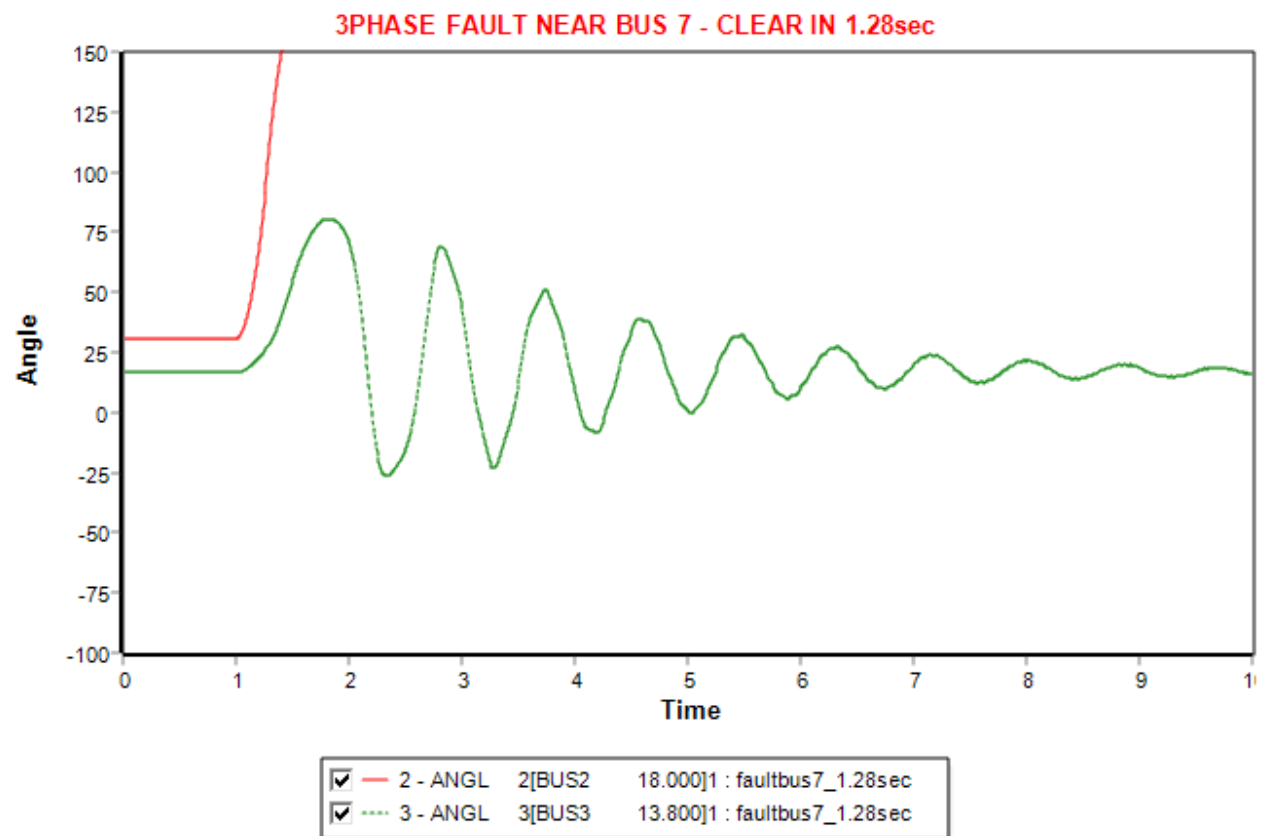
Εφαρμογή σφάλματος στο: 1sec

Γραμμή 7-5 εκτός λειτουργίας: 1.28sec

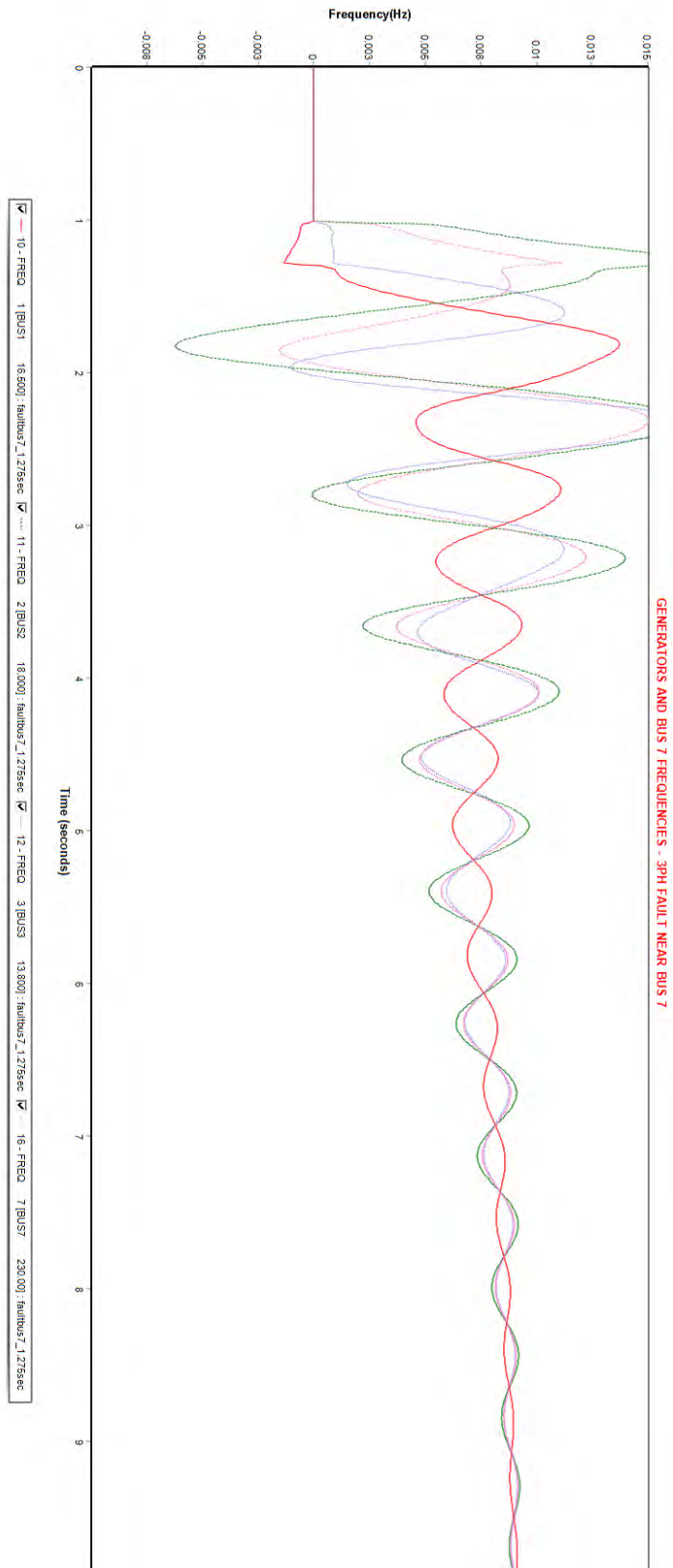
Εκκαθάριση σφάλματος: 1.28sec

Επαναφορά γραμμής 7-5 εντός λειτουργίας: 1.78sec

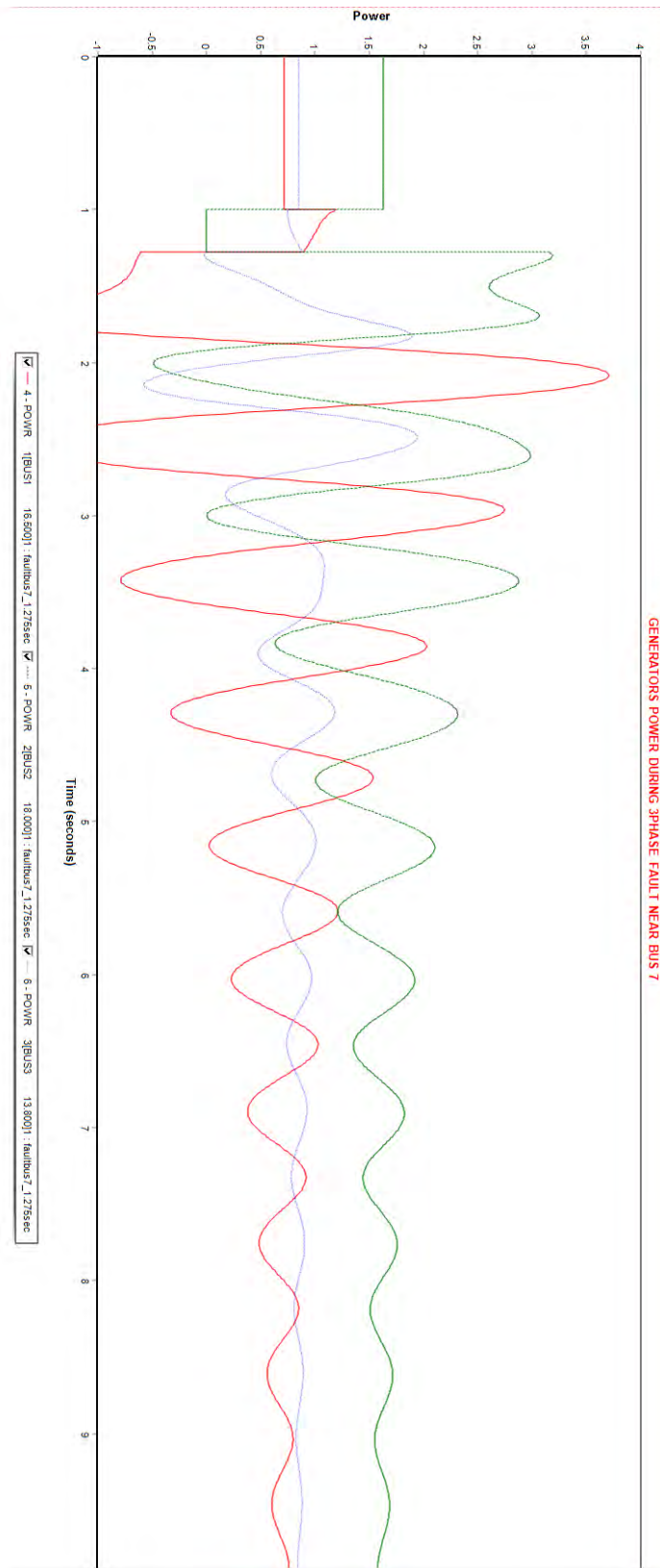
Λειτουργία έως: 10sec



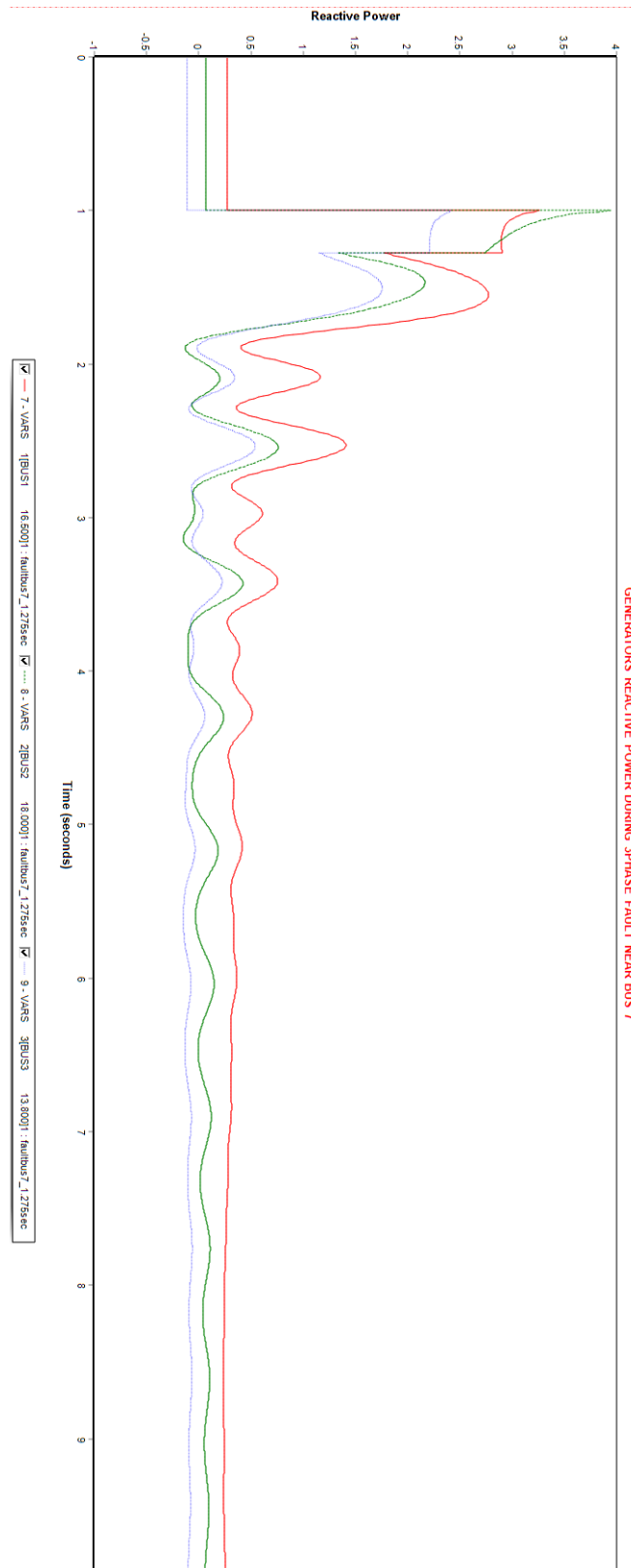
Εικόνα 23: Σφάλμα στη γραμμή 7-5 κοντά στο ζυγό 7. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1280msec. Γωνίες ισχύος γεννητριών (Γωνία αναφοράς η γωνία της γεννήτριας στο ζυγό 1).



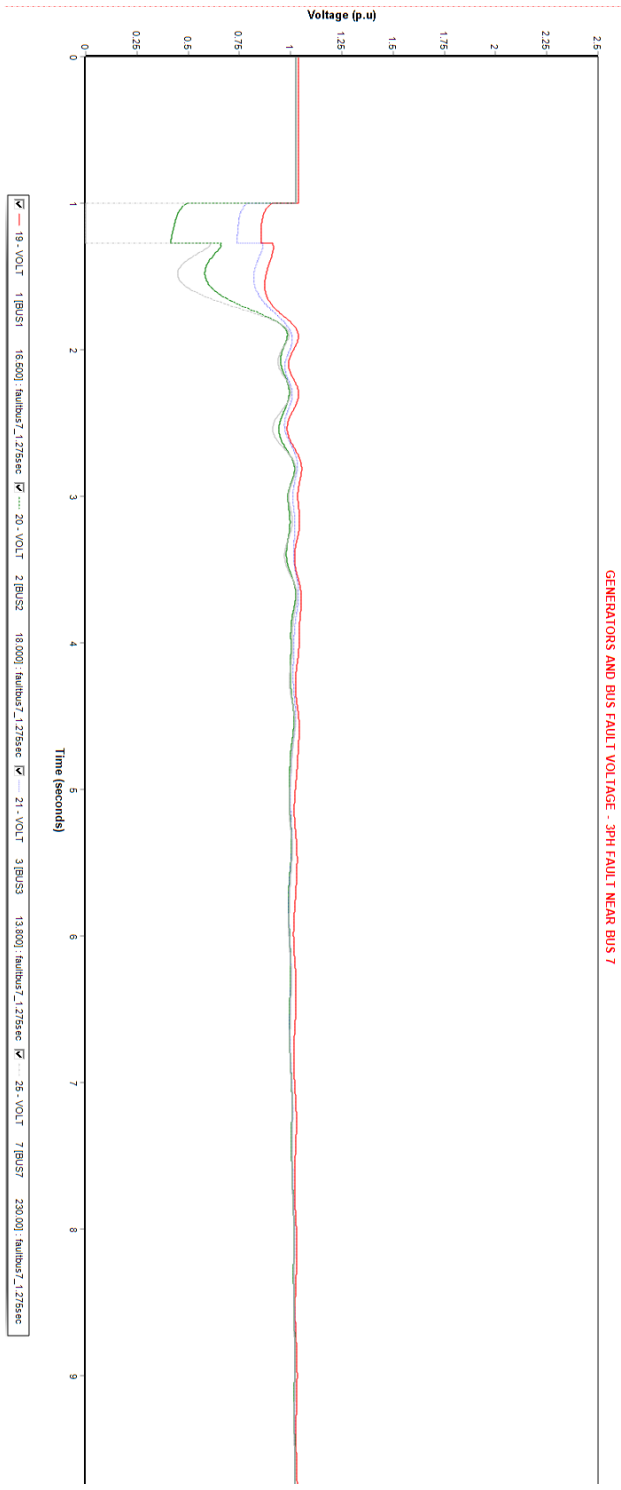
Εικόνα 24: Σφάλμα στη γραμμή 7-5 κοντά στο ζυγό 7. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1275msec. Συχνότητα στους ζυγούς 1,2,3,7 σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 25: Σφάλμα στη γραμμή 7-5 κοντά στο ζυγό 7. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1275msec. Ισχύς στους ζυγούς 1,2,3 σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 26: Σφάλμα στη γραμμή 7-5 κοντά στο ζυγό 7. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1275msec. Άεργος ισχύς στους ζυγούς 1,2,3 σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 27: Σφάλμα στη γραμμή 7-5 κοντά στο ζυγό 7. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1275msec. Τάση στους ζυγούς 1,2,3, 7 σε σχέση με το χρόνο.

