



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Σιδηρά Μαρία-Φωτεινή

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος 2020



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

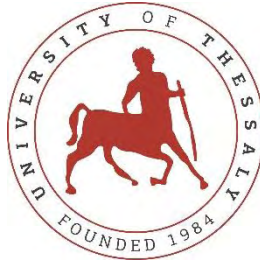
ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Σιδηρά Μαρία-Φωτεινή

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Βόλος 2020



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

RELIABILITY ANALYSIS OF POWER SYSTEMS

Diploma Thesis

Sidira Maria-Foteini

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

Volos 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Διπλωματικής μου Εργασίας, Δημήτριο Μπαργιώτα, για την 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».

Η Δηλούσα

(Υπογραφή)

Σιδηρά Μαρία Φωτεινή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύεται η έννοια της αξιοπιστίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Δίνεται έμφαση στο κομμάτι της στατικής ασφάλειας ενός ΣΗΕ και πραγματοποιείται αντίστοιχη μελέτη στο σύστημα των 9 ζυγών της ΙΕΕΕ.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται περιγραφή των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο περιγράφεται η δομή τους αλλά και τα συστατικά στοιχεία από τα οποία απαρτίζονται. Αναλύονται τα τρία επιμέρους τμήματα ενός συστήματος, παραγωγή, μεταφορά, διανομή, ενώ ταυτόχρονα περιγράφονται οι δομικές εγκαταστάσεις που τα απαρτίζουν (γεννήτρια, μετασχηματιστής, γραμμές μεταφοράς, φορτία)

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται παρουσίαση των εξισώσεων που περιγράφουν ένα σύστημα ισχύος και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι Newton – Raphson και Gauss με τις οποίες επιλύεται ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 3 διατυπώνεται ο ορισμός της αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και αναλύονται τα συστατικά στοιχεία του, τα οποία είναι η επάρκεια και η ασφάλεια. Διατυπώνονται οι δείκτες αξιοπιστίας και γίνεται εκτενής περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται κατά τη μελέτη αξιοπιστίας ενός συστήματος ισχύος, με έμφαση στη στατική ασφάλεια, ώστε στο κεφάλαιο 4 να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση μιας τέτοιας μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το σύστημα των 9 ζυγών της ΙΕΕΕ το οποίο μελετάται με τη χρήση του λογισμικού Siemens PSS/E. Στο σύστημα πραγματοποιείται εξομοίωση πιθανών διαταραχών που δύνανται να επηρεάσουν τη αξιόπιστη λειτουργία του, και προκύπτουν τα ανάλογα συμπεράσματα.

ABSTRACT

In this Diploma Thesis the concept of power system reliability is being analysed, emphasizing on the security of a power system. Contingency analysis is being made on the 9-bus IEEE power system.

In 1st Chapter there is an introduction to modern power systems, with brief description of their structure and components. Systems individual components (generation, transmission and distribution) are described.

In 2nd Chapter there is an extended description of the power flow analysis including Newton-Raphson and Gauss Methods. It also describes the solution of power flow equations.

Chapter 3 defines reliability of a power system and analyses its components, adequacy and security. Reliability indices are being presented as well as the process of a power system reliability analysis. Emphasis is being given on the static security part.

Chapter 4 presents a 9-bus IEE system, which is being studied using Siemens PSS-E software. Possible contingencies are being simulated and conclusions are made.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
ABSTRACT	vii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	11
1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	12
1.2 Δομή εγκαταστάσεων ενός ΣΗΕ.....	15
1.2.1 Σύγχρονη γεννήτρια.....	15
1.2.2 Ο Μετασχηματιστής	17
1.2.3 Η γραμμή μεταφοράς	19
1.2.4 Τα φορτία.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	22
ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	22
2.1 Εξισώσεις Ροής Φορτίου.....	22
2.2 Μέθοδος Newton - Raphson (N-R).....	27
2.3 Μέθοδος Gauss - Seidel (G-S).....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	35
ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	35
3.1 Εισαγωγή	36
3.2 Επάρκεια ΣΗΕ	36
3.3 Ασφάλεια ΣΗΕ	44
3.4 Μελέτη Στατικής Ασφάλειας ΣΗΕ	46
3.4.1 Δείκτες ιεράρχησης διαταραχών	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	51
ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 9 ΖΥΓΩΝ.....	51
4.1 Εισαγωγή	51
4.2 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας συστήματος 9 ζυγών.....	51
4.3 Σενάρια Μελέτης αξιοπιστίας συστήματος 9 ζυγών.....	57
4.3.1 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 4-5	57
4.3.2 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 4-6	61
4.3.3 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 5-7	64
4.3.4 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 6-9	67
4.3.5 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 7-8	70
4.3.6 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 8-9	73
4.3.7 Αφαίρεση γεννήτριας 2.....	76

4.3.8 Αφαίρεση γεννήτριας 3	79
4.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων την προσομοίωσης.....	82
4.4.1 Αξιολόγηση ως προς τις τάσεις των ζυγών.....	85
4.4.2 Αξιολόγηση ως προς τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών μεταφοράς.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	92
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Με τον όρο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ή σύστημα ηλεκτρικής ισχύος χαρακτηρίζεται ένα σύνολο εξοπλισμού, που αποτελείται από σταθμούς παραγωγής, υποσταθμούς ανύψωσης και υποβιβασμού τάσης, εναέριες και υπόγειες γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός του συστήματος είναι η τροφοδότηση ηλεκτρικών καταναλωτών με την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια αξιόπιστα, με υψηλά ποιοτικά χαρακτηριστικά και με χαμηλό κόστος.

Ιστορικά ο πρώτος άνθρωπος που αναφέρεται στην ανακάλυψη του ηλεκτροστατικού πεδίου είναι ο Θαλής ο Μιλήσιος (7ο π.Χ. αιώνα). Περίπου 2500 χρόνια αργότερα ο Άγγλος William Gilbert (1660 μ.Χ.) ενασχολείται με αυτά τα φαινόμενα κατασκευάζοντας την πρώτη ηλεκτροστατική μηχανή. Στα χρόνια που ακολουθούν 18 και 19 αιώνα διατυπώνονται οι πρώτοι νόμοι και κατασκευάζονται οι πρώτες ηλεκτρικές μηχανές. Οι μεγάλοι θεωρητικοί όπως Michael Faraday, Luigi Galvani, Alessandro Volta, Andre-Marie Ampere και Georg Simon Ohm διατυπώνουν τους βασικούς νόμους που διέπουν φαινόμενα που σχετίζονται με τον ηλεκτρισμό. Ο James Clerk Maxwell (1833-1879) θεμελίωσε τις σχέσεις ανάμεσα στα ηλεκτρικά και μαγνητικά μεγέθη. Η μαθηματική έκφραση των σχέσεων αυτών, οι γνωστές εξισώσεις του Maxwell, αποτελούν τη θεωρητική βάση όλων των ενεργειακών συστημάτων που στηρίζονται στις ιδιότητες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Έτσι το 1866 προτείνεται από τον Werner von Siemens η πρώτη στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή. Την ίδια εποχή ο Heinrich Göbel κατορθώνει μετά από πολλά πειράματα να κατασκευάσει την πρώτη λυχνία για ηλεκτρικό φωτισμό. Οι Willis Whitnew και Thomas Edison βελτιώνουν στη συνέχεια την κατασκευή αυτή, αντικαθιστώντας το μεταλλικό νήμα με νήμα από βολφράμιο και αυξάνοντας τη φωτεινή απόδοση της ηλεκτρικής λυχνίας.

Γύρω στα 1878-1884 ο εμπορικός και ιδιωτικός τομέας αρχίζουν να ενδιαφέρονται για την ηλεκτρική ενέργεια. Το ηλεκτρικό φως πλημμυρίζει τις πλατείες και αποτελεί πλέον μέσο διαφήμισης και ένδειξη πολυτέλειας. Οι πρώτες αξιόλογες εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται ταυτόχρονα στη Νέα Υόρκη, στην Pearl Street και στο Λονδίνο το 1882.

Αποτελούν ουσιαστικά το πρώτο πλήρες ηλεκτρικό σύστημα, το οποίο αποτελείται από γεννήτρια, καλώδιο, ασφάλεια, μετρητή και φορτία.

Η διαμάχη για τη χρήση συνεχούς ή εναλλασσόμενης τάσης έληξε στις αρχές του 20ου αιώνα με την επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς η μορφή αυτή επιτρέπει την ευκολότερη και οικονομικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τη χρήση μετασχηματιστών.

Στην Ελλάδα, η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ιδρύεται το 1889 στην Αθήνα από τη Γενική Εταιρεία Εργοληψιών. Τα ανάκτορα είναι το πρώτο κτίριο που θα ηλεκτροφωτισθεί. Δέκα χρόνια αργότερα κάνει την εμφάνισή της η αμερικανική πολυεθνική εταιρεία Thomson-Houston που θα αναλάβει την ηλεκτροδότηση και άλλων μεγάλων ελληνικών πόλεων. Μέχρι το 1929 θα ηλεκτροδοτηθούν 250 πόλεις της Ελλάδας με πληθυσμό πάνω από 5.000 κατοίκους από περίπου ισάριθμα εργοστάσια παραγωγής.

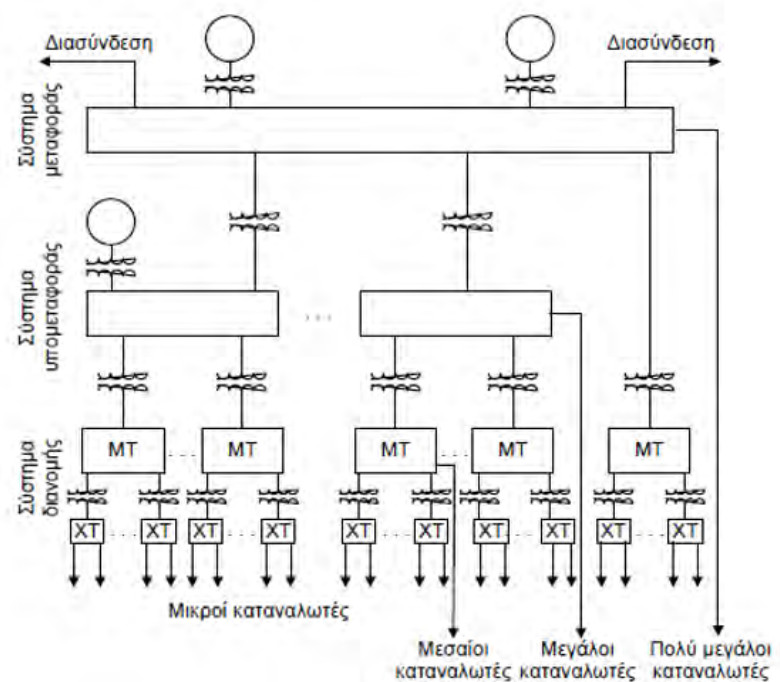
Το 1950 ιδρύεται η ΔΕΗ με στόχο την ενοποίηση όλων των τοπικών παραγωγών και την προώθηση του έργου του εξηλεκτρισμού. Κατά την ίδρυση της ΔΕΗ υπήρχαν 385 εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη την επικράτεια, από τις οποίες οι 327 ήταν ιδιωτικές και οι 58 κοινοτικές ή δημοτικές. Η ίδρυση της ΔΕΗ αποτελεί ένα σημαντικότατο βήμα της μεταπολεμικής οικονομίας της χώρας. Με το νόμο 3523/56 η ΔΕΗ αναλαμβάνει την εξαγορά όλων των μεμονωμένων επιχειρήσεων και την εφαρμογή ενιαίας ενεργειακής πολιτικής στη χώρα. Η πολιτική αυτή δίνει έμφαση στην εντατική χρήση των εγχώριων πρώτων υλών, στη δημιουργία εθνικού διασυνδεδεμένου δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και στην προώθηση του εξηλεκτρισμού στις πλέον απόμακρες περιοχές. Από το Φεβρουάριο του 2001 η ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας άνοιξε προς τον ελεύθερο ανταγωνισμό, δηλαδή απελευθερώθηκε από το μονοπωλιακό Σχήμα λειτουργίας, σύμφωνα με την οδηγία 96/92/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης.[1]

1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως ορίστηκε και παραπάνω, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα σύνολο συνεργαζόμενων εγκαταστάσεων, που στόχο έχουν την αδιάκοπη και αξιόπιστη τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Βασικός στόχος ενός ΣΗΕ είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση ικανοποιώντας ταυτόχρονα

απαιτήσεις για σταθερή τάση και συχνότητα, ποιότητα ισχύος, αξιοπιστία και ασφάλεια τροφοδοσίας.

