



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ

ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Ζαρίδης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ

ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Ζαρίδης

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2020



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER
ENGINEERING**

**ANALYSIS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH WIND
POWER GENERATION**

Diploma Thesis

Zaridis Vasileios

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

Volos 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, Δημήτριο Μπαργιώτα, για την ουσιαστική συνεργασία και πολύτιμη καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και φίλους μου για την στήριξη και την κατανόηση που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

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

Ο/Η Δηλών/ούσα

(Υπογραφή)

Ζαρίδης Βασίλειος

Ημερομηνία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, πραγματοποιείται η Ανάλυση ενός Συστήματος Ενέργειας και συγκεκριμένα γίνεται μελέτη στη Μόνιμη και στη Μεταβατική λειτουργία του. Η προσέγγιση αυτή ξεκινά με το θεωρικό υπόβαθρο που απαιτεί η ανάλυση ενός τέτοιου πολύπλοκου συστήματος. Συνεχίζει μέσω πειραματικών διεργασιών με χρήση του λογισμικού Siemens PSS/E με γνώμονα τη θεωρεία και στόχο την καλύτερη κατανόηση μέσω πολλών επαναλαμβανόμενων πειραμάτων.

Αρχικά το 1^ο Κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή, το οποίο πραγματεύεται τη μορφολογία ενός ΣΗΕ, δηλαδή, αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο είναι κατασκευασμένο και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των σημαντικότερων δομικά κομματιών που το απαρτίζουν.

Το 2^ο Κεφάλαιο πραγματεύεται την Ανάλυση Ροής Φορτίου, από την κατάστρωση των αντίστοιχων εξισώσεων, μέχρι την επίλυσή τους με τις αριθμητικές μεθόδους Gauss – Seidel και Newton – Raphson, με επεξήγηση των αντίστοιχων αλγορίθμων.

Το 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζει τη μελέτη συμμετρικών και ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, αναδεικνύοντας την κατάλληλη μεθοδολογία προσέγγισής τους.

Το 4^ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, με έμφαση στο Κριτήριο των Ίσων Εμβαδών για τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας.

Στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται χρήση του λογισμικού Siemens PSS/E για τη μελέτη ενός συστήματος 9 ζυγών της IEEE και συγκεκριμένα της μόνιμης και μεταβατικής λειτουργίας του. Αρχικά, παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα της ροής φορτίου. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα τριφασικών βραχυκυκλωμάτων σε συγκεκριμένους ζυγούς. Τέλος, μέσω αρκετών προσομοιώσεων πραγματοποιείται ο υπολογισμός κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφαλμάτων.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο αφού συλλεχτούν σημαντικά δεδομένα για την εκκαθάριση των σφαλμάτων, γίνεται μια προσπάθεια αυτοματοποίησης μέσω τεχνικών machine learning της εύρεσης του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης, βελτιώνοντας την χρονοβόρα διαδικασία.

ABSTRACT

In the present Diploma Thesis, the Analysis of an Energy System is carried out and specifically a study is made in its Steady State and Transient Stability. This approach begins with the theoretical background which required analyzing such a complex system. It continues through experimental processes using Siemens PSS / E software based on theory and aims to better understand through many repetitive experiments.

Initially, the first Chapter is the introduction, which deals with the morphology of a Electricity System, that is, it refers to the way in which it is constructed and analyzes the mode of operation of the most important structural parts that make it up.

Chapter 2 deals with Load Flow Analysis, from the creation of the corresponding equations, to their solution with the numerical methods Gauss - Seidel and Newton - Raphson, with an explanation of the corresponding algorithms.

Chapter 3 presents the study of symmetric and asymmetric short circuits, highlighting the appropriate methodology of their approach.

Chapter 4 focuses on the study of the transient stability of Electricity Systems, with an emphasis on the Equal Area Criteria for the study of transient stability.

In the 5th chapter, the Siemens PSS / E software is used for the study of a 9-bus system of IEEE and specifically of its permanent and transitional operation. Initially, the results of the load flow are presented diagrammatically. Then, the results of three-phase short circuits in specific scales are presented. Finally, through several simulations, the critical error clearance time is calculated.

Finally, in the 6th chapter, after collecting important data for the clearance of the errors, an attempt is made to automate the finding of the critical time of the error clearance through machine learning techniques.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<i>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</i>	<i>vi</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>vii</i>
<i>ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</i>	<i>viii</i>
<i>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</i>	<i>1</i>
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</i>	<i>1</i>
<i>1.1 Μορφολογία ενός ΣΗΕ</i>	<i>1</i>
<i>1.2 Σύγχρονες γεννήτριες</i>	<i>3</i>
<i>1.2.1 Περιγραφή σύγχρονης γεννήτριας</i>	<i>3</i>
<i>1.2.2 Ταχύτητα Περιστροφής</i>	<i>5</i>
<i>1.2.3 Παραγόμενη τάση</i>	<i>6</i>
<i>1.2.4 Μελέτη σύγχρονης γεννήτριας ανά φάση</i>	<i>7</i>
<i>1.2.5 Παράλληλισμός σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο</i>	<i>8</i>
<i>1.2.6 Μεταβατική συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας</i>	<i>10</i>
<i>1.3 Μετασχηματιστές</i>	<i>12</i>
<i>1.3.1 Λειτουργία μετασχηματιστή</i>	<i>12</i>
<i>1.3.2 Μετασχηματιστής στο ΣΗΕ</i>	<i>14</i>
<i>1.3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων</i>	<i>16</i>
<i>1.3.4 Απόδοση μετασχηματιστή</i>	<i>18</i>
<i>1.4 Γραμμές μεταφοράς</i>	<i>19</i>
<i>1.4.1 Περιγραφή γραμμής μεταφοράς</i>	<i>19</i>
<i>1.4.2 Κατηγορίες γραμμών μεταφοράς</i>	<i>20</i>

1.5 Φορτία	21
1.5.1 Ορισμός φορτίου	21
1.5.2 Χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού φορτίου	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	23
ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	23
2.1 Εισαγωγή στην ροή φορτίου	23
2.2 Εξισώσεις ροής φορτίου	25
2.3 Υπολογιστικές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου.	28
2.3.1 Ανάγκες για την επίλυση του προβλήματος.	28
2.3.2 Μέθοδος Gauss – Seidel.....	29
2.3.3 Μέθοδος Newton - Raphson	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	35
ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ.....	35
3.1 Εισαγωγή στην έννοια του βραχυκυκλώματος	35
3.2 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα	36
3.2.1 Ορισμός.....	36
3.2.2 Αντοχή συστήματος σε βραχυκύκλωμα.....	37
3.2.3 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης μέσω του θεωρήματος Thevenin	38
3.3 Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα	41
3.3.1 Εισαγωγή στα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα	41
3.3.2 Τρόπος μελέτης ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων	41
3.3.3 Συνθήκες φασικών ποσοτήτων βραχυκυκλωμάτων	42
3.3.4 Μετατροπή συμμετρικών συνιστωσών	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	49
ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	49

4.1 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	49
4.2 Εξίσωση ταλάντωσης	51
4.3 Μοντέλα σύγχρονων μηχανών σε μελέτες μεταβατικής ευστάθειας	52
4.4 Μέθοδοι μελέτης μεταβατικής ευστάθειας.....	54
4.5 Κριτήριο Ίσων Εμβαδών.....	55
4.5.1 Βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου	55
4.5.2 Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής.....	57
4.5.3 Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή	59
4.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβατική ευστάθεια	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	62
ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SIEMENS	
PSS/E	62
5.1 Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	62
5.2 Σύστημα 9 ζυγών IEEE.....	63
5.3 Προσομοίωση ροής φορτίου.....	65
5.4 Συμμετρικό Τριφασικό Βραχυκύκλωμα.....	67
5.5 Προσομοίωση μεταβατικής ευστάθειας με το PSS/E	72
5.5.1 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8	73
5.5.2 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8	77
5.5.3 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9	82
5.5.4. Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 2 – 7, πλησίον του ζυγού 2.	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	90
ΕΥΡΕΣΗ ΚΡΙΣΙΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΕΚΚΑΘΑΡΙΣΗΣ ΜΕ ΤΕΧΤΙΝΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ.....	90
6.1 Αυτοματοποίηση εύρεσης του κρίσιμου χρόνου	90
6.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.....	91

6.3 Η Μέθοδος πρόβλεψης	92
6.4 Αποτελέσματα	93
6.4.1 Πρόβλεψη κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8.....	94
6.4.2 Πρόβλεψη κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8.....	94
6.4.3 Πρόβλεψη κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9.....	97
6.5 Σύνοψη	100
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	102

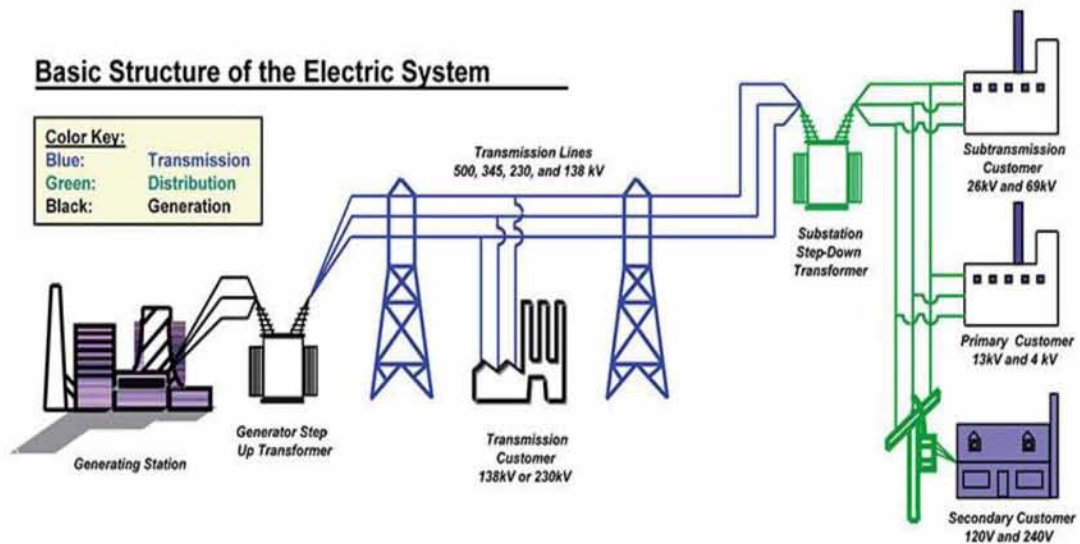
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Μορφολογία ενός ΣΗΕ

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζουμε το σύνολο των εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού τα ΣΗΕ αποτελούνται από τρία μέρη/συστήματα, κάθε ένα εκ των οποίων επιτελεί διαφορετική λειτουργία με τελικό στόχο διανομή στους καταναλωτές ασφαλούς, αξιόπιστης, ποιοτικής και φιλικής προς το περιβάλλον ηλεκτρικής ενέργειας. Παρακάτω, στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η βασική δομή ενός ΣΗΕ. Τα επιμέρους αυτά συστήματα είναι:

- Σταθμοί παραγωγής, εγκατεστημένους στις πιο ικανές περιοχές για την παραγωγή της απαιτούμενης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.
- Γραμμές μεταφοράς (ΓΜ), λειτουργία των οποίων είναι η ασφαλής μεταφορά των μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παράγεται στους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης
- Δίκτυο διανομής, που χρησιμοποιείται για την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές (π.χ. πόλεις, βιομηχανικές περιοχές), με σκοπό την μετατροπή της σε άλλες μορφές που θα εξυπηρετούν τις ανάγκες τους (θέρμανση, φως, μετακίνηση, παραγωγή, προϊόντων, κ.α.)



Σχήμα 1.1: Δομή ενός ΣΗΕ.

Η παραγωγή της ΗΕ που γίνεται στους ομώνυμους σταθμούς εξαρτάται κατά κόρον από την πηγή της ενέργειας που αυτοί χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε:

- Ατμοηλεκτρικούς, όπου η χημική ενέργεια (π.χ. λιγνίτης, πετρέλαιο) μέσω της καύσης μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Ο ατμός με την σειρά του μετατρέπεται μέσω του ατμοστροβίλου σε μηχανική ενέργεια η οποία περιστρέφει τη γεννήτρια και τελικά παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια.
- Υδροηλεκτρικούς, όπου η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική.
- Πυρηνικούς, όπου ο ελεγχόμενος πυρηνικός αντιδραστήρας αντικαθιστά το συμβατικό λέβητα σαν πηγή θερμικής ενέργειας. Η ενέργεια αυτή που απελευθερώνετε κατά τη διαδικασία της σχάσης χρησιμοποιείται για την κίνηση ηλεκτρικής γεννήτριας ατμού.

Τα τελευταία χρόνια, εξ αιτίας των αυξημένων απαιτήσεων για ΗΕ αλλά και της μόλυνσης του περιβάλλοντος υπάρχει αυξημένη κινητικότητα στην παραγωγή ΗΕ μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, γεωθερμία), ποσότητες παραγόμενης ενέργειας σαφώς μικρότερες σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης μέσω των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης (400 KV, 150 KV & 66KV). Η τάση των 400 KV μεταφέρεται στα Κέντρα Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ), υποβιβάζεται σε τάση 150 KV και, στη συνέχεια, μέσω των Υποσταθμών Υψηλής Τάσης σε τάσεις 66KV και 20KV (μέση τάση) με τις οποίες τροφοδοτούνται αντίστοιχα βιομηχανίες και τα αστικά κέντρα ή διάφορες επαγγελματικές δραστηριότητες. Η μέση τάση των 20KV υποβιβάζεται μέσω των Υποσταθμών Διανομής σε χαμηλές τάσεις 415 V (240 φασικό) με την οποία τροφοδοτούνται (μέσω του δικτύου διανομής) μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα. Οι Υποσταθμοί Διανομής τοποθετούνται εναέρια σε κολώνες ή στα υπόγεια μεγάλων κτιρίων.

Οι γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι τριφασικές εναλλασσόμενου ρεύματος και μπορεί να είναι εναέρια και υπόγεια ενώ υπάρχουν και ειδικές περιπτώσεις όπως η υποθαλάσσια μεταφορά ΗΕ, όπου χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης.[1]

Στην παρακάτω ενότητα θα αναλυθούν διεξοδικά οι βασικές συνιστώσες που επιτελούν τις κυριότερες λειτουργίες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτές λειτουργούν ώστε το σύστημα να παραμένει ευσταθές και αξιόπιστο.

1.2 Σύγχρονες γεννήτριες

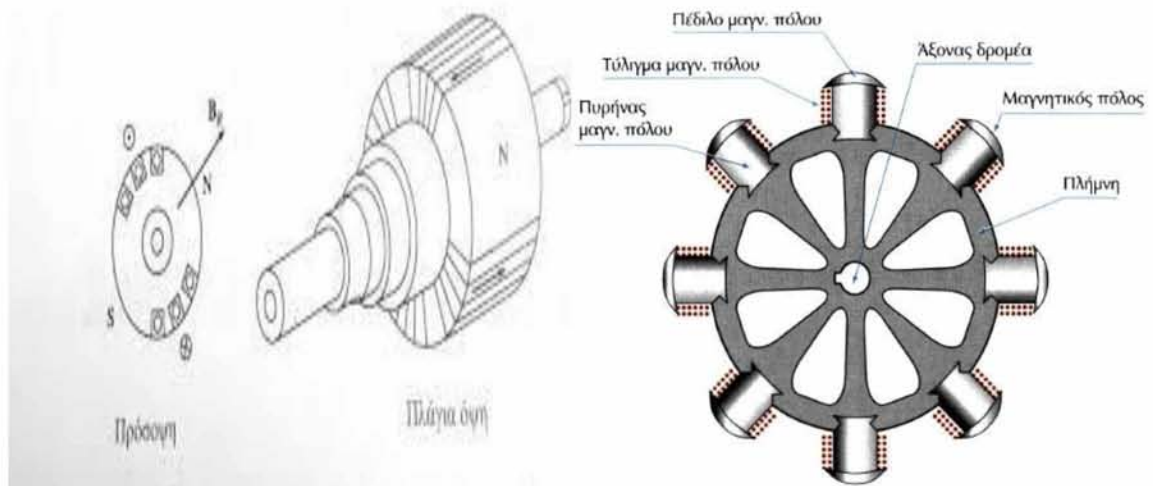
1.2.1 Περιγραφή σύγχρονης γεννήτριας

Το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται καθημερινά στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω των τριφασικών σύγχρονων γεννητριών. Αυτός ο τύπος γεννήτριας αποτελεί ένα αξιόπιστο μέσο για την μετατροπή άλλων μορφών ενέργειας σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Πρόκειται για την σημαντικότερη μηχανή παραγωγής ενέργειας, ενώ είναι γνώστη και ως εναλλακτήρας. Τα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα αποτελούνται από γεννήτριες με ονομαστική ισχύ μερικών εκατοντάδων έως και πάνω από χίλια MVA.

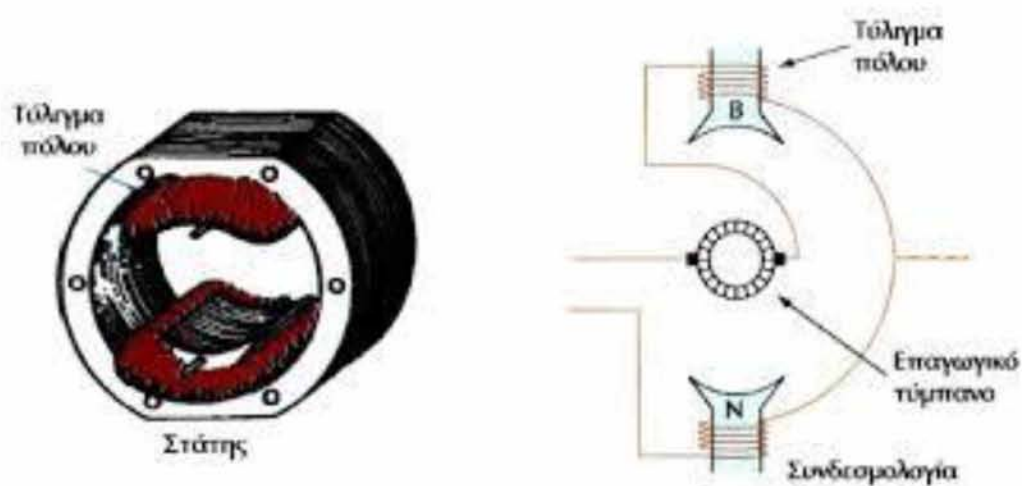
Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας βασίζεται στον νόμο του Faraday. Ο όρος σύγχρονη αναφέρεται στο γεγονός ότι λειτουργεί στην μόνιμη κατάσταση υπό σταθερή

ταχύτητα και συχνότητα. Τα δύο βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια σύγχρονη γεννήτρια είναι ο στάτης, που είναι το ακίνητο μέρος και ο δρομέας, που είναι το περιστρεφόμενο μέρος. Ο δρομέας περιστρέφεται από στρόβιλο ατμού, αερίου ύδατος. Για την λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας βασική προϋπόθεση αποτελεί η τροφοδοσία του τυλίγματος του δρομέα (τύλιγμα πεδίου ή τύλιγμα διέγερσης) με συνεχές ρεύμα. Ο δρομέας είναι ουσιαστικά ένα μεγάλος περιστρεφόμενος μαγνήτης ο οποίος καθώς περιστρέφεται, περιστρέφεται μαζί του το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το συνεχές ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο επάγεται τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη. Ο δρομέας μπορεί να είναι είτε κυλινδρικός, όπου οι πόλοι είναι στο ίδιο επίπεδο με την υπόλοιπη επιφάνεια (Σχήμα 1.2), είτε έκτυπων πόλων όπου οι πόλοι είναι διακριτοί (Σχήμα 1.3).

Εκτός από τον δρομέα, μια σύγχρονη γεννήτρια αποτελείται όπως αναφέρθηκε παραπάνω και από τον στάτη. Πρόκειται για ένα κοίλο κυλινδρικό εξάρτημα (Σχήμα 1.4) το οποίο είναι κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων. Στην εσωτερική του επιφάνεια υπάρχουν αυλακώσεις οι οποίες χρησιμεύουν για την τοποθέτηση τυλιγμάτων.



Σχήμα 1.2: Δρομέας με πόλους στην επιφάνεια. Σχήμα 1.3: Δρομέας έκτυπων πόλων.



Σχήμα 1.4: Στάτης.

Ο στάτης και ο δρομέας σχεδιάζονται έτσι ώστε για σταθερή ταχύτητα δρομέα να παράγεται μια ημιτονοειδής τάση σε κάθε ένα από τα τυλίγματα του στάτη. Οι τρεις αυτές τάσεις έχουν ίδιο μέτρο, ίδια συχνότητα αλλά παρουσιάζουν φασική διαφορά 120 μοίρες η μία από την άλλη. Συνδέοντας, τα τρία αυτά τυλίγματα σε τριφασική διάταξη, σχηματίζεται μια τριφασική πηγή. [2,3]

1.2.2 Ταχύτητα Περιστροφής

Οι σύγχρονες γεννήτριες οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι οι συχνότητες των τάσεων τις οποίες παράγουν είναι σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σχετίζεται με την ηλεκτρική συχνότητα του στάτη μέσω της σχέσης:

$$f = \frac{P}{120} \times N \quad (1.1)$$

Όπου f η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

P ο αριθμός των πόλων

N η ταχύτητα του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό

Επειδή η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου είναι ίδιες, η παραπάνω εξίσωση αποδίδει τη σχέση της ταχύτητας με την οποία περιστρέφεται η μηχανή και της ηλεκτρικής συχνότητας. Στην περίπτωση όμως που η εξίσωση (1) δεν επαληθεύεται η μηχανή αποσυγχρονίζεται πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει κίνδυνος βλαβών.[3]

1.2.3 Παραγόμενη τάση

Η τάση που επάγεται σε κάθε φάση μιας σύγχρονης μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\alpha} = \sqrt{2} \times \pi \times N \times \varphi \times f \quad (1.2)$$

Η σχέση (2) μπορεί να γραφεί με πιο απλό τρόπο ως εξής:

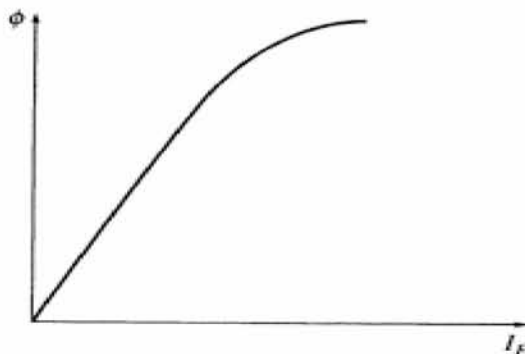
$$E_{\alpha} = K \times \varphi \times \omega \quad (1.3)$$

Όπου φ είναι η μαγνητική ροή

ω είναι η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής

K είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

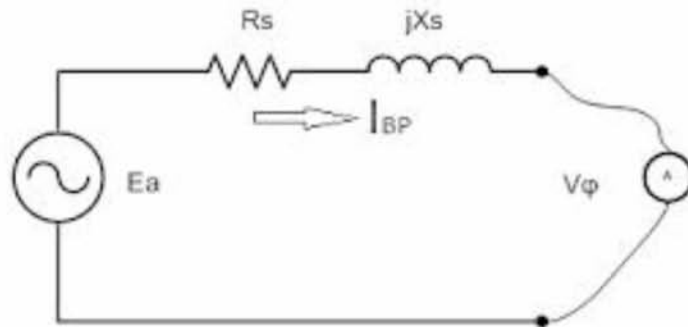
Η τάση E είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης I_F . Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται η καμπύλη ϕ - I η οποία ονομάζεται καμπύλη μαγνήτισης ή χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος.[3]



Σχήμα 1.5: Καμπύλη μαγνήτισης

1.2.4 Μελέτη σύγχρονης γεννήτριας ανά φάση

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και υπό συμμετρική φόρτιση η σύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει τριφασική συμμετρία. Είναι δυνατόν, να μελετηθεί ανά φάση χρησιμοποιώντας το μονοφασικό ισοδύναμο της (Σχήμα 1.6).

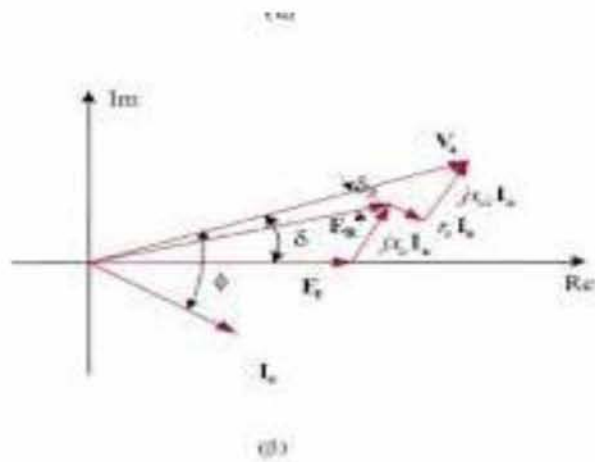


Σχήμα 1.6: Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας

Αποτελείται από πηγή τάσης E_a που συνδέεται σε σειρά με αντίσταση R_s , που είναι η ανά φάση αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη και η αντίδραση X_s , που είναι η ανά φάση αντίδραση της σύγχρονης γεννήτριας και η οποία λαμβάνει υπόψη τη ροή που παράγεται από τα ρεύματα του στάτη. Η πηγή τάσης E_a έχει μέτρο ανάλογο του ρεύματος διέγερσης και παριστά τη φασική τάση ανοιχτού κυκλώματος δηλ. για λειτουργία χωρίς φορτίο. Η τάση E_a σχετίζεται με την τερματική φασική τάση V_{ϕ} του ζυγού στον οποίο συνδέεται η γεννήτρια μέσω της εξίσωσης:

$$E_a = V_{\phi} + R_s I_{BP} + jX_s I_{BP} \quad (1.4)$$

Από την εξίσωση (1.4) μπορεί να χαραχθεί ένα διανυσματικό διάγραμμα (Σχήμα 1.7) της μίας φάσης συμμετρικά φορτισμένης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα. Η γωνία δ_m που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ονομάζεται γωνία ισχύος και ορίζεται θετική όταν η E_a προηγείται της V_{ϕ}



Σχήμα 1.7: Διανυσματική αναπαράσταση σύγχρονης γεννήτριας.

Επειδή σε μια σύγχρονη γεννήτρια, ισχύει σχεδόν πάντοτε $X_s \gg R_s$, μπορούμε να υποθέσουμε ότι $R_s = 0$ και στη συνέχεια να υπολογίσουμε την πραγματική και άεργο ισχύ του ισοδύναμου μονοφασικού κυκλώματος.

$$PG = \frac{|E||V|}{X_s} \sin \delta_m \quad (1.5)$$

$$QG = \frac{|V|(|E| \cos \delta_m - |V|)}{X_s} \quad (1.6)$$

Είναι ανάγκη να τονιστεί ότι οι παραπάνω εξισώσεις δίνουν τις σχέσεις PG και QG ανά φάση εφόσον οι ποσότητες $|E|$ και $|V|$ εκφράζονται στις φασικές τους τιμές. Εάν όμως οι $|E|$ και $|V|$ εκφραστούν σε πολικές τιμές, τότε οι εξισώσεις (1.5) και (1.6) μας δίνουν τις τριφασικές ισχύεις.[2]

1.2.5 Παραλληλισμός σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο

Στην πράξη, σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας οι γεννήτριες δε λειτουργούν μεμονωμένα, αλλά με τις εξόδους τους παραλληλισμένες. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Μπορούν να τροφοδοτηθούν πολύ περισσότερα φορτία από ότι με μία γεννήτρια.
- Υπάρχει μεγαλύτερη αξιοπιστία (ακόμα και με βλάβη μιας γεννήτριας συνεχίζουμε να έχουμε τροφοδότηση των φορτίων).
- Δυνατότητα απομάκρυνσης γεννήτριας για συντήρηση.

Πρακτικά είναι γενικά καλύτερο να υπάρχουν λίγες γεννήτριες που να λειτουργούν στα ονομαστικά τους στοιχεία, παρά πολλές να λειτουργούν σε μικρότερες φορτίσεις, τροφοδοτώντας η κάθε μία από λίγα φορτία, λαμβάνοντας υπόψη και την ανάγκη εξασφάλισης κατάλληλων εφεδρειών λειτουργίας..

Παρ' όλα αυτά για την ομαλή ένταξη (συγχρονισμός) μιας σύγχρονης γεννήτριας σε ένα υπάρχον ήδη δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν προϋποθέσεις που πρέπει να τηρηθούν ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα και η ποιοτική λειτουργία του.

1. Οι τάσεις των γεννητριών πρέπει να είναι ίσες σε μέτρο και φάση. Άρα λοιπόν πρέπει:
 - Οι ενεργές τιμές των πολικών τάσεων στα άκρα των γεννητριών να είναι ίδιες
 - Οι φάσεις πρέπει να είναι ίδιες.
 - Η σειρά διαδοχής των φάσεων να είναι ίδια
2. Η συχνότητα της γεννήτριας που εισάγεται στο δίκτυο (ετοιμάζεται να παραλληλιστεί) πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή θα υπάρχει μια αργή μεταβολή των φάσεων της γεννήτριας που εισάγεται σε σχέση με το υπόλοιπο σύστημα, οπότε πρέπει να παρακολουθείται το σύστημα ώστε ο διακόπτης της διασύνδεσης να κλείσει ακριβώς τη στιγμή που οι αντίστοιχες τάσης θα βρίσκονται σε φάση. [4]

Για να πραγματοποιηθούν αυτές οι συνθήκες θα πρέπει η γεννήτρια να περιστρέφεται με την κατάλληλη φόρα, με ταχύτητα $N = 120f/P$ στροφές/λεπτό και να ρυθμιστεί, μέσω του ρεύματος διέγερσης, η ηλεκτρεγερτική της δύναμη E ώστε $|E| = |V|$. Σε αυτή την

περίπτωση ο στρόβιλος πρέπει να παρέχει πολύ μικρή ισχύ, ώστε να καλυφθούν οι απώλειες περιστροφής.

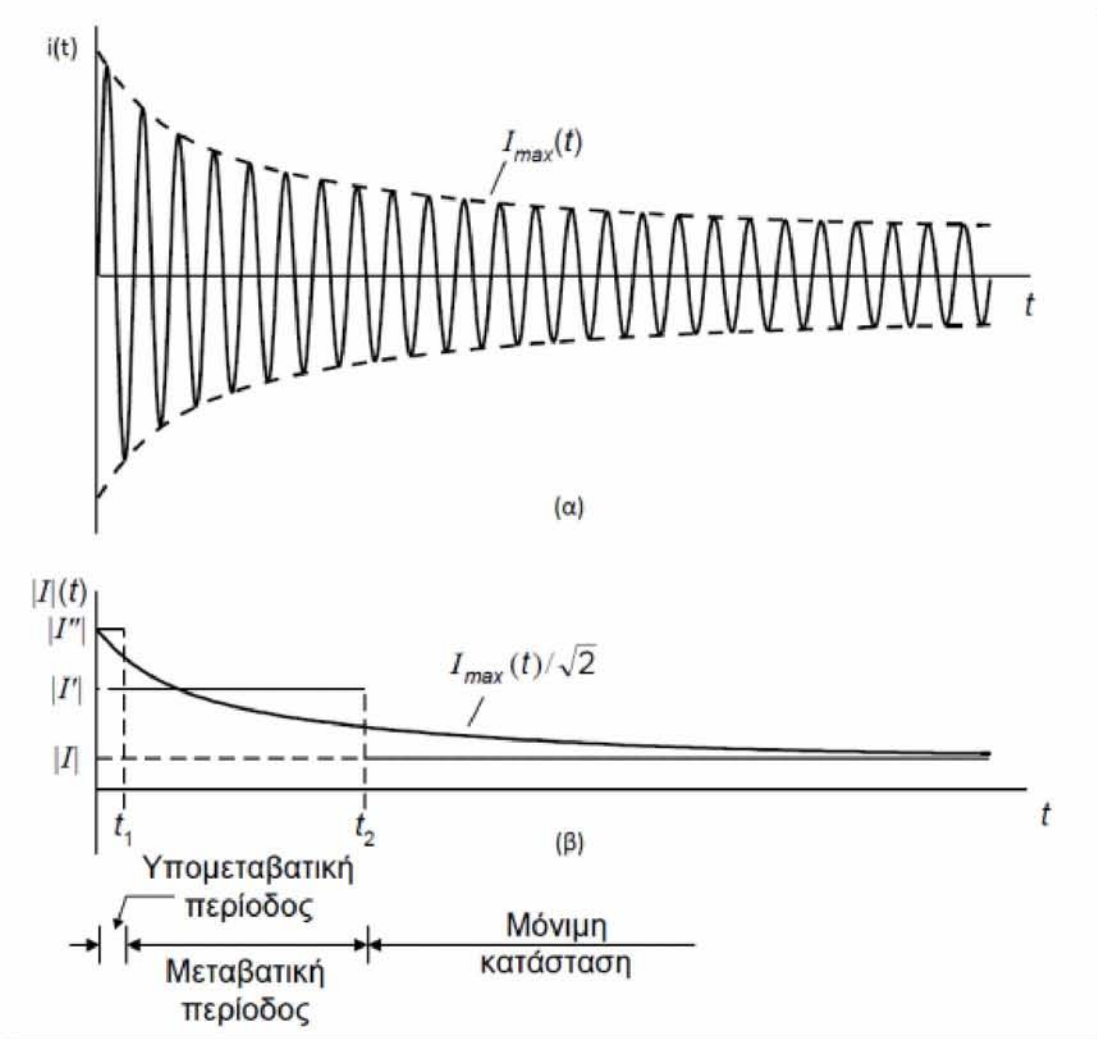
Μόλις ικανοποιηθούν ταυτόχρονα όλες οι συνθήκες και η γεννήτρια συνδεθεί στο σύστημα, βρίσκεται σε μια κατάσταση που δεν παρέχει ούτε πραγματική ούτε άεργο ισχύ. Για να επιτευχθεί η παραγωγή πραγματικής και άεργους ισχύς είναι ανάγκη να ρυθμιστεί κατάλληλα η μηχανική ροπή του άξονα της μηχανής καθώς και το ρεύμα διέγερσης. Στη πράξη αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια της βαλβίδας ατμού. Ανοίγοντας την αργά, εφαρμόζεται σταθερά αυξανόμενη μηχανική ροπή η οποία με την σειρά της οδηγεί στην παραγωγή της επιθυμητής πραγματικής ισχύος. Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερή τη μηχανική ισχύ εισόδου, εφαρμόζεται αύξηση του ρεύματος διέγερσης για την επιθυμητή παραγωγή άεργου ισχύος και ρύθμιση της τάσης των ακροδεκτών. [1]

1.2.6 Μεταβατική συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας

Αν και συνήθως μια σύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί υπό συνθήκες μόνιμης κατάστασης, υπάρχουν περιπτώσεις που χρειάζεται να λειτουργήσει και υπό συνθήκες μεταβατικής κατάστασης. Προβλήματα όπως αιφνίδια βραχυκυκλώματα στα οποία επικρατούν έντονα μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας είναι υπεύθυνα για τις διαταραχές της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας μιας σύγχρονης γεννήτριας. Παρόλο που υπό συνθήκες σφάλματος η γεννήτρια δεν λειτουργεί στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση, αποδεικνύεται ότι η συμπεριφορά της εξακολουθεί να είναι ημιτονοειδούς μορφής, με μεταβατικό χαρακτήρα.

Για την καλύτερη περιγραφή της μεταβατικής κατάστασης θα χρησιμοποιηθεί ένα απλό παράδειγμα. Έστω τα τυλίγματα του στάτη μιας σύγχρονης γεννήτριας, που λειτουργεί εν κενώ με σταθερή ταχύτητα και σταθερό ρεύμα διέγερσης, βραχυκυκλωθούν ξαφνικά. Παρατηρείται ότι αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα τα ρεύματα είναι πολύ μεγαλύτερα από ότι μερικούς κύκλους αργότερα. Επίσης παρατηρείται ότι αποτελούνται από δύο συνιστώσες: μια ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη συνιστώσα σταθερού εύρος και μια συνιστώσα συνεχούς ρεύματος, που φθίνει εκθετικά.

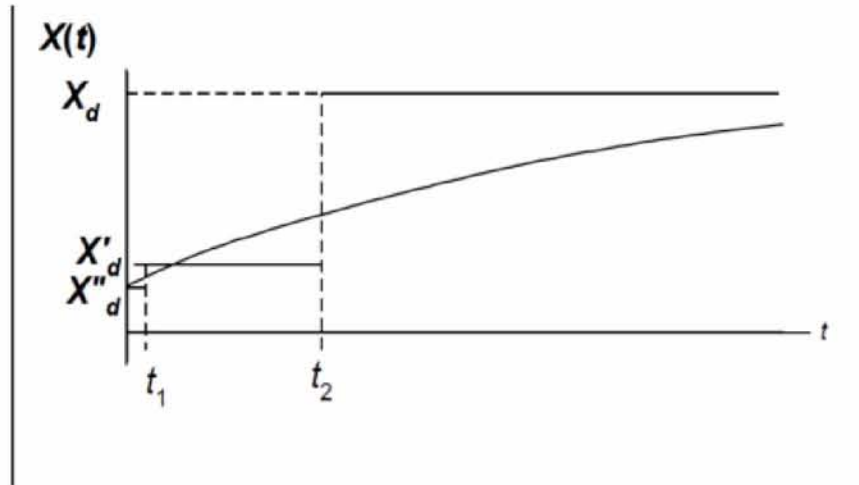
Στην πράξη δεν μπορεί να προβλεφτεί η χρονική στιγμή κατά τη οποία λαμβάνει χώρα το σφάλμα, όπως επίσης απρόβλεπτη είναι και η συνιστώσα του ρεύματος κάθε κυματομορφής. Για λόγους διευκόλυνσης λοιπόν παραλείπουμε αυτήν την συνιστώσα και θεωρούμε ότι το ρεύμα του σάτη μεταβάλλεται με τον χρόνο όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9 (α). Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η μέγιστη τιμή του ρεύματος $I_{max}(t)$. Διαιρώντας τις μέγιστες τιμές του Σχήματος 1.9(α) δια $\sqrt{2}$, προκύπτει η κυματομορφή στο Σχήμα 1.9 (β) που δείχνει τον τρόπο μεταβολής της ενεργού τιμής του ρεύματος $|I|(t)$.