#### 4.5.2 Μεταβατική ευστάθεια του συστήματος μετά από σφάλμα στη γραμμή 4-6 κοντά στο ζυγό 4

Λειτουργία χωρίς το σφάλμα: 1sec

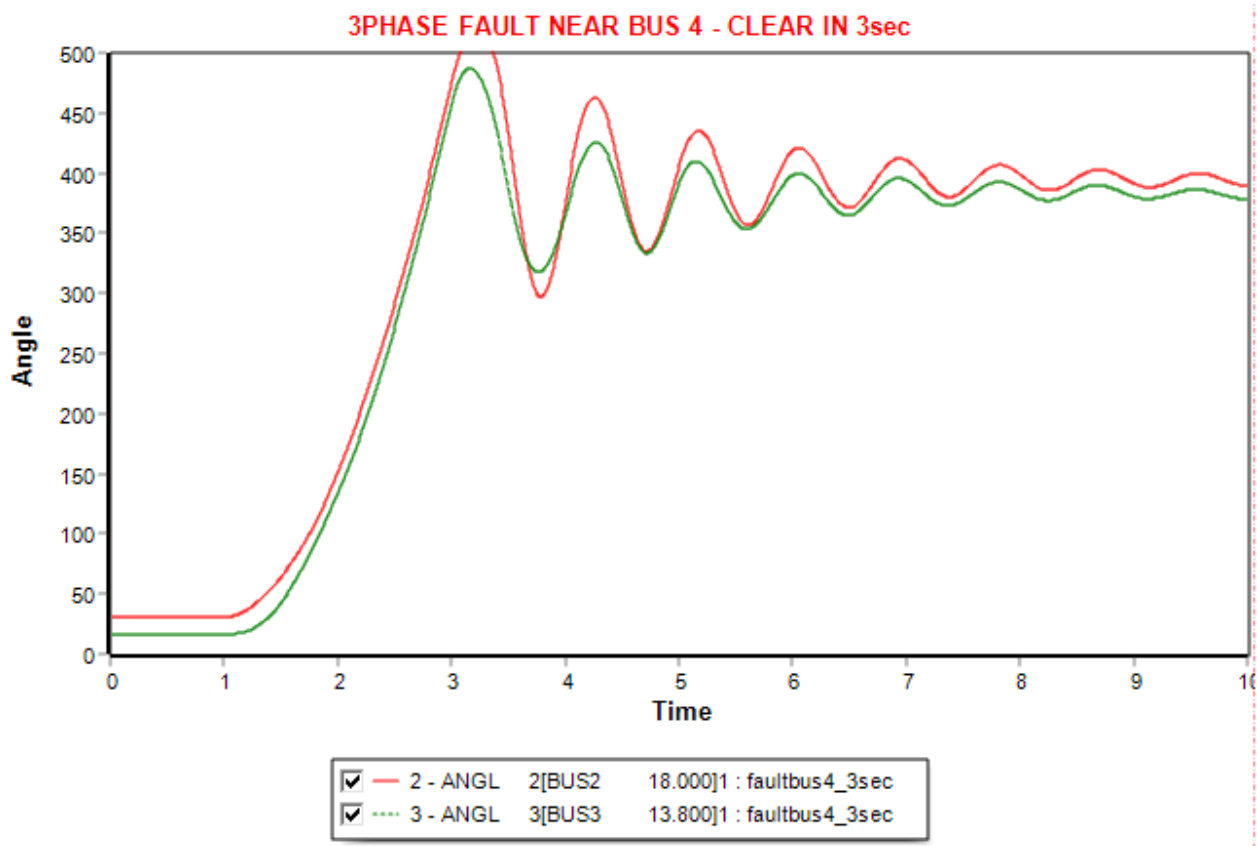
Εφαρμογή σφάλματος στο: 1sec

Γραμμή 4-6 εκτός λειτουργίας: 3sec

Εκκαθάριση σφάλματος: 3sec

Επαναφορά γραμμής 4-6 εντός λειτουργίας: 3.5sec

Λειτουργία έως: 10sec



Εικόνα 28: Σφάλμα στη γραμμή 4-6 κοντά στο ζυγό 4. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 3000msec. Γωνίες ισχύος γεννητριών (Γωνία αναφοράς η γωνία της γεννήτριας στο ζυγό 1).