Ακόμη και το μικρότερο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα δίκτυο με μεγάλη πολυπλοκότητα. Η δομή του καθορίζεται κυρίως από το μέγεθος του, καθιστώντας έτσι μια μεγάλη ποικιλία δικτύων ανάλογα με την πολυπλοκότητα τους. Δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες που να αφορούν τη δόμηση ενός συστήματος, οι οποίοι να είναι κοινοί για όλα τα συστήματα. Όλα τα συστήματα όμως παρουσιάζουν την εξής ομοιομορφία αναφορικά με τη δομή τους. Εργάζονται σε διάφορα επίπεδα τάσης που χωρίζονται μεταξύ τους με μετασχηματιστές. Είναι κοινή πρακτική να διαιρούμε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε δομές ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελεί η καθεμιά. Οι επιμέρους συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται σε 3 μεγάλες κατηγορίες όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [1]

Σταθμοί Παραγωγής:

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι ανάλογα με την πηγή πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν, διακρίνονται σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, υδροηλεκτρικούς και πυρηνικούς σταθμούς. Στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς

μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια η χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο καύσιμο (κάρβουνο, λιγνίτης, φυσικό αέριο, πετρέλαιο). Με την καύση του καυσίμου απελευθερώνεται χημική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού στο λέβητα. Ο ατμός διοχετεύεται στον αμοστρόβιλο όπου παρέχει μέρος της ενέργειας του σε μηχανική. Ο στρόβιλος με τη σειρά του περιστρέφει τη γεννήτρια όπου η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, η δυναμική ενέργεια των υδάτων. Στους πυρηνικούς σταθμούς, ο ελεγχόμενος πυρηνικός αντιδραστήρας αντικαθιστά το συμβατικό λέβητα σαν πηγή θερμικής ενέργειας. Η θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη σχάση, χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας ατμού. Σε μικρότερες ποσότητες είναι δυνατόν να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια από τον άνεμο, τη γεωθερμία ή την ηλιακή ενέργεια.[2]

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διακριθεί σε δύο επιμέρους δομές. Το σύστημα υπομεταφοράς και το σύστημα μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς διαχειρίζεται μεγάλα ποσά ενέργειας και διασυνδέει όλους τους σταθμούς παραγωγής και όλα τα σημεία μεγάλης κατανάλωσης στο σύστημα. Η ενέργεια μπορεί να διακινηθεί προς κάθε επιθυμητή κατεύθυνση μέσω των διάφορων γραμμών του συστήματος μεταφοράς και μάλιστα με τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η βέλτιστη οικονομική λειτουργία του συστήματος. Το σύστημα μεταφοράς δέχεται την ενέργεια κατευθείαν από τους σταθμούς παραγωγής μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης της τάσης, και είναι δυνατόν να εξυπηρετεί κατευθείαν τους μεγάλους καταναλωτές, ενώ ταυτόχρονα ανταλλάσσει ενέργεια με άλλα γειτονικά ενεργειακά συστήματα. Αναφορικά με τη δομή του, το σύστημα μεταφοράς έχει δομή βρόγχου ώστε να διοχετεύει την ενέργεια σε μεγαλύτερο συνδυασμό κατευθύνσεων.[2] Τα τυπικά επίπεδα τάση του συστήματος μεταφοράς για το Ελληνικό δίκτυο είναι τα 150 kV και τα 400 kV, ενώ στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται και τα 220 kV. Οι υψηλότερες τάσεις μεταφοράς σε χρήση σήμερα είναι τα 1200 kV για το τριφασικό σύστημα και τα ±600 kV για το συνεχές ρεύμα. Στους σταθμούς ή κέντρα μετασχηματισμού τάσης η τάση των ακροδεκτών των γεννητριών των σταθμών παραγωγής, η οποία είναι συνήθως 20 kV - 30 kV ανυψώνεται στα επίπεδα των τάσεων του συστήματος μεταφοράς. Στα αστικά και βιομηχανικά κέντρα κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, οι γραμμές μεταφοράς

τερματίζουν σε αντίστοιχους υποσταθμούς, όπου οι τάσεις υποβιβάζονται στο επίπεδο των τάσεων του συστήματος διανομής, δηλαδή συνήθως στα 15 kV - 20 kV και σπάνια στα 6 kV.[1] Το σύστημα υπομεταφοράς διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια σε έναν αριθμό σταθμών διανομής που βρίσκεται σε κάποια γεωγραφική περιοχή σε ένα επίπεδο τάσης που τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 23kV και 150kV. Αυτό δέχεται την ενέργεια είτε κατευθείαν από τους σταθμούς παραγωγής είτε από το σύστημα μεταφοράς μέσω υποσταθμών (ζεύξης ή/και μετασχηματισμού). Τα δίκτυα υπομεταφοράς σήμερα είναι τα δίκτυα υπομεταφοράς του χθες, τα οποία λόγω μεγέθυνσης του συστήματος επιτελούν διαφορετικό ρόλο απ' ότι μέχρι τώρα. Ειδοποιός διαφορά είναι η ύπαρξη περισσότερων γραμμών μεταφοράς με μικρότερο μήκος, και η μικρότερη ισχύς που διακινούν.

Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης, και τους μετασχηματιστές διανομής με τους οποίους η μέση τάση (π.χ. 15 kV) υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση (π.χ. 220kV). Το σύστημα αυτό τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς διανομής και παρέχει ενέργεια σε μικρούς οικιακούς καταναλωτές. Τα συστήματα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης στις αστικές πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι κατά κανόνα υπόγεια, ενώ στις άλλες περιοχές είναι εναέρια. Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται σε τεχνολογίες που καλύπτουν ποικίλα και σημαντικά τεχνικά προβλήματα, όπως εγκατάσταση και συντήρηση των εναέριων και υπόγειων γραμμών, μετρητές, διατάξεις ασφάλειας κ.ά. Σε ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να δαπανάται στο δίκτυο διανομής μέχρι και το μισό του επενδυμένου κεφαλαίου.[2]

1.2 Δομή εγκαταστάσεων ενός ΣΗΕ

Η σύγχρονη γεννήτρια, ο τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος και οι γραμμές μεταφοράς είναι τα συστατικά στοιχεία ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολουθεί μια λεπτομερής περιγραφή κάθε μιας συνιστώσας.

1.2.1 Σύγχρονη γεννήτρια

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αντλούν το μεγαλύτερο μέρος της απαιτούμενης ισχύος από τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες. Οι σύγχρονες γεννήτριες ή αλλιώς εναλλακτήρες είναι σύγχρονες μηχανές που μετατρέπουν μηχανική ενέργεια σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Τα δύο βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μια γεννήτρια είναι ο στάτης, που είναι το ακίνητο μέρος, και ο δρομέας, ο οποίος είναι περιστρεφόμενος. Για τη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας απαιτείται τροφοδότηση των τυλιγμάτων του δρομέα από συνεχές ρεύμα. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται παίρνοντας κίνηση από κάποια εξωτερική κινητήρια μηχανή, το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο είναι αυτό που παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία εμφανίζεται στην έξοδο της μηχανής. Ο στάτης είναι μια κοίλη κυλινδρική κατασκευή με διαμήκεις αυλακές στην εσωτερική του επιφάνεια, μέσα στις οποίες τοποθετούνται τρία τυλίγματα (συστάδες αγωγών) που έχουν απόσταση μεταξύ τους 120 μοίρες. Το τυλίγμα αυτό είναι δύο πόλων αφού μπορεί να παράγει ένα νότιο και ένα βόρειο πόλο στο εσωτερικό της μηχανής. Ο δρομέας μιας σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας μεγάλος ηλεκτρομαγνήτης που τοποθετείται στον άξονα της μηχανής και περιστρέφεται μέσα στον στάτη. Υπάρχουν δύο τύποι γεννητριών ανάλογα με τον τύπο του δρομέα, ο οποίος μπορεί να είναι έκτυπων πόλων ή κυλινδρικού δρομέα. Οι πόλοι μιας γεννήτριας έκτυπων πόλων διακρίνονται στην επιφάνεια του δρομέα, ενώ όταν ο δρομέας είναι κυλινδρικός οι πόλοι βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με την υπόλοιπη επιφάνεια του. Δρομείς με κυλινδρική επιφάνεια έχουν συνήθως οι γεννήτριες δύο ή τεσσάρων πόλων, ενώ δρομείς εκτύπων πόλων έχουν οι γεννήτριες με περισσότερους από τέσσερις πόλους. Στις σύγχρονες γεννήτριες ο δρομέας θα πρέπει να διαθέτει ένα τυλίγμα που να τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα. Ωστόσο ο δρομέας περιστρέφεται άρα υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθεί κάποιος ειδικός τρόπος τροφοδοσίας του τυλιγματος του. Οι πιο συνήθεις μέθοδοι για την τροφοδοσία του δρομέα είναι είτε με τροφοδοσία από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, οπότε ο δρομέας θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με ψήκτρες και δαχτυλίδια, είτε από ειδική πηγή συνεχούς ρεύματος η οποία βρίσκεται πάνω στον άξονα της γεννήτριας.

Οι σύγχρονες γεννήτριες καλούνται έτσι επειδή οι συχνότητες των τάσεων που παράγουν βρίσκονται σε συγχρονισμό με την ταχύτητα περιστροφής τους. Ο δρομέας τους είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης του οποίου το πεδίο περιστρέφεται με την ίδια φορά με αυτή του δρομέα. Η σχέση της ηλεκτρικής συχνότητας του στάτη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$f_e = \frac{n_p P}{120}$$

όπου:

f_e : η ηλεκτρική συχνότητα σε Hz

n_m : η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε r/min (= η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στις σύγχρονες μηχανές)

P: ο αριθμός των πόλων [3]

Η απλούστερη μορφή λειτουργίας της μηχανής στη μόνιμη κατάσταση είναι εκείνη κατά την οποία η μηχανή λειτουργεί χωρίς φορτίο. Αυτή η λειτουργία χαρακτηρίζεται από μηδενικά ρεύματα στάτη, από σταθερό ρεύμα διέγερσης και σταθερή ταχύτητα. Σε αυτή τη λειτουργία οι τάσεις στάτη είναι ημιτονοειδείς ποσότητες και χαρακτηρίζονται από τριφασική συμμετρία, έχουν δηλαδή ίδιο μέτρο και φασική διαφορά 120 μοίρες η μία από την άλλη. Αυτές ονομάζονται ηλεκτρεγερτική δυνάμεις (ΗΕΔς). Μια άλλη μορφή λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής είναι αυτή κατά την οποία χαρακτηρίζεται από συμμετρική φόρτιση. Αυτό συμβαίνει όταν η μηχανή συνδέεται σε ένα τριφασικό ζυγό, οι τάσεις του οποίου παρουσιάζουν τριφασική συμμετρία. Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή της επιρροής της σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο.

Η μιγαδική ισχύς που παρέχει ή απορροφά η σύγχρονη μηχανή ανά φάση είναι:

$$S_G = P_G + jQ_G = V_a I_a^* = |V||I| \cos\varphi + j|V||I| \sin\varphi$$

Επειδή το I_a ορίζεται θετικό όταν εξέρχεται από τη μηχανή και αυτή λειτουργεί σα γεννήτρια οι εξερχόμενες P_G , Q_G έχουν θετικές τιμές.