Σχήμα 1.9: (α) Στιγμιαίο ρεύμα σάτη μετά από βραχυκύκλωμα

(β) Ενεργός τιμή ρεύματος με βηματική προσέγγιση.

Για να δικαιολογηθεί η χρονικά μεταβαλλόμενη τιμή του ρεύματος $|I|(t)$ πρέπει να θεωρήσουμε ότι ή η ΗΕΔ $|E|$, ή η αντίσταση $|Z_s|$, ή και οι δύο είναι χρονικά μεταβαλλόμενες (Σχήμα 1.10). [1]



Σχήμα 1.10: Σύγχρονη αντίδραση γεννήτριας με βηματική προσέγγιση της.

Όπου: $X''_d = \frac{|E|}{|I''|}$: Υπομεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα.

$X'_d = \frac{|E|}{|I'|}$: Μεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα.

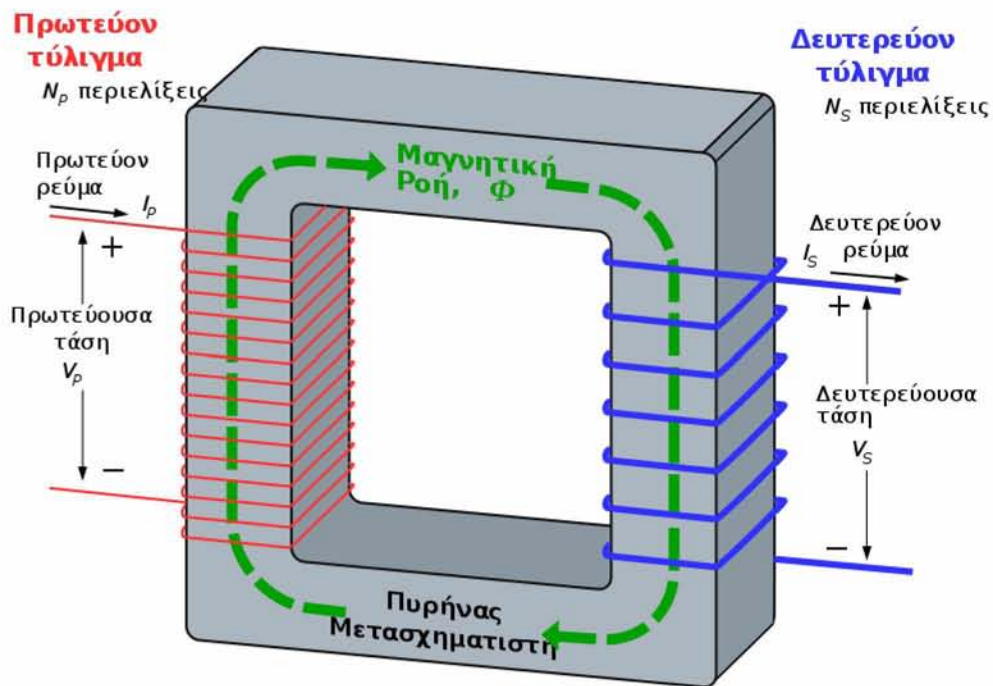
$X_d = \frac{|E|}{|I|}$: Σύγχρονη αντίδραση ευθέος άξονα.

1.3 Μετασηματιστές

1.3.1 Λειτουργία μετασηματιστή

Ο μετασηματιστής βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον, ότι ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο και, δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυλιγμένο σύρμα ("τύλιγμα"), επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλίγματος (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή). Μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα, αλλάζει η ένταση του μαγνητικού του πεδίου. Εφόσον το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εκτείνεται και στο δευτερεύον τύλιγμα, επάγεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος.

Στο σχήμα 1.11 φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα μετασχηματιστή. Ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα περιελίσσονται γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, π.χ. από σίδηρο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όσο το δυνατόν περισσότερες γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγει το πρωτεύον ρεύμα, βρίσκονται εντός του πυρήνα και περνούν τόσο από το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα.



Σχήμα 1.11: Ιδανικός μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης με επισημασμένη την μαγνητική ροή στον πυρήνα του.

Το δυναμικό που επάγεται στα άκρα του δευτερεύοντος μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο της επαγωγής του Φάραντσει, ο οποίος δηλώνει πως:

$$V_s = N_s \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1.7)$$

όπου V_s είναι η στιγμιαία τάση, N_s είναι ο αριθμός των περιελίξεων (στροφών) στο δευτερεύον και Φ η μαγνητική ροή σε μία περιέλιξη του τυλίγματος. Αν οι στροφές του τυλίγματος είναι προσανατολισμένες κάθετα προς τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου, η

ροή είναι το γινόμενο της έντασης B του μαγνητικού πεδίου και της επιφάνειας A μέσα από την οποία διέρχεται. Η επιφάνεια είναι σταθερή και ίση με την διατομή του πυρήνα του μετασχηματιστή, ενώ το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται με το χρόνο, ανάλογα με την διέγερση του πρωτεύοντος. [5,6]

Καθώς σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή η ροή που περνά μέσα τόσο από το πρωτεύον όσο και από το δευτερεύον είναι ίδια, η στιγμιαία τάση στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος ισούται με:

$$V_p = N_p \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (1.8)$$

Αν διαιρέσουμε τις σχέσεις (1.7) και (1.8) κατά μέλη παίρνουμε την βασική εξίσωση για την ανύψωση ή τον υποβιβασμό της τάσης:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (1.9)$$

1.3.2 Μετασχηματιστής στο ΣΗΕ

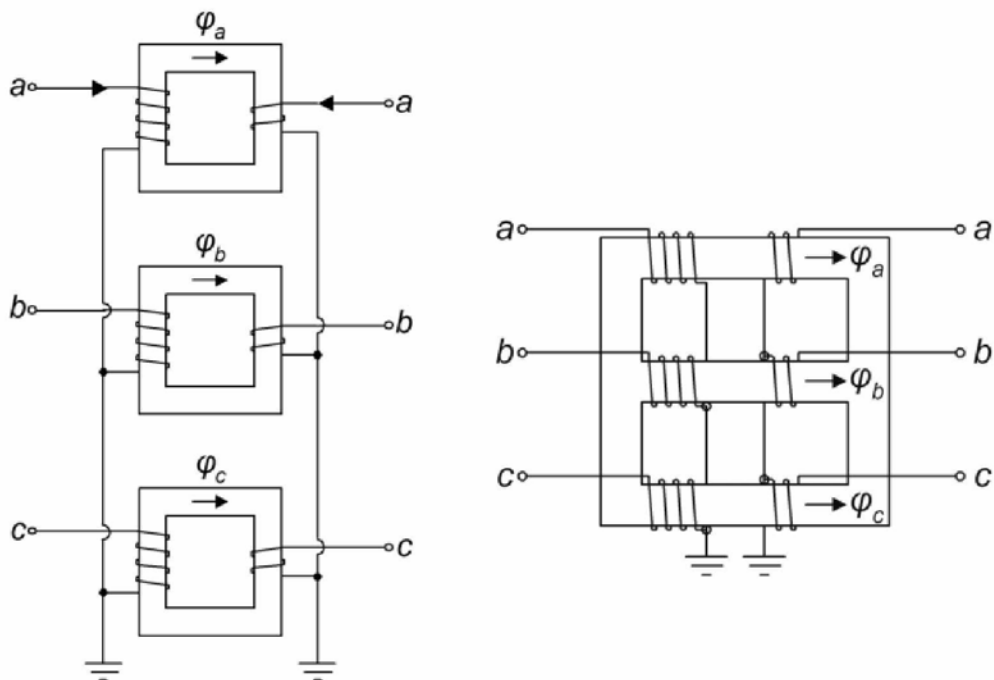
Ο μετασχηματιστής είναι μια πολύ βασική συνιστώσα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αφού ανάλογα με τις οικονομικές απαιτήσεις παρέχει την δυνατότητα χρήσης διαφορετικών επιπέδων τάσεων. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνει χώρα στις σύγχρονες γεννήτριες πραγματοποιείται σε χαμηλό επίπεδο τάσεων για οικονομικούς λόγους. Συνήθως οι πολικές τιμές κυμαίνονται από 11-25kV. Η μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις απαιτεί, για να είναι αποδοτική (υπάρχει πώση τάσης λόγω φαινομένου Joule), πολύ υψηλότερες τιμές τάσης, τυπικά πολικές τάσεις 150, 230, 345, 400, ακόμα και 765kV. Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, τέλος, γίνεται σε χαμηλότερες τάσεις, όπως 15 ή 20kV και για οικιακή χρήση 415V.

Αυτή η αναγκαία αύξηση των επιπέδων των τάσεων πραγματοποιείται με τη χρήση μετασχηματιστών ισχύος ώστε να γίνει ελαχιστοποίηση των απωλειών και η επαρκής φόρτιση των γραμμών μεταφοράς. Αυτό το επίπεδο τάσης μεταφοράς υποβιβάζεται σε χαμηλότερα επίπεδα με σκοπό την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ανάλογα με την λειτουργία τους, οι μετασχηματιστές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Μετασχηματιστές γεννήτριας, που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης από τα επίπεδα της γεννήτριας στο επίπεδο μεταφοράς.
- Μετασχηματιστές μεταφοράς, που χρησιμοποιούνται για τον μετασχηματισμό της ισχύος μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης του συστήματος μεταφοράς.
- Μετασχηματιστές διανομής, που χρησιμοποιούνται για τον υποβιβασμό της τάσης στα χαμηλά επίπεδα που ζητούνται από τους καταναλωτές.

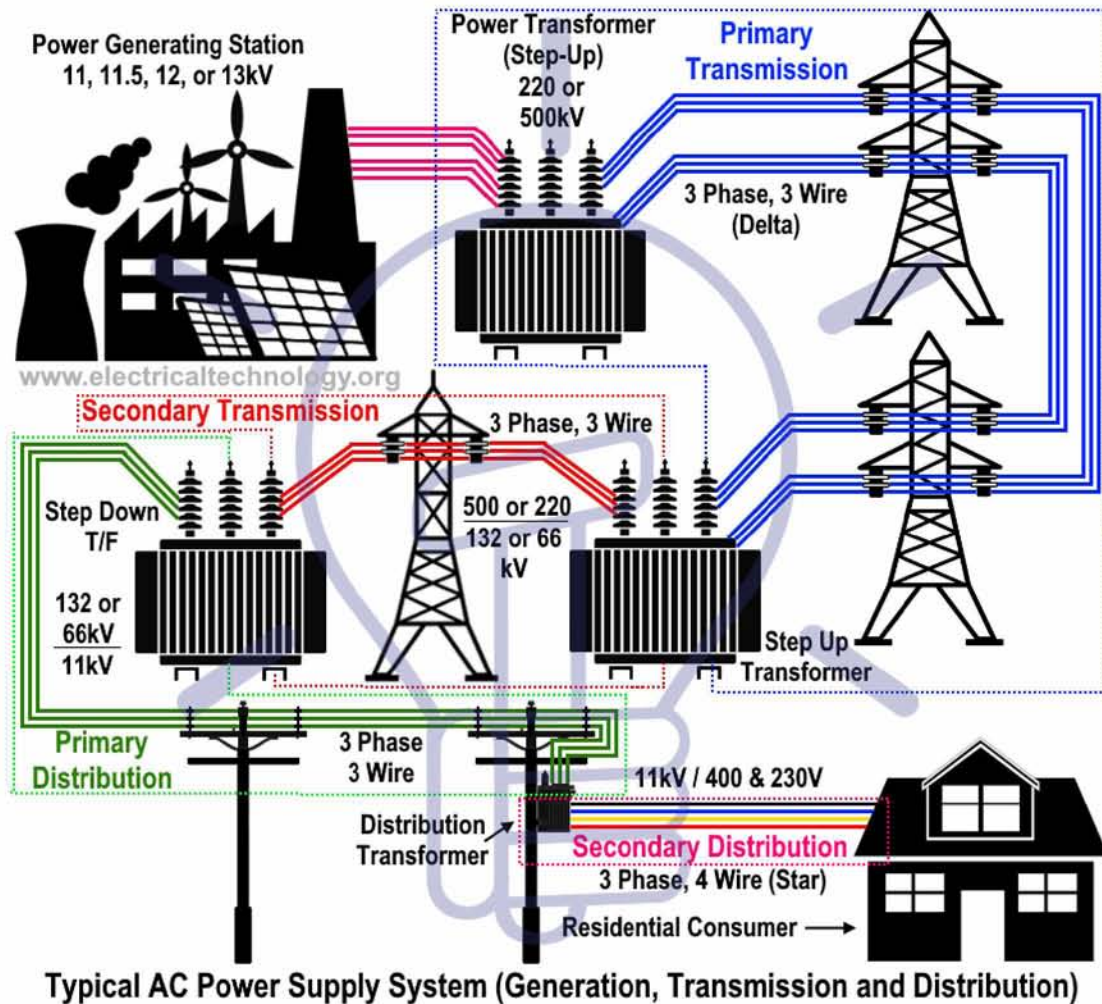
Για την ευκολότερη μεταφορά τους, οι πολύ μεγάλης ισχύος μετασχηματιστές κατασκευάζονται συνήθως από τρεις ξεχωριστούς μονοφασικούς μετασχηματιστές (Σχήμα 1.12α) που συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους. Οι μικρότερης ισχύος έχουν συνήθως ολοκληρωμένη τριφασική διάταξη με ενιαίο πυρήνα (Σχήμα 1.12 β). [1,2]



Σχήμα 1.12: (α) Διασύνδεση μονοφασικών μετασχηματιστών.

(β) Τριφασικός μετασχηματιστής ενιαίου πυρήνα.

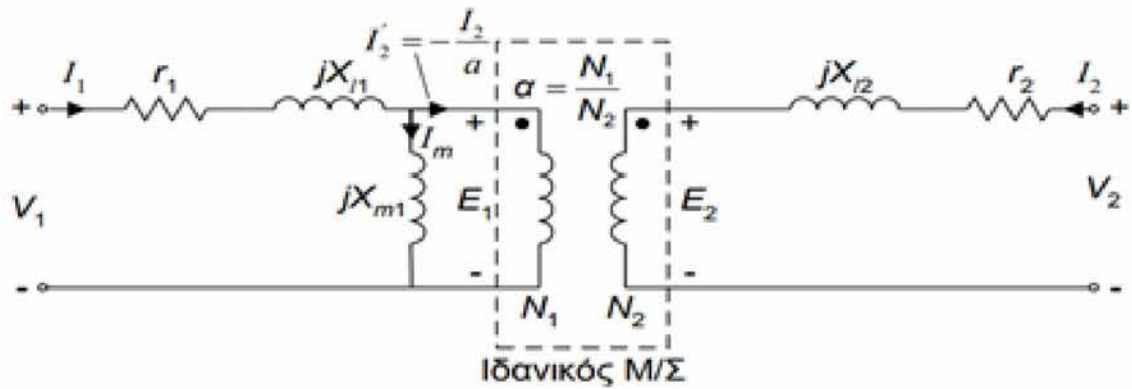
Στο Σχήμα 1.13 παρουσιάζεται ο η χρήση των μετασχηματιστών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας όσο αναφορά την ανύψωση της τάσης για την απομακρυσμένη μεταφορά της ενέργειας, την διατήρηση της και τέλος τον υποβιβασμό της σε επίπεδα διαχειρίσιμα για τους καταναλωτές. [1,2]



Σχήμα 1.13: Ηλεκτρική ενέργεια από την παραγωγή στη μεταφορά και εν τέλει στην κατανάλωση με την βοήθεια των μετασχηματισμών.

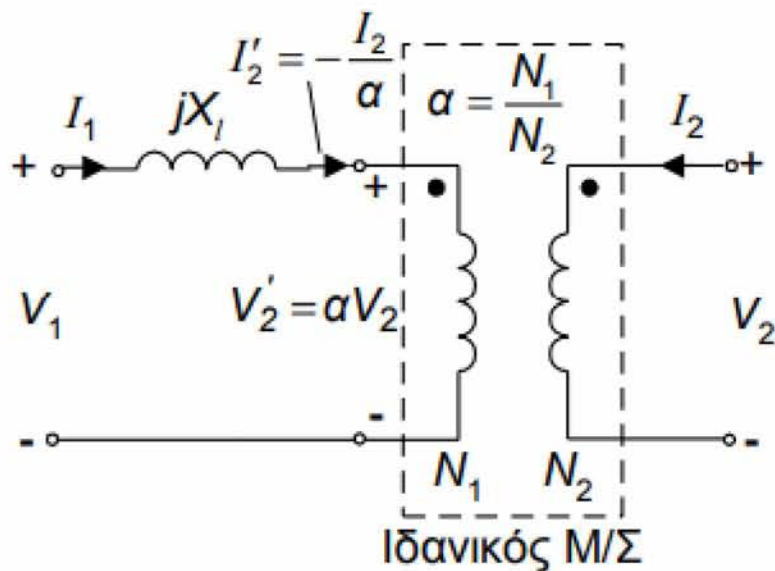
1.3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων

Το βασικό ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή ισχύος δύο τυλιγμάτων στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 1.14. Για μεγάλους μετασχηματιστές το μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί.



Σχήμα 1.14: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων.

Αν αμεληθεί το ρεύμα I_m (πολύ μικρό σε σχέση με αυτό του φορτίου) και παραλειφθεί ο εγκάρσιος κλάδος και συγχρόνως αμεληθούν οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων (πολύ μικρότερες των αντιδράσεων σκέδασης), προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα (Σχήμα 1.15). [2]



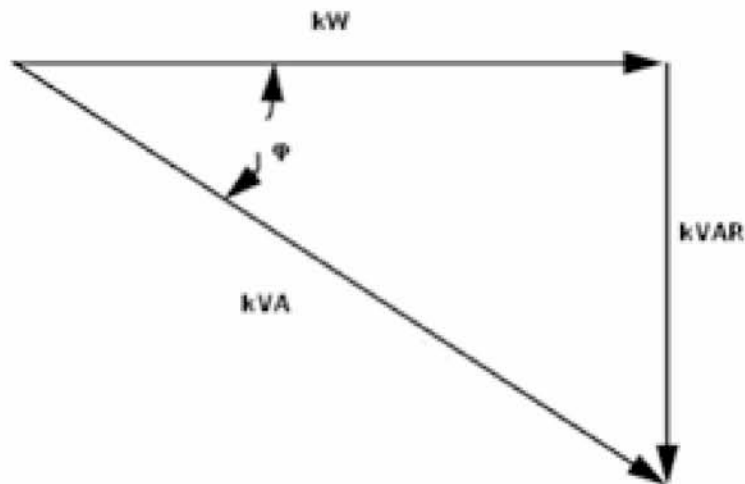
Σχήμα 1.15: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων αναφερόμενο στο πρωτεύον τύλιγμα.

1.3.4 Απόδοση μετασχηματιστή

Η απόδοση ισχύος σε οποιαδήποτε ηλεκτρική μηχανή ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ της εισόδου. Η ισχύς μετριέται σε watts (W) ή kilowatts (kW). Το ίδιο ισχύει και για τους μετασχηματιστές παρόλο που η ισχύς τους μετριέται σε kilovoltamperes (kVA). Η πινακίδα στον μετασχηματιστή αναφέρει την ισχύ του σε kVA, οπότε είναι αναγκαίο να μετατραπεί σε kW για να προσδιορίσουμε την απόδοση του. Η μετατροπή των kilovoltamperes σε kilowatts επιτυγχάνεται με τον εξής τύπο:

$$\text{Ισχύς μετασχηματιστή σε kW} = (\text{kVA}) (\cos\phi) \quad (1.8)$$

όπου $\cos\phi$ είναι ο συντελεστής ισχύος. Στο Σχήμα 1.16 έχουμε το τρίγωνο ισχύος όπου εμφανίζουμε την σχέση μεταξύ kVA και kW. Σύμφωνα με το Σχήμα 1.16 το $\cos\phi$ ή συντελεστής ισχύος είναι kW / kVA .



Σχήμα 1.16: Τρίγωνο ισχύος.

Επομένως η απόδοση σε έναν μετασχηματιστή μπορεί να αποδοθεί από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Απόδοση} = \frac{\text{Ισχύς εξόδου kVA}}{\text{Ισχύς εισόδου kVA}} = \frac{S \cos\phi}{S \cos\phi + \text{απώλειες}} \quad (1.10)$$

Αν ο συντελεστής ισχύος ή $\cos\phi$ είναι μονάδα, τότε ο τύπος της απόδοσης του μετασχηματιστή έχει ως εξής:

$$\text{Απόδοση} = \frac{S}{S + \text{απώλειες κενού φορτίου} + \text{απώλειες φορτίου} \times (S/S_B)^2} \quad (1.11)$$

Από την εξίσωση (1.11) προκύπτει ότι η απόδοση του μετασχηματιστή αυξάνεται με μείωση των απωλειών του.[7]

1.4 Γραμμές μεταφοράς

1.4.1 Περιγραφή γραμμής μεταφοράς

Η γραμμή μεταφοράς αποτελεί μια από τις σημαντικότερες συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος της είναι η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής σε μεγάλες αποστάσεις, με τρόπο ασφαλή, οικονομικό και με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες γίνεται. Οι ηλεκτρικές παράμετροι μια γραμμής μεταφοράς μετριοούνται συνήθως ανά μονάδα μήκους. Οι βασικότεροι εκφράζονται ως:

- Η εν σειρά αντίσταση r , σε Ω/m
- Η εν σειρά επαγωγή L , σε H/m
- Η εγκάρσια χωρητικότητα C , σε F/m

Οι παράμετροι αυτοί χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ενός μοντέλου γραμμής, αλλά και για τους απαραίτητους υπολογισμούς του συστήματος κατά την σχεδίαση.

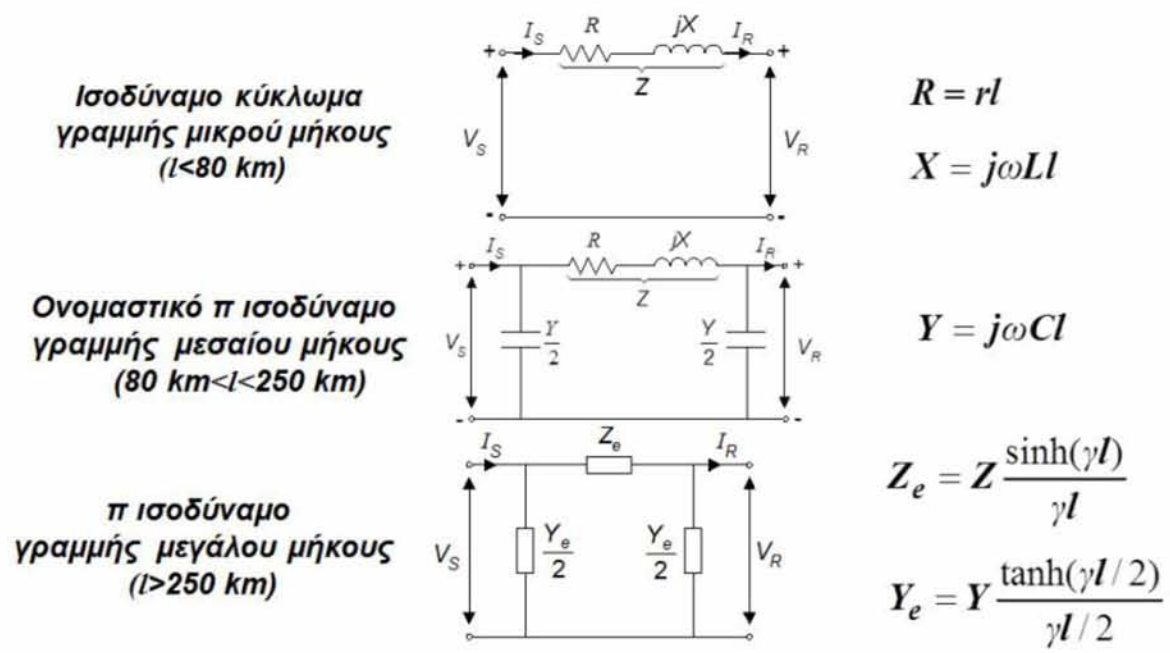
Αν υποθέσουμε ότι η γραμμή παρουσιάζει τριφασική συμμετρία τότε είναι εφικτή η μονοφασική της αναπαράσταση. Βασικός παράγοντας για την αναπαράσταση αυτή αποτελεί το μήκος της, το οποίο καθορίζει αν ληφθεί υπόψη ο κατανεμημένος χαρακτήρας των παραμέτρων της ή αν θεωρηθούν συγκεντρωμένες σε ένα σημείο, αλλά και ποιες από αυτές μπορούν να παραληφθούν εξ αιτίας της μειωμένης τους σημαντικότητας για το μέγεθος του συστήματος.

1.4.2 Κατηγορίες γραμμών μεταφοράς

Μια Γραμμή μεταφοράς θεωρείται μικρού μήκους εάν είναι μικρότερη από 80 km. Σε αυτήν την περίπτωση, η χωρητικότητα είναι τόσο μικρή που μπορεί να παραληφθεί τελείως χωρίς να έχει σημαντικές επιπτώσεις στους υπολογισμούς και να θεωρηθεί μόνο η αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής. Συγκεκριμένα η ανά φάση αντίσταση παριστάνεται $R = r/l$ και η ανά φάση επαγωγική αντίδραση $X=j\omega Ll$, όπου l το μήκος της γραμμής.

Αν η γραμμή έχει μήκος από 80 km μέχρι 120 km τότε, η χωρητική αγωγιμότητα της γραμμής λαμβάνεται υπόψη και ισούται με $Y = j\omega Cl$ και διαιρείται σε δύο ίσα τμήματα τα οποία τοποθετούνται στα άκρα αναχώρησης και άφιξης της γραμμής. Στις δύο αυτές κατηγορίες γραμμών μεταφοράς δεν λαμβάνεται υπόψη ο κατανεμημένος χαρακτήρας των παραμέτρων τους.

Αν, όμως, η γραμμή έχει μήκος μεγαλύτερο από 250 km (μεγάλου μήκους), χρειάζεται να θεωρηθεί ότι οι παράμετροι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το μήκος της. Παρακάτω, μέσω του σχήματος 1.17 παρουσιάζονται τα τρία παραπάνω ισοδύναμα κυκλώματα.[2]



Σχήμα 1.17: Ισοδύναμα κυκλώματα γραμμών μικρού, μεσαίου και μεγάλου μήκους.

1.5 Φορτία

1.5.1 Ορισμός φορτίου

Με τον όρο φορτίο εννοούμε μια συσκευή ή ένα σύνολο συσκευών που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Η ισχύς που καταναλώνουν τα φορτία κυμαίνεται σε μια περιοχή τιμών που ξεκινά από μερικά Watt και φτάνει σε αρκετά MW. Τα φορτία μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

- Κινητήρες
- Συσκευές θέρμανσης
- Ηλεκτρονικές συσκευές
- Φωτιστικά

Υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των διάφορων φορτίων όσον αφορά το μέγεθος, τη συμμετρία (μονοφασικά, τριφασικά), τη σταθερότητα (χρόνος, συχνότητα, τάση) και την περίοδο χρήσης. Παρά την ανομοιομορφία τους σχετικά με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους, οι νόμοι της στατιστικής φροντίζουν ώστε στους μετασχηματιστές διανομής να

γίνεται αντιληπτός κάποιος μέσος όρος ζήτησης. Στο επίπεδο της υπομεταφοράς ο μέσος όρος αυτός γίνεται πιο συγκεκριμένος ενώ στο επίπεδο μεταφοράς η ζήτηση μπορεί σχεδόν να προβλεφθεί.

1.5.2 Χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού φορτίου

Ένα τυπικό σύνθετο ηλεκτρικό φορτίο παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Τόσο το μέγεθος του όσο και ο τρόπος μεταβολής του με το χρόνο μπορούν να προβλεφθούν σε μεγάλο βαθμό
2. Μεταβάλλεται πολύ αργά με το χρόνο, έτσι ώστε από λεπτό σε λεπτό να είναι σχεδόν σταθερό. Η χρονική διάρκεια ενός λεπτού είναι σχετικά μια μεγάλη χρονική περίοδος συγκρινόμενη με τις σταθερές χρόνου ενός ηλεκτρικού συστήματος. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να δεχόμαστε ότι το σύστημα λειτουργεί σε μόνιμη κατάσταση η οποία μεταβάλλεται αργά κατά την διάρκεια της ημέρας.
3. Καταναλώνει πάντοτε άεργο ισχύ. Αυτό συμβαίνει διότι οι επαγωγικοί κινητήρες είναι ένα από τα πιο βασικά φορτία ενός ηλεκτρικού φορτίου.
4. Είναι πάντοτε συμμετρικό. Στους μεγάλους κινητήρες η συμμετρία είναι αυτόματη λόγω της τριφασικής λειτουργίας τους. Αντίθετα, στην περίπτωση των μονοφασικών φορτίων αυτή η συμμετρία επιτυγχάνεται με σωστή κατανομή των φορτίων στο επίπεδο διανομής στις τρεις φάσεις.
5. Εξαρτάται από τη συχνότητα και την τάση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

2.1 Εισαγωγή στην ροή φορτίου

Με τον όρο ανάλυση ροής φορτίου εννοείται η μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο υφίσταται συγκεκριμένη φόρτιση, στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση λειτουργίας. Οι μελέτες ενεργειακής ροής έχουν μεγάλη σημασία για τον τωρινό και μελλοντικό σχεδιασμό αλλά και την επέκταση των συστημάτων ισχύος, όπως και για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λειτουργίας των υφιστάμενων συστημάτων. Οι κύριες πληροφορίες που λαμβάνονται από μια μελέτη ροής φορτίου είναι το μέγεθος, η γωνία φάσης της τάσης σε κάθε ζυγό, η πραγματική και η άεργη ισχύ που ρέει σε κάθε γραμμή.

Για την επιτυχή λειτουργία ενός συστήματος τροφοδοσίας υπό κανονικές ισορροπημένες τριφασικές συνθήκες σταθερής κατάστασης απαιτούν τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Η παραγωγή να παρέχει την ζήτηση (φορτίο) συν τις απώλειες.
2. Τα μεγέθη των τάσεων των ζυγών να παραμένουν κοντά στις ονομαστικές τους τιμές.
3. Οι γεννήτριες πρέπει να λειτουργούν εντός συγκεκριμένων ορίων πραγματικής και άεργης ισχύος
4. Οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές είναι ανάγκη να μην υπερφορτώνονται.[2,8]

Μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου πραγματοποιείται έλεγχος και δοκιμές ώστε να ικανοποιούνται όσο το δυνατόν καλύτερα τα παραπάνω χαρακτηριστικά και τελικά να επιλέξει κανείς μέσα από ένα πλήθος διαφόρων δυνατών – επιτρεπτών καταστάσεων λειτουργίας, την καλύτερη έτσι ώστε το σύστημα να λειτουργήσει με βάση αυτή. Επομένως η ανάλυση ροής φορτίου είναι πρωταρχικής σημασίας όταν σχεδιάζονται

μεταβολές ή μελλοντικές επεκτάσεις σε ένα υπάρχον σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως:

1. Ανάπτυξη νέων μονάδων παραγωγής
2. Τροφοδοσία νέων φορτίων.
3. Όδευση νέων γραμμών μεταφοράς.
4. Διασύνδεση με άλλα συστήματα.

καθώς, πριν την υλοποίηση των παραπάνω αλλαγών, πρέπει να διερευνηθούν οι επιπτώσεις που αυτές θα έχουν στη λειτουργία του συστήματος. Έτσι, πραγματοποιείται σύγκριση ως προς την αποτελεσματικότητά τους των λύσεων αναβάθμισης, ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη περίπτωση για το σύστημα. Η ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιείται, ακόμη, για την εκτίμηση της ομαλής λειτουργίας ενός συστήματος, όταν τεθούν εκτός μία ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς, για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαφόρων συνθηκών φόρτισής του, καθώς και για τον υπολογισμό των απαραίτητων αρχικών συνθηκών του, που απαιτούνται για τη διενέργεια μελετών βραχυκυκλωμάτων και μεταβατικής ευστάθειας τα οποία θα αναλυθούν διεξοδικά στις παρακάτω ενότητες.

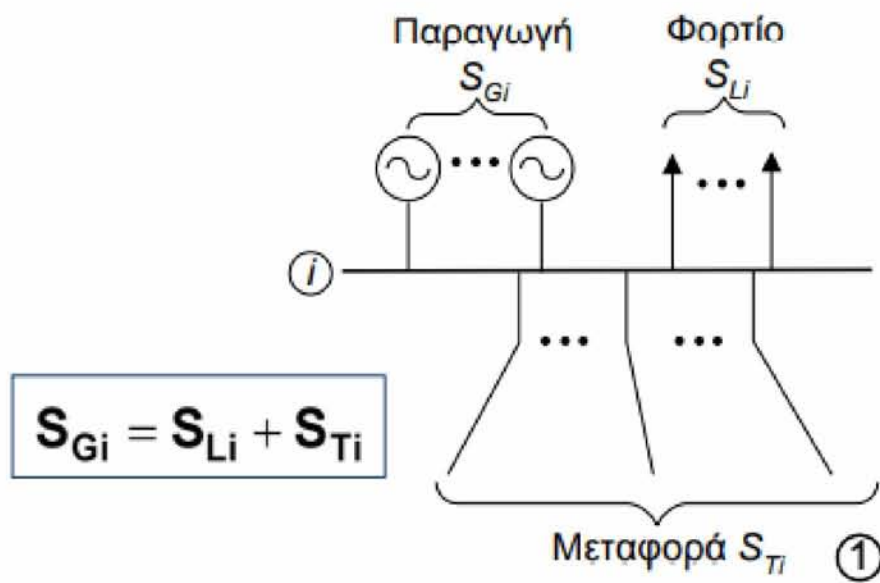
Για την υλοποίηση μιας αποτελεσματικής ανάλυσης φορτίου χρησιμοποιούνται υπολογιστικά προγράμματα τα οποία απαιτούν:

- Την μαθηματική περιγραφή του προβλήματος.
- Την εφαρμογή μια αριθμητικής μεθόδου για την επίλυση των εξισώσεων της ροής φορτίου που προκύπτουν.

Η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος πραγματοποιείται με την χρήση του μαθηματικού μοντέλου της μεθόδου των κόμβων. Για την επίλυση των εξισώσεων της ροής φορτίου γίνεται χρήση επαναληπτικών τεχνικών διότι λόγω της μη γραμμικότητας των εξισώσεων δεν μπορεί να δημιουργηθεί αναλυτική λύση. [2]

2.2 Εξισώσεις ροής φορτίου

Επειδή τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση, στην ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιείται το μονογραμμικό ισοδύναμο (Σχήμα 2.1). Επομένως όλες οι ποσότητες που θα αναφερθούν παρακάτω, είναι ποσότητες ανά φάση.



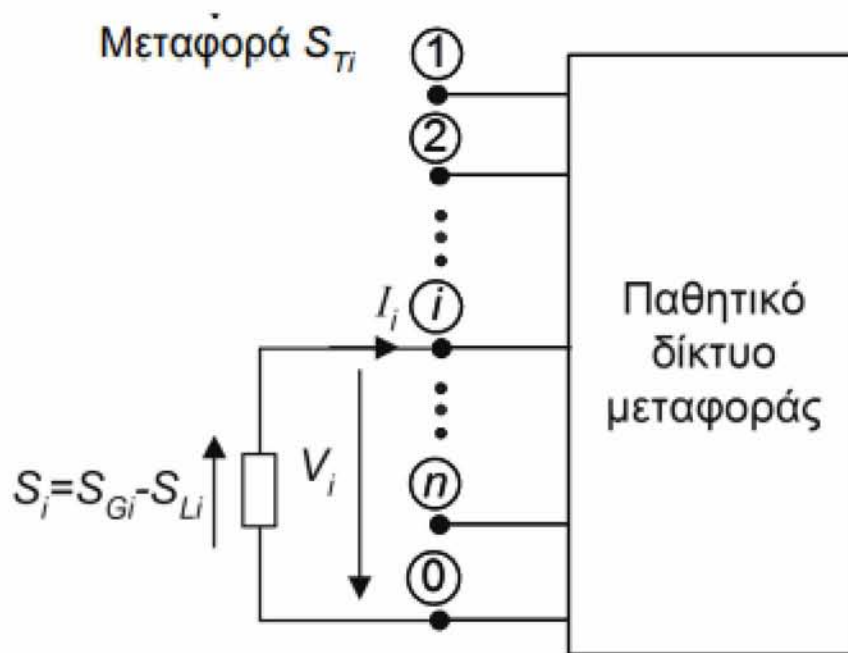
Σχήμα 2.1: Μονογραμμικό ζυγού i ενός συστήματος με n ζυγούς.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των κόμβων σε ένα παθητικό δίκτυο μεταφοράς (Σχήμα 2.2), οι εξισώσεις που περιγράφουν την συμπεριφορά ενός δικτύου είναι οι εξής:

- $I_{bus} = Y_{bus} V_{bus}$ (2.1)

Όπου:

- I_{bus} : Το διάνυσμα των ρευμάτων που εισέρχονται σε ζυγούς διαστάσεων $n \times 1$
- V_{bus} : Το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών οι οποίοι μετριοούνται ως προς το ζυγό αναφοράς, διαστάσεων $n \times 1$, με μορφή $V_i = |V|_i \angle \delta_i$
- Y_{bus} : Ο πίνακας αγωγιμοτήτων των ζυγών, διαστάσεων $n \times n$



Σχήμα 2.2 Σύστημα n ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου.