Λειτουργία χωρίς το σφάλμα: 1sec

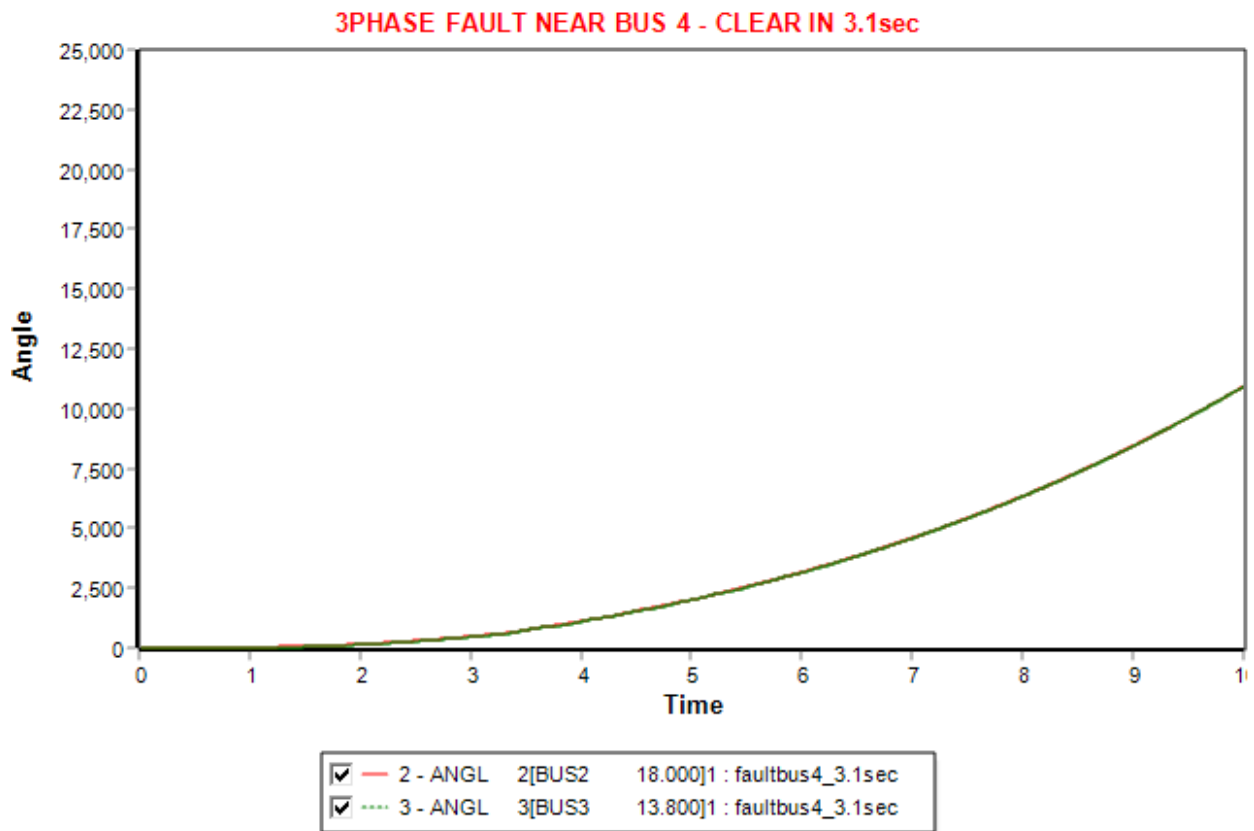
Εφαρμογή σφάλματος στο: 1sec

Γραμμή 4-6 εκτός λειτουργίας: 3.1sec

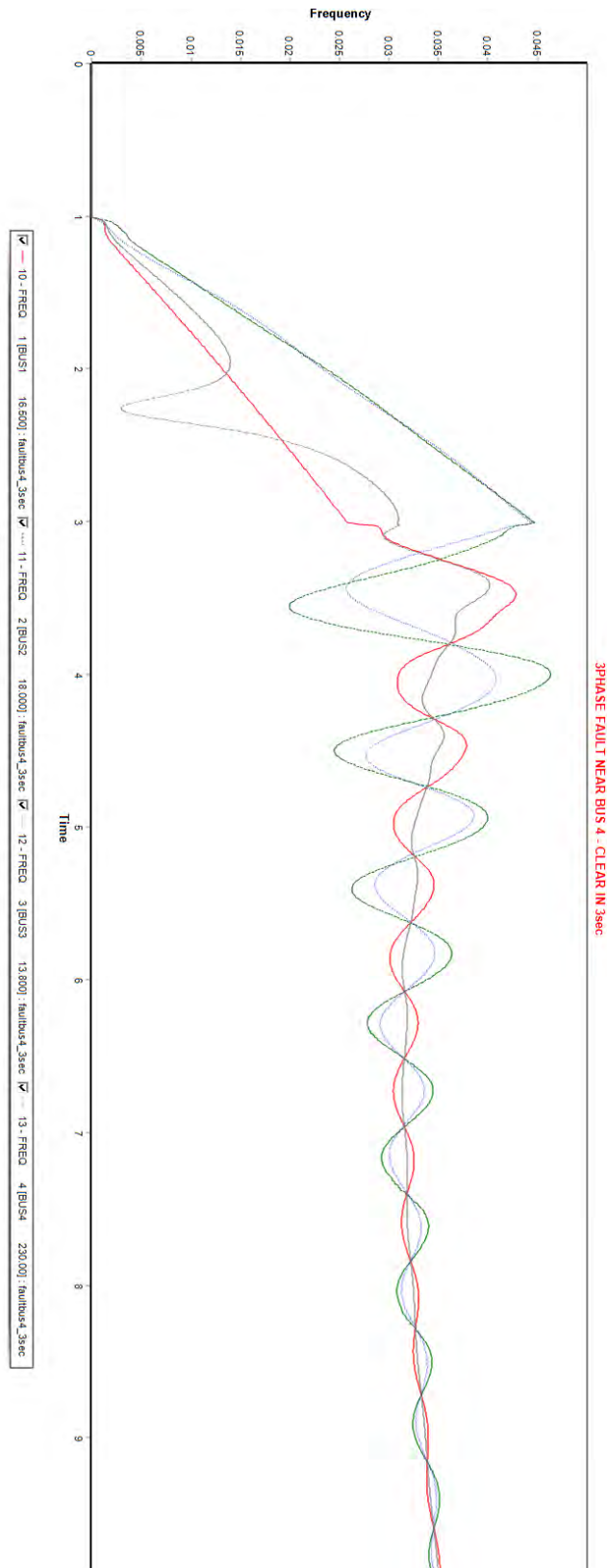
Εκκαθάριση σφάλματος: 3.1sec

Επαναφορά γραμμής 4-6 εντός λειτουργίας: 3.6sec

Λειτουργία έως: 10sec

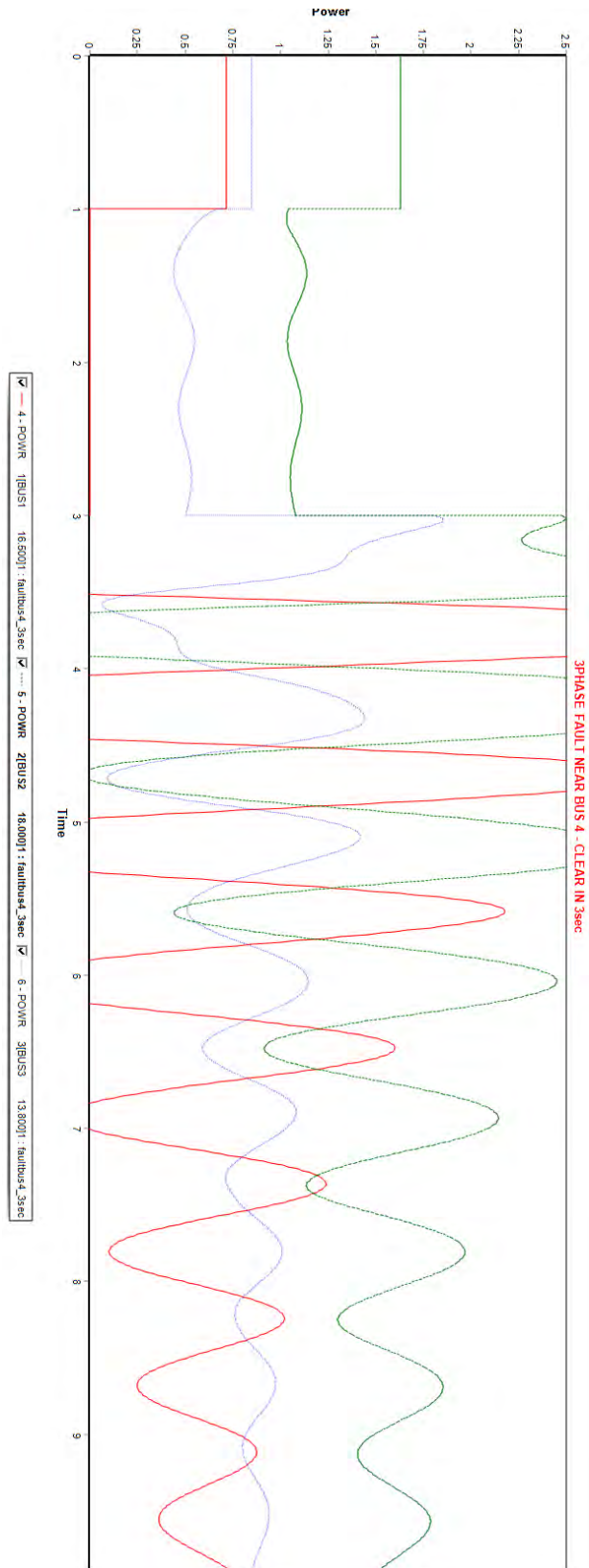


Εικόνα 29: Σφάλμα στη γραμμή 4-6 κοντά στο ζυγό 4. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 3100msec. Γωνίες ισχύος γεννητριών (Γωνία αναφοράς η γωνία της γεννήτριας στο ζυγό 1).

