



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Μόνιμη και Μεταβατική Λειτουργία
Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Αντώνενας

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2019



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Μόνιμη και Μεταβατική Λειτουργία
Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Διπλωματική Εργασία

Βασίλειος Αντώνενας

Επιβλέπων: Δημήτριος Μπαργιώτας

Βόλος 2019



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Steady State and Transient Stability Analysis
of Power Systems**

Diploma Thesis

Vasileios Antonenas

Supervisor: Dimitrios Bargiotas

Volos 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Διπλωματικής μου Εργασίας, Δημήτριο Μπαργιώτα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω του γονείς μου για τη στήριξή τους καθ' 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 Δηλών

(Υπογραφή)

Βασίλειος Αντώνενας

Ιούλιος 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, μελετώνται η Μόνιμη και Μεταβατική λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόσο από άποψη της αντίστοιχης θεωρίας, όσο και μέσω του λογισμικού Siemens PSS/E, εκτελώντας σχετικά σενάρια προσομοίωσης.

Το 1ο κεφάλαιο επικεντρώνεται στη μελέτη των βασικών συνιστωσών που απαρτίζουν ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, δηλαδή τις σύγχρονες γεννήτριες, τις γραμμές μεταφοράς, τους μετασχηματιστές ισχύος και τα φορτία, ενώ γίνεται αναφορά και στη μελέτη μέσω του ανά μονάδα συστήματος (ρ).

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

Το 3ο κεφάλαιο αφορά τη μελέτη συμμετρικών και ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, παρουσιάζοντας την κατάλληλη μεθοδολογία προσέγγισής τους. Για τα μη συμμετρικά βραχυκυκλώματα αναλύεται η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών και ακολουθιακών κυκλωμάτων.

Το 4ο κεφάλαιο επικεντρώνεται στη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, με έμφαση στα μοντέλα των σύγχρονων μηχανών για τις αντίστοιχες μελέτες, καθώς στη μέθοδο του Κριτηρίου των Ίσων Εμβαδών για τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας.

Το 5ο κεφάλαιο επικεντρώνεται στα μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς στις γεννήτριες των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, καθώς και στην εκκαθάριση σφαλμάτων από τους ηλεκτρονόμους προστασίας.

Τέλος, στο 6ο κεφάλαιο χρησιμοποιείται το λογισμικό Siemens PSS/E για τη μελέτη μόνιμης και μεταβατικής λειτουργίας του συστήματος 9 ζυγών της IEEE. Παρατίθενται αποτελέσματα μελέτης ροής φορτίου, τριφασικών βραχυκυκλωμάτων, καθώς και σενάρια υπολογισμού κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισης σφαλμάτων.

ABSTRACT

In this Diploma Thesis, Steady State and Transient Stability of Power Systems are examined, both in terms of theory and simulation, using Siemens PSS/E software to perform simulation scenarios.

The 1st Chapter focuses on the study of the basic components of a Power System, namely synchronous generators, power lines and transformers and loads. A reference to per unit study is also made.

The 2nd Chapter deals with Power Flow Analysis, from the development of the corresponding equations, to their solution, using either Gauss – Seidel or Newton – Raphson numerical methods, explaining the corresponding algorithms.

The 3rd Chapter focuses on the study of symmetrical and asymmetrical short circuits, presenting the appropriate methodology of their approach. For non – symmetrical short circuits, the symmetrical components and sequential circuits method is analyzed.

The 4th Chapter deals with the study of transient stability of Power Systems, with emphasis on the synchronous machines models for respective studies, and the Equal Area Criterion and its use in transient stability studies.

The 5th Chapter focuses on the protection systems used in power lines and generators, as well as on the fault clearance by protection relays.

Finally, in 6th Chapter, Siemens PSS/E software is used, in order to study the steady state and the transient stability of IEEE 9 bus system. Load flow study and three – phase short circuits results are presented, as well as critical time calculation scenarios for fault clearance.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ABSTRACT	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	viii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	1
1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	1
1.2 Σύγχρονες Γεννήτριες	4
1.2.1 Περιγραφή σύγχρονης γεννήτριας	4
1.2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα, πραγματική & άεργος ισχύς σύγχρονης γεννήτριας	7
1.2.3 Συγχρονισμός γεννήτριας στο δίκτυο	10
1.2.4 Ικανότητα φόρτισης γεννητριών	11
1.2.5 Μεταβατική συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας	12
1.3 Γραμμές Μεταφοράς	15
1.3.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς	15
1.3.2 Ισοδύναμο κυκλώματα γραμμών μεταφοράς	17
1.3.3 Ικανότητα φόρτισης γραμμών μεταφοράς	19
1.4 Μετασχηματιστές Ισχύος	20
1.4.1 Χαρακτηριστικά μετασχηματιστών ισχύος	20
1.4.2 Ισοδύναμο κυκλώματα μετασχηματιστών	23
1.4.3 Μετασχηματιστές ως συσκευές ελέγχου	24
1.5 Φορτία	26
1.6 Ανά Μονάδα σύστημα (Per Unit – PU)	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	30
ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	30
2.1 Εισαγωγή	30
2.2 Εξισώσεις ροής φορτίου	31

2.2.1 Κατάστροψη εξισώσεων ροής φορτίου	31
2.2.2 Χαρακτηριστικά εξισώσεων ροής φορτίου	34
2.2.3 Κατάταξη μεταβλητών συστήματος	35
2.3 Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου	35
2.3.1 Μέθοδος Gauss – Seidel (G – S).....	37
2.3.2 Μέθοδος Newton – Raphson (N – R).....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	42
ΜΕΛΕΤΕΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ	42
3.1 Εισαγωγή στα βραχυκυκλώματα	42
3.2 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα	44
3.2.1 Εισαγωγή	44
3.2.2 Αντοχή σε βραχυκύκλωμα (SCC).....	44
3.2.3 Υπολογισμός ρεύματος βραχυκύκλωσης με το Θεώρημα Thevenin	45
3.2.4 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα στις σύγχρονες μηχανές	47
3.3 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα	50
3.3.1 Συμμετρικές συνιστώσες.....	50
3.3.2 Τριφασική ισχύς και συμμετρικές συνιστώσες	52
3.3.3 Ακολουθιακά κυκλώματα	53
3.3.4 Ακολουθιακά κυκλώματα γεννητριών	53
3.3.5 Ακολουθιακά κυκλώματα γραμμών	55
3.3.6 Ακολουθιακά κυκλώματα μετασχηματιστών	56
3.3.7 Υπολογισμός ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων.....	57
3.3.8 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη (SLG).....	58
3.3.9 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων (LL).....	60
3.3.10 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων ως προς γη (LLG)	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	64

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	64
4.1 Γενικά περί ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	64
4.2 Εξίσωση ταλάντωσης	66
4.3 Μοντέλα σύγχρονων μηχανών σε μελέτες μεταβατικής ευστάθειας	68
4.4 Μέθοδοι μελέτης μεταβατικής ευστάθειας	70
4.5 Κριτήριο Ίσων Εμβαδών	71
4.5.1 Βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου.....	71
4.5.2 Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής.....	73
4.5.3 Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή.....	74
4.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβατική ευστάθεια.....	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	77
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	77
5.1 Εισαγωγή	77
5.2 Αρχές λειτουργίας ηλεκτρονόμων προστασίας	78
5.3 Ηλεκτρονόμοι προστασίας γραμμών μεταφοράς	79
5.3.1 Προστασία με ηλεκτρονόμους υπερέντασης.....	80
5.3.2 Προστασία με ηλεκτρονόμους απόστασης	81
5.3.3 Προστασία με ηλεκτρονόμους οδηγού	83
5.4 Εκκαθάριση σφαλμάτων	85
5.5 Προστασία γεννητριών.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	90
ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ SIEMENS	
PSS/E.....	90
6.1 Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	90
6.2 Σύστημα 9 ζυγών IEEE	91
6.3 Ροή Φορτίου.....	93

6.4 Συμμετρικό Τριφασικό Βραχυκύκλωμα	95
6.5 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας με το PSS/E	106
6.5.1 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4 – 6, πλησίον του ζυγού 6	106
6.5.2 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8	110
6.5.3 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 9	116
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	122
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	122
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	123

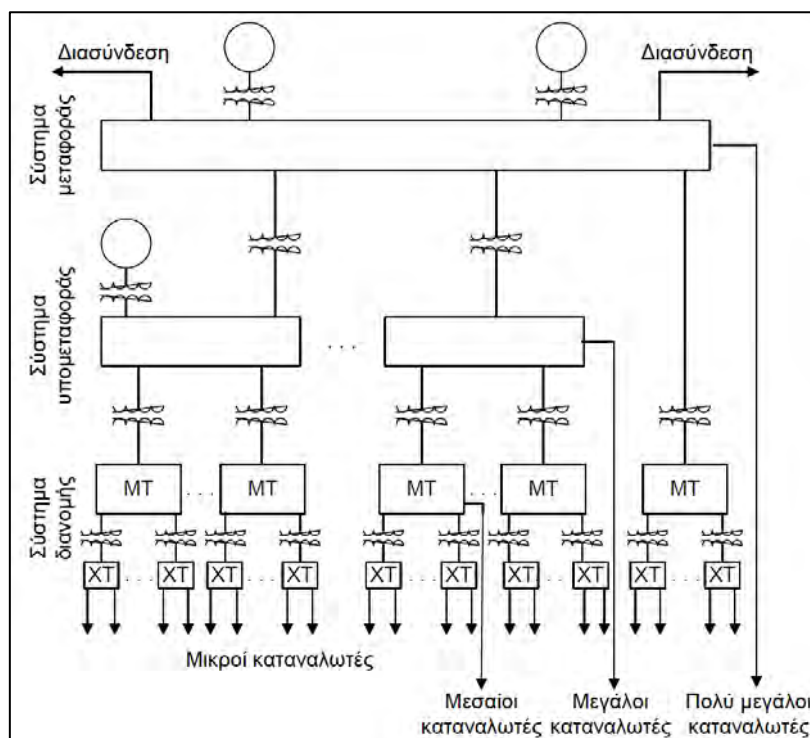
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες, διατάξεις αντιστάθμισης) που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια ένα σύνολο καταναλωτών. Σκοπός των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι η ασφαλής, αξιόπιστη, φιλική στο περιβάλλον και ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ισχύος στα φορτία των καταναλωτών, με τη χαμηλότερη δυνατή τιμή.

Οι τρεις βασικές συνιστώσες που απαρτίζουν ένα ΣΗΕ, είναι η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η τυπική διάρθρωση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, από την Παραγωγή, μέχρι τους Καταναλωτές.



Σχήμα 1.1: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται στους σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι διακρίνονται σε Ατμοηλεκτρικούς (ΑΗΣ), Υδροηλεκτρικούς (ΥΗΣ) και Πυρηνικούς

σταθμούς (ΠΣ), ανάλογα με τη μορφή της πρωτογενούς ενέργειας που αξιοποιούν, μετατρέποντάς την σε ηλεκτρική. Στους Ατμοηλεκτρικούς Σταθμούς, η χημική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), μετατρέπεται, μέσω της καύσης, σε θερμική, που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση νερού, και κατ' επέκταση την παραγωγή ατμού σε έναν λέβητα. Ο ατμός, στη συνέχεια, περιστρέφει έναν ατμοστρόβιλο, στον άξονα του οποίου είναι συνδεδεμένη μια γεννήτρια. Οι Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί αξιοποιούν τη δυναμική ενέργεια του νερού που πέφτει από μεγάλο ύψος, για την κίνηση υδροστροβίλων, συνδεδεμένων με γεννήτριες. Τέλος, στους Πυρηνικούς Σταθμούς, η θερμική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του ατμού, παρέχεται, μέσω πυρηνικών αντιδράσεων σχάσης, από έναν ελεγχόμενο πυρηνικό αντιδραστήρα. Τα τελευταία χρόνια, αξιοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η αιολική και ηλιακή ενέργεια, καθώς και η γεωθερμία, με το ποσοστό διεξόδυσής τους, όμως, να μην είναι αντίστοιχο των μεγάλων μονάδων παραγωγής που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες του σύγχρονου κόσμου, σε συνδυασμό με την επιτακτική ανάγκη για τον περιορισμό των αερίων ρύπων, έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση και αξιοποίηση πηγών ενέργειας πιο φιλικών στο περιβάλλον, με ταυτόχρονη την προσπάθεια για απεξάρτηση από ρυπογόνα ορυκτά καύσιμα.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται στους σταθμούς, μεταφέρεται στη συνέχεια, μέσω του Συστήματος Μεταφοράς, στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης. Το Σύστημα Μεταφοράς περιλαμβάνει τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, καθώς και τους υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού. Οι υποσταθμοί ανύψωσης βρίσκονται κοντά στις μονάδες παραγωγής και χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης, από τα 20kV – 30kV στους ακροδέκτες των γεννητριών, στα επίπεδα τάσης του συστήματος μεταφοράς. Οι τυποποιημένες τάσεις που χρησιμοποιούνται στα ανά τον κόσμο συστήματα μεταφοράς διαμορφώνονται στα 115, 132, 138, 150, 161, 230 και 275kV για την υψηλή τάση, και στα 345, 400, 500 και 765kV για την υπερυψηλή τάση. Η υψηλότερη τάση μεταφοράς που έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ, ήταν τα 1150kV στην πρώην Σοβιετική Ένωση. Τα τυπικά επίπεδα τάσης για το ελληνικό σύστημα μεταφοράς είναι τα 150kV και τα 400kV. Οι γραμμές που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικές εναλλασσόμενου ρεύματος, κατά πλειοψηφία εναέριες και σπανιότερα υπόγειες, ενώ σε ειδικές εφαρμογές, όπως στα υποθαλάσσια καλώδια, δύναται να χρησιμοποιηθεί και Συνεχές Ρεύμα Υψηλής Τάσης (HVDC). Η ανάπτυξη του δικτύου

μεταφοράς έχει, κυρίως, δομή βρόχου, παρέχοντάς του έτσι τη δυνατότητα να διοχετεύει την ηλεκτρική ενέργεια σε έναν μεγαλύτερο συνδυασμό κατευθύνσεων. Ανάμεσα στα εθνικά συστήματα μεταφοράς των κρατών αναπτύσσονται διασυνδεδετικές γραμμές, δημιουργώντας, έτσι, ένα ενιαίο δίκτυο, η λειτουργία του οποίου ορίζεται από αντίστοιχες διακρατικές συμφωνίες. Όλα τα παραπάνω προσδίδουν στο εκάστοτε σύστημα μεταφοράς αξιοπιστία, στιβαρότητα και αντοχή σε τυχόν διαταραχές. Μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές δύνανται να συνδεθούν απευθείας με το δίκτυο υψηλής τάσης, μέσω κατάλληλων υποσταθμών. Οι γραμμές μεταφοράς καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού στα κέντρα μεγάλης κατανάλωσης, όπως οι πόλεις και οι βιομηχανίες, όπου η τάση υποβιβάζεται στα επίπεδα του δικτύου διανομής, συνήθως στα 15kV – 20kV και σπανιότερα στα 6kV. Ανάλογα με τη βιβλιογραφία, οι χαμηλότερες τάσεις του συστήματος μεταφοράς, 23kV – 150 kV, διαμορφώνουν το σύστημα υπομεταφοράς, το οποίο χαρακτηρίζεται από περισσότερες γραμμές, μικρότερου μήκους και ισχύος. Ο ρόλος του είναι αντίστοιχος με αυτόν του συστήματος διανομής, που θα αναλυθεί στη συνέχεια, με τη διαφορά ότι καλύπτει μεγαλύτερες γεωγραφικά περιοχές, σε υψηλότερες τιμές τάσης και ισχύος, και δύναται να αναπτυχθεί και ακτινικά. Σε πολλές περιπτώσεις ΣΗΕ, η διάκριση μεταξύ μεταφοράς και υπομεταφοράς, δεν είναι πάντοτε εμφανής.

Το επόμενο και τελευταίο στάδιο της πορείας της ηλεκτρικής ενέργειας, από την παραγωγή προς τους καταναλωτές, είναι το Σύστημα Διανομής. Παραλαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς υποβιβασμού Υψηλής Τάσης/Μέσης Τάσης και στη συνέχεια τη διανέμει προς τους τελικούς καταναλωτές. Το σύστημα διανομής χωρίζεται σε δύο επίπεδα τάσεων, στην Πρωτεύουσα Διανομή (Μέση Τάση, ΜΤ) και στη Δευτερεύουσα Διανομή (Χαμηλή Τάση, ΧΤ). Στη Μέση Τάση συνδέονται παροχές μεγάλης ισχύος, άνω των 100kW, όπως βιοτεχνίες και βιομηχανίες, ενώ η Χαμηλή Τάση τροφοδοτεί μικρότερους καταναλωτές, κυρίως οικιακούς, με μονοφασικές ή τριφασικές παροχές. Στο ελληνικό ΣΗΕ, η Μέση Τάση βρίσκεται στα 20kV (παλιότερα στα 15kV), και η Χαμηλή Τάση στα 400V ή στα 230V στη μία φάση. Τα δίκτυα διανομής σχεδιάζονται και αναπτύσσονται ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής, ακολουθώντας ακτινική-δενδροειδή ή βροχοειδή μορφή. Στα αστικά κέντρα, για παράδειγμα, αναπτύσσονται κυρίως υπόγεια δίκτυα, στην ύπαιθρο εναέρια, ενώ σε ημιαστικές περιοχές αναπτύσσονται ως συνδυασμός εναερίων και υπόγειων δικτύων. Το σύστημα διανομής χαρακτηρίζεται από

μεγάλη πολυπλοκότητα, ως προς τη λειτουργία, τον έλεγχο και τη συντήρησή του, ενώ, πλέον, δύνανται να συνδεθούν σε αυτό, εκτός από φορτία καταναλωτών, και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, που αξιοποιούν ανανεώσιμες ή άλλες πηγές ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, σκοπός των ΣΗΕ είναι η αδιάλειπτη και ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ισχύος στα φορτία των καταναλωτών. Είναι αρκετά σημαντικό, κάθε χρονική στιγμή, όχι μόνο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να είναι ίση με το φορτίο, αλλά και να έχει εξασφαλιστεί επαρκής εφεδρεία για την κάλυψη τυχόν διαταραχών. Η δυσκολία στην εξασφάλιση της παραπάνω ανάγκης έγκειται στο γεγονός ότι, η μεταβολή του φορτίου των καταναλωτών είναι συνεχής. Το ημερήσιο φορτίο ενός ΣΗΕ, μπορεί να χωριστεί σε τρεις συνιστώσες: το φορτίο βάσης, το μεταβαλλόμενο φορτίο και το φορτίο αιχμής. Το φορτίο βάσης είναι μια σταθερή συνιστώσα, που διαρκεί όλη την ημέρα, το οποίο και καλύπτεται από μεγάλες μονάδες παραγωγής, με μικρό κόστος λειτουργίας, γνωστές και ως μονάδες βάσης (π.χ. λιγνιτικές, πυρηνικές). Το μεταβαλλόμενο φορτίο αποτελεί μια συνιστώσα, οι τιμές της οποίας είναι συνάρτηση του χρονικού διαστήματος της ημέρας, την εποχή, τις καιρικές συνθήκες, αλλά και από άλλους παράγοντες. Τέλος, το φορτίο αιχμής, που αποτελεί μια μικρή σχετικά συνιστώσα του ημερήσιου φορτίου, διαρκεί ένα μικρό διάστημα της ημέρας και καλύπτεται από μονάδες παραγωγής με ταχεία αντίδραση στην ανάληψη φορτίου, αλλά με μεγάλο κόστος λειτουργίας. Πρέπει να επισημανθεί ότι, οι ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών, στο παρόν αλλά και μελλοντικά, έχουν μεγάλη σημασία, όχι μόνο για την ομαλή λειτουργία του συστήματος, αλλά και για τις μελλοντικές προοπτικές αναβάθμισης και επέκτασής του. [1, 2, 3]

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, θα αναλυθούν περαιτέρω οι τρεις βασικές συνιστώσες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας: η σύγχρονη γεννήτρια, ο τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος και η γραμμή μεταφοράς.

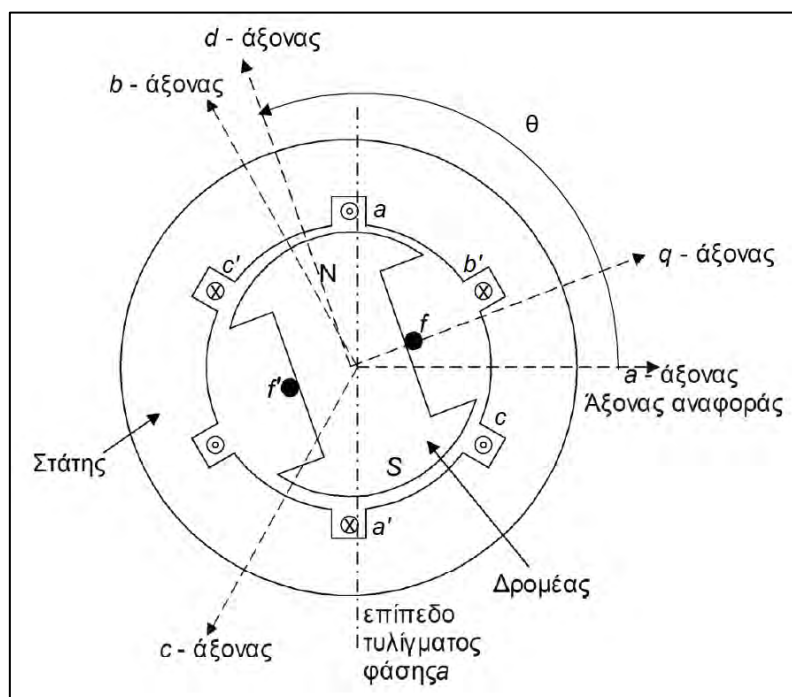
1.2 Σύγχρονες Γεννήτριες

1.2.1 Περιγραφή σύγχρονης γεννήτριας

Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι, σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα, σύγχρονες γεννήτριες, καθώς αποτελούν ένα αποδοτικό και αξιόπιστο μέσο για τη μετατροπή άλλων μορφών ενέργειας σε

ηλεκτρική. Το εύρος της ονομαστικής ισχύος των γεννητριών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα σύγχρονα ΣΗΕ κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες, μέχρι και πάνω από χίλια MVA. Ο όρος «σύγχρονη» απορρέει από το γεγονός ότι, στη μόνιμη κατάσταση, οι συχνότητες των τάσεων τις οποίες παράγουν είναι σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους.

Μια σύγχρονη γεννήτρια αποτελείται από δύο βασικά μέρη: τον στάτη, που είναι ακίνητος, και τον δρομέα, που αποτελεί το περιστρεφόμενο μέρος της μηχανής. Ο δρομέας δύναται να περιστραφεί από έναν στρόβιλο ατμού, ύδατος ή αερίου. Η σχηματική παράσταση τομής μιας σύγχρονης γεννήτριας παρατίθεται στη συνέχεια:



Σχήμα 1.2: Σχηματική παράσταση τομής σύγχρονης γεννήτριας

Ο στάτης είναι μια κοίλη κυλινδρική κατασκευή, φτιαγμένη από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων. Στην εσωτερική του επιφάνεια, μέσα σε αυλάκια, τοποθετούνται τα τρία τυλίγματα του στάτη, ένα για κάθε φάση. Τα τρία αυτά τυλίγματα (a-a', b-b', c-c') διευθετούνται σε τρεις συμμετρικές ζώνες, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους στο χώρο κατά 120° . Για κάθε τύλιγμα φάσης του στάτη, αντιστοιχεί ένας άξονας, ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο του αντίστοιχου τυλίγματος και είναι ακίνητος. Ως άξονας αναφοράς, θεωρείται πάντα ο άξονας του τυλίγματος a.

Ο δρομέας, που είναι και αυτός κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό, τοποθετείται στον άξονα της γεννήτριας και περιστρέφεται εντός του στάτη. Το τύλιγμά του

ονομάζεται Τύλιγμα Πεδίου ή Διέγερσης και σκοπός του είναι η παραγωγή ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς ρεύματος, τη διεγέρτρια. Η διεγέρτρια δύναται να είναι μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, τοποθετημένη στον ίδιο άξονα με αυτόν της σύγχρονης γεννήτριας ή μια ξεχωριστή πηγή συνεχούς ρεύματος, συνδεδεμένη στο τύλιγμα πεδίου μέσω ψυκτρών. Το τύλιγμα πεδίου των μεγάλων γεννητριών τροφοδοτείται, συνήθως, από πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, μέσω κατάλληλης ανορθωτικής διάταξης. Λόγω της παρουσίας του τυλίγματος αυτού, δημιουργούνται στο δρομέα δύο μαγνητικοί πόλοι N και S (Σχήμα 1.2). Ο άξονας των μαγνητικών πόλων ονομάζεται ευθύς άξονας (d – άξονας), ενώ ο κάθετος ως προς αυτόν εγκάρσιος άξονας (q – άξονας). Η γωνία θ καθορίζει κάθε στιγμή τη θέση του d – άξονα του δρομέα ως προς τον ακίνητο άξονα αναφοράς του τυλίγματος a του στάτη.

Κατασκευαστικά, υπάρχουν δύο βασικοί τύποι για τους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών: ο κυλινδρικός δρομέας, που είναι ουσιαστικά δρομέας με δύο πόλους, και ο δρομέας με έκτυπους πόλους. Γεννήτριες δρομέα με έκτυπους πόλους χρησιμοποιούνται σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς οι υδροστρόβιλοι λειτουργούν αποδοτικότερα σε χαμηλές ταχύτητες, με τον δρομέα να περιστρέφεται ως προς κατακόρυφο άξονα. Οι γεννήτριες με κυλινδρικό δρομέα χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, καθώς οι ατμοστρόβιλοι λειτουργούν αποδοτικότερα σε υψηλές ταχύτητες. Στην περίπτωση αυτή, ο δρομέας περιστρέφεται ως προς οριζόντιο άξονα. Οι γεννήτριες δρομέα με έκτυπους πόλους, για τη μείωση των μηχανικών ταλαντώσεων του δρομέα, που ενδέχεται να προκύψουν κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων (π.χ. εκκίνηση, μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας), διαθέτουν τυλίγματα απόσβεσης από βραχυκυκλωμένες ράβδους χαλκού, τοποθετημένες κατά μήκος της επιφάνειας των πόλων του δρομέα.

Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας βασίζεται στο νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday. Ο σχεδιασμός στάτη και δρομέα είναι τέτοιος ώστε, για σταθερή ταχύτητα του δρομέα, να παράγεται τάση ημιτονοειδούς μορφής σε καθένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη. Οι τάσεις αυτές χαρακτηρίζονται από ίδιο μέτρο και συχνότητα, και παρουσιάζουν φασική διαφορά 120° η μία απ' την άλλη, σχηματίζοντας έτσι μια τριφασική πηγή.

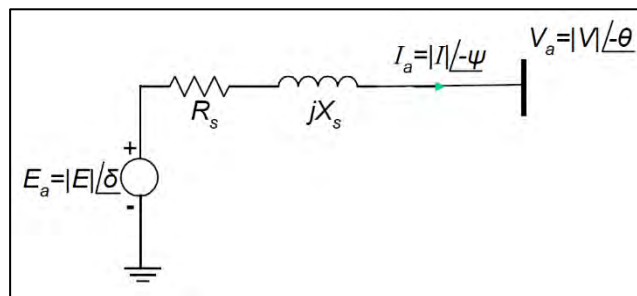
Η σχέση για τον υπολογισμό της συχνότητας της παραγόμενης ημιτονοειδούς τάσης της γεννήτριας είναι η ακόλουθη:

$$f = \frac{P}{2} \frac{N}{60} = \frac{P}{2} f_m \text{ Hz} \quad (1.1)$$

Όπου P ο αριθμός των πόλων και N η ταχύτητα του δρομέα σε στροφές/min, ενώ ως $f_m = N/60$ ορίζεται η μηχανική συχνότητα σε στροφές/sec. Για παράδειγμα, για την παραγωγή τάσης συχνότητας 50Hz, μια γεννήτρια δύο πόλων περιστρέφεται στις 3000 στροφές/min, ενώ μια γεννήτρια τεσσάρων πόλων στις 1500 στροφές/min. [1, 2]

1.2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα, πραγματική & άεργος ισχύς σύγχρονης γεννήτριας

Μελετώντας τη σύγχρονη γεννήτρια στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και υπό συμμετρική φόρτιση, διαπιστώνεται ότι παρουσιάζει τριφασική συμμετρία. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη μελέτη της ανά φάση, χρησιμοποιώντας το μονοφασικό ισοδύναμό της. Για μια σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα στη μόνιμη κατάσταση, το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα είναι το ακόλουθο (Σχήμα 1.3):



Σχήμα 1.3: Ανά Φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

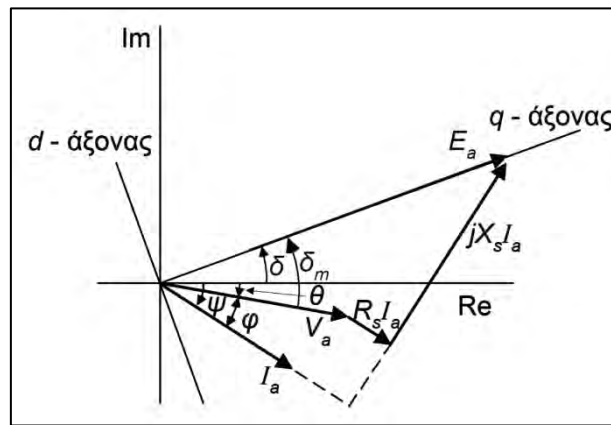
Αποτελείται από μια πηγή τάσης E_a , συνδεδεμένη σε σειρά μια αντίσταση (R_s) και μια αντίδραση (X_s). Η αντίσταση R_s αντιστοιχεί στην ανά φάση αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη, ενώ η αντίδραση X_s στη σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας, η οποία λαμβάνει υπόψη τη ροή που παράγεται από τα ρεύματα του στάτη. Το μέτρο $|E|$ της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης (ΗΕΔ) E_a της γεννήτριας, είναι ανάλογο του ρεύματος διέγερσης του δρομέα, και αντιπροσωπεύει τη φασική τάση ανοικτού κυκλώματος, δηλαδή την τάση των τυλιγμάτων του στάτη, όταν η γεννήτρια λειτουργεί χωρίς φορτίο. Η ΗΕΔ E_a και η φασική τάση ακροδεκτών V_a συνδέονται με τη σχέση:

$$E_a = V_a + R_s I_a + jX_s I_a \quad (1.2)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (Σχήμα 1.4), μπορεί να σχεδιαστεί αξιοποιώντας την παραπάνω σχέση. Η γωνία δ_m που σημειώνεται στο διάγραμμα και υπολογίζεται ως:

$$\delta_m = \angle E_a - \angle V_a = \delta + \theta \quad (1.3)$$

ονομάζεται γωνία ισχύος και είναι θετική όταν το E_a προηγείται του V_a . Όταν μια σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, η γωνία ισχύος είναι θετική ($\delta_m > 0$), ενώ όταν λειτουργεί ως κινητήρας λαμβάνει αρνητική τιμή ($\delta_m < 0$).



Σχήμα 1.4: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Σε μια πραγματική σύγχρονη γεννήτρια ισχύει γενικότερα $R_s \ll X_s$, οπότε για την απλοποίηση των υπολογισμών, μπορεί να θεωρηθεί ότι $R_s = 0$.

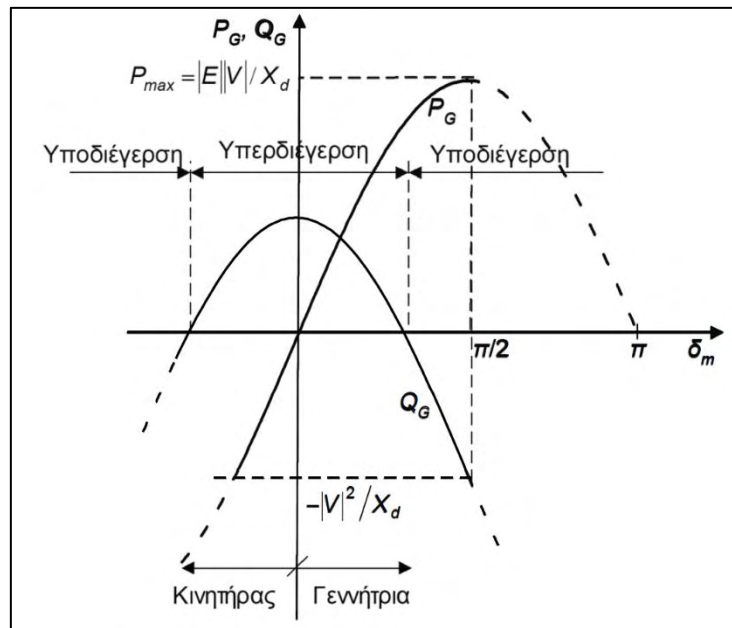
Οι σχέσεις για τον υπολογισμό των τιμών της πραγματικής και της αέργου ισχύος μιας σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα, είναι οι ακόλουθες:

$$P_G = \frac{|E||V|}{X_s} \sin \delta_m \quad (1.4)$$

$$Q_G = \frac{|V| (|E| \cos \delta_m - |V|)}{X_s} \quad (1.5)$$

Μια γεννήτρια είναι συνήθως συνδεδεμένη σε ένα «άπειρο δίκτυο», δηλαδή σε ένα δίκτυο μεγάλου μεγέθους. Σε αυτήν την περίπτωση, το μέτρο της τάσης $|V|$ είναι σταθερό. Αν, επίσης, θεωρηθεί ότι το ρεύμα διέγερσης είναι σταθερό, τότε και η τιμή της ΗΕΔ $|E|$ της γεννήτριας είναι και αυτή σταθερή. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω συνθήκες, και από τις δύο προαναφερθείσες σχέσεις για την πραγματική και την άεργο ισχύ, προκύπτει

ότι οι τιμές τους είναι συνάρτηση μόνο της γωνίας ισχύος δ_m . Για μια γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα, το διάγραμμα πραγματικής και άεργου ισχύος συναρτήσει της γωνίας ισχύος



Σχήμα 1.5: Πραγματική & Άεργος Ισχύς μηχανής κυλινδρικού δρομέα συναρτήσει της γωνίας ισχύος δ_m

δ_m , απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5:

Από το παραπάνω διάγραμμα και τη σχέση για την P_G , προκύπτει ότι αυτή μεγιστοποιείται για $\delta_m = 90^\circ$, δηλαδή:

$$P_{max} = \frac{|E||V|}{X_s} \quad (1.6)$$

Αύξηση της παραγόμενης πραγματικής ισχύος πέραν της τιμής της μέγιστης τιμής P_{max} , που αποτελεί όριο ευστάθειας, οδηγεί στον αποσυγχρονισμό της γεννήτριας από το δίκτυο. Γενικότερα, οι γεννήτριες λειτουργούν σε μικρές γωνίες ισχύος, κοντά στις 20° .

Παρατηρώντας τη σχέση υπολογισμού της άεργου ισχύος της γεννήτριας Q_G , γίνεται φανερό ότι η τιμή της εξαρτάται από την τιμή του αριθμητή, δηλαδή της ποσότητας $|E| \cos \delta_m - |V|$. Όταν η ποσότητα αυτή γίνει θετική, δηλαδή $|E| \cos \delta_m > |V|$, η γεννήτρια παράγει άεργο ισχύ ($Q_G > 0$). Στην περίπτωση αυτή, βρίσκεται σε υπερδιέγερση και αντιμετωπίζεται από το δίκτυο ως εγκάρσιος πυκνωτής. Αντίθετα, όταν $|E| \cos \delta_m < |V|$, η γεννήτρια βρίσκεται σε υποδιέγερση, καταναλώνει δηλαδή άεργο ισχύ ($Q_G < 0$) και αντιμετωπίζεται από το δίκτυο ως εγκάρσιο πηνίο. Η κατάσταση της υπερδιέγερσης, δηλαδή η παραγωγή άεργου ισχύος από μια σύγχρονη μηχανή, αξιοποιείται στους λεγόμενους σύγχρονους

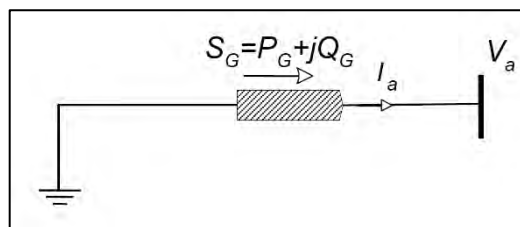
αντισταθμιστές, μηχανές στις οποίες είναι δυνατός ο έλεγχος της Q_G . Ένας σύγχρονος αντισταθμιστής δεν παράγει πραγματική ισχύ ($P_G = 0$), κατά συνέπεια η γωνία ισχύος είναι μηδενική ($\delta_m = 0$). Η παρεχόμενη άεργος ισχύς Q_G , που υπολογίζεται απ' τη σχέση

$$Q_G = \frac{|V| (|E| - |V|)}{X_s} \quad (1.7)$$

δύναται να ελεγχθεί μέσω της μεταβολής του ρεύματος διέγερσης i_f , που με τη σειρά του μεταβάλλει την τιμή $|E|$.

Η συμπεριφορά μιας γεννήτριας είναι δυνατόν να ελεγχθεί μέσω της μεταβολής του ρεύματος πεδίου i_{fi} και της μηχανικής ροπής στον άξονα της γεννήτριας τ_{mi} . Οι μεταβλητές αυτές καλούνται δυνάμεις ελέγχου ή είσοδοι και όταν μια ή και οι δύο μεταβληθούν, τότε οι τιμές των P_{Gi} , Q_{Gi} , $|V_i|$ και f , που χαρακτηρίζουν τη γεννήτρια, θα μεταβληθούν και αυτές.

Η γνώση των τιμών της πραγματικής και της άεργου ισχύος που παράγει μια σύγχρονη γεννήτρια, είναι αρκετά σημαντική για τη μελέτη ροής φορτίου, που θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, καθώς σε αυτήν την περίπτωση η γεννήτρια μοντελοποιείται ως μια πηγή πραγματικής (P_G) και άεργου ισχύος (Q_G) (Σχήμα 1.6). [1, 2]



Σχήμα 1.6: μονοφασικό ισοδύναμο γεννήτριας για χρήση σε μελέτη ροής φορτίου

1.2.3 Συγχρονισμός γεννήτριας στο δίκτυο

Για τη σύνδεση μιας γεννήτριας σε ένα μεγάλο δίκτυο, είναι απαραίτητο να έχει πραγματοποιηθεί νωρίτερα η διαδικασία του συγχρονισμού. Αρχικά, η γεννήτρια λειτουργεί αποκομμένη από το υπόλοιπο δίκτυο, δηλαδή εν κενώ. Προκειμένου να συνδεθεί με το δίκτυο, πρέπει να εξασφαλιστούν οι παρακάτω προϋποθέσεις (συνθήκες συγχρονισμού), μεταξύ της τάσης του δικτύου (V) και της τάσης της γεννήτριας κατά την εν κενώ λειτουργία της (E). E και V πρέπει, δηλαδή, να έχουν:

1. Ίδια συχνότητα
2. Ίδια φασική ακολουθία
3. Ίδιο μέτρο, δηλαδή $|E| = |V|$
4. Ίδιες φασικές γωνίες

Στην κατάσταση αυτή, ο στρόβιλος παρέχει πολύ μικρή ισχύ στη γεννήτρια, όση απαιτείται για την κάλυψη των απωλειών περιστροφής.

Όταν ικανοποιηθούν οι παραπάνω προϋποθέσεις, ο διακόπτης, που συνδέει τη γεννήτρια με το υπόλοιπο δίκτυο, μπορεί να κλείσει, και η γεννήτρια να συνδεθεί στο σύστημα. Επειδή όμως, αμέσως μετά τη σύνδεση, ισχύει $|E| = |V|$ και $\delta_m = 0$, δηλαδή η γεννήτρια δεν παράγει ούτε πραγματική ούτε άεργο ισχύ στο δίκτυο ($S_G = 0$), είναι απαραίτητο να ρυθμιστούν κατάλληλα οι μεταβλητές ελέγχου, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (ρεύμα διέγερσης και μηχανική ροπή στον άξονα), προκειμένου η γεννήτρια να δώσει στο δίκτυο την απαιτούμενη μιγαδική ισχύ S_G . Η μηχανική ροπή αυξάνεται μέχρι την επίτευξη της επιθυμητής πραγματικής ισχύος P_G . Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερή τη μηχανική ροπή, αυξάνεται το ρεύμα διέγερσης, μέχρι την εξασφάλιση της επιθυμητής αέργου ισχύος Q_G .

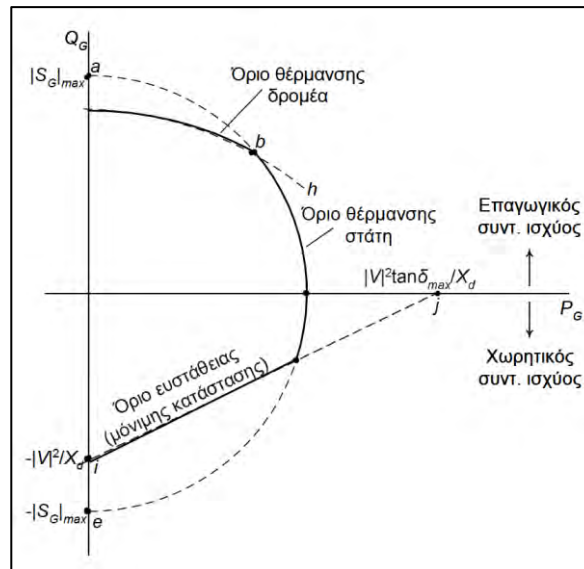
Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι μια γεννήτρια να λειτουργεί παράλληλα με άλλες, συνδεδεμένη σε ένα μεγάλο δίκτυο. Λόγω του μεγάλου μεγέθους και της στιβαρότητας του δικτύου, ο ζυγός που συνδέεται η γεννήτρια μπορεί να θεωρηθεί «άπειρος ζυγός», δηλαδή ζυγός με σταθερή τάση και συχνότητα. [1]

1.2.4 Ικανότητα φόρτισης γεννητριών

Η πραγματική και η άεργος ισχύς που μια γεννήτρια παρέχει στο δίκτυο, υπό συγκεκριμένη τάση στους ακροδέκτες της, δεν είναι απεριόριστη, αλλά περιορίζεται εντός συγκεκριμένου εύρους, το οποίο καθορίζεται από λειτουργικούς και κατασκευαστικούς παράγοντες της γεννήτριας. Οι τρεις πιο σημαντικοί από αυτούς τους παράγοντες, είναι:

1. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στάτη (θερμικό όριο)
2. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα δρομέα (θερμικό όριο)
3. Η μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία ισχύος

Αρκετά σημαντικοί είναι, επίσης, οι περιορισμοί που άπτονται των ορίων ευστάθειας της γεννήτριας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει η P – Q καμπύλη ικανότητας φόρτισης, που για γεννήτρια με κυλινδρικό δρομέα, είναι η ακόλουθη:



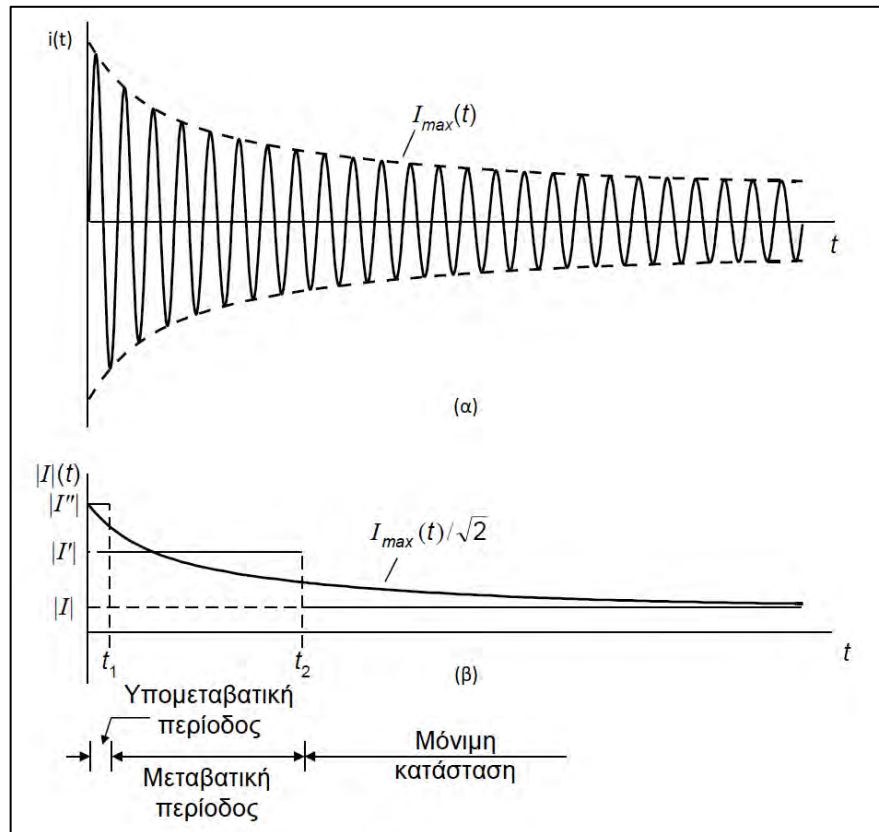
Σχήμα 1.7: Καμπύλη ικανότητας φόρτισης σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα

Επί του διαγράμματος, σημειώνονται οι καμπύλες που εκφράζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η καμπύλη της ικανότητας φόρτισης, που στο διάγραμμα απεικονίζεται με μαύρη συνεχή γραμμή (fbcdi), οροθετείται από τα σημεία τομής των καμπυλών αυτών, με τη γεννήτρια να πρέπει να λειτουργεί εντός της περιοχής που αυτή ορίζει. Ο περιορισμός της λειτουργίας μιας γεννήτριας εντός των ορίων της καμπύλης φόρτισής της, δύναται να πραγματοποιηθεί είτε με παρέμβαση χειριστή, είτε αυτόματα, είτε με συνδυασμό και των δύο. [1]

1.2.5 Μεταβατική συμπεριφορά σύγχρονης γεννήτριας

Μια σύγχρονη μηχανή, είτε είναι γεννήτρια είτε κινητήρας, λειτουργεί ως επί το πλείστον υπό συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Η πιθανή εμφάνιση σφαλμάτων, όπως αυτά που οφείλονται σε αιφνίδια βραχυκυκλώματα, οδηγούν σε συνθήκες μεταβατικής λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή, παρόλο που η μηχανή που μελετάται δεν βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η συμπεριφορά της εξακολουθεί να είναι ημιτονοειδούς μορφής, έχοντας, όμως, μεταβατικό χαρακτήρα.