1.2.2 Ο Μετασχηματιστής

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από τμήματα που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Η σύνδεση των επιμέρους τμημάτων σε ένα ενιαίο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τη χρήση μετασχηματιστών. Οι μετασχηματιστές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελούν. Οι

μετασχηματιστές ισχύος χρησιμοποιούνται για τη μετάβαση ενός τμήματος επιπέδου τάσης A σε ένα τμήμα επιπέδου τάσης B και έχουν σταθερό λόγο μετασχηματισμού. Οι μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν την τάση ή τη ροή ισχύος του συστήματος και έχουν λόγο μετασχηματισμού που μπορεί να μεταβάλλεται με μικρά βήματα ύστερα από σχετική εντολή.

Οι μετασχηματιστές ισχύος ανάλογα με τη λειτουργία τους διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- *Μετασχηματιστές γεννήτριας*, που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης από το επίπεδο της γεννήτριας στο επίπεδο μεταφοράς (20/150 kV ή 20/400 kV)
- *Μετασχηματιστές μεταφοράς*, που χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό της ισχύος μεταξύ διάφορων επιπέδων τάσης του συστήματος μεταφοράς (20/400kV)
- *Μετασχηματιστές διανομής*, που χρησιμοποιούνται για τον υποβιβασμό της τάσης στα χαμηλά επίπεδα τάσης που ζητούνται από τους καταναλωτές (15kV/330V)

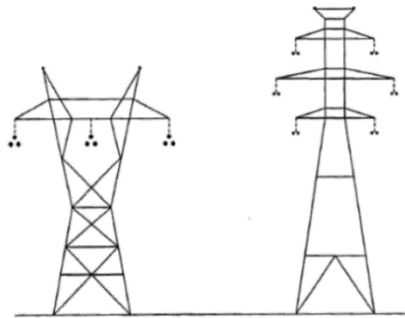
Αναφορικά με τις διατάξεις των μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται στα τριφασικά συστήματα, υπάρχουν οι μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος που κατασκευάζονται συνήθως από τρεις ξεχωριστούς μονοφασικούς μετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές μικρότερης ισχύος που έχουν ολοκληρωμένη τριφασική κατασκευή με ενιαίο πυρήνα και για τις τρεις φάσεις.

Οι πιθανές συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων των τριφασικών μετασχηματιστών, οι οποίες καθορίζουν και τη λειτουργία του μετασχηματιστή είναι οι εξής:

- Συνδεσμολογία Υ-Υ (αστέρα-αστέρα): Συνήθης τρόπος σύνδεσης μετασχηματιστών μεταφοράς με γειωμένο ουδέτερο.
- Συνδεσμολογία Υ-Δ (αστέρα-τρίγωνο): Συνήθης τρόπος σύνδεσης μετασχηματιστών διανομής.
- Συνδεσμολογία Δ-Υ (τρίγωνο-αστέρα): Συνήθης τρόπος σύνδεσης μετασχηματιστών γεννήτριας με γειωμένο ουδέτερο.
- Συνδεσμολογία Δ-Δ (τρίγωνο-τρίγωνο)

1.2.3 Η γραμμή μεταφοράς

Η γραμμή μεταφοράς είναι μία από τις σημαντικότερες συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η βασική της λειτουργία είναι να μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια, με τις μικρότερες δυνατόν απώλειες, από τους σταθμούς που παράγεται προς τα κέντρα κατανάλωσης, που απέχουν συνήθως μεταξύ τους μεγάλες αποστάσεις. Τοποθετούνται πάνω σε πύργους μεταφοράς (Σχήμα 1.2) οι οποίοι μπορεί να αποτελούνται από απλά ή διπλά κυκλώματα. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούν αγωγούς αλουμινίου, οι οποίοι σε κάποιες περιπτώσεις ενισχύονται από χάλυβα ή κράμα.



Σχήμα 1.2: Πύργοι γραμμών μεταφοράς

Οι τρεις βασικές παράμετροι μιας γραμμής μεταφοράς, που μετρούνται συνήθως ανά μονάδα μήκους είναι:

- Η εν σειρά αντίσταση r , σε Ω/m
- Η εν σειρά επαγωγή L , σε H/m
- Η εγκάρσια χωρητικότητα C , σε F/m [2,4]

Η αντίσταση σε συνεχές ρεύμα ενός αγωγού από ομοιόμορφο υλικό δίνεται από τον τύπο:

$$R_{dc} = \rho \frac{l}{A} \Omega$$

Όπου

A = η διατομή του αγωγού σε mm

l = το μήκος του αγωγού σε m

ρ = η ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού σε $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$

Το ρεύμα κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη τη διατομή του αγωγού μόνο στην περίπτωση που είναι συνεχές, ενώ αν είναι εναλλασσόμενο προκαλείται αύξηση της αντίστασης του αγωγού.

Η εν σειρά επαγωγή L είναι η παράμετρος μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψιν η τάση που επάγεται στους αγωγούς λόγω των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από τη διαρροή του αγωγού από μεταβαλλόμενο ρεύμα. Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότεροι από ένας αγωγοί στον ίδιο χώρο, ο καθένας από αυτούς δημιουργεί δικό του μαγνητικό πεδίο, δημιουργώντας μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται τάσεις εξ επαγωγής, τα μέτρα των οποίων εξαρτώνται από τα επαγωγικά χαρακτηριστικά των αγωγών. Η επαγωγή είναι η σημαντικότερη παράμετρος της γραμμής διότι επηρεάζει την ικανότητα μεταφοράς της γραμμής.

Η χωρητικότητα μιας γραμμής μεταφοράς είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των αγωγών και είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη κατά το μήκος της γραμμής. Αυτή η διαφορά δυναμικού προκαλεί ροή εγκάρσιου ρεύματος διαρροής μεταξύ των αγωγών, το οποίο επηρεάζει την πτώση τάσης κατά το μήκος της γραμμής, την απόδοση και το συντελεστή ισχύος αυτής, κάθε και την ευστάθεια του συστήματος στο οποίο ανήκει η γραμμή.

1.2.3.1 Ικανότητα φόρτισης των γραμμών μεταφοράς

Ένας βασικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στη σχεδίαση και λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανότητα φόρτισης των γραμμών μεταφοράς. Υπάρχει ένα όριο πέραν του οποίου δεν μπορούμε να διακινήσουμε άλλη ενέργεια. Για εναέριες γραμμές μικρού μήκους και υπόγεια καλώδια το όριο αυτό καθορίζεται κυρίως από τη θερμική αντοχή των αγωγών της γραμμής. Για εναέριες γραμμές μεγάλου μήκους το όριο αυτό καθορίζεται από τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής, η οποία περιορίζει την ισχύ που μπορεί να μεταφερθεί δια αυτής. Κατά τη ροή ρεύματος μέσω των γραμμών μικρού μήκους αναπτύσσεται θερμότητα, λόγω των απωλειών, που προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας τους. Τα πιθανά αποτέλεσμα της υπέρβασης των εν λόγω ορίων είναι το τάνυσμα των αγωγών, ενώ στα καλώδια μπορεί να επέλθει καταπόνησης ή και καταστροφή της μόνωσης τους. Θεωρητικά η μέγιστη πραγματική ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί μέσω μιας γραμμής μεταφοράς καλείται όριο στατικής ευστάθειας P_{max} . Καθώς το μήκος της γραμμής αυξάνεται το όριο στατικής ευστάθειας μειώνεται. Το πρακτικό όριο φόρτισης μιας γραμμής μεταφοράς βρίσκεται κάτω από το όριο στατικής ευστάθειας.

1.2.4 Τα φορτία

Ως φορτίο καλείται μια συσκευή ή ένα σύνολο συσκευών που απορροφούν ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Ανάλογα με το μέγεθος και το είδος του φορτίου οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διαχωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες: τους βιομηχανικούς, τους οικιακούς, τους εμπορικούς, και τους αγροτικούς καταναλωτές. Τα χαρακτηριστικά ενός τυπικού σύνθετου ηλεκτρικού φορτίου είναι τα εξής:

1. Το μέγεθος του και ο τρόπος μεταβολής του με το χρόνο μπορούν σε μεγάλο βαθμό να προβλεφθούν.
2. Μεταβάλλεται πολύ αργά με το χρόνο ώστε να είναι σχεδόν σταθερό από λεπτό σε λεπτό.
3. Καταναλώνει πάντα άεργο ισχύ, αφού τα πιο βασικά στοιχεία ενός φορτίου είναι οι κινητήρες που είναι πάντοτε επαγωγικοί.
4. Είναι πάντοτε συμμετρικό. Στους τριφασικούς μεγάλους κινητήρες η συμμετρία είναι αυτόματη, ενώ στα μονοφασικά φορτία η συμμετρία επιτυγχάνεται με σκόπιμη κατανομή των φορτίων στο επίπεδο διανομής, και στις τρεις φάσεις. [4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η ανάλυση ροής φορτίου αποτελεί τη σημαντικότερη μέθοδο για την επίλυση και διερεύνηση προβλημάτων σχετικά με τα συστήματα ισχύος, τόσο στο επίπεδο λειτουργίας τους, όσο και στον σχεδιασμό τους. Με δεδομένο ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς, η μέθοδος αυτή επιλύει το σύστημα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του, υπολογίζοντας τις μεταβλητές κατάστασης (τάσεις ζυγών, ροές ισχύος στους κλάδους και στους μετασχηματιστές), χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις μεταβατικές καταστάσεις του συστήματος.[5]

2.1 Εξισώσεις Ροής Φορτίου

Ένα απλό σύστημα ηλεκτρικής ισχύος αποτελείται από γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, φορτία κλπ. Τα στατικά στοιχεία του συστήματος όπως είναι οι μετασχηματιστές οι γραμμές μεταφοράς κ.ά., αντιπροσωπεύονται από τα αντίστοιχα ισοδύναμα τους, και το δίκτυο που σχηματίζουν μπορεί να θεωρηθεί γραμμικό. Αντίστοιχα οι γεννήτριες και τα φορτία αντιμετωπίζονται ως μη γραμμικά στοιχεία. Ακολουθεί η συλλογιστική πορεία για την εξαγωγή των εξισώσεων ροής φορτίου.