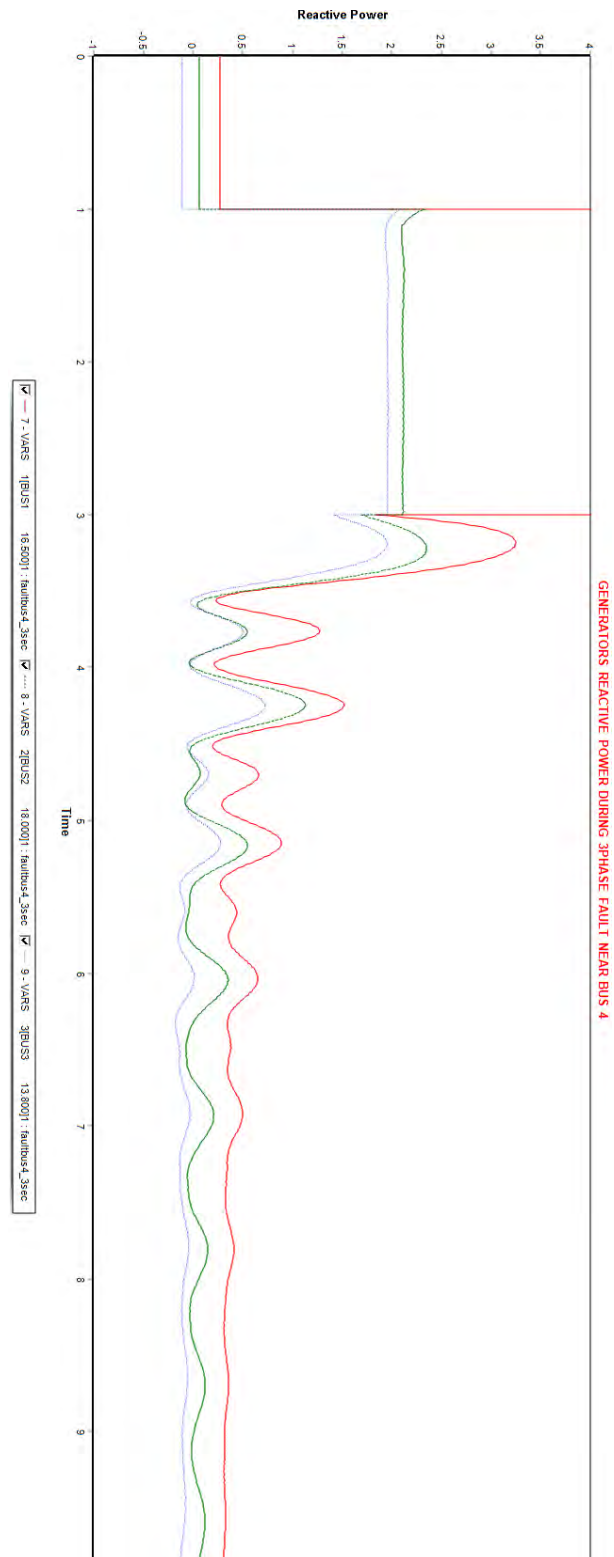


Εικόνα 30: Σφάλμα στη γραμμή 4-6 κοντά στο ζυγό 4. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 3000msec. Συχνότητα στους ζυγούς 1,2,3,4 σε σχέση με το χρόνο.

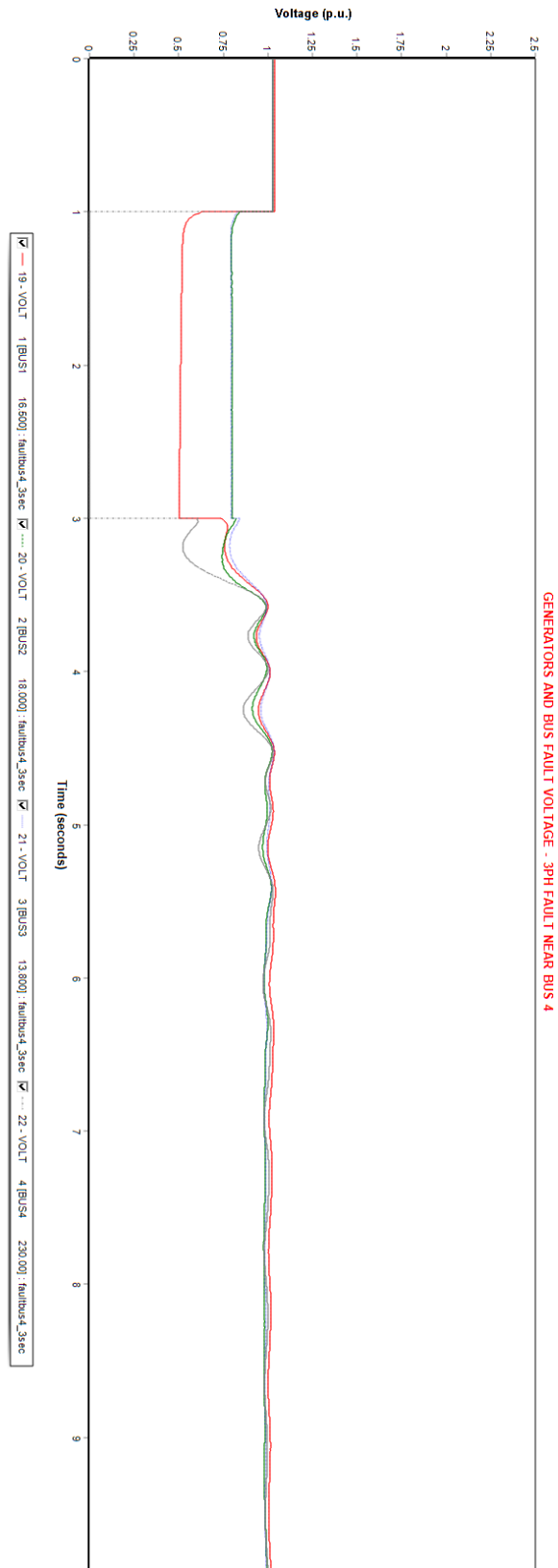




Εικόνα 31: Σφάλμα στη γραμμή 4-6 κοντά στο ζυγό 4. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 3000msec. Ισχύς στους ζυγούς 1,2,3 σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 32: Σφάλμα στη γραμμή 4-6 κοντά στο ζυγό 4. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 3000msec. Άεργος ισχύς στους ζυγούς 1,2,3 σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 33: Σφάλμα στη γραμμή 4-6 κοντά στο ζυγό 4. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 3000msec. Τάση στους ζυγούς 1,2,3,4 σε σχέση με το χρόνο.