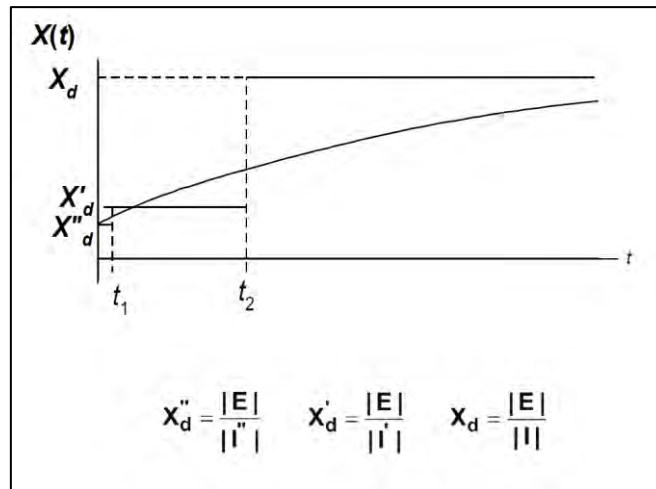
Το στιγμιαίο ρεύμα του σάτη μετά από βραχυκύκλωμα, απεικονίζεται στο Σχήμα 1.8α. Η περιβάλλουσα, που σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή, δείχνει τη μεταβολή της μέγιστης τιμής του ρεύματος $I_{max}(t)$. Διαιρώντας με $\sqrt{2}$, διαμορφώνεται η κυματομορφή του Σχήματος 1.8β, που απεικονίζει τη μεταβολή της ενεργού τιμής του ρεύματος του σάτη $|I|(t)$.



Σχήμα 1.8: (α) Ρεύμα σάτη μετά από βραχυκύκλωμα

(β) Μεταβολή της ενεργούς τιμής του ρεύματος με τον χρόνο, με βηματική προσέγγιση

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης της μόνιμης ημιτονοειδούς για την περιγραφή της μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας, η μεταβολή του ρεύματος $|I|(t)$, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είτε η ΗΕΔ $|E|$, είτε η αντίσταση $|Z_s|$, ή και οι δύο μαζί, μεταβάλλονται με τον χρόνο. Επειδή η $|E|$ μεταβάλλεται πολύ λιγότερο, συγκριτικά με την $|Z_s|$, μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Για την $|Z_s|$, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.2.2, θεωρείται ότι $|Z_s| = X$. Με βάση όλα τα παραπάνω, η χρονικά μεταβαλλόμενη ενεργός τιμή του ρεύματος $|I|(t)$, οφείλεται στη μεταβολή με τον χρόνο της αντίδρασης $X(t)$. Η μεταβολή αυτή της αντίδρασης παρατίθεται στο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9: Μεταβολή της σύγχρονης αντίδρασης με τον χρόνο, με βηματική προσέγγιση

Η προσέγγιση της μεταβολής της αντίδρασης $X(t)$ πραγματοποιείται με βηματικό τρόπο, χωρίζοντας το διάστημα μεταβολής της σε τρία βήματα, οδηγώντας και σε αντίστοιχη προσέγγιση για τη μεταβολή του ρεύματος $|I|(t)$. Έτσι, διαμορφώνονται τρία διακριτά επίπεδα ρεύματος: $|I''|$ (υπομεταβατικό), $|I'|$ (μεταβατικό), $|I|$ (μόνιμης κατάστασης). Στις περισσότερες περιπτώσεις μηχανών, η υπομεταβατική περίοδος διαρκεί από 0 έως 0,1 sec και η μεταβατική από 0,1 έως 6 sec. Στη μόνιμη κατάσταση, από περίπου τα 6 sec και έπειτα, τα μεταβατικά φαινόμενα έχουν πλέον αποσβεστεί.

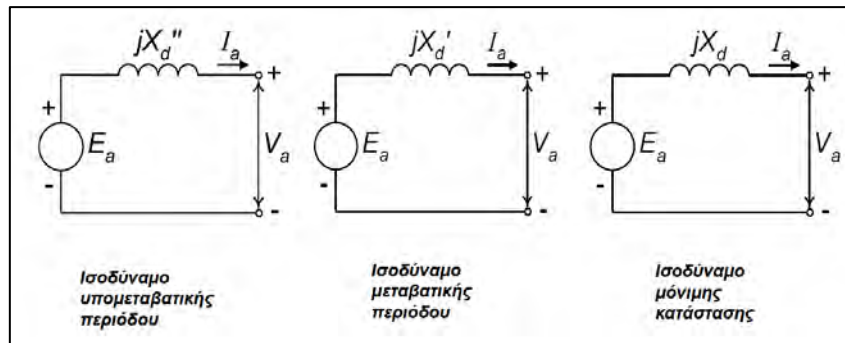
Οι τιμές της αντίδρασης για καθεμιά από αυτές τις περιόδους είναι:

- $X''_d = \frac{|E|}{|I''|}$, για την υπομεταβατική περίοδο (1.8)

- $X'_d = \frac{|E|}{|I'|}$, για τη μεταβατική περίοδο (1.9)

- $X_d = \frac{|E|}{|I|}$, για τη μόνιμη κατάσταση (1.10)

Οι τιμές των αντιδράσεων αυτών παρέχονται από τον κατασκευαστή της εκάστοτε μηχανής. Τα ανά φάση αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα παρατίθενται στο Σχήμα 1.10 και χρησιμοποιούνται για τη μελέτη καθεμίας από τις περιόδους μετά από ένα βραχυκύκλωμα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και φαίνεται και στο σχήμα, η τιμή της ΗΕΔ $|E|$ είναι η ίδια σε όλες τις περιόδους. [1, 2]

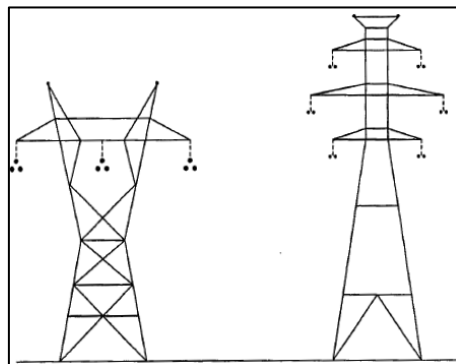


Σχήμα 1.10: Ανά φάση ισοδύναμα κυκλώματα μηχανής μετά από βραχυκύκλωμα

1.3 Γραμμές Μεταφοράς

1.3.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς είναι από τις σημαντικότερες συνιστώσες που συγκροτούν ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, έχοντας ως σκοπό τη μεταφορά, με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες, της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής, στα κέντρα κατανάλωσης, τα οποία συνήθως απέχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Οι αγωγοί των τριών φάσεων είναι αναρτημένοι σε μονωτήρες πάνω σε πύργους, οι οποίοι δύναται να είναι απλού ή διπλού κυκλώματος (Σχήμα 1.11). Μια γραμμή μεταφοράς περιλαμβάνει, επίσης, και αγωγούς προστασίας για την αντιμετώπιση τυχόν σφαλμάτων.



Σχήμα 1.11: Πύργοι γραμμών μεταφοράς απλού (αριστερά) και διπλού κυκλώματος (δεξιά)

Στην πλειονότητα των εναερίων γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιούνται αγωγοί κατασκευασμένοι από αλουμίνιο, υλικό που χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, πολύ καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και χαμηλό βάρος. Το χαμηλό κόστος και βάρος που τους χαρακτηρίζει, καθώς η μικρή ένταση ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται γύρω τους, ήταν οι λόγοι που οι αγωγοί αλουμινίου επικράτησαν των αντίστοιχων από χαλκό, που χρησιμοποιούνταν νωρίτερα. Υπάρχουν τέσσερεις κυριότεροι τύποι αγωγών αλουμινίου που

χρησιμοποιούνται ευρέως στις γραμμές μεταφοράς: εξ' ολοκλήρου από αλουμίνιο (AAC), εξ' ολοκλήρου από κράμα αλουμινίου (AAAC), ενισχυμένοι με χάλυβα (ACSR) και ενισχυμένοι με κράμα (ACAR). Κατά κανόνα χρησιμοποιούνται πολύκλωνοι αγωγοί, με τους κλώνους τους να περιελίσσονται ελικοειδώς σε αλληπάλληλες στρώσεις, παρουσιάζοντας έτσι ευκαμψία και αντοχή σε καταπονήσεις.

Μια γραμμή μεταφοράς χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές ηλεκτρικές παραμέτρους:

1. Την εν σειρά αντίσταση r (Ω/m)
2. Την εν σειρά επαγωγή L (H/m)
3. Την εγκάρσια χωρητικότητα C (F/m)

Από τις μονάδες των παραμέτρων αυτών, εξάγεται το συμπέρασμα ότι εξαρτώνται άμεσα από το μήκος της μελετώμενης γραμμής.

Η εν σειρά αντίσταση R ενός αγωγού από ομοιόμορφο υλικό και διατομή, που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, εκφράζεται από τη σχέση

$$R_{dc} = \rho * \frac{l}{A} \quad (1.11)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού σε $\Omega \text{ mm}^2/m$, l το μήκος σε m και A η διατομή του αγωγού σε mm^2 . Η ειδική αντίσταση του αγωγού εξαρτάται άμεσα από την εκάστοτε θερμοκρασία. Για το εναλλασσόμενο ρεύμα, η αντίσταση του αγωγού είναι αυξημένη κατά 3% με 5% λόγω της ανομοιομορφίας που παρουσιάζει στην κατανομή του στον αγωγό. Επιπλέον επαύξηση της αντίστασης σειράς, της τάξης του 1% με 2%, οφείλεται στους συνεστραμμένους αγωγούς των πολύκλωνων αγωγών, καθώς το μήκος των κλώνων είναι μεγαλύτερο από το μήκος του αγωγού.

Η εν σειρά επαγωγή L οφείλεται στην τάση που επάγεται στους αγωγούς λόγω της αλληλεπίδρασής τους με τα μαγνητικά πεδία που τους περιβάλλουν. Η εμφάνιση των μαγνητικών πεδίων οφείλεται στο γεγονός ότι, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από μεταβαλλόμενο ρεύμα, δημιουργείται εντός αυτού, αλλά και στον περιβάλλοντα χώρο, μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η εν σειρά επαγωγή και αντίσταση διαμορφώνουν την εν σειρά σύνθετη αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς, με την επαγωγή να κατέχει σημαντικότερο ρόλο, όσον αφορά την ικανότητα μεταφοράς της γραμμής, κυρίως λόγω της διαπίστωσης $\omega L \gg$

R. Ο υπολογισμός των επαγωγικών χαρακτηριστικών μιας γραμμής εξαρτάται από τη γεωμετρία της, καθώς απαιτείται ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής κάθε αγωγού της.

Τέλος, όσον αφορά την παράμετρο της εγκάρσιας χωρητικότητας C, αυτή οφείλεται στη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των αγωγών της γραμμής μεταφοράς, προκαλώντας τη φόρτισή τους, όπως συμβαίνει με τους σπλισμούς ενός πυκνωτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη ροή εγκάρσιου ρεύματος διαρροής μεταξύ των αγωγών, ρεύμα το οποίο προκαλεί πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, επηρεάζει την απόδοση και τον συντελεστή ισχύος της, έχοντας αντίκτυπο στην ευστάθεια του συστήματος που η γραμμή ανήκει. Η εγκάρσια χωρητικότητα εξαρτάται άμεσα από το μήκος της γραμμής, αλλά και από την απόσταση που έχουν οι αγωγοί της μεταξύ τους. Έτσι για μικρού μήκους γραμμές, μικρότερες δηλαδή των 80km, αυτή μπορεί να αγνοηθεί. Επειδή, για τη μελέτη των ΣΗΕ χρησιμοποιείται η ανά φάση ανάλυση, για μια γραμμή, υπολογίζεται η χωρητικότητα της φάσης ως προς τον ουδέτερο ή ως προς κάποιο άλλο σημείο με μηδενικό δυναμικό, που ορίζεται ως σημείο αναφοράς, μέσω της διαφοράς δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ τους. [1, 2]

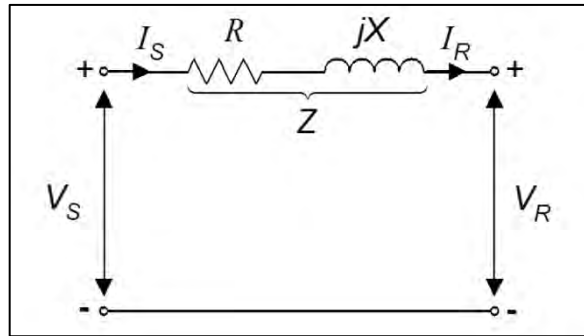
1.3.2 Ισοδύναμα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς

Για την ευκολότερη μελέτη και ανάλυση των ΣΗΕ, οι γραμμές μεταφοράς, όπως και οι υπόλοιπες συνιστώσες του, μοντελοποιούνται μέσω ισοδύναμων κυκλωμάτων. Θεωρώντας ότι παρουσιάζεται τριφασική συμμετρία, μια γραμμή δύναται να μελετηθεί ανά φάση και να παρασταθεί μέσω ενός μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος.

Βασικό κριτήριο για την επιλογή του κατάλληλου ισοδύναμου κυκλώματος μιας γραμμής, είναι το μήκος της, καθώς καθορίζει αν οι ηλεκτρικές παράμετροί της είναι κατανεμημένες σε όλο της το μήκος ή συγκεντρωμένες σε ένα σημείο, καθώς και το μέγεθος των απωλειών ρεύματος προς τη γη. Ταυτόχρονα, καθορίζει την αγνόηση, ενδεχομένως, κάποιων από τις παραμέτρους, που δεν είναι σημαντικές στην εκάστοτε περίπτωση. Έτσι, ανάλογα με το μήκος τους, οι γραμμές μεταφοράς χωρίζονται σε:

- Γραμμές μικρού μήκους (<80km)
- Γραμμές μεσαίου μήκους (80km – 250km)
- Γραμμές μεγάλου μήκους (>250km)

Στις γραμμές μικρού μήκους (Σχήμα 1.12), οι απώλειες ρεύματος είναι αμελητέες, επιτρέποντας έτσι την αγνόηση της εγκάρσιας χωρητικότητας, χωρίς αυτό να επηρεάζει την ακρίβεια των υπολογισμών. Μια τέτοια γραμμή παριστάνεται από την ανά φάση συνολική αντίσταση $R = r \cdot l$ και επαγωγή $X = j\omega lL$ σειράς, όπου l είναι το μήκος της γραμμής. Η αφετηρία της συμβολίζεται με S , ενώ η άφιξή της με R .

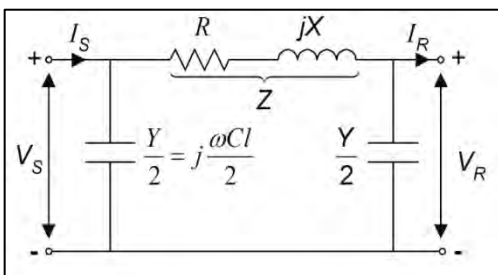


Σχήμα 1.12: Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μικρού μήκους

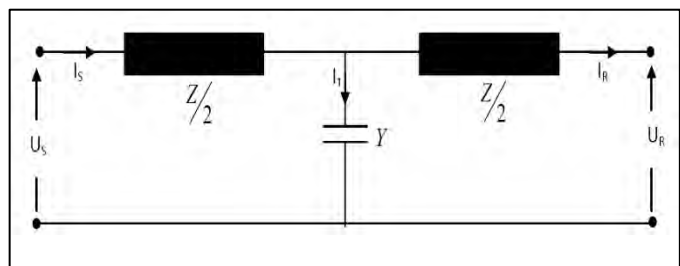
Η σχέση για τον υπολογισμό της τάσης V_S στην είσοδο της γραμμής, είναι:

$$V_S = V_R + IZ \quad (1.12)$$

Στις γραμμές μεσαίου μήκους, οι απώλειες ρεύματος είναι σημαντικές, και δε μπορεί να αγνοηθεί η επίδραση της εγκάρσιας χωρητικότητας. Ένας τρόπος αναπαράστασής τους είναι το π – ισοδύναμο κύκλωμα (Σχήμα 1.13), στο οποίο η χωρητική αγωγιμότητα της γραμμής $Y = j\omega Cl$ κατανέμεται σε δύο ίσα τμήματα, που τοποθετούνται στην αναχώρηση (S) και την άφιξη (R) της γραμμής. Στο τ – ισοδύναμο (Σχήμα 1.14), η αντίδραση $R+jX$ της γραμμής ισοκατανέμεται στα άκρα της, ενώ η χωρητικότητα είναι συγκεντρωμένη στο μέσο της.



Σχήμα 1.13: π – ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεσαίου μήκους



Σχήμα 1.14: τ – ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεσαίου μήκους

Για το π – ισοδύναμο, οι σχέσεις της τάσης (V_S) και του ρεύματος εισόδου (I_S), διαμορφώνονται:

$$V_S = \left(\frac{Z*Y}{2} + 1\right) V_R + I_R Z \quad (1.13)$$

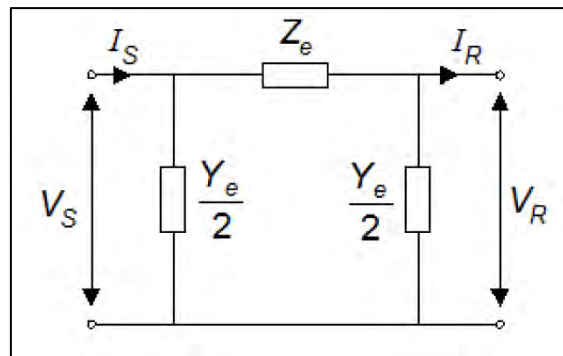
$$I_S = V_R Y \left(1 + \frac{Z*Y}{4}\right) + \left(1 + \frac{Z*Y}{2}\right) I_R \quad (1.14)$$

Αντίστοιχα, για το τ – ισοδύναμο:

$$V_S = \left(1 + \frac{Y*Z}{2}\right) V_R + \left(1 + \frac{Y*Z}{4}\right) Z I_R \quad (1.15)$$

$$I_S = Y V_R + \left(1 + \frac{Y*Z}{2}\right) I_R \quad (1.16)$$

Τέλος, οι παράμετροι των γραμμών μεγάλου μήκους δεν θεωρούνται συγκεντρωμένες σε ένα σημείο, όπως συμβαίνει στις αντίστοιχες μικρού και μεσαίου μήκους, αλλά είναι κατανεμημένες ομοιόμορφα σε όλο το μήκος της γραμμής. Ουσιαστικά, κάθε σημείο της παρουσιάζει αντίσταση, επαγωγική και χωρητική αντίδραση. Υπολογίζοντας τις ενεργές τιμές και τις φασικές γωνίες τάσης και ρεύματος σε κάθε σημείο της γραμμής, συναρτήσει της απόστασης τους από την άφιξη (R) της, δύναται να βρεθεί η κατάλληλη εν σειρά σύνθετη αντίσταση και η εγκάρσια αγωγιμότητα, για τη μοντελοποίηση της γραμμής μέσω ενός π – ισοδύναμου κυκλώματος (Σχήμα 1.15). [1, 2]



Σχήμα 1.15: π – ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεγάλου μήκους

1.3.3 Ικανότητα φόρτισης γραμμών μεταφοράς

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των γραμμών μεταφοράς, που είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση και τη μελέτη ενός ΣΗΕ, είναι η ικανότητα φόρτισής τους, δηλαδή το μέγιστο όριο της ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί από μια γραμμή. Για εναέριες γραμμές σχετικά μικρού μήκους, αλλά και σε υπόγεια καλώδια, το όριο αυτό καθορίζεται ως επί το πλείστο από τα θερμικά όρια των αγωγών της γραμμής. Η θερμική αντοχή

των αγωγών μιας γραμμής αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα, καθώς για τις μεν εναέριες γραμμές, υπέρβαση αυτού του ορίου μη αναστρέψιμο τέντωμα των αγωγών, για δε τα υπόγεια καλώδια ενδέχεται να προκαλέσει καταπόνηση της μόνωσής τους, με συνέπεια την καταστροφή τους, λόγω της περιορισμένης δυνατότητας απαγωγής της παραγόμενης θερμότητας. Για τις εναέριες γραμμές μεγάλου μήκους, το όριο φόρτισής τους καθορίζεται κυρίως από τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής, η οποία και επιβάλλει περιορισμούς στη μεταφερόμενη ισχύ, πολύ πριν η ισχύς πλησιάσει το όριο θερμικής αντοχής των αγωγών. Η μέγιστη μεταφερόμενη, από τη γραμμή, πραγματική ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη της επαγωγικής αντίδρασης X . Ο σχεδιασμός των γραμμών μεταφοράς γίνεται για λειτουργία υπό ορισμένο επίπεδο τάσης, το οποίο και καθορίζει το μέγεθος και τη γεωμετρία των αγωγών, την απόσταση μεταξύ των φάσεων, καθώς και την επιλογή της μόνωσης. [1]

1.4 Μετασηματιστές Ισχύος

1.4.1 Χαρακτηριστικά μετασηματιστών ισχύος

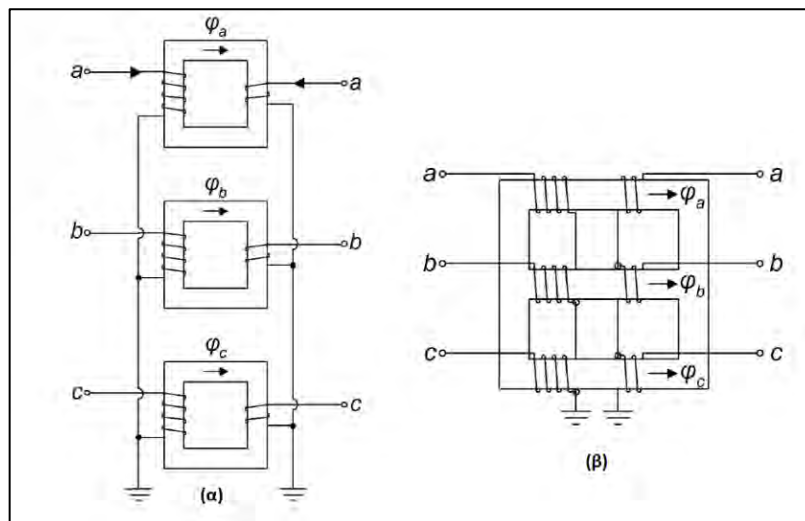
Όπως έγινε φανερό ήδη από την ενότητα 1.1, τα ΣΗΕ δεν λειτουργούν υπό ενιαίο επίπεδο τάσης. Στους σταθμούς παραγωγής, η τάση στους ακροδέκτες των γεννητριών κυμαίνεται μεταξύ 11kV με 25kV, στο σύστημα μεταφοράς χρησιμοποιούνται υψηλές τάσεις από 150kV μέχρι και 765kV, ενώ η διανομή πραγματοποιείται σε χαμηλότερα επίπεδα τάσεων. Οι μετασηματιστές ισχύος χρησιμοποιούνται προκειμένου να συνδέσουν τις επιμέρους συνιστώσες ενός ΣΗΕ, που λειτουργούν υπό διαφορετικά επίπεδα τάσεων, ανυψώνοντας ή υποβαθμίζοντας την τάση, ανάλογα με την περίπτωση.

Έτσι, ανάλογα με τη λειτουργία τους, οι μετασηματιστές ισχύος διακρίνονται σε:

- Μετασηματιστές γεννήτριας, που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης της γεννήτριας στα επίπεδα του συστήματος μεταφοράς, π.χ. από τα 20kV στα 150kV ή τα 400kV.
- Μετασηματιστές μεταφοράς, για την εναλλαγή μεταξύ των διαφόρων επιπέδων υψηλής τάσης που χρησιμοποιεί το σύστημα μεταφοράς. Η ισχύς τους, όπως και των μετασηματιστών γεννήτριας, κυμαίνεται από μερικές δεκάδες MVA μέχρι και πάνω από 1000MVA.

- Μετασχηματιστές διανομής, για τον υποβιβασμό της τάσης στα επίπεδα που τροφοδοτούνται οι καταναλωτές, π.χ. στα 20kV της μέσης τάσης ή στα 400V της χαμηλής τάσης. Η ισχύς τους είναι της τάξεως των μερικών kVA.

Οι πολύ μεγάλης ισχύος τριφασικοί μετασχηματιστές συγκροτούνται, συνήθως, από τρεις ξεχωριστούς μονοφασικούς μετασχηματιστές (Σχήμα 1.16α), ενώ οι μικρότερης ισχύος από μια ολοκληρωμένη τριφασική κατασκευή με ενιαίο πυρήνα και για τις τρεις φάσεις (Σχήμα 1.16β). Η πρώτη διάταξη παρουσιάζει πλεονεκτήματα όσον αφορά την ευκολότερη μεταφορά και την ευκολία στην επισκευή, ενώ η δεύτερη παρουσιάζει μεν λιγότερες απώλειες, από την άλλη δε σε περίπτωση σφάλματος απαιτείται η αντικατάσταση ολόκληρου του μετασχηματιστή.



Σχήμα 1.16: διατάξεις τριφασικών μετασχηματιστών

(α): συγκρότηση από τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές

(β): τριφασικός μετασχηματιστής ενιαίου πυρήνα

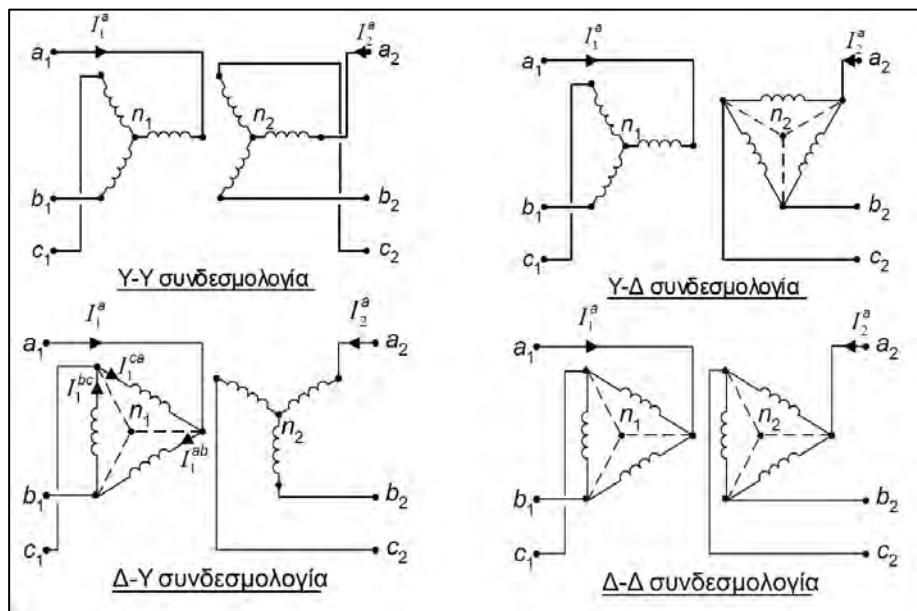
Ανάλογα με τη λειτουργία που πρόκειται να επιτελέσει ένας τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος, τα τυλίγματα του δύνανται να συνδεθούν με τέσσερις δυνατές συνδεσμολογίες: Υ – Υ (αστέρας – αστέρας), Υ – Δ (αστέρας – τρίγωνο), Δ – Υ (τρίγωνο – αστέρας), Δ – Δ (τρίγωνο – τρίγωνο) (Σχήμα 1.17), με καθεμιά να έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Οι μετασχηματιστές γεννήτριας συνδέονται συνήθως με τη συνδεσμολογία Δ – Υ, με τον ουδέτερο γειωμένο. Το τύλιγμα χαμηλής τάσης, συνδεδεμένο σε Δ, αποτελεί διέξοδο για τα ρεύματα που προκαλούνται από ασύμμετρη φόρτιση του μετασχηματιστή. Γεννήτριες μεγάλης ισχύος, από 200 – 500 MW και άνω, έχουν η καθεμιά τον δικό της

μετασχηματιστή ανύψωσης, συγκροτημένο από τρεις μονοφασικούς, ενώ σε σταθμούς παραγωγής με γεννήτριες μικρότερης ισχύος, δύο γεννήτριες δύνανται να είναι σε συνδεδεμένες σε κοινό μετασχηματιστή ανύψωσης, συνήθως ενιαίου πυρήνα.

Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στο σύστημα μεταφοράς είναι συνήθως συνδεδεμένοι κατά Υ-Υ, με γειωμένους ουδετέρους. Συχνά, τοποθετείται και ένα τύλιγμα Δ χαμηλότερης ισχύος, γνωστό και ως τριτεύον τύλιγμα, το οποίο αποτελεί δίοδο για την απαγωγή ρευμάτων που προκαλούνται από ασύμμετρη φόρτιση του τυλίγματος της υψηλής τάσης.

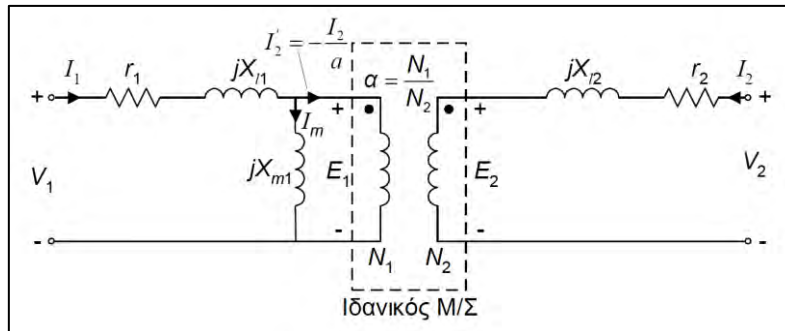
Τέλος, οι μετασχηματιστές διανομής συνδέονται συνήθως κατά Υ-Δ, με το τύλιγμα Δ στη χαμηλότερη τάση, ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ασυμμετρίας στην τροφοδότηση των φορτίων. [1, 2]



Σχήμα 1.17: συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών

1.4.2 Ισοδύναμα κυκλώματα μετασχηματιστών

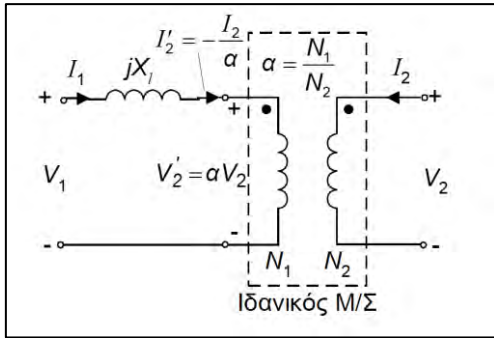
Όπως είναι γνωστό, η διάταξη του μετασχηματιστή αξιοποιεί το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, που περιέγραψε ο Faraday, για την ανύψωση ή τον υποβιβασμό της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του πρωτεύοντος τυλιγματος. Για έναν μονοφασικό μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων, το βασικό ισοδύναμο κύκλωμα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, είναι το ακόλουθο:



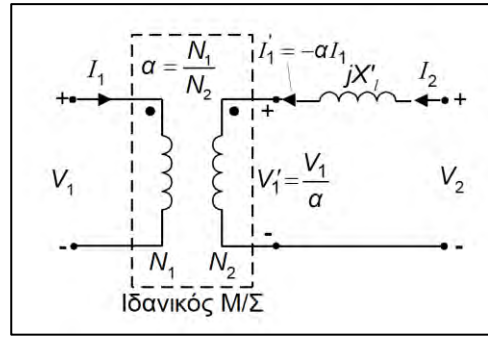
Σχήμα 1.18: ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού μετασχηματιστή

όπου r_1 και r_2 οι αντιστάσεις τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα, X_{r1} και X_{r2} οι αντιδράσεις σκέδασης πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα και X_{m1} η αντίδραση μαγνήτισης αναφερόμενη στο πρωτεύον τύλιγμα.

Για τους μετασχηματιστές ισχύος που χρησιμοποιούνται στα ΣΗΕ, το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα δύναται να απλοποιηθεί περαιτέρω. Καθότι συγκριτικά πολύ μικρότερο σε σχέση με το ρεύμα φορτίου, το ρεύμα μαγνήτισης I_m μπορεί να αγνοηθεί, με αποτέλεσμα και την αγνόηση του εγκάρσιου κλάδου. Είναι, επίσης, δυνατόν να αμεληθούν οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων, καθώς είναι πολύ μικρότερες από τις αντιδράσεις σκέδασης ($r_1 \ll X_{r1}$ και $r_2 \ll X_{r2}$). Έτσι, προκύπτουν τα απλοποιημένα ισοδύναμα κυκλώματα, αναφερόμενα στο πρωτεύον (Σχήμα 1.19) και στο δευτερεύον (Σχήμα 1.20).



Σχήμα 1.19: απλοποιημένο κύκλωμα μετασχηματιστή αναφερόμενο στο πρωτεύον



Σχήμα 1.20: απλοποιημένο κύκλωμα μετασχηματιστή αναφερόμενο στο δευτερεύον

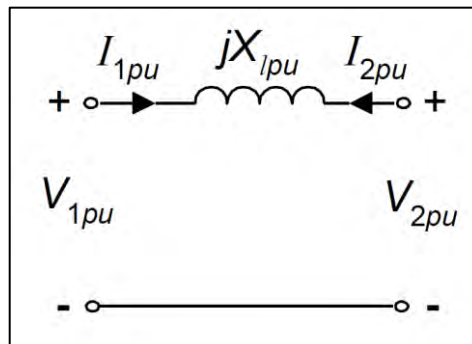
Η συνολική αντίδραση σκέδασης, αναφερόμενη στο πρωτεύον τύλιγμα, διαμορφώνεται ως:

$$X_l = X_{l1} + a^2 X_{l2} \quad (1.17)$$

ενώ για το δευτερεύον:

$$X_l' = X_l/a^2 = X_{l1}/a^2 + X_{l2} \quad (1.18)$$

Όταν γίνεται χρήση του ανά μονάδα συστήματος (per unit, PU) για τη μελέτη ενός ΣΗΕ, όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, χρησιμοποιείται το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα:



Σχήμα 1.21: ανά μονάδα ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

Με αυτή την επιλογή $X_{lpu} = X_{lpu}'$, δηλαδή η ανά μονάδα τιμή της αντίδρασης σκέδασης του είναι η ίδια ανεξαρτήτως της πλευράς του μετασχηματιστή που αυτή είναι ανηγμένη. [1,2]

1.4.3 Μετασχηματιστές ως συσκευές ελέγχου

Ο βασικός ρόλος των μετασχηματιστών ισχύος σε ένα ΣΗΕ είναι η ανύψωση ή ο υποβιβασμός της τάσης, ανάμεσα στα διάφορα επίπεδα του συστήματος, από τους σταθμούς

παραγωγής μέχρι τον τελικό καταναλωτή. Μετασχηματιστές, όμως, δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές ελέγχου σε άλλες εφαρμογές ενός ΣΗΕ, όπως ο έλεγχος της τάσης και της ροής ισχύος. Τέτοιοι είναι οι:

- Μετασχηματιστές με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού
- Μετασχηματιστές ρύθμισης μέτρου ή/και φασικής γωνίας τάσης

Οι μετασχηματιστές με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού διατηρούν την τάση στο δευτερεύον τύλιγμά τους σταθερή και ανεξάρτητη τυχόν διακυμάνσεων της μεταφοράς, καθώς είναι εφοδιασμένοι με λήψεις, επιτρέποντας έτσι τη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού υπό φορτίο. Η μεταβολή αυτή πραγματοποιείται συνήθως μέσω κινητήρων, που λαμβάνουν εντολές από ειδικούς ανιχνευτές του επιπέδου τάσης, οι οποίοι προσθέτουν ή αφαιρούν σπείρες στο πρωτεύον τύλιγμα. Η τάση του δευτερεύοντος συγκρίνεται, δηλαδή, με μια επιθυμητή τιμή αναφοράς και αναλόγως δίνεται η κατάλληλη εντολή για τη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού. Τέτοιοι μετασχηματιστές, χρησιμοποιούνται στους υποσταθμούς υποβιβασμού από την υψηλή στη μέση τάση του δικτύου διανομής, με τις μεταβλητές λήψεις στο τύλιγμα υψηλής τάσης, καθώς η τάση του δευτερεύοντος πρέπει να παραμένει εντός ενός συγκεκριμένου εύρους τιμών εκατέρωθεν της ονομαστικής.

Οι μετασχηματιστές ρύθμισης της τάσης χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στο επίπεδο μεταφοράς, για τη μεταβολή, συνήθως κατά μικρά ΔV , της τάσης σε κάποιο σημείο του συστήματος. Η μεταβολή αυτή δύναται να ελεγχθεί και ως προς το μέτρο και ως προς τη φασική γωνία της τάσης. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η ροή ισχύος μιας γραμμής, στην οποία παρεμβάλλεται ένας τέτοιος μετασχηματιστής. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της μεταβολής του μέτρου της τάσης ελέγχεται η ροή της αέργου ισχύος, καθώς αυτή ρέει από τον ζυγό υψηλότερης τάσης προς αυτόν της χαμηλότερης, ενώ μέσω της φασικής γωνίας ελέγχεται η ροή της πραγματικής ισχύος, η οποία ρέει από τον ζυγό με τη μεγαλύτερη φασική γωνία προς αυτόν με τη μικρότερη. [1, 2]

1.5 Φορτία

Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό απ' όλα τα παραπάνω, η όλη οργάνωση και διάρθρωση ενός ΣΗΕ γίνεται με κριτήριο την ομαλή και ποιοτική τροφοδότηση των φορτίων των καταναλωτών.

Έστω ότι ένα φορτίο τροφοδοτείται υπό τάση $V\angle\varphi_V$ και ρεύμα $I\angle\varphi_I$. Ως μιγαδική ισχύς $S = VI^*$, με μονάδα τα VA, ορίζεται η ισχύς που καταναλώνει ένα φορτίο. Αναλύοντας περαιτέρω την προηγούμενη σχέση, προκύπτει:

$$S = VI^* = V\angle\varphi_V * I\angle-\varphi_I = VI\angle(\varphi_V - \varphi_I) = VI\angle\varphi = |S|\angle\varphi \quad (1.19)$$

όπου φ η γωνία που η τάση προηγείται του ρεύματος και $|S|$ η φαινόμενη ισχύς σε VA.

Συνεχίζοντας,

$$S = VI \cos \varphi + VI \sin \varphi = P + jQ \quad (1.20)$$

Από την παραπάνω σχέση, η πραγματική ισχύς P (Watt) που καταναλώνει το φορτίο, ορίζεται ως:

$$P = VI \cos \varphi = |S| \cos \varphi \quad (1.21)$$

και η άεργος Q (VAR):

$$Q = VI \sin \varphi = |S| \sin \varphi \quad (1.22)$$

Ο συντελεστής ισχύος (power factor – pf) ενός φορτίου ορίζεται ως το συνημίτονο της γωνίας φ :

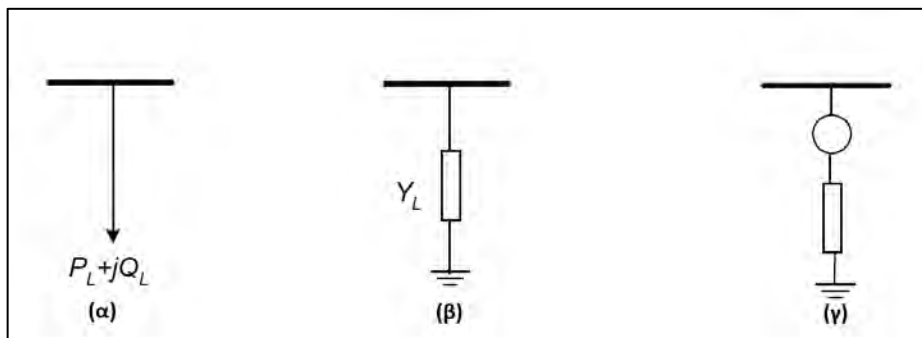
$$pf = \cos \varphi \quad (1.23)$$

και εξαρτάται από το είδος του φορτίου και η τιμή του να κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Χαρακτηρίζεται «επαγωγικός» όταν το ρεύμα του φορτίου έπεται της τάσης, δηλαδή η γωνία φ είναι θετική ($\varphi_V > \varphi_I$), ή «χωρητικός» όταν το ρεύμα προηγείται της τάσης, με τη γωνία φ να είναι αρνητική ($\varphi_I > \varphi_V$). Σε ένα ωμικό φορτίο, V και I είναι συμφασικά ($\varphi = 0$), με συνέπεια ο συντελεστής ισχύος να ισούται με τη μονάδα ($pf = 1$). Ένα επαγωγικό φορτίο απορροφά θετική άεργο ισχύ Q , ενώ ένα χωρητικό αρνητική, ή όπως αναφέρεται διαφορετικά, το επαγωγικό καταναλώνει και το χωρητικό παράγει άεργο ισχύ.

Τέλος, η παράσταση των φορτίων ενός ΣΗΕ εξαρτάται από το είδος της μελέτης που επιτελείται. Στις μελέτες ροής φορτίου παριστάνονται ως η πραγματική (P_L) και η άεργος ισχύς (Q_L) που απορροφούν (Σχήμα 1.22α), ενώ στις μελέτες βραχυκυκλωμάτων και ευστάθειας ως μια σύνθετη αγωγιμότητα μεταξύ του ζυγού που είναι συνδεδεμένα και της γης (Σχήμα 1.22β). Αν $|V|$ το μέτρο της τάσης του ζυγού, η αγωγιμότητα αυτή υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Y_L = \frac{S_L^*}{|V|^2} = \frac{P_L - jQ_L}{|V|^2} \quad (1.24)$$

Στην περίπτωση, δε, που το φορτίο είναι μια περιστρεφόμενη μηχανή, στις μελέτες βραχυκυκλωμάτων και ευστάθειας, παριστάνεται ως μια πηγή τάσης σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση (Σχήμα 1.22γ). [1, 2]



Σχήμα 1.22: Μοντέλα για την παράσταση φορτίων

1.6 Ανά Μονάδα σύστημα (Per Unit – PU)

Κατά τη μελέτη των ΣΗΕ, είναι αρκετά πιο βολικό οι διάφορες ηλεκτρικές ποσότητες που το χαρακτηρίζουν, όπως τάσεις, ρεύματα, αντιστάσεις και ισχύες, να εκφράζονται όχι απευθείας στις αντίστοιχες μονάδες τους, αλλά σε ανά μονάδα (per unit) τιμές, δηλαδή υπό κλίμακα. Αυτή η μέθοδος υπολογισμών ονομάζεται ανά μονάδα σύστημα και καθιερώθηκε για την απλοποίηση των πράξεων. Έτσι, η τιμή ενός μεγέθους σε pu μπορεί να οριστεί ως:

$$per\ unit = \frac{\text{πραγματική τιμή}}{\text{τιμή βάσης}} \quad (1.25)$$

και αφορά μόνο το μέτρο του αντίστοιχου μεγέθους, όχι τη γωνία. Δίδεται ως δεκαδικός αριθμός ή σε % ποσοστό.

Οι ποσότητες που επιλέγονται ως βάση είναι η ισχύς $|S_B|$, η τάση $|V_B|$, το ρεύμα $|I_B|$ και η αντίσταση $|Z_B|$. Από αυτές, καθορίζονται δύο, με τις υπόλοιπες δύο να υπολογίζονται συναρτήσει αυτών. Συνήθως, ορίζονται αρχικά η βάση της ισχύος S_B και η βάση της τάσης V_B . Οι γνωστές σχέσεις της ανάλυσης κυκλωμάτων, όπως οι νόμοι του Kirchhoff και Ohm, αλλά και το θεώρημα Thevenin, ισχύουν και κατά την pu ανάλυση ενός ΣΗΕ.