- Από εξ. 2.1: $I_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j$, $i = 1, 2, \dots, n$ (2.2)

Όσον αφορά την ισχύ S_{T_i} , προκύπτει:

- $S_{T_i} = V_i I_i^* = V_i [\sum_{j=1}^n y_{ij} V_j]^*$, $i = 1, 2, \dots, n$ (2.3)

Η εξίσωση 2.3 δείχνει την πολυπλοκότητα της ροής φορτίου, διότι η ισχύς S_{T_i} που μεταφέρεται εκτός του ζυγού i είναι συνάρτηση των τάσεων όλων των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος. Μπορεί να γραφτεί ως:

- $S_{T_i} = S_{G_i} - S_{L_i} = V_i [\sum_{j=1}^n y_{ij} V_j]^*$, $i = 1, 2, \dots, n$ (2.4)

Όπου S_{G_i} η μιγαδική ισχύς που παρέχουν γεννήτριες και S_{L_i} η μιγαδική ισχύ που καταναλώνουν τα φορτία.

Χρησιμοποιώντας τις συζυγείς παραστάσεις και των δύο μελών και αντικαταστήσουμε $S_{G_i} = P_{G_i} - jQ_{G_i}$ και $S_{L_i} = P_{L_i} - jQ_{L_i}$ η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\bullet P_i - jQ_i = V_i^* \left[\sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \right] \quad , \quad i=1,2,\dots,n \quad (2.5)$$

Όπου $P_i = P_{G_i} - P_{L_i}$ και $Q_i = Q_{G_i} - Q_{L_i}$

Η Εξίσωση 2.5 εκφράζει το μιγαδικό ισοζύγιο της ισχύος σε κάθε ζυγό του δικτύου η οποία αναφέρεται και ως στατική εξίσωση ροής φορτίου (ΣΕΡΦ) υπό μιγαδική μορφή. Στη συνέχεια, με χρήση πολικών συντεταγμένων για αγωγιμότητες και τάσεις η 2.5 χωρίζεται σε δυο εξισώσεις με τον διαχωρισμό πραγματικού και φανταστικού μέρους.

$$\bullet P_i = P_{G_i} - P_{L_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (2.6)$$

$$\bullet Q_i = Q_{G_i} - Q_{L_i} = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (2.7)$$

Οι δυο παραπάνω εξισώσεις αναφέρονται ως στατικές εξισώσεις ροής φορτίου υπό πραγματική μορφή και εκφράζουν το ισοζύγιο της πραγματικής και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό του δικτύου.

Παρατηρήσεις:

1. Οι εξισώσεις είναι αλγεβρικές επειδή περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός συστήματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.
2. Αποτελούν μη γραμμικές εξισώσεις. Δηλαδή δεν είναι εύκολο να παραχθούν αναλυτικές λύσεις, για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούμε αριθμητικές λύσεις με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.
3. Οι εξισώσεις πουθενά δεν εμφανίζουν την συχνότητα των στοιχείων του δικτύου, διότι στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας υποθέτουμε ότι η συχνότητα παραμένει σταθερή.
4. Το ισοζύγιο πραγματικής και άεργου ισχύος μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά αθροίζοντας τις 2.6 και 2.7 αντίστοιχα.
5. Οι φασικές γωνίες δ_i των τάσεων ζυγών δεν εμφανίζονται ποτέ μόνες τους, αλλά μονάχα σαν διαφορές $\delta_i - \delta_j$. [9,2]

2.3 Υπολογιστικές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου.

2.3.1 Ανάγκες για την επίλυση του προβλήματος.

Επειδή οι εξισώσεις ροής φορτίου είναι μη γραμμικές δεν είναι εφικτό να έχουν αναλυτικές λύσεις. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην χρήση των αριθμητικών λύσεων που μπορούν εύκολα να παραχθούν με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων της ροής φορτίου μέσω υπολογιστικών τεχνικών είναι ανάγκη:

1. Η Εκάστοτε τεχνική να μπορεί να χειρίζεται μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις.
2. Να μπορεί να χειρίζεται δεδομένα μεγάλων ενεργειακών συστημάτων με εκατοντάδες ζυγούς και χιλιάδες γραμμές μεταφοράς.
3. Να παρέχουν υψηλή ακρίβεια.
4. Να παρέχουν υψηλές ταχύτητες επεξεργασίας και υπολογισμών.

Τέτοιες τεχνικές για επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων έχουν αναπτυχθεί πολλές. Στη συνέχεια, θα γίνει ενασχόληση με δύο τεχνικές που έχουν συμβάλει πολύ στις μελέτες της ροής φορτίου. Πρόκειται για τη μέθοδο Gauss-Seidel (G-S) και τη μέθοδο Newton – Raphson (N-R). Ο τρόπος με τον οποίο οι παραπάνω τεχνικές προσεγγίζουν το πρόβλημα της επίλυσης των στατικών εξισώσεων είναι ο εξής:

- Πραγματοποιούν μια αρχική εκτίμηση για τη λύση αυτών των εξισώσεων, τις $2n$ άγνωστες ποσότητες που χρειάζεται να υπολογισθούν.
- Η αρχική αυτή εκτίμηση χρησιμοποιείται για να υπολογισθεί, με την βοήθεια των εξισώσεων ροής φορτίου μια καλύτερη εκτίμηση.
- Η δεύτερη εκτίμηση χρησιμοποιείται για να βρεθεί μια καλύτερη τρίτη κ.ο.κ.[2]

2.3.2 Μέθοδος Gauss – Seidel

Η πολυπλοκότητα της επίτευξης μιας επίσημης λύσης για τη ροή φορτίου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει λόγω των δυσκολιών που υπάρχουν στον τύπο των δεδομένων που προδιαγράφονται για τα διάφορα είδη ζυγών. Αν και η διατύπωση επαρκών εξισώσεων για να ταιριάζει με τον αριθμό των άγνωστων μεταβλητών κατάστασης δεν είναι ακατόρθωτη, η κλειστή μορφή λύσης δεν είναι πρακτική.

Οι ψηφιακές λύσεις των προβλημάτων ροής φορτίου ακολουθούν μια επαναληπτική διαδικασία καθορίζοντας τις εκτιμώμενες τιμές στις άγνωστες τάσεις των ζυγών και υπολογίζοντας μια νέα τιμή για κάθε τάση ζυγού από τις εκτιμώμενες. Έτσι αποκτάται ένα νέο σύνολο τιμών για την τάση σε κάθε ζυγό και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό ακόμα ενός άλλου συνόλου τάσεων. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται μέχρι οι αλλαγές σε κάθε ζυγό να είναι μικρότερες από μια ελάχιστη τιμή.[9]

Για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου με την μέθοδο Gauss-Seidel χρησιμοποιείται η μιγαδική μορφή των εξισώσεων. Αρχικά, όλες οι εξισώσεις που περιγράφουν τους ζυγούς του συστήματος εκτός αυτής του ζυγού αναφοράς, πρέπει να μετασχηματιστούν στην μορφή της παρακάτω εξίσωσης.

$$x_i = F_i(x_j + x_{j+1} + \dots + x_k) \quad (2.8)$$

Επομένως η εξίσωση 2.5 γράφεται ως εξής:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = y_{ij}V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij}V_j, i = 2, 3, \dots, n \quad (2.9)$$

Συνεπώς,

$$V_i = \frac{1}{y_{ij}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij}V_j \right], i = 2, 3, \dots, n \quad (2.10)$$

Ο αλγόριθμος G-S διαμορφώνεται ως:

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{y_{ij}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{[V_i^{*(v)}]^*} - \sum_{j=1}^{i-1} y_{ij} V_j^{(v+1)} - \sum_{j=i+1}^n y_{ij} V_j^{(v)} \right] \quad (2.11)$$

Στη μέθοδο αυτή, είναι σημαντικός ο τρόπος αντιμετώπισης των τριών τύπων ζυγών που υπάρχουν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

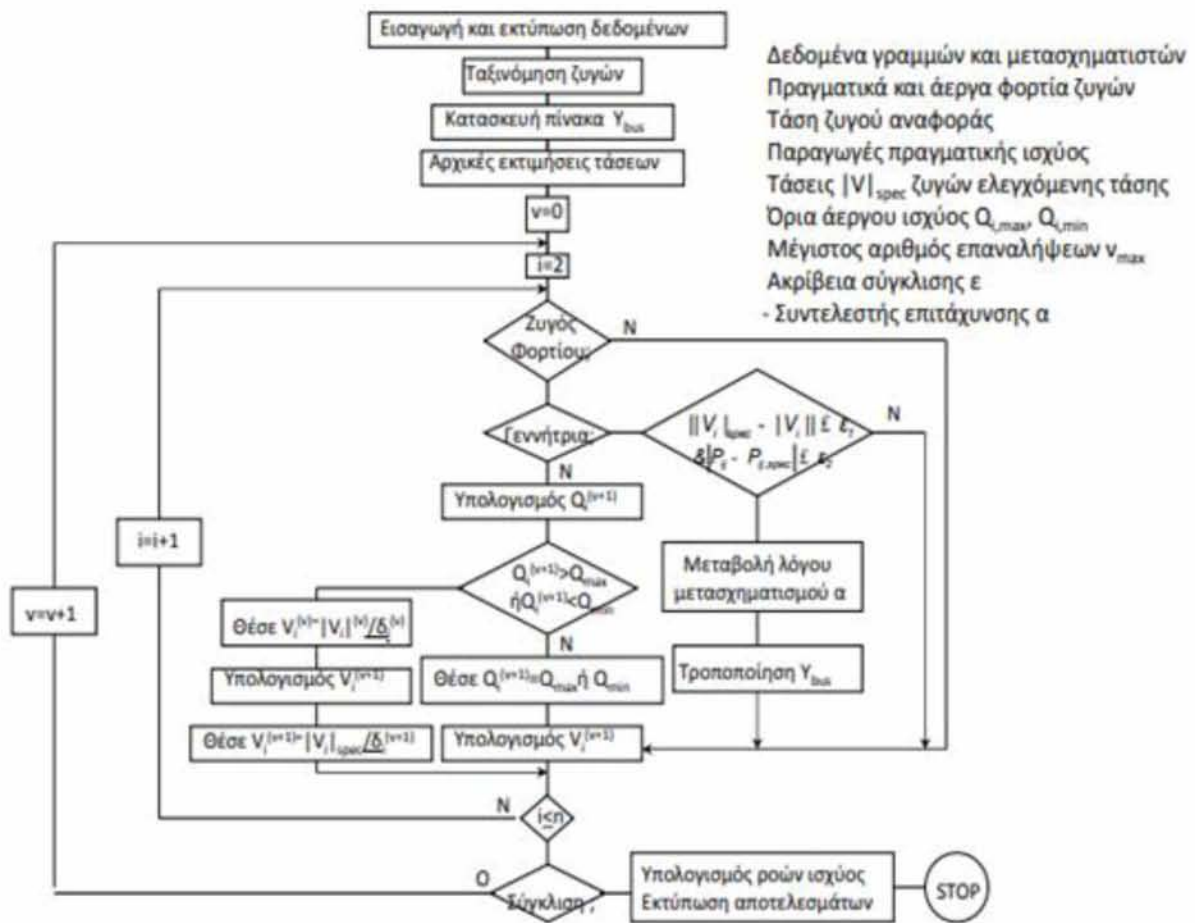
Ζυγός αναφοράς: Λόγω της ιδιότητας του συγκεκριμένου ζυγού ($V_i = |V_i| < \delta_i = 1 < 0^\circ$) γίνεται παράκαμψη αυτού του υπολογισμού.

Ζυγός φορτίου: Σε αυτόν τον τύπο ζυγού είναι γνωστό ότι $P_i = -P_{L_i}$ και $Q_i = -Q_{L_i}$ οπότε το δεύτερο μέρος της εξίσωσης 2.11 ορίζεται πλήρως. Επομένως, σε κάθε επανάληψη υπολογίζονται οι νέες βελτιωμένες τιμές για το μέτρο και τη φασική γωνία της τάσης.

Ζυγός με ελεγχόμενη τάση: Σ' αυτόν τον τύπο ζυγού η παραγωγή της άεργου ισχύος είναι άγνωστη διότι η ποσότητα $Q_i = Q_{G_i} - Q_{L_i}$ δεν είναι εφικτό να υπολογισθεί άμεσα. Επομένως, το δεύτερο μέλος της εξίσωσης 2.11 δεν ορίζεται σαφώς. Για να ξεπεραστεί το εμπόδιο αυτό πρέπει να υπολογισθεί έμμεσα η ποσότητα Q_i από τις τάσεις των ζυγών, χρησιμοποιώντας τις πρόσφατες τιμές τους. Είναι γνωστό ότι σ' αυτόν τον τύπο ζυγού το μοναδικό μέσο για να παραμείνει το μέτρο της τάσης σταθερό στην προκαθορισμένη τιμή $|V_i|_{spec}$ είναι η καθαρή άεργος ισχύς Q_i που χύνεται στον ζυγό αυτόν. Η απαιτούμενη εξίσωση είναι ανάγκη να εξασφαλίζει σταθερό το μέτρο της τάσης $|V_i|_{spec}$ και είναι:

$$Q_i^{(v+1)} = -|V_i|_{spec} \sum_{j=1}^{i-1} |V_j|^{(v+1)} |y_{ij}| \sin(\delta_j^{(v+1)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij}) \\ + \sum_{j=i}^n |V_j|^{(v)} |y_{ij}| \sin(\delta_j^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij}) \quad (2.12)$$

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η αλγοριθμική υλοποίηση για τη σύγκλιση της μεθόδου Gauss – Seidel. [9,2]



Σχήμα 2.3: Γραφική απεικόνιση της αλγοριθμικής υλοποίησης της μεθόδου Gauss – Seidel.

2.3.3 Μέθοδος Newton - Raphson

Η μέθοδος G-S είναι μία απλή σχετικά μέθοδος έχει όμως το μειονέκτημα ότι η σύγκλιση πραγματοποιείται με αργούς ρυθμούς ειδικά στις περιπτώσεις που τα συστήματα είναι μεγάλα. Από την άλλη, η μέθοδος Newton – Raphson συγκλίνει το ίδιο γρήγορα είτε για μικρά είτε για μεγάλα συστήματα με πολλούς ζυγούς. Επομένως η μέθοδος N-R είναι ευρέως διαδεδομένη για την επίλυση μεγάλων συστημάτων παρόλο που χρειάζεται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με την G-S. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι στη δεύτερη είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθεί η μιγαδική

μορφή των εξισώσεων ροής φορτίου όπως γίνεται στην Gauss – Seidel διότι στην προκειμένη μερικές παράγωγοι μιγαδικών μεταβλητών δεν υπάρχουν. Συνεπώς, είναι αναγκαία η χρήση της πραγματικής μορφής των εξισώσεων.

Η αλγοριθμική μέθοδος Newton – Raphson υλοποιείται ως εξής:

1. Έστω ότι είναι γνωστή μια αρχική σειρά τιμών για τις τάσεις των ζυγών των φορτίων. Οι τάσεις του ζυγού αναφορά και των ελέγχου τάσης θεωρούνται δεδομένες. Δίνονται, επίσης, οι αρχικές τιμές των φασικών γωνιών δ για των ζυγών φορτίων και ελέγχου τάσης.
2. Υπολογίζεται η πραγματική ισχύς P_i των ζυγών παραγωγής και ελέγχου τάσης, αλλά και η άεργος ισχύς Q_i των ζυγών ελέγχου τάσης, από τις Σχέσεις 2.6 και 2.7 αντίστοιχα.
3. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι διαφορές πραγματικής και άεργης ισχύος ΔP και ΔQ αντίστοιχα. Τα στοιχεία των διανυσμάτων $\Delta P^{(v)}$ και $\Delta Q^{(v)}$ ορίζονται ως εξής:

$$\bullet \Delta P_i^{(v)} = P_{i,spec} - P_i^{(v)}, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2.13)$$

$$\bullet \Delta Q_i^{(v)} = Q_{i,spec} - Q_i^{(v)}, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2.14)$$

Οι τιμές των P_i και Q_i υπολογίζονται από τις παρακάτω επαναληπτικές σχέσεις:

$$\bullet P_i^{(v)} = \sum_{k=1}^n |V_i^{(v)}| |V_k^{(v)}| |Y_{ik}| \cos(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}), i=1,2,3,\dots,n \quad (2.15)$$

$$\bullet Q_i^{(v)} = -\sum_{k=1}^n |V_i^{(v)}| |V_k^{(v)}| |Y_{ik}| \sin(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}), i=1,2,3,\dots,n \quad (2.16)$$

4. Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα.

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

Και για λόγους ευκολίας μπορεί να γραφτεί συνοπτικά:

$$\bullet \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

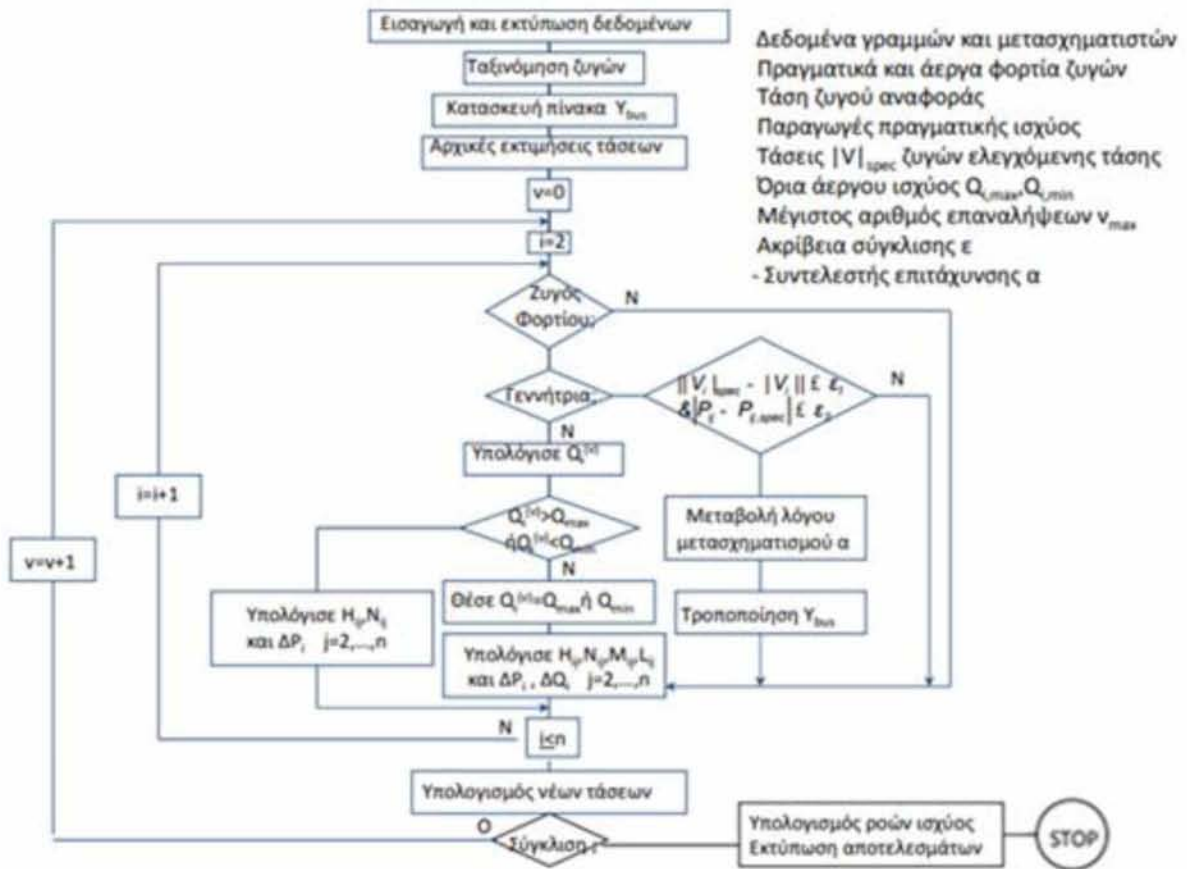
5. Αφού υπολογιστούν οι δύο παραπάνω παράμετροι πραγματοποιείται έλεγχος σύγκλισης της μεθόδου πάνω σε κάποια ορισμένη ανέχεια. Αν η μέθοδος δεν συγκλίνει τότε επαναυπολογίζονται οι εξισώσεις των βημάτων 2, 3, 4 για $(v+1)$ μετατρέποντας το παραπάνω σύστημα πινάκων ως εξής:

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

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ |V|^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ |V|^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

6. Εφόσον τα κριτήρια σύγκλισης $\left| \operatorname{Re}(V_i^{(v+1)}) - \operatorname{Re}(V_i^{(v)}) \right| \leq \varepsilon$ και $\left| \operatorname{Im}(V_i^{(v+1)}) - \operatorname{Im}(V_i^{(v)}) \right| \leq \varepsilon$, όπου $\varepsilon < 10^{-3}$ ικανοποιούνται, υπολογίζεται η πραγματική P και η άεργος ισχύς Q του ζυγού αναφοράς, καθώς και οι ροές ισχύος και οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς.

Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η αλγοριθμική υλοποίηση για τη σύγκλιση της μεθόδου Newton - Raphson. [2]



Σχήμα 2.4 Γραφική απεικόνιση της αλγοριθμικής υλοποίησης της μεθόδου Newton-Raphson.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγή στην έννοια του βραχυκυκλώματος

Βραχυκύκλωμα ονομάζεται κάθε απότομη διαταραχή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία οδηγεί σύνδεση ενεργού τμήματός του με τη γη, είτε άμεσα (στερεό βραχυκύκλωμα), είτε μέσω αντίδρασης.[10]

Πολλές είναι περιπτώσεις καταστροφής του ηλεκτρικού εξοπλισμού εξ αιτίας της χαμηλής τάσης στα ρεύματα σφάλματος τόξου σε συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και κυρίως στην περίπτωση της χαμηλής τάσης. Περιστατικά όπως η πλήρης καταστροφή αγωγών, συστημάτων μόνωσης και μεταλλικών περιβλημάτων από την συμπυκνωμένη απελευθέρωση ενέργειας στο σφάλμα τόξου είναι συνήθεις γεγονότα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και γι αυτό το λόγω τα βραχυκυκλώματα αποτελούν αντικείμενο μελέτης. Τόσο τα γειωμένα όσο και τα μη γειωμένα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής έχουν υποστεί τέτοιου είδους καταστροφές, και τα αναφερόμενα περιστατικά αφορούσαν τόσο τον βιομηχανικό όσο και τον εμπορικό εξοπλισμό διανομής κτιρίων, ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή, τη γεωγραφική θέση ή το περιβάλλον λειτουργίας.[8]

Παρ' όλα αυτά είναι στατιστικά αποδεδειγμένο ότι το 70 με 80% των βραχυκυκλωμάτων είναι παροδικού τύπου. Μόνιμα βραχυκυκλώματα παρατηρούνται εξ αιτίας ακραίων καιρικών φαινομένων που οδηγούν στην εξ ολοκλήρου καταστροφή εξοπλισμού που αναφέρθηκε παραπάνω.

Για τον καλύτερο ορισμό τους τα βραχυκυκλώματα πρέπει να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες.

1. Μεταλλικό ή στερεό, συμμετρικό βραχυκύκλωμα και των τριών φάσεων.
Οφείλεται στην εφαρμογή ίσων, αντίθετων αντιστάσεων σφάλματος Z^{σ} μεταξύ

τριών φάσεων και γης. Λέγεται στερεό ή μεταλλικό όταν $Z^{\sigma} = 0$. Αυτού του είδους τα βραχυκυκλώματα αποτελούν το 5% επί του συνόλου των βραχυκυκλωμάτων

2. Βραχυκυκλώματα μεταξύ δύο φάσεων που είναι δυνατόν να είναι γειωμένες ή όχι. Η τρίτη φάση παραμένει υγιής.
3. Βραχυκύκλωμα μεταξύ μιας φάσης και της γης.

Το πρώτο είδος βραχυκυκλώματος σταματά εντελώς την μεταφορά ισχύος ενώ τα υπόλοιπα δύο ελαττώνουν τον ρυθμό μεταφοράς της. Αποτελεί κανόνα, ότι μετά από κάθε βραχυκύκλωμα ακολουθεί πτώση στις τάσεις του συστήματος, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της τάσης εξόδου και επειδή των γεννητριών παραμένουν αμετάβλητες οι γεννήτριες αρχίζουν να επιταχύνουν. Αν το φαινόμενο αυτό συνεχιστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, θα δημιουργήσει μηχανικές ταλαντώσεις, οι οποίες μπορεί να αποβούν καταστροφικές για το σύστημα.

Όσον αφορά τα ρεύματα, αμέσως μετά από ένα βραχυκύκλωμα μεταβάλλονται πολύ σε σχέση με τα αυτά που διαρρέουν το σύστημα στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του. Γι τον λόγο αυτό, τα ρεύματα στην περίοδο του βραχυκυκλώματος (μεταβατική κατάσταση) αποτελούν σημαντικό κριτήριο για την επιλογή κατάλληλων διακοπών, όπως και για την ρύθμιση των ηλεκτρονόμων, οι οποίοι ελέγχουν τους διακόπτες αυτούς.[2,6]

3.2 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα

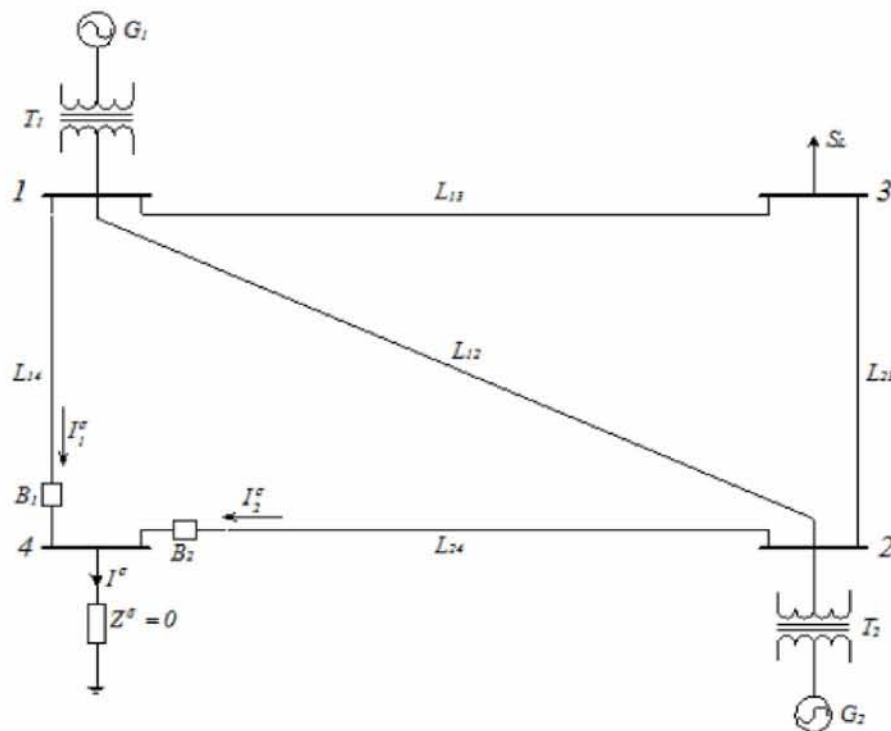
3.2.1 Ορισμός

Ένα συμμετρικό ή ισορροπημένο σφάλμα επηρεάζει εξίσου καθεμία από τις τρεις φάσεις. Σε σφάλματα γραμμής μεταφοράς, περίπου μόνο το 5% είναι συμμετρικά. Σε αντίθεση με ένα ασύμμετρο σφάλμα, όπου οι τρεις φάσεις δεν επηρεάζονται εξίσου. Αυτά τα σφάλματα συμβαίνουν σπάνια στην πράξη σε σύγκριση με ασύμμετρα σφάλματα τα οποία θα αναλυθούν περεταίρω στην επόμενη ενότητα. Δύο είδη συμμετρικών βλαβών περιλαμβάνουν τη γραμμή προς τη γραμμή (L-L) και τη γραμμή προς τη γραμμή προς τη γείωση (L-G). Η εμφάνιση συμμετρικών βλαβών κυμαίνεται από

2 έως 5% των συνολικών βλαβών του συστήματος. Ωστόσο, αν παρουσιαστούν αυτά τα βραχυκυκλώματα, προκαλούν πολύ σοβαρή ζημιά στους εξοπλισμούς, παρόλο που το σύστημα παραμένει σε ισορροπημένη κατάσταση.[6]

3.2.2 Αντοχή συστήματος σε βραχυκύκλωμα

Έστω ότι εξετάζεται η αντοχή ενός συστήματος τεσσάρων ζυγών (Σχήμα 3.1) στη διαταραχή ενός τριφασικού συμμετρικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό 4.



Σχήμα 3.1: Συμμετρικό βραχυκύκλωμα σε σύστημα τεσσάρων ζυγών.

Η ασφαλιστική τάση θα μηδενιστεί ξαφνικά και το υπόλοιπο δίκτυο θα τροφοδοτεί μέσω των ζυγών 1 και 2, ρεύματα βραχυκύκλωσης I_1^σ και I_2^σ στο ζυγό 4. Συνήθως τα ρεύματα βραχυκύκλωσης φτάνουν σε τιμές υπερδιπλάσιες συγκριτικά με τα ρεύματα σε κανονική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος μειώνονται κατά το συμμετρικό βραχυκύκλωμα. Το μέγεθος της πτώσης

είναι ένδειξη της αντοχής του δικτύου. Υπάρχει ανάγκη για την ύπαρξη ένα μέγεθος που περιγράφει την αντοχή αυτή αλλά και της σοβαρότητας του βραχυκυκλώματος. Τα μεγέθη αυτά εκφράζονται από μια ποσότητα που λέγεται αντοχή σε βραχυκύκλωμα (Short Circuit Capacity (SCC)) του εκάστοτε ζυγού.

Αντοχή σε βραχυκύκλωμα σε ζυγό ενός δικτύου ορίζεται σαν το γινόμενο της τάσης του ζυγού πριν το βραχυκύκλωμα και του ρεύματος μετά από αυτό. Στο per unit σύστημα ορίζεται ως εξής:[2]

- $|SCC| = |V_{bf}| |I_{af}| puMVA \quad (3.1)$

Με τη χρήση πολικών στάσεων και φασικών ρευμάτων η αντοχή εκφράζεται ως:

- $|SCC| = \sqrt{3} |V_{bf}| |I_{af}| MVA \quad (3.2)$

Επειδή η προσφαλματική τάση είναι 1 pu, η εξίσωση 3.1 μπορεί να γραφτεί ως:

- $|SCC| = |I_{af}| pu MVA \quad (3.3)$

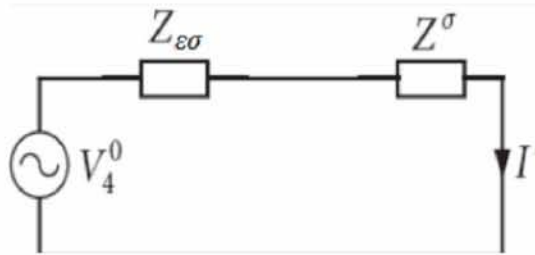
3.2.3 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης μέσω του θεωρήματος Thevenin

Το θεώρημα Thevenin ορίζεται ως εξής:

Οι μεταβολές που συμβαίνουν στις τάσεις και τα ρεύματα ενός δικτύου κατά την εισαγωγή μια σύνθετης αντίστασης μεταξύ δύο κόμβων ενός 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 μετράται όταν μηδενιστούν όλες τις πηγές του.

Έστω Z_{σ} είναι η εσωτερική αντίσταση του κυκλώματος του Σχήματος 3.1, στον ζυγό 4. Το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2 ενδείκνυται για τον υπολογισμό του ρεύματος I^{σ} βραχυκύκλωσης του συμμετρικού βραχυκυκλώματος και υπολογίζεται:

$$I^{\sigma} = \frac{V_4^0}{Z^{\sigma} + Z_{\varepsilon\sigma}} \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.2: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin.

Στην περίπτωση στερεού βραχυκυκλώματος:

$$I^{\sigma} = \frac{V_4^0}{Z_{\varepsilon\sigma}} \quad (3.5)$$

Επομένως, η εσωτερική αντίσταση του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin υπολογίζεται:

$$Z_{\varepsilon\sigma} = \frac{V_4^0}{I^{\sigma}} \quad (3.6)$$

Αν εκφραστούν όλες οι ποσότητες τις εξ. 3.6 σε pu και επειδή συνήθως $V_4^{\sigma} \cong 1$, από την εξ. 3.3 έχουμε ότι $|SCC| = |I^{\sigma}|$, επομένως η εξ. 3.6 μπορεί να γραφτεί και ως:

$$Z_{\varepsilon\sigma} = \frac{1}{|SCC|} \quad (3.7)$$

Πρακτικά, όταν η αντοχή σε βραχυκύκλωμα είναι γνωστή για όλους τους ζυγούς ενός δικτύου, δεν πραγματοποιείται λεπτομερή ανάλυση ενός ΣΗΕ, παρά μόνο η επίδραση που έχει αυτό το τμήμα στο υπόλοιπο δίκτυο μέσω κάποιου ζυγού. Στις περιπτώσεις αυτές γίνεται αντικατάσταση του τμήματος αυτού με πηγή τάσης, ίση με την προσφαλματική τάση του ζυγού αυτού, σε σειρά με μία αντίσταση, όπως δίνεται από την εξ. 3.7.

Παρατηρήσεις:

- Η αντοχή ενός ζυγού εξαρτάται (είναι ανάλογη) από τα MVA του βραχυκυκλώματος στον ζυγό αυτό. Από την εξ. 3.7 διαφαίνεται ότι όσο η αντοχή βραχυκυκλώματος αυξάνεται, τόσο η σύνθετη αντίσταση του ζυγού μειώνεται. Με τον τρόπο αυτό ένας ζυγός αυξάνει την ικανότητα διατήρησης της τάσης του όταν συμβαίνει βραχυκύκλωμα σε έναν άλλο ζυγό. Παρ' όλα αυτά, τα ρεύματα βραχυκύκλωσης σε ζυγούς με μεγάλη αντοχή, είναι πολύ μεγάλα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μεγάλο κόστος σε διακόπτες ασφαλείας. Επομένως, πολλές φορές ακολουθείται η τεχνική μείωσης των MVA βραχυκυκλώματος με την χρήση πηνίων.
- Επειδή η πρώτη δουλειά ενός διακόπτη είναι η άμεση διακοπή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, είναι προτιμότερα τα MVA να επιλέγονται ως μέτρο καταπόνησης του διακόπτη απ' ό,τι το ρεύμα. Μετά την διακοπή υπάρχει ανάγκη αποφυγής της διάσπαση και επαναδημιουργία τόξου, γι αυτό η διηλεκτρική αντοχή μεταξύ των πόλων πρέπει να αυξάνεται ταχύτερα από την τάση που αναπτύσσεται μεταξύ τους. Τελικά, οι διακόπτες προγραμματίζονται να για την διακοπή του ρεύματος αλλά και της τάσης που αναφέρθηκε παραπάνω. Το γινόμενο των δύο αυτών ποσοτήτων είναι τα MVA του βραχυκυκλώματος στη θέση που βρίσκεται ο διακόπτης.
- Πολλές φορές για λόγους απλότητας της ανάλυσης, υποθέτουμε ότι η αντοχή ενός ζυγού είναι άπειρη, πράγμα που σημαίνει μηδενική εσωτερική αντίσταση. Η υπόθεση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένας τέτοιος ζυγός μπορεί να διατηρεί σταθερή τάση υπό οποιοσδήποτε συνθήκες, εκτός της περίπτωσης του στερεού βραχυκυκλώματος στον ίδιο ζυγό.

Στα σημερινά ηλεκτρικά συστήματα ενέργειας η αντοχή βραχυκυκλώματος μπορεί να φτάσει τα 50000 MVA, κάτι που σημαίνει ρεύμα βραχυκύκλωσης 60000A στις περιοχές πολύ υψηλής τάσης (500 KV). [2]

3.3 Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα

3.3.1 Εισαγωγή στα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα

Τα περισσότερα σφάλματα που συμβαίνουν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ασύμμετρα. Αυτά μπορούν να είναι ασύμμετρα στερεά βραχυκυκλώματα ή ασύμμετρα βραχυκυκλώματα δια μέσου αντιστάσεων ή ανοιχτοκυκλωμένων αγωγών. Όλα τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα μπορούν να μελετηθούν με τη χρήση προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή, που αξιοποιούν το θεώρημα Thevenin, που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων στην προηγούμενη ενότητα.

Η διαδικασία μελέτης των βραχυκυκλωμάτων αυτών στηρίζεται στην κατασκευή των δικτύων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας του συστήματος και στη σύνδεσή τους, ανάλογα με τον τύπο του ασύμμετρου βραχυκυκλώματος, για την κατασκευή του τελικού δικτύου, από το οποίο θα υπολογιστούν οι συμμετρικές συνιστώσες του ρεύματος και της τάσης μετά το βραχυκύκλωμα στη θέση αυτού. Από αυτές τις συνιστώσες υπολογίζονται οι συμμετρικές συνιστώσες των ρευμάτων και σε άλλα σημεία του δικτύου. Το προσφαλματικό ρεύμα φορτίου μπορεί να ληφθεί υπόψη, είτε με χρήση του θεωρήματος Thevenin στο κύκλωμα θετικής ακολουθίας, είτε με υπολογισμό των εσωτερικών τάσεων των μηχανών. Στη συνέχεια, γίνεται ο υπολογισμός των συμμετρικών συνιστωσών των ρευμάτων.

3.3.2 Τρόπος μελέτης ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων

1. Καταγραφή, ανάλογα με το είδος του βραχυκυκλώματος, τις χαρακτηριστικές τιμές που παίρνουν οι φασικές τάσεις και τα ρεύματα, στο σημείο του βραχυκυκλώματος.
2. Μετατροπή των συνθηκών που χαρακτηρίζουν τις φασικές ποσότητες, σε συνθήκες που χαρακτηρίζουν τις συμμετρικές συνιστώσες τους.

3. Από τις συνθήκες συμμετρικών συνιστωσών γίνεται καθορισμός του τρόπου που συνδέονται τα ακολουθιακά δίκτυα, για την κατασκευή του τελικού δικτύου.