Επεξήγηση των συμβόλων που χρησιμοποιούνται σε αυτή την παράγραφο:

S_{Gi} : μιγαδική ισχύς γεννήτρια i

S_{Li} : μιγαδική ισχύς που καταναλώνεται από το φορτίο i

S_{Ti} : μιγαδική ισχύς που μεταφέρεται από τη γραμμή μεταφοράς i

P_{Gi} : πραγματική ισχύς γεννήτριας i

Q_{Gi} : άεργος ισχύς γεννήτριας i

P_{Li} : πραγματική ισχύς φορτίου i

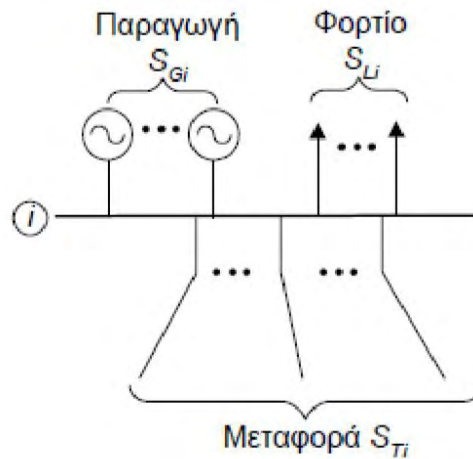
Q_{Li} : άεργος ισχύς φορτίου i

δ_i : γωνία τάσης ζυγών ως προς ζυγό αναφοράς

$|V_i|$: μέτρο τάσης ζυγού i

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα σύστημα n ζυγών, στον καθένα από τους οποίους είναι συνδεδεμένες γεννήτριες που τροφοδοτούν μιγαδική ισχύ S_{Gi} , φορτία που καταναλώνουν μιγαδική ισχύ S_{Li} και γραμμές που μεταφέρουν εκτός των ζυγών μιγαδική ισχύ S_{Ti} . Οι ισχύς αυτές συνδέονται από τη σχέση:

$$S_{Gi} = S_{Li} + S_{Ti} \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.1: Γενική μορφή ζυγού[4]

Ως καθαρή ισχύς που χύνεται από τον ζυγό i ορίζεται η διαφορά μεταξύ των ισχύων παραγωγής και φορτίου:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Li} \quad (2.2)$$

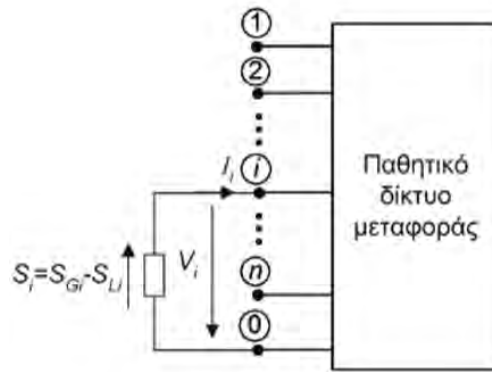
Όπου

$$S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi} \quad (2.3)$$

και

$$S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li} \quad (2.4)$$

Συνεπώς το σύστημα των ζυγών μπορεί να παρασταθεί όπως στο Σχήμα 2.2, όπου το παθητικό τμήμα του δικτύου, δηλαδή οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές, παριστάνεται με n ακροδέκτες οι οποίοι αντιστοιχούν στους ζυγούς, σε καθέναν από τους οποίους γίνεται έγχυση ρεύματος I_i που αντιστοιχεί στη ισχύ $S_i = S_{Gi} - S_{Li}$



Σχήμα 2.2: Παράσταση συστήματος n ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου [4]

Η σχέση μεταξύ των εισρεόμενων ρευμάτων και των τάσεων των ζυγών που φαίνονται στο Σχήμα 2.2, μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας την μέθοδο των κόμβων ως εξής:

$$I_{BUS} = Y_{BUS} V_{BUS} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

Όπου I_{BUS} το διάνυσμα ρευμάτων που εισέρχονται στους ζυγούς, Y_{BUS} ο πίνακας αγωγιμοτήτων και V_{BUS} το διάνυσμα τάσεων των ζυγών μετρούμενες ως προς τον ζυγό αναφοράς. Το ρεύμα του κάθε ζυγού δίνεται από τον τύπο:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.6)$$

Η μιγαδική ισχύς που εξέρχεται από το ζυγό i μπορεί να εκφραστεί ακολούθως:

$$S_i = V_i (\sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_j))^* \quad (2.7)$$

Χρησιμοποιώντας πολικές συντεταγμένες για τις τάσεις και τις αγωγιμότητες, η εξίσωση 2.7 μέσω των εξισώσεων 2.2, 2.3, 2.4, και εξισώνοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, γράφονται ως εξής:

$$(2.8)$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{j=1}^n (|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = - \sum_{j=1}^n (|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Οι εξισώσεις 2.8 αποτελούν τις εξισώσεις ροής φορτίων για ένα σύστημα n ζυγών.

Με στόχο την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου και την κατηγοριοποίηση των ζυγών, οι έξι μεταβλητές (P_{Gi} , Q_{Gi} , P_{Li} , Q_{Li} , V_j , δ_i) που σχετίζονται με κάθε ζυγό ταξινομούνται ως εξής:

Μη ελέγξιμες μεταβλητές ή μεταβλητές διαταραχής:

Αυτές είναι οι P_{Li} , Q_{Li} οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν. Είναι η πραγματική και άεργη κατανάλωση ισχύος που πραγματοποιείται από τα φορτία και εξαρτώνται από τις εκάστοτε απαιτήσεις του συστήματος.

Μεταβλητές ελέγχου:

Είναι οι P_{Gi} , Q_{Gi} οποίες δύνανται να ελεγχθούν, αφού είναι οι παραγωγές πραγματικής και άεργου ισχύος από τις γεννήτριες.

Μεταβλητές κατάστασης:

Τα μέτρα των τάσεων και οι φασικές γωνίες δ είναι οι μεταβλητές οι οποίες επηρεάζονται μέσω της μεταβολής των μεταβλητών ελέγχου.[4]

Από το σύνολο των 6 μεταβλητών οι οποίες σχετίζονται με τους ζυγούς είναι δυνατή η πρόβλεψη δύο εξ αυτών, της πραγματικής και άεργου ισχύος των φορτίων P_{Li} και Q_{Li} κάνοντας χρήση ιστορικών στοιχείων σχετικά με τις απαιτήσεις των φορτίων. Συνεπώς οι υπόλοιπες τέσσερις μεταβλητές ανά ζυγό απαιτούν υπολογισμό.

Μεγεθύνοντας το πρόβλημα σε n πλήθος ζυγών, προκύπτει πως για την επίλυση ενός συστήματος $2n$ εξισώσεων (2.8) με $6n$ μεταβλητές, έχουμε στη διάθεση μας $2n$ γνωστές μεταβλητές. Η επίλυση, λοιπόν, του συστήματος απαιτεί να μειωθεί ο αριθμός των αγνώστων, προσδιορίζοντας τις τιμές $2n$ επιπλέον μεταβλητών, ώστε οι άγνωστοι να γίνουν όσες και οι εξισώσεις. Η επιλογή των μεταβλητών που θα προκαθοριστούν εξαρτάται από το είδος των συσκευών που συνδέονται σε κάθε ζυγό όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Τύποι ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου [4]

Τύπος ζυγού	Γνωστές ποσότητες που προκαθορίζονται	Άγνωστες ποσότητες που υπολογίζονται	Πλήθος ζυγών
-------------	---------------------------------------	--------------------------------------	--------------

Ζυγός αναφοράς	$ V_1 , \delta_1$	P_{G1}, Q_{G1}	1
Ζυγός φορτίου	P_{Gi}, Q_{Gi}	$ V_i , \delta_i$	85%
Ζυγός ελεγχόμενης τάσης	$P_{Gi}, V_i $	Q_{Gi}, δ_i	15%

Ζυγοί φορτίου:

Είναι οι ζυγοί στους οποίους δεν υπάρχει παραγωγή και συχνά αποτελούν ζυγούς υποσταθμών, στους οποίους είναι συνδεδεμένα αποκλειστικά φορτία. Έτσι οι μεταβλητές P_{Gi} και Q_{Gi} μηδενίζονται. Σε ορισμένες περιπτώσεις σταθμών παραγωγής όπου όπου υπάρχει προκαθορισμένη τιμή της εξαγόμενης P και Q , οι αντίστοιχοι ζυγοί μπορούν να θεωρηθούν επίσης ζυγοί φορτίου, ή ζυγοί PQ όπως ονομάζονται εναλλακτικά. Οι περισσότεροι ζυγοί σε ένα σύστημα ισχύος ανήκουν σε αυτή την κατηγορία σε ποσοστό 85%. Έτσι κατά την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου για τους ζυγούς φορτίου, υπολογίζονται το μέτρο και η φασική γωνία της τάσης $|V_i|$ και δ_i . [5]

Ζυγοί ελεγχόμενης τάσης:

Είναι ζυγοί οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε μια ελεγχόμενη πηγή παροχής ισχύος που παρέχει σταθερή τάση. Έτσι συνήθως είναι συνδεδεμένοι με γεννήτριες στις οποίες η παραγόμενη πραγματική ισχύς P_G και το μετρό της τάσης $|V|$ διατηρούνται στην επιθυμητή τιμή. Συνεπώς στην επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου για ζυγούς ελεγχόμενης τάσης (ή ζυγοί PV), υπολογίζονται οι μεταβλητές Q_G και δ_i .

Ζυγοί αναφοράς:

Σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να υπάρχει ένα και μοναδικός ζυγός αναφοράς ο οποίος καθορίζεται από σταθερό μέτρο και γωνίας τάσης. Ουσιαστικά πρόκειται για ζυγό παραγωγής, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με γεννήτρια η οποία προμηθεύει το δίκτυο με τις απαιτούμενες απώλειες, ώστε να συντηρείται το ισοζύγιο που λέει ότι πως η συνολική παραγωγή ενέργειας του συστήματος θα πρέπει να ισούται με τη συνολική ζήτηση των φορτίων συν τις απώλειες μεταφοράς. Αυτό είναι απαραίτητο αφού δεν μπορεί να γίνει εκ των προτέρων προσδιορισμός των απωλειών του συστήματος, παρά μόνο αφού

ολοκληρωθεί ο υπολογισμός των ρευμάτων. έτσι η ενεργός P και η άεργος Q ισχύς του ζυγού που πρέπει να τροφοδοτηθούν στο σύστημα για να επιτευχθεί το ισοζύγιο, υπολογίζονται από την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου. Σε αυτόν τον ζυγό συνήθως θέτουμε το μέτρο της τάσης ίσο με 1 και τη φασική γωνία της τάσης ίση με 0.

2.2 Μέθοδος Newton - Raphson (N-R)

Η μέθοδος Newton - Raphson είναι ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων. Μετατρέπει τη διαδικασία επίλυσης μη γραμμικών εξισώσεων στη διαδικασία επανειλημμένης επίλυσης γραμμικών εξισώσεων. Αυτή η επαναλαμβανόμενη διαδικασία μετατροπής των εξισώσεων σε γραμμικές είναι το θεμέλιο της μεθόδου Newton-Raphson. Με τη χρήση του παρακάτω μη-γραμμικού παραδείγματος παρουσιάζεται η μέθοδος Newton - Raphson:

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

Έστω ότι $x^{(0)}$ είναι η αρχική τιμή για την λύση της εξίσωσης, υποθέτοντας ότι η πραγματική λύση x είναι κοντά στο $x^{(0)}$.

$$x = x^{(0)} - \Delta x^{(0)} \quad (2.10)$$

όπου $\Delta x^{(0)}$ είναι η απόσταση της πραγματικής λύσης από το $x^{(0)}$. Συνεπώς θα πρέπει:

$$f(x^{(0)} - \Delta x^{(0)}) = 0 \quad (2.11)$$

Όταν το $\Delta x^{(0)}$ είναι γνωστό, η λύση x υπολογίζεται από την εξίσωση (2.10). Αν αναπτύξουμε τη σειρά Taylor για την αρχική τιμή $x^{(0)}$ προκύπτει:

$$\begin{aligned} f(x^{(0)} - \Delta x^{(0)}) &= f(x^{(0)}) - f'(x^{(0)})\Delta x^{(0)} + f''(x^{(0)})\frac{(\Delta x^{(0)})^2}{2!} - \dots \\ &+ (-1)^n f^{(n)}(x^{(0)})\frac{(\Delta x^{(0)})^n}{n!} + \dots = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Όπου $f(x^{(0)}), \dots, f^{(n)}(x^{(0)})$ είναι οι μερικές παράγωγοι των $f(x)$ στο σημείο $x^{(0)}$. Αν η αρχική μαντεψιά είναι αρκετά κοντά στην πραγματική λύση της εξίσωσης, οι όροι υψηλής τάξης της σειράς Taylor μπορούν να αμεληθούν. Η εξίσωση (2.12) γίνεται:

$$f(x^{(0)}) - f'(x^{(0)})\Delta x^{(0)} = 0 \quad (2.13)$$

Έτσι από την σχέση (2.13) μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή για το $\Delta x^{(0)}$.

Χρησιμοποιώντας το $\Delta x^{(0)}$ και το $x^{(0)}$ μπορούμε να υπολογίσουμε το $x^{(1)}$:

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \Delta x^{(0)} \quad (2.14)$$

Το $x^{(1)}$ είναι βελτιωμένη λύση της εξίσωσης. Έπειτα χρησιμοποιώντας το $x^{(1)}$ ως νέα μαντεψιά μπορούμε να λύσουμε την ακόλουθη εξίσωση όπως λύσαμε την (2.13):

$$f(x^{(1)}) - f'(x^{(1)})\Delta x^{(1)} = 0$$

και παρόμοια το $x^{(2)}$ προκύπτει ως εξής:

$$x^{(2)} = x^{(1)} - \Delta x^{(1)} \quad (2.15)$$

Η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή αυτής της διαδικασίας παράγει τον αλγόριθμο Newton-Raphson, ο οποίος συνοψίζεται ως εξής:

$$x^{(v+1)} = x^{(v)} - \frac{f(x^{(v)})}{f'(x^{(v)})} \quad (2.16)$$

Η επαναληπτική διαδικασία θα τερματιστεί όταν το λάθος Δx γίνει μικρότερο από ένα όριο ανοχής ϵ .