Σε ένα τριφασικό σύστημα είναι σύνηθες οι τιμές της τάσης να δίνονται σε πολικές τιμές και της ισχύος σε τριφασικές. Χρησιμοποιώντας ως βάση τάσης $|V_B|_{3\phi}$ μια πολική τιμή σε kV και ως βάση ισχύος $|S_B|_{3\phi}$ μια τριφασική τιμή σε MVA, οι βάσεις ρεύματος και αντίστασης προκύπτουν ως ακολούθως:

$$|I_B|_{3\phi} = \frac{|S_B|_{3\phi}}{\sqrt{3}|V_B|_{3\phi}} \quad (1.26)$$

$$|Z_B|_{3\phi} = \frac{|V_B|_{3\phi}^2}{|S_B|_{3\phi}} \Omega \quad (1.27)$$

Η βάση ισχύος $|S_B|_{3\phi}$ ορίζεται η ίδια για όλο το μελετώμενο σύστημα. Η μετατροπή των σύνθετων αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς σε pu τιμές, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την κατάλληλη βάση αντίστασης για το τμήμα του συστήματος που βρίσκεται η γραμμή.

Για τμήματα του συστήματος που συνδέονται μεταξύ τους μέσω μετασχηματιστή, ο λόγος των ονομαστικών πολικών τάσεων των δύο τυλιγμάτων του, ισούται με τον λόγο των βάσεων τάσης των δύο τμημάτων που αυτός συνδέει. Έτσι, η pu τιμή της αντίστασης ενός μετασχηματιστή είναι η ίδια, είτε υπολογίζεται στο πρωτεύον, είτε στο δευτερεύον τυλιγμα. Με αυτόν τον τρόπο, εξαλείφεται η τμηματικοποίηση του συστήματος, που δημιουργούν οι μετασχηματιστές.

Συνεχίζοντας, τα δεδομένα των σύνθετων αντιστάσεων γεννητριών και μετασχηματιστών δίνονται, κυρίως, από τους κατασκευαστές σε pu τιμές, λαμβάνοντας ως βάσεις την ονομαστική τους ισχύ και τάση. Σε περίπτωση που οι αντίστοιχες βάσεις της περιοχής του δικτύου, που βρίσκεται η γεννήτρια ή ο μετασχηματιστής, διαφέρουν από τις αντίστοιχες ονομαστικές, τότε οι ανά μονάδα τιμές των σύνθετων αντιστάσεών τους θα πρέπει να αναπροσαρμοστούν στις νέες βάσεις. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται με την παρακάτω σχέση:

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{|V_B^{old}|^2}{|V_B^{new}|^2} \frac{|S_B^{new}|}{|S_B^{old}|} \quad (1.28)$$

όπου old και new οι παλιές (ονομαστικές) και οι καινούργιες (επιλεγείσες) βάσεις αντίστοιχα.

Τέλος, αποδεικνύεται ότι οι ανά μονάδα τιμές πολικής και της αντίστοιχης φασικής τάσης, αλλά και της τριφασικής και της αντίστοιχης μονοφασικής ισχύος, είναι ίδιες. Έτσι, αξιοποιώντας την τριφασική συμμετρία, κάνοντας χρήση των παραπάνω σχέσεων, υπολογίζονται οι τιμές των μονοφασικών ισοδυνάμων των στοιχείων, επιτρέποντας έτσι την κατάστροψη του ανά μονάδα μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος του μελετώμενου συστήματος. Το κύκλωμα αυτό μπορεί να επιλυθεί πολύ εύκολα, χρησιμοποιώντας τις παραδοσιακές μεθόδους ανάλυσης κυκλωμάτων, μετατρέποντας στη συνέχεια τα αποτελέσματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, στις αντίστοιχες πραγματικές τιμές τους, μέσω της σχέσης ορισμού του ανά μονάδα συστήματος. [1, 2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση ροής φορτίου αποτελεί τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, υπό συγκεκριμένη φόρτιση, στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση λειτουργίας του. Μέσω της ανάλυσης αυτής, καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός των τάσεων όλων των ζυγών του συστήματος, καθώς και των ροών ισχύος σε όλες τις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές. Η συμβολή της, στην ανάλυση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, είναι καθοριστική, καθώς αποτελεί τη βάση για την εύρεση της βέλτιστης λειτουργίας του εκάστοτε μελετώμενου συστήματος.

Η ανάλυση ροής φορτίου είναι απαραίτητη για τη μελέτη των μεταβολών ή των μελλοντικών επεκτάσεων ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως:

- Ανάπτυξη/τοποθέτηση νέων μονάδων παραγωγής
- Τροφοδοσία νέων φορτίων
- Αναβάθμιση ή τοποθέτηση νέων γραμμών μεταφοράς
- Διασύνδεση με άλλα δίκτυα

καθώς, πριν την υλοποίηση των προαναφερθεισών αλλαγών, πρέπει να μελετηθούν οι επιπτώσεις που αυτές θα έχουν στη λειτουργία του υπάρχοντος συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, συγκρίνονται, ως προς την αποτελεσματικότητά τους, οι διάφορες λύσεις αναβάθμισης που προτείνονται, ούτως ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη για το σύστημα. Η ανάλυση ροής φορτίου χρησιμοποιείται, επίσης, για την εκτίμηση της ομαλής λειτουργίας ενός συστήματος, όταν τεθούν εκτός μία ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς, για τον προσδιορισμό των επιδράσεων 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.

Για τη δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου ανάλυσης ροής φορτίου, είναι απαραίτητη η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος, μέσω εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές είναι κατάλληλα διαμορφωμένες για κάθε ζυγό του συστήματος και χαρακτηρίζονται από απουσία γραμμικότητας, γεγονός που απαιτεί κατάλληλη επαναληπτική αριθμητική

μέθοδο για την επίλυσή τους. Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι η Gauss – Seidel και η Newton – Raphson, η καθεμιά με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Τέλος, ανεξάρτητα από τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση των εξισώσεων του δικτύου, επιβάλλεται:

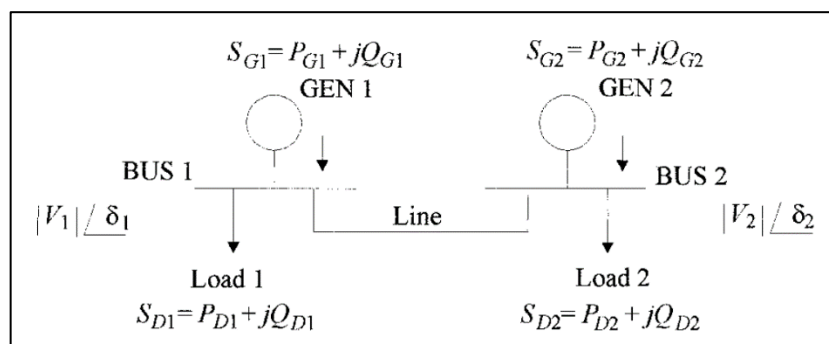
- Οι τάσεις των ζυγών να παραμένουν εντός των επιτρεπόμενων ορίων (ανοχή $\pm 5\%$, δηλαδή από 0,95pu έως 1,05pu).
- Η συχνότητα f του συστήματος να είναι ίση με την ονομαστική (με πολύ μικρές αποκλίσεις βάσει οδηγιών).
- Η φόρτιση γραμμών, μετασχηματιστών και γεννητριών να μην υπερβαίνει τα επιτρεπόμενα όρια.
- Να μη γίνεται υπέρβαση των ορίων λήψης των μετασχηματιστών ελέγχου.

Είναι σημαντικό, οι παραπάνω περιορισμοί είναι απαραίτητο να τηρούνται, όχι μόνο κάτω από συνθήκες μέγιστου φορτίου, αλλά και κατά τη διάρκεια αιφνίδιων μεταβολών της κατάστασης του συστήματος. [2, 4]

2.2 Εξισώσεις ροής φορτίου

2.2.1 Κατάστρωση εξισώσεων ροής φορτίου

Για την απλοποίηση της διαδικασίας κατάστρωσης των εξισώσεων ροής φορτίου, θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα του Σχήματος 2.1, που αποτελείται από δύο ζυγούς, που έχουν παραγωγή και κατανάλωση ισχύος, ενωμένους με μια γραμμή μεταφοράς.

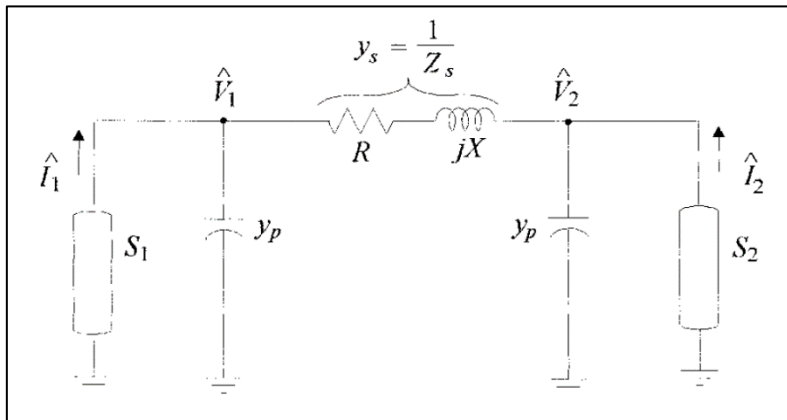


Σχήμα 2.1: Σύστημα δύο ζυγών

Κάθε ζυγός χαρακτηρίζεται από έξι μεγέθη:

- P_D : κατανάλωση πραγματικής ισχύος
- P_G : παραγωγή πραγματικής ισχύος
- Q_D : κατανάλωση άεργου ισχύος
- Q_G : παραγωγή άεργου ισχύος
- $|V|$: μέτρο τάσης
- δ : γωνία τάσης

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.2, γεννήτριες και φορτία έχουν αντικατασταθεί από την ισχύ του αντίστοιχου ζυγού (S_i), η οποία είναι η διαφορά της ισχύος του φορτίου από την παρεχόμενη ισχύ της γεννήτριας. Για τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιείται το π – ισοδύναμο, με τα μεγέθη της να εκφράζονται μέσω των αγωγιμοτήτων τους (Y).



Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο κύκλωμα δύο ζυγών, για τη μελέτη ροής φορτίου

Η ισχύς του ζυγού 1 και 2 ορίζεται αντίστοιχα:

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (2.1)$$

$$S_2 = S_{G2} - S_{D2} = (P_{G2} - P_{D2}) + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \quad (2.2)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα ρεύμα που σημειώνονται στο Σχήμα 2.2. Όλες οι ποσότητες εκφράζονται σε ανά μονάδα τιμές (pu).

$$S_1 = V_1 I_1^* \Rightarrow I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = V_1 Y_P + (V_1 - V_2) Y_S$$

$$\Rightarrow I_1 = (Y_P + Y_S) V_1 - Y_S V_2 \quad (2.3)$$

$$S_2 = V_2 I_2^* \Rightarrow I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = V_2 Y_P + (V_2 - V_1) Y_S$$

$$\Rightarrow I_2 = -Y_S V_1 + (Y_P + Y_S) V_2 \quad (2.4)$$

Έστω:

$$Y_{11} = Y_P + Y_S \quad Y_{12} = -Y_S$$

$$Y_{22} = Y_P + Y_S \quad Y_{21} = -Y_S$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στις Σχέσεις 2.3 και 2.4 προκύπτει:

$$I_1 = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 \quad (2.5)$$

$$I_2 = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \Rightarrow I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (2.7)$$

Ο πίνακας Y_{bus} ονομάζεται πίνακας αγωγιμοτήτων. Τα διαγώνια στοιχεία του αντιστοιχούν στο άθροισμα των αγωγιμοτήτων που καταλήγουν στον αντίστοιχο κόμβο, ενώ τα μη διαγώνια είναι το αντίθετο της αγωγιμότητας που βρίσκεται μεταξύ των κόμβων i και j του συστήματος.

Συνεχίζοντας, οι Σχέσεις 2.5 και 2.6, μπορούν να εκφραστούν και ως:

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 \quad (2.8)$$

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 \quad (2.9)$$

Έτσι, λύνοντας ως προς S_1^* και S_2^* τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτουν οι εξισώσεις ροής φορτίου του συστήματος του Σχήματος 2.1:

$$S_1^* = P_1 - jQ_1 = Y_{11} V_1 V_1^* + Y_{12} V_2 V_1^* \quad (2.10)$$

$$S_2^* = P_2 - jQ_2 = Y_{21} V_1 V_2^* + Y_{22} V_2 V_2^* \quad (2.11)$$

Το παραπάνω παράδειγμα των δύο ζυγών μπορεί πολύ εύκολα να επεκταθεί και για μεγαλύτερα συστήματα.

Η Σχέση 2.10, για ένα σύστημα n ζυγών, διαμορφώνεται:

$$P_1 - jQ_1 = V_1^* I_1 = V_1^* \sum_{k=1}^n Y_{1k} V_k \quad (2.12)$$

Έτσι, για έναν οποιοδήποτε ζυγό i του συστήματος, προκύπτει:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

Όπου $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ και $Y_{ik} = |Y_{ik}| \angle \gamma_{ik}$

$$\Rightarrow P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| |Y_{ik}| e^{j(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik})} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

Εξισώνοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη στη Σχέση 2.14, προκύπτουν οι γενικές εξισώσεις ροής φορτίου για ένα σύστημα n ζυγών [2, 4]:

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

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

2.2.2 Χαρακτηριστικά εξισώσεων ροής φορτίου

Οι εξισώσεις ροής φορτίου παρουσιάζουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Είναι μη γραμμικές
2. Η ισορροπία πραγματικής ισχύος εκφράζεται από την άθροιση των εξισώσεων της Σχέσης 2.15. Έτσι, για το σύστημα των δύο ζυγών προκύπτει:

$$P_1 + P_2 = f_{1p} + f_{2p} \Rightarrow$$

$$P_{G1} + P_{G2} = P_{D1} + P_{D2} + f_{1p} + f_{2p} = P_{D1} + P_{D2} + P_L \quad (2.17)$$

Δηλαδή, η παραγόμενη πραγματική ισχύς πρέπει να εξισορροπεί τη ζήτηση του συστήματος P_D , καθώς και τις απώλειες P_L , οι οποίες είναι το άθροισμα f_{1p} και f_{2p} .

3. Η ισορροπία άεργου ισχύος εκφράζεται από την άθροιση των εξισώσεων της σχέσης 2.16. Έτσι, για το σύστημα των δύο ζυγών:

$$Q_1 + Q_2 = f_{1q} + f_{2q} \Rightarrow$$

$$Q_{G1} + Q_{G2} = Q_{D1} + Q_{D2} + f_{1q} + f_{2q} = Q_{D1} + Q_{D2} + Q_L \quad (2.18)$$

Οι απώλειες Q_L είναι η διαφορά της άεργου ισχύος που παράγεται στις εγκάρσιες χωρητικότητες της γραμμής, από την άεργο ισχύ που καταναλώνεται στην εν σειρά επαγωγική αντίδρασή της.

4. Οι ποσότητες f_{ip} και f_{iq} εξαρτώνται μόνο από τις τιμές των διανυσμάτων των τάσεων. Η ίδια εξάρτηση υφίσταται και για τις απώλειες.

$$P_L = P_L(|V_1|, |V_2|, \dots, |V_n|, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \quad (2.19)$$

$$Q_L = Q_L(|V_1|, |V_2|, \dots, |V_n|, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \quad (2.20)$$

5. Συνήθως, οι φασικές γωνίες δ_1 και δ_2 εμφανίζονται ως διαφορά $\delta_1 - \delta_2$. [2, 4]

2.2.3 Κατάταξη μεταβλητών συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της ενότητας 2.2.1, κάθε ζυγός χαρακτηρίζεται από έξι μεταβλητές: P_{Gi} , Q_{Gi} , P_{Di} , Q_{Di} , $|V_i|$, δ_i . Έτσι, θεωρώντας ένα σύστημα n ζυγών, θα υπάρχουν $6n$ μεταβλητές. Οι μεταβλητές αυτές μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Μη ελέγξιμες μεταβλητές ή μεταβλητές διαταραχής: Είναι οι μεταβλητές που δεν δύναται να ελεγχθούν, δηλαδή οι πραγματικές και άεργες καταναλώσεις των φορτίων (P_{Di} , Q_{Di}).
- Μεταβλητές ελέγχου ή Ανεξάρτητες: Είναι οι μεταβλητές που υπάρχει η δυνατότητα να ελεγχθούν. Αυτές είναι η παραγωγή πραγματικής και άεργου ισχύος (P_{Gi} , Q_{Gi}).
- Μεταβλητές κατάστασης ή Εξαρτημένες: Είναι οι μεταβλητές που επηρεάζονται από τη μεταβολή των μεταβλητών ελέγχου P_{Gi} και Q_{Gi} . Αυτές είναι τα μέτρα των τάσεων $|V_i|$ και οι φασικές γωνίες δ_i , που ελέγχονται από το Q_{Gi} και P_{Gi} αντίστοιχα. [2, 4]

2.3 Επίλυση εξισώσεων ροής φορτίου

Έστω ένα σύστημα n ζυγών. Έτσι, εφόσον κάθε ζυγός χαρακτηρίζεται από έξι μεταβλητές, αυτές θα είναι συνολικά $6n$. Από τις Σχέσεις ροής φορτίου 2.15 και 2.16, προκύπτει ότι θα υπάρχουν $2n$ εξισώσεις που θα πρέπει να επιλυθούν. Επειδή, στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να υπάρξει λύση, $4n$ μεταβλητές πρέπει να προκαθοριστούν. Ανάλογα με το είδος του ζυγού, οι προκαθορισμένες και οι άγνωστες μεταβλητές συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση μεταβλητών συστήματος ανάλογα με το είδος του ζυγού

Τύπος Ζυγού	Προκαθορισμένες Μεταβλητές	Άγνωστες Μεταβλητές
Αναφοράς	$ V , \delta, P_D, Q_D$	P_G, Q_G
Ελέγχου Τάσεως	$ V , P_G, P_D, Q_D$	δ, Q_G
Φορτίου	P_G, Q_D, P_D, Q_D	$ V , \delta$

Το 80% έως 90% των ζυγών ενός συστήματος ανήκουν στην κατηγορία των ζυγών φορτίου. Το υπόλοιπο είναι ζυγοί ελέγχου τάσεως και ένας είναι ο ζυγός αναφοράς. Η τάση του ζυγού αναφοράς ορίζεται $V = 1 \angle 0^\circ$. Οι γεννήτριες συνδέονται συνήθως στους ζυγούς ελέγχου τάσεως, γι' αυτό συχνά ονομάζονται και ζυγοί παραγωγής.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της αριθμητικής μεθόδου, είναι απαραίτητο να γίνει μια αρχική εκτίμηση των άγνωστων μεταβλητών τάσης και γωνία δ . Συνήθως αυτό πραγματοποιείται μέσω flat start, όπου όλες οι τάσεις τίθεται ίσες με $1 \angle 0^\circ$.

Οι πιο δημοφιλείς αριθμητικές μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου, είναι η Gauss – Seidel και η Newton – Raphson. Οι μέθοδοι αυτές θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Μετά την ολοκλήρωση της αριθμητικής μεθόδου, απαιτούνται επιπλέον ο υπολογισμός της παραγόμενης πραγματικής και άεργου ισχύος στο ζυγό αναφοράς, μέσω των Σχέσεων 2.15 και 2.16, καθώς και ο υπολογισμός της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς.

Για τον υπολογισμό των ροών ισχύος μεταξύ δύο ζυγών (Σχήμα 2.3), αρχικά υπολογίζεται το ρεύμα I_{ij} της γραμμής που τους συνδέει:

$$I_{ij} = I_s + I_{pi} = (V_i - V_j)Y_s + V_i Y_{pi} \quad (2.21)$$

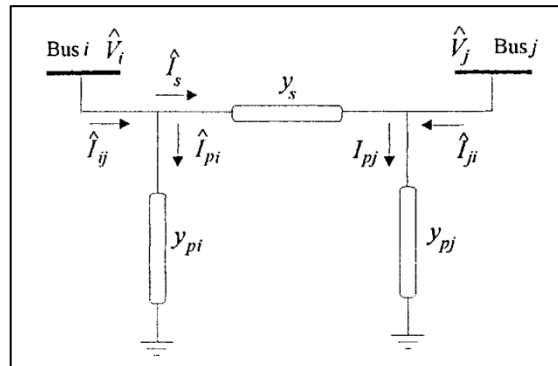
Έτσι, οι ροές ισχύος στις γραμμές διαμορφώνονται:

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i (V_i^* - V_j^*) Y_s^* + |V_i|^2 Y_{pi}^* \quad (2.22)$$

$$S_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = V_j I_{ji}^* = V_j (V_j^* - V_i^*) Y_s^* + |V_j|^2 Y_{pj}^* \quad (2.23)$$

Οι απώλειες στη γραμμή είναι το αλγεβρικό άθροισμα των ρών ισχύος, που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις 2.12 και 2.13 [2, 4]:

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.24)$$



Σχήμα 2.3: Σύστημα δύο ζυγών, για τον υπολογισμό ρών ισχύος στη γραμμή

2.3.1 Μέθοδος Gauss – Seidel (G – S)

Η Gauss – Seidel είναι μια από απλούστερες επαναληπτικές μεθόδους. Παλαιότερα, χρησιμοποιούταν εκτεταμένα για την ανάλυση ροής φορτίου των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Πλέον, με τη Newton – Raphson να έχει επικρατήσει, η χρήση της περιορίζεται στην ανάλυση μικρών ενεργειακών συστημάτων. Δύναται, επίσης, να χρησιμοποιηθεί και σε μεγάλα συστήματα, κυρίως για τον υπολογισμό προσεγγιστικής λύσης, η οποία θα αξιοποιηθεί ως αρχική από τη μέθοδο Newton – Raphson.

Ο αλγόριθμος Gauss – Seidel για τη ροή φορτίου, ενός συστήματος η ζυγών, είναι ο ακόλουθος:

1. Αρχικά κατασκευάζεται ο πίνακας αγωγιμοτήτων Y_{bus} του συστήματος, εκφρασμένος σε ανά μονάδα σύστημα (pu).
2. Ορίζονται $|V_i|=1,0$ και $\delta_i=0^\circ$ για τους ζυγούς με άγνωστα μέτρα τάσεων και φασικές γωνίες.
3. Για τους ζυγούς φορτίων, η τάση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k^{(v)} \right] \quad (2.25)$$

Όπου v ο αριθμός της επανάληψης. Για γρηγορότερη σύγκλιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί συντελεστής επιτάχυνσης a (Acceleration Factor - ACC):

$$V_{i,acc}^{(v+1)} = V_{i,acc}^{(v)} + a(V_i^{(v)} - V_{i,acc}^{(v)}) \quad (2.26)$$

Για τους ζυγούς ελέγχου τάσης υπολογίζεται πρώτα η παραγόμενη άεργος ισχύς:

$$Q_i^{(v+1)} = -|V_i|_{spec} \left[\sum_{k=1}^{i-1} |V_k|^{(v+1)} |Y_{ik}| \sin(\delta_k^{(v+1)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}) + \sum_{k=i}^n |V_k|^{(v)} |Y_{ik}| \sin(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}) \right] \quad (2.27)$$

όπου $|V_i|_{spec}$ το προκαθορισμένο μέτρο της τάσης του ζυγού. Ο υπολογισμός της παραγόμενης άεργου ισχύος, κατά την επανάληψη $v+1$, γίνεται με βάση τις τιμές των τάσεων στην επανάληψη v ή στην επανάληψη $v+1$, για όσες έχουν ήδη υπολογιστεί. Στη συνέχεια, από τη Σχέση 2.25, υπολογίζεται η φασική γωνία της τάσης δ_i .

4. Στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος της σύγκλισης. Για να προχωρήσει η μέθοδος στο επόμενο στάδιο, πρέπει η απόλυτη τιμή της διαφοράς του πραγματικού μέρους της τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων να είναι μικρότερη μιας ανοχής ε :

$$\left| Re(V_i^{(v+1)}) - Re(V_i^{(v)}) \right| \leq \varepsilon \quad (2.28)$$

Το ίδιο πρέπει να ισχύει και για τα φανταστικά μέρη των τάσεων:

$$\left| Im(V_i^{(v+1)}) - Im(V_i^{(v)}) \right| \leq \varepsilon \quad (2.29)$$

Η ανοχή ε είναι, συνήθως, της τάξης $\varepsilon \leq 10^{-4}$.

Σε αντίθετη περίπτωση, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο προηγούμενο βήμα.

5. Υπολογίζεται η παραγωγή πραγματικής (P_G) και άεργου ισχύος (Q_G) στο ζυγό αναφοράς, από τις Σχέσεις 2.15 και 2.16.
6. Υπολογίζονται όλες οι ροές ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, μέσω των Σχέσεων 2.22 και 2.23.

Η μέθοδος Gauss – Seidel χαρακτηρίζεται από ταχύτητα στην εκτέλεση και ευκολία στον προγραμματισμό της. Παρόλα αυτά, συγκλίνει αργά, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν αποκλίσεις σε μεγάλα συστήματα, ενώ ο προγραμματισμός της απαιτεί τη χρήση μιγαδικών αριθμών. [2, 4]

2.3.2 Μέθοδος Newton – Raphson (N – R)

Όπως αναφέρθηκε, η σύγκλιση της μεθόδου Gauss – Seidel είναι αργή, γεγονός που γίνεται περισσότερο εμφανές σε μεγάλα ενεργειακά συστήματα. Η Newton – Raphson αντίθετα, συγκλίνει εξίσου γρήγορα και για μικρά και για μεγάλα συστήματα, γεγονός που οδήγησε στην επικράτησή της στην ανάλυση ροής φορτίου, παρόλο που αλγοριθμικά είναι πιο σύνθετη από την Gauss – Seidel. Μερικές επαναλήψεις της αρκούν, συνήθως, για την επίτευξη σύγκλισης στο μελετώμενο σύστημα.

Ο αλγόριθμος Newton – Raphson για τη ροή φορτίου, ενός συστήματος n ζυγών, είναι ο ακόλουθος:

1. Έστω ότι είναι γνωστή μια αρχική σειρά τιμών για τις τάσεις των ζυγών των φορτίων. Οι τάσεις του ζυγού αναφοράς και των ελέγχου τάσης θεωρούνται δεδομένες. Δίνονται, επίσης, οι αρχικές τιμές των φασικών γωνιών δ για των ζυγών φορτίων και ελέγχου τάσης.
2. Υπολογίζονται η πραγματική ισχύς (P_i) των ζυγών παραγωγής και ελέγχου τάσης, καθώς και η άεργος ισχύς (Q_i) των ζυγών ελέγχου τάσης, από τις Σχέσεις 2.15 και 2.16 αντίστοιχα.
3. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι αποκλίσεις ΔP και ΔQ . Τα στοιχεία των διανυσμάτων $\Delta P^{(v)}$ και $\Delta Q^{(v)}$ ορίζονται ως εξής:

$$\Delta P_i^{(v)} = P_{i,spec} - P_i^{(v)} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2.30)$$

$$\Delta Q_i^{(v)} = Q_{i,spec} - Q_i^{(v)} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (2.31)$$

Τα $P_i^{(v)}$ και $Q_i^{(v)}$ υπολογίζονται από τις παρακάτω επαναληπτικές σχέσεις:

$$P_i^{(v)} = \sum_{k=1}^n |V_i|^{(v)} |V_k|^{(v)} |Y_{ik}| \cos(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.32)$$

$$Q_i^{(v)} = -\sum_{k=1}^n |V_i|^{(v)} |V_k|^{(v)} |Y_{ik}| \sin(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.33)$$

4. Υπολογίζεται η Ιακωβιανή μήτρα:

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

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

5. Μετά τον υπολογισμό των $\Delta P^{(v)}$ και $\Delta Q^{(v)}$ εξετάζεται το κριτήριο σύγκλισης. Αν ικανοποιείται, ο αλγόριθμος προχωρά στο επόμενο βήμα. Στην αντίθετη περίπτωση, προχωρά σε επόμενη επανάληψη (v+1), μετατρέποντας το σύστημα των εξισώσεων ως ακολούθως:

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

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ |V|^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ |V|^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Με τον τρόπο αυτόν, υπολογίζονται οι νέες τιμές των τάσεων και των γωνιών. Ο αλγόριθμος επιστρέφει στο 2^ο βήμα και επαναλαμβάνει τη διαδικασία μέχρις ότου να επιτευχθεί σύγκλιση.

6. Εφόσον το κριτήριο σύγκλισης (Σχέσεις 2.28 και 2.29) ικανοποιείται, υπολογίζεται η πραγματική P (Σχέση 2.15) και η άεργος ισχύς Q (Σχέση 2.16) του ζυγού αναφοράς, καθώς και οι ροές ισχύος και οι απώλειες στις γραμμές μεταφοράς (Σχέσεις 2.22 και 2.23).

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου Newton – Raphson είναι ότι η εφαρμογή της μέσω flat start δεν είναι πάντοτε εφικτή, καθώς η λύση ενδέχεται να ταλαντώνεται, χωρίς να συγκλίνει. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτός ο περιορισμός, η ανάλυση ροής φορτίου πραγματοποιείται αρχικά μέσω της μεθόδου Gauss – Seidel, και μετά από μερικές επαναλήψεις του, συνεχίζεται μέσω Newton – Raphson. [2, 4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΕΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή στα βραχυκυκλώματα

Βραχυκύκλωμα ονομάζεται κάθε απότομη δομική αλλαγή του δικτύου, η οποία οδηγεί σύνδεση ενεργού τμήματός του με τη γη, είτε άμεσα (στερεό βραχυκύκλωμα), είτε μέσω αντίδρασης.

Σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, η πλειοψηφία των βραχυκυκλωμάτων συμβαίνει στις γραμμές μεταφοράς, και οφείλονται σε πολλούς λόγους, όπως αστοχία υλικού και καιρικές συνθήκες. Το 70% με 80% των βραχυκυκλωμάτων στις γραμμές μεταφοράς είναι παροδικού τύπου και οφείλονται στη δημιουργία ιονισμένου δρόμου μεταξύ κάποιου αγωγού της γραμμής και της γης. Η μικρή σύνθετη αντίσταση ανάμεσά τους, επιτρέπει τη ροή ρεύματος από τον αγωγό προς τη γη, με το κύκλωμα να κλείνει μέσω των γειώσεων των γεννητριών και των μετασχηματιστών. Ένα λιγότερο συνηθισμένο σενάριο είναι το βραχυκύκλωμα δύο αγωγών της γραμμής μεταξύ τους, χωρίς να περιλαμβάνεται η γη. Το βραχυκυκλωμένο τμήμα της γραμμής απομονώνεται από το υπόλοιπο υγιές σύστημα, μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος, τερματίζοντας τη ροή ρεύματος μέσω του ιονισμένου δρόμου, ώστε αυτός, στη συνέχεια, να απιονισθεί. Ο απιονισμός ολοκληρώνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα, της τάξης των 400msec, με τους διακόπτες τότε να ξανακλείνουν, αποκαθιστώντας τη λειτουργία της γραμμής. Εκτός από βραχυκυκλώματα παροδικής φύσεως, ενδέχεται να παρουσιαστούν και μόνιμα σφάλματα, από την πτώση γραμμών στη γη, κυρίως λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων ή δυσλειτουργίας των αλεξικέραυνων.

Τα βραχυκυκλώματα μπορούν να διακριθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Συμμετρικό βραχυκύκλωμα και των τριών φάσεων με τη γη, μέσω αντίστασης σφάλματος Z_f . Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα διατηρεί την τριφασική του συμμετρία, δηλαδή τάσεις και ρεύματα έχουν, σε κάθε φάση, ίσα μέτρα και τις γωνίες τους μετατοπισμένες κατά 120° , επιτρέποντας έτσι την ανάλυση του συστήματος μελετώντας μόνο τη μία φάση. Στην περίπτωση που $Z_f = 0$, το βραχυκύκλωμα χαρακτηρίζεται μεταλλικό ή στερεό. Τα τριφασικά βραχυκυκλώματα αποτελούν τη

σοβαρότερη περίπτωση σφάλματος, καθώς διακόπτουν τελείως τη μεταφορά ισχύος. Αντιπροσωπεύουν το 5% του συνόλου των βραχυκυκλωμάτων.

2. Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων, με την τρίτη να παραμένει υγιής.
3. Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων προς τη γη, με την τρίτη να παραμένει υγιής
4. Βραχυκύκλωμα μιας φάσης προς τη γη.

Οι τρεις τελευταίες περιπτώσεις ελαττώνουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος, στο σημείο του σφάλματος, και χαρακτηρίζονται από ασυμμετρία στα ρεύματα και τις τάσεις τους, με συνέπεια η ανάλυσή τους να μην μπορεί να γίνει μελετώντας μόνο τη μια φάση. Απαιτείται διαφορετική αντιμετώπιση του προβλήματος, η οποία βασίζεται στη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών.

Ένα βραχυκύκλωμα ακολουθείται πάντα από μια μικρή ή μεγάλη βύθιση των τάσεων του συστήματος. Όσον αφορά τις γεννήτριες, η βύθιση των τάσεών τους, οδηγεί σε απότομη ελάττωση της ισχύος τους. Καθώς η ισχύς εισόδου της γεννήτριας παραμένει σταθερή, η γεννήτρια επιταχύνεται, με αποτέλεσμα την εμφάνιση, σε αυτήν, μηχανικών ταλαντώσεων.

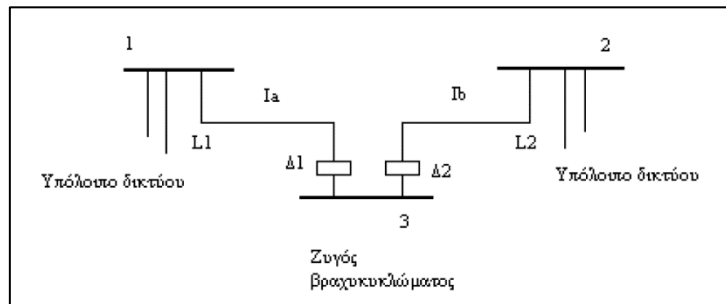
Τέλος, είναι αρκετά σημαντικός ο υπολογισμός των ρευμάτων του μελετώμενου συστήματος, καθώς οι τιμές τους διαφέρουν ανάλογα με τη χρονική στιγμή, μετά το βραχυκύκλωμα, που μελετάται, π.χ. αμέσως μετά την εμφάνισή του, λίγους κύκλους αργότερα ή στη μόνιμη κατάσταση χωρίς αποκατάσταση του σφάλματος. Η γνώση αυτή είναι απαραίτητη για την επιλογή και τη ρύθμιση των διακοπτικών μέσων που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς αυτά χαρακτηρίζονται, όχι μόνο από το ρεύμα που θα δεχτούν αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα, αλλά και από το ρεύμα που πρέπει να διακόψουν. Οι τιμές των ρευμάτων αυτών υπολογίζονται για διαφορετικά είδη βραχυκυκλωμάτων, σε διαφορετικά σημεία του δικτύου.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, θα αναλυθεί η μελέτη των συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων και η μέθοδος συμμετρικών συνιστωσών, που χρησιμοποιείται για τη μελέτη των ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων. [2]

3.2 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα

3.2.1 Εισαγωγή

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένα τμήμα του συστήματος μεταφοράς ενός ΣΗΕ, που περιλαμβάνει τρεις ζυγούς (1,2 και 3) και τις γραμμές μεταφοράς 1 – 3 και 2 – 4. Αρχικά, το δίκτυο λειτουργεί κανονικά και κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί ότι οι τάσεις όλων των ζυγών έχουν μέτρο περίπου 1pu.



Σχήμα 3.1: Τμήμα ηλεκτρικού δικτύου για την ανάλυση συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων

Έστω ότι συμβαίνει ένα στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 3. Η τάση του θα μηδενιστεί και το υπόλοιπο δίκτυο, μέσω των ζυγών 1 και 2, θα αρχίσει να τροφοδοτεί τα ρεύματα βραχυκύκλωσης I_a και I_b , που ρέουν προς αυτόν. Το μέτρο των ρευμάτων αυτών προσδιορίζεται από την αντοχή των ζυγών 1 και 2, αλλά και από τις αντιδράσεις L_1 και L_2 των γραμμών. Συνήθως, οι τιμές των ρευμάτων βραχυκύκλωσης είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των κανονικών ρευμάτων γραμμής. Προκειμένου να απομονωθεί ο ζυγός του σφάλματος, θα πρέπει να δοθεί εντολή, από το σύστημα προστασίας, προκειμένου να ανοίξουν οι διακόπτες Δ_1 και Δ_2 . [2]

3.2.2 Αντοχή σε βραχυκύκλωμα (SCC)

Κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, οι τάσεις των ζυγών 1 και 2, όπως και των υπόλοιπων του δικτύου, θα ελαττωθούν. Το μέγεθος αυτής της πτώσης τάσης αποτελεί μια ένδειξη για την αντοχή του μελετώμενου δικτύου. Η Αντοχή σε Βραχυκύκλωμα (Short Circuit Capacity – SCC) ή Επίπεδο Σφάλματος Εξεταζόμενου Ζυγού εκφράζει το μέτρο της αντοχής του δικτύου, αλλά και της σοβαρότητας ενός βραχυκυκλώματος.

Η SCC ενός ζυγού του δικτύου, ορίζεται ως το γινόμενο των μέτρων της τάσης του πριν το βραχυκύκλωμα (V_{PB} , προσφαιματική) και του ρεύματος μετά το βραχυκύκλωμα (I_{MB}). Αν

οι προαναφερθείσες ποσότητες δίνονται σε ανά μονάδα σύστημα (pu), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$|SCC| = |V_{PB}| |I_{MB}| pu \quad (3.1)$$

Αν, για τον ζυγό, δίνονται η πολική τάση σε kV και το φασικό ρεύμα σε kA, η SCC εκφράζεται σε τριφασικά MVA, δηλαδή:

$$|SCC| = \sqrt{3} |V_{PB}| |I_{MB}| MVA \quad (3.2)$$

Θεωρώντας την προσφαλματική τάση του ζυγού ίση με 1 pu, τιμή που συνήθως έχει ο ζυγός, οι παραπάνω σχέσεις διαμορφώνονται:

$$|SCC| \approx |I_{MB}| pu \quad (3.3)$$

$$|SCC| \approx \sqrt{3} |I_{MB}| MVA \quad (3.4)$$

Οι τυπικές τιμές της SCC για μεγάλα δίκτυα κυμαίνονται από πολλές δεκάδες μέχρι εκατοντάδες MVA. [2]

3.2.3 Υπολογισμός ρεύματος βραχυκύκλωσης με το Θεώρημα Thevenin

Τα συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα χαρακτηρίζονται από τη διατήρηση της τριφασικής συμμετρίας κατά τη διάρκεια εμφάνισής τους, γεγονός που επιτρέπει την ανάλυσή τους μέσω μονοφασικού ισοδυναμού κυκλώματος, ανάγοντας στη συνέχεια τα αποτελέσματα και στις άλλες δύο φάσεις.

Στην ανάλυση κυκλωμάτων, το θεώρημα Thevenin χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των μεταβολών που συμβαίνουν στις τάσεις και τα ρεύματα ενός κυκλώματος, εξαιτίας της προσθήκης μιας σύνθετης αντίστασης μεταξύ δύο κόμβων του. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το θεώρημα, οι μεταβολές τάσεων και ρευμάτων, είναι ίδιες με τις τάσεις και τα ρεύματα που θα προκαλούνταν από μια πηγή τάσης, μέτρου και πολικότητας ίσων με τα αντίστοιχα της προσφαλματικής τάσης μεταξύ των δύο κόμβων, τοποθετημένη σε σειρά με την εσωτερική αντίσταση του κυκλώματος και την σύνθετη αντίσταση που προστέθηκε. Η εσωτερική αντίσταση προκύπτει από τον μηδενισμό όλων των πηγών του κυκλώματος, δηλαδή τη βραχυκύκλωση των πηγών τάσης και ανοιχτοκύκλωση των πηγών ρεύματος.

Η μελέτη συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων στα ΣΗΕ αποτελεί μια παρόμοια κατάσταση. Για τον υπολογισμό των τελικών τιμών τάσεων και ρευμάτων του δικτύου μετά από ένα βραχυκύκλωμα, οι μεταβολές Thevenin υπερτίθενται στις προσφαλματικές τάσεις και ρεύματα αντίστοιχα.

Εφαρμόζοντας το Θεώρημα Thevenin στο σύστημα του Σχήματος 3.1, προκύπτει το ισοδύναμο κύκλωμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2, όπου $V_{ΠΒ}$ η προσφαλματική τάση του ζυγού 3 και $Z_{ΕΣ}$ η εσωτερική αντίσταση του δικτύου από τον ζυγό 3, με όλες τις πηγές μηδενισμένες.

Από το Σχήμα 3.3, στην περίπτωση που υπάρχει αντίσταση σφάλματος Z_f , για το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{BP} ισχύει:

$$I_{BP} = \frac{V_{ΠΒ}}{Z_{ΕΣ} + Z_f} \quad (3.5)$$

Στην περίπτωση ενός στερεού τριφασικού βραχυκυκλώματος ($Z_f = 0$), ισχύει:

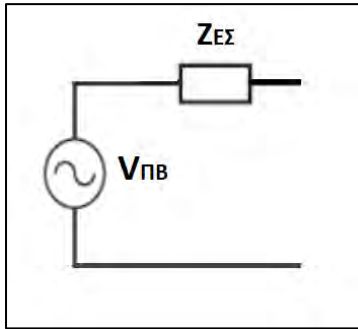
$$I_{BP} = \frac{V_{ΠΒ}}{Z_{ΕΣ}} \quad (3.6)$$

$$Z_{ΕΣ} = \frac{V_{ΠΒ}}{I_{BP}} \quad (3.7)$$

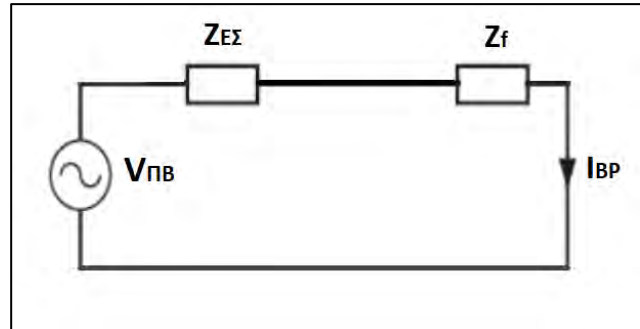
Εάν η $V_{ΠΠ} = 1 pu$, από τη Σχέση 3.3 προκύπτει $|SCC| \approx |I_{MB}| pu$. Έτσι, αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στη Σχέση 3.7, προκύπτει:

$$Z_{ΕΣ} = \frac{1}{SCC} \quad (3.8)$$

Από τη Σχέση 3.8 μπορεί κατά προσέγγιση να υπολογιστεί η εσωτερική αντίσταση Thevenin $Z_{ΕΣ}$, όπως φαίνεται από κάποιο ζυγό, καθώς οι τιμές της SCC των ζυγών είναι, συνήθως, γνωστές από τον χειριστή του δικτύου. Χρησιμοποιείται κυρίως σε πρακτικές εφαρμογές, για τον κατά προσέγγιση υπολογισμό της επίδρασης ενός τμήματος του δικτύου στο υπόλοιπο, μέσω κάποιου ζυγού. [2]



Σχήμα 3.2: Thevenin Ισοδύναμο του δικτύου του Σχήματος 3.1, ως προς το ζυγό 3

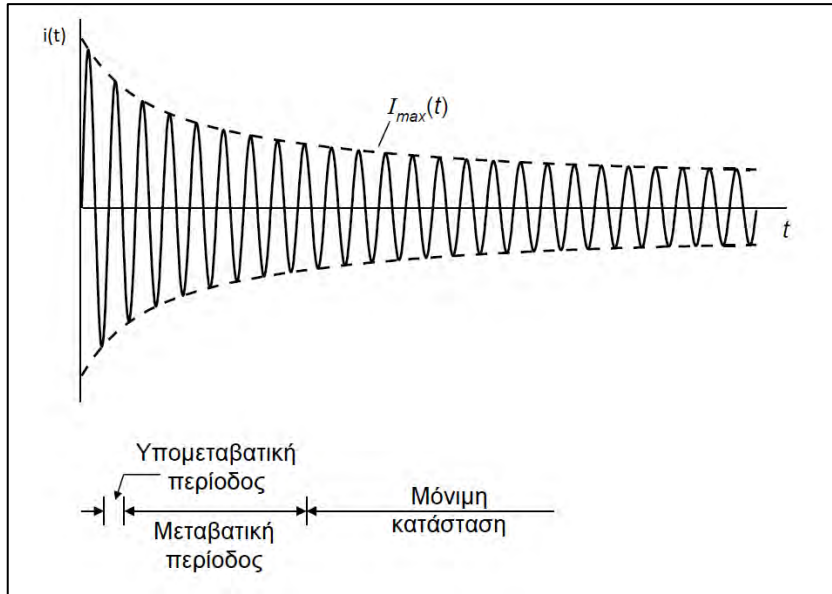


Σχήμα 3.3: Thevenin Ισοδύναμο του δικτύου του Σχήματος 3.1, ως προς το ζυγό 3, για τον υπολογισμό του I_{BP}

3.2.4 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα στις σύγχρονες μηχανές

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.2.5, όταν στους ακροδέκτες μιας σύγχρονης γεννήτριας, που λειτουργεί εν κενώ, συμβεί τριφασικό βραχυκύκλωμα, το ρεύμα της έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4. Το ρεύμα είναι αρχικά μηδέν, ακολούθως αυξάνεται γρήγορα σε μεγάλες τιμές, ενώ στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια δύο διακριτών χρονικών περιόδων, μειώνεται, μέχρι να φτάσει σε μια σταθερή τιμή, την τιμή μόνιμης κατάστασης. Η πρώτη εκ των δύο περιόδων είναι η υπομεταβατική, που χαρακτηρίζεται από ραγδαία μείωση των τιμών του ρεύματος, και διαρκεί συνήθως 2 με 5 κύκλους. Η περίοδος, που ακολουθεί, είναι η μεταβατική, κατά τη διάρκεια της οποίας η μείωση της τιμής του ρεύματος είναι πιο αργή. Η μεταβατική περίοδος διαρκεί αρκετούς κύκλους της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος, συνήθως 10 έως 15.