#### 4.5.3 Μεταβατική ευστάθεια του συστήματος μετά από σφάλμα στη γραμμή 7-8 κοντά στο ζυγό 8

Λειτουργία χωρίς το σφάλμα: 1sec

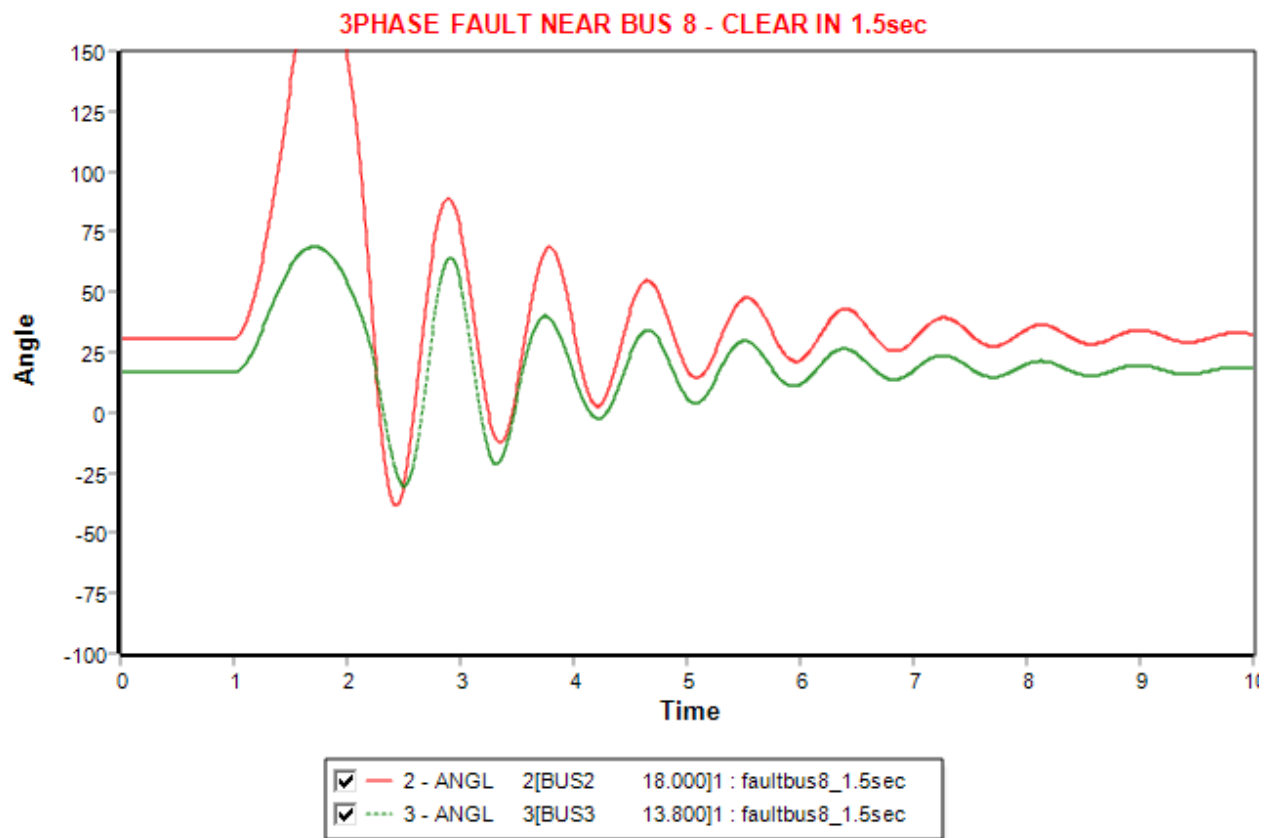
Εφαρμογή σφάλματος στο: 1sec

Γραμμή 7-8 εκτός λειτουργίας: 1.5sec

Εκκαθάριση σφάλματος: 1.5sec

Επαναφορά γραμμής 7-8 εντός λειτουργίας: 2sec

Λειτουργία έως: 10sec



Εικόνα 34: Σφάλμα στη γραμμή 7-8 κοντά στο ζυγό 8. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1500msec. Γωνίες ισχύος γεννητριών (Γωνία αναφοράς η γωνία της γεννήτριας στο ζυγό 1).