Η μέθοδος Newton-Raphson μπορεί να επεκταθεί για ένα σύστημα n μη γραμμικών εξισώσεων της μορφής:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

έστω $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ οι αρχικές τιμές κάθε εξίσωσης και $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ οι αντίστοιχες αποστάσεις των πραγματικών λύσεων από τις αρχικές τιμές, οι οποίες ικανοποιούν τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{aligned} f_1(x_1^{(0)} - \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} - \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} - \Delta x_n^{(0)}) &= 0 \\ f_2(x_1^{(0)} - \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} - \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} - \Delta x_n^{(0)}) &= 0 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ f_n(x_1^{(0)} - \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} - \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} - \Delta x_n^{(0)}) &= 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Η επέκταση των παραπάνω n εξισώσεων μέσω της πολυπαραγοντικής σειράς Taylor και η παράληψη των όρων υψηλότερης τάξης, δίνει τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) - \left[\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2^{(0)} + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n^{(0)} \right] &= 0 \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) - \left[\frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2^{(0)} + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n^{(0)} \right] &= 0 \\ \vdots & \\ f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) - \left[\frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 \Delta x_1^{(0)} + \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 \Delta x_2^{(0)} + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \Delta x_n^{(0)} \right] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

Συνοψίζοντας τις παραπάνω εξισώσεις σε μορφή πινάκων προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_0 & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_0 & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Με την επίλυση του συστήματος ως προς $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ αντικαθίστανται οι τιμές στις παρακάτω εξισώσεις:

$$(2.21)$$

$$\begin{aligned}
x_1^{(1)} &= x_1^{(0)} - \Delta x_1^{(0)} \\
x_2^{(1)} &= x_2^{(0)} - \Delta x_2^{(0)} \\
&\vdots \\
x_n^{(1)} &= x_n^{(0)} - \Delta x_n^{(0)}
\end{aligned}$$

από τις οποίες προκύπτουν οι τιμές των $x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}$ που είναι βελτιωμένες λύσεις του συστήματος εξισώσεων. Αυτές οι τιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σύστημα (2.20) και με τη σειρά τους να δώσουν ακόμη ακριβέστερες λύσεις στο σύστημα.

Γενικεύοντας το σύστημα οι εξισώσεις (2.20) κατά την t-στη τους επανάληψη μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1^{(t)}, x_2^{(t)}, \dots, x_n^{(t)}) \\ f_2(x_1^{(t)}, x_2^{(t)}, \dots, x_n^{(t)}) \\ \vdots \\ f_n(x_1^{(t)}, x_2^{(t)}, \dots, x_n^{(t)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} |_t & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} |_t & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} |_t \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} |_t & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} |_t & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} |_t \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} |_t & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} |_t & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} |_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(t)} \\ \Delta x_2^{(t)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(t)} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

ή αν εκφραστούν συνοπτικότερα:

$$F(X^{(t)}) = J^{(t)} \Delta X^{(t)} \quad (2.23)$$

Όπου J ο Ιακωβιανός πίνακας.

Επίσης η γενική μορφή της (3.21) είναι:

$$X^{(t+1)} = X^{(t)} - \Delta X^{(t)} \quad (2.24)$$

Επιλύοντας τις εξισώσεις (2.23),(2.24) επαναληπτικά, προσεγγίζεται η βέλτιστη λύση του αρχικού συστήματος. Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τα Δx_i γίνουν μικρότερα μια επιθυμητής ανοχής.

Ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson

Βήμα 1: Σχηματισμός του Πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{BUS} .

Βήμα 2: Για σύστημα ισχύος μεγέθους n ζυγών, ο ζυγός 1 λαμβάνεται ως ζυγός αναφοράς με αρχικοποιημένες τιμές: $|V_1| = 1$ και $\delta = 0$.

Βήμα 3: Υπολογίζονται οι τιμές $P_i^{(v)}$, $Q_i^{(v)}$ από τους τύπους:

$$P_i^{(v)} = \sum_{j=1}^n |V_i|^{(v)} |V_j|^{(v)} |y_{ij}| \cos(\delta_j^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij}), i = 2, \dots, n \quad (2.25)$$

$$Q_i^{(v)} = -\sum_{j=1}^n |V_i|^{(v)} |V_j|^{(v)} |y_{ij}| \sin(\delta_j^{(v)} - \delta_i^{(v)} + \gamma_{ij}), i = 2, \dots, n \quad (2.26)$$

Βήμα 4: Υπολογισμός του Πίνακα J υπολογίζοντας τους επιμέρους πίνακες H , N , L , M , καταλήγοντας στο εξής σύστημα:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta Q_2^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(v)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(v)} \\ \vdots & H & \vdots & \vdots & N & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(v)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(v)} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(v)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(v)} \\ \vdots & M & \vdots & \vdots & L & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(v)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(v)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(v)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta |V_2|^{(v)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(v)} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Βήμα 5: Υπολογισμός των $\Delta P_i^{(v)}$, $\Delta Q_i^{(v)}$ και έλεγχος σύγκλισης (σχέση 2.29). Αν υπάρχει σύγκλιση ο αλγόριθμος συνεχίζει στο επόμενο βήμα. Αν δεν υπάρχει σύγκλιση ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο βήμα μετατρέποντας το σύστημα εξισώσεων ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(v)} \\ \Delta |V|^{(v)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (2.28)$$

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

Αυτό συμβαίνει ώστε να υπολογιστούν οι νέες τιμές των τάσεων και των γωνιών. Έπειτα ο αλγόριθμος πάει στο βήμα 2 και συνεχίζει μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

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

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

2.3 Μέθοδος Gauss - Seidel (G-S)

Η μέθοδος Gauss-Seidel είναι μία από τις απλούστερες επαναληπτικές μεθόδους για την επίλυση εξισώσεων. Είναι απλούστερη, αργότερη και συχνά με προβλήματα σύγκλισης σε σχέση με τη μέθοδο Newton-Raphson, η οποία παρουσιάστηκε παραπάνω, αλλά χρησιμοποιείται ακόμη για την ανάλυση ενεργειακών συστημάτων και όχι μόνο.

Έστω η συνάρτηση μίας μεταβλητής

$$f(x) = 0 \quad (2.30)$$

Μια εναλλακτική μορφή της $f(x)$ γράφεται ως εξής:

$$x = F(x) \quad (2.31)$$

Η επαναληπτική διαδικασία που δίνει τις προσεγγίσεις των λύσεων εκφράζεται από τη σχέση:

$$x^{(v+1)} = F(x^{(v)}) \quad (2.32)$$

Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν οι λύσεις μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων γίνει μικρότερη μια προκαθορισμένης ανοχής ε :

$$|x^{(v+1)} - x^{(v)}| < \varepsilon \quad (2.33)$$

Η μέθοδος Gauss-Seidel μπορεί να επεκταθεί για την επίλυση ενός συστήματος n εξισώσεων:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (2.34)$$

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

⋮

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

Αυτές οι εξισώσεις γράφονται στη μορφή:

$$\begin{aligned}x_1 &= F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\x_2 &= F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\&\vdots \\x_n &= F_n(x_1, x_2, \dots, x_n)\end{aligned}\tag{2.35}$$

Σε αναλογία με την εξίσωση (2.32) η επαναληπτική διαδικασία για σύστημα εξισώσεων μπορεί να γραφτεί:

$$\begin{aligned}x_1^{(v+1)} &= F_1(x_1^{(v)}, x_2^{(v)}, \dots, x_n^{(v)}) \\x_2^{(v+1)} &= F_2(x_1^{(v)}, x_2^{(v)}, \dots, x_n^{(v)}) \\&\vdots \\x_n^{(v+1)} &= F_n(x_1^{(v)}, x_2^{(v)}, \dots, x_n^{(v)})\end{aligned}\tag{2.36}$$

η οποία συνοπτικά γράφεται:

$$x^{(v+1)} = F(x^{(v)})\tag{2.37}$$

Η επαναληπτική διαδικασία θα τερματιστεί όταν οι διαφορές μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων γίνουν, ταυτόχρονα για όλες τις μεταβλητές x_i , μικρότερες μιας προκαθορισμένης ανοχής ε :

$$|x_i^{(v+1)} - x_i^{(v)}| < \varepsilon \quad i = 1, 2, \dots, n\tag{2.38}$$

Ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Gauss-Seidel

Βήμα 1: Σχηματισμός του Πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{BUS} .

Βήμα 2: Αρχικές εκτιμήσεις των δ_i όλων των ζυγών εκτός του ζυγού αναφοράς, και του $|V_i|$ για τους ζυγούς των φορτίων.

Βήμα 3: Υπολογισμός V_i

Βήμα 3.1: Αν ζυγός φορτίου:

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

Βήμα 3.2: Αν ζυγός ελεγχόμενης τάσης:

Υπολογισμός άεργου ισχύος:

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

Υπολογισμός νέα εκτίμησης:

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

Βήμα 4: Υπολογισμός $\Delta V_i^{(v+1)}$

Βήμα 5: Έλεγχος αν $|\Delta V_i^{(v+1)}| \leq \varepsilon$ και επανάληψη στο βήμα 3

Βήμα 6: Υπολογισμός ροών ισχύος σε όλες τις γραμμές και υπολογισμός ισχύος στο ζυγό αναφοράς [4]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι παγκόσμιες απαιτήσεις σε κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια. Προκειμένου να ικανοποιηθεί η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, πολύπλοκα συστήματα ισχύος έχουν κατασκευαστεί για να ικανοποιήσουν τη ζήτηση. Η βιομηχανία παραγωγής και παροχής ενέργειας που έχει συγκροτηθεί για την κάλυψη των εν λόγω αναγκών, παρουσιάζει πολλά μηχανικά προβλήματα που αποτελούν πρόκληση για τον μηχανικό. Η επιτυχής λειτουργία οποιουδήποτε συστήματος τροφοδοσίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα να παρέχει αξιόπιστη και αδιάλειπτη εξυπηρέτηση στα φορτία. [6]

Η επίλυση των σύνθετων αυτών προβλημάτων απαιτεί τον συγκερασμό γνώσεων και μεθόδων που συνιστούν τη μελέτη αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission - IEC) ως **αξιοπιστία** (IEV 692-01-14) ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται η ικανότητα που έχει το σύστημα να ικανοποιεί επαρκώς τη ζήτηση, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ο όρος αξιοπιστία όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, αποτελεί συνάρτηση δύο επιμέρους εννοιών που είναι η επάρκεια και η ασφάλεια. Ως **επάρκεια** (IEV 692-01-05) ορίζεται η ικανότητα του συστήματος να τροφοδοτεί την απαιτούμενη συνολική ηλεκτρική ισχύ και ενέργεια, χωρίς να υπερβαίνει τα χαρακτηριστικά του συστήματος ή τα όρια λειτουργίας του συστήματος και με τις τάσεις των ζυγών και τη συχνότητα του συστήματος να διατηρούνται εντός ορίων λαμβάνοντας υπόψη τις προγραμματισμένες ή μη προγραμματισμένες διακοπές των συνιστωσών του συστήματος. **Ασφάλεια** (IEV 692-01-11) ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανότητα του να αντέχει ένα συμβάν χωρίς απώλεια φορτίου ή υπερφόρτωση των στοιχείων του συστήματος, ή απόκλιση από τα καθορισμένα όρια τάσης και συχνότητας.