Η συμπεριφορά μιας σύγχρονης γεννήτριας κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος, δύναται να μελετηθεί είτε με τη χρήση συστήματος διαφορικών εξισώσεων (περίπλοκη μέθοδος), είτε μέσω των ισοδυνάμων κυκλωμάτων για τη μόνιμη, μεταβατική και υπομεταβατική κατάσταση της γεννήτριας (Σχήμα 3.5). Καθένα από τα κυκλώματα αυτά αποτελείται από μια πηγή τάσης E , σε σειρά με μια επαγωγική αντίσταση.



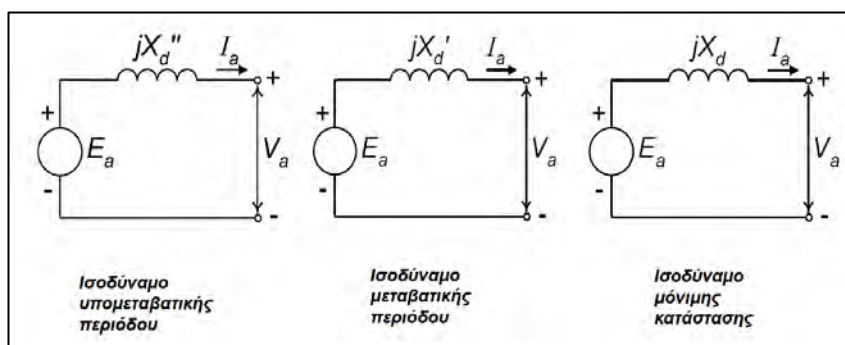
Σχήμα 3.4: Κυματομορφή ρεύματος γεννήτριας κατά τη διάρκεια τριφασικού βραχυκυκλώματος

Οι τιμές της αντιδράσεων των ισοδύναμων κυκλωμάτων εξαρτώνται από το ρεύμα της αντίστοιχης περιόδου (I , I' , I'' για τη μόνιμη κατάσταση, μεταβατική και υπομεταβατική περίοδο αντίστοιχα) και υπολογίζονται ως ακολούθως:

- $X_d'' = \frac{|E|}{|I''|}$, για την υπομεταβατική περίοδο (3.9)

- $X_d' = \frac{|E|}{|I'|}$, για τη μεταβατική περίοδο (3.10)

- $X_d = \frac{|E|}{|I|}$, για τη μόνιμη κατάσταση (3.11)



Σχήμα 3.5: Ανά φάση ισοδύναμα κυκλώματα γεννήτριας μετά από βραχυκύκλωμα

Στην περίπτωση που η γεννήτρια είναι αφόρτιστη, δηλαδή λειτουργεί χωρίς να τροφοδοτεί κάποιο φορτίο, η εσωτερική ΗΕΔ E ισούται με την τάση των ακροδεκτών V_t και το ρεύμα I_L είναι μηδέν ($I_L = 0$). Αν, όμως, η γεννήτρια τροφοδοτεί κάποιο φορτίο, υπό τάση V_t και

ρεύμα I_L , η εσωτερική ΗΕΔ E_g , για κάθε κατάσταση, υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

- $E_g'' = V_t + (jX_d'')I_L$ για τις υπομεταβατικές συνθήκες (3.12)

- $E_g' = V_t + (jX_d')I_L$ για τις μεταβατικές συνθήκες (3.13)

- $E_g = V_t + (jX_d)I_L$ για τις κανονικές συνθήκες (3.14)

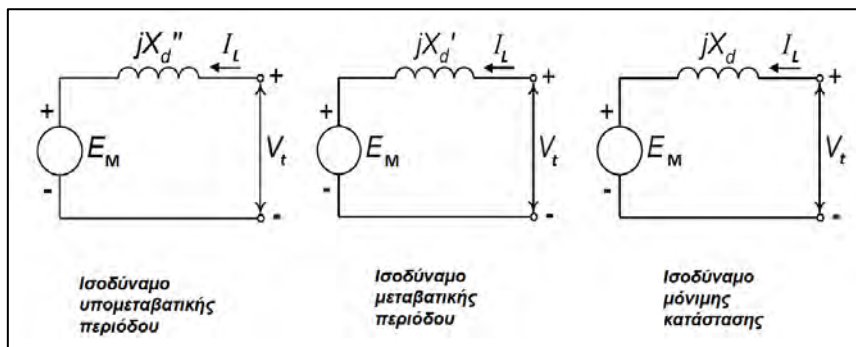
Εκτός από τις γεννήτριες, στη διαμόρφωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης συμμετέχουν και οι σύγχρονοι κινητήρες, με τη συμπεριφορά τους σε ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα να ομοιάζει με αυτή των γεννητριών. Από τα ισοδύναμα κυκλώματα των κινητήρων (Σχήμα 3.6), η εσωτερική ΗΕΔ E_M , για κάθε κατάσταση, υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

- $E_M'' = V_t - (jX_d'')I_L$ για τις υπομεταβατικές συνθήκες (3.15)

- $E_M' = V_t - (jX_d')I_L$ για τις μεταβατικές συνθήκες (3.16)

- $E_M = V_t - (jX_d)I_L$ για τις κανονικές συνθήκες (3.17)

Όπου V_t η τάση των ακροδεκτών του κινητήρα και I_L το ρεύμα που απορροφά.



Σχήμα 3.6: Ανά φάση ισοδύναμα κυκλώματα κινητήρα μετά από βραχυκύκλωμα

Πρέπει να επισημανθεί ότι σε ένα βραχυκύκλωμα, τόσο η γεννήτρια όσο και ο κινητήρας συνεισφέρουν στη διαμόρφωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης, μαζί με τα ρεύματα πριν το σφάλμα, επειδή και τα δύο αυτά στοιχεία έχουν αποθηκευμένη ενέργεια. Συχνά, στον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης και της SCC, τα προσφαλματικά ρεύματα θεωρούνται μηδενικά, με συνέπεια, στην επίλυση με το Θεώρημα Thevenin, αυτά να μην προστίθενται στη συνιστώσα του ρεύματος που ρέει προς το βραχυκύκλωμα. Όταν χρησιμοποιούνται οι εσωτερικές ΗΕΔ των μηχανών (γεννητριών ή κινητήρων), τα προσφαλματικά ρεύματα μπορούν να αγνοηθούν αν οι εσωτερικές ΗΕΔ των μηχανών είναι ίσες με την προσφαλματική τάση στο σημείο του βραχυκυκλώματος. [2]

3.3 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα

3.3.1 Συμμετρικές συνιστώσες

Η εμφάνιση ενός ασύμμετρου σφάλματος σε ένα τριφασικό σύστημα δημιουργεί ασυμμετρία στο μελετώμενο δίκτυο. Η μελέτη των ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο μετασχηματισμού των συμμετρικών συνιστωσών, που διατυπώθηκε από τον C.L. Fortescue το 1918. Με τη μέθοδο αυτή, ένα ασύμμετρο τριφασικό σύστημα δύναται να αναλυθεί μέσω τριών συμμετρικών συστημάτων, που ονομάζονται Συμμετρικές Συνιστώσες (Symmetrical Components). Οι συνιστώσες αυτές είναι:

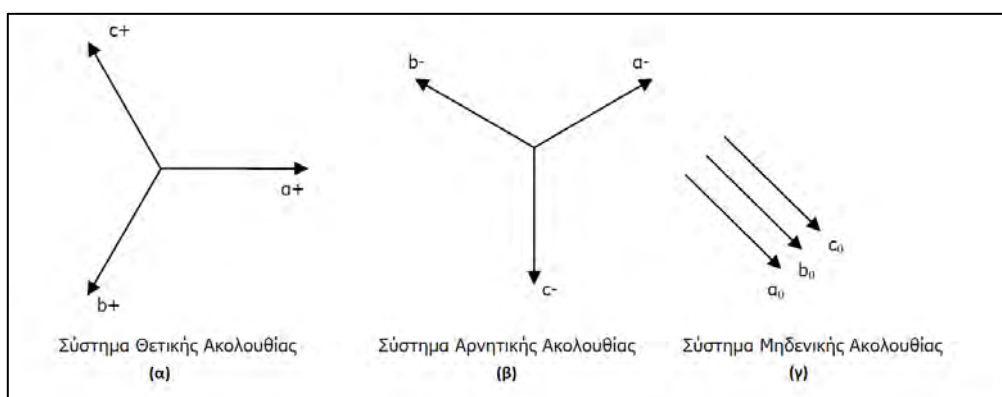
- Δίκτυο Θετικής Ακολουθίας (Positive Sequence Network)
- Δίκτυο Αρνητικής Ακολουθίας (Negative Sequence Network)
- Δίκτυο Μηδενικής Ακολουθίας (Zero Sequence Network)

Θεωρείται ότι το αρχικό σύστημα έχει φασική ακολουθία a,b,c .

Η θετική ακολουθία (Σχήμα 3.7α) αποτελείται από τρία διανύσματα ίσου μέτρου, διαφοράς φάσης 120° και φασική ακολουθία a,b,c .

Η αρνητική ακολουθία (Σχήμα 3.7β) αποτελείται από τρία διανύσματα ίσου μέτρου, διαφοράς φάσης 120° και φασικής ακολουθίας a,c,b .

Η μηδενική ακολουθία (Σχήμα 3.7γ) αποτελείται από τρία συμφασικά διανύσματα ίσου μέτρου.



Σχήμα 3.7: Ακολουθιακές Συνιστώσες

Ο προσδιορισμός κάθε φάσης είναι το άθροισμα των τριών αντίστοιχων ακολουθιών:

- $V_a = V_a^0 + V_a^1 + V_a^2$
- $V_b = V_b^0 + V_b^1 + V_b^2$
- $V_c = V_c^0 + V_c^1 + V_c^2$

(3.18)

Ότι ισχύει για τις τάσεις, ισχύει και για τα ρεύματα:

- $I_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2$
- $I_b = I_b^0 + I_b^1 + I_b^2$
- $I_c = I_c^0 + I_c^1 + I_c^2$

(3.19)

Ορίζεται ο τελεστής $\alpha = 1 \angle 120^\circ = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -0,5 + j 0,866$ (3.20).

Μερικές από τις ιδιότητές του είναι οι ακόλουθες:

- $\alpha^2 = 1 \angle 240^\circ = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ = -0,5 - j 0,866$
- $\alpha^3 = 1 \angle 360^\circ = 1$
- $\alpha^* = \alpha^2$
- $1 + \alpha + \alpha^2$

(3.21)

Έτσι, για τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας, δεδομένου ότι τα τρία διανύσματα είναι ίδιου μέτρου και κατεύθυνσης, θα ισχύει: $I_a^0 = I_b^0 = I_c^0$ (3.22)

Για τα ρεύματα θετικής ακολουθίας: $I_b^1 = \alpha^2 I_a^1$ & $I_c^1 = \alpha I_a^1$ (3.23)

Τέλος, για τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας: $I_b^2 = \alpha I_a^2$ & $I_c^2 = \alpha^2 I_a^2$ (3.24)

Από τις Σχέσεις 3.19, 3.22, 3.23 και 3.24 προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = I_a^0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + I_a^1 \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} + I_a^2 \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \quad (3.25)$$

$$I_p = T I_s \quad (3.26)$$

Βάσει των παραπάνω σχέσεων που αξιοποιούν τις συμμετρικές συνιστώσες, μπορούν να υπολογιστούν τα φασικά ρεύματα. Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να υπολογιστούν και οι τάσεις:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V_a^0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + V_a^1 \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} + V_a^2 \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ \alpha^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a^0 \\ V_a^1 \\ V_a^2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \quad (3.27)$$

$$V_p = TV_s \quad (3.28)$$

Για την εύρεση του ρεύματος ή της τάσης σε κάποιο άλλο σημείο, πέρα από το σημείο του σφάλματος, θα πρέπει και εκεί πρώτα να υπολογιστούν οι συμμετρικές συνιστώσες και κατόπιν τα φασικά ρεύματα και τάσεις.

Οι Σχέσεις 3.26 και 3.28 δύνανται να λυθούν ως προς I_s και V_s αντίστοιχα, με σκοπό την εύρεση των συμμετρικών τιμών από τις φασικές:

$$I_s = T^{-1}I_p \quad (3.29)$$

$$V_s = T^{-1}V_p \quad (3.30)$$

$$\text{Όπου } T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} [2]$$

3.3.2 Τριφασική ισχύς και συμμετρικές συνιστώσες

Η συνολική ισχύς που διακινείται σε ένα τριφασικό δίκτυο ισούται με το άθροισμα των ισχύων καθεμίας από τις φάσεις του:

$$S_{3\phi} = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = [V_a \quad V_b \quad V_c] * \begin{bmatrix} I_a^* \\ I_b^* \\ I_c^* \end{bmatrix} = V_p^T * I_p^* \quad VA \quad (3.31)$$

Όπου V_p και I_p τα διανύσματα φασικών τάσεων και ρευμάτων αντίστοιχα

Με αντικατάσταση των σχέσεων 3.26 και 3.28 στη 3.31 προκύπτει:

$$S_{3\phi} = (TV_s)^T (TI_s)^* = V_s^T T^T T^* I_s^* \quad (3.32)$$

Για το γινόμενο $T^T T^*$ ισχύει:

$$T^T T^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση 3.33 στην 3.32 προκύπτει:

$$S_{3\phi} = V_s^T \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} I_s^* = [V_a^0 \quad V_a^1 \quad V_a^2] \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^{0*} \\ I_a^{1*} \\ I_a^{2*} \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$S_{3\phi} = 3V_a^0 I_a^{0*} + 3V_a^1 I_a^{1*} + 3V_a^2 I_a^{2*} VA \quad (3.34)$$

Η ολική ισχύς ενός ασύμμετρου συστήματος ισούται με το άθροισμα των ισχύων των συμμετρικών συνιστωσών του. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τιμές στο σύστημα ρυ, τα 3 στη σχέση 3.34 απαλείφονται. [2]

3.3.3 Ακολουθιακά κυκλώματα

Η πτώση τάσης που προκαλείται σε ένα τμήμα του μελετώμενου δικτύου από κάποιο ακολουθιακό ρεύμα, εξαρτάται άμεσα από τη σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζει το συγκεκριμένο τμήμα στο ακολουθιακό αυτό ρεύμα. Η σύνθετη αντίσταση δύναται να είναι διαφορετική ανάλογα με το ακολουθιακό ρεύμα και διακρίνεται σε αντίσταση θετικής (Z^1 ή Z^+), αρνητικής (Z^2 ή Z^-) και μηδενικής ακολουθίας (Z^0). Σε ένα συμμετρικό δίκτυο, τα ρεύματα μιας ακολουθίας είναι ανεξάρτητα από τις άλλες και προκαλούν πτώσεις τάσης μόνο της ίδιας ακολουθίας. Έτσι, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα ρεύματα αυτά διαρρέουν ένα ανεξάρτητο ακολουθιακό δίκτυο, αποτελούμενο από τις αντίστοιχες αντιστάσεις που παρουσιάζουν τα στοιχεία του, καθώς και από κάθε παραγόμενη ΗΕΔ που ενδέχεται να υπάρχει. Ο τύπος του ασύμμετρου βραχυκυκλώματος καθορίζει τον τρόπο που τα τρία ισοδύναμα ακολουθιακά δίκτυα του συστήματος θα συνδεθούν μεταξύ τους. [2]

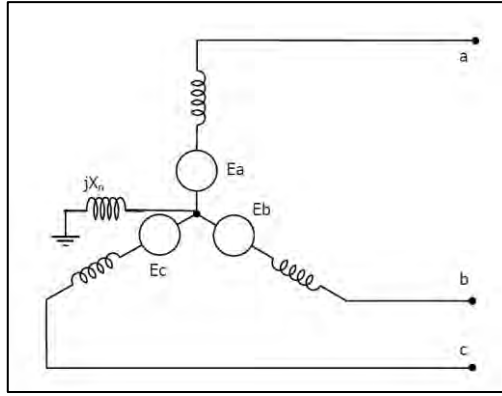
3.3.4 Ακολουθιακά κυκλώματα γεννητριών

Οι εσωτερικές ΗΕΔ μιας γεννήτριας ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$E_a = |E_a| \angle 0^\circ \quad (3.35)$$

$$E_b = |E_a| \angle 240^\circ = a^2 |E_a| \quad (3.36)$$

$$E_c = |E_a| \angle 120^\circ = a |E_a| \quad (3.37)$$



Σχήμα 3.8: Κυκλωματική αναπαράσταση αφόρτιστης γεννήτριας

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι συμμετρικές συνιστώσες των τάσεων, αντικαθιστώντας τις Σχέσεις 3.35, 3.36 και 3.37 στην 3.30:

$$\begin{bmatrix} E_a^0 \\ E_a^1 \\ E_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |E_a| \\ a^2 E_a \\ a |E_a| \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 3E_a \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Συνεπώς, μόνο το κύκλωμα θετικής ακολουθίας της γεννήτριας (Σχήμα 3.9) περιλαμβάνει πηγή τάσης. Η αντίδρασή του εξαρτάται από τη χρονική περίοδο που εξετάζεται (υπομεταβατική ή μεταβατική περίοδος ή μόνιμη κατάσταση), λαμβάνοντας τιμές:

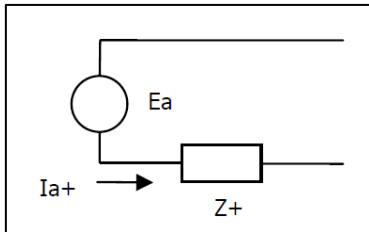
$$Z^1 = Z^+ = \begin{cases} jX_a'' \rightarrow \text{υπομεταβατική περίοδος} \\ jX_a' \rightarrow \text{μεταβατική περίοδος} \\ jX_a \rightarrow \text{μόνιμη κατάσταση} \end{cases} \quad (3.39)$$

Συνεχίζοντας, όσον αφορά το κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας, η αντίδρασή του είναι διαφορετική από την αντίστοιχη της θετικής ακολουθίας, καθότι οι γεννήτριες είναι ενεργά στοιχεία (Σχήμα 3.10).

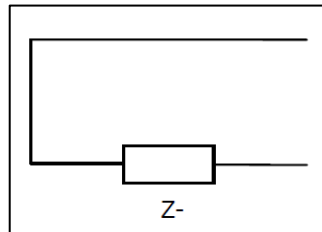
Τέλος, για το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας, από τη Σχέση 3.29 προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \Rightarrow I_a^0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \frac{1}{3}I_n \Rightarrow I_n = 3I_a^0 \quad (3.40)$$

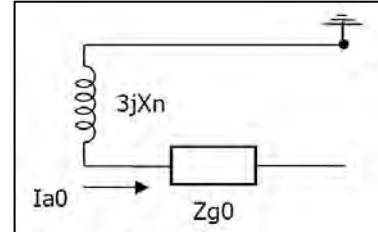
Δηλαδή, η αντίδραση που παρεμβάλλεται μεταξύ του ουδετέρου της γεννήτριας και της γης, διαρρέεται από ρεύμα τριπλάσιο της μηδενικής ακολουθίας, παρουσιάζοντας πτώση τάσης ίση με $(3I_{a0}) \cdot jX_n$. Για το λόγο αυτό, στο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας της γεννήτριας, εκτός από την σχετική αντίδραση των τυλιγμάτων, περιλαμβάνεται τριπλασιασμένη και η αντίδραση γείωσης του ουδετέρου (Σχήμα 3.11). [2]



Σχήμα 3.9: κύκλωμα θετικής ακολουθίας γεννήτριας



Σχήμα 3.10: κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας γεννήτριας



Σχήμα 3.11: κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας γεννήτριας

3.3.5 Ακολουθιακά κυκλώματα γραμμών

Οι γραμμές μεταφοράς χαρακτηρίζονται ως στατικά στοιχεία, με αποτέλεσμα να έχουν ταυτοτικές αντιδράσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας ($Z^1 = Z^2$), οι οποίες ταυτίζονται με την αντίδραση που παρουσιάζει η γραμμή σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Λόγω της τριφασικής συμμετρίας που παρουσιάζουν, δεν διαθέτουν ουδέτερο αγωγό, καθώς το συνολικό ρεύμα ουδετέρου είναι ίσο με το μηδέν. Σε περίπτωση ασυμμετρίας, τα τυχόν εμφανιζόμενα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας οδεύουν προς τη γη μέσω των αγωγών προστασίας της γραμμής, εφόσον αυτοί υπάρχουν. Επομένως, η αντίδραση μηδενικής ακολουθίας των γραμμών μεταφοράς έχει, συνήθως, τιμές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των αντιδράσεων θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Σε περίπτωση που η τιμή της αντίδρασης μηδενικής ακολουθίας δεν είναι γνωστή, δύναται να χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικές σχέσεις, ανάλογα με το είδος της μελετώμενης γραμμής.

Έτσι, για γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

- $\frac{Z^0}{Z^1} = 3,5$ όταν δεν υπάρχει αγωγός προστασίας
- $\frac{Z^0}{Z^1} = 2$ όταν υπάρχει αγωγός προστασίας

Για τις γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος:

- $\frac{Z^0}{Z^1} = 5,5$ όταν δεν υπάρχει αγωγός προστασίας
- $\frac{Z^0}{Z^1} = 3$ όταν υπάρχει αγωγός προστασίας

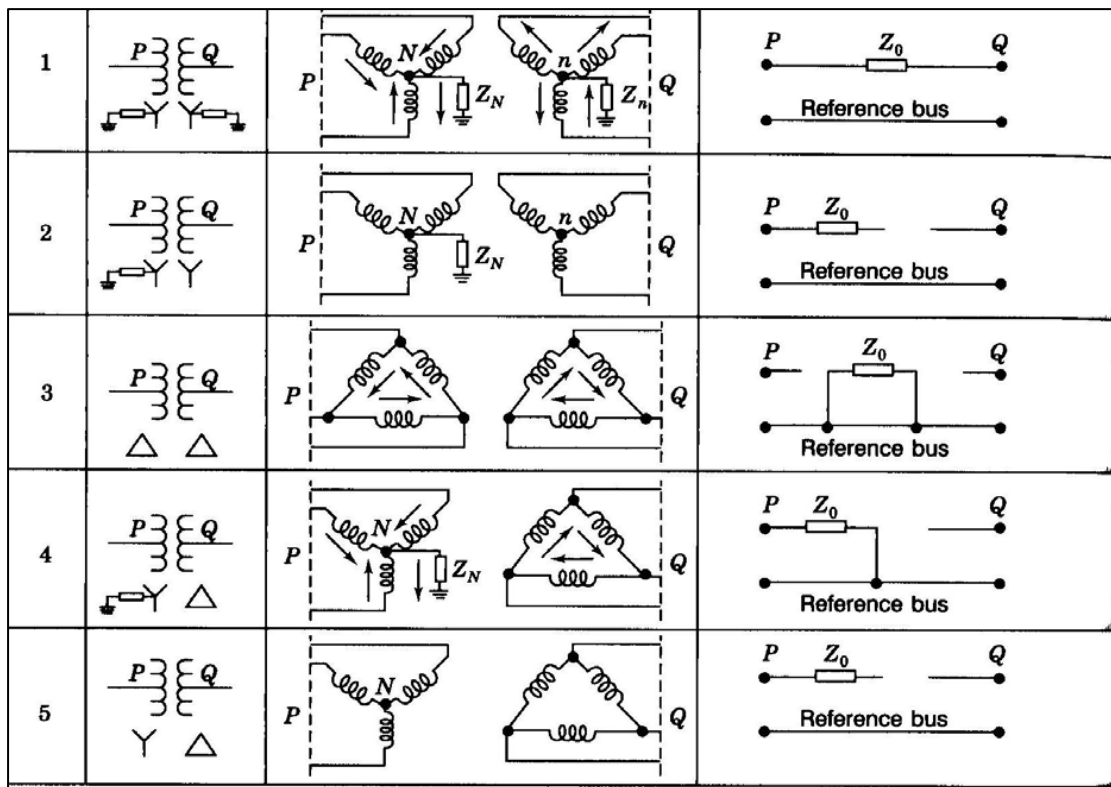
Ενώ, για υποβρύχιες ή υπόγειες γραμμές ισχύει:

- $\frac{Z^0}{Z^1} = 1 \sim 1,25$ για μονοπολικά καλώδια
- $\frac{Z^0}{Z^1} = 3 \sim 5$ για τριπολικά καλώδια [2]

3.3.6 Ακολουθιακά κυκλώματα μετασχηματιστών

Ο μετασχηματιστής είναι και αυτός στατική συσκευή, όπως οι γραμμές μεταφοράς, με αποτέλεσμα οι αντιδράσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας του να έχουν την ίδια τιμή ($Z^1 = Z^2$), η οποία ταυτίζεται με την αντίδραση διαρροής του. Τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας χρησιμοποιούν τη γη ως μέσο όδευσης, επομένως η διαμόρφωση του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας, ενός μετασχηματιστή, εξαρτάται από τον τρόπο που είναι συνδεδεμένα τα τυλίγματά του (Y ή Δ) και από το αν είναι γειωμένος ή όχι ο ουδέτερος του αστέρα (Y). Τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας μπορούν να διαρρέουν τα σκέλη τυλίγματος σε αστέρα, μόνο αν είναι γειωμένος, ενώ δε ρέουν σε γραμμές που συνδέονται στο τύλιγμα τριγώνου, γιατί δεν υπάρχει δρόμος επιστροφής. Παρ' όλα αυτά, μπορούν να ρέουν στα σκέλη του τριγώνου, προκαλούμενα από τάσεις μηδενικής ακολουθίας.

Τα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας ενός μετασχηματιστή, για τις πιο συχνές συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται, διαμορφώνονται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 3.12) [2]:



Σχήμα 3.12: Κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας για διάφορες συνδέσεις τριφασικών μετασχηματιστών

3.3.7 Υπολογισμός ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων

Η διαδικασία υπολογισμού των ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων στηρίζεται στην κατάστροψη των δικτύων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας του μελετώμενου συστήματος, και στην κατάλληλη διασύνδεσή τους, ανάλογα με τον τύπο του βραχυκυκλώματος που συμβαίνει. Έτσι, δημιουργείται το τελικό δίκτυο, μέσω του οποίου θα υπολογιστούν οι συμμετρικές συνιστώσες ρεύματος και τάσης στο σημείο του σφάλματος, μετά το βραχυκύκλωμα. Από αυτές, δύνανται να υπολογιστούν, εφόσον απαιτείται, οι συμμετρικές συνιστώσες των ρευμάτων και σε άλλα σημεία του συστήματος, χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα ακολουθιακά δίκτυα. Στην περίπτωση που υπάρχει προσφαλματικό ρεύμα, μπορεί να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς, είτε μέσω της πρόσθεσής του στις συνιστώσες θετικής ακολουθίας (μέθοδος με Θεώρημα Thevenin), είτε μέσω υπολογισμού των εσωτερικών τάσεων (HEΔ) των μηχανών [2].

Οι βασικοί τύποι σφαλμάτων που θα μελετηθούν στη συνέχεια, είναι οι παρακάτω:

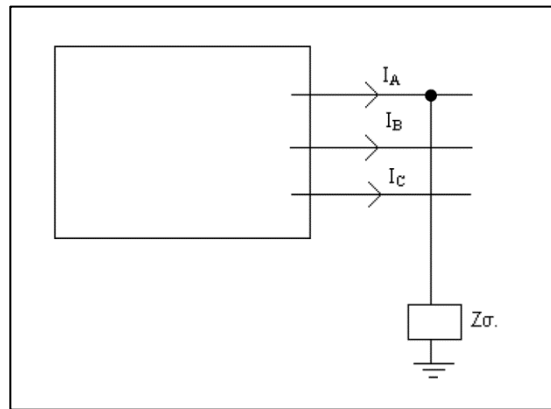
- Μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς τη γη, με ή χωρίς αντίσταση (SLG)

- Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων, με ή χωρίς αντίσταση (LL)
- Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων ως προς τη γη, με ή χωρίς αντίσταση (LLG)

3.3.8 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη (SLG)

Το ισοδύναμο κύκλωμα για το μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη (Single Line Ground - SLG) παρατίθεται στο Σχήμα 3.13. Λόγω του παραπάνω σφάλματος παρατηρείται ασυμμετρία στο δίκτυο.

Τα προσφαλματικά ρεύματα του συστήματος αγνοούνται. Επιλέγεται η φάση a , για να βραχυκυκλωθεί με τη γη, δηλαδή είναι η μόνη φάση που συνεισφέρει στο ρεύμα βραχυκύκλωσης I_a .



Σχήμα 3.13: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα ως προς γη, μέσω αντίστασης Z_f

Έτσι, για τα ρεύματα σφάλματος των φάσεων b και c , θα ισχύει:

$$I_b = I_c = 0 \quad (3.41)$$

Για την τάση στο σημείο του σφάλματος ισχύει:

$$V_a = I_a Z_f \quad (3.42)$$

Σε περίπτωση που το βραχυκύκλωμα είναι στερεό, δηλαδή $Z_f = 0$, η τάση αυτή είναι ίση με το 0 ($V_a = 0$).

Κάνοντας χρήση των συμμετρικών συνιστωσών, τα μη συμμετρικά ρεύματα του τριφασικού δικτύου, στο σημείο του σφάλματος, μπορούν να μετασχηματιστούν στα ακολουθιακά, ως εξής:

$$\begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \stackrel{3.41}{\Rightarrow} I_a^0 = I_a^1 = I_a^2 = \frac{1}{3} I_a \quad (3.43)$$

Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, το ρεύμα της φάσης α διαμορφώνεται:

$$I_\alpha = \frac{V_\alpha}{Z_f} \quad (3.44)$$

Από τις σχέσεις 3.43 και 3.44 προκύπτει:

$$I_\alpha = \frac{V_\alpha}{Z_f} \Rightarrow 3I_a^0 = \frac{V_\alpha}{Z_f} \Rightarrow I_a^0 = \frac{V_\alpha}{3Z_f} \quad (3.45)$$

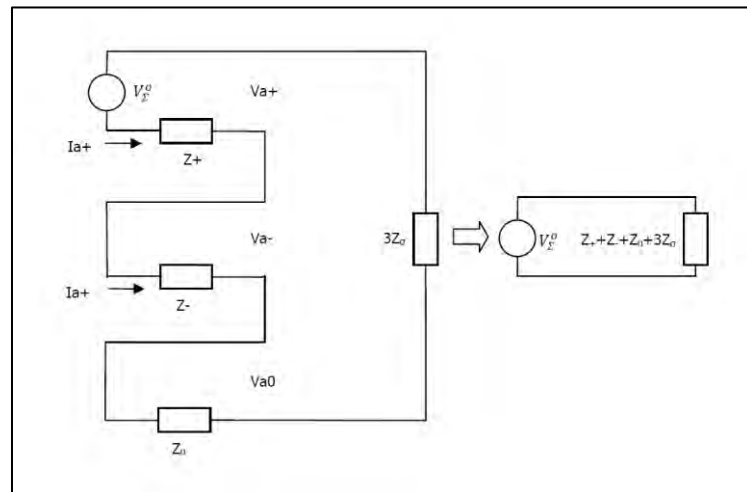
Η τάση της φάσης α μπορεί να προσδιοριστεί ως ακολούθως:

$$V_\alpha = V_a^0 + V_a^1 + V_a^2 \quad (3.46)$$

Η σχέση 3.46 αντικαθίσταται στην 3.45:

$$I_a^0 = \frac{V_a^0 + V_a^1 + V_a^2}{3Z_f} \quad (3.47)$$

Ο μόνος τρόπος για να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι Σχέσεις 3.43 και 3.47 είναι η σύνδεση των δικτύων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας σε σειρά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.14. [2]



Σχήμα 3.14: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για SLG βραχυκύκλωμα

3.3.9 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων (LL)

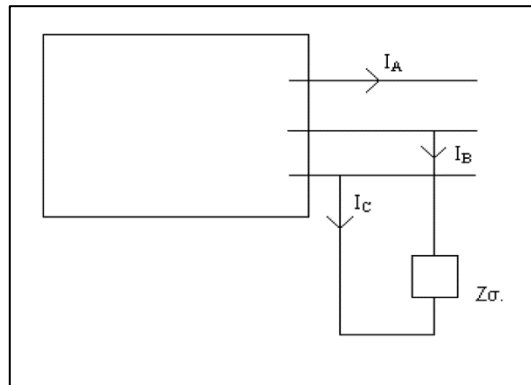
Το ισοδύναμο κύκλωμα για το βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων (Line to Line - LL) παρατίθεται στο Σχήμα 3.15. Τα προσφαλματικά ρεύματα αγνοούνται. Από το προαναφερθέν σχήμα εξάγονται οι παρακάτω σχέσεις για τα ρεύματα και τις τάσεις σφάλματος των φάσεων του συστήματος:

$$I_a = 0 \quad (3.48)$$

$$I_b = -I_c \quad (3.49)$$

$$V_b - V_c = I_b Z_f \Leftrightarrow V_b = V_c + I_b Z_f \quad (3.50)$$

$$V_c - V_b = I_c Z_f \Leftrightarrow V_c = V_b + I_c Z_f \quad (3.51)$$



Σχήμα 3.15: Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων, μέσω αντίστασης Z_f

Τα ακολουθιακά ρεύματα του συστήματος διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \xrightarrow{3.48-3.49} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \begin{cases} I_a^0 = 0 \\ I_a^1 = \frac{1}{3}(a - a^2)I_b \\ I_a^2 = \frac{1}{3}(a^2 - a)I_b \end{cases} \quad (3.52) \end{aligned}$$

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι, κατά τη διάρκεια ενός LL σφάλματος δεν υπάρχουν ρεύματα μηδενικής ακολουθίας

$$I_a^0 = 0 \quad (3.53)$$

με συνέπεια το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας να μην συμμετέχει στη διαμόρφωση του ισοδυναμού κυκλώματος. Επίσης, για τα ρεύματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας ισχύει:

$$I_a^1 = -I_a^2 \quad (3.54)$$

Οι τάσεις b και c εκφράζονται, μέσω των ακολουθιακών τάσεων, ως εξής:

$$V_b = V_a^0 + a^2V_a^1 + aV_a^2 \quad (3.55)$$

$$V_c = V_a^0 + aV_a^1 + a^2V_a^2 \quad (3.56)$$

Το ρεύμα της φάσης b εκφράζεται μέσω ακολουθιακών ρευμάτων:

$$I_b = I_a^0 + a^2I_a^1 + aI_a^2 \quad (3.57)$$

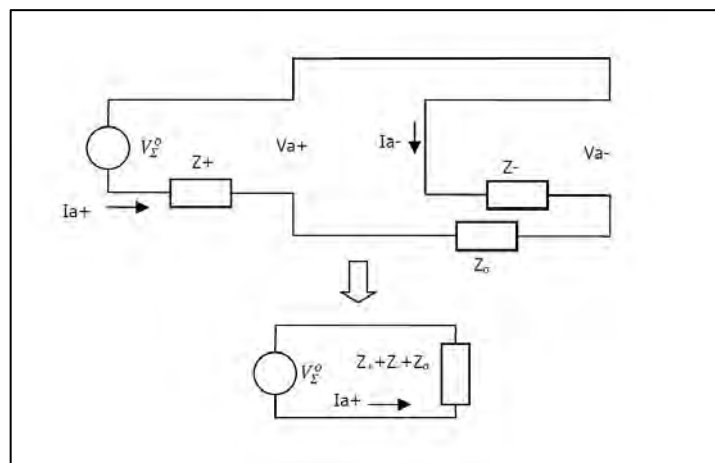
Αντικαθιστώντας τις Σχέσεις 3.54, 3.55 και 3.57 στην 3.50, προκύπτει:

$$V_a^0 + a^2V_a^1 + aV_a^2 = V_a^0 + aV_a^1 + a^2V_a^2 + Z_f(I_a^0 + a^2I_a^1 + aI_a^2) \quad (3.58)$$

Μετά από πράξεις, και από τις Σχέσεις 3.53 και 3.54, προκύπτει:

$$V_a^1 = V_a^2 + I_a^1 Z_f \quad (3.59)$$

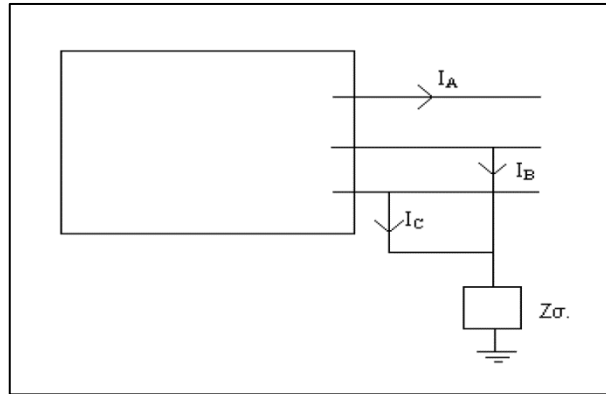
Για την ταυτόχρονη των Σχέσεων 3.53, 3.54 και 3.59, το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας δε συμμετέχει, ενώ τα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας θα συνδεθούν παράλληλα, με την αντίσταση σφάλματος Z_f τοποθετημένη ανάμεσά τους (Σχήμα 3.16). [2]



Σχήμα 3.16: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για LL βραχυκύκλωμα

3.3.10 Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων ως προς γη (LLG)

Το ισοδύναμο κύκλωμα για το βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων ως προς γη (Line to Line to Ground - LLG) παρατίθεται στο Σχήμα 3.17. Τα προσφαλματικά ρεύματα αγνοούνται.



Σχήμα 3.17: Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων ως προς γη, μέσω αντίστασης Z_f

Για τη συγκεκριμένη τοπολογία ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$I_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 = 0 \quad (3.60)$$

$$V_b = V_c \quad (3.61)$$

$$V_b = V_c = (I_b + I_c)Z_f = I_f Z_f \quad (3.62)$$

Από τις εκφράσεις των τάσεων b και c μέσω ακολουθιακών τάσεων (Σχέσεις 3.55 και 3.56) και τη Σχέση 3.61, προκύπτει για τις τάσεις των φάσεων b και c:

$$V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 = V_a^0 + a V_a^1 + a^2 V_a^2 \Leftrightarrow$$

$$V_a^1 = V_a^2 \quad (3.63)$$

Κάνοντας χρήση των συμμετρικών συνιστωσών, τα ρεύματα των φάσεων b και c διαμορφώνονται ως εξής:

$$I_b = I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 \quad (3.64)$$

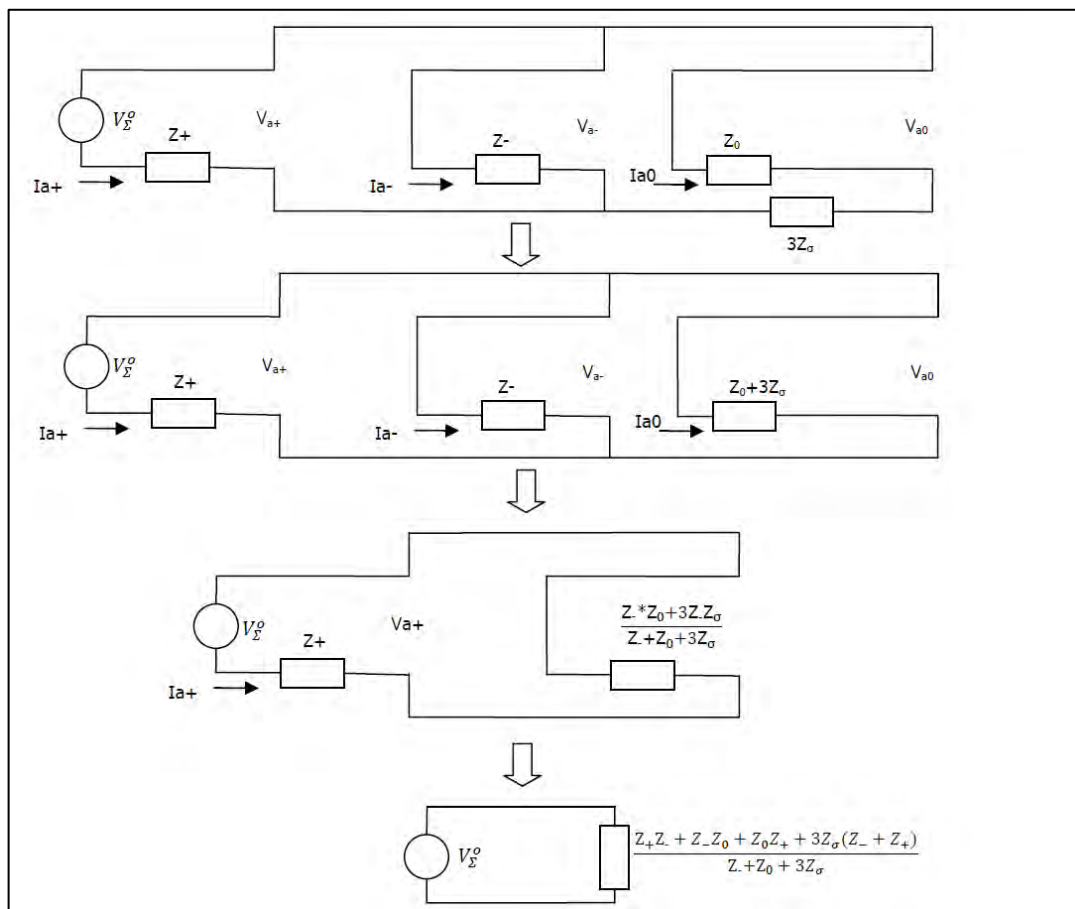
$$I_c = I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2 \quad (3.65)$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω στη σχέση 3.62 προκύπτει:

$$V_a^0 + a^2 V_a^1 + a V_a^2 = (I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2 + I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2) Z_f$$

$$\xrightarrow{3.60-3.63} V_a^0 - V_a^1 = 3I_a^0 Z_f \quad (3.66)$$

Για την ταυτόχρονη ικανοποίηση των σχέσεων 3.60, 3.63 και 3.66, τα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας συνδέονται παράλληλα, ενώ παράλληλα με αυτά συνδέεται και το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας, σε σειρά με την αντίσταση $3Z_f$ (Σχήμα 3.18). [2]



Σχήμα 3.18: Σύνδεση ακολουθιακών δικτύων για LLG βραχυκύκλωμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Γενικά περί ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (Power System Stability) ορίζεται ως η ικανότητα, 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.

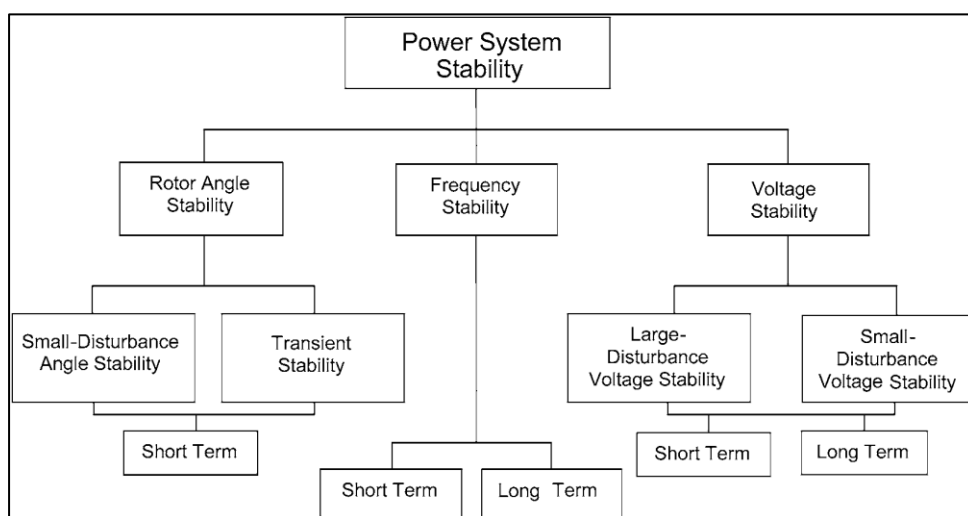
Η μελέτη της ευστάθειας ενός συστήματος διακρίνεται σε ευστάθεια γωνίας δρομέα, τάσης και συχνότητας, ανάλογα με το μέγεθος το οποίο μελετάται, καθώς και σε μεσοπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη, ανάλογα με το χρονικό διάστημα μελέτης της μετά τη διαταραχή (Σχήμα 4.1).

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

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. [5,6,7]

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 στροβίλου 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.