4. Υπολογισμός των συμμετρικών συνιστωσών του ρεύματος και της τάσης στη θέση του βραχυκυκλώματος.

5. Υπολογισμός των φασικών τιμών των ρευμάτων και τάσεων στη θέση του βραχυκυκλώματος.

6. Εφόσον απαιτείται, λαμβάνεται υπόψη το ρεύμα φορτίου στις γραμμές μεταφοράς:

α) με πρόσθεσή του στις συνιστώσες θετικής ακολουθίας, αν γίνει χρήση του θεωρήματος Thevenin στο κύκλωμα θετικής ακολουθίας

β) το ρεύμα αυτό λαμβάνεται αυτόματα υπόψη, αν στο κύκλωμα θετικής ακολουθίας γίνει χρήση των εσωτερικών ΗΕΔ των μηχανών.

Οι παραπάνω τρόποι μελέτης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εξής ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων:

- Στους ακροδέκτες αφόρτιστων σύγχρονων μηχανών.
- Στερεά βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικών συστημάτων.
- Μέσω συνθέτων αντιστάσεων βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικών συστημάτων.

Οι συνθήκες των φασικών ποσοτήτων των παραπάνω περιπτώσεων θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα.

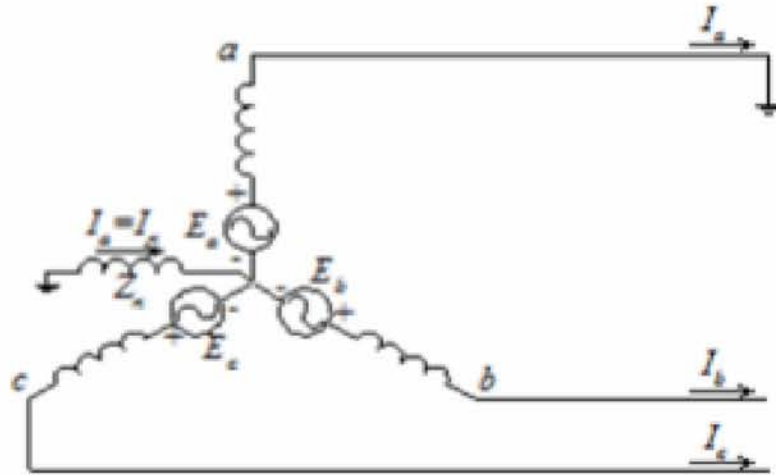
3.3.3 Συνθήκες φασικών ποσοτήτων βραχυκυκλωμάτων

A. Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων μηχανών

Τα βασικά Στερεά βραχυκυκλώματα στους ακροδέκτες σύγχρονων μηχανών ανήκουν σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι:

1. Βραχυκύκλωμα μεταξύ της φάσης α και της γης (Σχήμα 3.3) και ισχύει:

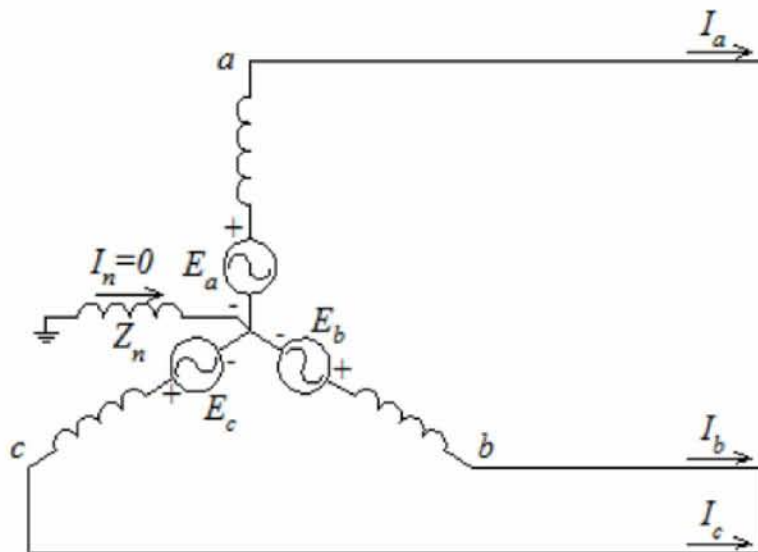
$$V_a = 0, \quad I_b = I_c = 0 \quad (3.8)$$



Σχήμα 3.3: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε ακροδέκτη σύγχρονης γεννήτριας

2. Βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσεων b και c (Σχήμα 3.4) και ισχύει:

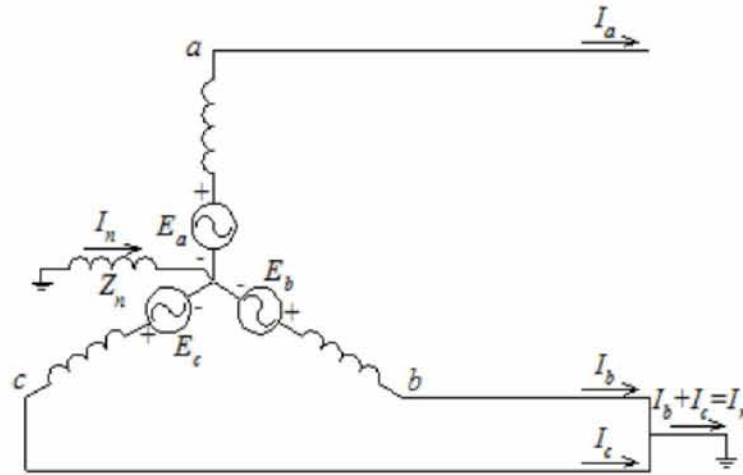
$$V_b = V_c, \quad I_b = -I_c, \quad I_a = 0 \quad (3.9)$$



Σχήμα 3.4: Διφασικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες σύγχρονης γεννήτριας.

3. Βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων b , c και γης (Σχήμα 3.5), όπου ισχύει:

$$V_b = V_c = 0, \quad I_a = 0 \quad (3.10)$$



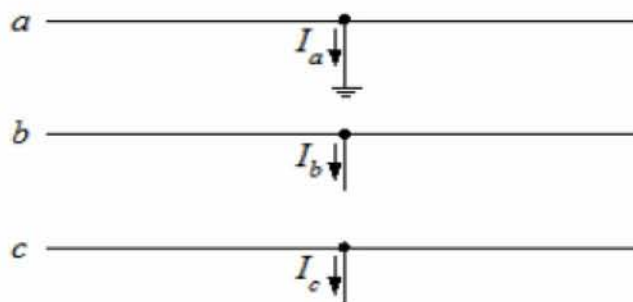
Σχήμα 3.5: Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και γης σε ακροδέκτες σύγχρονης μηχανής.

Β. Στερεά βραχυκυκλώματα στις γραμμές μεταφοράς.

Τα βασικά Στερεά βραχυκυκλώματα στις γραμμές μεταφοράς ανήκουν σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι:

1. Βραχυκύκλωμα μεταξύ της φάσης a και της γης (Σχήμα 3.6). Για το οποίο ισχύει:

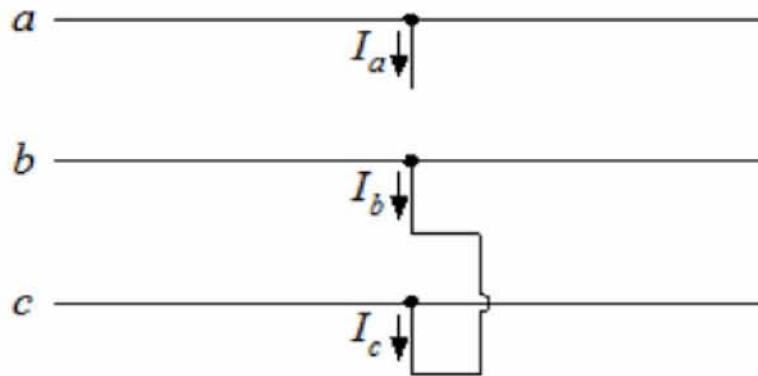
$$V_a = 0, \quad I_b = I_c = 0 \quad (3.11)$$



Σχήμα 3.6: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα

2. Βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων b και c (Σχήμα 3.7), για το οποίο ισχύει:

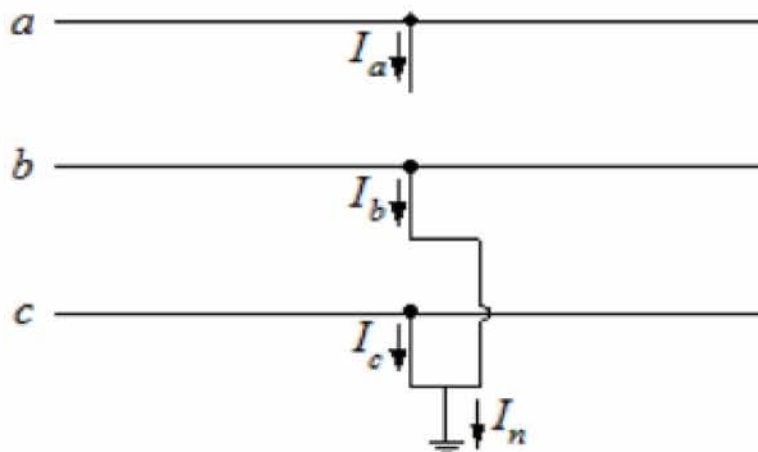
$$V_b = V_c, I_b = -I_c, I_a = 0 \quad (3.12)$$



Σχήμα 3.7: Διφασικό βραχυκύκλωμα.

3. Βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων b, c και γης (Σχήμα 3.8), για το οποίο ισχύει:

$$V_c = V_b = 0, I_a = 0 \quad (3.13)$$



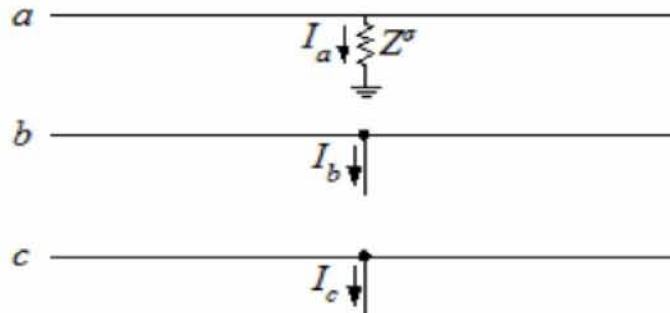
Σχήμα 3.8: Διφασικό βραχυκύκλωμα με την γη.

Γ. Βραχυκυκλώματα μέσω συνθέτων αντιστάσεων σε γραμμές μεταφοράς.

Τα βραχυκυκλώματα αυτά συμβαίνουν δια μέσου σύνθετων αντιστάσεων και προκαλούν υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης όπως και τα προηγούμενα. Η σύνθετη αντίσταση επηρεάζει τις τάσεις στις γραμμές ιδιαίτερα στο σημείο βραχυκύκλωσης. Αυτά τα βραχυκυκλώματα ανήκουν σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι:

1. Βραχυκύκλωμα μεταξύ της φάσης a και της γης, μέσω της αντίστασης Z_{σ} (Σχήμα 3.9), για το οποίο ισχύει:

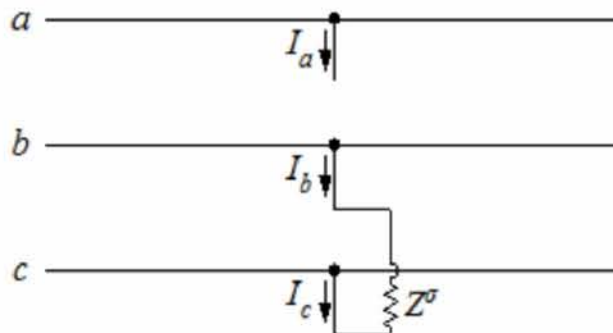
$$V_a = I_a Z_{\sigma}, \quad I_b = I_c = 0 \quad (3.14)$$



Σχήμα 3.9: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα.

2. Βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων b και c, δια μέσου της Z_{σ} (Σχήμα 3.10), για το οποίο ισχύει:

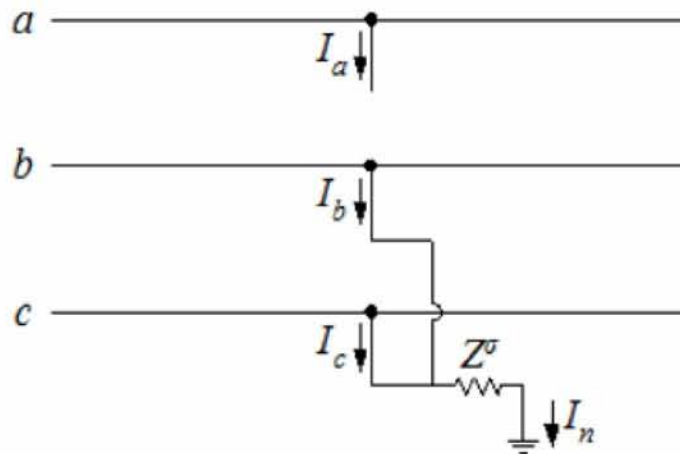
$$V_c = V_b - I_b Z_{\sigma}, \quad I_b = -I_c, \quad I_a = 0 \quad (3.15)$$



Σχήμα 3.10: Διφασικό βραχυκύκλωμα.

3. Βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων b, c και γης, δια μέσου της αντίστασης Z^σ (Σχήμα 3.11), για το οποίο ισχύει:

$$V_b = V_c = (I_b + I_c)Z^\sigma, I_a = 0 \quad (3.16)$$



Σχήμα 3.11: Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη.

3.3.4 Μετατροπή συμμετρικών συνιστωσών

Για τη μετατροπή των φασικών συνθηκών βραχυκύκλωσης σε συμμετρικές συνιστώσες γίνεται χρήση των εξισώσεων:

$$\bullet \begin{bmatrix} I^0 \\ I^1 \\ I^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\bullet \begin{bmatrix} V^0 \\ V^1 \\ V^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Τα παραπάνω συστήματα αποτελούνται από εξισώσεις τριών αγνώστων. Επομένως, για την επίλυση τους απαιτούνται τρεις συνθήκες σφάλματος μεταξύ των τάσεων και των ρευμάτων, όσες δηλαδή έχουν καταγραφεί σε κάθε περίπτωση στερεού βραχυκυκλώματος στην ενότητα αυτή. Συνεπώς, με την αντικατάσταση των φασικών τιμών των ρευμάτων ή των τάσεων στο δεύτερο μέρος του εκάστοτε συστήματος παίρνουμε τις σχέσεις των συμμετρικών συνιστωσών των τάσεων ή ρευμάτων.[2]

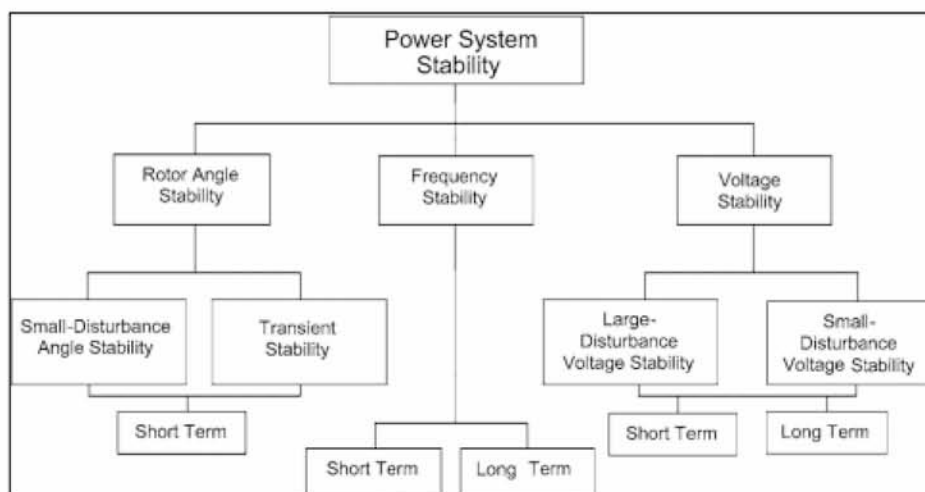
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (Power System Stability) ορίζεται ως η ιδιότητα, η οποία τα επιτρέπει, όχι μόνο να παραμένουν σε κατάσταση λειτουργικής ισορροπίας κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας, αλλά και να επανακτούν μια αποδεκτή κατάσταση λειτουργίας, μετά την έκθεσή τους σε διαταραχές. Για την αξιολόγηση της ευστάθειας ενός συστήματος, είναι απαραίτητη η μελέτη της συμπεριφοράς του υπό την επίδραση διαταραχών, μικρών ή μεγάλων. Μικρές διαταραχές, όπως η μεταβολή του φορτίου των καταναλωτών, συμβαίνουν διαρκώς, με το σύστημα να έχει τη δυνατότητα να αυτορυθμίζεται στις νέες συνθήκες, ώστε να τροφοδοτήσει με επιτυχία το μέγιστο δυνατό φορτίο. Θα πρέπει, επίσης, να μπορεί να ανταπεξέρχεται και σε σοβαρές διαταραχές που ενδέχεται να συμβούν, όπως βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς, απώλειες μεγάλων γεννητριών, φορτίων ή διασυνδέσεων μεταξύ δύο υποσυστημάτων. Η απόκριση του συστήματος για την αντιμετώπιση αυτών των διαταραχών, ενεργοποιεί μεγάλο μέρος του εξοπλισμού, όπως ηλεκτρονόμοι προστασίας για την απομόνωση του σημείου του σφάλματος, ρυθμιστές τάσης γεννητριών και συστήματος μεταφοράς, ρυθμιστές ταχύτητας γεννητριών κ.α. Η μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος διακρίνεται σε ευστάθεια γωνίας δρομέα, τάσης και συχνότητας, ανάλογα με το μέγεθος το οποίο μελετάται, καθώς και σε μεσοπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη, ανάλογα με το χρονικό διάστημα μελέτης της μετά τη διαταραχή (Σχήμα 4.1). Η ευστάθεια γωνίας δρομέα (Rotor Angle Stability) αφορά την ικανότητα των διασυνδεδεμένων σύγχρονων μηχανών ενός ΣΗΕ να παραμένουν σε συγχρονισμό, δηλαδή να στρέφονται με σταθερή σχετική ταχύτητα μεταξύ τους, αφού υποβληθούν σε κάποια διαταραχή. Γενικότερα, οι αυξανόμενες ταλαντώσεις της γωνίας του δρομέα μιας γεννήτριας, μετά από κάποια διαταραχή, ενδέχεται να οδηγήσουν στην απώλεια συγχρονισμού, όχι μόνον αυτής, αλλά και των υπόλοιπων γεννητριών του συστήματος. Διακρίνεται σε ευστάθεια μικρών μεταβολών/διαταραχών (Small

Signal/Disturbance) και σε μεταβατική ευστάθεια (Transient Stability). Η ευστάθεια μικρών μεταβολών σχετίζεται με την ικανότητα του 65 συστήματος να διατηρεί τον συγχρονισμό του υπό την παρουσία μικρών διαταραχών, όπως μεταβολές στα φορτία και στην παραγωγή, ενώ η μεταβατική υπό την παρουσία σοβαρών σφαλμάτων, όπως βραχυκυκλώματα. Η ευστάθεια τάσης (Voltage Stability) σχετίζεται με την ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τις τάσεις όλων των ζυγών του εντός των επιτρεπτών ορίων, τόσο σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, όσο και κατά τη διάρκεια διαταραχών. Μια διαταραχή, όπως η αύξηση της ζήτησης φορτίου ή κάποια αλλαγή στην κατάσταση του συστήματος, ενδέχεται να προκαλέσουν μια ανεξέλεγκτη πτώση τάσης, με σημαντικό αντίκτυπο στην ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Η αστάθεια τάσης οφείλεται, κυρίως, στην αδυναμία του συστήματος να ανταποκριθεί στη ζήτηση άεργου ισχύος. Διακρίνεται και αυτή, ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής που εμφανίζεται, σε ευστάθεια τάσης μεγάλων και μικρών διαταραχών. Αξίζει να επισημανθεί ότι, η αστάθεια τάσης σπανίως εμφανίζεται μόνη της, αλλά εκδηλώνεται ταυτόχρονα με την αντίστοιχη της γωνίας, επηρεάζοντας η μια την άλλη, χωρίς να είναι εύκολη η διάκριση μεταξύ τους. Τέλος, η ευστάθεια συχνότητας (Frequency Stability) αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τη συχνότητα λειτουργίας του σταθερή, έπειτα από μια σοβαρή διαταραχή, αποτέλεσμα της οποίας είναι μια ανισορροπία μεταξύ της παραγωγής και των φορτίων. Η διατήρηση της συχνότητας σε σταθερή τιμή είναι πολύ σημαντική, καθώς παρατεταμένες διακυμάνσεις της τιμής της οδηγούν στην απώλεια μονάδων παραγωγής ή/και φορτίων.



Σχήμα 4.1: Κατηγοριοποίηση μορφών ευστάθειας ΣΗΕ

Η συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα επικεντρωθεί στη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, τη διατήρηση δηλαδή του συγχρονισμού των γεννητριών του συστήματος, κατά τη διάρκεια σοβαρών διαταραχών, όπως βραχυκυκλώματα, απώλειες γραμμών ή παραγωγής ή μεταβολές φορτίων. Η απόκριση του συστήματος, στην περίπτωση αυτή, χαρακτηρίζεται από μεγάλες εκτροπές στις γωνίες των δρομέων των γεννητριών, καθώς επηρεάζεται από τη μη γραμμική σχέση ισχύος – γωνίας. Η αρχική κατάσταση λειτουργίας, καθώς και η σοβαρότητα της διαταραχής, συμβάλουν καθοριστικά στη διαμόρφωση της ευστάθειας. Είναι αξιοσημείωτο ότι, η μεταβολή του συστήματος είναι τέτοια, ώστε, η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μετά τη διαταραχή διαφέρει από την αντίστοιχη πριν την εμφάνιση του σφάλματος. Συνήθως, μελέτες μεταβατικής ευστάθειας πραγματοποιούνται πριν την ένταξη στο σύστημα νέων μονάδων και γραμμών μεταφοράς, καθώς είναι χρήσιμες για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των συστημάτων προστασίας, του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφαλμάτων, των επιπέδων τάσης, καθώς και της ικανότητας μεταφοράς ισχύος μεταξύ των διαφόρων υποσυστημάτων.[3, 10]

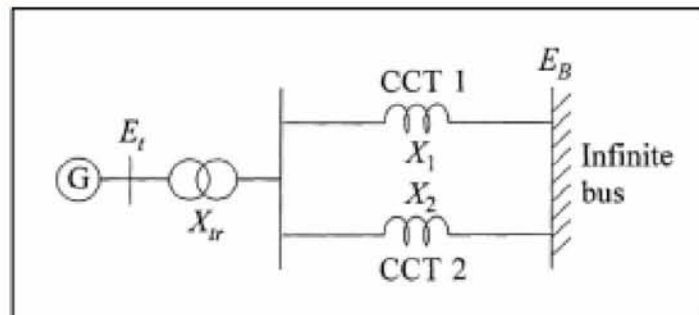
4.2 Εξίσωση ταλάντωσης

Έστω η n -οστή γεννήτρια ενός συστήματος με n μονάδες. Κάθε μονάδα του συστήματος αποτελείται από την αντίστοιχη γεννήτρια, καθώς και τον στρόβιλο που την περιστρέφει. Η γεννήτρια λαμβάνει μέσω του άξονα του στρόβιλου μηχανική ισχύ P_{Tn} και αποδίδει στο δίκτυο ηλεκτρική ισχύ P_{Gn} . Αν αμεληθούν οι απώλειες της γεννήτριας και θεωρηθεί ότι η ισχύς στην είσοδο και την έξοδό της είναι ίσες ($P_{Tn} = P_{Gn}$), τότε η γεννήτρια στρέφεται με σταθερή σύγχρονη ταχύτητα. Στην περίπτωση που υπάρχει διαφορά μεταξύ μηχανικής και ηλεκτρικής ισχύος, αυτή δύναται να χρησιμοποιηθεί:

- Για την αλλαγή της κινητικής ενέργειας, και κατά συνέπεια της ταχύτητας της μονάδας.
- Για την αντιμετώπιση των παραγόντων που εμποδίζουν την περιστροφή της, όπως η ροπή των πηνίων απόσβεσης, οι μεταβολές της τριβής στα έδρανα του δρομέα και οι μαγνητικές απώλειες.

4.3 Μοντέλα σύγχρονων μηχανών σε μελέτες μεταβατικής ευστάθειας

Έστω το σύστημα του Σχήματος 4.2, το οποίο αποτελείται από μια γεννήτρια που προσφέρει ισχύ, μέσω δύο γραμμών μεταφοράς, σε ένα μεγάλο σύστημα. Το σύστημα αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί από έναν άπειρο ζυγό, όπου το μέτρο της τάσης και η συχνότητα παραμένουν σταθερά.



Σχήμα 4.2: Σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού

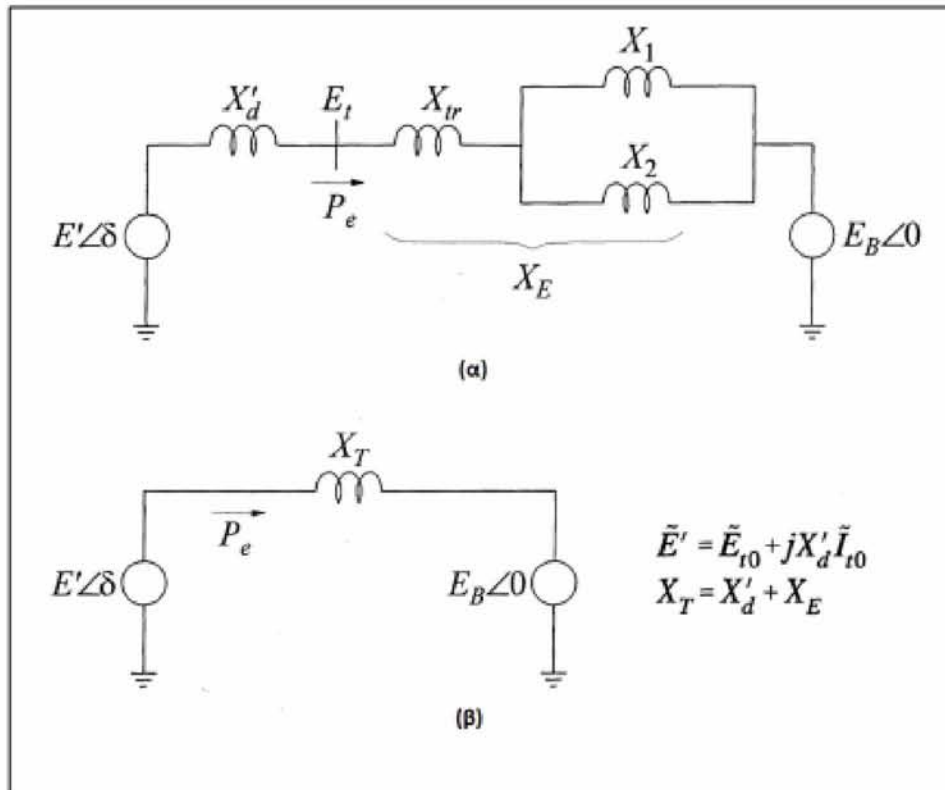
Το ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος, καθώς και η απλοποιημένη του μορφή, παρατίθενται στο Σχήμα 4.3. Κατά τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας, η γεννήτρια αναπαρίσταται από μια πηγή τάσης $E' \angle \delta$ σε σειρά με τη μεταβατική της αντίδραση X_d' . Η γωνία δ του δρομέα εκφράζει το πόσο προπορεύεται το διάνυσμα της τάσης E' σε σχέση με το αντίστοιχο της E_B του άπειρου ζυγού. Κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής, το μέτρο της τάσης E' παραμένει σταθερό και ίσο με την προσφαλματική του τιμή, ενώ η γωνία δ μεταβάλλεται, δεδομένης της απόκλισης της ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας από τη σύγχρονη ω_0 .

Η ισχύς εξόδου της γεννήτριας ισούται με την ισχύ που δέχεται ο άπειρος ζυγός, αφού δεν υπάρχουν ωμικές αντιστάσεις, και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_e = \frac{E' E_B}{X_T} \sin \delta \quad (4.1)$$

Και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν $\delta = 90^\circ \Rightarrow \sin \delta = 1$

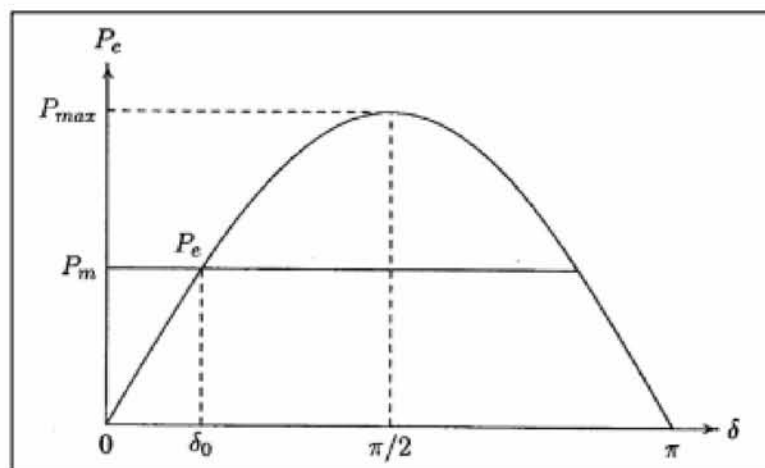
$$P_{max} = \frac{E' E_B}{X_T} \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.3: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα

(β) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα

Από τη Σχέση 4.1 προκύπτει ότι, η καμπύλη της ισχύος P_e , συναρτήσεως της γωνίας δ , έχει ημιτονοειδή μορφή (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Καμπύλη ισχύος-γωνίας

Η σταδιακή αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος, που παρέχει η γεννήτρια στο δίκτυο, είναι δυνατή μέχρι η τιμή της να φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη P_{max} , που υπολογίστηκε από τη Σχέση 4.2. Η τιμή P_{max} , που είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί, αναφέρεται ως όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης και ορίζεται για γωνία $\delta=90^\circ$. Σε περίπτωση που η μηχανική ισχύς εισόδου της γεννήτριας αυξηθεί περαιτέρω, δηλαδή η γωνία δ γίνει μεγαλύτερη των 90° ($\delta>90^\circ$), η ηλεκτρική ισχύς εξόδου θα αρχίσει να μειώνεται σε σχέση με την τιμή P_{max} , η γεννήτρια θα επιταχυνθεί, οδηγώντας τελικά στον αποσυγχρονισμό της από το δίκτυο.

Στην περίπτωση που οι ακροδέκτες της γεννήτριας βραχυκυκλωθούν, το ισοδύναμο κύκλωμά της αποτελείται από τη μεταβατική της αντίδραση X_d' σε σειρά με μια πηγή τάσης, μέτρου ίσου με την προσφαλματική E' . Η καμπύλη ισχύος – γωνίας στην περίπτωση αυτή έχει παρόμοια μορφή με την αντίστοιχη της μόνιμης κατάστασης, με τη διαφορά να έγκειται στη μεγαλύτερη μέγιστη τιμή που παρουσιάζει, συγκριτικά με τη μόνιμη κατάσταση. Στην περίπτωση ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, χρησιμοποιούνται, για τους διάφορους ζυγούς του συστήματος, οι εξισώσεις ρευμάτων και τάσεων θετικής ακολουθίας, λόγω του γεγονότος ότι μόνο οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας δημιουργούν δυνάμεις συγχρονισμού στις σύγχρονες μηχανές. [3, 10]

4.4 Μέθοδοι μελέτης μεταβατικής ευστάθειας

Οι μελέτες μεταβατικής ευστάθειας αφορούν τον προσδιορισμό του κατά πόσον διατηρείται ή όχι ο συγχρονισμός, όταν σε μια σύγχρονη μηχανή του συστήματος εμφανιστεί κάποια σοβαρή διαταραχή, όπως βραχυκυκλώματα, μεγάλες μεταβολές στα φορτία ή απώλειες στην παραγωγή. Στην πλειονότητα των διαταραχών, οι ταλαντώσεις των μεγεθών είναι τόσο έντονες, που το πρόβλημα δεν δύναται να εκφραστεί μέσω γραμμικών σχέσεων και απαιτείται η επίλυση της μη γραμμικής εξίσωσης ταλάντωσης. Στην πράξη, υπάρχουν δύο τρόποι για τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας:

- Οι μέθοδοι απευθείας ανάλυσης, μέσω των οποίων μπορεί να εξεταστεί η ευστάθεια ενός συστήματος, χωρίς να απαιτείται η επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Γενικά υπάρχουν περιορισμοί, που καθιστούν δύσκολη την εφαρμογή τους στην ανάλυση

μεγάλων συστημάτων, με αποτέλεσμα η χρήση τους να περιορίζεται σε ακαδημαϊκό επίπεδο, κυρίως για την κατανόηση του φαινομένου της μεταβατικής ευστάθειας. Η πιο σημαντική από αυτές, είναι η μέθοδος των ίσων εμβαδών, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία στη μελέτη συστημάτων με δύο μηχανές ή με μια μηχανή που τροφοδοτεί έναν άπειρο ζυγό.

- Η μέθοδος της έμμεσης λύσης, όπου οι αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις, που περιγράφουν το σύστημα, επιλύονται μέσω αριθμητικών μεθόδων από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Η ύπαρξη ή η απουσία ευστάθειας, του εκάστοτε εξεταζόμενου συστήματος, προσδιορίζεται μέσω της μελέτης των καμπυλών ταλάντωσης, που προκύπτουν από την εκτέλεση της μεθόδου. Αξιοποιείται από τα λογισμικά προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως το PSS/E της Siemens και το PowerWorld της PowerWorld Corporation, αποτελώντας μία πρακτική λύση για τη μελέτη της ευστάθειας πραγματικών συστημάτων. [3, 10]

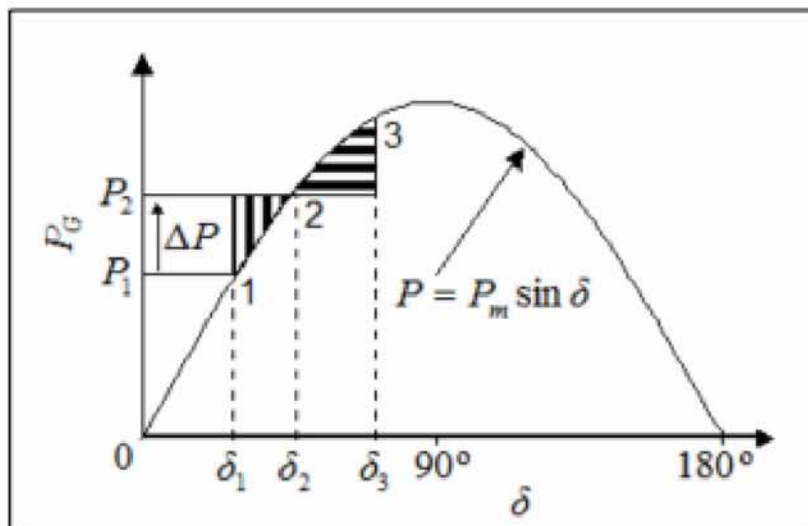
4.5 Κριτήριο Ίσων Εμβαδών

Το Κριτήριο των Ίσων Εμβαδών (Equal Area Criterion) χρησιμοποιείται για γρήγορη πρόβλεψη της ευστάθειας, σε συστήματα με δύο διασυνδεδεμένες μηχανές ή με μία μηχανή και έναν άπειρο ζυγό. Βασίζεται στη γραφική ερμηνεία της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στα κινούμενα μέρη της μηχανής. Με το πέρας της εφαρμογής του κριτηρίου, αν διαπιστωθεί ότι η γωνία ταλάντωσης της μηχανής δ αυξάνει απεριόριστα, τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται από αστάθεια. Αντίθετα, αν η δ ταλαντώνεται γύρω από μια θέση ισορροπίας, το σύστημα είναι ευσταθές. Στη συνέχεια παρατίθενται οι κυριότερες εφαρμογές του κριτηρίου.

4.5.1 Βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου

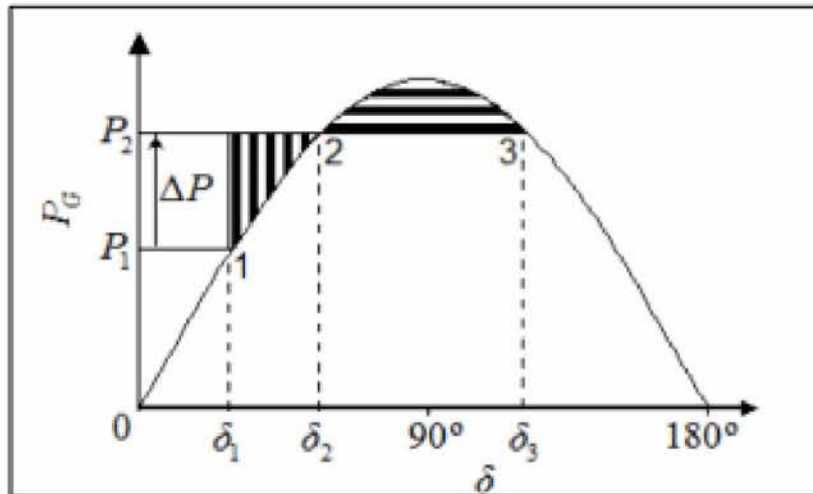
Το σύστημα που θα μελετηθεί αποτελείται από μια σύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη με έναν άπειρο ζυγό. Η γεννήτρια χαρακτηρίζεται από σταθερό μέτρο εσωτερικής ΗΕΔ E' και μεταβατική αντίδραση X_d' , ενώ το δίκτυο παρουσιάζει επαγωγικό χαρακτήρα. Το

σημείο 1 στο Σχήμα 4.5 είναι η αρχική κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας. Έστω ότι πραγματοποιείται μια βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου της γεννήτριας PT κατά ΔP , μέχρι το σημείο 2. Κατά τη διάρκεια που η γωνία δ μεταβάλλεται από δ_1 σε δ_2 , ο δρομέας απορροφά κινητική ενέργεια, με αποτέλεσμα την αύξηση των στροφών 72 του. Όταν η ισχύς της γεννήτριας γίνει ίση με P_2 ($\delta=\delta_2$), η γεννήτρια έχει ταχύτητα λίγο μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, με αποτέλεσμα η γωνία δ να συνεχίσει να αυξάνεται, μέχρι η ταχύτητα του δρομέα να γίνει ίση με τη σύγχρονη. Αυτό συμβαίνει όταν $\delta=\delta_3$. Ο δρομέας έχει, τότε, επιστρέψει όλη την κινητική ενέργεια που απορρόφησε, κατά τη μεταβολή της δ από δ_1 σε δ_2 , με αποτέλεσμα τα δύο σκιασμένα εμβαδά του Σχήματος 4.5 να είναι ίσα. Ουσιαστικά, ο δρομέας ταλαντώνεται μεταξύ δ_1 και δ_3 , μέχρι, λόγω των απωλειών, οι ταλαντώσεις αυτές να αποσβεστούν και να ισορροπήσει στη νέα μόνιμη κατάσταση ($\delta=\delta_2$).