Λειτουργία χωρίς το σφάλμα: 1sec

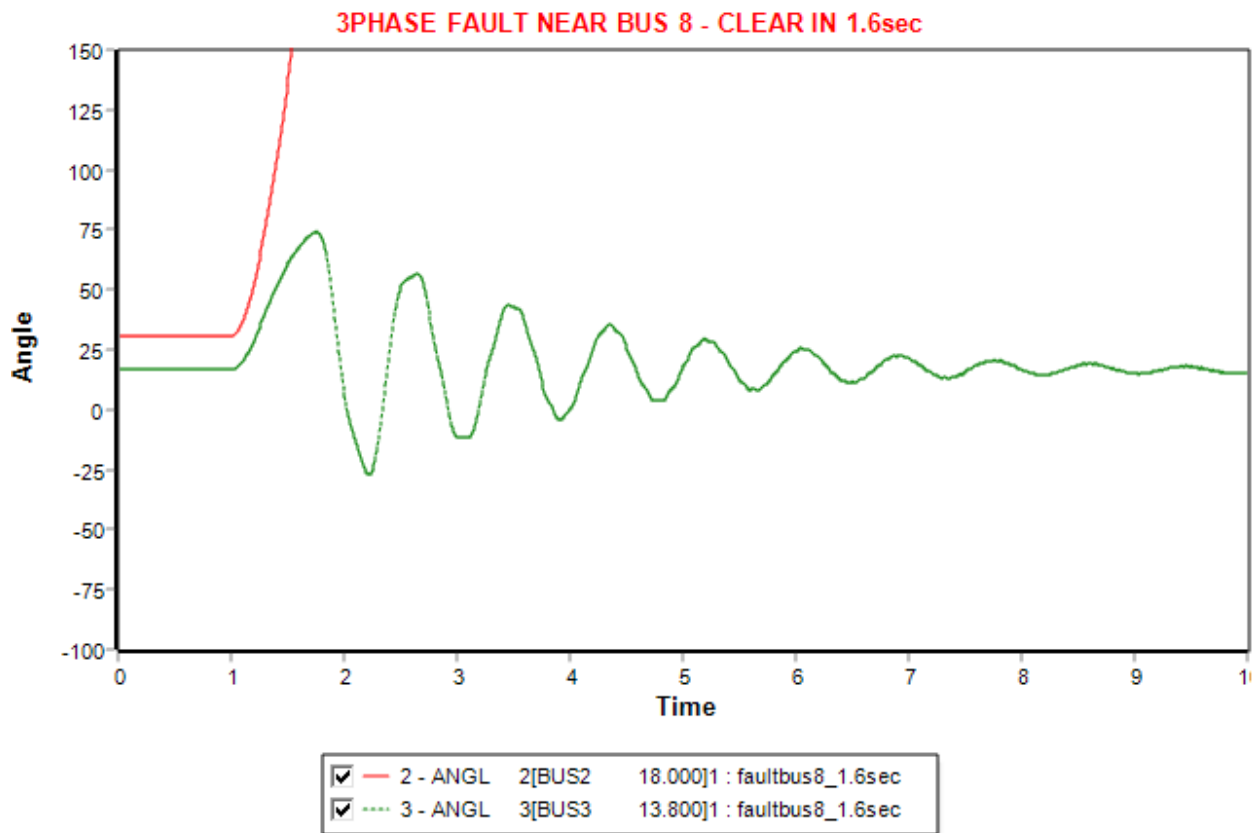
Εφαρμογή σφάλματος στο: 1sec

Γραμμή 7-8 εκτός λειτουργίας: 1.6sec

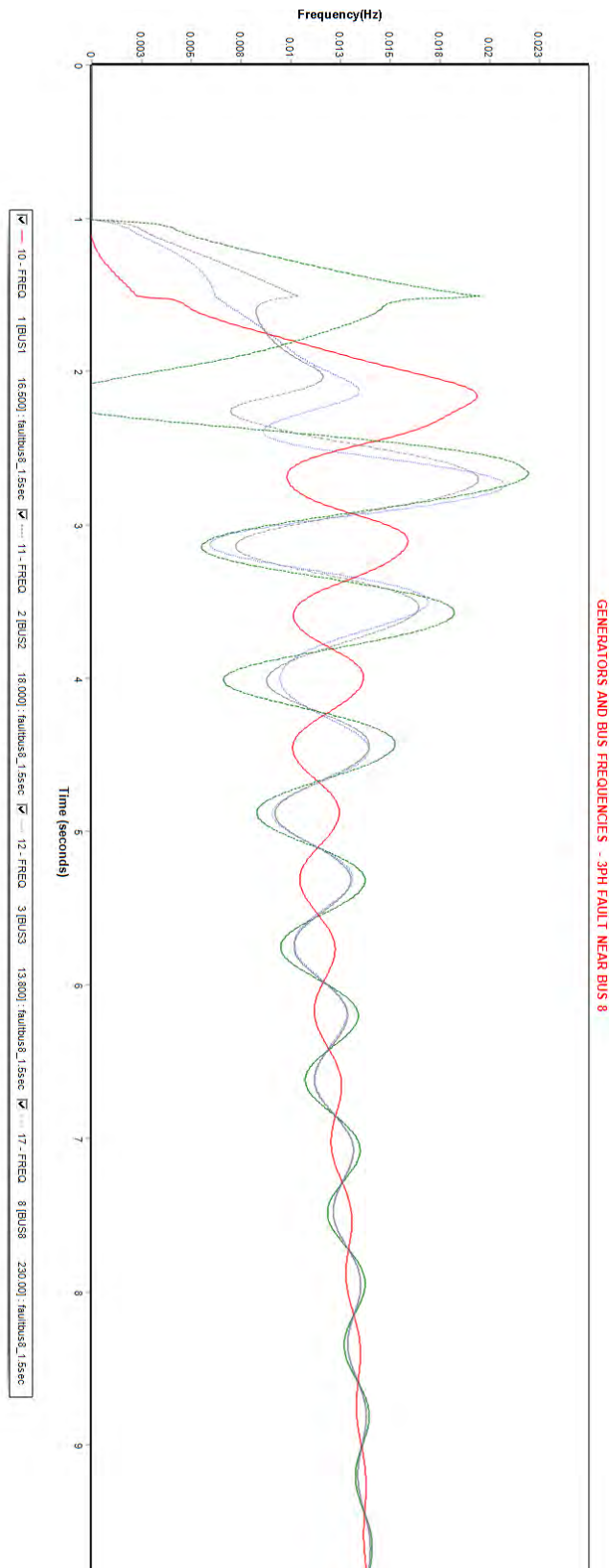
Εκκαθάριση σφάλματος: 1.6sec

Επαναφορά γραμμής 7-8 εντός λειτουργίας: 2.1sec

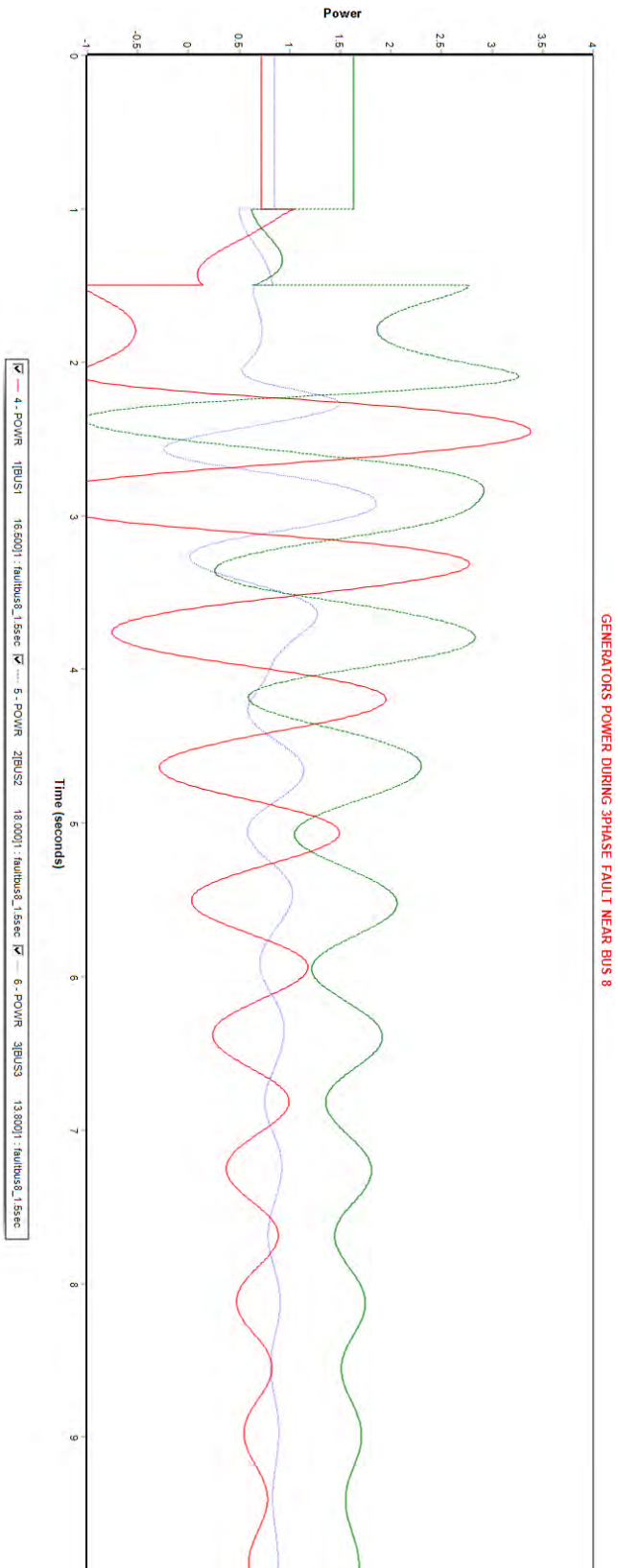
Λειτουργία έως: 10sec



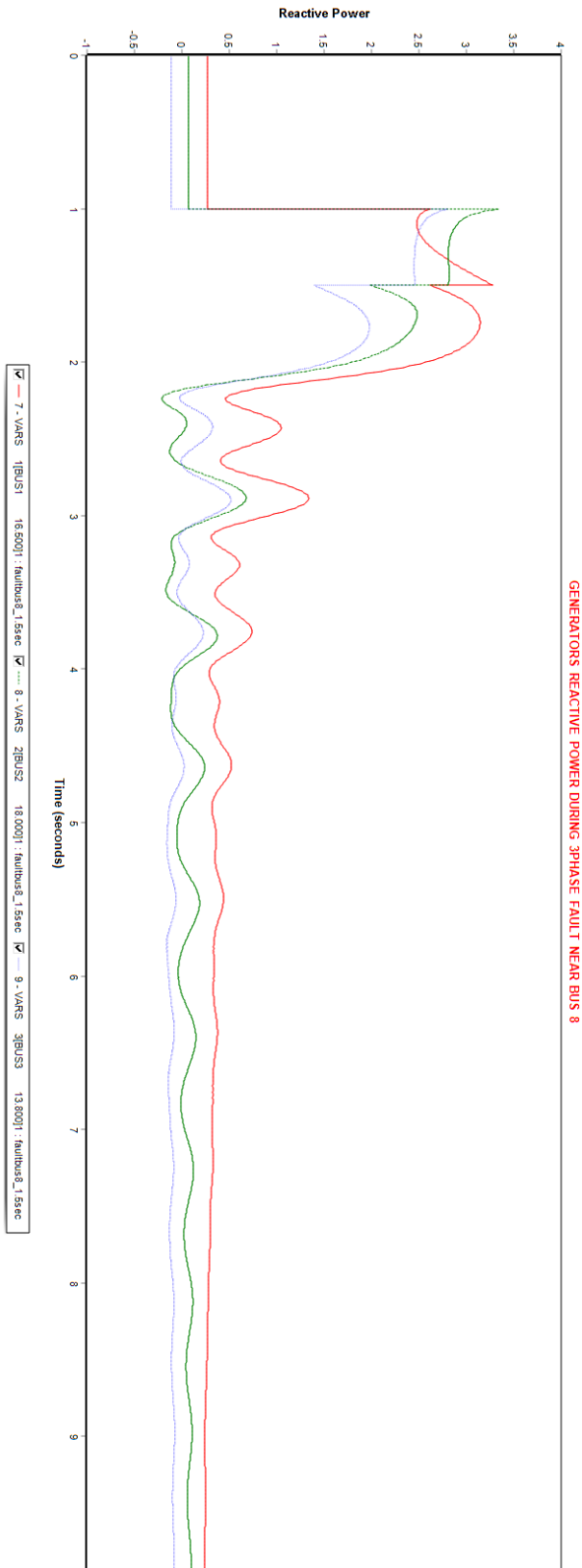
Εικόνα 35: Σφάλμα στη γραμμή 7-8 κοντά στο ζυγό 8. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1600msec. Γωνίες ισχύος γεννητριών (Γωνία αναφοράς η γωνία της γεννήτριας στο ζυγό 1).



Εικόνα 36: Σφάλμα στη γραμμή 7-8 κοντά στο ζυγό 8. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1500msec. Συχνότητα στους ζυγούς 1,2,3,8 σε σχέση με το χρόνο.