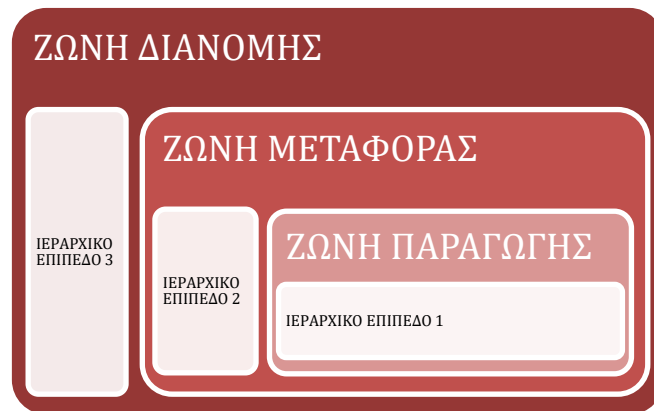


Σχήμα 3.1: Σχέση μεταξύ της αξιοπιστίας, της επάρκειας του συστήματος και της ασφάλειας του συστήματος

3.2 Επάρκεια ΣΗΕ

Για να γίνει αντιληπτή η έννοια της μελέτης επάρκειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται ένας διαχωρισμός ζωνών του ίδιου του συστήματος. Αυτές οι ζώνες φαίνονται στο Σχήμα 3.2, δομούνται ιεραρχικά και χαρακτηρίζονται ως προς τη

λειτουργικότητα τους ως ζώνη παραγωγής, ζώνη μεταφοράς και ζώνη διανομής, με τρόπο παρόμοιο με τον οποίο δομείται ένα σύστημα ισχύος. Έτσι οι μελέτες επάρκειας μπορούν να διεξάγονται μεμονωμένα σε αυτές τις τρεις λειτουργικές ζώνες.



Σχήμα 3.2: Ζώνες μελέτης επάρκειας ΣΗΕ

Αυτά τα επίπεδα ιεραρχίας μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση της επάρκειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το ιεραρχικό επίπεδο 1 αφορά αποκλειστικά τις εγκαταστάσεις παραγωγής. Το ιεραρχικό επίπεδο 2 περιλαμβάνει τόσο εγκαταστάσεις παραγωγής όσο και εγκαταστάσεις μεταφοράς, ενώ το επίπεδο 3 περιλαμβάνει και τις τρεις λειτουργικές ζώνες. Οι μελέτες επιπέδου 3 αποφεύγεται να πραγματοποιούνται σε πραγματικού μεγέθους συστήματα λόγω του μεγέθους και της πολυπλοκότητας τους. Υπάρχει δυνατότητα να γίνει μελέτη ενός επιπέδου, στην οποία δεν θα συμπεριληφθούν τα ανώτερα επίπεδα μελέτης, ώστε να εξεταστεί μια συγκεκριμένη μετατροπή του συστήματος ή μια τοπολογία, και συνήθως επικεντρώνονται στο δίκτυο υπομεταφοράς ή διανομής.

Για να πραγματοποιηθεί η συνολική μελέτη ενός συστήματος ως προς την επάρκεια του, θα πρέπει να γίνει μελέτη και στα τρία επίπεδα όπως αυτά αναφέρθηκαν.

Μελέτη επάρκειας επιπέδου 1

Στο επίπεδο 1 η μελέτη επάρκειας γίνεται προκειμένου να προσδιοριστεί αν η συνολική παραγωγή του συστήματος ικανοποιεί τις απαιτήσεις φορτίου του συστήματος. Αυτό συνήθως ονομάζεται αξιολόγηση αξιοπιστίας ικανότητας παραγωγής. Σε αυτή τη μελέτη αγνοείται αν το σύστημα μπορεί να μεταφέρει και να διανείμει αξιόπιστα την απαιτούμενη ενέργεια στα φορτία. Στόχος της μελέτης είναι αν η παραγόμενη ενέργεια δύναται να

καλύψει τις απαιτήσεις των φορτίων καθώς και η ικανότητα του συστήματος να προβεί σε διορθωτικές και προληπτικές ενέργειες για τη συντήρηση του συστήματος παραγωγής.

Μελέτη επάρκειας επιπέδου 2

Στη μελέτη επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 2 γίνεται επέκταση της μελέτης επιπέδου 1, προκειμένου να συμπεριληφθεί το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη επιπέδου 2 χρησιμοποιείται είτε για αξιολόγηση σε υπάρχοντα συστήματα, είτε για την αξιολόγηση μελετών που στοχεύουν στην αναβάθμιση και δημιουργία νέων συστημάτων. Η μελέτη επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 2 γίνεται είτε με χρήση μεμονωμένων δεικτών φορτίου-ζυγών, που αφορούν συγκεκριμένους ζυγούς και δίνουν αποτελέσματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη επάρκειας του συστήματος διανομής επιπέδου 3, είτε με χρήση δεικτών όλου του συστήματος. Οι δύο κατηγορίες δεικτών μπορούν να χωριστούν σε ετήσιους δείκτες που υπολογίζονται βάσει των μεταβολών του φορτίου κατά τη διάρκεια ενός έτους, και σε δείκτες ανοιγμένους σε ετήσιους, οι οποίοι υπολογίζονται βάσει ενός επιπέδου φορτίου, συνήθως το φορτίο αιχμής, και εκφράζονται σε ετήσια βάση. Γενικά οι δείκτες που έχουν ανοιχθεί σε ετήσιους παρέχουν ικανοποιητικότερα αποτελέσματα όταν χρησιμοποιούνται για να συγκριθούν μεταξύ τους πιθανά σενάρια αλλαγών στο σύστημα, ενώ οι ετήσιοι δείκτες παρέχουν πιο ρεαλιστική και περιεκτική εικόνα της επάρκειας του συστήματος.

Μελέτη επάρκειας επιπέδου 3

Η μελέτη επάρκειας επιπέδου 3 αποτελεί την πιο περίπλοκη διαδικασία αφού περιλαμβάνει και τις 3 λειτουργικές ζώνες, ξεκινώντας από τους σταθμούς παραγωγής και τερματίζοντας στα φορτία των καταναλωτών. Για αυτό το λόγο η ζώνη της διανομής μελετάται συνήθως ως ξεχωριστή οντότητα. Για τον υπολογισμό των δεικτών στη μελέτη επιπέδου 3 χρησιμοποιούνται ως τιμές εισόδου, οι δείκτες ζυγών-φορτίων του επιπέδου 2. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται στα συγκεκριμένα σημεία των καταναλωτών. Οι βασικές διαρθρώσεις των συστημάτων διανομής είναι η μορφή βρόγχου και η ακτινική μορφή. Η αξιολόγηση των δικτύων σε μορφή βρόγχου είναι περίπου ίδια με αυτή των σύνθετων συστημάτων. Στα ακτινικά δίκτυα η αξιολόγηση γίνεται μέσω της ανάλυσης αστοχίας λειτουργίας και περιλαμβάνει συνολικά αποτελέσματα για όλα τις περιπτώσεις δυσλειτουργίας και αποκατάστασης του συστήματος. [7]

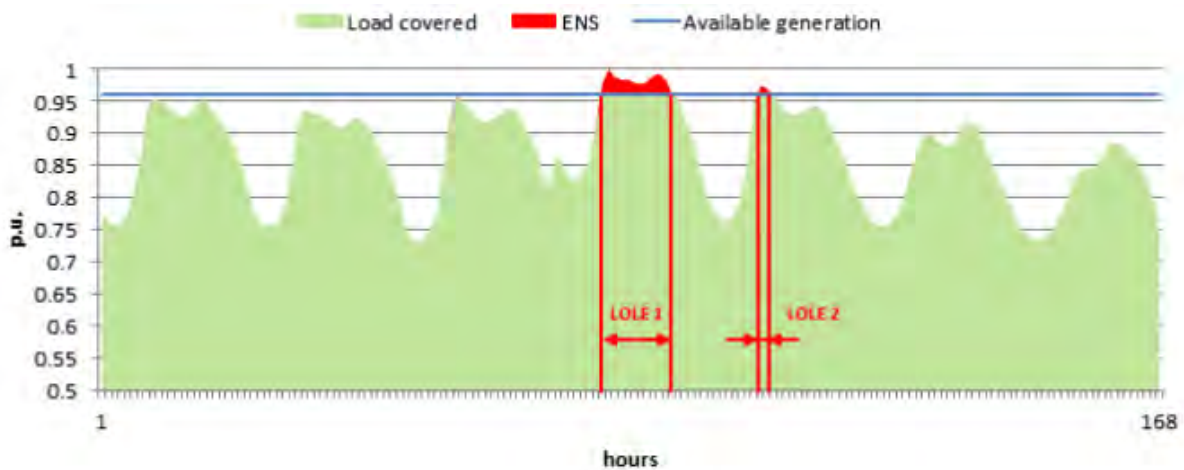
Η μελέτη επάρκειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αντικατοπτρίζεται στους παρακάτω δείκτες αξιολόγησης οι οποίοι αφορούν τα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς:

EENS (Expected Energy Not Supplied): Ο δείκτης EENS είναι η βάση όλων των υπόλοιπων δεικτών, αφού δείχνει κατά πόσο οι απαιτήσεις των φορτίων υπερβαίνουν τη διαθέσιμη παραγωγική ισχύς του συστήματος. Μονάδα μέτρησης είναι MWh ανά έτος. Αιτίες που προκαλούν αυτή τη συνθήκη είναι:

- Έλλειψη ισχύος: δεν υπάρχει επαρκής παραγωγική ικανότητα στο ηλεκτρικό σύστημα που εξετάζεται.
- Έλλειψη διασύνδεσης: ύπαρξη επαρκούς παραγωγής ενέργειας ωστόσο τοπολογικά οι απαιτήσεις των φορτίων είναι μακριά από την παραγωγή, και οι ενδιάμεσες εγκαταστάσεις του συστήματος δεν επιτρέπουν την ικανοποίηση των φορτίων.
- Υπερφόρτιση γραμμών: οι υπερφόρτωση στοιχείων του δικτύου καθιστούν αδύνατη την τροφοδοσία φορτίου.
- Απομονωμένα συστήματα ή ζυγοί: σε περίπτωση που ένα από τα στοιχεία του απομονωμένου συστήματος δεν λειτουργεί, τα απομονωμένα φορτία δεν δύναται να καλυφθούν.

Ο δείκτης EENS στη βιβλιογραφία συναντάται και ως LOEE (Loss of Energy Expectation)

LOLE (Loss of Load Expectancy): είναι ο μέσος όρος των ημερών κατά τις οποίες το ημερήσιο μέγιστο φορτίο προβλέπεται να είναι μεγαλύτερο από την διαθέσιμη παραγωγή. Μονάδα μέτρησης του δείκτη είναι μέρες/έτος ή ώρες/έτος. Το Σχήμα 3.3 δείχνει τη γραφική αναπαράσταση των δεικτών ENS και LOLE για μια εβδομάδα ενός έτους.



Σχήμα 3.3: Γραφική απεικόνιση των δεικτών ENS και LOLE

LOLP (Loss of Load Probability): ο δείκτης αυτός δείχνει την πιθανότητα το φορτίο να υπερβεί τη διαθέσιμη παραγωγική ισχύ. Ο δείκτης αυτός καθορίζει την πιθανότητα να εμφανιστούν προβλήματα που χρήζουν αντιμετώπισης, αλλά όχι τη σοβαρότητά τους.

P95: Ο δείκτης αυτός αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ωρών κατά τη διάρκεια ενός πολύ βαρύ χειμώνα (υπολογίζεται μια φορά κάθε 20 χρόνια περίπου), κατά τη διάρκεια του οποίου η κάλυψη του φορτίου είναι αδύνατη ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν όλα τα διαθέσιμα μέσα. Ο P95 είναι ίδιος με τον δείκτη LOLE αλλά υπολογίζεται για κρίσιμα σενάρια.