Σχήμα 4.5: Κριτήριο ίσων εμβαδών για βηματική αύξηση PT

Πρέπει να επισημανθεί ότι, για δεδομένη αρχική κατάσταση με γωνία δ_1 , ορίζεται η μέγιστη μεταβολή ισχύος ΔP , που οδηγεί σε $\delta_3=\pi-\delta_2$, για την οποία το σύστημα παραμένει ευσταθές (Σχήμα 4.6). Για μεγαλύτερη μεταβολή, τα δύο σκιασμένα εμβαδά δε δύναται να είναι ίσα, με αποτέλεσμα το σύστημα να οδηγηθεί σε αστάθεια. [3, 10]

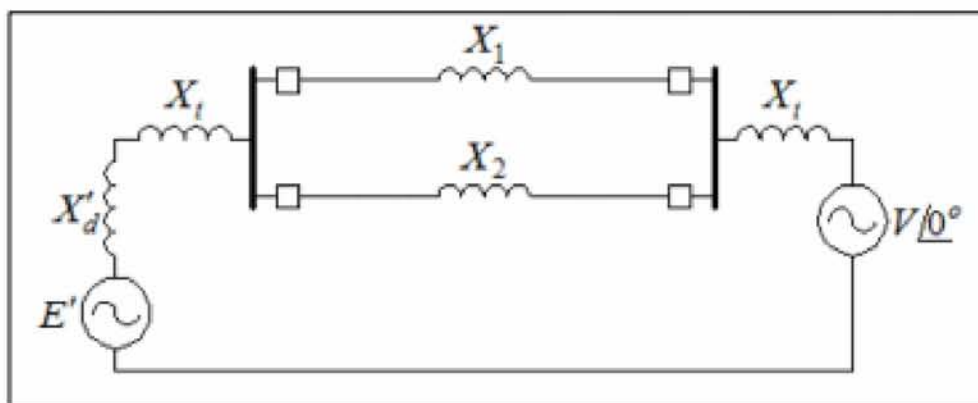


Σχήμα 4.6: Οριακή περίπτωση, όταν $\delta_3 = \pi - \delta_2$

4.5.2 Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής

Στην περίπτωση αυτή, η γεννήτρια τροφοδοτεί έναν άπειρο ζυγό μέσω δύο παράλληλων γραμμών μεταφοράς (Σχήμα 4.7). Η παρεχόμενη ισχύς στο ζυγό δίνεται από τη σχέση:

$$P_{GI} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + 2X_t + (X_1 || X_2)} \sin \delta \quad (4.3)$$

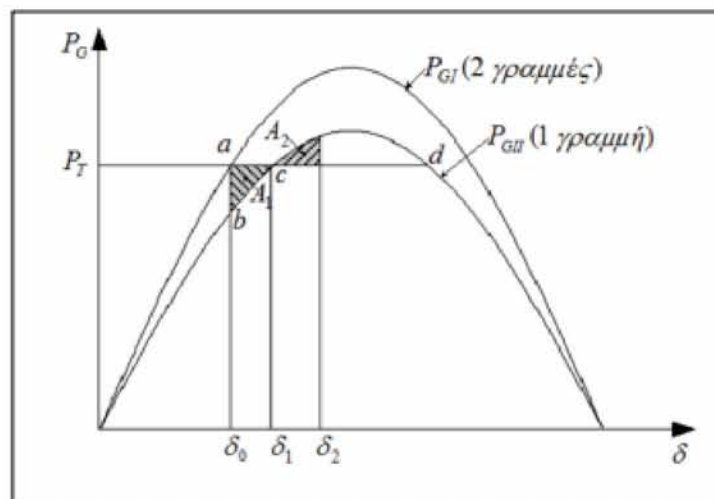


Σχήμα 4.7: Σύνδεση γεννήτριας με άπειρο ζυγό μέσω δύο παράλληλων γραμμών μεταφοράς

Στην περίπτωση που οι διακόπτες της γραμμής L2 ανοίξουν ταυτόχρονα και η γραμμή αποσυνδεθεί από το σύστημα, η ισχύς προς το ζυγό διοχετεύεται αποκλειστικά από τη γραμμή L1, με αποτέλεσμα την ελάττωσή της:

$$P_{GII} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + 2X_t + X_1} \sin \delta \quad (4.4)$$

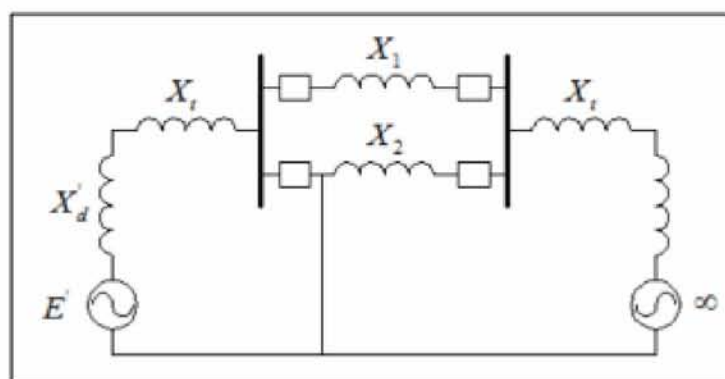
Οι καμπύλες των Σχέσεων 4.3 και 4.4 απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8. Το αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος ορίζεται για PT, με γωνία δ_0 . Με την αποσύνδεση της γραμμής L2, η παρεχόμενη ισχύς αντιστοιχεί πλέον στο b της PGII. Λόγω του ότι η ισχύς εισόδου της γεννήτριας από τον στρόβιλο παραμένει σταθερή, η γωνία δ θα αυξηθεί. Η ενέργεια για την επιτάχυνση του δρομέα αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν A1, ενώ η ενέργεια για την ακόλουθη σταδιακή επιβράδυνσή του, από το εμβαδόν A2. Το νέο σημείο λειτουργίας του συστήματος είναι το c, με γωνία δ_1 . Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, μπορεί να οριστεί η μέγιστη τιμή μεταφερόμενης ισχύος για την κατάσταση αυτή, υπέρβαση της οποίας οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια, καθώς το εμβαδόν A2 δε δύναται να είναι ίσο με το A1. Η τιμή αυτή της ισχύος αντιστοιχεί σε γωνία δ_2 , που βρίσκεται στην τομή του PT και της καμπύλης PGII, δηλαδή για $\delta_2 = \pi - \delta_1$. [3, 10]



Σχήμα 4.8: Εφαρμογή του κριτηρίου ίσων εμβαδών, για την αποσύνδεση της μίας παράλληλης γραμμής

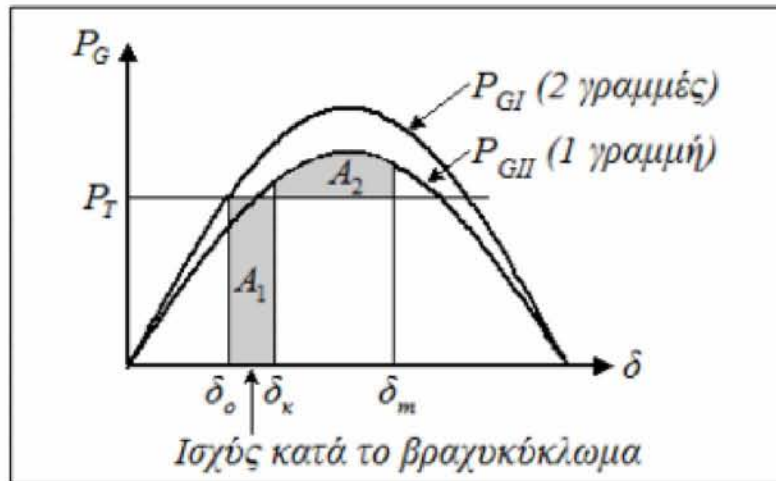
4.5.3 Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή

Έστω ότι συμβαίνει ένα στερεό ($Z_f=0$) τριφασικό βραχυκύκλωμα στο άκρο της μίας εκ των δύο γραμμών του συστήματος του Σχήματος 4.9. Στην περίπτωση αυτή, όλο το ρεύμα της γεννήτριας ρέει, μέσω επαγωγικής αντίδρασης, προς τη γη. Λόγω της επαγωγικής φύσης του ρεύματος, η γεννήτρια παρέχει μόνο άεργο ισχύ, με την παρεχόμενη πραγματική να είναι μηδέν. Αν το βραχυκύκλωμα δεν αντιμετωπιστεί, η γεννήτρια επιταχύνεται και η γωνία δ αυξάνεται απεριόριστα.



Σχήμα 4.9: Τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ένα άκρο της γραμμής

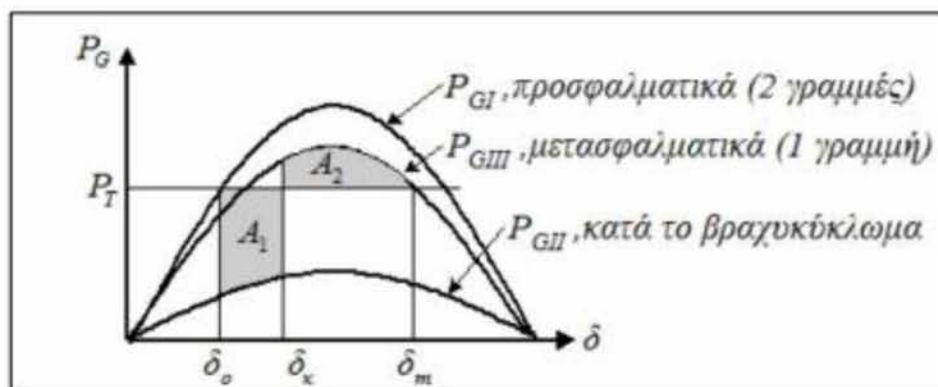
Στο Σχήμα 4.10, η PGI είναι η καμπύλη πριν το βραχυκύκλωμα. Με την απομόνωση του σημείου του βραχυκυκλώματος, η ισχύς παρέχεται στον άπειρο ζυγό μέσω της γραμμής L1 (καμπύλη P_{GII}). Η εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος πραγματοποιείται για $\delta=\delta_k$. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι, αν η εκκαθάριση καθυστερήσει, ίσως να μην είναι πλέον δυνατόν το εμβαδόν A_2 να ισούται με το A_1 , με συνέπεια το σύστημα να οδηγηθεί σε αστάθεια. Έτσι, για κάθε ισχύ P_T , ορίζεται μια κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης, με το σφάλμα να είναι ανάγκη να εκκαθαριστεί νωρίτερα από αυτή. Ο χρόνος για να φτάσει η γωνία ισχύος δ την κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης, ονομάζεται κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης και παίζει καθοριστικό ρόλο για τη ρύθμιση των συστημάτων προστασίας του ΣΗΕ. Ο χρόνος αυτός δεν υπολογίζεται μέσω του κριτηρίου των ίσων εμβαδών, αλλά μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης της εξίσωσης ταλάντωσης.



Σχήμα 4.10: Κριτήριο ίσων εμβαδών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα και απομόνωσής του μέσω αποσύνδεσης της γραμμής

Στην περίπτωση που το είδος του βραχυκυκλώματος επιτρέπει μια περιορισμένη παροχή ισχύος προς στον άπειρο ζυγό, οι καμπύλες του κριτηρίου των ίσων εμβαδών παρατίθενται στο Σχήμα 4.11, όπου η καμπύλη P_{GI} ($P_{mI} \sin\delta$) αντιπροσωπεύει την ισχύ πριν το βραχυκύκλωμα, η P_{GII} ($P_{mII} \sin\delta$) την ισχύ που μεταφέρεται κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος και η P_{GIII} ($P_{mIII} \sin\delta$) την ισχύ μετά την απομόνωση του σφάλματος. Εξισώνοντας τα δύο εμβαδά A_1 και A_2 , προκύπτει, μετά από πράξεις, η κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης δ_k : [3, 10]

$$\delta_k = \cos^{-1} \frac{P_T(\delta_m - \delta_0) - P_{mII} \cos\delta_0 + P_{mIII} \cos\delta_m}{P_{mIII} - P_{mII}} \quad (4.5)$$



Σχήμα 4.11: Κριτήριο ίσων εμβαδών, όταν μεταφέρεται ισχύς κατά τη διάρκεια του σφάλματος

4.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβατική ευστάθεια

Η μεταβατική ευστάθεια μιας γεννήτριας εξαρτάται και επηρεάζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

1. Τον βαθμό φόρτισης της γεννήτριας.
2. Την ισχύ εξόδου της γεννήτριας κατά τη διάρκεια του σφάλματος, η οποία και εξαρτάται από το είδος και το σημείο του σφάλματος.
3. Τον χρόνο εκκαθάρισης του σφάλματος.
4. Την αντίδραση του συστήματος μεταφοράς, αφότου εκκαθαριστεί το σφάλμα.
5. Την αντίδραση της ίδιας της γεννήτριας, καθώς μικρότερη τιμή αντίδρασης οδηγεί στην αύξηση της μέγιστης ισχύος, αλλά και στη μείωση της αρχικής γωνίας του δρομέα.
6. Την αδράνεια της γεννήτριας, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η αδράνεια, τόσο πιο αργός είναι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας.
7. Το μέτρο της εσωτερικής ΗΕΔ E' της γεννήτριας, το οποίο και καθορίζεται από τη διέγερσή της. 8. Το μέτρο της τάσης του άπειρου ζυγού EB, τον οποίο η γεννήτρια τροφοδοτεί. [10]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SIEMENS PSS/E

5.1 Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα σημερινά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, εκτός από τα μεγάλα μεγέθη, χαρακτηρίζονται και από το μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας. Για το λόγο αυτό, η χρήση λογισμικών και υπολογιστών με μεγάλη επεξεργαστική ισχύ αποτελεί ανάγκη όχι μόνο για τον γρήγορο και ακριβή σχεδιασμό τους, αλλά και κατά τη μετέπειτα λειτουργία τους. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων, τα λογισμικά αυτά αξιοποιούν μαθηματικές μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης, ενώ η χρήση τους επεκτείνεται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως στους τομείς της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ισχύος, καθώς και σε εφαρμογές βιομηχανικής φύσεως. Οι κυριότερες υπολογιστικές λειτουργίες που προσφέρονται είναι:

- Μελέτη ροής φορτίου.
- Ανάλυση σφαλμάτων.
- Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας.
- Επιλογή και ρύθμιση διακοπτικών συσκευών και συστημάτων προστασίας.

Ανάλογα με τη χρήση που προορίζονται, εμπορική ή ακαδημαϊκή, διατίθενται πολλά πακέτα λογισμικών προσομοίωσης με πληθώρα δυνατοτήτων. Ένα από αυτά είναι το PSS/E (Power System Simulation for Engineering) της Siemens, το οποίο χρησιμοποιείται από ηλεκτρολόγους μηχανικούς σε ολόκληρο τον κόσμο. Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, θα χρησιμοποιηθεί το PSS/E για τη μελέτη του συστήματος των 9 ζυγών της IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). [10]

5.2 Σύστημα 9 ζυγών IEEE

Το σύστημα 9 ζυγών της IEEE (Σχήμα 5.1) το οποίο παρουσιάζεται μέσω ενός ισοδυνάμου συστήματος τριών γεννητριών και εννέα ζυγών. Το σύστημα χωρίζεται σε δύο περιοχές:

- Περιοχή 1: Ζυγοί 1, 4, 5, 6.
- Περιοχή 2: Ζυγοί 2, 3, 7, 8, 9.

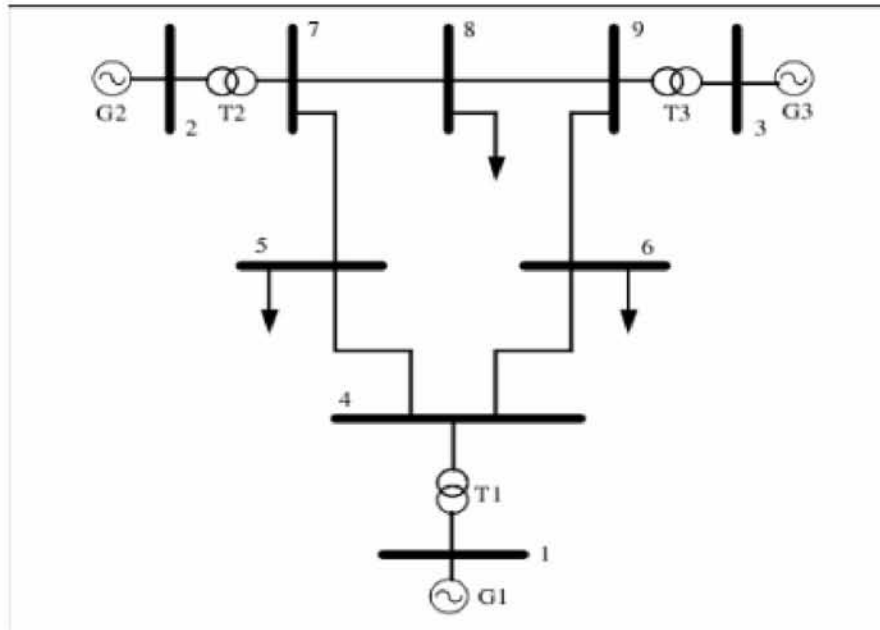
Και σε έξι ζώνες (zones):

- Ζώνη 1: Ζυγοί 1 και 4 (Ζυγοί γεννήτριας και μετασχηματιστή ανύψωσης).
- Ζώνη 2: Ζυγοί 2 και 7 (Ζυγοί γεννήτριας και μετασχηματιστή ανύψωσης).
- Ζώνη 3: Ζυγοί 3 και 9 (Ζυγοί γεννήτριας και μετασχηματιστή ανύψωσης).
- Ζώνη 4: Ζυγός 5 (Ζυγός φορτίου).
- Ζώνη 5: Ζυγός 6 (Ζυγός φορτίου).
- Ζώνη 6: Ζυγός 8 (Ζυγός φορτίου).

Ανάλογα με τον ζυγό, οι βάσεις τάσης διαμορφώνονται:

1. 13,8kV: Ζυγός 3.
2. 16,5kV: Ζυγός 1.
3. 18kV: Ζυγός 2.
4. 230kV: Ζυγοί 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Ο ζυγός 1 του συστήματος ορίζεται ως Ζυγός Αναφοράς (Swing Bus).



Σχήμα 5.1: Μονογραμμική αναπαράσταση συστήματος 9 ζυγών.

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του παραπάνω γεννητριών συστήματος φαίνονται στον Πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1: Ονομαστικά χαρακτηριστικά γεννητριών:

ΖΥΓΟΣ	kV	MVA	R (pu)	X (pu)
1	16,5	260	0,000100	0,100000
2	18,0	310	0,000100	0,210000
3	13,8	280	0,000100	0,210000

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των Μετασχηματιστών φαίνονται στον Πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2: Ονομαστικά χαρακτηριστικά Μετασχηματιστών

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	ΖΥΓΟΙ	kV	X (pu)
T1	1 - 4	16,5 / 230,0	0,057600
T2	2 - 7	18,0 / 230,0	0,062500
T3	3 - 9	13,8 / 230,0	0,058600

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των Γραμμών Μεταφοράς φαίνονται στον Πίνακα 5.3:

Πίνακας 5.3: Ονομαστικά χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς

ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	kV	R (pu)	X (pu)	B (pu)
4 - 5	230	0,010000	0,085000	0,176000
4 - 6	230	0,017000	0,092000	0,158000
5 - 7	230	0,032000	0,161000	0,306000
6 - 9	230	0,039000	0,170000	0,358000
7 - 8	230	0,008500	0,072000	0,149000
8 - 9	230	0,011900	0,100800	0,209000

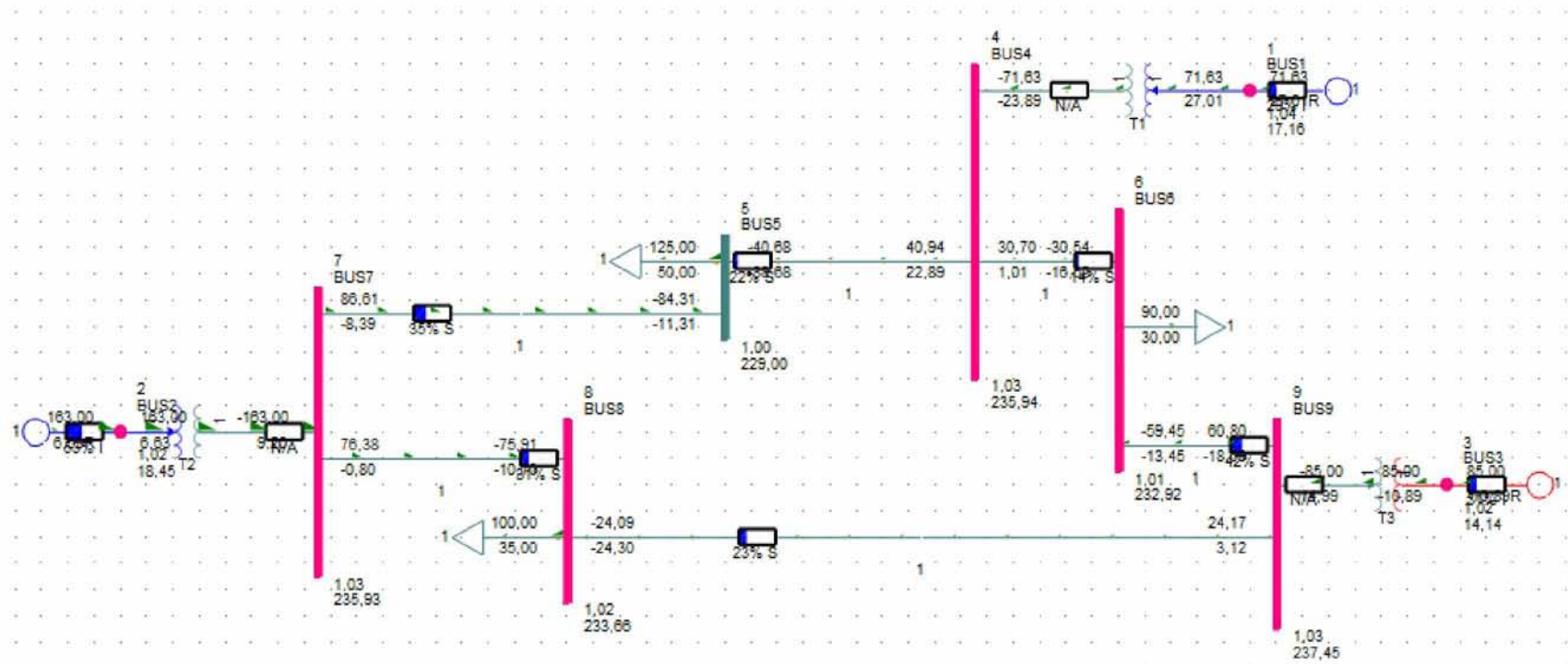
Τέλος, το σύστημα τροφοδοτεί φορτία, με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 5.4:

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά Φορτίων

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

5.3 Προσομοίωση ροής φορτίου

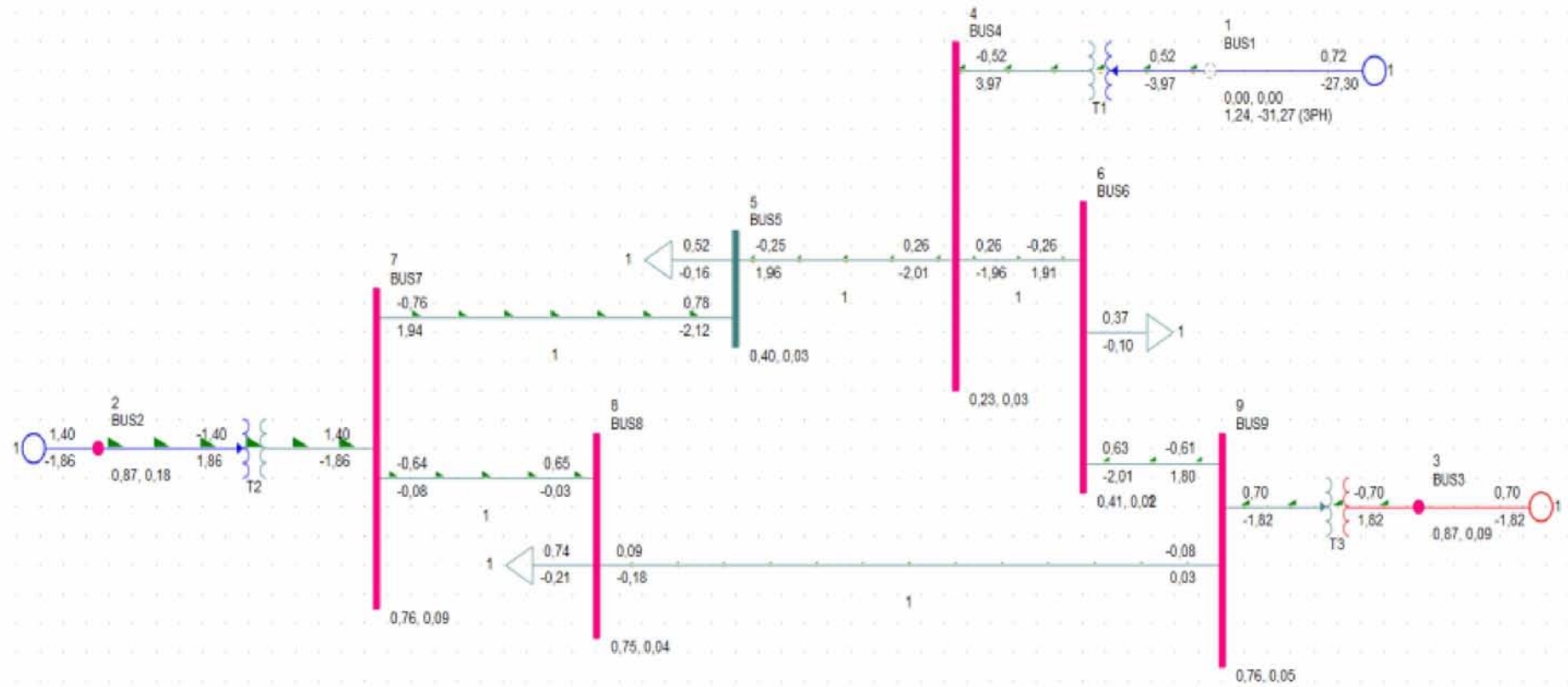
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ροής φορτίου στο PSS/E, για το παραπάνω σύστημα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2. Σε κάθε ζυγό σημειώνεται η τάση του εκφρασμένη σε kV και pu, στις γεννήτριες η παραγωγή πραγματικής (MW) και άεργου ισχύος (MVAR) και στις γραμμές μεταφορά η ροή ισχύος που διακινείται (MW και MVAR). Τέλος, στα φορτία του συστήματος, παρουσιάζονται οι καταναλώσεις τους (MW και MVAR).



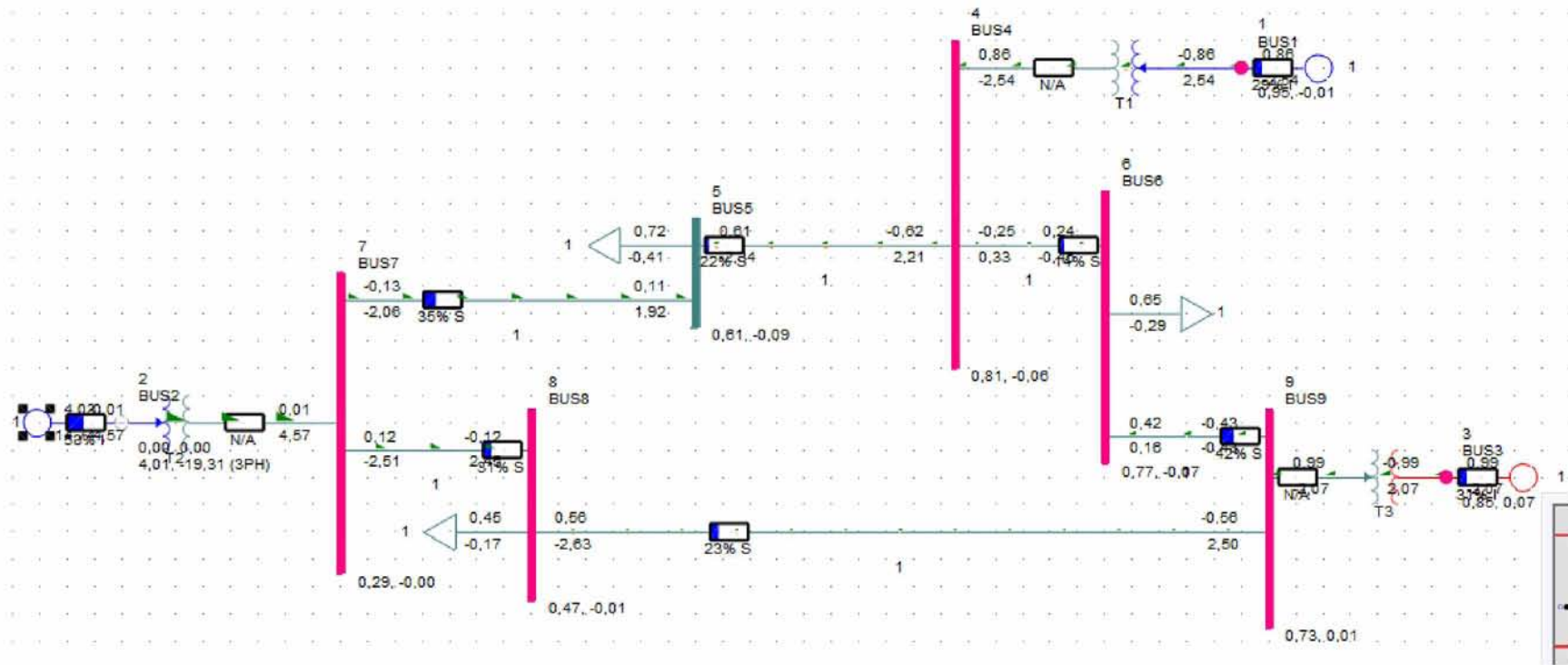
Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα ροής φορτίου.

5.4 Συμμετρικό Τριφασικό Βραχυκύκλωμα

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εφαρμογή στερεού συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος σε κάποιους από τους ζυγούς του συστήματος, κατά σειρά (Σχήμα 5.3 έως Σχήμα 5.6). Σε όλες τις περιπτώσεις διαφαίνονται τα ρεύμα βραχυκύκλωσης στον ζυγό που έγινε το σφάλμα, οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών, καθώς και τα ρεύματα όλων των γραμμών και γεννητριών, εκφρασμένα όλα σε pu.



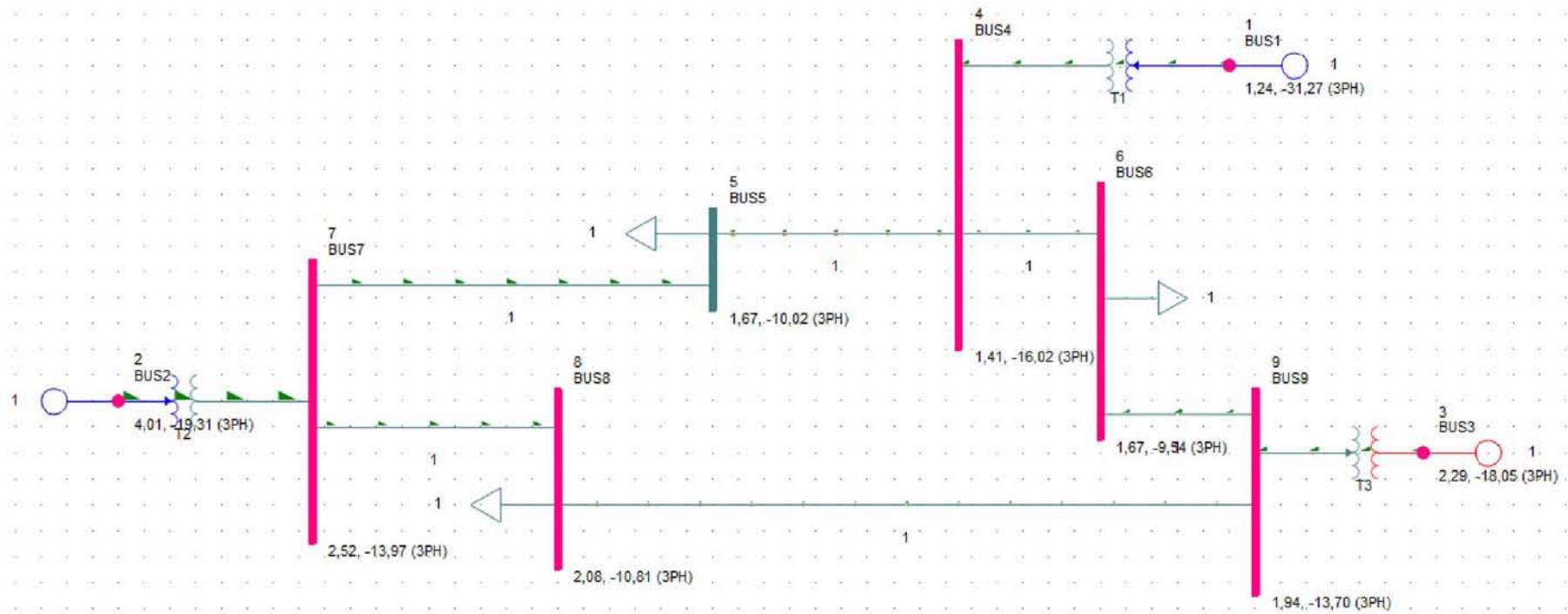
Σχήμα 5.3: 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 1



Σχήμα 5.4: 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 2



Σχήμα 5.5: 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 3



Σχήμα 5.6: 3Φ βραχυκύκλωμα σε κάθε ζυγό του συστήματος.

Ο Πίνακας 5.5 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα ρεύματα βραχυκύκλωσης (σε pu) για κάθε στερεό συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα που προσομοιώθηκε παραπάνω.