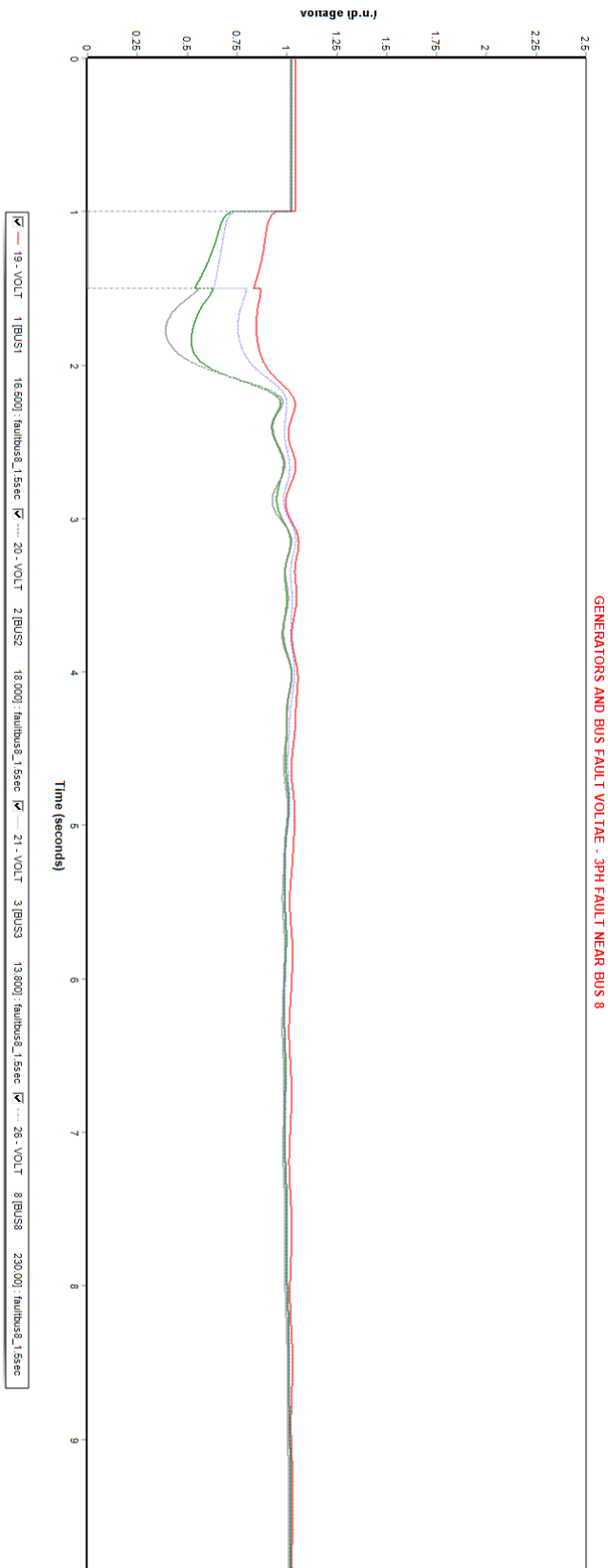


Εικόνα 37: Σφάλμα στη γραμμή 7-8 κοντά στο ζυγό 8. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1500msec. Ισχύς στους ζυγούς 1,2,3 σε σχέση με το χρόνο.



Εικόνα 38: Σφάλμα στη γραμμή 7-8 κοντά στο ζυγό 8. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1500msec. Άεργος ισχύς στους ζυγούς 1,2,3 σε σχέση με το χρόνο.





Εικόνα 39: Σφάλμα στη γραμμή 7-8 κοντά στο ζυγό 8. Κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης 1500msec. Τάση στους ζυγούς 1,2,3,8 σε σχέση με το χρόνο.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα

Η μελέτη των διαγραμμάτων που παρουσιάζονται στο κεφαλαίο 4 είναι ιδιαίτερα σημαντική για τους μηχανικούς έτσι ώστε να γνωρίζουν άμεσα την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα το οποίο διαχειρίζονται καθώς και τα όρια στα οποία μπορεί να λειτουργήσει σε περιπτώσεις μεγάλων μεταβολών.

Αρχικά μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου που πραγματοποιήθηκε, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε ποσότητες που αφορούν τα στοιχεία του εκάστοτε δικτύου. Έχοντας ως αρχή τη γνώση των μέτρων και των γωνιών των τάσεων δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού όλων των ποσοτήτων που προσδιορίζουν το δίκτυο στην σταθερή του κατάσταση, την συμπεριφορά και το ποσοστό φόρτισής του, οι οποίες αξιοποιούνται και για την πραγματοποίηση επιπλέον μελετών όπως βραχυκυκλωμάτων ή 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. Τα ρεύματα αυτά συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερα από τα ρεύματα που εμφανίζονται σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει στην υπερφόρτιση και καταπόνηση των γραμμών και επομένως στην καταστροφή του εξοπλισμού ενός δικτύου. Για το λόγο αυτό είναι αρκετά σημαντικό να γνωρίζουμε τις τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης έτσι ώστε να 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 έγινε με σκοπό την εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης των σφαλμάτων. Έγιναν δοκιμές για διαφορετικούς χρόνους εκκαθάρισης για κάθε σφάλμα έτσι ώστε να βρεθεί ο κρίσιμος χρόνος κατά τον οποίο το σύστημα χάνει την ευστάθειά του και οι γεννήτριες αποσυγχρονίζονται. Οι γραφικές παραστάσεις της συχνότητας, της ισχύος, των τάσεων και της άεργου ισχύος που παρουσιάστηκαν σχετίζονται με το χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος κατά τον οποίο το δίκτυο διατηρεί την ευστάθειά του. Παρατηρώντας τις παραστάσεις αυτές διαπιστώνουμε τις ταλαντώσεις στη συχνότητα του δικτύου, τις βυθίσεις των τάσεων και την κακή ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Όλα τα στοιχεία αυτά και κυρίως οι χρόνοι στους οποίους ένα σύστημα δύναται να διατηρήσει την ευστάθεια του έπειτα από ένα σφάλμα, μας επιτρέπουν να σχεδιάζουμε σωστά ενεργειακά συστήματα και να ρυθμίζουμε κατάλληλα τους χρόνους αντίδρασης των διακοπών έτσι ώστε να το σύστημα να είναι ευσταθές.

Η γνώση όλων των παραπάνω στοιχείων μέσω των μελετών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας βοηθούν τους μηχανικούς να δημιουργούν αξιόπιστα δίκτυα που θα παρέχουν με ποιότητα ενέργεια στους καταναλωτές.

## Βιβλιογραφία

- [1] N. Βοβός και Γ. Γιαννακόπουλος, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Ιούλιος 2008
- [2] N. Βοβός και Γ. Γιαννακόπουλος, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Ιούλιος 2008
- [3] Kundur Prabha, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994
- [4] Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηλεκτρικές Μηχανές, Εκδόσεις Τζιόλα, 2015
- [5] Γ. Βασιλά, Ανάλυση και έλεγχος σε σφάλματα σε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2016
- [6] Thomas Edison Muckers: Your Blog for Everything Edison, Everyday. (2019). Thomas Edison Lightbulb. [online] Available at: <http://www.edisonmuckers.org/thomas-edison-lightbulb/> [Accessed 29 Jun. 2019].
- [7] Σημειώσεις μαθήματος  
<http://eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHX135/%CE%A3%CE%97%CE%95%20%CE%99%20-%20%CE%92%CE%BF%CE%B7%CE%B8%CE%B7%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C/1a.%20%CE%A3%CE%97%CE%95%20%CE%99%20-%20%CE%95%CE%B9%CF%83%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE.pdf>
- [8] Admie.gr. (2019). Αρχική | ΑΔΜΗΕ. [online] Available at: <http://www.admie.gr/> [Accessed 29 Jun. 2019].
- [9] EEP - Electrical Engineering Portal. (2019). 11 Major Causes of Power System Failures. [online] Available at: <https://electrical-engineering-portal.com/11-major-causes-of-power-system-failures> [Accessed 29 Jun. 2019].