Τα παραπάνω μπορούν να εκφραστούν μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$P_{T\nu} - P_{G\nu} = \frac{d}{dt}(W_{κιν}) + P_{αποσ,ν} \text{ MW} \quad (4.1)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της συνολικής κινητικής ενέργειας γεννήτριας και στροβίλου $\frac{d}{dt}(W_{κιν})$ εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{d}{dt}(W_{κιν}) = \frac{W_{κιν,ν}^0}{\pi f^0} \frac{d^2 \delta_\nu}{dt^2} \text{ MW} \quad (4.2)$$

Όπου $W_{κιν,ν}^0$ η κινητική ενέργεια της μονάδας ν υπό την ονομαστική συχνότητα και δ_ν (rad) η γωνιακή θέση του δρομέα ως προς έναν άξονα αναφοράς που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Ο όρος $P_{αποσ,ν}$ αναφέρεται στην ισχύ που καταναλώνεται στα πηνία απόσβεσης του δρομέα. Τα ρεύματα που επάγονται σε αυτά, κατά τη μεταβολή της ταχύτητας του δρομέα, αναπτύσσουν ροπές που αντιτίθενται στη μεταβολή της ταχύτητας. Μπορεί να θεωρηθεί ότι η αναπτυσσόμενη ροπή ή η ισχύς είναι ανάλογη με τη γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας. Έτσι, ο όρος $P_{αποσ,ν}$ εκφράζεται ως:

$$P_{αποσ,ν} = D_\nu \frac{d\delta_\nu}{dt} \text{ MW} \quad (4.3)$$

Όπου D_ν μια θετική σταθερά της μηχανής (MW*sec/ηλεκτρικά ακτίνια).

Αντικαθιστώντας τις Σχέσεις 4.2 και 4.3 στην 4.1, προκύπτει:

$$P_{T\nu} - P_{G\nu} = \frac{W_{κιν,ν}^0}{\pi f^0} \frac{d^2 \delta_\nu}{dt^2} + D_\nu \frac{d\delta_\nu}{dt} \text{ MW} \quad (4.4)$$

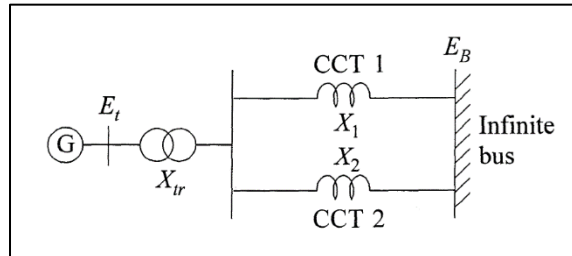
Διαιρώντας την με τη βάση ισχύος της γεννήτριας, δηλαδή την ονομαστική της ισχύ, η παραπάνω σχέση εκφράζεται στο ανά μονάδα σύστημα (pu):

$$P_{T\nu} - P_{G\nu} = \frac{H_\nu}{\pi f^0} \frac{d^2 \delta_\nu}{dt^2} + D_\nu \frac{d\delta_\nu}{dt} \text{ pu MW} \quad (4.5)$$

Ως $H_\nu = \frac{W_{κιν,ν}^0}{S_B}$ sec ορίζεται η σταθερά αδράνειας της μονάδας. Εκφράζει τα MJ της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας της μονάδας στη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα, ανά ονομαστικά MVA. Για τις ατμοστροβιλογεννήτριες, η τιμή της σταθεράς αδράνειας ελαττώνεται με την αύξηση της ονομαστικής ισχύος, ενώ για γεννήτριες έκτυπων πόλων που κινούνται από υδροστροβίλους, εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων. [7, 8]

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

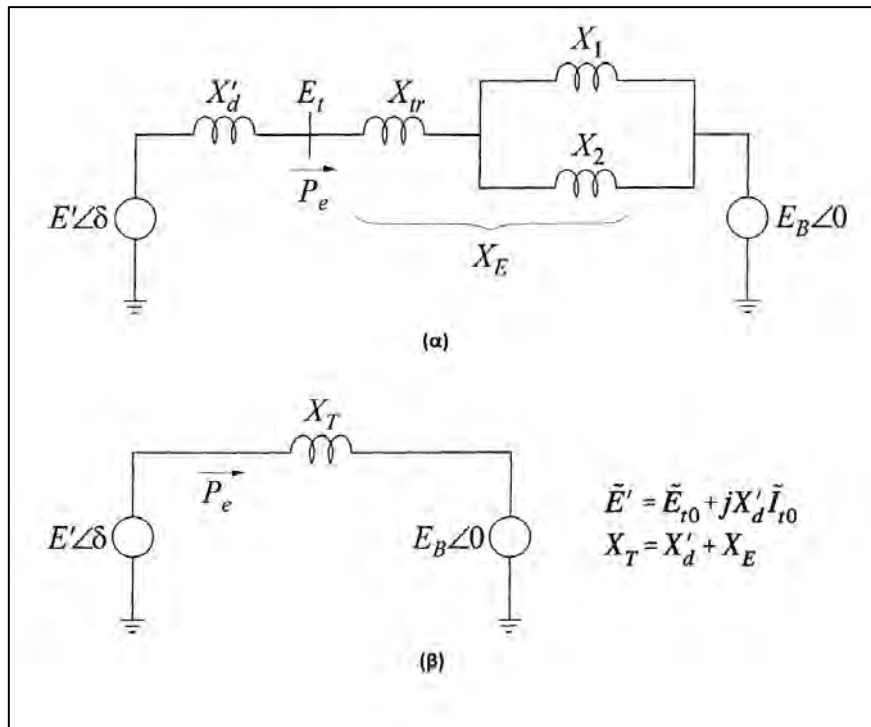
Το ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος, καθώς και η απλοποιημένη του μορφή, παρατίθενται στο Σχήμα 4.3. Κατά τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας, η γεννήτρια αναπαρίσταται από μια πηγή τάσης $E' \angle \delta^\circ$ σε σειρά με τη μεταβατική της αντίδραση X_d' . Η γωνία δ του δρομέα εκφράζει το πόσο προπορεύεται 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:

$$P_e = \frac{E'E_B}{X_T} \sin \delta \quad (4.6)$$

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

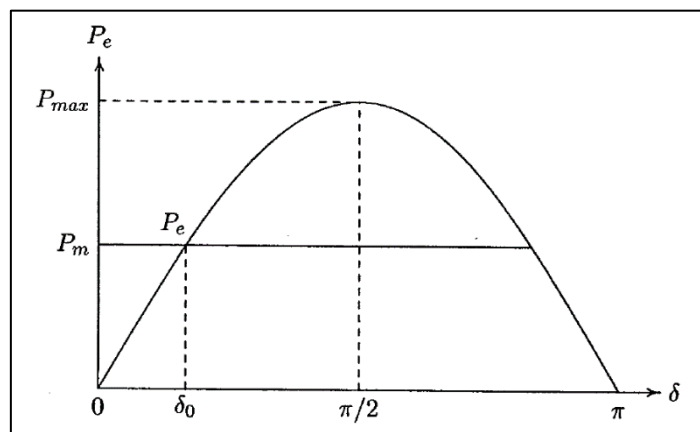
$$P_{max} = \frac{E'E_B}{X_T} \quad (4.7)$$



Σχήμα 4.3: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα

(β) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα

Από τη Σχέση 4.6 προκύπτει ότι, η καμπύλη της ισχύος P_e , συναρτήσει 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 4.7. 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. [6, 7, 8]

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. Άλλη γνωστή μέθοδος, που

όμως δεν είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η μέθοδος του Liapunov.

- 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 τη μόνη πρακτική λύση για τη μελέτη της ευστάθειας πραγματικών συστημάτων. [8]

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.

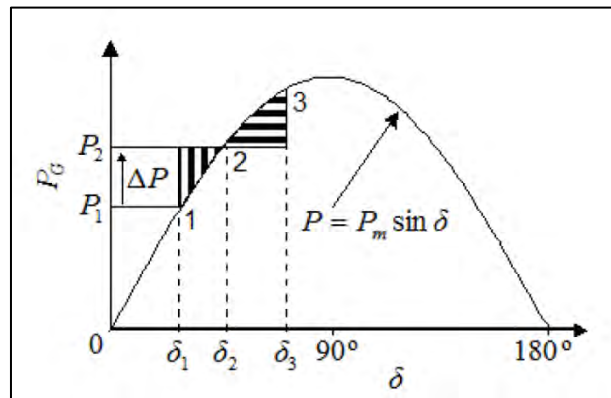
4.5.1 Βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου

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 P_T 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

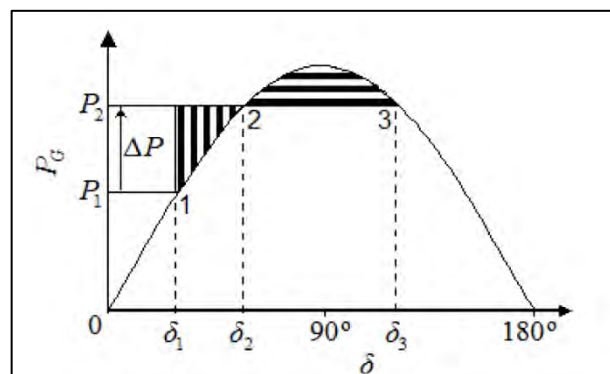
του. Όταν η ισχύς της γεννήτριας γίνει ίση με P_2 ($\delta=\delta_2$), η γεννήτρια έχει ταχύτητα λίγο μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, με αποτέλεσμα η γωνία δ να συνεχίσει να αυξάνεται, μέχρι η ταχύτητα του δρομέα να γίνει ίση με τη σύγχρονη. Αυτό συμβαίνει όταν $\delta=\delta_3$. Ο δρομέας έχει, τότε, επιστρέψει 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 ($\delta=\delta_2$).

Πρέπει να επισημανθεί ότι, για δεδομένη αρχική κατάσταση με γωνία δ_1 , ορίζεται η μέγισ-



Σχήμα 4.5: Κριτήριο ίσων εμβαδών για βηματική αύξηση P_T

στη 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. [7, 8]

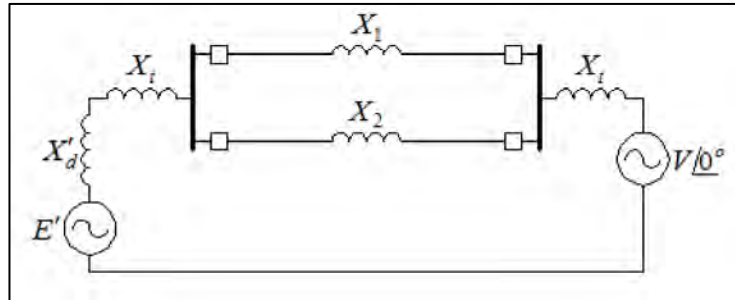


Σχήμα 4.6: Οριακή περίπτωση, όταν $\delta_3=\pi-\delta_2$

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:

$$P_{GI} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + 2X_t + (X_1 || X_2)} \sin \delta \quad (4.8)$$

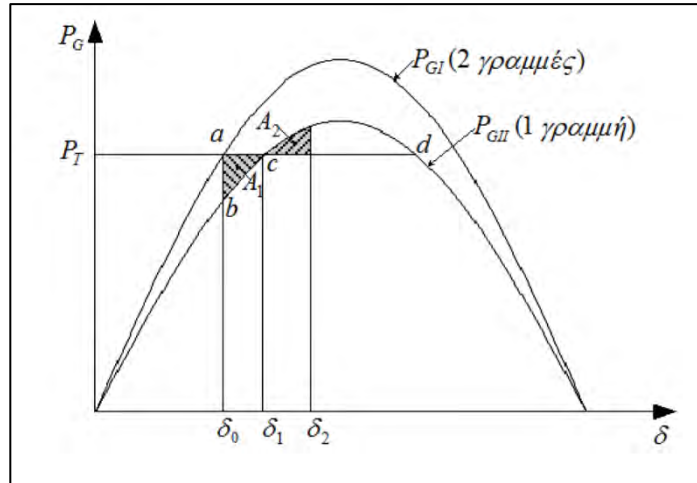


Σχήμα 4.7: Σύνδεση γεννήτριας με άπειρο ζυγό μέσω δύο παράλληλων γραμμών μεταφοράς

Στην περίπτωση που οι διακόπτες της γραμμής L_2 ανοίξουν ταυτόχρονα και η γραμμή αποσυνδεθεί από το σύστημα, η ισχύς προς το ζυγό διοχετεύεται αποκλειστικά από τη γραμμή L_1 , με αποτέλεσμα την ελάττωσή της:

$$P_{GII} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + 2X_t + X_1} \sin \delta \quad (4.9)$$

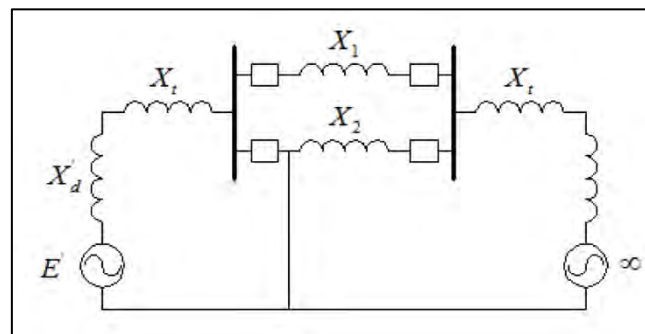
Οι καμπύλες των Σχέσεων 4.8 και 4.9 απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8. Το αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος ορίζεται για P_T , με γωνία δ_0 . Με την αποσύνδεση της γραμμής L_2 , η παρεχόμενη ισχύς αντιστοιχεί πλέον στο b της P_{GII} . Λόγω του ότι η ισχύς εισόδου της γεννήτριας από τον στρόβιλο παραμένει σταθερή, η γωνία δ θα αυξηθεί. Η ενέργεια για την επιτάχυνση του δρομέα αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν A_1 , ενώ η ενέργεια για την ακόλουθη σταδιακή επιβράδυνσή του, από το εμβαδόν A_2 . 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 A_2 δε δύναται να είναι ίσο με το A_1 . Η τιμή αυτή της ισχύος αντιστοιχεί σε γωνία δ_2 , που βρίσκεται στην τομή του P_T και της καμπύλης P_{GII} , δηλαδή για $\delta_2 = \pi - \delta_1$. [8]



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.

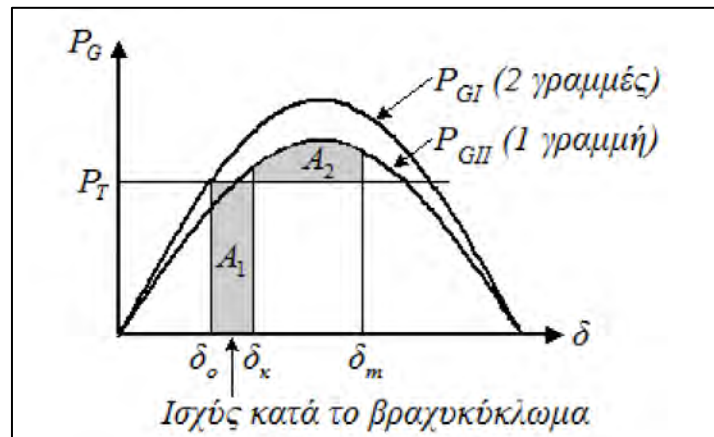


Σχήμα 4.9: Τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ένα άκρο της γραμμής

Στο Σχήμα 4.10, η P_{GI} είναι η καμπύλη πριν το βραχυκύκλωμα. Με την απομόνωση του σημείου του βραχυκυκλώματος, η ισχύς παρέχεται στον άπειρο ζυγό μέσω της γραμμής L_1 (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

πρέπει να εκκαθαριστεί νωρίτερα από αυτήν, καθώς η υπέρβασή της επιφέρει αστάθεια. 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.

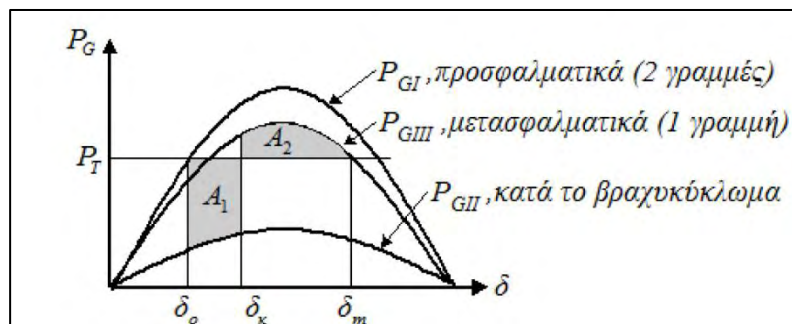
Στην περίπτωση που το είδος του βραχυκυκλώματος επιτρέπει μια περιορισμένη παροχή



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

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 : [7,8]

$$\delta_k = \cos^{-1} \frac{P_T(\delta_m - \delta_0) - P_{mII} \cos \delta_0 + P_{mIII} \cos \delta_m}{P_{mIII} - P_{mII}} \quad (4.10)$$



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 E_B , τον οποίο η γεννήτρια τροφοδοτεί. [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Οι επενδύσεις που πραγματοποιούνται στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, αναφορικά με την αναβάθμιση και την επέκτασή τους, είναι πολύ μεγάλες. Λόγω του υψηλού κόστους που χαρακτηρίζει τον εξοπλισμό τους, είναι απαραίτητο να ληφθούν κατάλληλα μέτρα για την προστασία των συστημάτων από τυχόν σφάλματα, καθώς η μη έγκαιρη αντιμετώπιση ενός βραχυκυκλώματος ενδέχεται να έχει καταστροφικά αποτελέσματα στις συνιστώσες του δικτύου. Τέτοια σφάλματα δεν προκαλούνται μόνο από ανθρώπινο λάθος ή αστοχία υλικού, αλλά και από ακραία καιρικά φαινόμενα.

Για τον εντοπισμό και την απομόνωση των σφαλμάτων χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι προστασίας, οι οποίοι, μέσω της διαρκούς επιτήρησης κατάλληλων μεγεθών του συστήματος, ενεργοποιούν τους αντίστοιχους διακόπτες ισχύος. Έτσι, αποσυνδέονται, όσο το δυνατόν γρηγορότερα, τα τμήματα του δικτύου που έχουν υποστεί σφάλμα, περιορίζοντας τις επιπτώσεις της διαταραχής στο υπόλοιπο υγιές σύστημα. Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας επιβάλλεται να ικανοποιούν τις παρακάτω σημαντικές απαιτήσεις:

1. Υψηλός βαθμός αξιοπιστίας.
2. Ικανοποιητική ευαισθησία, η οποία ορίζει το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης που μπορεί να ενεργοποιήσει τον ηλεκτρονόμο, μέσα στη ζώνη του συστήματος που επιτηρεί.
3. Επιλεκτικότητα, η ικανότητα δηλαδή να διακρίνει ένα βραχυκύκλωμα που εμφανίζεται στη ζώνη εποπτείας του, από ένα που εκδηλώνεται σε άλλη ζώνη.
4. Μεγάλη ταχύτητα απόκρισης, η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο, όχι μόνο στην ελαχιστοποίηση των καταστροφικών συνεπειών των σφαλμάτων στο υπόλοιπο σύστημα, αλλά και στην αποφυγή του αποσυγχρονισμού των σύγχρονων γεννητριών.

Οι ηλεκτρονόμοι πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνουν τις συνθήκες μεταξύ φαινομένων σφάλματος, ευσταθών ταλαντώσεων ισχύος, καθώς και συνθηκών αποσυγχρονισμού. Είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί, όχι μόνο ότι θα ενεργοποιήσουν τους κατάλληλους διακόπτες για την εκκαθάριση ενός σφάλματος, αλλά και ότι δε θα προκαλέσουν ανεπιθύμητο άνοιγμα διακοπών κατά τη διάρκεια ευσταθών ταλαντώσεων ισχύος. Σε αυτή την

περίπτωση, η απομόνωση από το δίκτυο στοιχείου που δεν έχει υποστεί σφάλμα, ενδέχεται να οδηγήσει στην αποδυνάμωση του συστήματος και στην εμφάνιση αστάθειας.

Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι οι ηλεκτρονόμοι προστασίας παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της μεταβατικής ευστάθειας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, διατηρώντας τον συγχρονισμό τους κατά τη διάρκεια των σοβαρών διαταραχών. Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητη η σωστή επιλογή και διαστασιολόγησή τους, για αποτελεσματικότερη και γρηγορότερη απόκριση όταν απαιτηθεί, ιδιαίτερα ηλεκτρονόμων προστασίας που εποπτεύουν γραμμές μεταφοράς και γεννήτριες. [6, 9]

5.2 Αρχές λειτουργίας ηλεκτρονόμων προστασίας

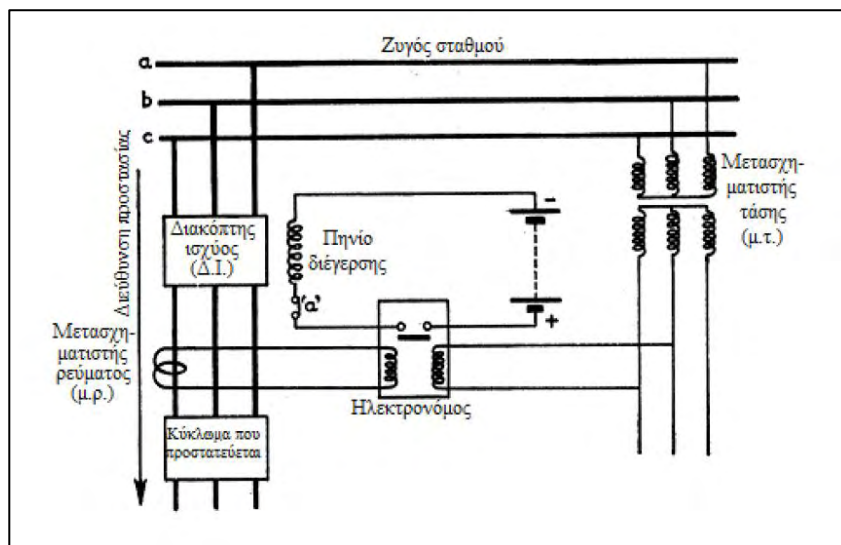
Οι ηλεκτρονόμοι, που χρησιμοποιούνται για την προστασία από βραχυκυκλώματα και άλλους τύπους σφαλμάτων, ενεργοποιούνται από κάποιο ρεύμα ή τάση ή συνδυασμό και των δύο, που λαμβάνουν μέσω μετασχηματιστών ρεύματος ή τάσης, από το τμήμα του συστήματος που εποπτεύουν. Ανάλογα με το είδος του βραχυκυκλώματος, αλλά και τη θέση που εμφανίζεται στο σύστημα, ορίζεται μια χαρακτηριστική διαφορά στις προαναφερθείσες ποσότητες ρεύματος ή τάσης, που λαμβάνει ο ηλεκτρονόμος. Διαφορές εντοπίζονται σε ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω μεγέθη, που χαρακτηρίζουν το ρεύμα και την τάση:

- Μέτρο.
- Συχνότητα.
- Φασική γωνία.
- Διάρκεια.
- Ρυθμός μεταβολής.
- Διεύθυνση ή διαδοχή των μεταβολών.
- Αρμονικές ή κυματομορφή.

Ανάλογα με τον τύπο του, κάθε ηλεκτρονόμος αναγνωρίζει μια από τις προαναφερθείσες διαφορές του ρεύματος ή της τάσης, και αντιδρά αποκρινόμενος σε αυτή.

Ουσιαστικά, ένας ηλεκτρονόμος προστασίας εποπτεύει διαρκώς ένα τμήμα του δικτύου, μετρώντας τις ηλεκτρικές ποσότητες που λαμβάνει από αυτό. Σε περίπτωση που η

μετρούμενη ποσότητα λάβει τιμή ασυνήθιστη για φυσιολογική λειτουργία, ενεργοποιεί τους διακόπτες ισχύος που ελέγχει, ώστε να αποσυνδεθεί το τμήμα που προστατεύει. Μια τυπική συνδεσμολογία σύνδεσης ηλεκτρονόμου προστασίας και του αντίστοιχου διακόπτη ισχύος παρατίθεται στο Σχήμα 5.1. Ο ηλεκτρονόμος είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο μέσω μετασχηματιστή τάσης. Όταν κλείσουν οι επαφές του, λόγω κάποιας διαταραχής στο δίκτυο, ο μεγάλος λόγος L/R του πηνίου διέγερσης (ή ενεργοποίησης) καθυστερεί την γρήγορη αύξηση του ρεύματος και ο διακόπτης ισχύος ανοίγει, πριν το ρεύμα φτάσει στην ονομαστική του τιμή. Το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας των επαφών των ηλεκτρονόμων είναι της τάξεως των 5A, ενώ του πηνίου 30A. Μόλις ενεργοποιηθεί ο διακόπτης ισχύος και αποσυνδεθεί το κύκλωμα που προστατεύεται, ανοίγει ο βοηθητικός διακόπτης «α», ούτως ώστε ο ηλεκτρονόμος να επανέλθει στην κανονική του κατάσταση, από την αποδιέγερση που τέθηκε με το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος. [6, 9]



Σχήμα 5.1: Συνδεσμολογία σύνδεσης ηλεκτρονόμου προστασίας

5.3 Ηλεκτρονόμοι προστασίας γραμμών μεταφοράς

Υπάρχουν πολλές πρακτικές και τύποι ηλεκτρονόμων, που χρησιμοποιούνται από τους διαχειριστές του δικτύου, για την προστασία των γραμμών μεταφοράς ενός ΣΗΕ. Η επιλογή της καταλληλότερης πρακτικής γίνεται βάσει παραγόντων που χαρακτηρίζουν την εκάστοτε γραμμή, όπως:

- Ο τύπος κυκλώματος της γραμμής (μονή, παράλληλες γραμμές, πολυτεματική), καθώς και η στάθμη των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.
- Η λειτουργία και η επίδρασή της στην ομαλή τροφοδότηση των φορτίων, παράμετροι δηλαδή που καθορίζουν την ταχύτητα που πρέπει να εκκαθαριστεί ένα σφάλμα.
- Οι απαιτήσεις συντονισμού και προσαρμογής.

Η προστασία μιας γραμμής μεταφοράς δύναται να επιτελεστεί μέσω:

1. Ηλεκτρονόμων Υπερέντασης (Overcurrent Relaying).
2. Ηλεκτρονόμων Απόστασης (Distance Relaying).
3. Ηλεκτρονόμων Οδηγού (Pilot Relaying).

Στη συνέχεια της ενότητας αυτής, θα αναλυθούν οι προαναφερθέντες τύποι προστασίας. [6, 9]

5.3.1 Προστασία με ηλεκτρονόμους υπερέντασης

Η προστασία γραμμών μέσω ηλεκτρονόμων υπερέντασης είναι η απλούστερη και φθηνότερη από τις μεθόδους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι ηλεκτρονόμοι που χρησιμοποιούνται είναι στιγμιαίας (Instantaneous Overcurrent Relays) και χρονικής υπερέντασης (Time Overcurrent Relays). Στους ηλεκτρονόμους υπερέντασης, ο χρόνος λειτουργίας είναι αντιστρόφως ανάλογος με την ένταση του ρεύματος του τμήματος που εποπτεύει. Έτσι, ο ηλεκτρονόμος που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο του βραχυκυκλώματος, όπου το ρεύμα έχει και την υψηλότερη τιμή, θα ενεργοποιηθεί ταχύτατα, ανοίγοντας τον διακόπτη ισχύος για την εκκαθάριση του σφάλματος, πριν προλάβουν να ενεργοποιηθούν οι πιο απομακρυσμένοι ηλεκτρονόμοι. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει γενικότερα δυσκολία στην εφαρμογή, λόγω του ότι αδυνατεί να ξεχωρίσει τα ρεύματα φόρτισης από τα σφάλματος, ενώ, συνήθως, απαιτεί αλλαγή στις ρυθμίσεις ή ακόμα και αντικατάσταση, όταν αλλάζει η τοπολογία του δικτύου ή οι συνθήκες φόρτισης. Η χρήση της αποφεύγεται σε γραμμές που η επιλεκτικότητα, η διατήρηση του συντονισμού αλλά και η ταχύτητα απόκρισης σε σφάλματα αποτελούν σημαντικά ζητήματα. Χρησιμοποιείται, κυρίως, σε συστήματα υπομεταφοράς και σε ακτινικά δίκτυα διανομής, καθώς, σφάλματα στα συστήματα αυτά, συνήθως

δεν επηρεάζουν την ευστάθεια του συστήματος, και δεν απαιτείται ταχεία προστασία.
[6,9]

5.3.2 Προστασία με ηλεκτρονόμους απόστασης

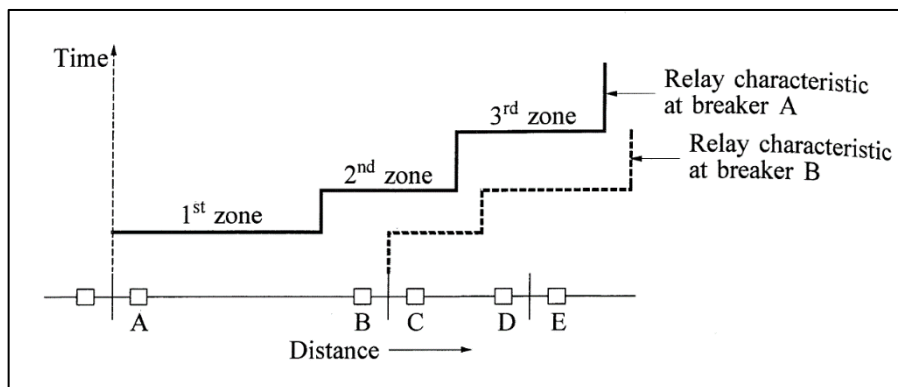
Η προστασία γραμμής με ηλεκτρονόμους απόστασης χρησιμοποιείται όταν η χρονική καθυστέρηση, για την εκκαθάριση του σφάλματος, δεν είναι αποδεκτή. Ένας ηλεκτρονόμος απόστασης είναι σχεδιασμένος να αποκρίνεται σε δεδομένο λόγο μετρούμενης τάσης προς ρεύμα, ο οποίος εκφράζει τη σύνθετη αντίσταση από το σημείο του ηλεκτρονόμου μέχρι το σημείο του βραχυκυκλώματος. Καθότι η σύνθετη αντίσταση είναι ανάλογη του μήκους μιας γραμμής, αποτελεί ένα μέτρο για την απόστασης κατά μήκος της. Ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται όταν ο λόγος αυτός είναι μικρότερος από την τιμή που είναι ρυθμισμένος, δηλαδή για βραχυκυκλώματα που λαμβάνουν χώρα εντός της γραμμής που προστατεύει. Η επιλεκτικότητα επιτυγχάνεται μέσω του περιορισμού της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, εντός ενός ορισμένου εύρους τιμών σύνθετης αντίστασης.

Οι τύποι ηλεκτρονόμων απόστασης, που χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών μεταφοράς, είναι οι ακόλουθοι:

- Σύνθετης αντίστασης (Impedance Relays).
- Επαγωγικής αντίδρασης (Reactance Relays).
- Σύνθετης αγωγιμότητας (Mho Relays).
- Τροποποιημένοι ηλεκτρονόμοι σύνθετης αγωγιμότητας και αντίστασης, καθώς και συνδυασμοί τους.

Οι ηλεκτρονόμοι απόστασης αποτελούν την πιο δημοφιλή μέθοδο για την προστασία των γραμμών μεταφοράς των ΣΗΕ, καθώς χαρακτηρίζονται από γρήγορη απόκριση στην εμφάνιση σφάλματος, αλλά και επειδή τυχόν μεταβολές των συνθηκών του συστήματος δεν τους επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό.

Είναι σύνηθες, οι ηλεκτρονόμοι απόστασης να παρέχουν προστασία σε τρεις ζώνες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Η πρώτη και η δεύτερη ζώνη παρέχουν πρωτεύουσα προστασία (primary protection) στη γραμμή, ενώ η τρίτη ζώνη απομακρυσμένη εφεδρική προστασία (remote backup) στη γειτονική γραμμή. Με αφετηρία το σημείο A, η πρώτη ζώνη παρέχει προστασία μεγάλης ταχύτητας για το περίπου 80% της γραμμής AB, χωρίς χρονική καθυστέρηση, με τον χρόνο λειτουργίας της να διαμορφώνεται κοντά στα 20 msec. Η δεύτερη ζώνη καλύπτει όχι μόνο τη γραμμή AB, αλλά μέχρι και το 20% της επόμενης γειτονικής CD. Λόγω του γεγονότος αυτού, απαιτείται μια καθυστέρηση της τάξεως των 0,3 έως 0,5 sec στους ηλεκτρονόμους της δεύτερης ζώνης, προκειμένου να υπάρχει χρονικός συντονισμός με τους αντίστοιχους της πρώτης ζώνης της γραμμής CD. Τέλος, η τρίτη ζώνη παρέχει εφεδρική προστασία στη γραμμή CD και παρουσιάζει χρονική καθυστέρηση 1 με 2 sec σε σχέση με την πρωτεύουσα προστασία της γραμμής CD. Αντίστοιχη τοπολογία παρέχεται και από το σημείο B, για την επιτήρηση της γραμμής AB προς την αντίθετη κατεύθυνση. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται, στην περίπτωση σφάλματος, το άνοιγμα των διακοπών και στα δύο άκρα της γραμμής AB.



Σχήμα 5.2: Βηματικά χρονικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονόμων απόστασης

Σε κάθε άκρο μιας γραμμής τοποθετούνται, συνήθως, δύο ομάδες ηλεκτρονόμων απόστασης: η πρώτη για προστασία από σφάλματα μεταξύ φάσεων και η δεύτερη από σφάλματα γης.

Όσον αφορά τη συσχέτιση του μήκους γραμμής με τον τύπο ηλεκτρονόμου απόστασης που χρησιμοποιείται, για μικρού μήκους γραμμές επιλέγονται ηλεκτρονόμοι τύπου

επαγωγικής αντίδρασης, ενώ για μεγάλου μήκους προτιμώνται οι τύπου σύνθετης αγωγιμότητας.

Γενικότερα, η προστασία γραμμών μεταφοράς μέσω ηλεκτρονόμων απόστασης αποδεικνύεται αξιόπιστη σε πολλές περιπτώσεις. Παρόλα αυτά, οι χρονικές καθυστερήσεις, που παρατηρούνται μεταξύ των διαφόρων ζωνών προστασίας, δεν επιτρέπουν το ταυτόχρονο άνοιγμα των διακοπών και στα δύο άκρα μιας γραμμής. Αν μάλιστα η γραμμή είναι σημαντική, η καθυστέρηση μεταξύ του ανοίγματος των διακοπών στα άκρα της, δύναται να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα στην ευστάθεια του συστήματος, καθώς και στην αποκατάσταση της ομαλής του λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, η προστασία με ηλεκτρονόμους απόστασης δεν χρησιμοποιείται σε γραμμές, όπου η ταυτόχρονη απόζευξη και των δύο άκρων τους είναι υψίστης σημασίας για τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, επιλέγεται η μέθοδος με ηλεκτρονόμους οδηγού, η οποία και θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα. [6, 9]

5.3.3 Προστασία με ηλεκτρονόμους οδηγού

Τα συστήματα προστασίας γραμμών μεταφοράς με ηλεκτρονόμους οδηγού χρησιμοποιούν τηλεπικοινωνιακά κανάλια, προκειμένου να διασυνδέσουν τους τερματικούς σταθμούς της γραμμής που προστατεύουν. Οι ηλεκτρονόμοι, που βρίσκονται σε κάθε τερματικό σταθμό, προσδιορίζουν αν το σφάλμα που εκδηλώθηκε είναι εντός ή εκτός της γραμμής που εποπτεύουν, μεταδίδοντας, στη συνέχεια, την πληροφορία, μέσω του καναλιού διασύνδεσης (pilot) στους υπόλοιπους τερματικούς σταθμούς. Αξιολογώντας την πληροφορία που λαμβάνουν, οι ηλεκτρονόμοι δρουν ανάλογα, για την προστασία της γραμμής. Έτσι, στην περίπτωση ενός σφάλματος εντός της γραμμής, δίνεται εντολή στους διακόπτες ισχύος όλων των τερματικών σταθμών να ανοίξουν, για την απόζευξη της γραμμής. Αντίθετα, στην περίπτωση που το σφάλμα λαμβάνει χώρα εκτός της προστατευόμενης γραμμής, η αντίστοιχη εντολή αποτρέπει την απόζευξή της.

Ως τηλεπικοινωνιακό κανάλι, για τη διασύνδεση των τερματικών σταθμών της γραμμής, χρησιμοποιούνται οδηγοί σύρματος (Wire Pilot), φέροντος-ρεύματος (Carrier-Current Pilot), καθώς και μικροκυματικοί οδηγοί (Microwave Pilot). Στην περίπτωση που οι ηλεκτρονόμοι είναι ψηφιακοί, για τη μετάδοση της πληροφορίας, δύναται να χρησιμοποιηθεί

οδηγός οπτικών ινών. Οι οδηγοί σύρματος αποτελούν μια οικονομική λύση για γραμμές μικρού μήκους, κυρίως σε αστικές περιοχές, ενώ, για μεγαλύτερες αποστάσεις, επιλέγονται οι φέροντος ρεύματος. Οι μικροκυματικοί οδηγοί χρησιμοποιούνται όταν το πλήθος των διακινούμενων πληροφοριών, μεταξύ των τερματικών σταθμών, ξεπερνά τις δυνατότητες που προσφέρουν οι φέροντος ρεύματος.

Τα συστήματα ηλεκτρονόμων οδηγού κατηγοριοποιούνται βάσει του τρόπου που αξιοποιούν το μεταδιδόμενο σήμα, καθώς και από τη μέθοδο που εφαρμόζουν για την ανίχνευση των σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα, το σήμα του καναλιού δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εμπλοκή (blocking), την απελευθέρωση (unblocking) ή τη μεταφορά μιας λειτουργίας απόζευξης. Σε ένα σύστημα εμπλοκής, το μεταδιδόμενο σήμα εμποδίζει τους τοπικούς ηλεκτρονόμους, που κανονικά θα οδηγούσαν σε απόζευξη έναν διακόπτη ισχύος, να κάνουν την απόζευξη αυτή. Στα συστήματα μεταφοράς της απόζευξης, μεταδίδεται σήμα προς τους ηλεκτρονόμους στην άλλη άκρη της γραμμής, για την απόζευξη των διακοπών ισχύος αυτού του άκρου. Ένα σύστημα απελευθέρωσης αποτελεί συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων, καθώς αποτρέπεται η λειτουργία απόζευξης στους τοπικούς ηλεκτρονόμους, ενώ, όταν είναι απαραίτητο, το σήμα του καναλιού διασύνδεσης απελευθερώνει τη λειτουργία απόζευξης στους απομακρυσμένους τερματικούς σταθμούς. Στην περίπτωση απώλειας του διαύλου επικοινωνιών, οι τοπικοί ηλεκτρονόμοι δύνανται να αποζεύξουν τους αντίστοιχους διακόπτες ισχύος, προκειμένου να προστατεύσουν τη γραμμή από σφάλματα που ενδέχεται να εμφανιστούν, όσο δεν λειτουργεί το κανάλι. Όσον αφορά την ανίχνευση της τοποθεσίας του σφάλματος, την εξακρίβωση δηλαδή αν αυτό συμβαίνει εντός ή εκτός της γραμμής που προστατεύεται, αυτή βασίζεται, ανάλογα με το είδος των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρονόμων, είτε στην αρχή της κατευθυντικής σύγκρισης, είτε σε αυτή της σύγκρισης φάσης. Όταν εφαρμόζεται η αρχή της κατευθυντικής σύγκρισης, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι απόστασης, καθώς και κατευθυντικοί, για τον εντοπισμό εσωτερικών και εξωτερικών σφαλμάτων, ενώ στην αρχή σύγκρισης της φάσης, η θέση του σφάλματος προσδιορίζεται μέσω της σύγκρισης της σχετικής μετατόπισης της φάσης των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται της γραμμής που εμποτεύεται. Γενικότερα, τα συστήματα προστασίας οδηγού, αξιοποιούν κάποιον συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων.

Συνοψίζοντας, η προστασία οδηγού αποτελεί τον αποτελεσματικότερο τρόπο πρωτεύουσας προστασίας των γραμμών μεταφοράς, καθώς προσφέρει υψηλή ταχύτητα αντίδρασης για όλα τα είδη βραχυκυκλωμάτων, για κάθε θέση που αυτά ενδέχεται να εκδηλωθούν. Με τη μέθοδο αυτή, επιτυγχάνεται το ταυτόχρονο άνοιγμα και κλείσιμο των διακοπών ισχύος στα άκρα της εκάστοτε γραμμής, γεγονός που επιτρέπει τη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς κοντά στο όριο της μεταβατικής του ευστάθειας, με αποτέλεσμα τη βέλτιστη χρησιμοποίησή του. [6, 9]

5.4 Εκκαθάριση σφαλμάτων

Όταν ένα στοιχείο του δικτύου, όπως μια γραμμή, υποστεί σφάλμα, ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι προστασίας, οι οποίοι με τη σειρά τους δίνουν εντολή απόζευξης στους διακόπτες ισχύος που ελέγχουν, προκειμένου το στοιχείο αυτό να απομονωθεί από το υπόλοιπο σύστημα.

Ο συνολικός χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος ισούται με τον χρόνο αντίδρασης των ηλεκτρονόμων και τον χρόνο διακοπής του κυκλώματος από τους διακόπτες ισχύος. Ως χρόνος αντίδρασης των ηλεκτρονόμων ορίζεται το χρονικό διάστημα από την εμφάνιση του ρεύματος βραχυκύκλωσης, μέχρι την αποστολή σήματος στον διακόπτη ισχύος, για την απόζευξη του στοιχείου, ενώ ως χρόνος διακοπής, το χρονικό διάστημα από την στιγμή που το σήμα απόζευξης ενεργοποιεί τον διακόπτη, μέχρι τη διακοπή του ρεύματος που τον διαρρέει και την τελική απομόνωση του στοιχείου. Οι χρόνοι αντίδρασης των ηλεκτρονόμων, που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς Υψηλής και Υπερυψηλής Τάσης των ΣΗΕ, εντοπίζονται σε ένα εύρος από 15 έως 30 msec, ενώ οι αντίστοιχοι για τη διακοπή των διακοπών ισχύος, από 30 έως 70 msec.

Οι διακόπτες ισχύος, που τοποθετούνται σε κρίσιμες θέσεις μέσα στο σύστημα μεταφοράς, είναι εφοδιασμένοι με εφεδρική προστασία, σε περίπτωση που προκύψει τοπική αστοχία στη λειτουργία τους. Έτσι, όταν ένας διακόπτης αποτύχει να ενεργοποιηθεί και να ανοίξει, αποστέλλεται, μέσω διαύλου επικοινωνίας, σήμα απόζευξης προς τους ηλεκτρονόμους γειτονικών ζωνών προστασίας, καθώς και σήμα μεταφοράς απόζευξης στους ηλεκτρονόμους των άλλων τερματικών σταθμών της γραμμής.

Το μεγαλύτερο ποσοστό, περίπου 60 με 80%, των σφαλμάτων που συμβαίνουν σε εναέριες γραμμές μεταφοράς, αποτελούν παροδικά σφάλματα. Μια τέτοια περίπτωση είναι η υπερπήδηση (flashover) σε έναν μονωτήρα, η οποία προκαλείται λόγω την υψηλών μεταβατικών τάσεων, που συνήθως δημιουργούν οι κεραυνοί. Για την αντιμετώπιση μιας τέτοιας διαταραχής, η γραμμή αποσυνδέεται από το δίκτυο, για ένα ικανό χρονικό διάστημα, ώστε να απομακρυνθεί η πηγή του σφάλματος και να απιονιστεί το τόξο που δημιουργήθηκε. Με το σφάλμα να έχει πλέον εκκαθαριστεί, η γραμμή μπορεί να συνδεθεί και πάλι στο σύστημα. Η διαδικασία που αναφέρθηκε μόλις, ονομάζεται αυτόματη επαναφορά ή επανακλείσιμο (Reclosure) των διακοπών ισχύος και αποτελεί μια συνήθη πρακτική στα ΣΗΕ. Η επαναφορά της γραμμής πραγματοποιείται είτε σε έναν κύκλο (μία προσπάθεια) είτε σε περισσότερους κύκλους (αρκετές προσπάθειες), με χρονική καθυστέρηση μεταξύ των προσπαθειών. Στην περίπτωση που το σφάλμα δεν έχει εκκαθαριστεί, με την παρέλευση δύο ή τριών προσπαθειών, ο διαχειριστής του συστήματος δοκιμάζει τη χειροκίνητη επαναφορά του διακόπτη. Αποτυχία της ενέργειας αυτής, καταδεικνύει ότι το σφάλμα είναι μόνιμο, γεγονός που απαιτεί να τεθεί η γραμμή εκτός συστήματος, ώστε να ακολουθήσει ο επιτόπιος έλεγχος και η επιδιόρθωσή της.