Capacity margin: Ο δείκτης αυτός είναι ένα ποσοστό που προσδιορίζει κατά πόσο η παραγωγική ικανότητα του συστήματος υπερβαίνει τη αιχμή της ζήτησης. Η παραγωγή ενέργειας που μπορεί να διαθέσει το σύστημα λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά της εγκατεστημένης ισχύος, προσαρμόζοντας τη ανάλογα με τη διαθεσιμότητα παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη και τις περιπτώσεις στις οποίες οι μονάδες παραγωγής δεν είναι διαθέσιμες λόγω συμβάντων διακοπής.

Frequency and duration of expected outages: (συχνότητα και διάρκεια αναμενόμενων διακοπών): είναι ένα μέγεθος που προσδιορίζει την επίδραση των ηλεκτρικών αποκοπών στους καταναλωτές. Βασίζεται στη λήψη αποφάσεων που λαμβάνονται αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος σε περιπτώσεις όπου η παραγωγή δεν καλύπτει τη

ζήτηση, όπου ο διαχειριστής το συστήματος λαμβάνει αποφάσεις για το μετριασμό του προβλήματος. Ο δείκτης αυτός είναι λιγότερο ακριβής από τους LOLE ή EENS, αλλά επιτρέπει να γίνει αντιληπτή η πιθανότητα ελεγχόμενων αποσυνδέσεων στο σύστημα. [8]

Η μελέτη επάρκειας ενός δικτύου αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία καθώς περιλαμβάνει όλα τα επίπεδα του ηλεκτρικού συστήματος, ξεκινώντας από την παραγωγή και φτάνοντας στη διανομή στους τελικούς καταναλωτές. Επιπλέον τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ανήκουν συνήθως σε διαφορετικούς διαχειριστές. Τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής παρουσιάζουν όχι μόνο διαφορετική τάση αλλά και δομικές διαφορές. Η μεταφορά γίνεται συνήθως σε δίκτυα αποτελούμενα από εναέριες γραμμές πολλών χιλιομέτρων, ενώ το δίκτυο της διανομής είναι συνήθως ακτινικής μορφής με πολλές εναλλακτικές διαδρομές, οι οποίες δομούνται από υπόγεια καλώδια και εναέριες γραμμές στις πόλεις. Επιπλέον προκύπτει η ανάγκη για αξιολόγηση της επάρκειας ισχύος από τους διαχειριστές του δικτύου διανομής τόσο για λόγους ικανοποίησης των καταναλωτών, όσα και για λόγους ανταγωνισμού με άλλες εταιρείες. Έτσι στη μελέτη επάρκειας η διανομή αναλύεται συνήθως ξεχωριστά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δείκτες αξιοπιστίας επάρκειας για τα δίκτυα διανομής όπως αυτά παρουσιάζονται στο πρότυπο.[9]

Δείκτης Μέσης Συχνότητας Διακοπών Συστήματος ΔΜΣΔΣ (System Average Interruption Frequency Index –SAIFI). Αυτός ο δείκτης υποδηλώνει το πόσο συχνά ο μέσος πελάτης υπομένει τη διακοπή τροφοδοσίας, για προκαθορισμένη εξεταζόμενη χρονική περίοδο και μετράται σε σφάλματα/έτος. Η μαθηματικής διατύπωση του δείκτη είναι:

$$SAIFI = \frac{\sum \text{Συνολικός αριθμός καταναλωτών που υφίστανται διακοπή}}{\text{Συνολικός αριθμός καταναλωτών που εξυπηρετούνται}}$$

για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_T} = \frac{CI}{N_T}$$

N_i = Αριθμός πελατών που υφίστανται διακοπή τροφοδοσίας κατά τη διάρκεια της προκαθορισμένης εξεταζόμενης χρονικής περιόδου,

N_T = Συνολικός αριθμός πελατών που εξυπηρετούνται σε όλη την εξεταζόμενη έκταση του δικτύου διανομής, και

CI= Πελάτες που υφίστανται διακοπή τροφοδοσίας

Δείκτης Μέσης Διάρκειας Διακοπών Συστήματος ΔΜΔΔΣ (System Average Interruption Duration Index – SAIDI). Ο συγκεκριμένος δείκτης υποδηλώνει τη συνολική διάρκεια έλλειψης τροφοδοσίας που υφίσταται ο μέσος καταναλωτής για προκαθορισμένη εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Συνήθως μετράται σε λεπτά διακοπής/πελάτη ή ώρες διακοπής/πελάτη. Η μαθηματικής διατύπωση του δείκτη είναι:

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Διάρκεια διακοπών καταναλωτών}}{\text{Συνολικός αριθμός καταναλωτών που εξυπηρετούνται}}$$

Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιείται η σχέση:

$$SAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{N_T} = \frac{CMI}{N_T}$$

r_i = Χρόνος αποκατάστασης τροφοδοσίας για κάθε καταναλωτή,

CMI = Διάρκεια σε λεπτά διακοπής τροφοδοσίας για τους καταναλωτές που έχουν υποστεί διακοπή τροφοδοσίας

Δείκτης Μέσης Διάρκειας Διακοπών Πελατών ΔΜΔΔΚ (Customer Average Interruption Duration Index – CAIDI). Εκφράζει το μέσο χρόνο που απαιτείται για αποκατάσταση τροφοδοσίας. Η μαθηματική του διατύπωση είναι:

$$CAIDI = \frac{\sum \text{Διάρκεια διακοπών καταναλωτών}}{\text{Συνολικός αριθμός καταναλωτών που υπέστησαν διακοπή}}$$

Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιείται η σχέση:

$$CAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{\sum N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI}$$

Δείκτης Συνολικής Μέσης Διάρκειας Διακοπών Πελατών ΔΣΜΔΔΚ (Customer Total Average Interruption Duration Index – CTAIDI). Εκφράζει το συνολικό μέσο χρόνο κατά τον οποίο πελάτης υπέστη έλλειψη τροφοδοσίας. Ο δείκτης αυτός είναι παρόμοιος με τον CAIDI με μόνη διαφορά πως οι πελάτες που έχουν πολλαπλές φορές έλλειψη τροφοδοσίας προσμετρούνται μία μόνο φορά. Η μαθηματική έκφραση αυτού του τύπου είναι:

$$CTAIDI = \frac{\sum \text{Διάρκεια διακοπών καταναλωτών}}{\text{Συνολικός αριθμός καταναλωτών που υπέστησαν διακοπή}}$$

Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιείται η σχέση:

$$CTAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{CN}$$

Δείκτης Μέσης Συχνότητας Διακοπών Πελατών ΔΜΣΔΠ (Customer Average Interruption Frequency Index - CAIFI). Ο δείκτης αυτός προσδιορίζει τη μέση συχνότητα που συμβαίνουν παρατεταμένες διακοπές τροφοδοσίας για τους πελάτες που τις αντιμετωπίζουν. Κάθε πελάτης προσμετράται μία φορά ανεξάρτητα από το πλήθος των διακοπών τροφοδοσίας που αντιμετώπισε. Η μαθηματική έκφραση αυτού του τύπου είναι:

$$CAIFI = \frac{\sum \text{Συνολικός αριθμός καταναλωτών που υπέστησαν διακοπή}}{\text{Συνολικός αριθμός καταναλωτών που υπέστησαν διακοπή}}$$

Για τον υπολογισμό του δείκτη χρησιμοποιείται η σχέση:

$$CAIFI = \frac{\sum N_i}{CN}$$

Μέσος δείκτης διαθεσιμότητας υπηρεσίας ΜΔΔΥ (average service availability index - ASAI). Ο δείκτης αυτός αντιπροσωπεύει το κλάσμα του χρόνου (συντά σε ποσοστό) που ένας πελάτης έχει λάβει ισχύ, κατά την καθορισμένη περίοδο αναφοράς. Η μαθηματική έκφραση αυτού του τύπου είναι:

$$ASAI = \frac{\text{Ώρες που ο πελάτης δύναται να λάβει ισχύ}}{\text{Ώρες που ο πελάτης απαιτεί ισχύ}}$$

Πελάτες που αντιμετωπίζουν πολλαπλές διακοπές ΠΑΠΔ(Customers experiencing multiple interruptions - CEIMI_n)

Ο δείκτης αυτός δείχνει την αναλογία των μεμονωμένων πελατών που αντιμετωπίζουν περισσότερες από η παρατεταμένες διακοπές στο σύνολο των εξυπηρετούμενων πελατών.

Η μαθηματική έκφραση αυτού του τύπου είναι:

$CEIMI_n$

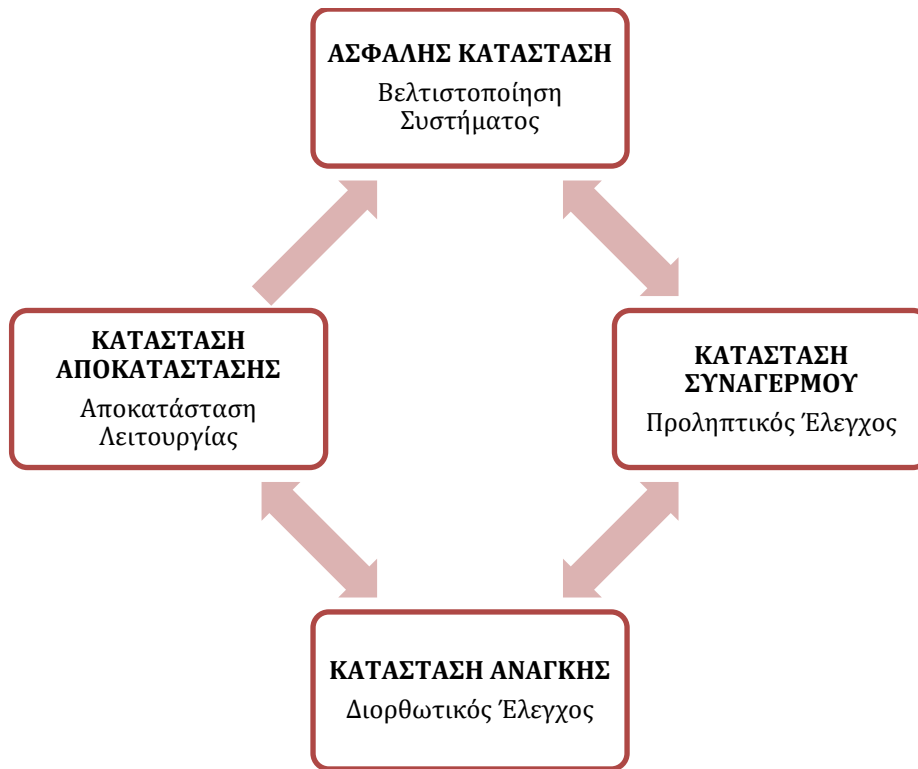
$$= \frac{\text{Συνολικός αριθμός πελατών που αντιμετωπίζουν περισσότερες από η παρατεταμμένες διακοπές}}{\text{Συνολικός αριθμός πελατών που εξυπηρετούνται}}$$

3.3 Ασφάλεια ΣΗΕ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, με τον όρο ασφάλεια ενός συστήματος ενέργειας προσδιορίζεται η ικανότητα του συστήματος να παρέχει στους καταναλωτές συνεχή τροφοδοσία παρά τις διαταραχές που μπορούν να προκύψουν. Αυτό σημαίνει την διατήρηση των τάσεων και των ροών ισχύος του συστήματος εντός των προκαθορισμένων ορίων. Η αξιολόγηση της ασφάλειας ενός συστήματος είναι απαραίτητη προκειμένου να αναπτυχθούν τρόποι ώστε το σύστημα να συνεχίζει να λειτουργεί ακόμη και αν ένα ή περισσότερα στοιχεία του συστήματος πάψει να λειτουργεί. Σ αυτή την περίπτωση γίνονται διακριτές οι πιθανές καταστάσεις λειτουργίας (Σχήμα 3.4) στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα σύστημα ισχύος:

- Ασφαλής κατάσταση: Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ικανοποιεί τις απαιτήσεις των φορτίων, όλος ο εξοπλισμός του λειτουργεί εντός των ορίων, και ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια ασφάλειας.
- Κατάσταση συναγερμού: Ο εξοπλισμός του συστήματος λειτουργεί εντός των προκαθορισμένων ορίων, αλλά δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια ασφάλειας.
- Κατάσταση ανάγκης: Κάποια απροσδόκητη μεταβολή οδηγεί σε παραβίαση των ορίων λειτουργίας κάποιων στοιχείων του συστήματος και απαιτούνται διορθωτικές ενέργειες για την αποκατάσταση του.