Πίνακας 5.5: Ρεύματα βραχυκύκλωσης (σε pu) για κάθε περίπτωση εφαρμογής
συμμετρικού 3φ βραχυκυκλώματος

Τύπος σφάλματος και ζυγός εφαρμογής	Ρεύμα βραχυκύκλωσης (pu)
3φ βραχυκύκλωμα, ζυγός 1	31.29
3φ βραχυκύκλωμα, ζυγός 2	19.72
3φ βραχυκύκλωμα, ζυγός 3	18.20
3φ βραχυκύκλωμα, ζυγός 4	16.10
3φ βραχυκύκλωμα, ζυγός 5	10.14
3φ βραχυκύκλωμα, ζυγός 6	9.63
3φ βραχυκύκλωμα, ζυγός 7	14.22
3φ βραχυκύκλωμα, ζυγός 8	10.95
3φ βραχυκύκλωμα, ζυγός 9	13.83

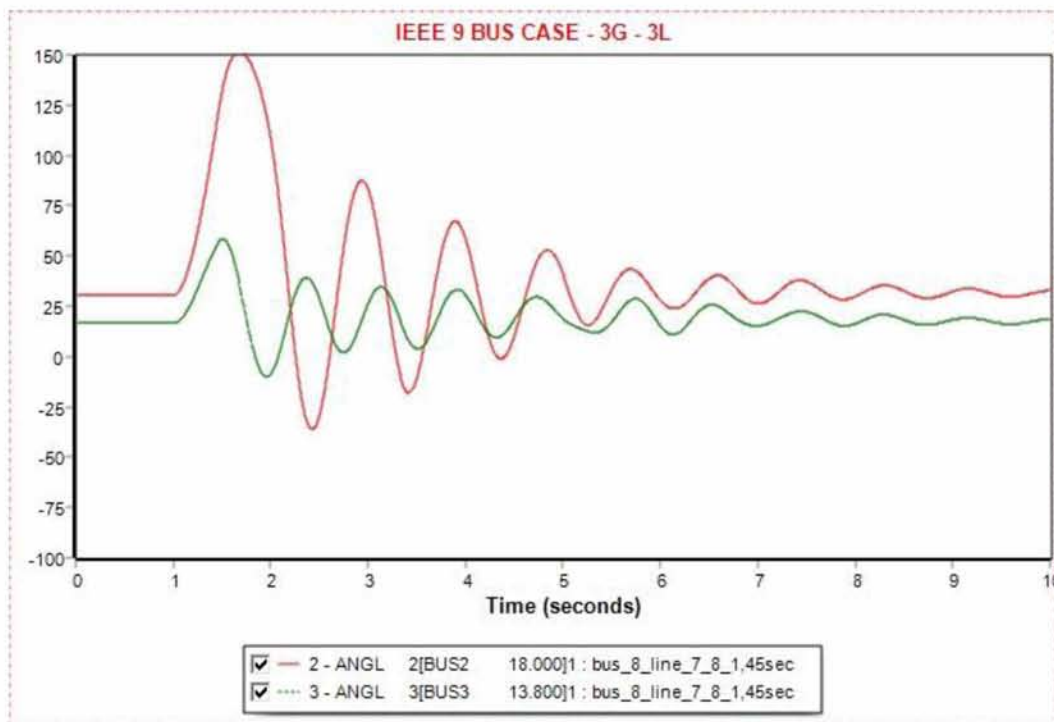
5.5 Προσομοίωση μεταβατικής ευστάθειας με το PSS/E

Παρακάτω θα μελετηθεί η μεταβατική ευστάθεια του συστήματος, υπολογίζοντας τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης για τα παρακάτω σφάλματα:

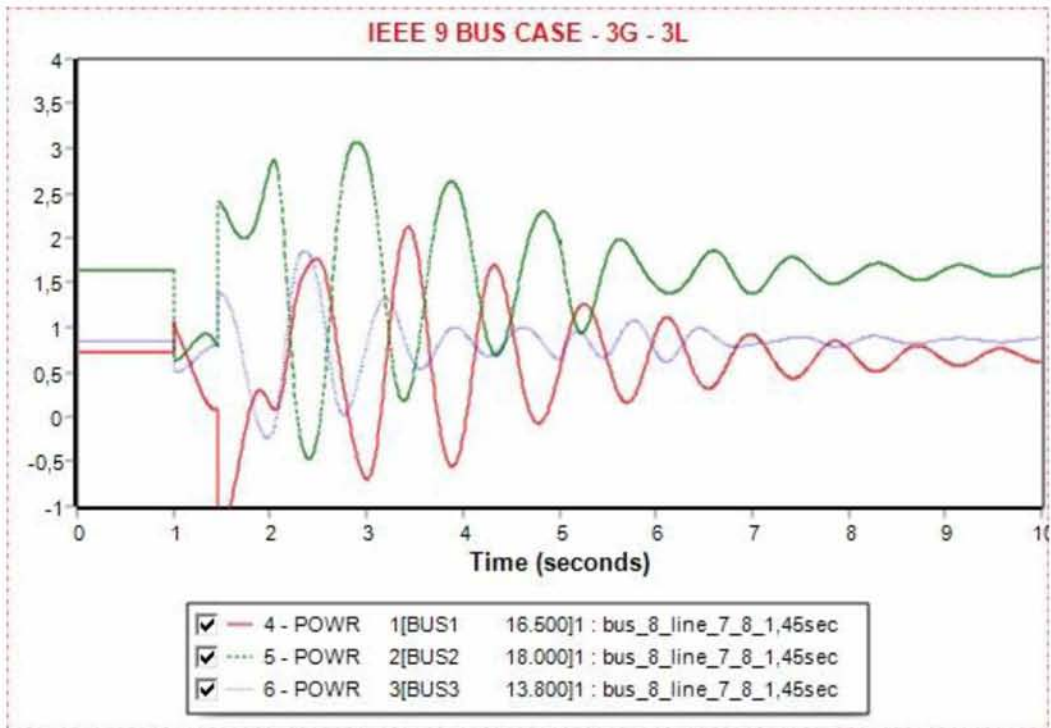
1. Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8.
2. Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8.
3. Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9.
4. Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 2 – 7, πλησίον του ζυγού 2 (ζυγός γεννήτριας).

5.5.1 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8

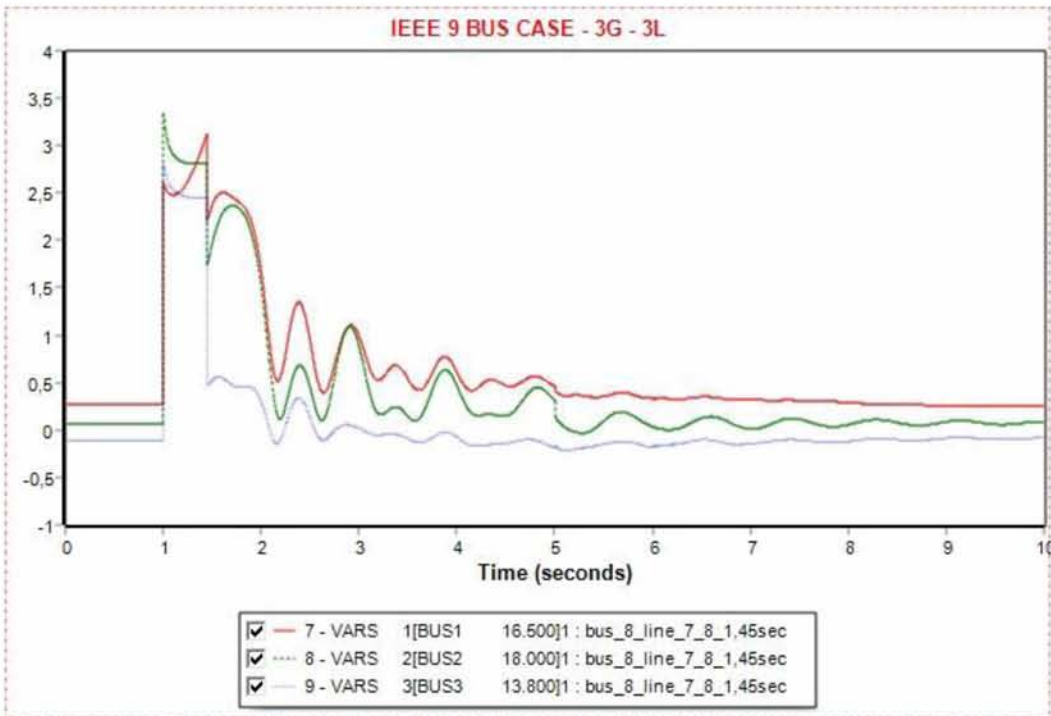
Τη χρονική στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ εμφανίζεται σφάλμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος προσδιορίστηκε, έπειτα από μελέτη, στα $t = 0,45 \text{ sec}$ μετά την εμφάνισή του, δηλαδή η εκκαθάρισή του πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή $t = 1,45 \text{ sec}$, μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος στα άκρα της γραμμής 7 – 8. Τη χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$, η γραμμή 7 – 8 τίθεται ξανά σε λειτουργία, με την προσομοίωση να συνεχίζεται μέχρι $t = 10 \text{ sec}$. Με βάση το διάγραμμα των γωνιών ισχύος των γεννητριών 2 και 3 (Σχήμα 5.7), εκφρασμένων ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1, υπάρχει σύγκλιση του συστήματος, δηλαδή ευστάθεια μετά τη διαταραχή. Από τα υπόλοιπα διαγράμματα προκύπτει ότι οι τάσεις (Σχήμα 5.8), η πραγματική και η άεργος ισχύς των γεννητριών (Σχήμα 5.9 & Σχήμα 5.10) επανέρχονται σε ομαλές τιμές, ενώ οι συχνότητες των ζυγών συγκλίνουν σε μια νέα τιμή. Αν ο χρόνος της διαταραχής αυξηθεί κατά 50 msec , δηλαδή πραγματοποιηθεί τη χρονική στιγμή $t = 1,50 \text{ sec}$, το σύστημα δεν επανέρχεται και οδηγείται σε αστάθεια, το οποίο παρουσιάζεται στα (Σχήματα 5.11 έως 5.14).



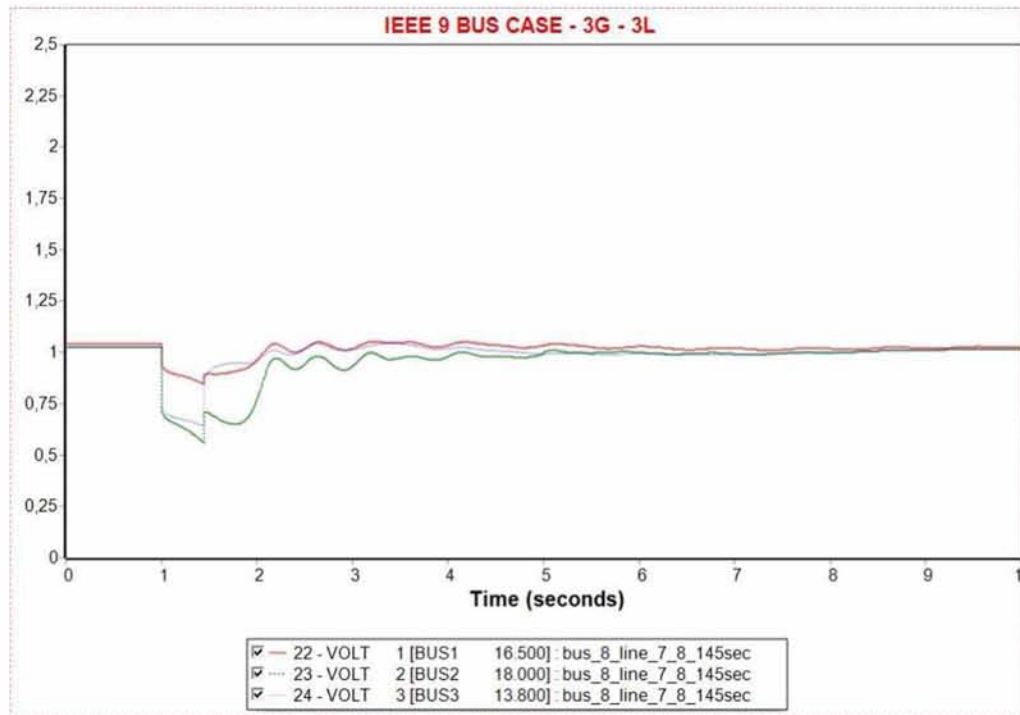
Σχήμα 5.7: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8. Γωνία ισχύος γεννητριών 2 & 3, ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1.



Σχήμα 5.8: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8. Πραγματική ισχύς των γεννητριών.

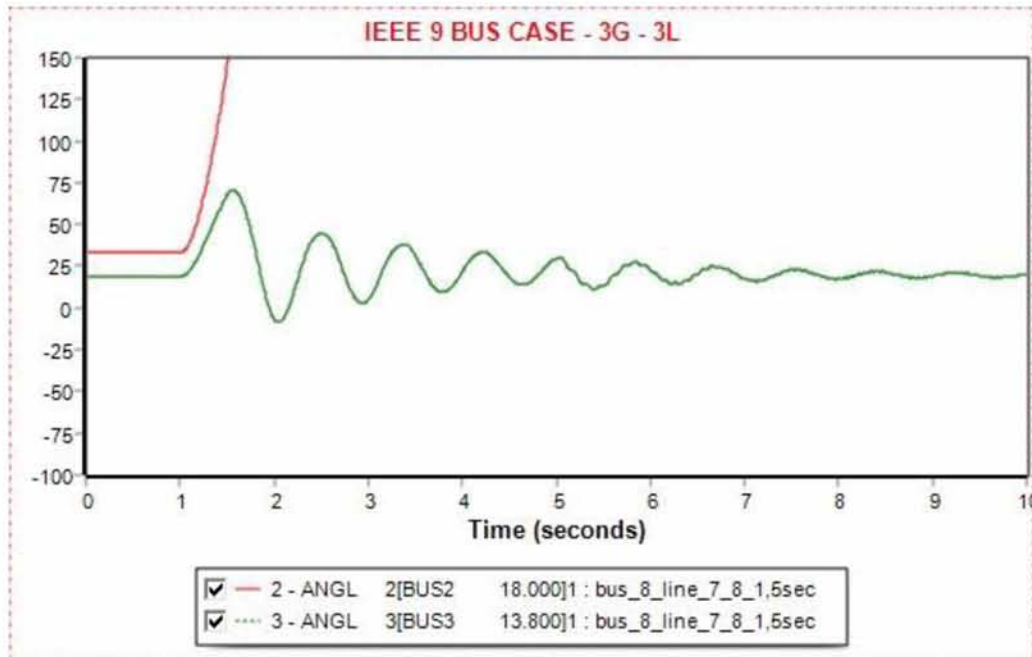


Σχήμα 5.9: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8. Άεργος ισχύς των γεννητριών.

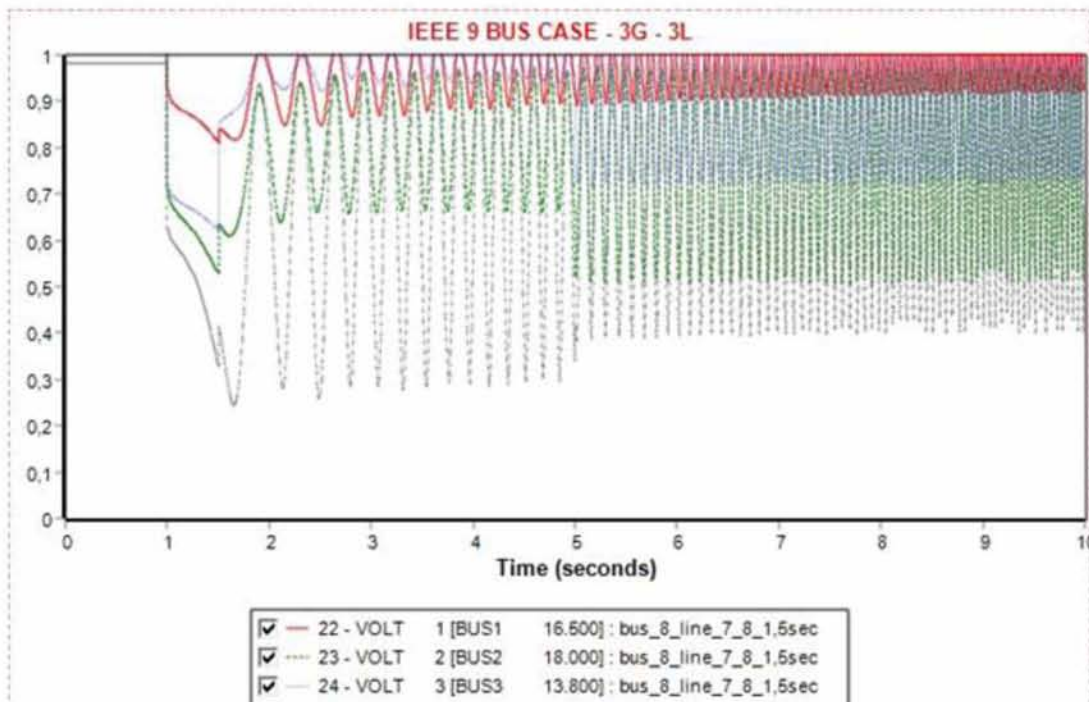


Σχήμα 5.10: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8. Τάση των γεννητριών ζυγών του συστήματος.

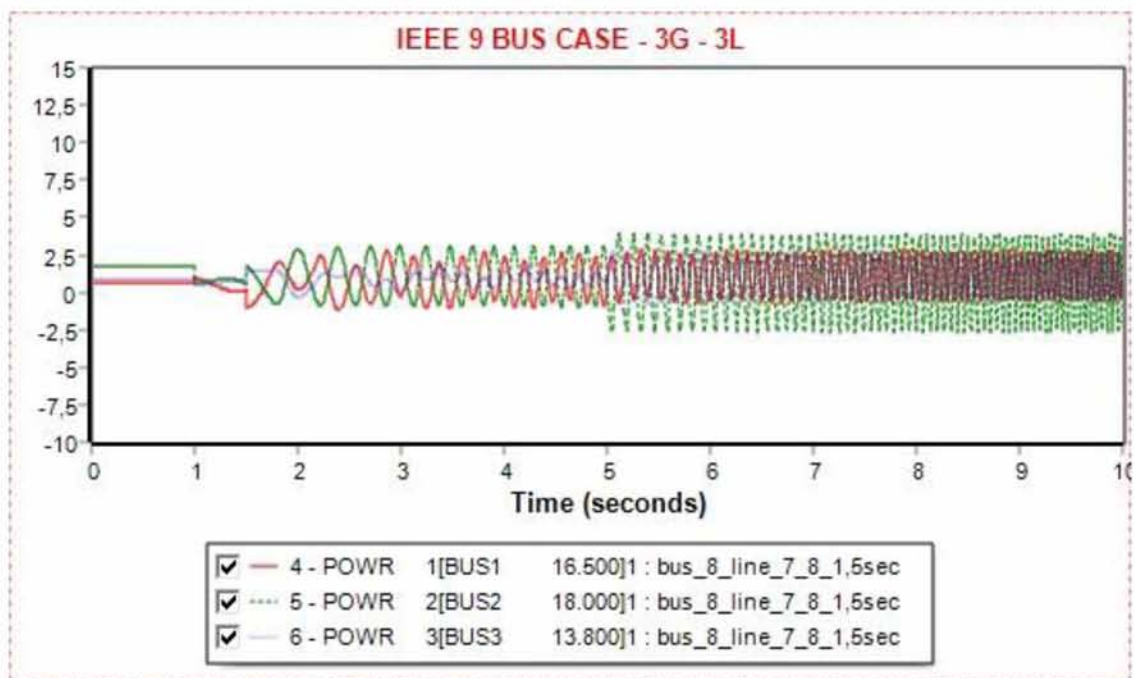
Στα παρακάτω διαγράμματα ο χρόνος του τριφασικού βραχυκυκλώματος στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8 έχει αυξηθεί κατά 50 msec, δηλαδή η εκκαθάριση πραγματοποιείται μετά την χρονική στιγμή $t=1,50$ sec.



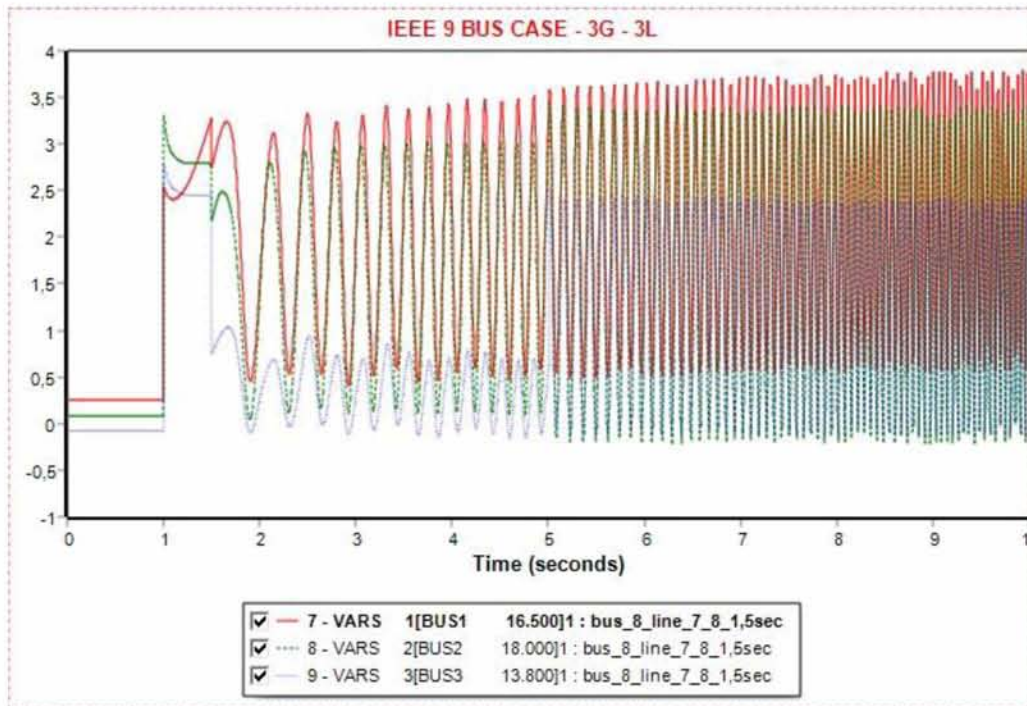
Σχήμα 5.11: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8. Γωνία ισχύος γεννητριών 2 & 3, ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.5 sec



Σχήμα 5.12: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού. Τάση των ζυγών του συστήματος, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.5 sec.



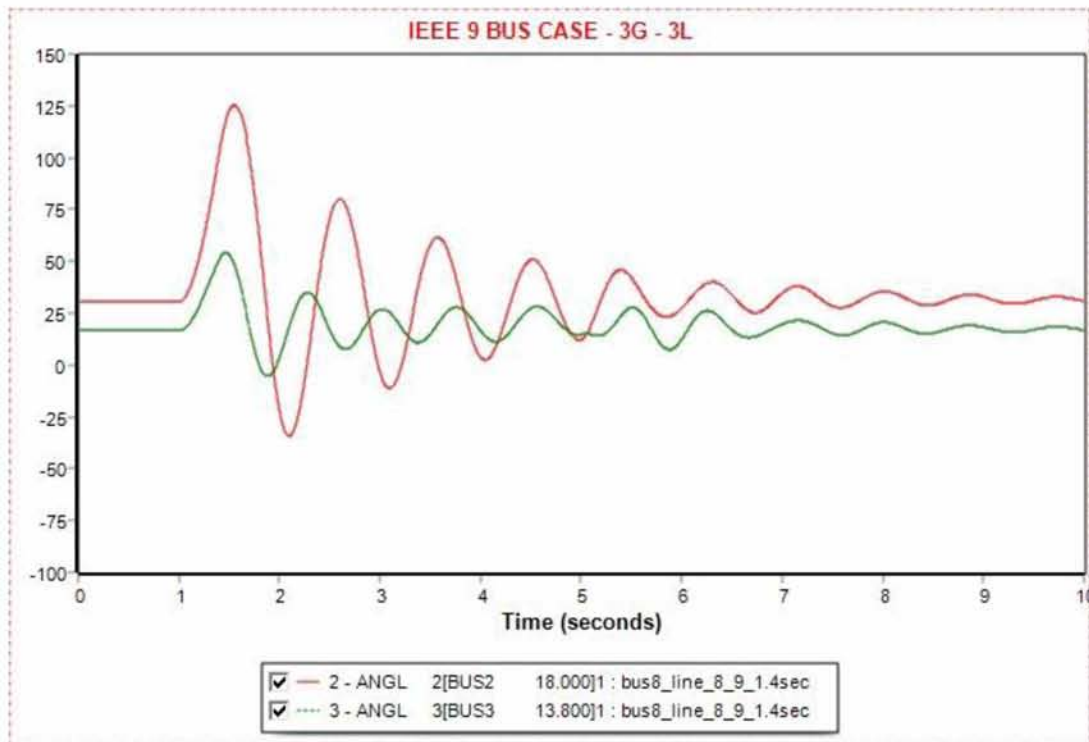
Σχήμα 5.13: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8. Πραγματική ισχύς των γεννητριών, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.5 sec.



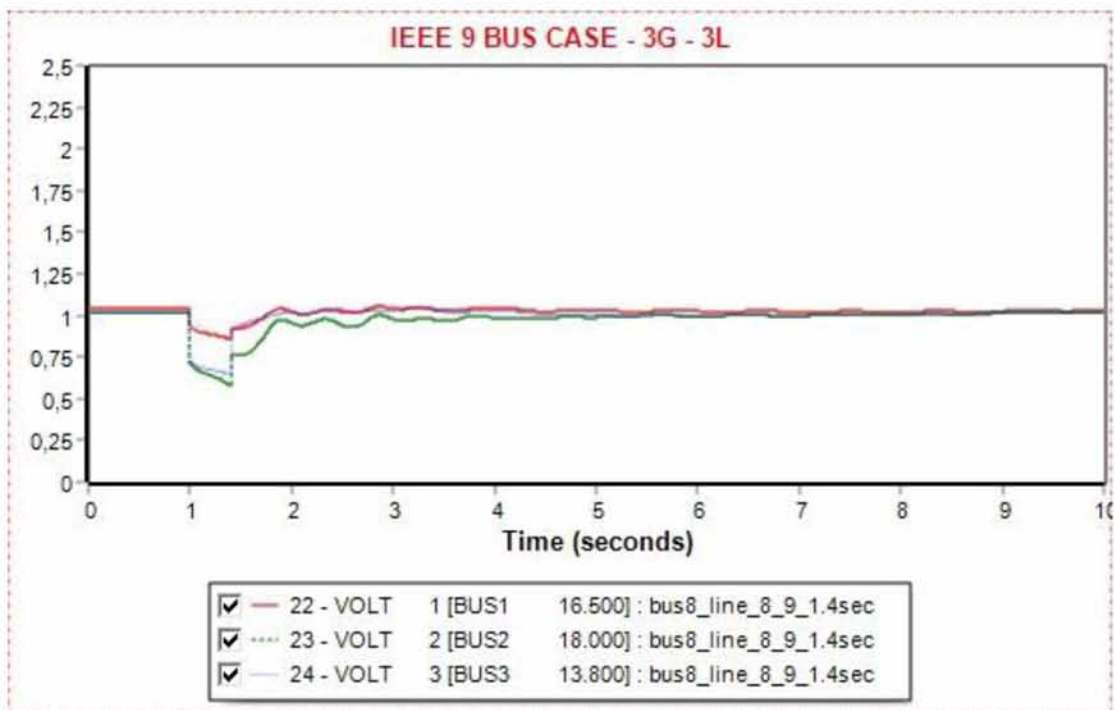
Σχήμα 5.14: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8. Άεργος ισχύς των γεννητριών, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.5 sec.

5.5.2 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8

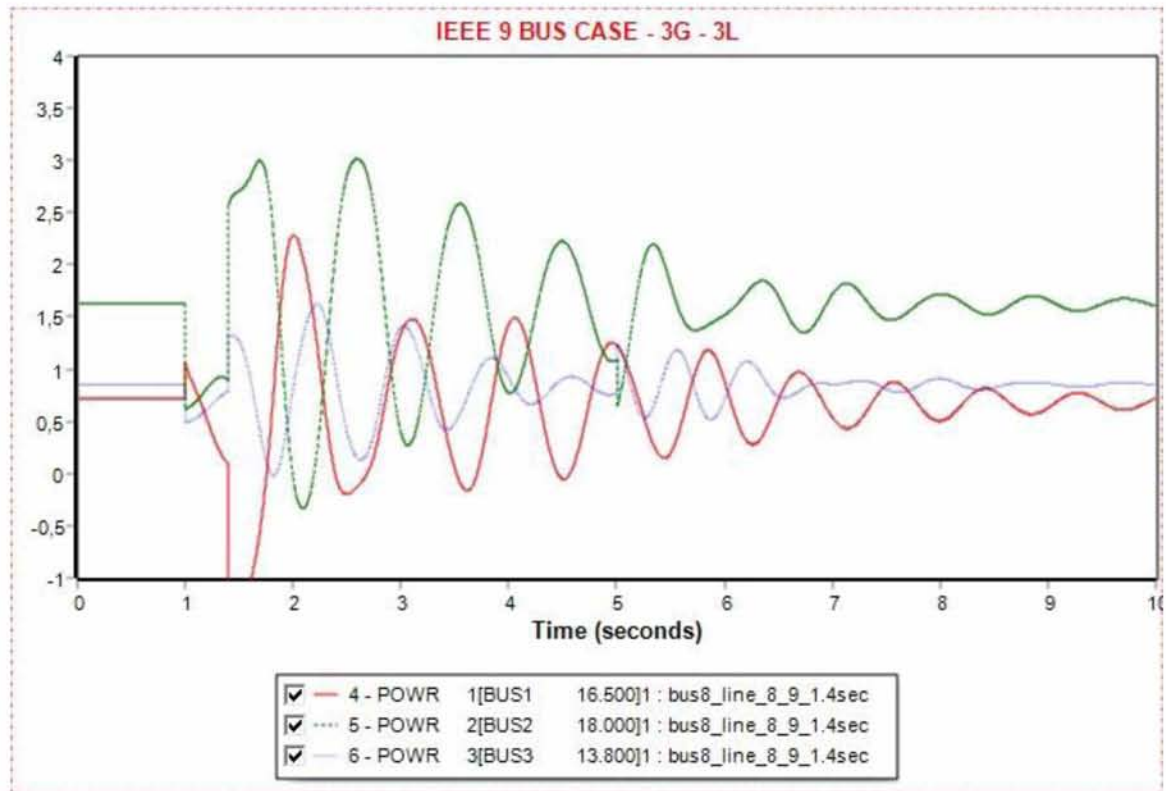
Τη χρονική στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ εμφανίζεται σφάλμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος προσδιορίστηκε, έπειτα από μελέτη, στα $t = 0,40 \text{ sec}$ μετά την εμφάνισή του, δηλαδή η εκκαθάρισή του πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή $t = 1,40 \text{ sec}$, μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος στα άκρα της γραμμής 8 – 9. Τη χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$, η γραμμή 8 – 9 τίθεται ξανά σε λειτουργία, με την προσομοίωση να συνεχίζεται μέχρι $t = 10 \text{ sec}$. Με βάση το διάγραμμα των γωνιών ισχύος των γεννητριών 2 και 3 (Σχήμα 5.15), εκφρασμένων ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1, υπάρχει σύγκλιση του συστήματος, δηλαδή ευστάθεια μετά τη διαταραχή. Από τα υπόλοιπα διαγράμματα προκύπτει ότι οι τάσεις (Σχήμα 5.16), η πραγματική και η άεργος ισχύς των γεννητριών (Σχήμα 5.17 & Σχήμα 5.18) επανέρχονται σε ομαλές τιμές, ενώ οι συχνότητες των ζυγών συγκλίνουν σε μια νέα τιμή. Αν ο χρόνος της διαταραχής αυξηθεί κατά 50 msec , δηλαδή πραγματοποιηθεί τη χρονική στιγμή $t = 1,45 \text{ sec}$, το σύστημα δεν επανέρχεται και οδηγείται σε αστάθεια, το οποίο παρουσιάζεται στα (Σχήματα 5.19 έως 5.22).



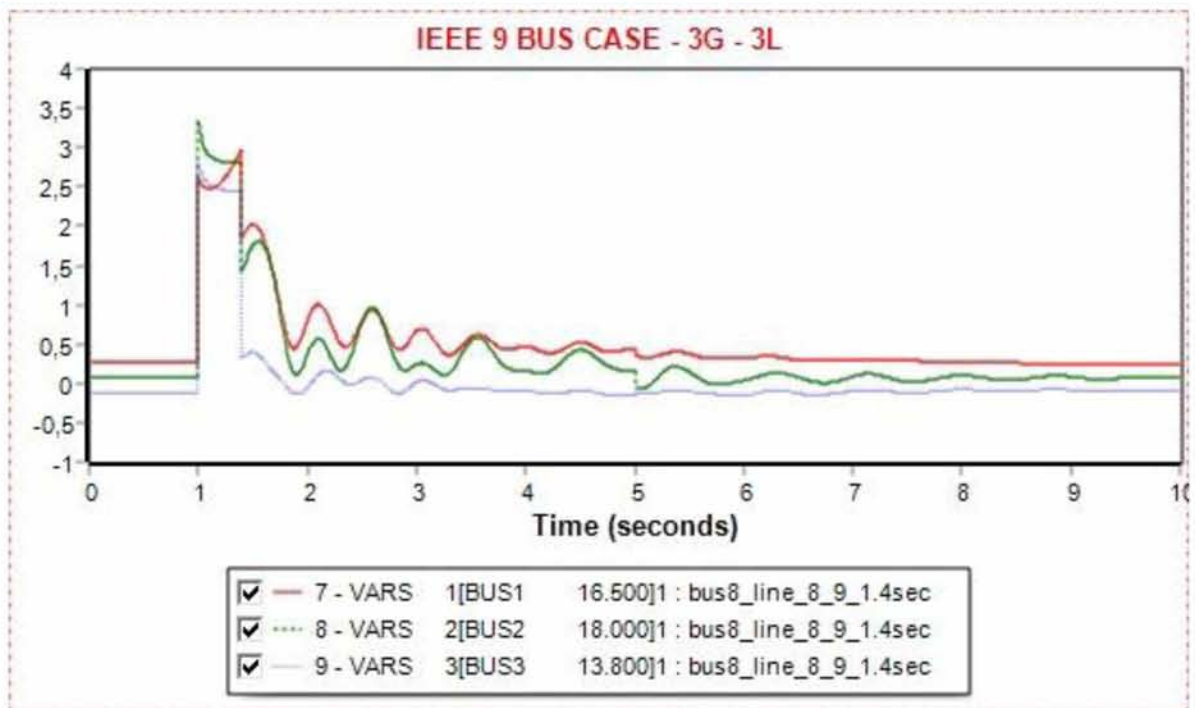
Σχήμα 5.15: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8. Γωνία ισχύος γεννητριών 2 & 3, ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1.



Σχήμα 5.16: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8. Τάση των γεννητριών ζυγών του συστήματος.

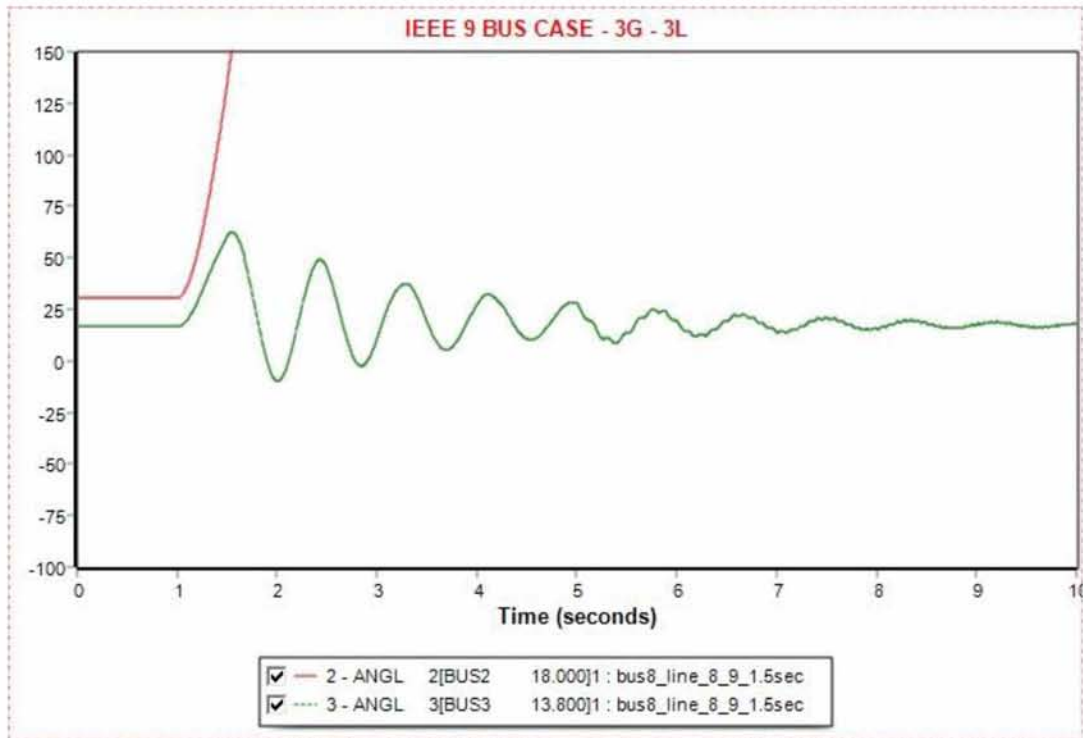


Σχήμα 5.17: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8. Πραγματική ισχύς των γεννητριών.

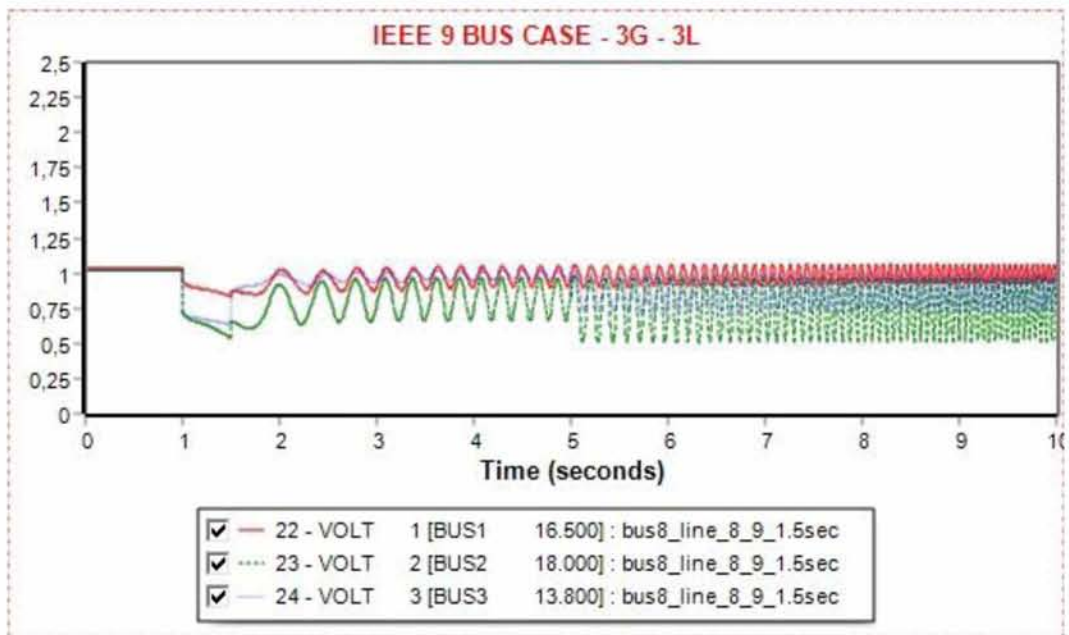


Σχήμα 5.18: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8. Άεργος ισχύς των γεννητριών.