Ως ταχεία επαναφορά γραμμής (High-Speed Reclosure) ορίζεται το κλείσιμο των διακοπών ισχύος μιας γραμμής, μετά από τον ελάχιστο απαιτούμενο χρόνο για τον απιονισμό του τόξου του σφάλματος. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται, συνήθως, σε χρόνο λιγότερο του ενός δευτερολέπτου. Παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα για το σύστημα, όσον αφορά την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας δημιουργίας λειτουργικών προβλημάτων, καθώς και τη μείωση της επίδρασης μιας διακοπής της γραμμής στην τροφοδότηση κρίσιμων φορτίων, λόγω του γεγονότος ότι επιτρέπει την εύκολη επαναφορά του συστήματος στη φυσιολογική του λειτουργία. Παρόλα αυτά, η ταχεία επαναφορά δεν είναι πάντοτε η ενδεδειγμένη μέθοδος σε όλες τις περιπτώσεις. Στην περίπτωση ενός μόνιμου σφάλματος, ενδέχεται να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια, ενώ η εφαρμογή της σε γραμμές κοντά σε σταθμούς παραγωγής με αεριοστροβίλους, δύναται να προκαλέσει καταπόνηση στους άξονες των στροβίλων. Γενικότερα, αρκετοί είναι οι διαχειριστές δικτύου, οι οποίοι ενεργούν με την παραδοχή ότι όλα τα σφάλματα που εμφανίζονται είναι μόνιμης φύσεως, οπότε το σύστημα θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να ανταπεξέλθει στην επαναφορά της γραμμής, υπό συνθήκες μόνιμου σφάλματος.

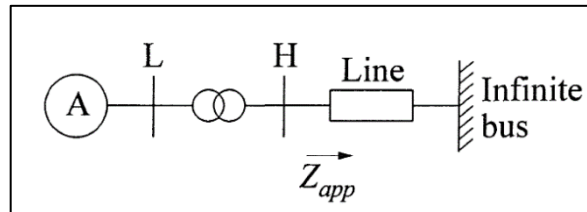
Η αυτόματη επαναφορά γραμμής αποτελεί, συμπερασματικά, την πλέον διαδεδομένη μέθοδο αντιμετώπισης σφαλμάτων παροδικής φύσης, που εμφανίζονται στο σύστημα μεταφοράς. [6]

5.5 Προστασία γεννητριών

Οι γεννήτριες αποτελούν τις πλέον ακριβές και πολύπλοκες συσκευές ενός ΣΗΕ, με αποτέλεσμα να υπόκεινται συχνά σε πολλούς και διαφορετικούς τύπους σφαλμάτων. Σε μια γεννήτρια, σφάλματα ενδέχεται να εμφανιστούν στα τυλίγματα της, καθώς και στα κινούμενά της μέρη, προκαλώντας σημαντικά προβλήματα, όπως υπερθέρμανση, φθορές, καθώς και μηχανικούς συντονισμούς, προβλήματα τα οποία μπορεί να τη θέσουν μέχρι και εκτός λειτουργίας. Τα σφάλματα αυτά δύνανται να επηρεάσουν τη λειτουργία του δρομέα, του στάτη ή και των δύο. Για το λόγο αυτό, όσο μεγαλύτερη και ακριβότερη είναι μια γεννήτρια, τόσο πιο μεγάλος πρέπει να είναι και ο αριθμός των διαφορετικών συστημάτων προστασίας που είναι εφοδιασμένη.

Ξεκινώντας, μια δικλείδα ασφαλείας που πρέπει να έχει μια γεννήτρια, είναι η προστασία από ενδεχόμενο αποσυγχρονισμό. Κατά τη διάρκεια μιας κατάστασης αποσυγχρονισμού, παρατηρούνται μεγάλες κυκλικές μεταβολές στα ρεύματα και στις τάσεις της γεννήτριας. Η λειτουργία μιας γεννήτριας με μεγάλα ρεύματα, συχνότητας διαφορετικής της ονομαστικής, ενδέχεται να οδηγήσει, όχι μόνο σε καταπόνηση των τυλιγμάτων της, αλλά και στην εμφάνιση μηχανικών κραδασμών, επικίνδυνων για τη λειτουργία της. Ενέχει, επίσης, ο κίνδυνος απώλειας των βοηθητικών συστημάτων όχι μόνο της αποσυγχρονισμένης γεννήτριας, αλλά και γειτονικών ευσταθών γεννητριών. Για την αποφυγή των αρνητικών αυτών συνεπειών, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενός ηλεκτρονόμου προστασίας αποσυγχρονισμού, ο οποίος, όταν χρειαστεί, θα ενεργοποιήσει τον διακόπτη ισχύος της γεννήτριας, για την άμεση αποσύνδεσή της από το δίκτυο. Η απόξευση αυτή θα επιτρέψει τον επανασυγχρονισμό της γεννήτριας, μόλις η κατάστασή της ομαλοποιηθεί, προκειμένου να ενταχθεί ξανά στο σύστημα. Τα συστήματα προστασίας αποσυγχρονισμού που χρησιμοποιούνται στις γεννήτριες, ομοιάζουν με εκείνα που χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς για αντίστοιχες περιπτώσεις. Μία συνήθης μέθοδος που εφαρμόζεται, είναι η χρήση ηλεκτρονόμου σύνθετης αγωγιμότητας, ο οποίος εποπτεύει την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση προς τη μεριά του δικτύου (Z_{app}), στους ακροδέκτες Υψηλής Τάσης του

μετασηματιστή ανύψωσης της γεννήτριας, καλύπτοντας την περιοχή μέχρι τη γεννήτρια (Σχήμα 5.3). Είναι σημαντική η κατάλληλη παραμετροποίηση της χαρακτηριστικής καμπύλης λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, ούτως ώστε αυτός να ενεργοποιείται μόνο όταν η σύνθετη αντίσταση λάβει τιμές που αντιστοιχούν σε ταλαντώσεις αστάθειας, και όχι κατά τη διάρκεια ευσταθών ταλαντώσεων. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα ανεπιθύμητης απόζευξης της γεννήτριας, είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιείται επιπλέον και ένας ανιχνευτής σφάλματος υπορρεύματος.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα συστήματος προστασίας γεννήτριας με ηλεκτρονόμο σύνθετης αγωγιμότητας

Εξίσου σημαντική για την ομαλή λειτουργία των γεννητριών, είναι η ύπαρξη προστασίας για περιπτώσεις απώλειας διέγερσης. Όταν μια σύγχρονη γεννήτρια απολέσει τη διέγερσή της, λόγω κάποιου βραχυκυκλώματος στο αντίστοιχο τύλιγμα, συμπεριφέρεται ως επαγωγικός κινητήρας, απορροφώντας άεργο ισχύ από το δίκτυο. Η κατάσταση αυτή, εκτός του ότι καταπονεί την γεννήτρια, λόγω υψηλών ρευμάτων και επακόλουθης υπερθέρμανσης, ενδέχεται να προκαλέσει και πτώση τάσης σε μεγάλο τμήμα του δικτύου, εξαιτίας της κατανάλωσης άεργου ισχύος από τη γεννήτρια. Ιδιαίτερα σε ασθενή ΣΗΕ, η πτώση τάσης αυτή δύναται να οδηγήσει όχι μόνο στην απώλεια φορτίων, αλλά και στην απώλεια συγχρονισμού άλλων γεννητριών. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι με γρήγορη αντίδραση στην απώλεια διέγερσης, οι οποίοι και αποσυνδέουν τη γεννήτρια από το δίκτυο, όταν αυτό απαιτηθεί. Η μέθοδος προστασίας που χρησιμοποιούταν παλαιότερα, όριζε τη σύνδεση ηλεκτρονόμων υπορρεύματος στο κύκλωμα διέγερσης της γεννήτριας. Η αδυναμία διαχωρισμού ανάμεσα στην απώλεια διέγερσης λόγω σφάλματος και στην ηθελημένη μείωσή της εξαιτίας μειωμένου φορτίου, οδήγησε στην αντικατάσταση της μεθόδου από άλλες αποδοτικότερες. Σήμερα, χρησιμοποιούνται ευρέως κατευθυντικοί ηλεκτρονόμοι απόστασης, οι οποίοι συνδέονται στους ακροδέκτες των γεννητριών. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί έχουν τη δυνατότητα να αντιδρούν, όταν η ροή ισχύος ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση από την κανονική, δηλαδή από το δίκτυο προς τη γεννήτρια, ενεργοποιώντας τον αντίστοιχο διακόπτη ισχύος, για την απόζευξή της.

Συνοψίζοντας, η επιλογή του κατάλληλου συστήματος προστασίας, για μια ασύγχρονη γεννήτρια, πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες που αφορούν τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας και του δικτύου, καθώς μια ανεπιθύμητη λειτουργία του ενδέχεται, όχι μόνο να προκαλέσει μεγάλες διαταραχές στο σύστημα, αλλά και σοβαρές ζημιές στην ίδια την γεννήτρια. [6, 9]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ SIEMENS PSS/E

6.1 Προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα σημερινά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, εκτός από μεγάλα μεγέθη, χαρακτηρίζονται και από μεγάλο βαθμό πολυπλοκότητας. Για το λόγο αυτό, η προσομοίωσή τους μέσω κατάλληλων λογισμικών Ηλεκτρονικού Υπολογιστή αποτελεί την μοναδική μέθοδο που χρησιμοποιείται, όχι μόνο κατά το στάδιο του σχεδιασμού 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 λειτουργίες που προσφέρονται είναι:

- Μελέτη ροής φορτίου.
- Ανάλυση σφαλμάτων και βραχυκυκλωμάτων.
- Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας.
- Επιλογή και ρύθμιση διακοπτικών συσκευών και συστημάτων προστασίας.
- Ανάλυση ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος.
- Μελέτη βέλτιστης ροής ισχύος.

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 πάνω από 140 χώρες του κόσμου, για την προσομοίωση συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1976 και πλέον αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο προγραμμάτων, με δυνατότητες μελετών:

- Ροής φορτίου.
- Συμμετρικών & ασύμμετρων σφαλμάτων.
- Μεταβατικής ευστάθειας, για κλίμακες χρόνου από κλάσματα του δευτερολέπτου έως δεκάδες δευτερόλεπτα.

- Κατασκευής ισοδυνάμων δικτύων.

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, 11]

6.2 Σύστημα 9 ζυγών IEEE

Το σύστημα 9 ζυγών της IEEE (Σχήμα 6.1) αποτελεί μια απλή προσέγγιση του Western System Coordinating Council (WSCC), μέσω ενός ισοδύναμου συστήματος τριών γεννητριών και εννέα ζυγών.

Το σύστημα χωρίζεται σε δύο περιοχές (areas):

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

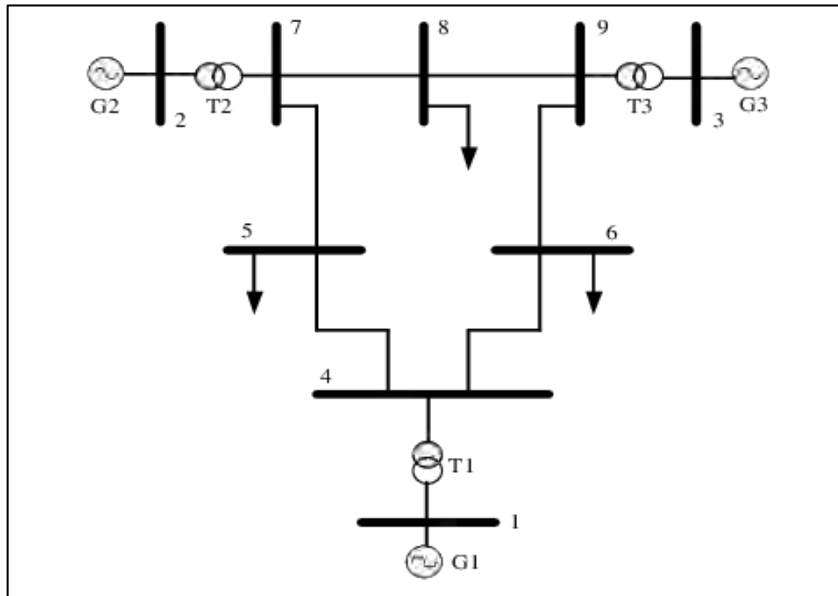
Και σε έξι ζώνες (zones):

- 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:

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

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



Σχήμα 6.1: Σύστημα 9 ζυγών IEEE

Τα ονομαστικά στοιχεία των Γεννητριών είναι:

Πίνακας 6.1: Ονομαστικά στοιχεία 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 στοιχεία των Μετασχηματιστών είναι:

Πίνακας 6.2: Ονομαστικά στοιχεία 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 στοιχεία των Γραμμών Μεταφοράς είναι:

Πίνακας 6.3: Ονομαστικά στοιχεία 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

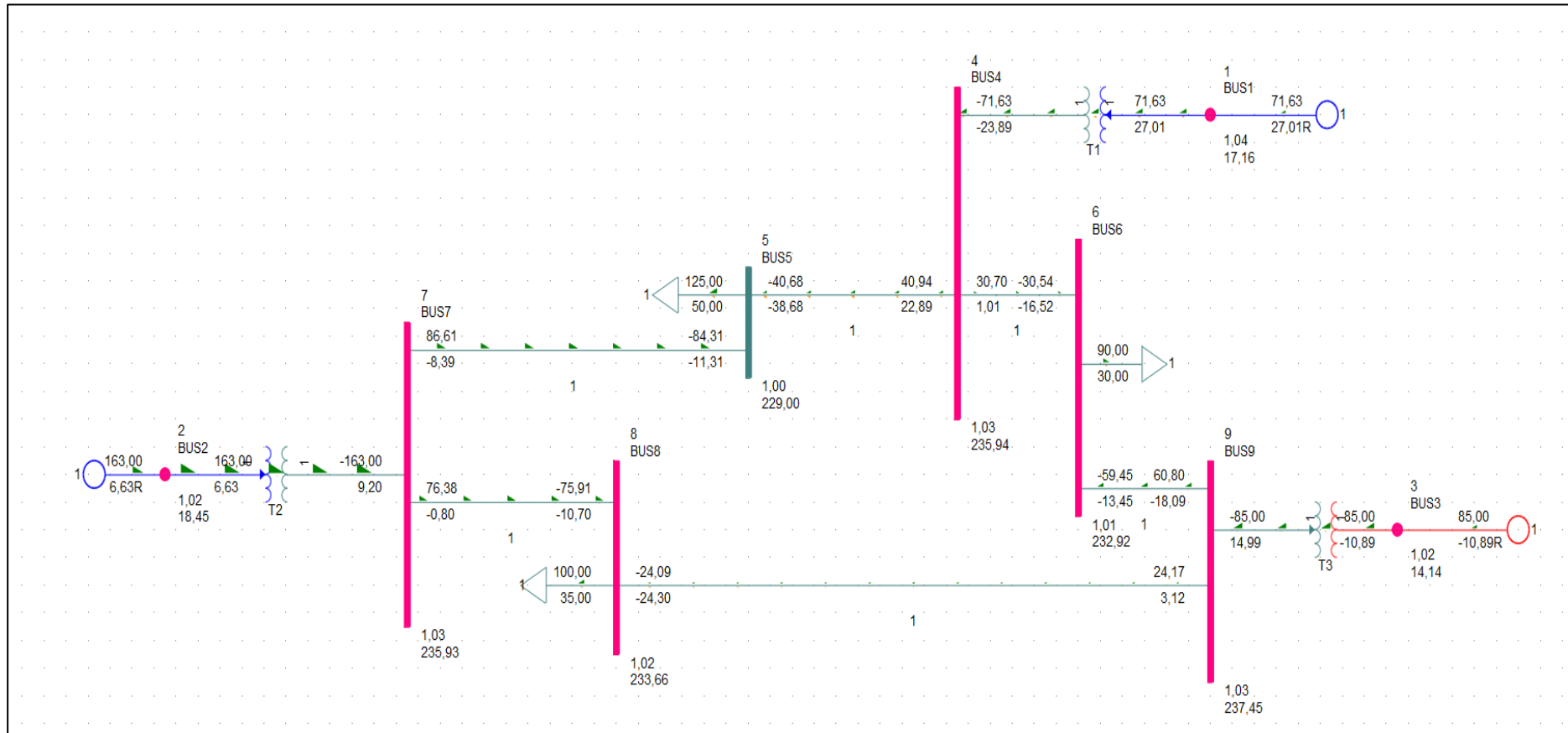
Τέλος, το σύστημα τροφοδοτεί φορτία, με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 6.4: Στοιχεία Φορτίων

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

6.3 Ροή Φορτίου

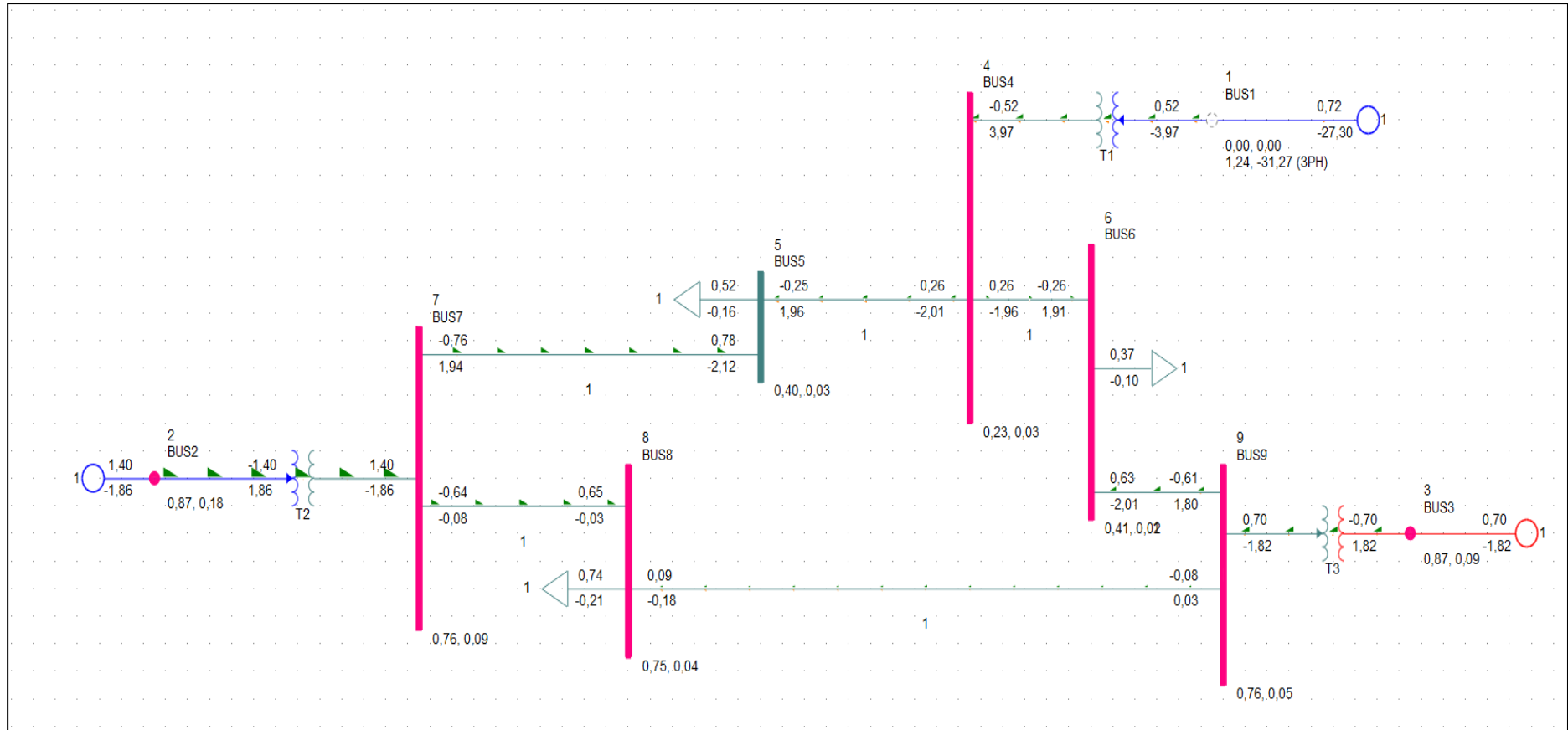
Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της λειτουργίας της ροής φορτίου του PSS/E, για το παραπάνω σύστημα, απεικονίζονται στο Σχήμα 6.2. Σε κάθε ζυγό σημειώνεται η τάση του εκφρασμένη σε kV και pu, στις γεννήτριες η παραγωγή πραγματικής (MW) και άεργου ισχύος (MVAR) και στις γραμμές μεταφοράς η ισχύς που διακινείται (MW και MVAR). Τέλος, στα φορτία του συστήματος, σημειώνονται οι καταναλώσεις τους (MW και MVAR).



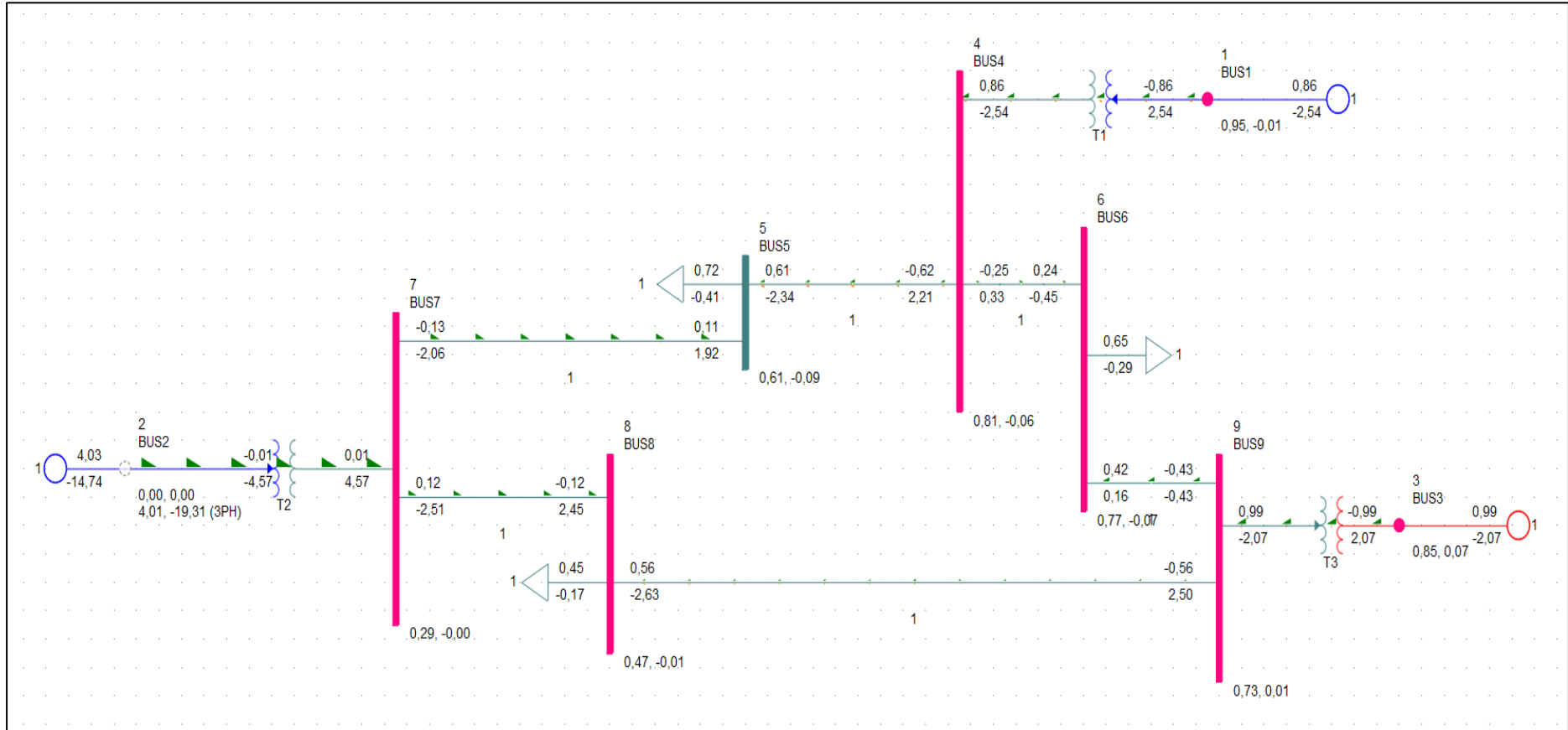
Σχήμα 6.2: Αποτελέσματα ροής φορτίου στο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος

6.4 Συμμετρικό Τριφασικό Βραχυκύκλωμα

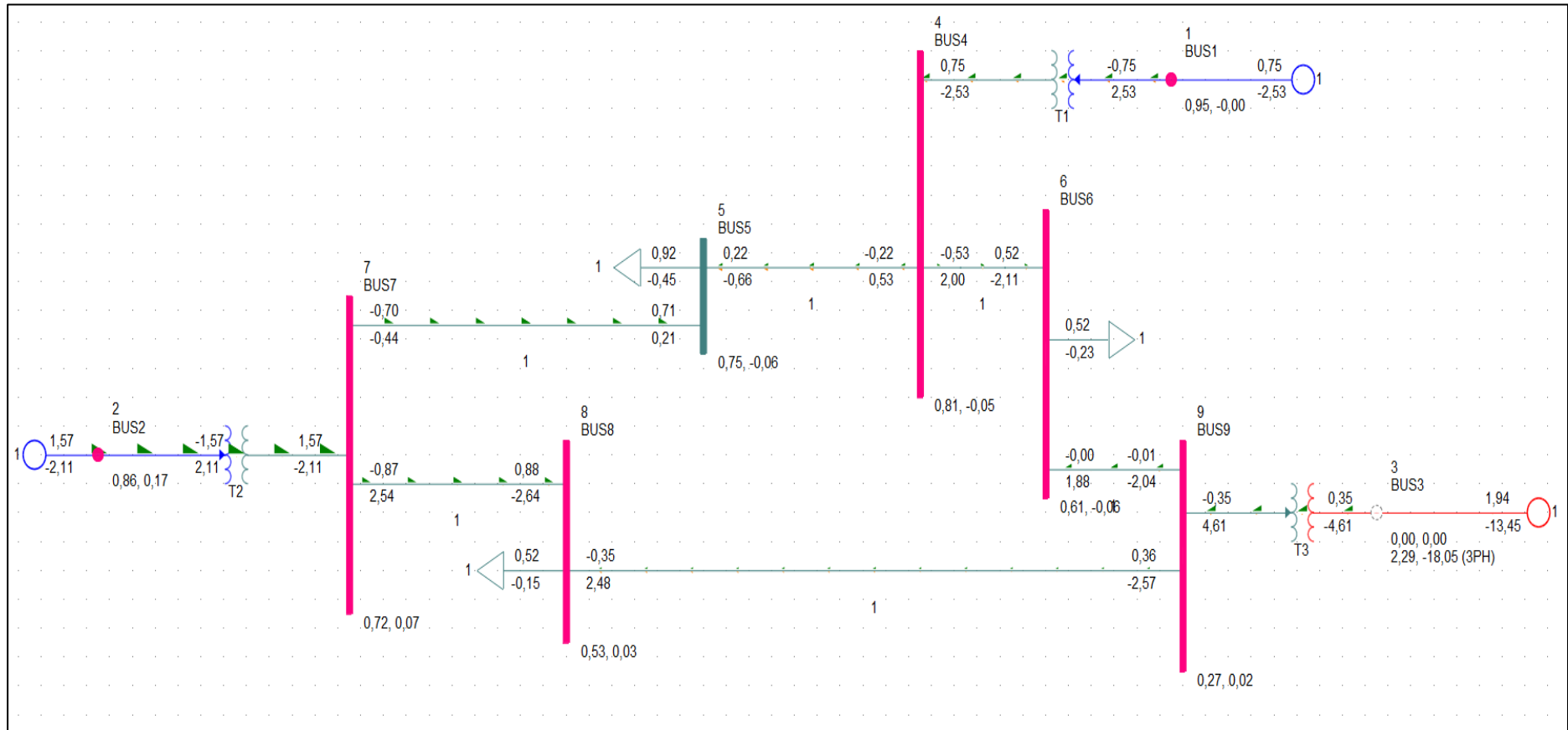
Στη συνέχεια, αναλύεται η εφαρμογή στερεού συμμετρικού τριφασικού βραχυκυκλώματος σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, κατά σειρά (Σχήμα 6.3 έως Σχήμα 6.11). Σε κάθε περίπτωση, επί του μονογραμμικού, σημειώνονται το ρεύμα βραχυκύκλωσης στον ζυγό που έγινε το σφάλμα, οι τάσεις των υπόλοιπων ζυγών, καθώς και τα ρεύματα όλων των γραμμών και γεννητριών, εκφρασμένα όλα σε ρι. Το Σχήμα 6.12 είναι συγκεντρωτικό όλων των παραπάνω περιπτώσεων, όπου σε κάθε ζυγό σημειώνεται το ρεύμα σφάλματος, σε ρι, για στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα.



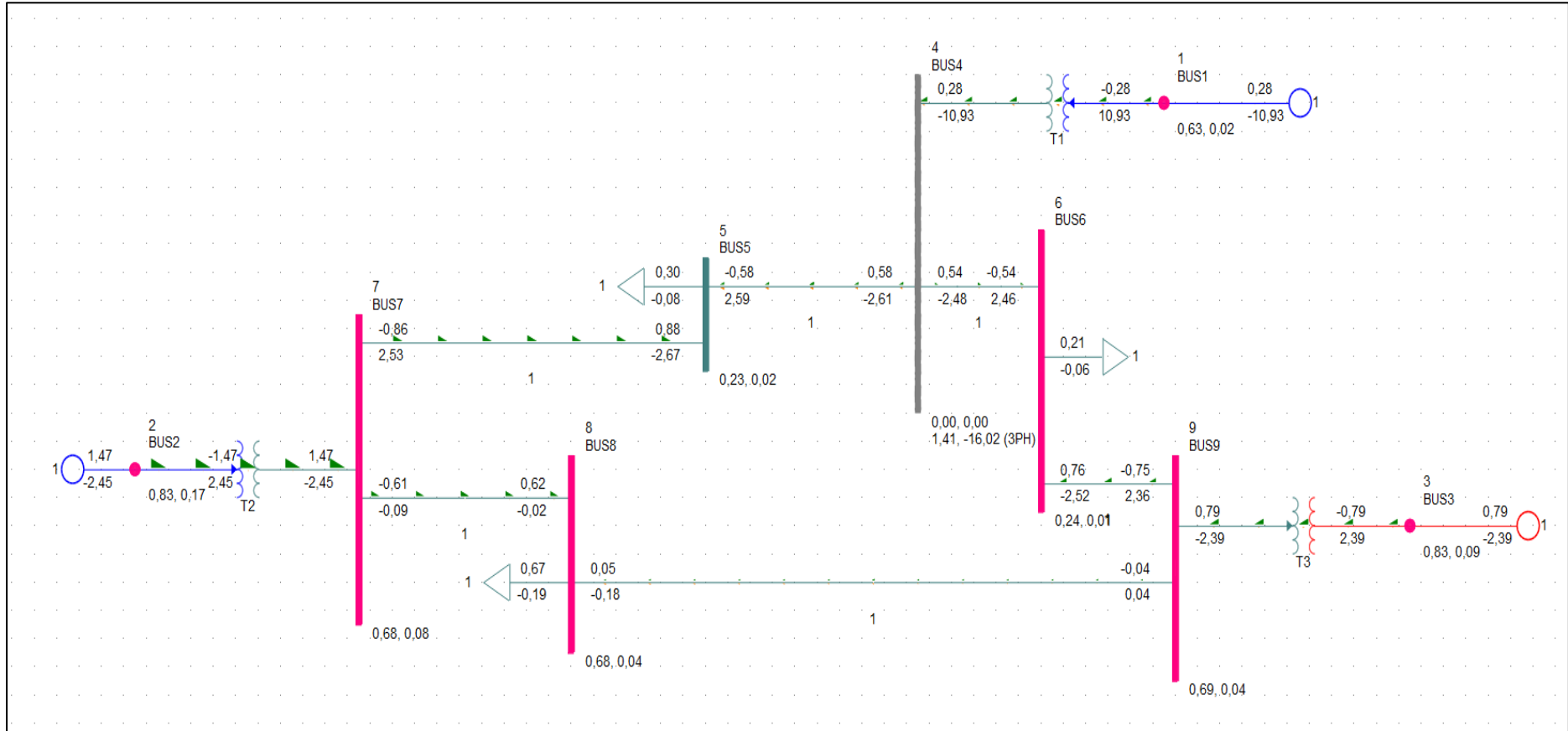
Σχήμα 6.3: Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 1



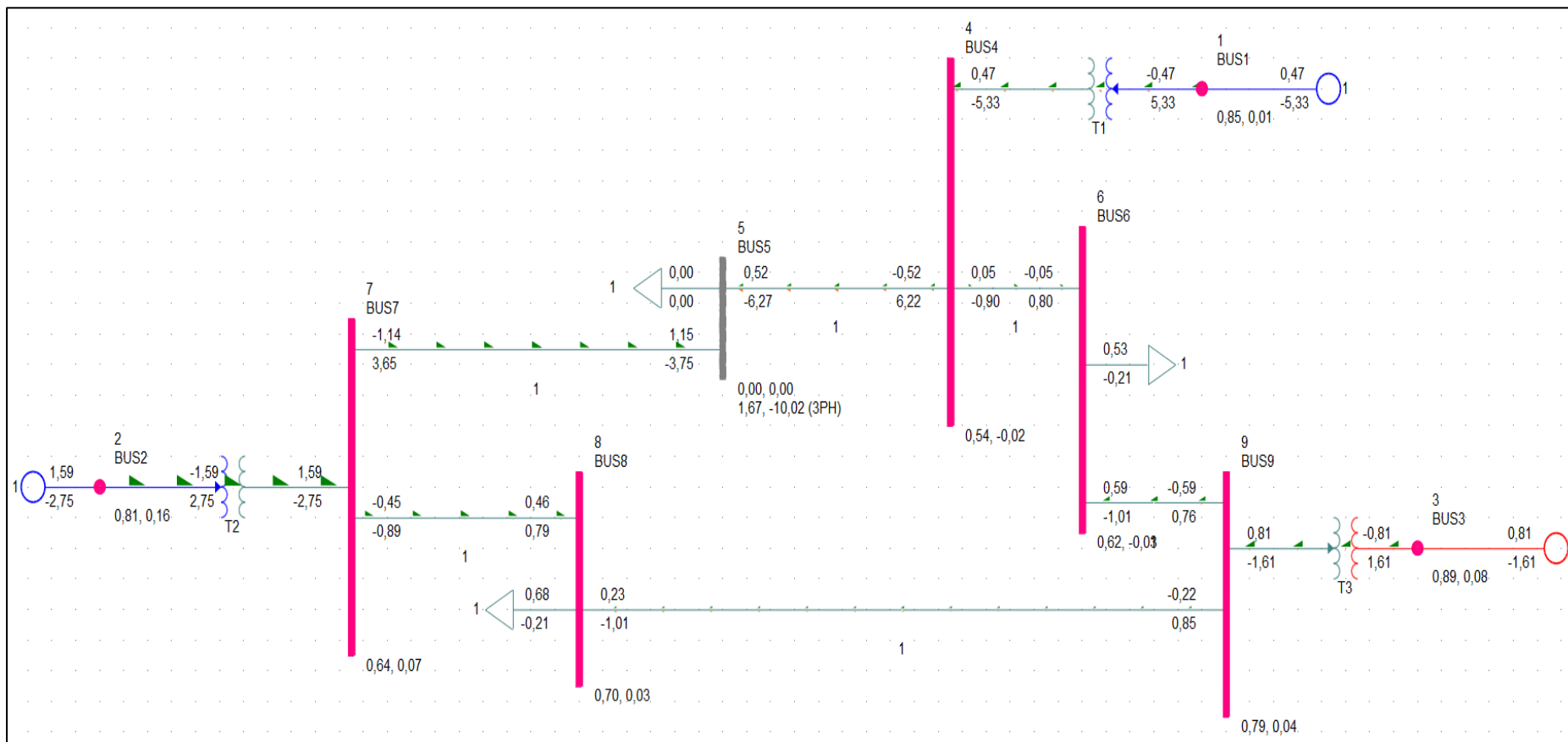
Σχήμα 6.4: Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 2



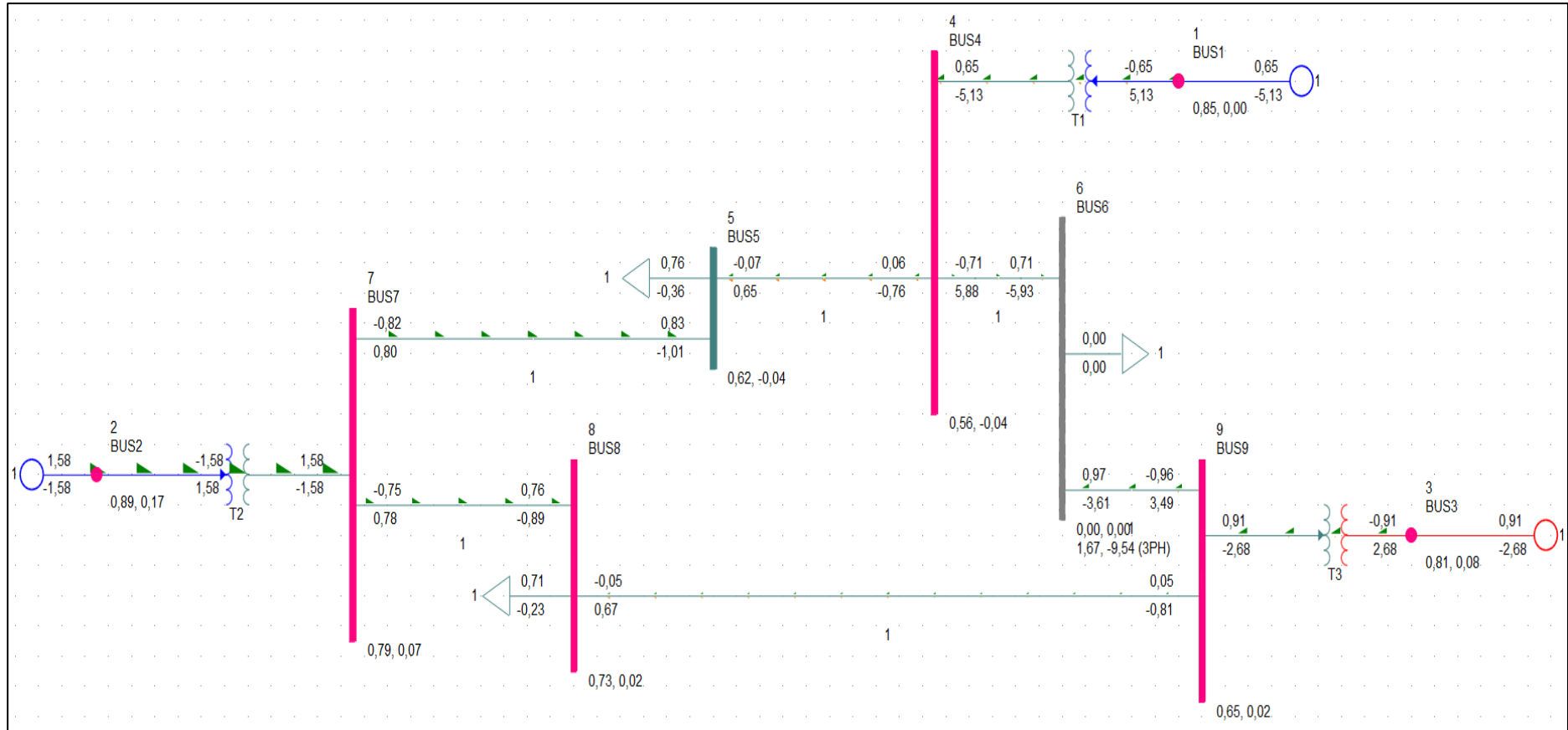
Σχήμα 6.5: Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 3



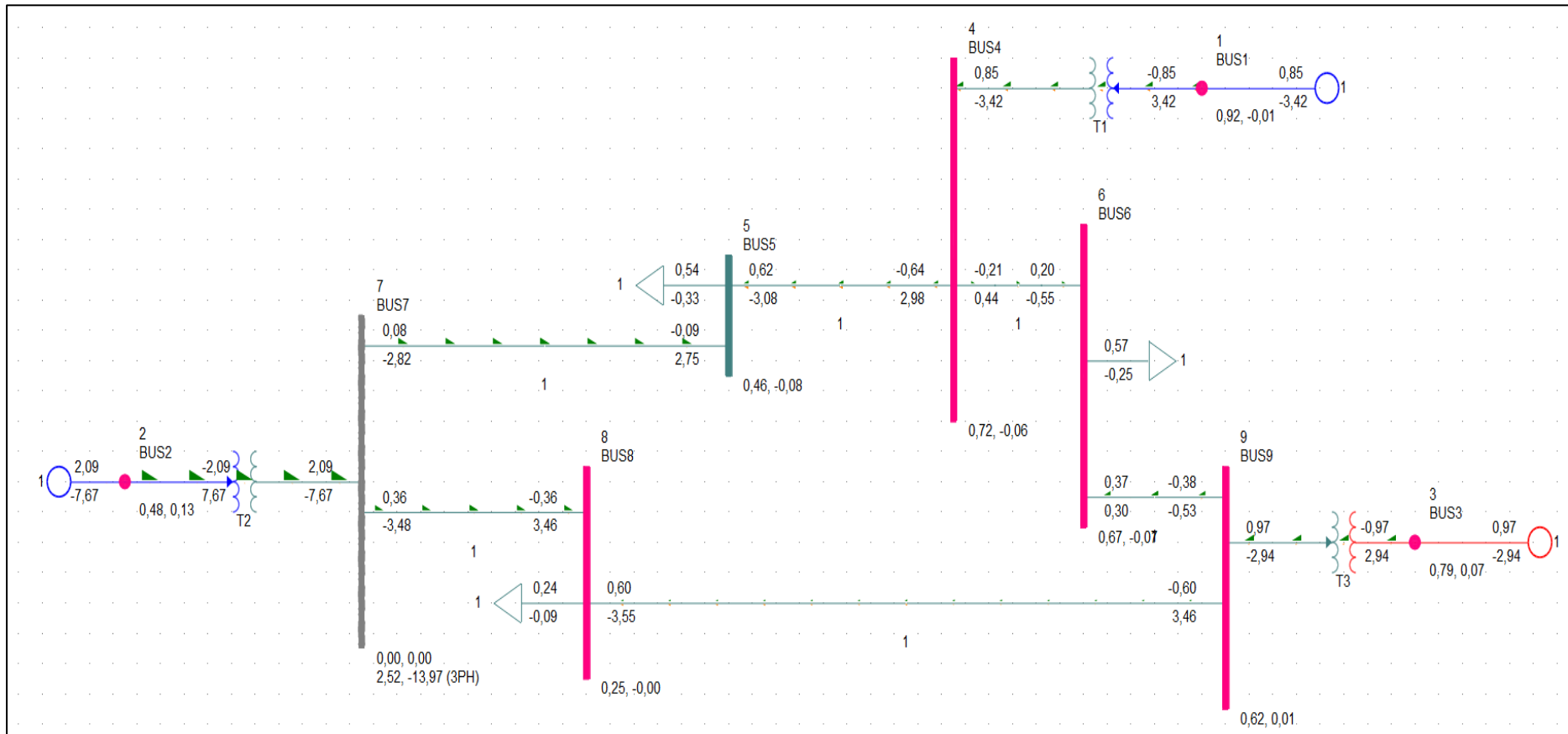
Σχήμα 6.6: Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 4



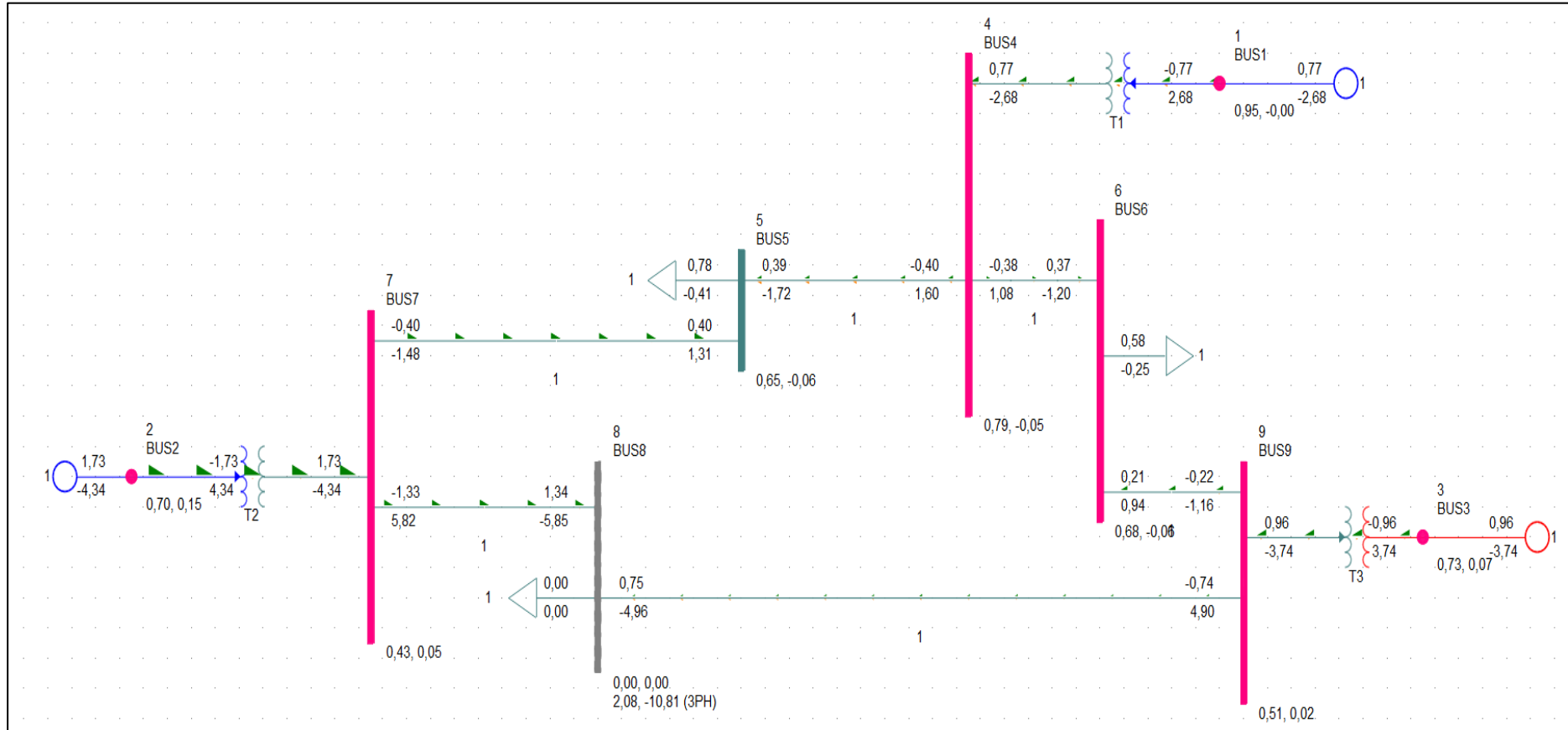
Σχήμα 6.7: Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 5



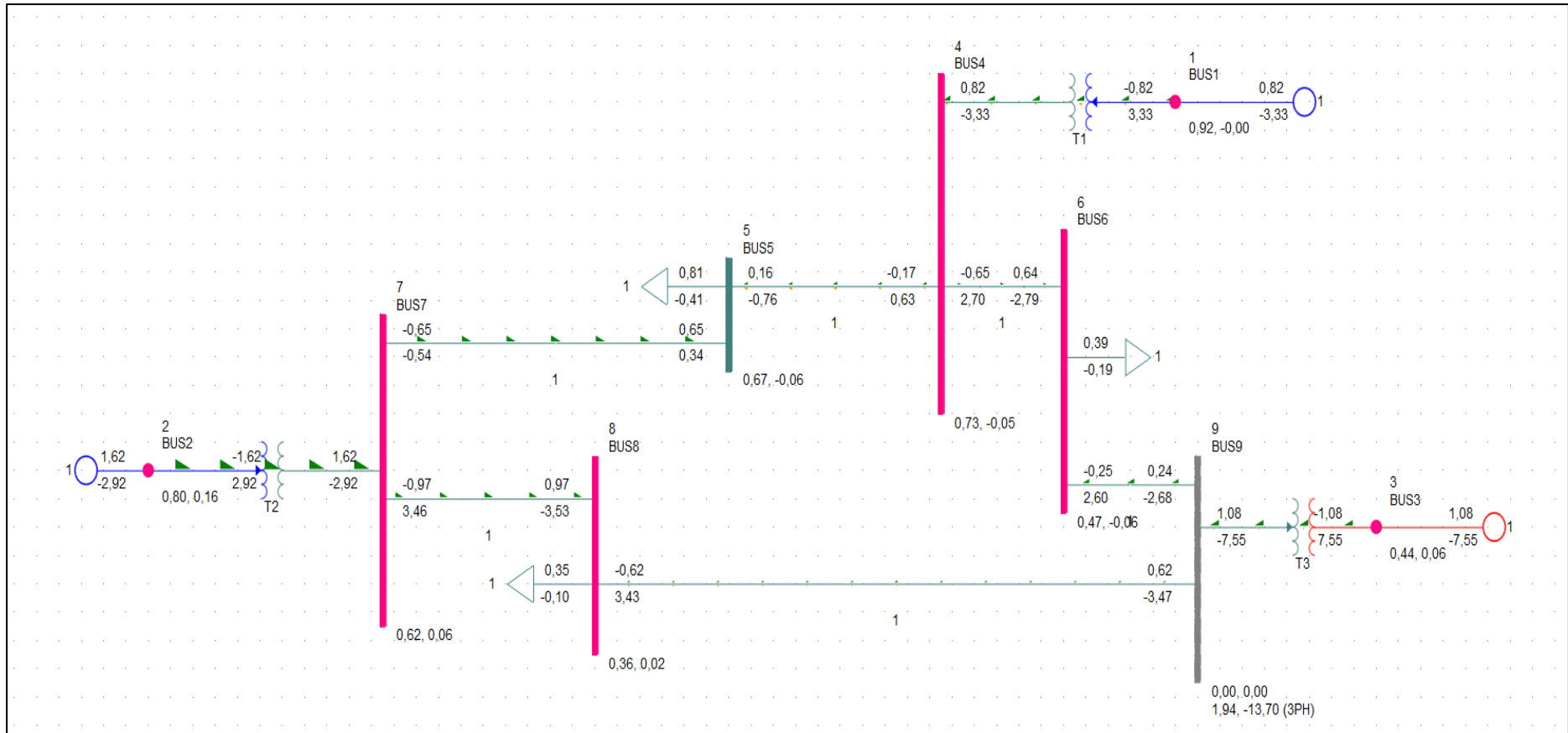
Σχήμα 6.8: Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 6



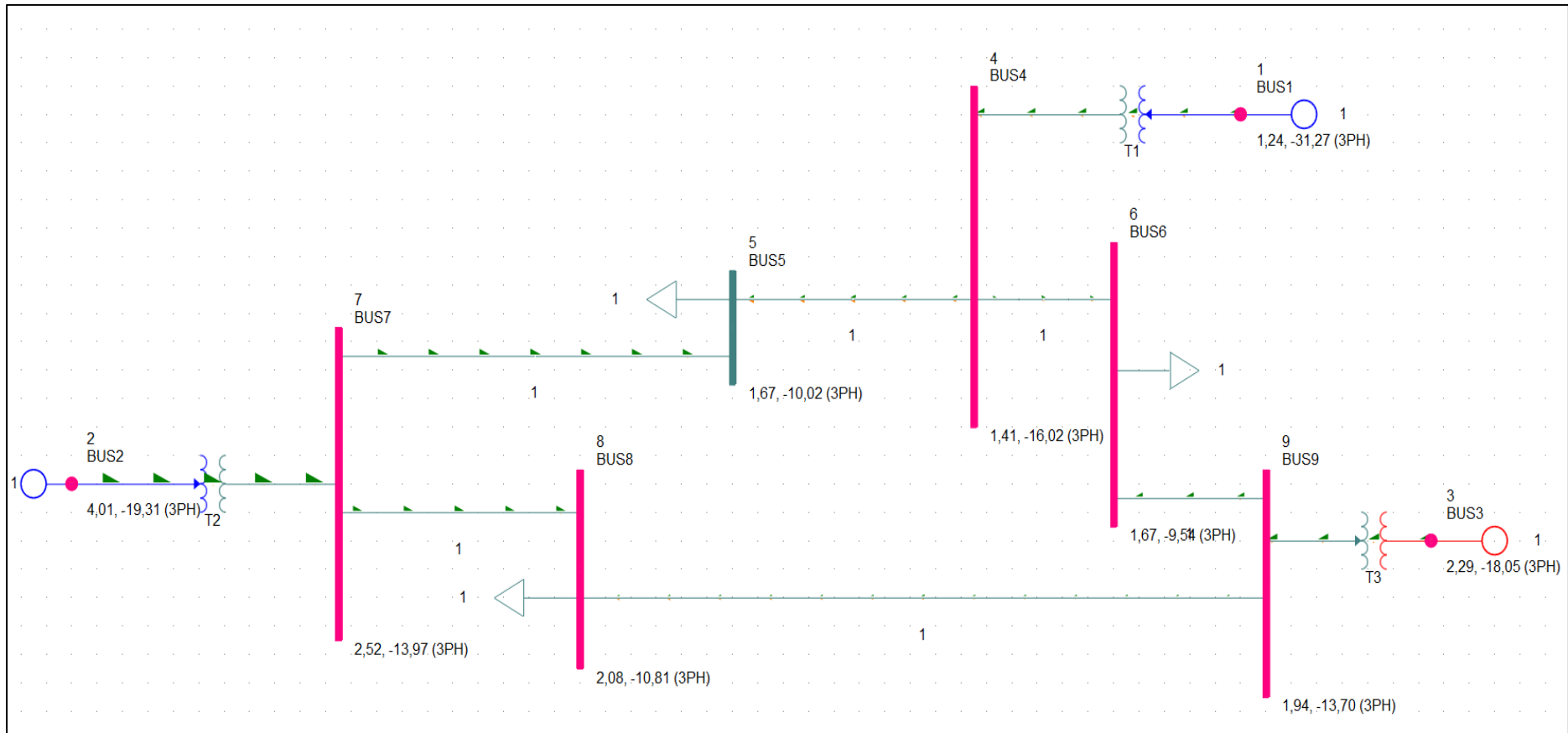
Σχήμα 6.9: Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 7



Σχήμα 6.10: Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 8



Σχήμα 6.11: Ρεύματα γραμμών και τάσεις ζυγών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στον ζυγό 9



Σχήμα 6.12: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ρευμάτων βραχυκύκλωσης για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα σε κάθε ζυγό

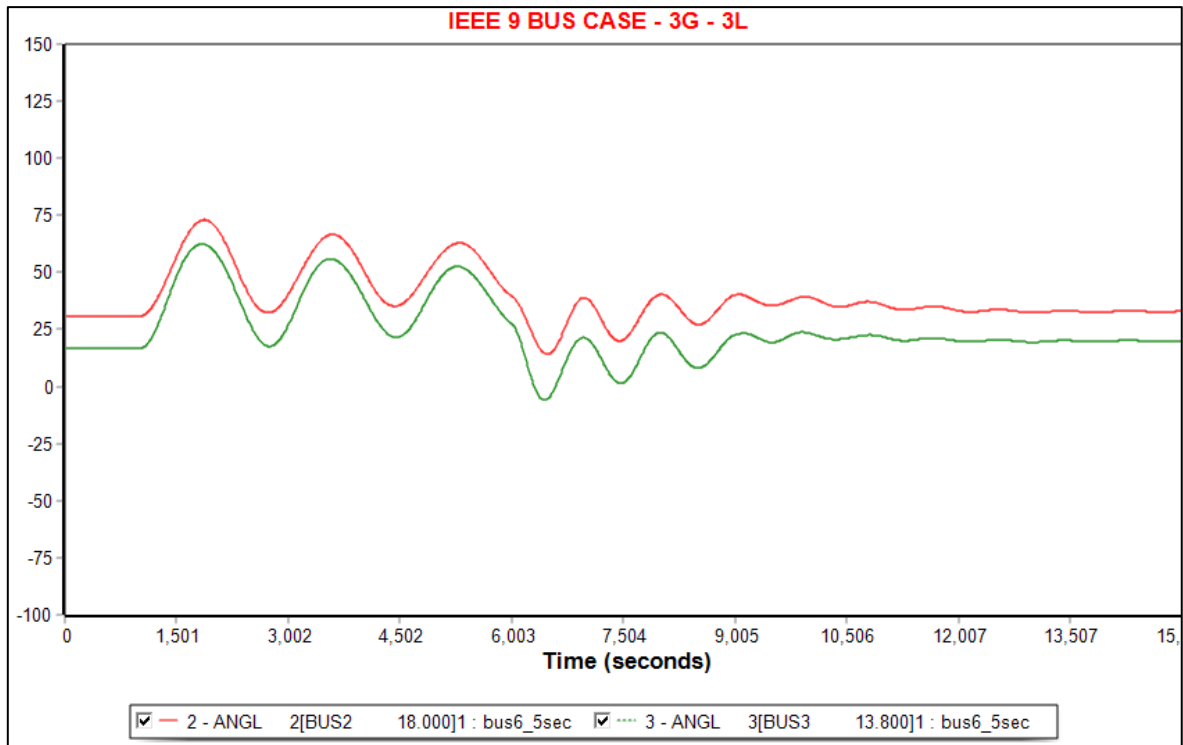
6.5 Μελέτη μεταβατικής ευστάθειας με το PSS/E

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

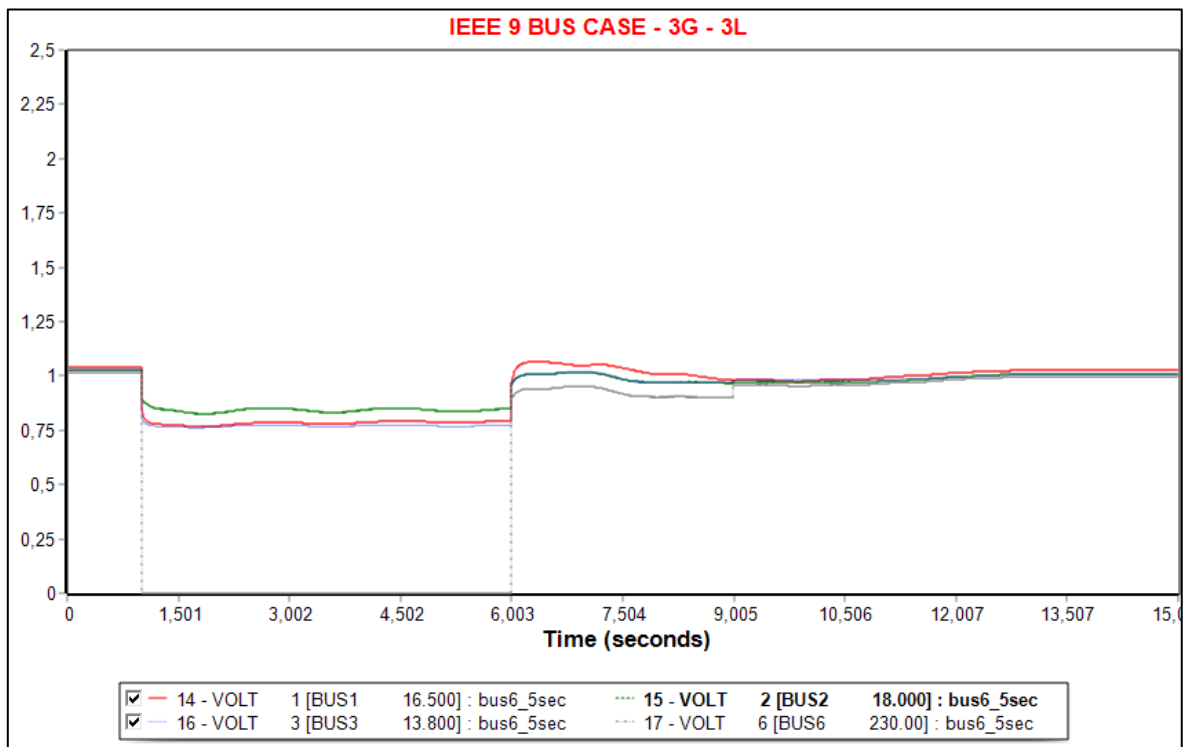
1. Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4 – 6, πλησίον του ζυγού 6.
2. Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8.
3. Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 9.

6.5.1 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4 – 6, πλησίον του ζυγού 6

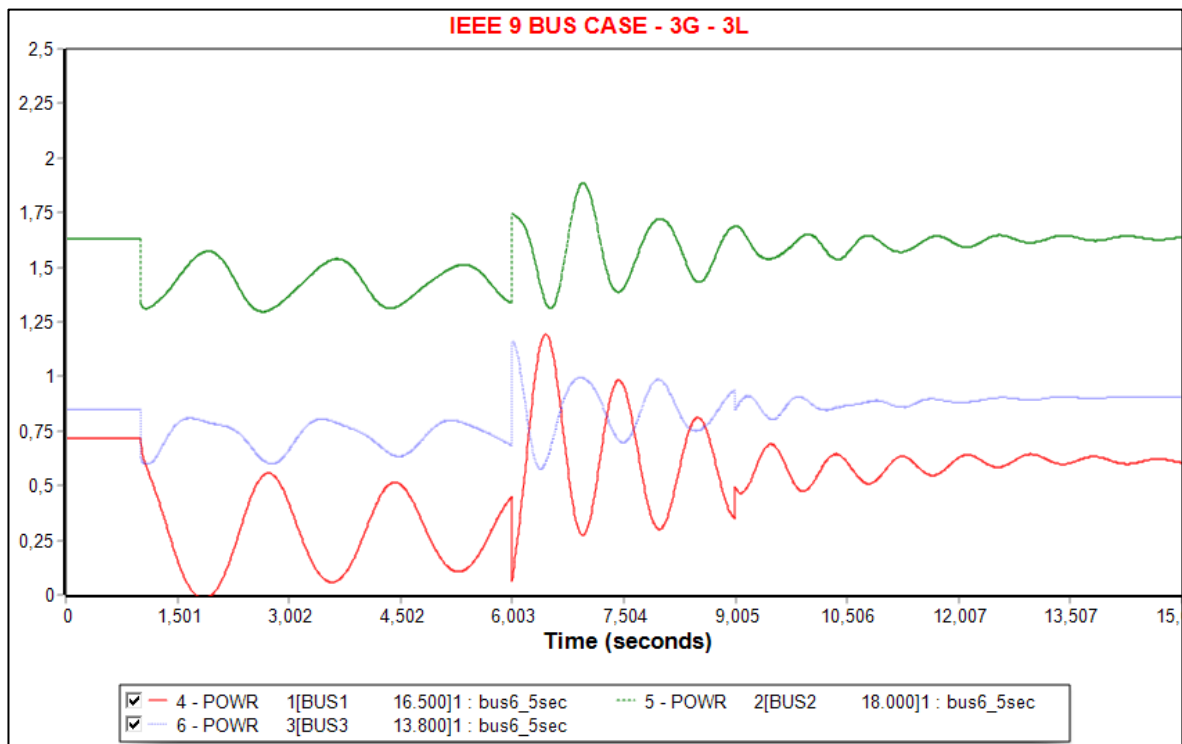
Τη χρονική στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ εμφανίζεται σφάλμα στη γραμμή 4 – 6, πλησίον του ζυγού 6. Το σφάλμα θα διαρκέσει 5 sec και θα αποσβεστεί τη χρονική στιγμή $t = 6 \text{ sec}$, με το άνοιγμα της γραμμής 4 – 6. Όταν $t = 9 \text{ sec}$ η γραμμή επανασυνδέεται και η προσομοίωση συνεχίζεται μέχρι τη χρονική στιγμή $t = 15 \text{ sec}$. Παρατηρώντας το διάγραμμα των γωνιών ισχύος των γεννητριών 2 και 3 (Σχήμα 6.13), εκφρασμένων ως προς γη γωνία της γεννήτριας 1, παρατηρείται ότι οι γωνίες συγκλίνουν, δηλαδή το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του, μετά τη διαταραχή. Από τα υπόλοιπα διαγράμματα προκύπτει ότι οι τάσεις (Σχήμα 6.14), και η πραγματική και η άεργος ισχύς των γεννητριών (Σχήμα 6.15 & Σχήμα 6.16 αντίστοιχα) επανέρχονται στις προσφαλματικές τιμές, ενώ οι συχνότητες των ζυγών συγκλίνουν σε μια νέα τιμή (Σχήμα 6.17). Κατά τη διάρκεια του σφάλματος δεν παρατηρείται αποσυγχρονισμός. Παρόλα αυτά, η μεγάλης διάρκειας πτώση τάσης που παρατηρείται στους ζυγούς των γεννητριών, καθώς και οι ταλαντώσεις χωρίς απόσβεση των γωνιών ισχύος τους, κατά τη διάρκεια του σφάλματος, είναι γεγονότα μη αποδεκτά για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντική η γρήγορη εκκαθάριση του σφάλματος αυτού. [12]



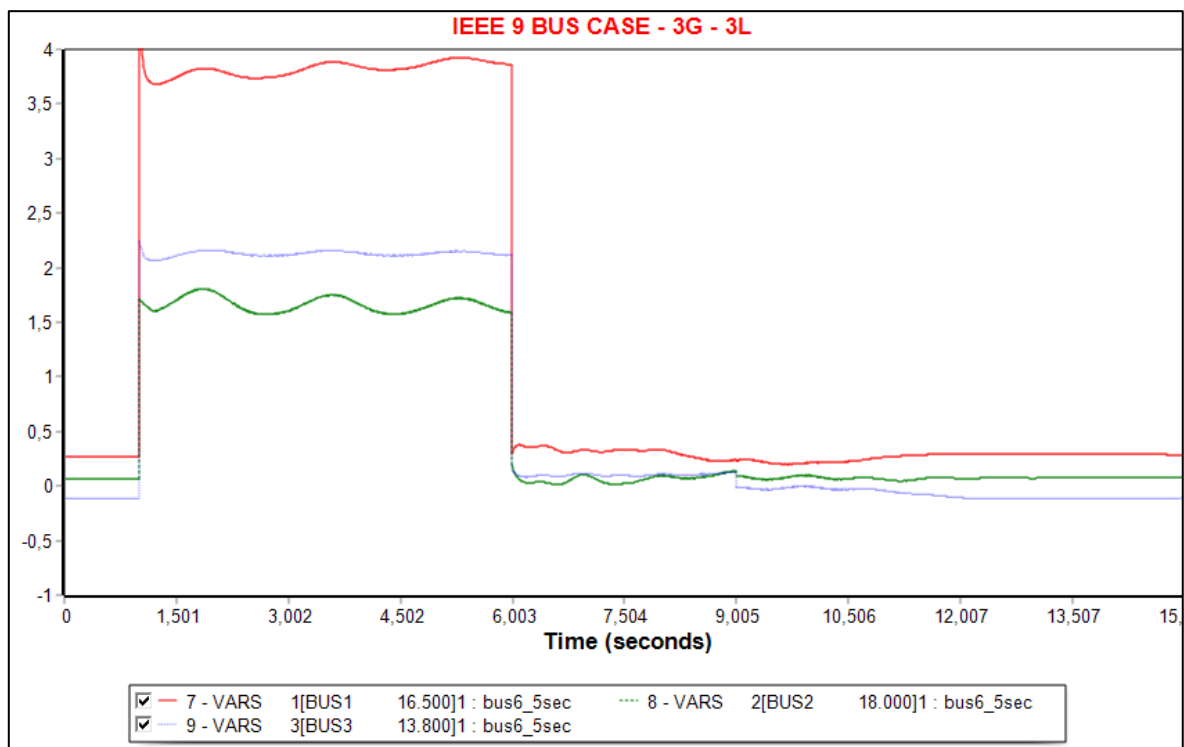
Σχήμα 6.13: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4 – 6, πλησίον του ζυγού 6. Γωνίες ισχύος γεννητριών 2 & 3, σε σχέση με τη γωνία της γεννήτριας 1



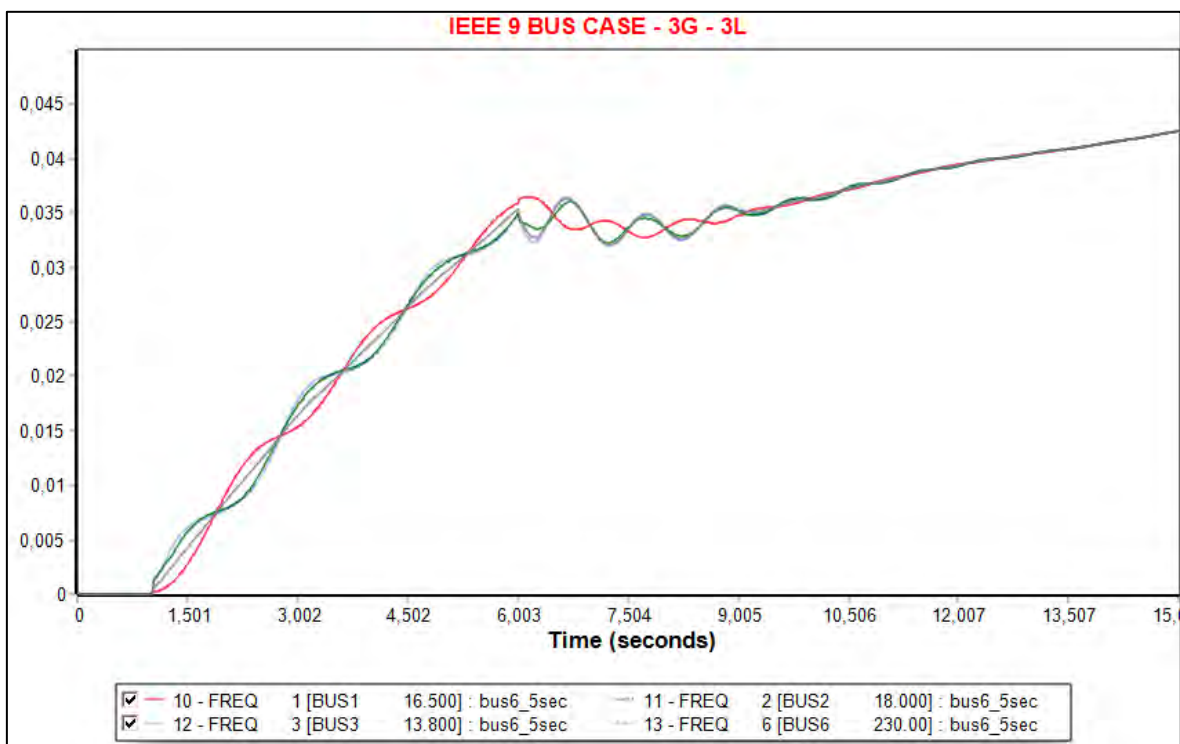
Σχήμα 6.14: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4 – 6, πλησίον του ζυγού 6. Τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος



Σχήμα 6.15: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4 – 6, πλησίον του ζυγού 6.
Πραγματική ισχύς γεννητριών



Σχήμα 6.16: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4 – 6, πλησίον του ζυγού 6.
Άεργος ισχύς γεννητριών

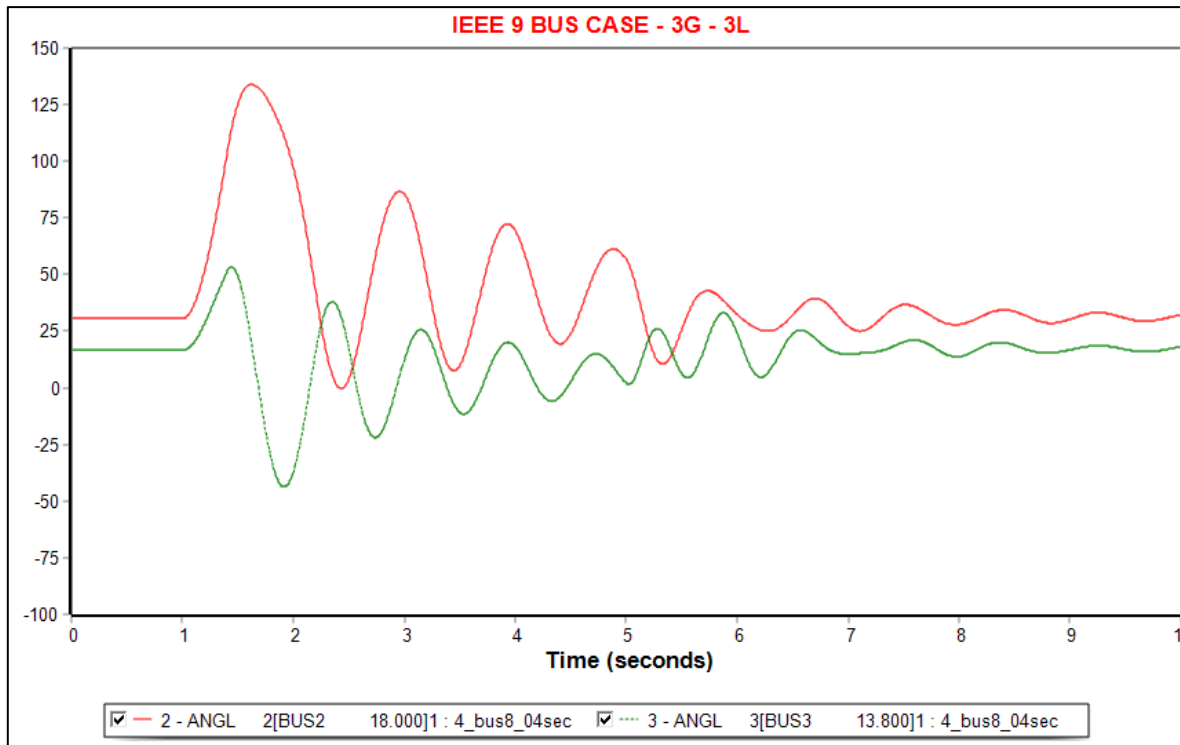


Σχήμα 6.17: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4 – 6, πλησίον του ζυγού 6.
Συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος

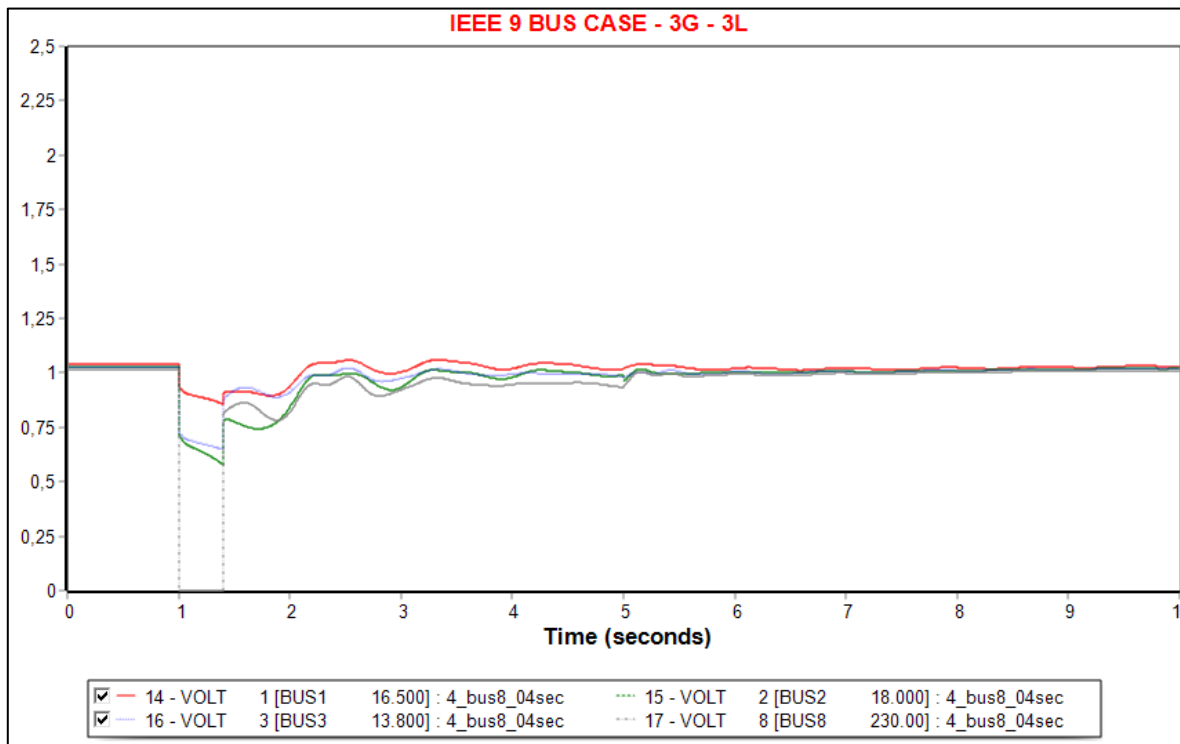
6.5.2 Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7 – 8, πλησίον του ζυγού 8

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 $t_{\text{crit}} = 0,40 \text{ sec}$ 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 7 – 8. Τη χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$, η γραμμή 7 – 8 τίθεται ξανά υπό τάση, με την προσομοίωση να συνεχίζεται μέχρι $t = 10 \text{ sec}$. Παρατηρώντας το διάγραμμα των γωνιών ισχύος των γεννητριών 2 και 3 (Σχήμα 6.18), εκφρασμένων ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1, αυτές συγκλίνουν, δηλαδή το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του, μετά τη διαταραχή. Από τα υπόλοιπα διαγράμματα προκύπτει ότι οι τάσεις (Σχήμα 6.19), και η πραγματική και η άεργος ισχύς των γεννητριών (Σχήμα 6.20 & Σχήμα 6.21 αντίστοιχα) επανέρχονται στις προσφαλματικές τιμές, ενώ οι συχνότητες των ζυγών συγκλίνουν σε μια νέα τιμή (Σχήμα 6.22).

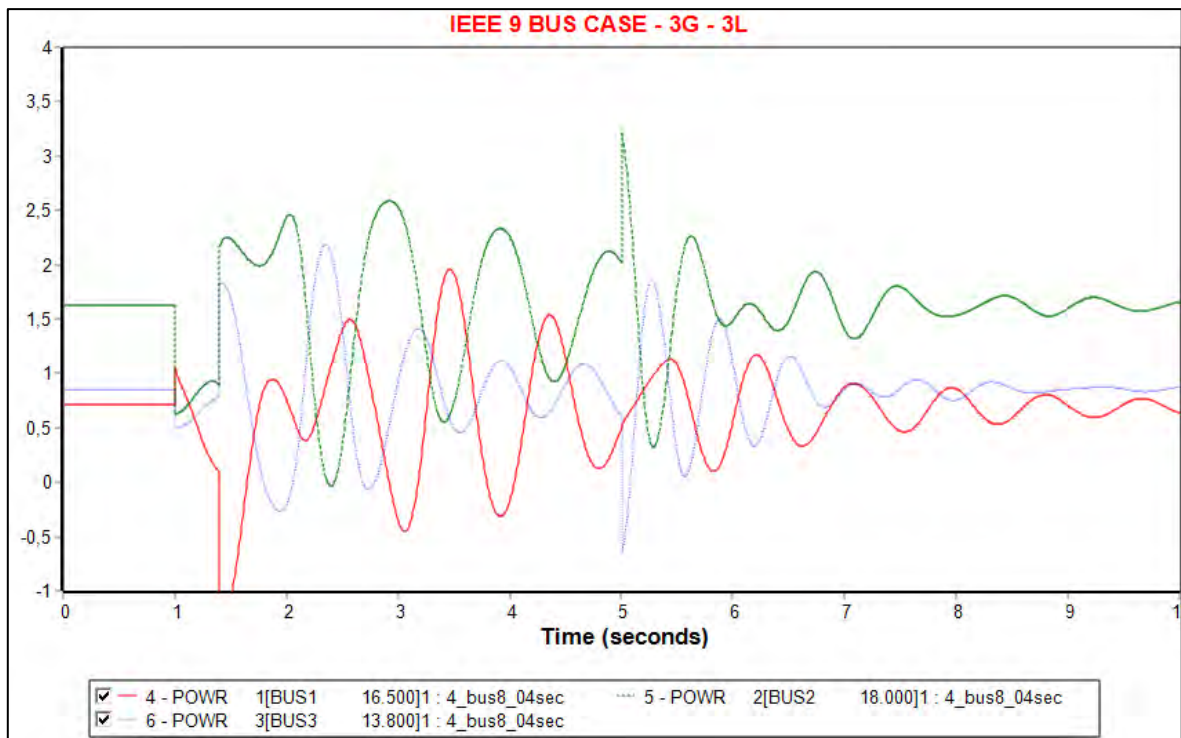
Αν η εκκαθάριση του σφάλματος καθυστερήσει 50 msec, δηλαδή πραγματοποιηθεί τη χρονική στιγμή $t = 1,45 \text{ sec}$, το σύστημα δεν επανέρχεται και οδηγείται σε αστάθεια. Από τα διαγράμματα που εξάγει το λογισμικό, προκύπτει ότι οι γωνίες ισχύος των γεννητριών δεν ήρθαν σε σύγκλιση (Σχήμα 6.23), ενώ οι τάσεις (Σχήμα 6.24), η πραγματική και η άεργος ισχύς των γεννητριών (Σχήμα 6.25 & Σχήμα 6.26 αντίστοιχα), καθώς και οι συχνότητες (Σχήμα 6.27) των ζυγών παρουσιάζουν ταλαντώσεις.



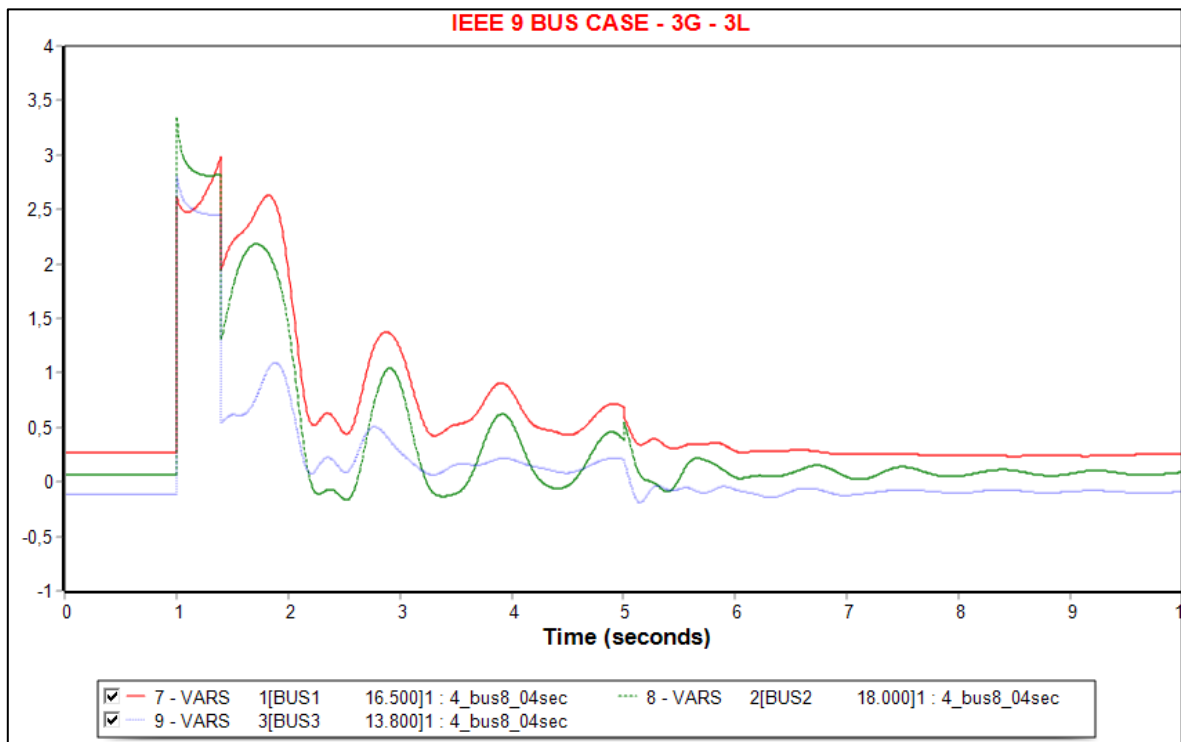
Σχήμα 6.18: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,40$ sec.
Γωνίες ισχύος γεννητριών 2 & 3, σε σχέση με τη γωνία της γεννήτριας 1



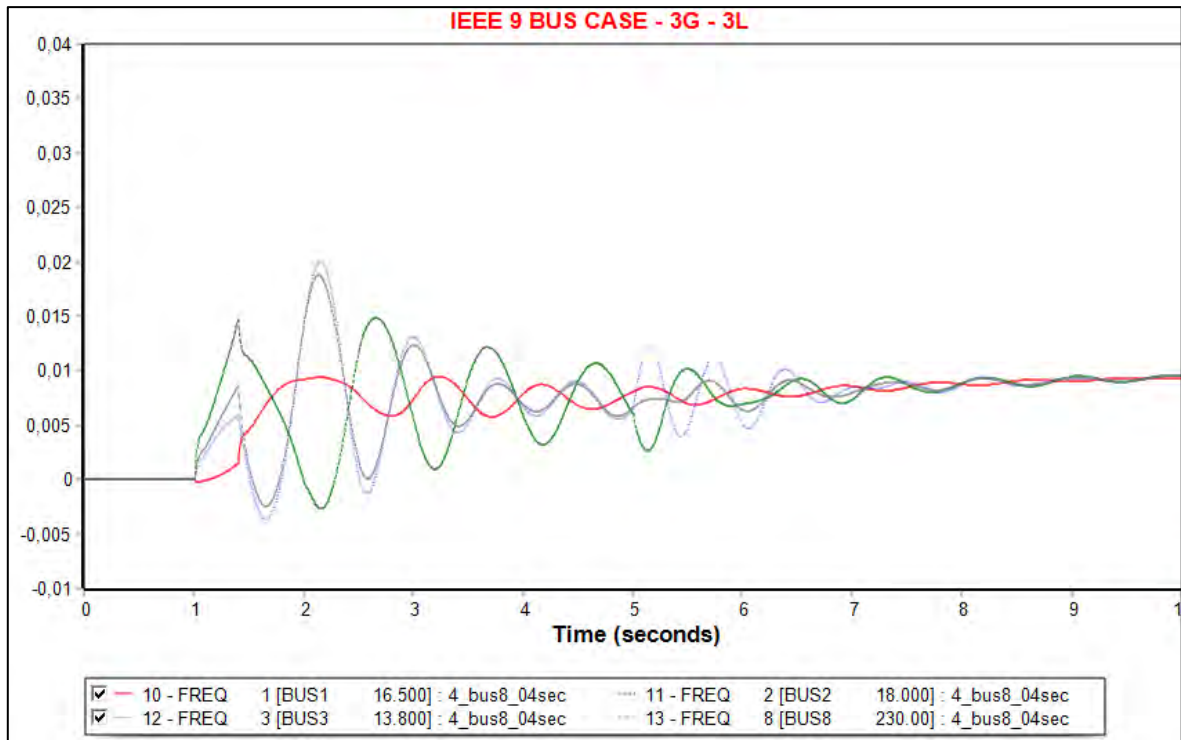
Σχήμα 6.19: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,40$ sec. Τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος



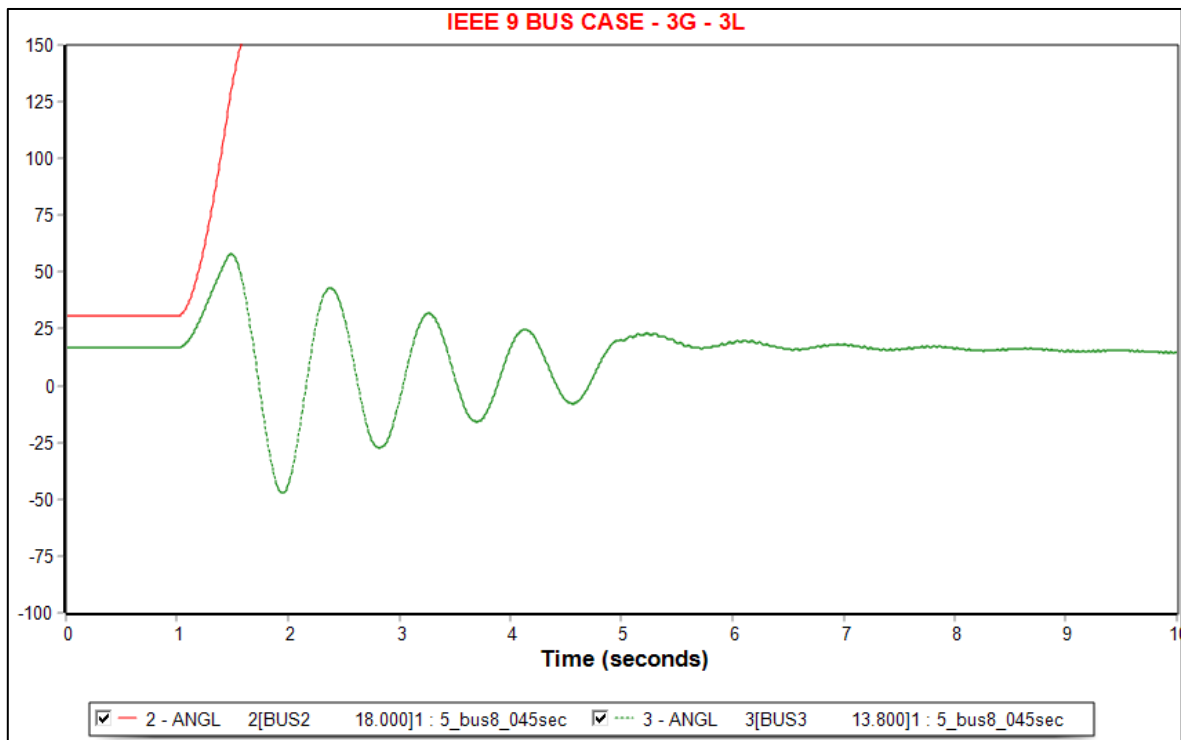
Σχήμα 6.20: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,40$ sec. Πραγματική ισχύς γεννητριών



Σχήμα 6.21: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,40$ sec. Άεργος ισχύς γεννητριών

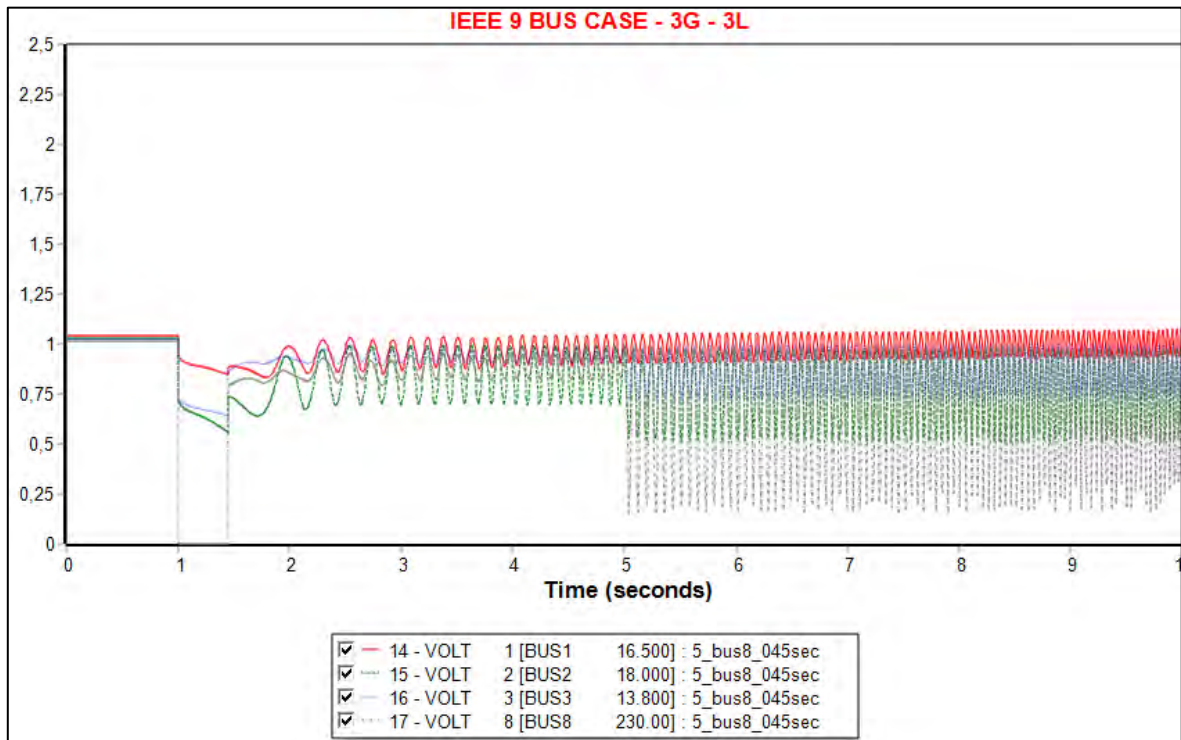


Σχήμα 6.22: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,40$ sec. Συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος

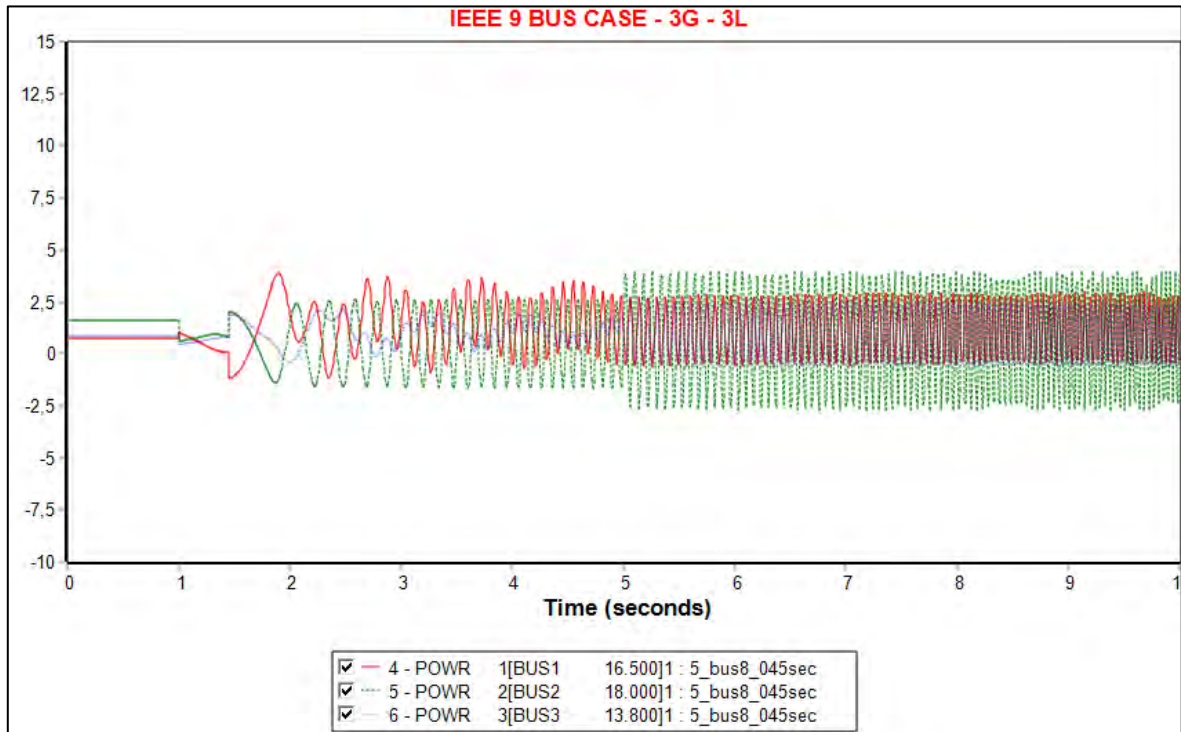


Σχήμα 6.23: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,45$ sec.