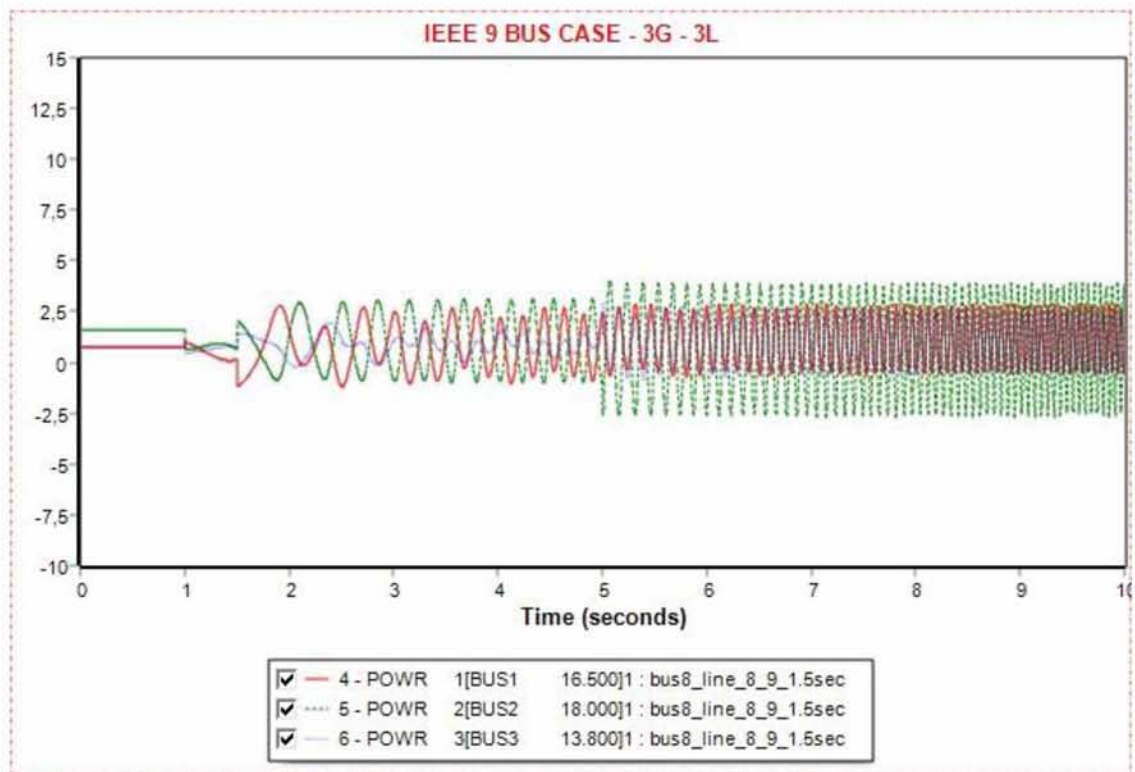
Στη περίπτωση που η διαταραχή αυξηθεί στα 0.45 sec παρατηρείται αποσυγχρονισμός του συστήματος και τα παραπάνω διαγράμματα μεταβάλλονται σε:



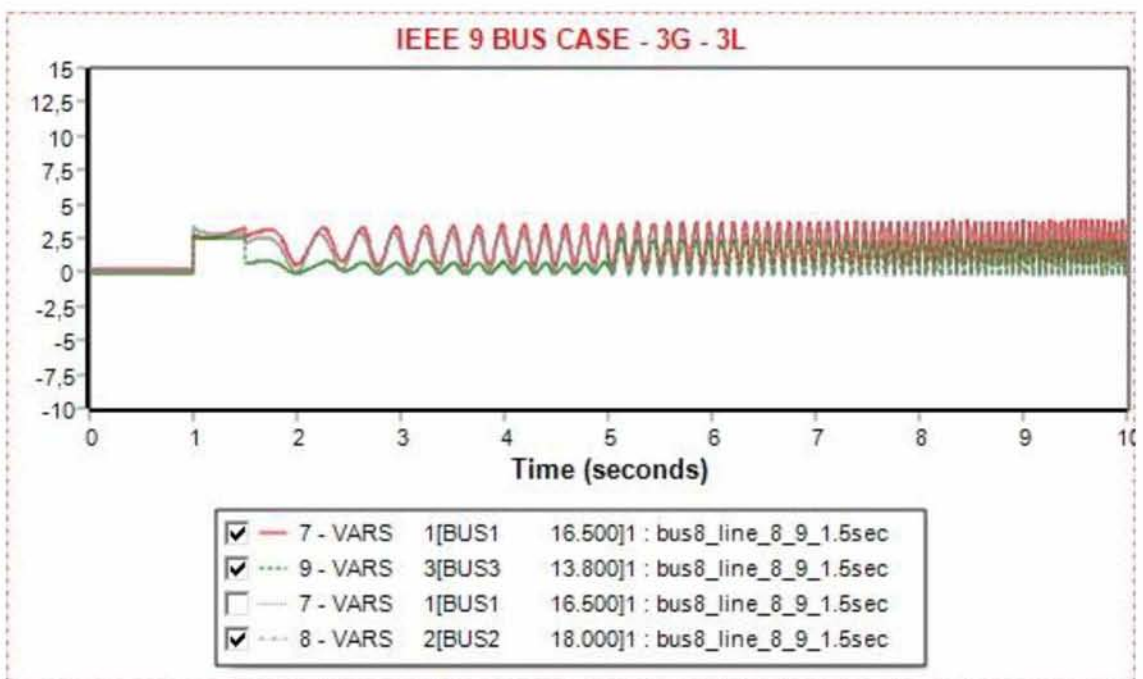
Σχήμα 5.19: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8. Γωνία ισχύος γεννητριών 2 & 3, ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.45 sec



Σχήμα 5.20: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού. Τάση των ζυγών του συστήματος, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.45 sec.



Σχήμα 5.21: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8. Πραγματική ισχύς των γεννητριών, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.45 sec.

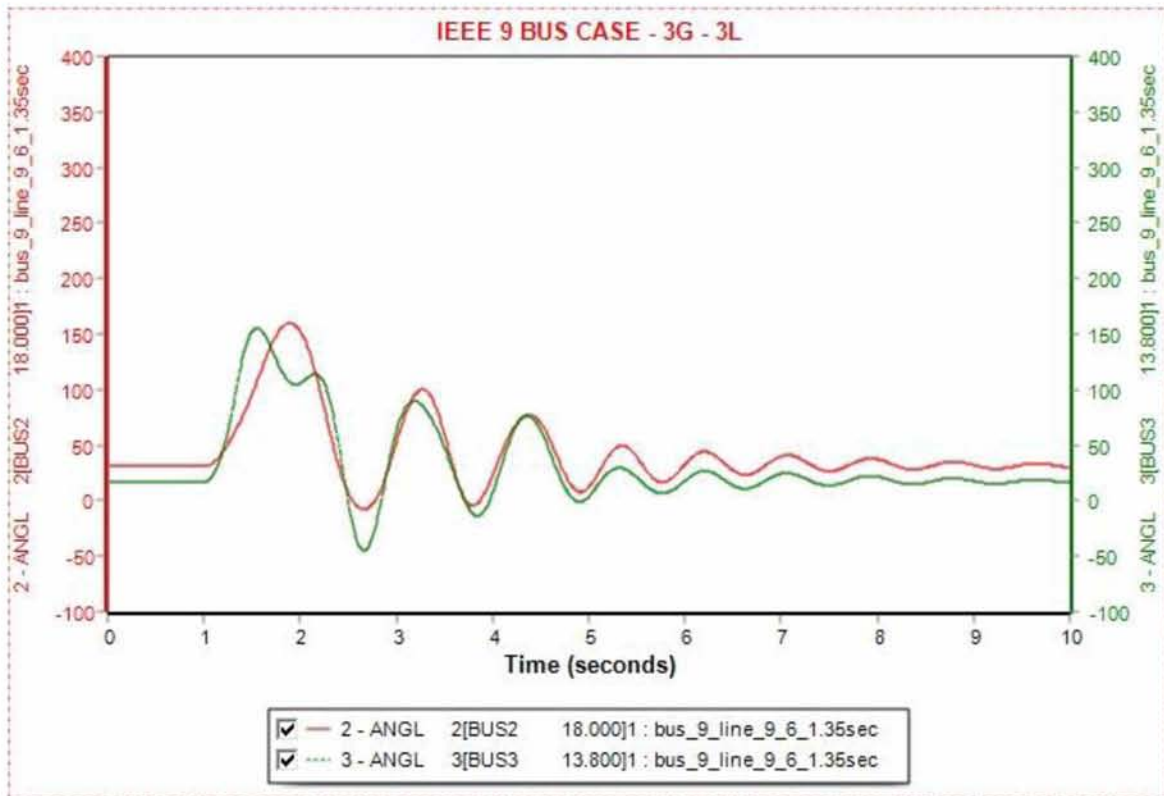


Σχήμα 5.22: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8. Άεργος ισχύς των γεννητριών, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.45 sec.

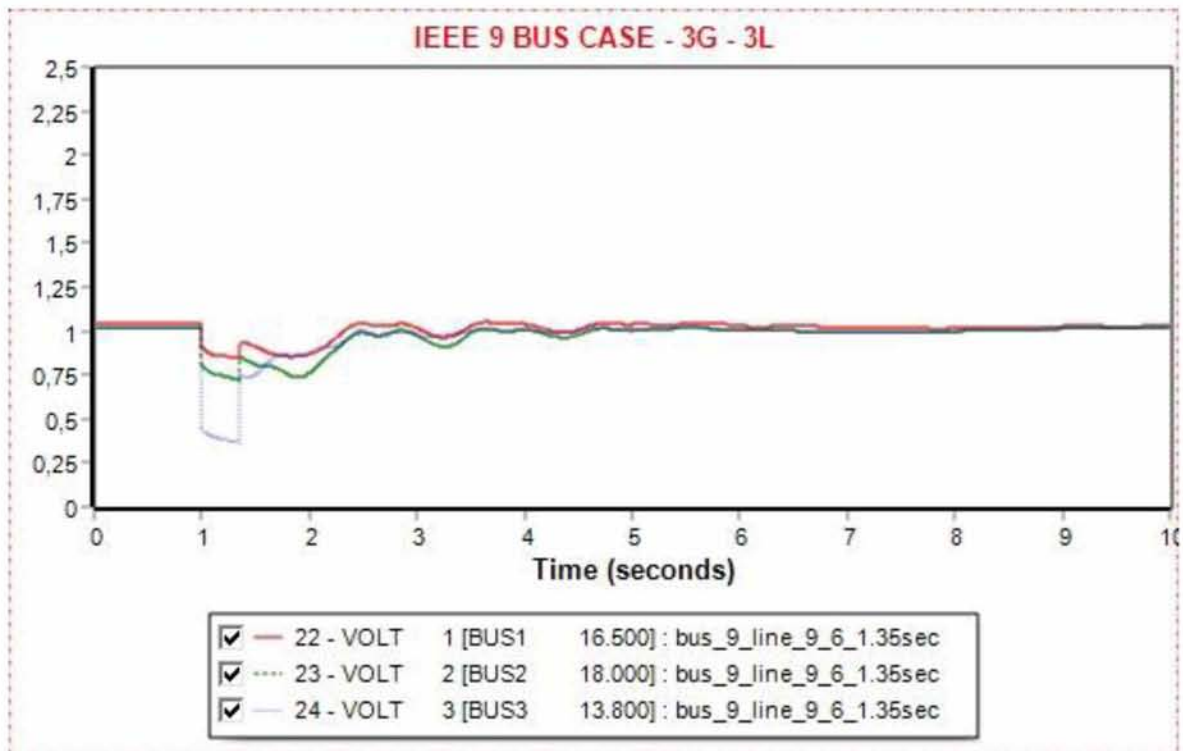
Όσον αφορά τις δύο διαταραχές που εξετάστηκαν στην παρόν και την προηγούμενη ενότητα (5.5.1) παρατηρείται ότι παρόλο που βρίσκονται και οι δύο κοντά στον ίδιο ζυγό του συστήματος (ζυγός 8) η μεταβατική τους ευστάθεια διαφέρει χρονικά. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές γραμμές μεταφοράς (και τα χαρακτηριστικά τους) που επιλέγονται για την εφαρμογή του 3φ στερεού βραχυκυκλώματος.

5.5.3 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9

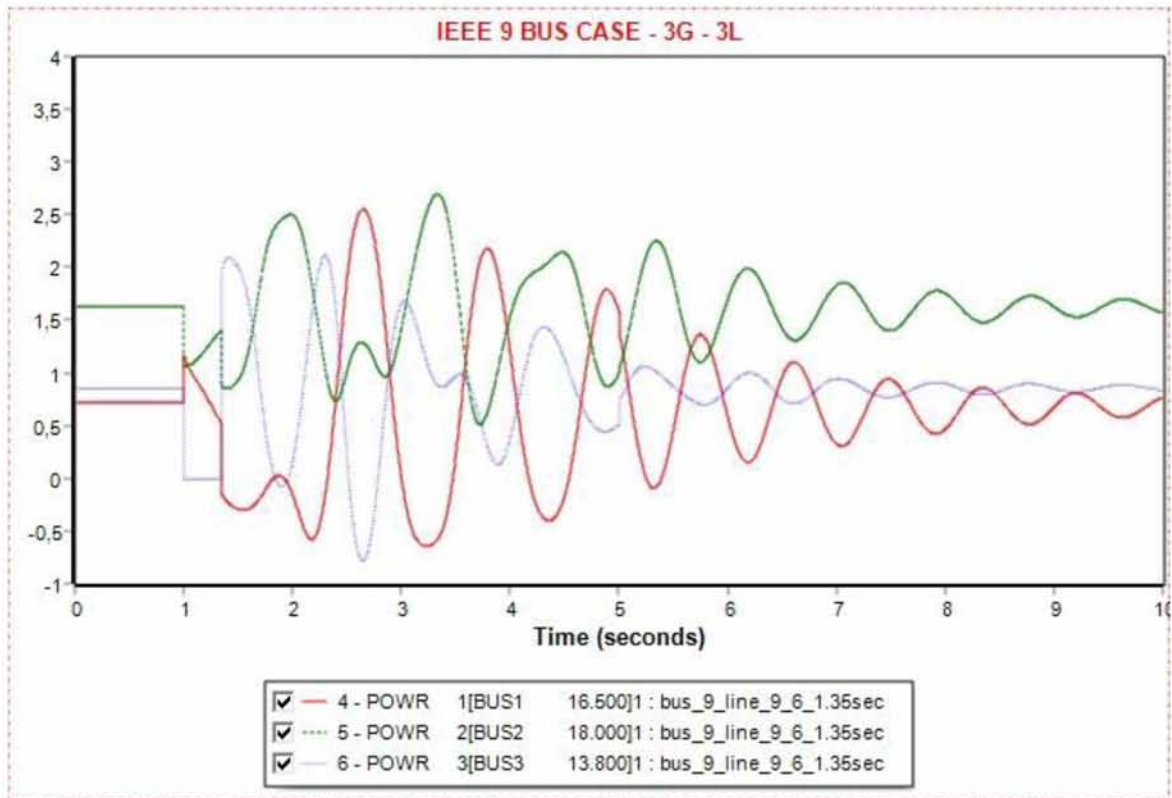
Τη χρονική στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ εμφανίζεται σφάλμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος προσδιορίστηκε, έπειτα από μελέτη, στα $t = 0,35 \text{ sec}$ μετά την εμφάνισή του, δηλαδή η εκκαθάρισή του πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή $t = 1,35 \text{ sec}$, μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος στα άκρα της γραμμής 6 – 9. Τη χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$, η γραμμή 6 – 9 τίθεται ξανά σε λειτουργία, με την προσομοίωση να συνεχίζεται μέχρι $t = 10 \text{ sec}$. Με βάση το διάγραμμα των γωνιών ισχύος των γεννητριών 2 και 3 (Σχήμα 5.23), εκφρασμένων ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1, υπάρχει σύγκλιση του συστήματος, δηλαδή ευστάθεια μετά τη διαταραχή. Από τα υπόλοιπα διαγράμματα προκύπτει ότι οι τάσεις (Σχήμα 5.24), η πραγματική και η άεργος ισχύς των γεννητριών (Σχήμα 5.25 & Σχήμα 5.26) επανέρχονται σε ομαλές τιμές, ενώ οι συχνότητες των ζυγών συγκλίνουν σε μια νέα τιμή. Αν ο χρόνος της διαταραχής αυξηθεί κατά 50 msec , δηλαδή πραγματοποιηθεί τη χρονική στιγμή $t = 1,4 \text{ sec}$, το σύστημα δεν επανέρχεται και οδηγείται σε αστάθεια, το οποίο παρουσιάζεται στα (Σχήματα 5.27 έως 5.30).



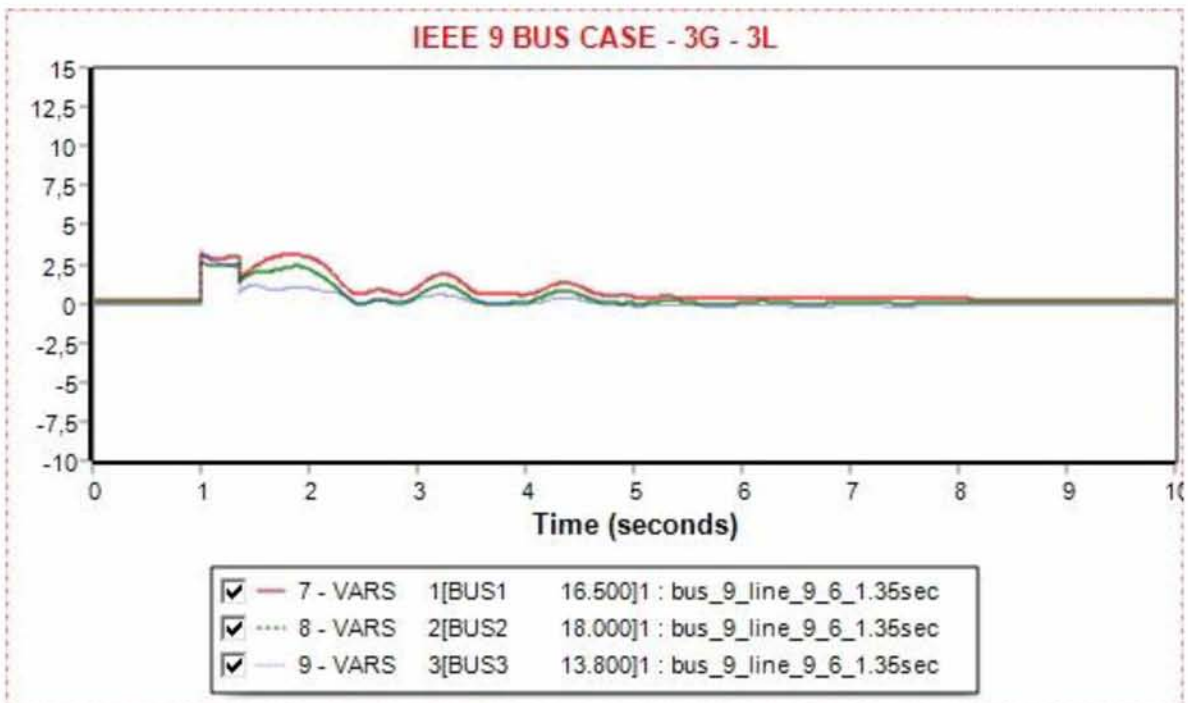
Σχήμα 5.23: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Γωνία ισχύος γεννητριών 2 & 3, ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1.



Σχήμα 5.24: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Τάση γεννητριών συστήματος.

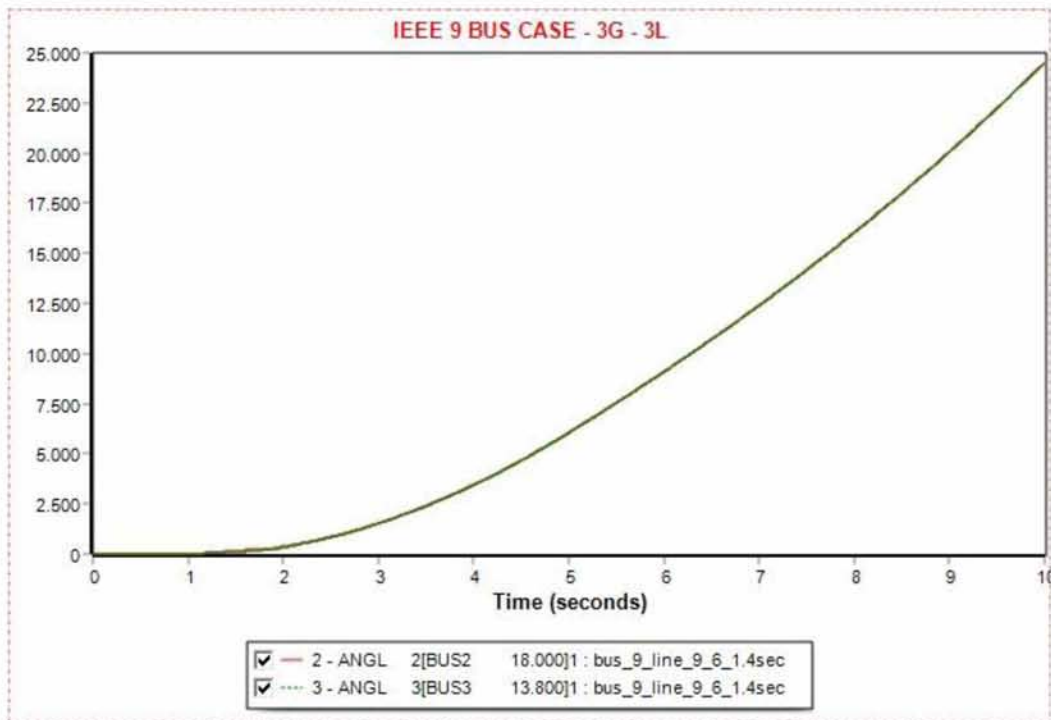


Σχήμα 5.25: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Πραγματική ισχύς των γεννητριών.

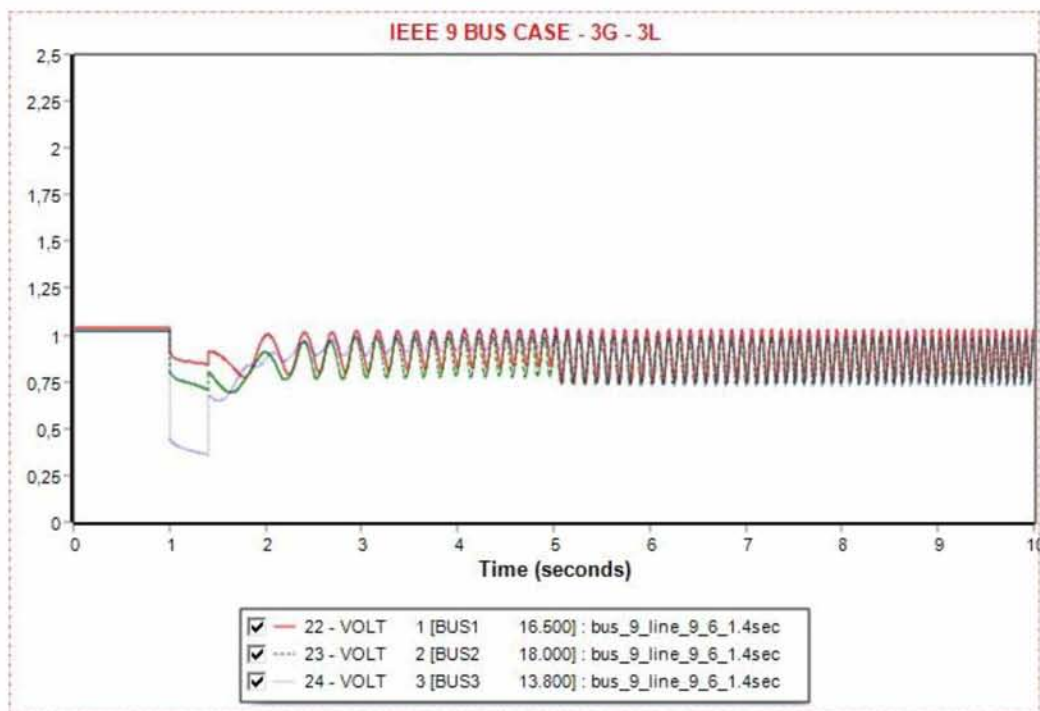


Σχήμα 5.26: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Άεργος ισχύς των γεννητριών.

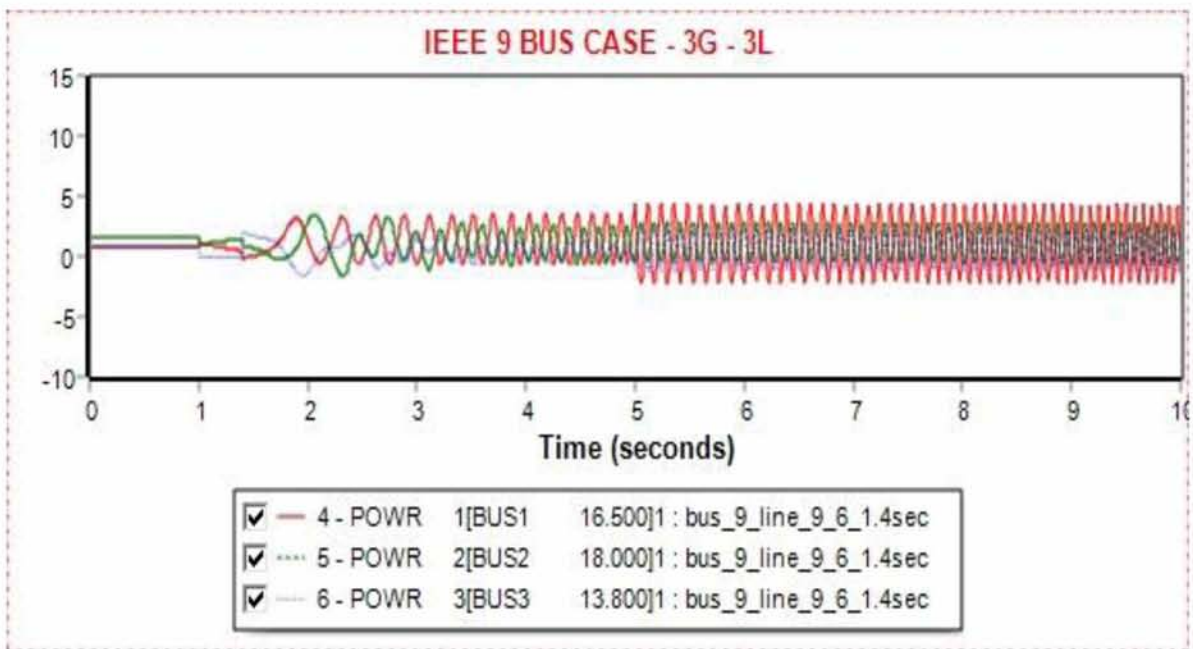
Στη περίπτωση που η διαταραχή αυξηθεί στα 0.4 sec παρατηρείται αποσυγχρονισμός του συστήματος και τα παραπάνω διαγράμματα μεταβάλλονται σε:



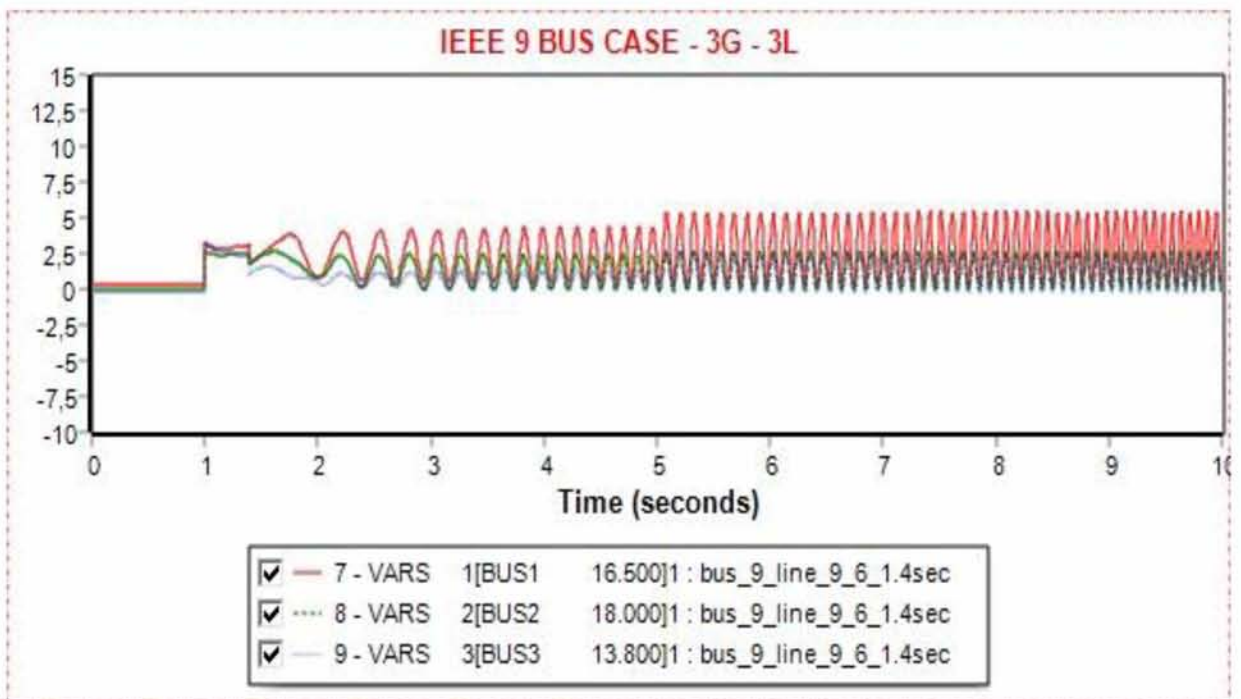
Σχήμα 5.27: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Γωνία ισχύος γεννητριών 2 & 3, ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.4 sec



Σχήμα 5.28: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Τάση των ζυγών του συστήματος, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.4 sec.



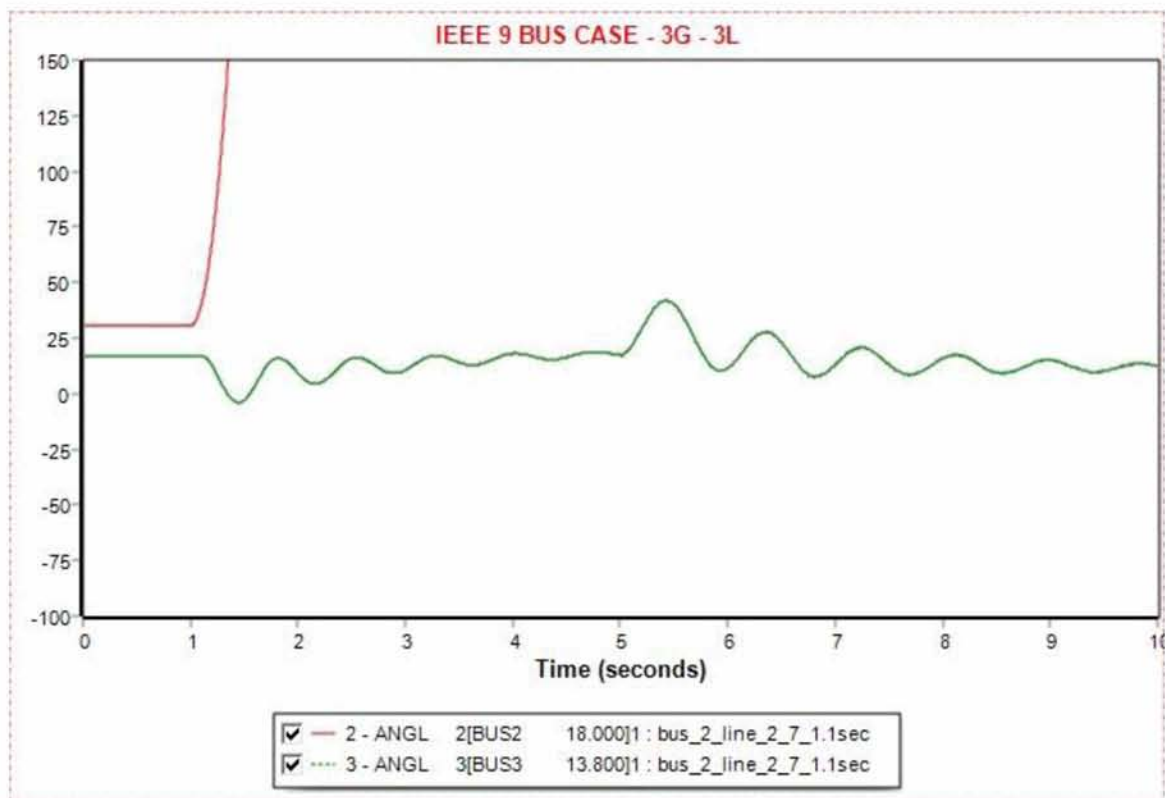
Σχήμα 5.29: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Πραγματική ισχύς των γεννητριών, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.4 sec.



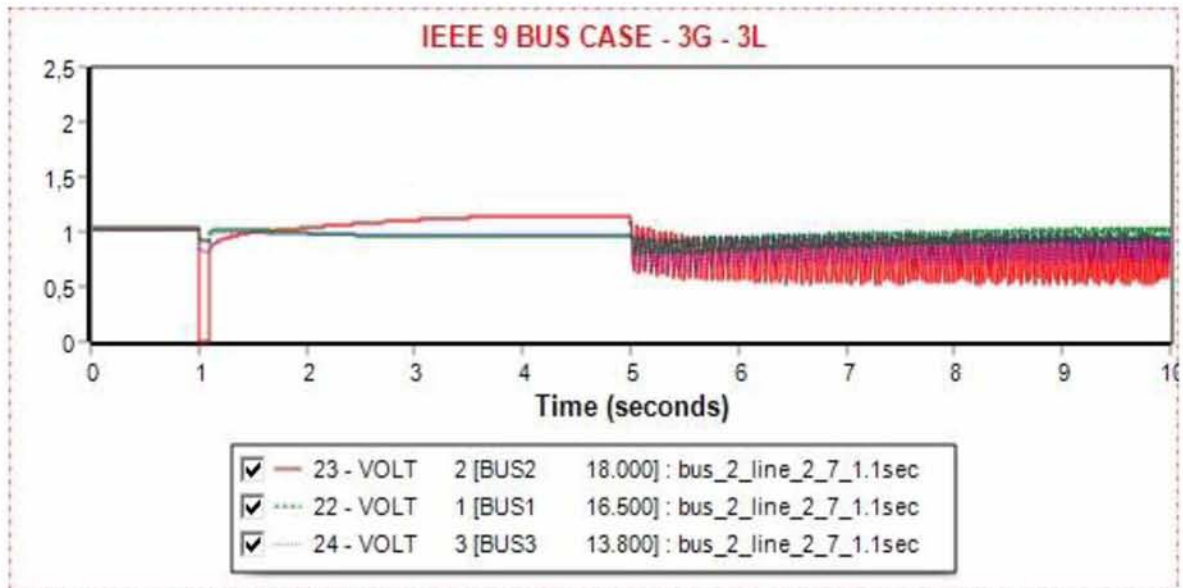
Σχήμα 5.30: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Άεργος ισχύς των γεννητριών, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.4 sec.

5.5.4. Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 2 – 7, πλησίον του ζυγού 2.

Στην περίπτωση αυτή, η γραμμή 2-7 είναι η γραμμή μεταφοράς είναι ζυγός που συνδέει τον ζυγό 2 με την γεννήτρια 2 του συστήματος. Παρατηρήθηκε, όπως και στις υπόλοιπες δύο περιπτώσεις όπου η διαταραχή λαμβάνει χώρα σε γραμμή μεταφοράς που συνδέει ζυγό και γεννήτρια, ότι για οποιαδήποτε χρονικό διάστημα διαταραχής το σύστημα δεν μπορεί να επιστρέψει σε ευσταθή κατάσταση και αποσυγχρονίζεται. Στα Σχήματα 5.31-5.32 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι γωνίες ισχύος και τάσεις των γεννητριών για την περίπτωση εφαρμογής διαταραχής πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (0.05 sec) στη γραμμή 2-7 πλησίον του ζυγού 2. Στη συνέχεια πραγματοποιείται εκκαθάριση όπως περιγράφηκε και στα παραπάνω σενάρια.



Σχήμα 5.31: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 2 – 7, πλησίον του ζυγού 2. Γωνίας ισχύος των γεννητριών 2,3 ως προς τη γωνία ισχύος της γεννήτριας 1. Χρόνος διαταραχής 0.05 sec.



Σχήμα 5.32: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 2 – 7, πλησίον του ζυγού 2. Τάση των ζυγών του συστήματος, όταν το σφάλμα διαρκεί 0.05 sec.