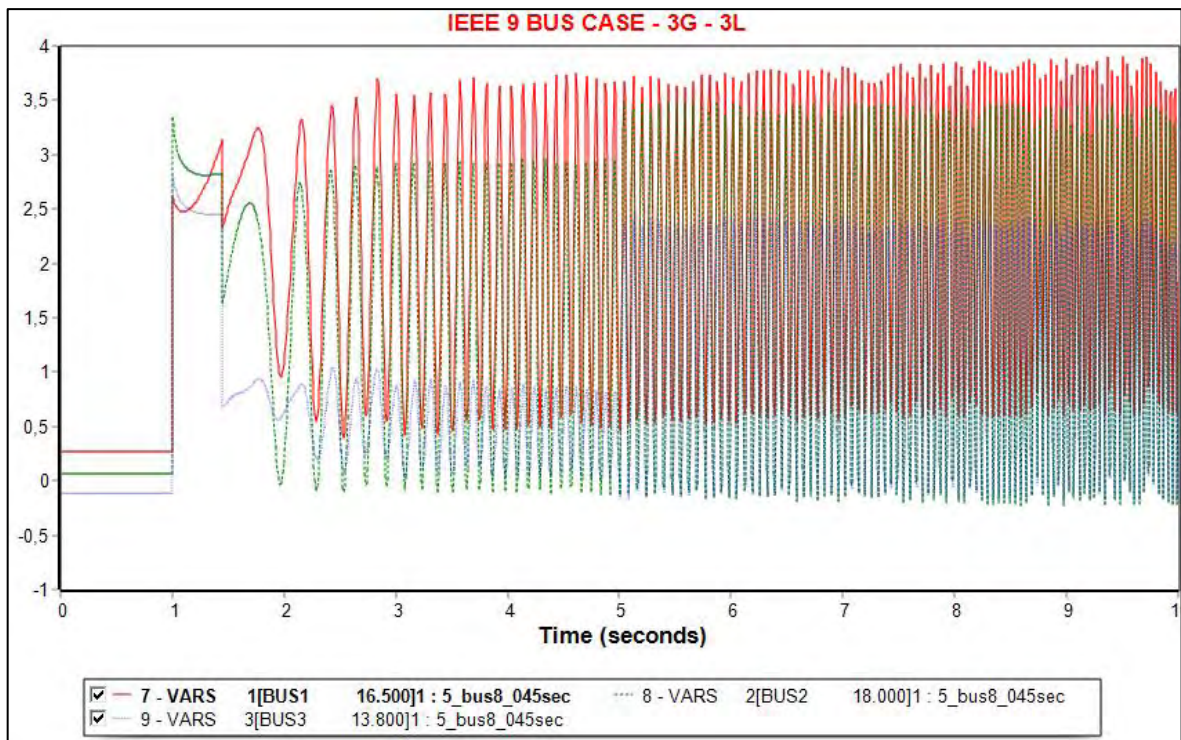
Γωνίες ισχύος γεννητριών 2 & 3, σε σχέση με τη γωνία της γεννήτριας 1



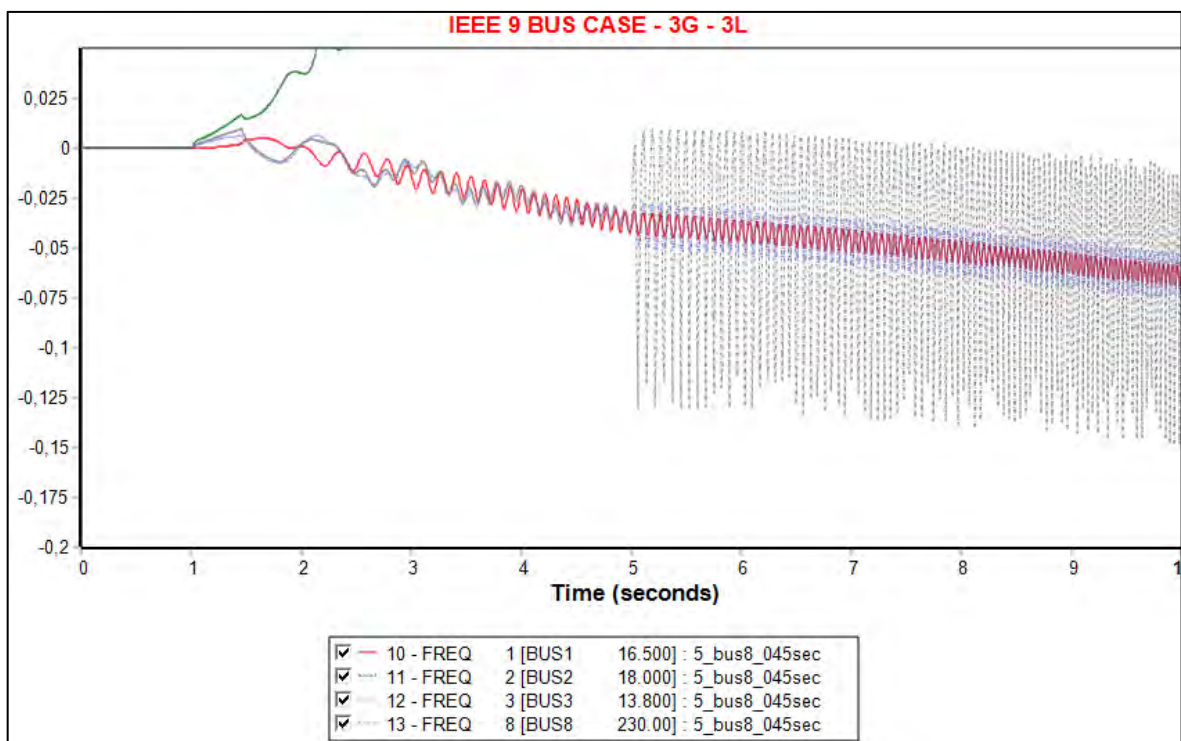
Σχήμα 6.24: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,45$ sec. Τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος



Σχήμα 6.25: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,45$ sec. Πραγματική ισχύς γεννητριών



Σχήμα 6.26: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,45$ sec. Άεργος ισχύς γεννητριών

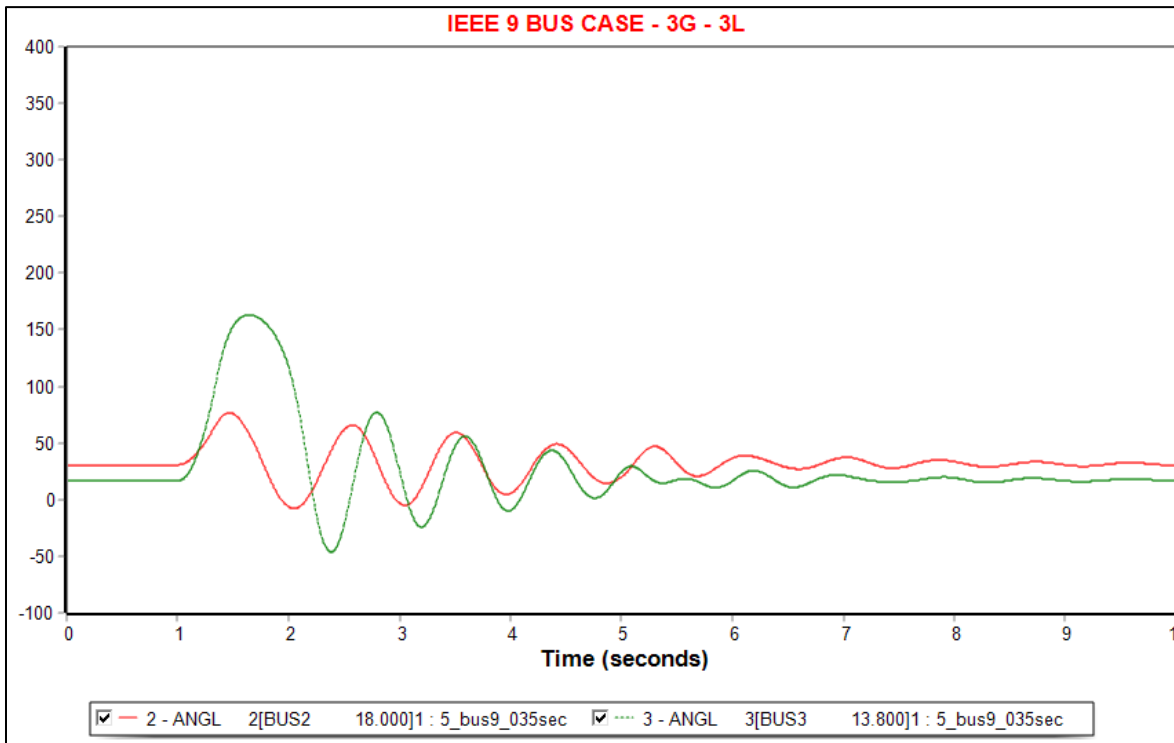


Σχήμα 6.27: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 7-8, πλησίον του ζυγού 8, εκκαθάριση όταν $t=1,45$ sec. Συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος

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

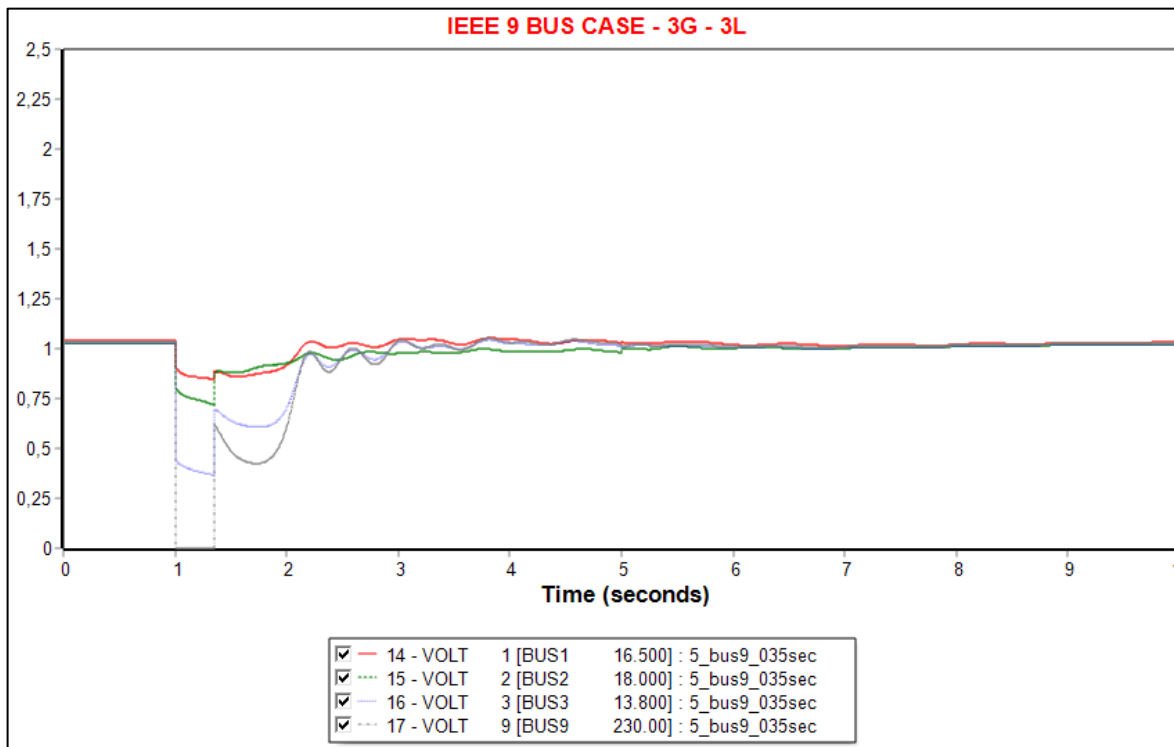
Τη χρονική στιγμή $t = 1 \text{ sec}$ εμφανίζεται σφάλμα στη γραμμή 8 – 9, πλησίον του ζυγού 9. Ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος προσδιορίστηκε, έπειτα από μελέτη, στα $t_{\text{crit}} = 0,35 \text{ sec}$ μετά την εμφάνισή του, δηλαδή η εκκαθάρισή του πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή $t = 1,35 \text{ sec}$, μέσω του ανοίγματος των διακοπών ισχύος στα άκρα της γραμμής 8 – 9. Τη χρονική στιγμή $t = 5 \text{ sec}$, η γραμμή 8 – 9 τίθεται ξανά υπό τάση, με την προσομοίωση να συνεχίζεται μέχρι $t = 10 \text{ sec}$. Παρατηρώντας το διάγραμμα των γωνιών ισχύος των γεννητριών 2 και 3 (Σχήμα 6.28), εκφρασμένων ως προς τη γωνία της γεννήτριας 1, αυτές συγκλίνουν, δηλαδή το σύστημα διατηρεί την ευστάθειά του, μετά τη διαταραχή. Από τα υπόλοιπα διαγράμματα προκύπτει ότι οι τάσεις (Σχήμα 6.29), η πραγματική και η άεργος ισχύς των γεννητριών (Σχήμα 6.30 & Σχήμα 6.31 αντίστοιχα) επανέρχονται στις προσφαλματικές τιμές, ενώ οι συχνότητες των ζυγών συγκλίνουν σε μια νέα τιμή (Σχήμα 6.32).

Αν η εκκαθάριση του σφάλματος καθυστερήσει 50 msec, δηλαδή πραγματοποιηθεί τη χρονική στιγμή $t = 1,40 \text{ sec}$, το σύστημα δεν επανέρχεται και οδηγείται σε αστάθεια. Από τα διαγράμματα που εξάγει το λογισμικό, προκύπτει ότι οι γωνίες ισχύος των γεννητριών δεν ήρθαν σε σύγκλιση (Σχήμα 6.33), ενώ οι τάσεις (Σχήμα 6.34), η πραγματική και η άεργος ισχύς των γεννητριών (Σχήμα 6.35 & Σχήμα 6.36 αντίστοιχα), καθώς και οι συχνότητες (Σχήμα 6.37) των ζυγών παρουσιάζουν ταλαντώσεις.

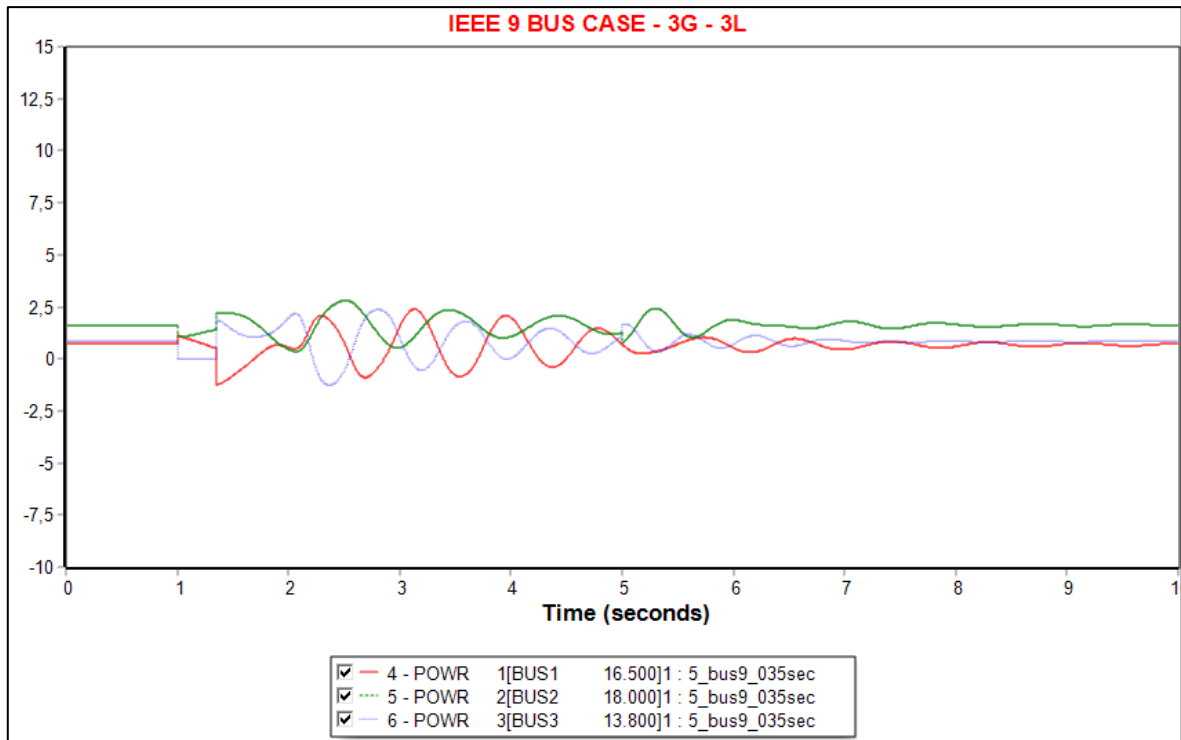


Σχήμα 6.28: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,35\text{sec}$.

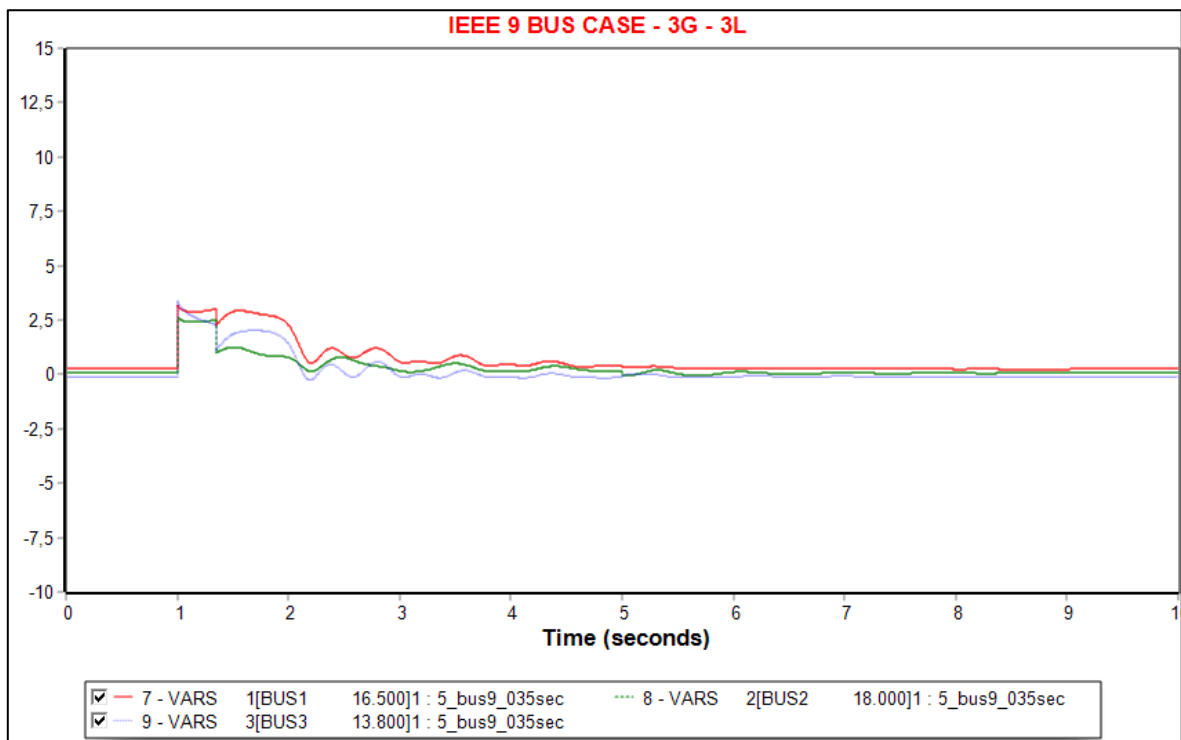
Γωνίες ισχύος γεννητριών 2 & 3, σε σχέση με τη γωνία της γεννήτριας 1



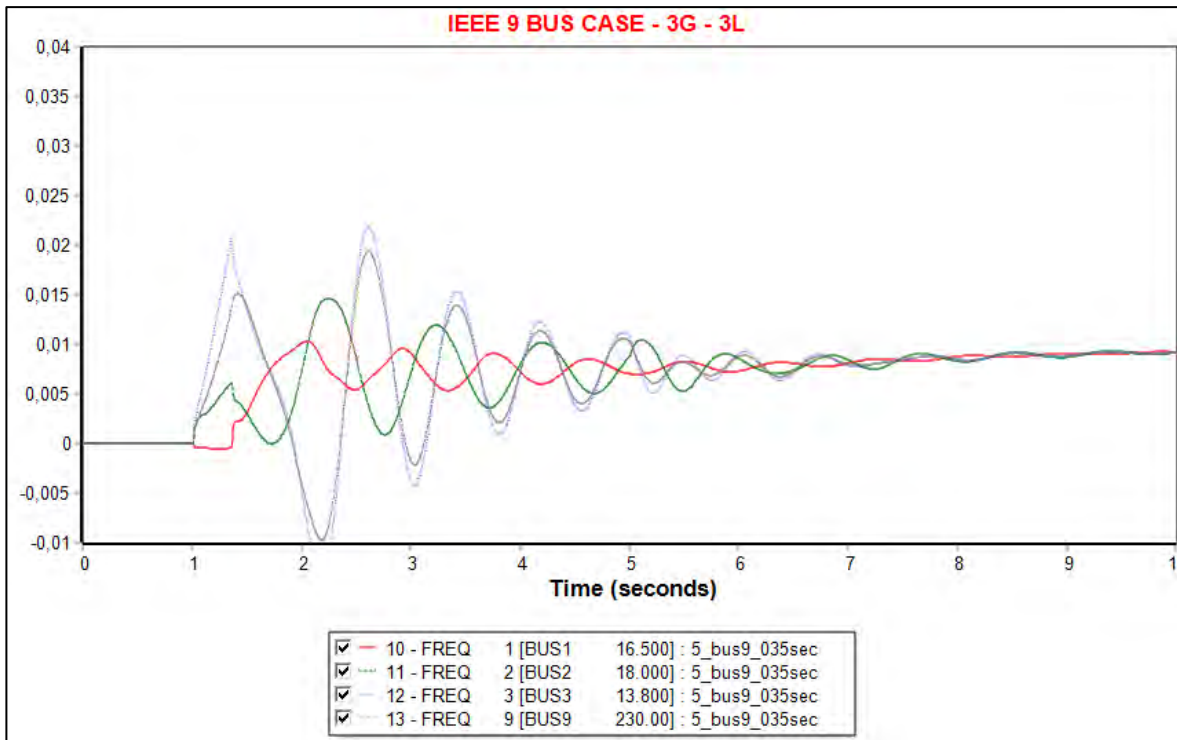
Σχήμα 6.29: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,35\text{sec}$. Τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος



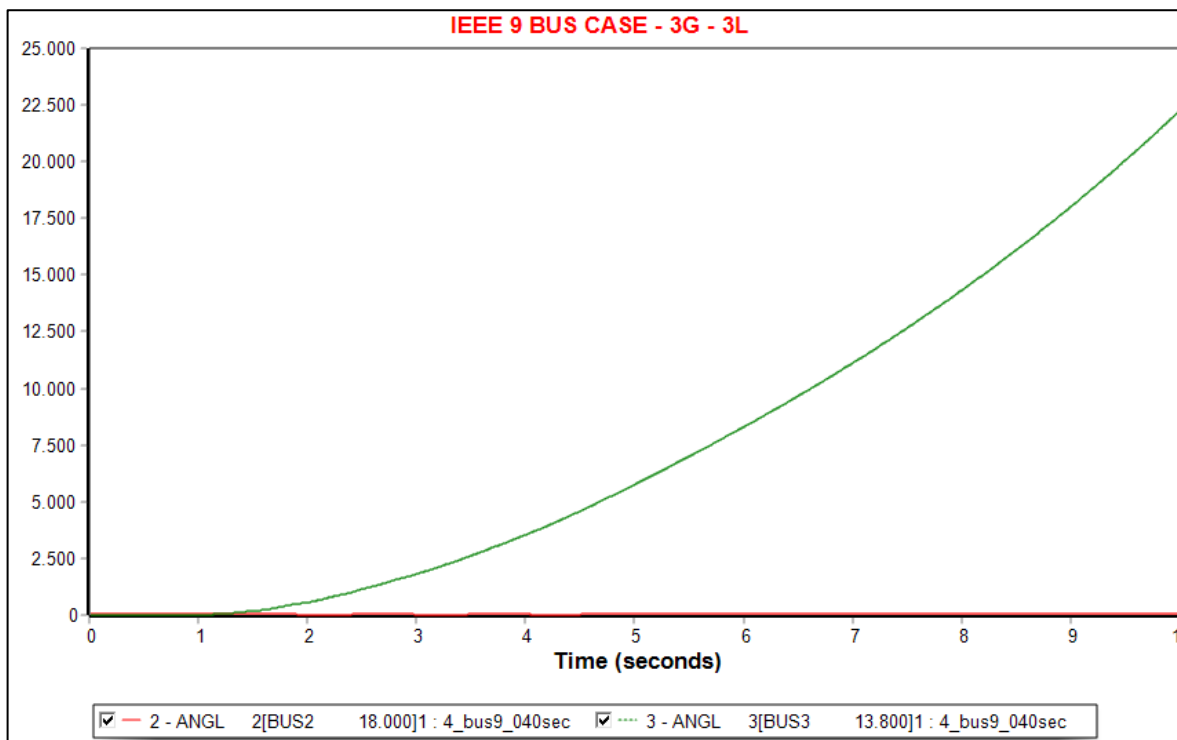
Σχήμα 6.30: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,35\text{sec}$. Πραγματική ισχύς γεννητριών



Σχήμα 6.31: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,35\text{sec}$. Άεργος ισχύς γεννητριών

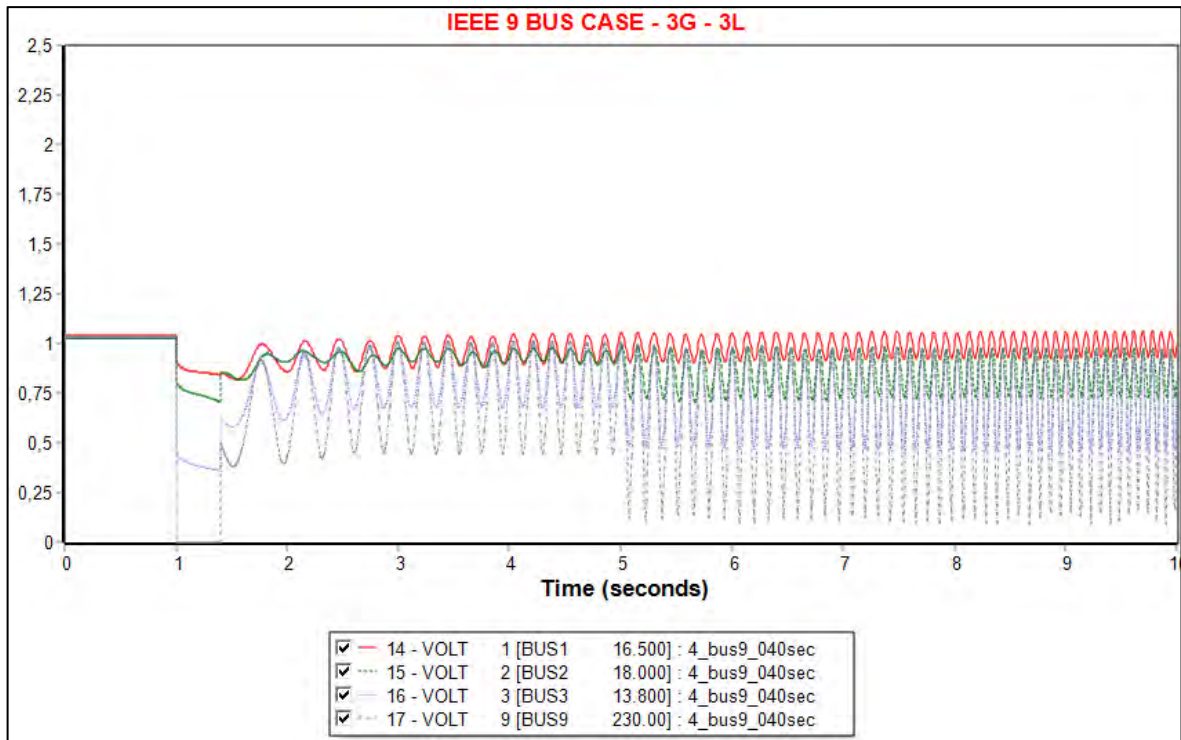


Σχήμα 6.32: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,35\text{sec}$. Συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος

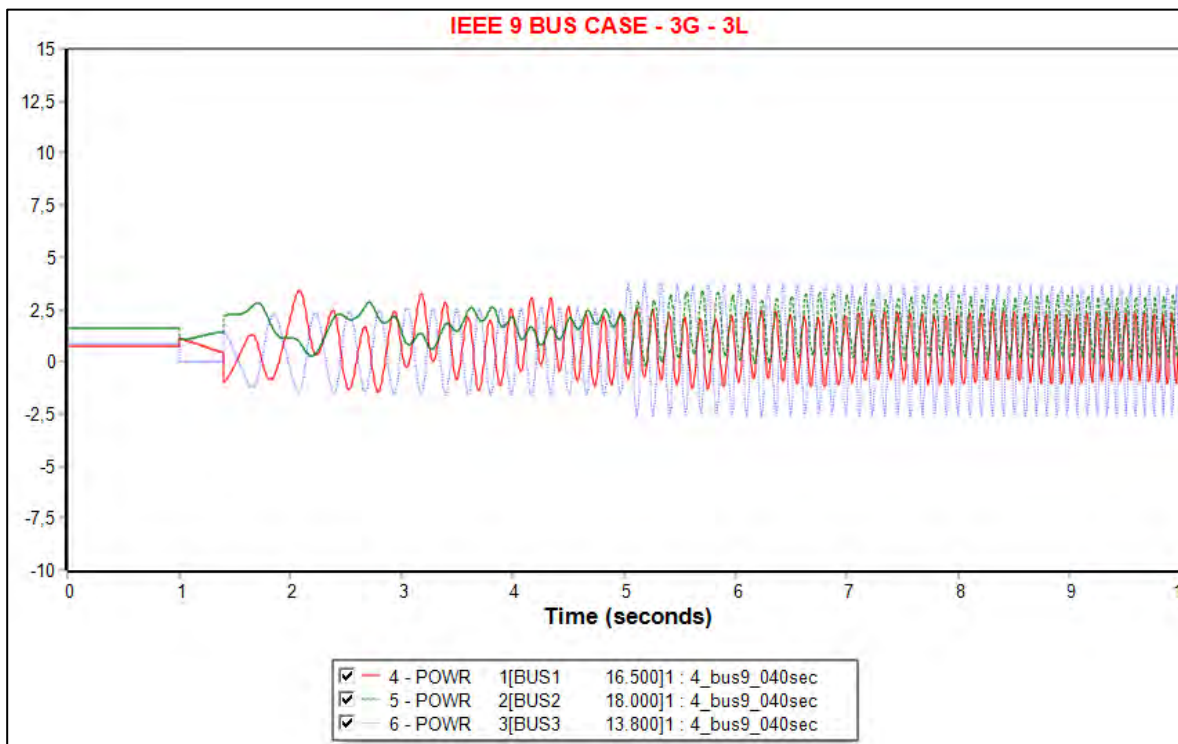


Σχήμα 6.33: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,40\text{sec}$.

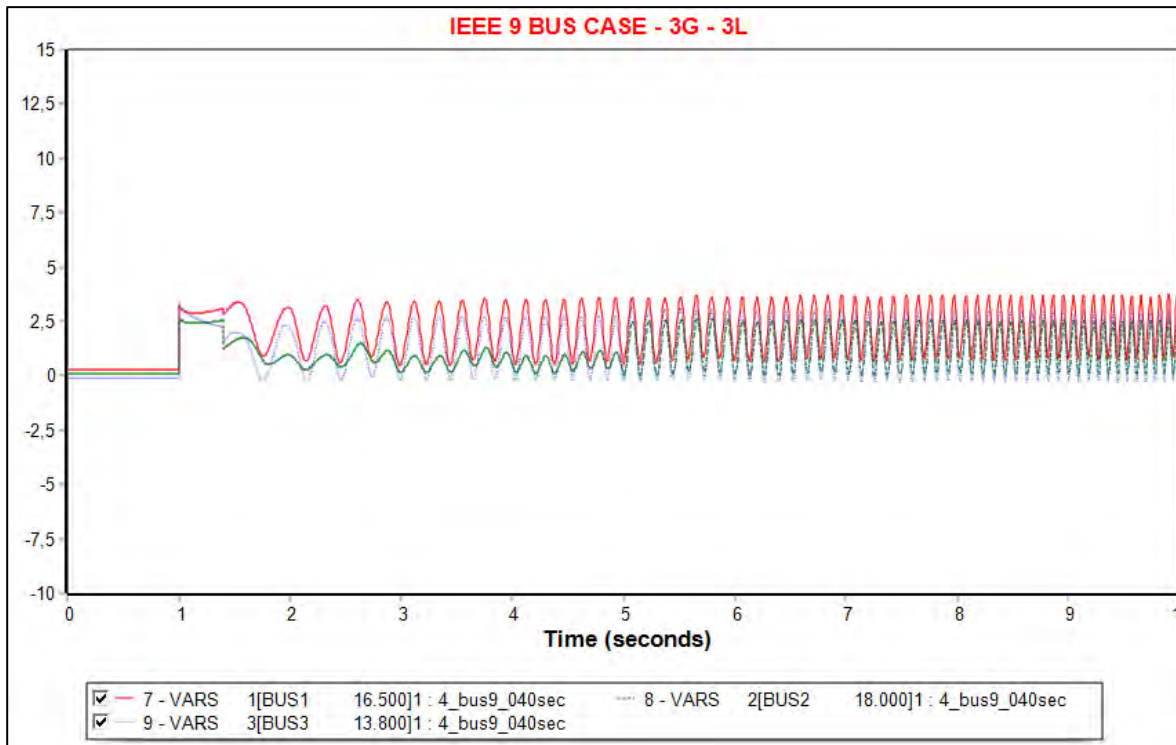
Γωνίες ισχύος γεννητριών 2 & 3, σε σχέση με τη γωνία της γεννήτριας 1



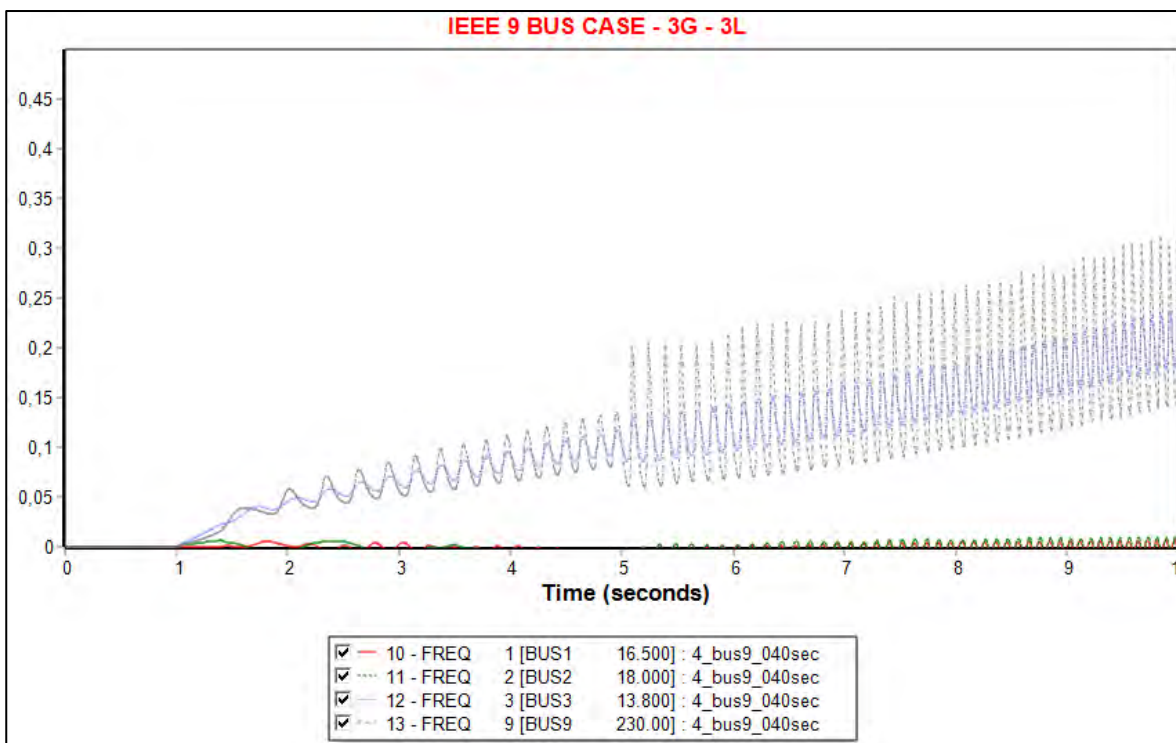
Σχήμα 6.34: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,40\text{sec}$. Τάσεις ζυγών γεννητριών και σφάλματος



Σχήμα 6.35: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,40\text{sec}$. Πραγματική ισχύς γεννητριών



Σχήμα 6.36: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,40\text{sec}$. Άεργος ισχύς γεννητριών



Σχήμα 6.37: Στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα στη γραμμή 8-9, πλησίον του ζυγού 9, εκκαθάριση όταν $t=1,40\text{sec}$. Συχνότητες ζυγών γεννητριών και σφάλματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συμβολή των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας στην οικονομική ανάπτυξη των χωρών, αλλά και στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των πολιτών τους, είναι καθοριστική, με την ηλεκτρική ενέργεια να αποτελεί πλέον ένα αναντικατάστατο αγαθό. Η σπουδαιότητα αυτή των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας επιβάλλει τη σωστή και εμπειριστατωμένη μελέτη τους, τόσο κατά το στάδιο σχεδιασμού και υλοποίησής τους, όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους αργότερα. Οι μελέτες που πραγματοποιούνται δεν περιορίζονται μόνο στις συνθήκες της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας των Συστημάτων και στις προοπτικές αναβάθμισής τους, αλλά επεκτείνονται και σε περιπτώσεις σφαλμάτων και άλλων σοβαρών διαταραχών, οι οποίες θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την ομαλή λειτουργία και ευστάθεια του συστήματος, με ανυπολόγιστες συνέπειες, όχι μόνο στον εξοπλισμό του, αλλά και στην αδιάλειπτη και ποιοτική τροφοδότηση των φορτίων των καταναλωτών. Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητη η σωστή επιλογή και ρύθμιση κατάλληλων μέσων προστασίας, τα οποία θα ενεργοποιηθούν, όταν απαιτηθεί, για την προστασία των συνιστωσών του δικτύου. Εξαιτίας του μεγέθους, αλλά και της πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει τα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, οι μελέτες που αναφέρθηκαν, πραγματοποιούνται μέσω ειδικών λογισμικών ηλεκτρονικού υπολογιστή, τα οποία, με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων, προσομοιώνουν εύκολα και γρήγορα τις διάφορες καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί ένα σύστημα, αποτελώντας έτσι ένα πολύτιμο εργαλείο στα χέρια των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, οι οποίοι και αξιολογούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη λήψη κατάλληλων αποφάσεων. Τέλος, περαιτέρω βελτιώσεις του τρόπου λειτουργίας και των δυνατοτήτων των λογισμικών προσομοίωσης, θα συμβάλουν στην ευκολότερη και πληρέστερη μελέτη των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.

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] Λαμπρίδης Δ., Ντοκόπουλος Π., Παπαγιάννης Γ., Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Τόμος Α', Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2007
- [4] Chowdhury Badrul H., Load-Flow Analysis in Power Systems, Electrical & Computer Engineering Department, University of Missouri-Rolla
- [5] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, Definition and Classification of Power System Stability, IEEE, 2004
- [6] Kundur Prabha, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc., 1994
- [7] Saadat Hadi, Power System Analysis, McGraw-Hill Inc., New York, 1999
- [8] Βοβός Νικόλαος Α., Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2017
- [9] Βοβός Νικόλαος Α., Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2013
- [10] Power System Simulation, Wikipedia
- [11] Program Operation Manual (POM), PSS/E Documentation
- [12] Ντοκόπουλος Πέτρος, Λαμπρίδης Δημήτρης, Μεταβατικά Φαινόμενα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1994