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των στερεών τριφασικών βραχυκυκλωμάτων που προσομοιώθηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

Πίνακα 5.6 Κρίσιμοι χρόνοι εκκαθάρισης των στερεών τριφασικών βραχυκυκλωμάτων

Line	Bus	Critical time for fault cleaning (sec)
Τριφασικό σφάλμα στη γραμμή 7_8 πλησίον του ζυγού 8	8	0,45
Τριφασικό σφάλμα στη γραμμή 8_9 πλησίον του ζυγού 8	8	0,40
Τριφασικό σφάλμα στη γραμμή 6_9 πλησίον του ζυγού 9	9	0,35
Τριφασικό σφάλμα στη γραμμή 2_7 πλησίον του ζυγού 2	2	Αποσυγχρονισμός για οποιαδήποτε τριφασικό σφάλμα

Για την πραγματοποίηση για την εξαγωγή όλων των παραπάνω συμπερασμάτων πραγματοποιήθηκαν επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις σφαλμάτων μεταβάλλοντας κάθε φορά το χρονικό διάστημα στην εκάστοτε διαταραχής, με σκοπό να ανακαλυφθεί τελικά ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης. Επομένως, η εύρεση του κρίσιμου αυτού χρόνου

για κάθε περίπτωση σφάλματος σε ένα μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μια ιδιαίτερα χρονοβόρα διαδικασία, ενώ η σημαντικότητα της παραμένει πολύ υψηλή. Για τον λόγο αυτό στο παρακάτω κεφάλαιο πραγματοποιείται μια προσπάθεια αυτοματοποίησης της παραπάνω διαδικασίας με μεθόδους μηχανικής μάθησης με τελικό σκοπό την εξοικονόμηση πολύτιμου χρόνου στην εύρεση κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης για όλα τα πιθανά στερεά τριφασικά βραχυκυκλώματα του παρόντος συστήματος των 9 ζυγών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΥΡΕΣΗ ΚΡΙΣΙΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΕΚΚΑΘΑΡΙΣΗΣ ΜΕ ΤΕΧΤΙΝΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ

6.1 Αυτοματοποίηση εύρεσης του κρίσιμου χρόνου

Όπως αναφέρθηκε στο τέλος της προηγούμενης ενότητας, η διαδικασία εύρεσης του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης ενός βραχυκυκλώματος αποτελεί ιδιαίτερα χρονοβόρα και διαδικασία, αφού απαιτεί την επαναλαμβανόμενη προσομοίωση του βραχυκυκλώματος για διαφορετικές χρονικές περιόδους (trial-error method) σε κάθε ζυγό του συστήματος, έως ότου βρεθεί ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος που δεν θα οδηγήσει το σύστημα σε αποσυγχρονισμό και περεταίρω προβλήματα. Επομένως σκοπός της παρακάτω ανάλυσης είναι:

1. Η εξοικονόμηση πολύτιμου χρόνου στον εκάστοτε μηχανικό που μελετά το παρόν Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, οδηγώντας τον αυτόματα στον κρίσιμο χρόνο ούτως ώστε να επικεντρωθεί στην λεπτομερή μελέτη των γραφημάτων που αφορούν αυτή τη διαταραχή του συστήματος.
2. Η ευκολότερη κατανόηση της συσχέτισης γειτονικών σφαλμάτων, αλλά και το πώς σημαντικά στοιχεία του δικτύου επηρεάζουν τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης, αφού και θα υπάρχουν στην διάθεση μας πολλαπλά αποτελέσματα σε γρήγορο χρονικό διάστημα.
3. Τροφή για σκέψη το πώς θα μπορούσαν τέτοιες τεχνικές να συμβάλουν στην ευκολότερη διαχείριση τεράστιων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

6.2 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Τα δεδομένα συλλέχτηκαν κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων τριφασικού στερεού βραχυκυκλώματος σε όλες τις γραμμές μεταφοράς πλησίον κάθε ζυγού του συστήματος έως ότου βρεθεί ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του. Αποτελούν τα σημαντικότερα δεδομένα που βοηθούν στο να πραγματοποιηθεί η πρόβλεψη αν το σύστημα μετά την διαταραχή θα παραμείνει ευσταθές ή όχι. Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η δομή τους και στη συνέχεια γίνεται ατομική επεξήγηση.

Bus	generator	Line	Loading	R	X	Fault_time	Stable
7	0	7_8	0.31	0.0085	0.0720	0.60	0
4	0	4_5	0.22	0.0100	0.0850	0.35	1
7	0	7_8	0.31	0.0085	0.0720	0.15	1
5	0	5_7	0.35	0.0320	0.1610	0.15	1
7	0	7_8	0.31	0.0085	0.0720	0.25	0
7	0	7_8	0.31	0.0085	0.0720	0.05	1
9	0	8_9	0.23	0.0119	0.1008	0.70	0

Σχήμα 6.1: Δείγμα από τα δεδομένα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν στην πρόβλεψη της ευστάθειας

- Bus: Ο αριθμός του ζυγού πλησίον του οποίου πραγματοποιείται τον τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα.
- Generator: Είναι 1 εάν ο ζυγός πλησίον του οποίου γίνεται η διαταραχή είναι ζυγός γεννήτριας. Σε αντίθετη περίπτωση είναι 0.
- Line: Αναγνωριστικό γραμμής μεταφοράς στην οποία εφαρμόζεται η διαταραχή.
- Loading: Ποσοστό ροής φορτίου στην εκάστοτε γραμμή πριν την εφαρμογή της διαταραχής (προέρχεται από την ανάλυση ροής φορτίου).
- R: Η ωμική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.
- X: Η επαγωγική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.
- Fault_time: Χρονική διάρκεια (sec) διατήρησης της διαταραχής.
- Stable: Παρουσιάζει εάν το σύστημα μετά την εκκαθάριση της διαταραχής παρέμεινε ευσταθές ή όχι. Αποτελεί την μεταβλητή πρόβλεψης παρακάτω.

Οι παραπάνω μεταβλητές επιλέχθηκαν με γνώμονα τη σημαντικότητα τους στη πρόβλεψη τη ευστάθειας του συστήματος μετά την διαταραχή. Είναι φυσικό σε ένα τόσο πολύπλοκο σύστημα όπως είναι τα ΣΗΕ να υπάρχουν πολλές περισσότερες παράμετροι που καθορίζουν την ευστάθεια του συστήματος και να μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα των προβλέψεων. Παρ όλα αυτά, για την διατήρηση της απλότητας του προβλήματος που μελετάται διατηρήθηκαν οι παραπάνω μεταβλητές.

Στη συνέχεια τα δεδομένα επεξεργάστηκαν κατάλληλα με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού ργthon ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν οι τεχνικές μηχανικής μάθησης (Σχήμα 6.2).

Bus_2	Bus_4	Bus_5	Bus_7	Bus_8	Bus_9	generator	Loading	R	X	Line_2_7	Line_4_5	Line_5_4	Line_5_7	Line_7_8	Line_8_9	Line_9_6	Fault_time	Stable
0	0	0	1	0	0	0	0.31	0.0085	0.0720	0	0	0	0	1	0	0	0.60	0
1	0	0	0	0	0	1	0.33	0.0000	0.0625	1	0	0	0	0	0	0	0.45	0
0	0	0	0	0	1	0	0.42	0.0390	0.1700	0	0	0	0	0	0	1	0.15	1
0	0	0	0	1	0	0	0.23	0.0119	0.1008	0	0	0	0	0	1	0	0.70	0
0	0	0	0	0	1	0	0.42	0.0390	0.1700	0	0	0	0	0	0	1	0.25	1
1	0	0	0	0	0	1	0.33	0.0000	0.0625	1	0	0	0	0	0	0	0.05	0
0	0	0	0	1	0	0	0.23	0.0119	0.1008	0	0	0	0	0	1	0	0.50	0
0	0	0	1	0	0	0	0.31	0.0085	0.0720	0	0	0	0	1	0	0	0.10	1
0	0	0	0	1	0	0	0.31	0.0085	0.0720	0	0	0	0	1	0	0	0.35	1
0	0	0	0	1	0	0	0.23	0.0119	0.1008	0	0	0	0	0	1	0	0.35	1

Σχήμα 6.2: Η μορφή των δεδομένων μετά την επεξεργασία που επεβλήθησαν.

6.3 Η Μέθοδος πρόβλεψης

Το μικρό μέγεθος του συστήματος που εξετάζεται (9 ζυγοί) έχει ως αποτέλεσμα των περιορισμένο αριθμό δεδομένων που αφορούν τις προσομοιώσεις τριφασικού στερεού βραχυκυκλώματος. Επομένως η μέθοδος μηχανικής μάθησης που θα χρησιμοποιηθεί, θα πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει σε δεδομένα μικρής κλίμακας με όσο το δυνατόν καλύτερα ποσοστό πρόβλεψης.

Έπειτα από εξερεύνηση και δοκιμές διαφόρων μοντέλων, επιλέχθηκε ως επικρατέστερη η μέθοδος ταξινόμησης *Random Forest Classifier* που αποτελεί σύνολο μεθόδου μάθησης για ταξινόμηση που λειτουργεί κατασκευάζοντας ένα πλήθος δέντρων αποφάσεων κατά το χρόνο εκπαίδευσης και εξάγοντας την κλάση των μεμονωμένων δέντρων. Ο πρώτος αλγόριθμος για τα δάση τυχαίας απόφασης (random decision

forests) δημιουργήθηκε από τον Tin Kam Ho χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του τυχαίου υποδιαστήματος, που στη διατύπωσή του, είναι ένας τρόπος για την εφαρμογή της προσέγγισης «στοχαστικής διάκρισης» στην ταξινόμηση που πρότεινε ο Eugene Kleinberg. Αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας της παραπάνω μεθόδου μελετήθηκαν από το ερευνητικό άρθρο: *A random forest guided tour*, καθώς και οι τεχνικές υλοποίησης σε επίπεδο κώδικα, από το εγχειρίδιο της μεθόδου *Random Forest Classifier* στη γλώσσα προγραμματισμού Python από την βιβλιοθήκη *Scikit learn*. Στόχος μας αποτελεί η εκπαίδευση του μοντέλου στα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 6.2 ούτως ώστε να είναι σε θέση να προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τη μεταβλητή *Stable* ο οποία μας πληροφορεί αν το σύστημα παρέμεινε ευσταθές ή όχι έπειτα από την εκκαθάριση του τριφασικού στερεού βραχυκυκλώματος πλησίον του εκάστοτε ζυγού που μελετάμε.[11,12,13]

6.4 Αποτελέσματα

Αρχικά, τα δεδομένα χωρίστηκαν τυχαία 9 φορές σε δεδομένα εκπαίδευσης (training set) που αποτελούν το 85% των αρχικών δεδομένων και σε δεδομένα επικύρωσης (validation set) που αποτελούν το 15% των αρχικών δεδομένων έτσι ώστε η μέση απόδοση του μοντέλου να μετρηθεί σε προβλέψεις δεδομένων τα οποία του είναι άγνωστα μιας και δεν έχουν συμπεριληφθεί στην εκπαίδευση του.

Το μέσο ποσοστό επιτυχημένων προβλέψεων για την ευστάθεια του συστήματος είναι **93,6%**. Το ποσοστό αυτό είναι ιδιαίτερα καλό και μας φανερώνει ότι για το παρόν σύστημα μπορεί να προβλέψει με μεγάλη επιτυχία την ευστάθεια του για όλο το χρονικό εύρος εφαρμογής βραχυκυκλώματος. Παρ όλα αυτά το κύριο μέλημα μας είναι ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης σε κάθε περίπτωση. Είναι λογικό το μεγαλύτερο ποσοστό λάθους του μοντέλου να συμβαίνει για πολύ οριακές χρονικές διάρκειες σφάλματος (όταν γίνεται η εναλλαγή του συστήματος από ευσταθές σε ασταθές). Για τον λόγο αυτό παρακάτω παρουσιάζονται σε παραδείγματα οι προβλέψεις των κρίσιμων χρόνων με βάση το μοντέλο στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5.

6.4.1 Πρόβλεψη κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8

Συμφώνα με την προσομοίωση της ενότητας 5.5.1 ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ενός 3Φ στέρους βραχυκυκλώματος στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8 είναι 0.45 sec. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η πρόβλεψη του κρίσιμου χρόνου με την βοήθεια του εκπαιδευμένου μοντέλου. Συμφώνα με την πρόβλεψη του μοντέλου ο μέγιστος δυνατός χρόνος διάρκειας του σφάλματος ώστε το σύστημα να παραμείνει ευσταθές είναι 0.40 sec. Το ποσοστό λάθους αυτής της πρόβλεψης είναι 11%. Παρ όλα αυτά, αυτή η χρονική απόκλιση (0.05 sec) από τον πραγματικό κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης δεν εγκυμονεί κινδύνους για το δίκτυο διότι εάν οι διακόπτες ασφαλείας ρυθμιστούν στα 0.40 sec αντί για 0.45 sec το σύστημα θα παραμείνει ασφαλές από τον κίνδυνο του αποσυγχρονισμού. Επομένως η πρόβλεψη θεωρείται αποδεκτή.

```
## Initial situation
fault_input = np.array([[0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0.31, 0.0085, 0.0720, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0.05]])
fault_input = pd.DataFrame(fault_input, columns = result.iloc[:, :1].keys())
fault_input
```

	Bus_2	Bus_4	Bus_5	Bus_7	Bus_8	Bus_9	generator	Loading	R	X	Line_2_7	Line_4_5	Line_5_4	Line_5_7	Line_7_8	Line_8_9	Line_9_6	Fault_time
0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.31	0.0085	0.072	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.05

```
while (1):
    stable = clf.predict(fault_input)[0] #prediction
    if stable == 0:
        print("Minimum fault duration for unstable system:", fault_input.iloc[0, -1].round(3), "sec")
        break # When the stable situation changes from 1 to 0 print the critical time
    else:
        fault_input.iloc[0, -1] = fault_input.iloc[0, -1] + 0.01 # increase duration of fault by 0.01sec
print("Maximum fault duration for stable system:", (fault_input.iloc[0, -1] - 0.01).round(3), "sec")
Minimum fault duration for unstable system: 0.41 sec
Maximum fault duration for stable system: 0.4 sec
```

Σχήμα 6.3: Υπολογισμός κρίσιμου χρόνου για σφάλμα στην γραμμή 7-8 με την βοήθεια του μοντέλου RandomForestClassifier.

6.4.2 Πρόβλεψη κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8

Συμφώνα με την προσομοίωση της ενότητας 5.5.2 ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ενός 3Φ στέρους βραχυκυκλώματος στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 8 είναι 0.4 sec (για βραχυκύκλωμα διάρκειας 0.45 sec το σύστημα αποσυγχρονίζεται). Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η πρόβλεψη του κρίσιμου χρόνου με την βοήθεια του εκπαιδευμένου μοντέλου. Συμφώνα με την πρόβλεψη του

μοντέλου ο μέγιστος δυνατός χρόνος διάρκειας του σφάλματος ώστε το σύστημα να παραμείνει ευσταθές είναι 0.42 sec (0.43 sec είναι η πρόβλεψη του ελάχιστου χρόνου βραχυκυκλώματος που οδηγεί σε αστάθεια το σύστημα). Το ποσοστό λάθους αυτής της πρόβλεψης είναι 5%. Η περίπτωση αυτής της πρόβλεψης μας οδηγεί σε μια ιδιαίτερη περίπτωση αναφορικά με τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το PSS/E. Στο κεφάλαιο 5 όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, πραγματοποιούνται συνεχείς προσομοιώσεις μεταβάλλοντας την χρονική διάρκεια (κατά +0.05 sec) του βραχυκυκλώματος έως ότου το σύστημα αποσυγχρονιστεί, επομένως η αμέσως προηγούμενη χρονική διάρκεια αποτελεί τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης. Στη προκειμένη περίπτωση η πρόβλεψη του μοντέλου μας παρέχει έναν κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης για τον οποίο δεν έχει πραγματοποιηθεί προσομοίωση και βρίσκεται ενδιάμεσα από τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης και ελάχιστο χρόνο βραχυκυκλώματος για τον αποσυγχρονισμό του συστήματος. Η πρόβλεψη αυτή μας φανερώνει τη δυνατότητα για ακριβέστερους προσδιορισμούς κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης στους ζυγούς του συστήματος. Παρ όλα αυτά δημιουργεί την ανάγκη για εξακρίβωση της ευστάθειας του συστήματος για χρονική διάρκεια βραχυκυκλώματος 0.42 sec μέσω προσομοίωσης. Παρακάτω θα παρουσιαστεί η προσομοίωση για βραχυκύκλωμα διάρκειας 0.42 sec.

```

## Initial situation
## bus = 8 , Line = 8-9 , initial_time = 0.05 sec
fault_input = np.array([[0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0.23, 0.0119, 0.1008, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0.05]])
fault_input = pd.DataFrame(fault_input, columns = result.iloc[:, :-1].keys())
fault_input

```

Bus_2	Bus_4	Bus_5	Bus_7	Bus_8	Bus_9	generator	Loading	R	X	Line_2_7	Line_4_5	Line_5_4	Line_5_7	Line_7_8	Line_8_9	Line_9_6
0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.23	0.0119	0.1008	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0

```

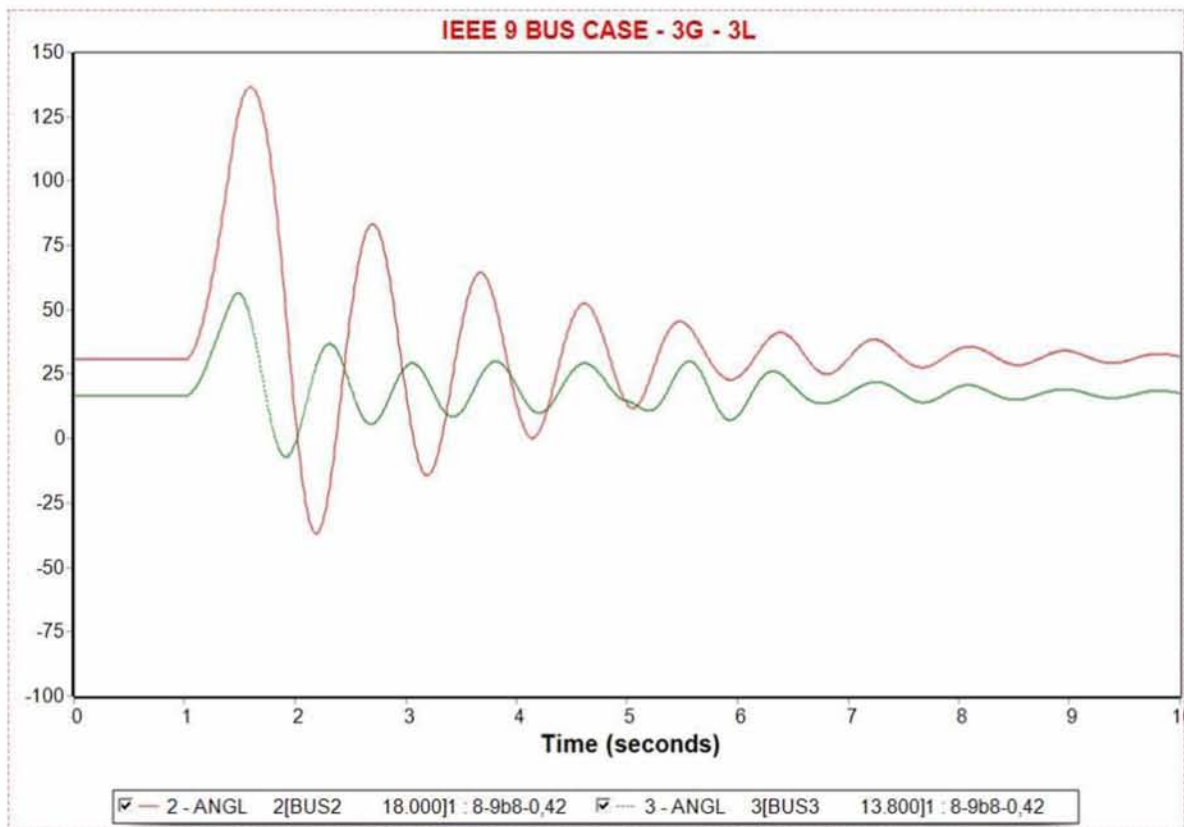
while (1):
    stable = clf.predict(fault_input)[0] #prediction
    if stable == 0:
        print("Minimum fault duration for unstable system: ", fault_input.iloc[0,-1].round(3), "sec")
        break # When the stable situation changes from 1 to 0 print the critical time
    else:
        fault_input.iloc[0,-1] = fault_input.iloc[0,-1] + 0.01 # increase duration of fault by 0.01sec
print("Maximum fault duration for stable system:", (fault_input.iloc[0,-1] - 0.01).round(3), "sec")

```

Minimum fault duration for unstable system: 0.43 sec
Maximum fault duration for stable system: 0.42 sec

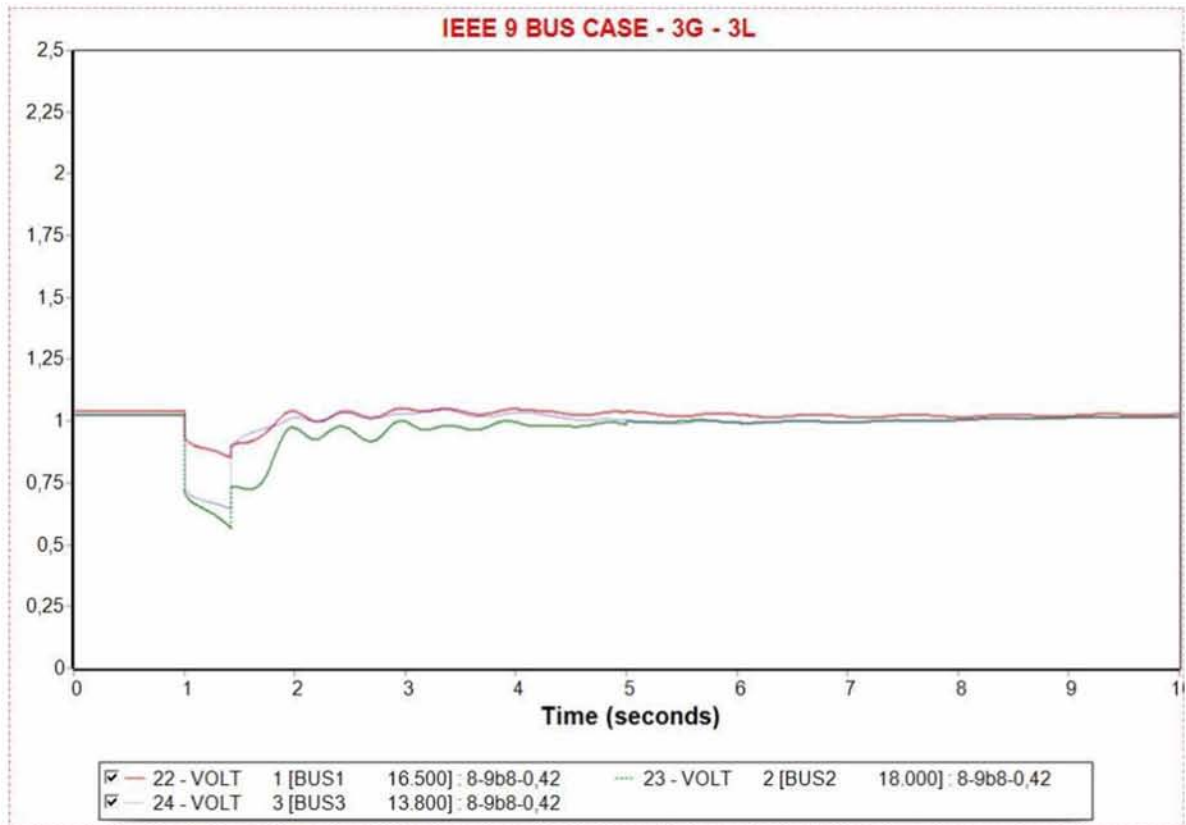
Σχήμα 6.4: Υπολογισμός κρίσιμου χρόνου για σφάλμα στην γραμμή 8-9 πλησίον του ζυγού 8 με την βοήθεια του μοντέλου Random Forest Classifier.

Πράγματι, έπειτα από το προσομοίωση τριφασικού βραχυκυκλώματος στη γραμμή 8-9 πλησίον του ζυγού 8 για χρονική διάρκεια 0.42 sec μέσω του PSS/E το σύστημα παραμένει ευσταθές. Στα Σχήματα 6.5 και 6.6 παρουσιάζεται η σύγκλιση των γωνιών ισχύος και των τάσεων αντίστοιχα. Επομένως, η πρόβλεψη του μοντέλου θεωρείται επιτυχημένη διότι η ρύθμιση των διακοπών ασφαλείας με χρονικό όριο τα 0.42 sec δεν εγκυμονεί κινδύνους για την ευστάθεια του δικτύου. Τέλος αυτή η τεχνική μας βοηθά στην εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης με μεγαλύτερη ταχύτητα και ακρίβεια σε επίπεδο milliseconds σε περίπτωση επιτυχημένης πρόβλεψης, μιας και στις προσομοιώσεις που πραγματοποιούμε δεν είναι εφικτή η κάλυψη όλου του χρονικού φάσματος.



Σχήμα 6.5:Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα διάρκειας 0.42 sec στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8.

Γωνία ισχύος γεννητριών 2 & 3, ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1.



Σχήμα 6.6: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα διάρκειας 0.42 sec στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8. Τάση των γεννητριών ζυγών του συστήματος.

6.4.3 Πρόβλεψη κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9

Συμφώνα με την προσομοίωση της ενότητας 5.5.3 ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης ενός 3Φ στέρεου βραχυκυκλώματος στη γραμμή 6-9, πλησίον του ζυγού 9 είναι 0.35 sec (για βραχυκύκλωμα διάρκειας 0.4 sec το σύστημα αποσυγχρονίζεται). Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η πρόβλεψη του κρίσιμου χρόνου με την βοήθεια του εκπαιδευμένου μοντέλου. Συμφώνα με την πρόβλεψη του μοντέλου ο μέγιστος δυνατός χρόνος διάρκειας του σφάλματος ώστε το σύστημα να παραμείνει ευσταθές είναι 0.37 sec (0.38 sec είναι η πρόβλεψη του ελάχιστου χρόνου βραχυκυκλώματος που οδηγεί σε αστάθεια το σύστημα). Το ποσοστό λάθους αυτής της πρόβλεψης είναι 5,7%. Η περίπτωση αυτής της είναι όμοια περίπτωση με αυτή στην προηγούμενη ενότητα. Η πρόβλεψη του μοντέλου μας παρέχει έναν κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης για τον οποίο δεν έχει πραγματοποιηθεί προσομοίωση και βρίσκεται

ενδιάμεσα από τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης και ελάχιστο χρόνο βραχυκυκλώματος για τον αποσυγχρονισμό του συστήματος. Παρακάτω θα παρουσιαστεί η προσομοίωση για βραχυκύκλωμα διάρκειας 0.37 για την εξακρίβωση της ευστάθειας του συστήματος για τον προβλεπόμενο χρόνο.

```

## Initial situation
## bus = 8 , line = 8-9 , initial_fault_duration = 0.05 sec
fault_input = np.array([[0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0.42, 0.0390, 0.1700, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0.05]])
fault_input = pd.DataFrame(fault_input, columns = result.iloc[:, :-1].keys())
fault_input

```

Bus_4	Bus_5	Bus_7	Bus_8	Bus_9	generator	Loading	R	X	Line_2_7	Line_4_5	Line_5_4	Line_5_7	Line_7_8	Line_8_9	Line_9_6	Fault_time
0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.42	0.039	0.17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.05

```

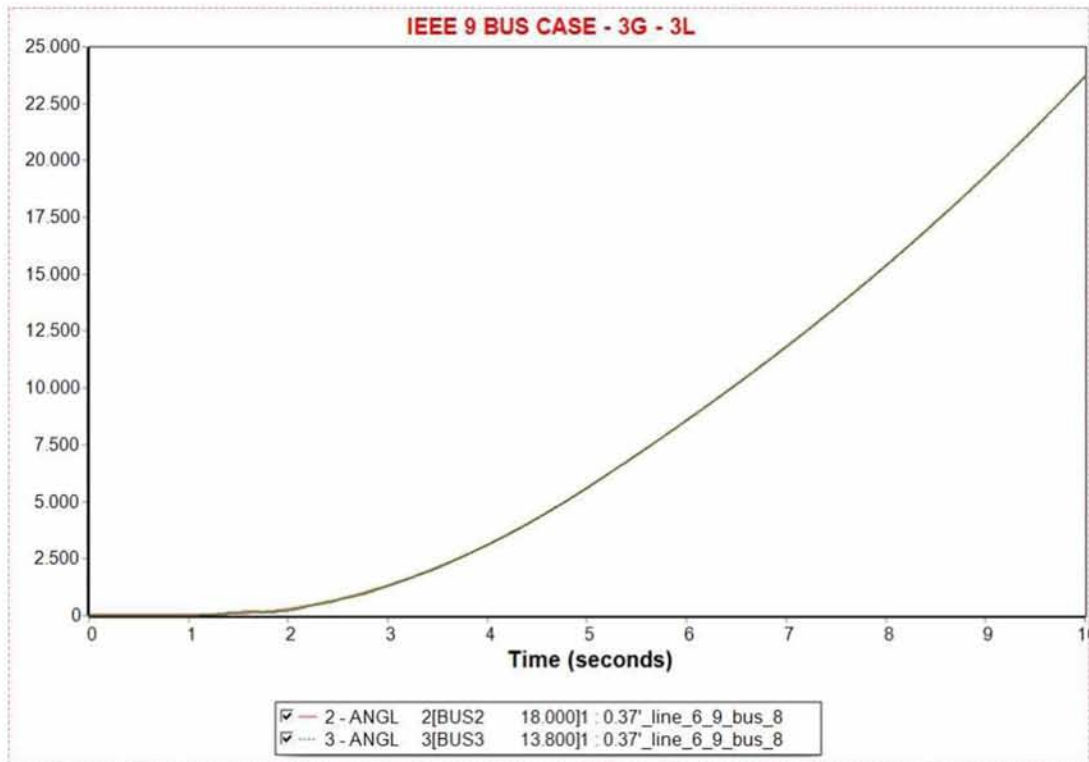
while (1):
    stable = clf.predict(fault_input)[0] #prediction
    if stable == 0:
        print("Minimum fault duration for unstable system: ", fault_input.iloc[0, -1].round(3), "sec")
        break # When the stable situation changes from 1 to 0 print the critical time
    else:
        fault_input.iloc[0, -1] = fault_input.iloc[0, -1] + 0.01 # increase duration of fault by 0.01sec
print("Maximum fault duration for stable system:", (fault_input.iloc[0, -1] - 0.01).round(3), "sec")
Minimum fault duration for unstable system: 0.38 sec
Maximum fault duration for stable system: 0.37 sec

```

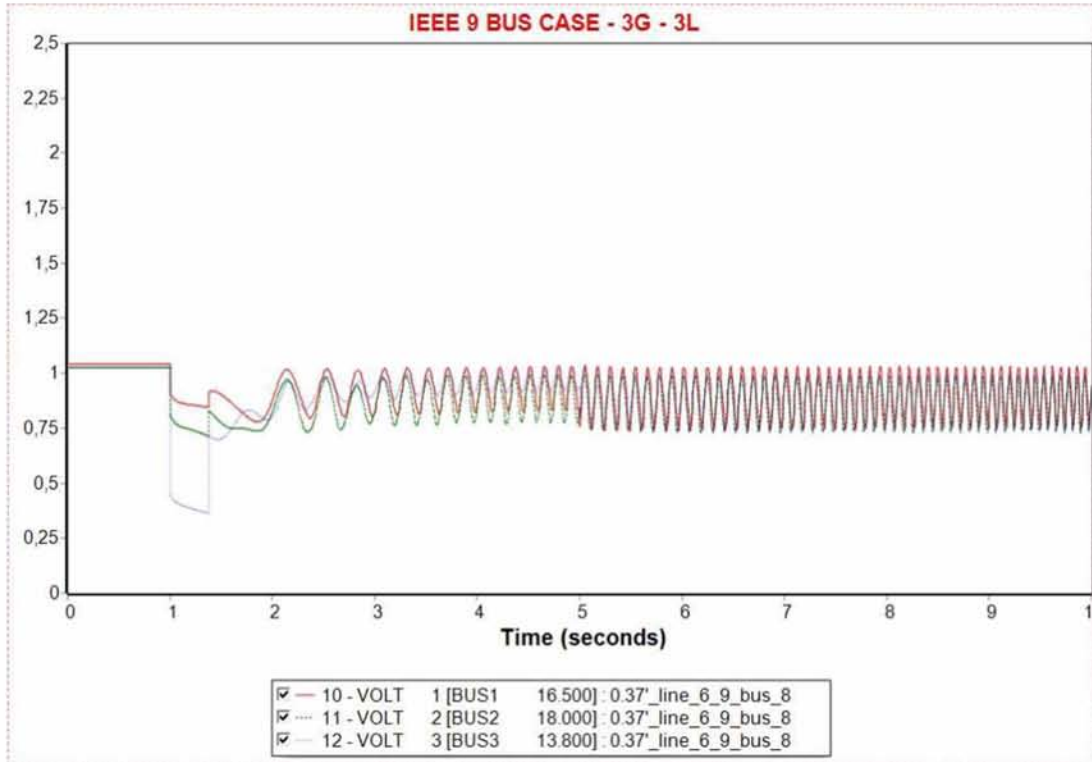
Σχήμα 6.7: Υπολογισμός κρίσιμου χρόνου για σφάλμα στην γραμμή 6-9 πλησίον του ζυγού 9 με την βοήθεια του μοντέλου RandomForestClassifier.

Έπειτα από την προσομοίωση τριφασικού βραχυκυκλώματος στη γραμμή 6-9 πλησίον του ζυγού 9 για χρονική διάρκεια 0.37 sec μέσω του PSS/E το σύστημα αποσυγχρονίζεται.

Στα παρακάτω Σχήματα 6.8 και 6.9 παρουσιάζονται οι σχετικές γωνίες ισχύος των γεννητριών 2 και 3 ως προς την αντίστοιχη της γεννήτριας 1 καθώς και οι τάσεις των ζυγών. Ο αποσυγχρονισμός του συστήματος φαίνεται από το σχήμα των γωνιών ισχύος. Επομένως, η πρόβλεψη του μοντέλου δεν θεωρείται επιτυχημένη διότι δεν είναι δυνατή η ρύθμιση των διακοπών ασφαλείας με χρονικό όριο τα 0.37 sec.



Σχήμα 6.8:Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα διάρκειας 0.37 sec στη γραμμή 6 – 9, πλησίον του ζυγού 9.
Γωνία ισχύος γεννητριών 2 & 3, ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1.



Σχήμα 6.9:Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα διάρκειας 0.37 sec στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 8.
Τάση των γεννητριών ζυγών του συστήματος.

6.5 Σύνοψη

Το μικρό μέγεθος του συστήματος των εννέα ζυγών το οποίο μελετήθηκε στα παραπάνω κεφάλαια είχε ως αποτέλεσμα τον περιορισμένο αριθμό δεδομένων που συλλέχθηκαν για την πραγματοποίηση των προβλέψεων της ευστάθειας του. Είναι φυσικό λοιπόν, ότι για την διεξαγωγή συμπαγών συμπερασμάτων όσον αφορά την επίδοση του αλγορίθμου να χρειάζεται μεγαλύτερος όγκος δεδομένων από μεγαλύτερα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Κάτι τέτοιο θα είχε ως αποτέλεσμα την επίτευξη ακριβέστερων προβλέψεων, τη δυνατότητα δοκιμής περισσότερων και πιο πολύπλοκων μεθόδων μηχανικής μάθησης που ανταποκρίνονται καλύτερα σε μεγάλο όγκο δεδομένων (π.χ. νευρωνικά δίκτυα), την ευκολότερη εξαγωγή μοτίβων και συσχετίσεων μεταξύ δεδομένων που επηρεάζουν τον κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισης ενός βραχυκυκλώματος κάτι που θα αποτελούσε σημαντικό εργαλείο για τον εκάστοτε μηχανικό μελετά το σύστημα.

Παρ' όλα αυτά, η παραπάνω ανάλυση αποτελεί μια πειραματική δοκιμή με κύριο σκοπό να φανερώσει τις εξελικτικές προοπτικές που μπορούν να δημιουργηθούν, στην προκειμένη περίπτωση, σε μια μελέτη μεταβατικής ευστάθειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και κατ' επέκταση σε ολόκληρο τον κλάδο της μελέτης ενεργειακών συστημάτων όταν συνδυαστούν με τεχνολογίες αιχμής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί αν όχι το σημαντικότερο, ένα από τα σημαντικότερα αγαθά που μας προσφέρει η τεχνολογία. Η οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη του σημερινού κόσμου έχει ως αφετηρία την ανακάλυψη την ηλεκτρικής ενέργειας. Τα Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας τα οποία αποτελούνται από τα υποσυστήματα παραγωγής, μεταφοράς και κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα αναντικατάστατο τμήμα αυτής της τεχνολογικής και οικονομικής προόδου. Η σπουδαιότητα αυτή των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας επιβάλλει τη σωστή και λεπτομερέστατη μελέτη τους, τόσο κατά το στάδιο σχεδιασμού και της κατασκευής τους, όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Οι μελέτες τόσο μόνιμης κατάστασης λειτουργίας τους όσο και της μεταβατικής τους ευστάθειας είναι αναγκαίες για την ασφαλή λειτουργία τους αφού περιπτώσεις σφαλμάτων και άλλων σοβαρών διαταραχών μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ομαλή λειτουργία και ευστάθεια του συστήματος, με οικονομικές συνέπειες σε ότι αφορά τον εξοπλισμό τους, αλλά και συνέπειες κύρους του εκάστοτε παρόχου προς τους καταναλωτές. Ως μέσο εξασφάλισης ομαλής λειτουργίας του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας κρίνεται αναγκαία η σωστή επιλογή και ρύθμιση κατάλληλων διακοπών προστασίας που θα προστατεύσουν το δίκτυο από ανυπολόγιστες καταστροφές. Χάρη στη πρόοδο στην τεχνολογίας και την ισχυρή υπολογιστική δύναμη των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι μελέτες που αναφέρθηκαν, πραγματοποιούνται μέσω ειδικών λογισμικών, τα οποία, με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων, προσομοιώνουν εύκολα και γρήγορα όλες τις καταστάσεις ενός συστήματος, λύνοντας έτσι τα χέρια των μηχανικών. Τέλος, με την δημιουργία νέων επιστημονικών κλάδων στον τομέα της επιστήμης των υπολογιστών και των μαθηματικών, οι δυνατότητες βελτιστοποίησης των μελετών ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας εκτοξεύονται και το μέλλον τους φαντάζει ευοίωνο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Βοβός Νικόλαος Α., Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2015
- [2] Βοβός Νικόλαος Α., Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2016
- [3] Βοβός Νικόλαος Α., Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2017
- [4] University of Thessaly educational material. Retrieved from: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Parousiasi6_ver2.pdf
- [5] Flanagan, William M., Handbook of Transformer Design and Applications, 1993
- [6] Grainger, John J., Power System Analysis, 2003. Αναρτήθηκε από: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_fault
- [7] Διπλωματική εργασία, Πάλλας Α. Δημήτρης, Εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, Χανιά, 2007
- [8] J.Duncan Clover, Mulukutla S.Sarma, Thomas J. Overbye., Power Systems Analysis and Design, GLOVER, 2011
- [9] John J. Granger, William D. Stevenson, Jr., Power System Analysis, International Editions, 1994
- [10] Διπλωματική εργασία, Αντώνενας Βασίλειος, Μόνιμη και Μεταβατική Λειτουργία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Βόλος, 2019
- [11] Gérard Biau & Erwan Scornet, A random forest guided tour, 2016
- [12] Ho, Tin Kam, Random Decision Forests, 1995. Αναρτήθηκε από: https://en.wikipedia.org/wiki/Random_forest
- [13] Scikit-learn, retrieved from: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html>