- Κατάσταση αποκατάστασης: Τα μέσα προστασίας ή οι διαχειριστές του συστήματος παρεμβαίνουν στο σύστημα σταματώντας να εξυπηρετούν τα φορτία, καθιστώντας άμεση την ανάγκη επέμβασης για αποκατάσταση της τροφοδοσίας.



Σχήμα 3.4: Καταστάσεις Λειτουργίας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ασφαλής κατάσταση και η κατάσταση συναγερμού υποδηλώνουν ότι στο σύστημα δεν παρουσιάζονται προβλήματα ικανά να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης προτεραιότητα του συστήματος είναι η επιστροφή του σε κανονική κατάσταση, αφού σε αυτή την περίπτωση η οικονομική του λειτουργία αποτελεί δευτερεύουσα προτεραιότητα. Όταν όλες οι μονάδες επανέλθουν εντός των ορίων τους, τότε ο στόχος γίνεται ξανά η βελτιστοποίηση του συστήματος, μέσω της ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής και κατανομής της ενέργειας μεταξύ των μονάδων. Αν προτεραιότητα είναι η ασφάλεια του συστήματος τότε πραγματοποιείται προληπτικός έλεγχος, που ίσως συγκρούεται με τους οικονομικούς στόχους του συστήματος. Συνεπώς υπάρχουν αντιφάσεις ως προς τις προτεραιότητες που θεμελιώνονται για την κατάσταση

λειτουργίας ενός συστήματος, αφού επιθυμείται σύμπραξη βέλτιστης κατάστασης ασφάλειας και βέλτιστου κόστους λειτουργίας. [10]

3.4 Μελέτη Στατικής Ασφάλειας ΣΗΕ

Η μελέτη στατικής ασφάλειας είναι από μία από τις βασικότερες εργασίες κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός συστήματος ισχύος. Κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας η μελέτη αυτή χρησιμοποιείται προκειμένου να διαπιστωθεί η λειτουργική απόδοση του συστήματος και να διαπιστωθεί αν υπάρχει ανάγκη αλλαγών σε περίπτωση επέκτασης του, λόγω αύξησης των απαιτήσεων των φορτίων.

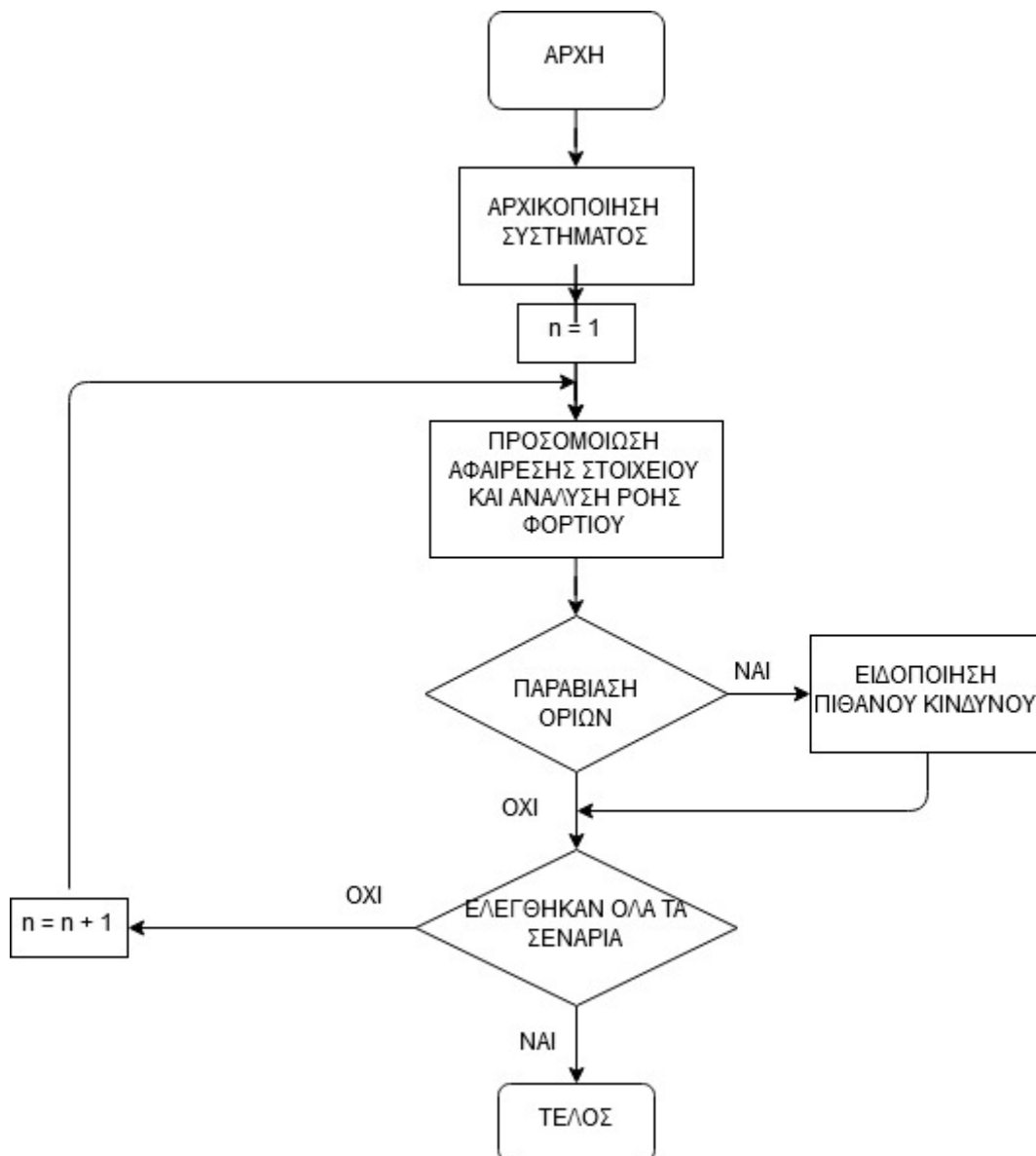
Η μελέτη στατικής ασφάλειας αποτελεί ένα αναγνωριστικό εργαλείο που στόχο έχει να εξετάζει την ικανότητα του συστήματος να ανταπεξέλθει σε πιθανές διαταραχές.[11] Η εκκίνηση της μελέτης γίνεται με τον καθορισμό των διαταραχών που μπορούν να προκύψουν σε πραγματικό χρόνο σε ένα σύστημα ισχύος. Επιλέγονται όλα τα πιθανά σενάρια που ίσως οδηγήσουν σε παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών και των επιτρεπόμενων ορίων φόρτισης των γραμμών μεταφοράς. Πιθανές διαταραχές, και κατ'επέκταση σενάρια μελέτης, είναι η απώλεια μιας γεννήτριας ή ενός μετασχηματιστή, ή η διακοπή μιας γραμμής μεταφοράς. Η γενική θεώρηση της μελέτης περιλαμβάνει τα παρακάτω κριτήρια ασφάλειας για τον καθορισμό των διαταραχών:

- Κριτήριο Ασφάλειας N-1: Απλή διακοπή λειτουργίας οποιουδήποτε στοιχείου του συστήματος(γεννήτρια, γραμμή μεταφοράς, μετασχηματιστής)
- Κριτήριο Ασφάλειας N-2: Ταυτόχρονη διακοπή λειτουργίας δύο στοιχείων του συστήματος. Εφαρμόζεται σε μεγαλύτερα συστήματα που τα κριτήρια ασφάλειας είναι αυστηρά.
- Κριτήριο διακοπής λειτουργίας της μεγαλύτερης γεννήτριας: ταυτόχρονη διακοπή λειτουργίας της μεγαλύτερης γεννήτριας του συστήματος και κάποιας γραμμής που τη συνδέει με το υπόλοιπο σύστημα.

Το σύνολο αυτών των διαταραχών μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρές καταστάσεις όπου η ομαλή λειτουργία του συστήματος δεν διασφαλίζεται. Από τις διαταραχές που καταγράφονται ως σοβαρές επιλέγονται εκείνες που μπορούν να ωθήσουν το σύστημα εκτός των ορίων ασφαλούς λειτουργίας. Η διαδικασία επιλογής των σεναρίων καλείται «επιλογή διαταραχών». Για την επιλογή τους πραγματοποιείται ανάλυση ροής φορτίου για κάθε

σενάριο και αξιολογούνται τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα ταξινομούνται ανάλογα με τη σοβαρότητα τους και εκκινούνται οι απαραίτητες διεργασίες ελέγχου και ασφάλειας, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι επιπλοκές στο σύστημα από μία διαταραχή σε πραγματικό χρόνο.

Το διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.5 δείχνει την πορεία που ακολουθείται κατά την ανάλυση στατικής ασφάλειας ενός συστήματος για το οποίο έχουν επιλεγεί οι διαταραχές που θα εξεταστούν.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ροής για την μελέτη στατικής ασφάλειας ενός ΣΗΕ

3.4.1 Δείκτες ιεράρχησης διαταραχών

Στην ανάλυση ροής φορτίου που χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός συστήματος ισχύος, παρέχονται ως αποτελέσματα η πραγματική και άεργος ισχύ του συστήματος, οι τάσεις των ζυγών κ.ά. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αξιολόγηση της στατικής ασφάλειας του συστήματος, μέσω των δεικτών απόδοσης (PI), οι οποίοι παρουσιάζουν τη σοβαρότητα των διαταραχών που μελετώνται. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του δείκτη, τόσο σημαντικότερη η διαταραχή του συστήματος. Οι δείκτες απόδοσης είναι: δείκτης τάσης(PI_v) και ο δείκτης ενεργού ισχύος (PI_p).

Ο δείκτης ενεργού ισχύος (PI_p) δείχνει το βαθμό υπερφόρτισης των γραμμών και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$PI_p = \sum_{i=1}^{N_L} \left(\frac{W}{2n} \right) * \left(\frac{P_i}{P_i^{max}} \right)^{2n}$$

Όπου:

P_i, P_i^{max} : η ισχύς και η χωρητικότητα της γραμμής αντίστοιχα,

N_L : ο αριθμός των γραμμών του συστήματος,

W : ένας μη αρνητικός παράγοντας βάρους,

n : συνάρτηση λάθους.

Όπου: $P_i^{max} = \frac{V_i V_j}{X}$

Όπου:

V_i, V_j : οι τάσεις δύο ζυγών στα άκρα μιας γραμμής μεταφοράς και

X : η αντίδραση της γραμμής

Ο δείκτης τάσης PI_v καθορίζει αν οι τάσεις κάποιων ζυγών είναι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων, και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$PI_v = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{W}{2n} \left\{ \frac{|V_i| - |V_i^{sp}|}{\Delta V_i^{lim}} \right\}^{2n}$$

Όπου:

V_i : η τάση του ζυγού i ,

V_i^{sp} : η επιθυμητή τάση του ζυγού i ,

ΔV_i^{lim} : το όριο απόκλισης τάσης,

N_B : ο αριθμός των ζυγών του συστήματος,
 W : ένας μη αρνητικός παράγοντας βάρους,
 n : συνάρτηση λάθους.

Η τάση των ζυγών εξαρτάται από την άεργο ισχύ που παράγεται στις γεννήτριες, όμως ο δείκτης PI_V δείχνει την κρισιμότητα της διαταραχής μόνο στην περίπτωση που η άεργος ισχύς είναι εντός των ορίων. Για αυτό το λόγο εισάγεται ένας νέος δείκτης (PI_{VQ}) που λαμβάνει υπόψιν πιθανές παραβιάσεις των ορίων άεργου ισχύος των γεννητριών, και δίνεται από τον τύπο:

$$PI_{VQ} = \sum_{i=1}^{N_B} \left(\frac{W}{2n}\right) \{|V_i| - |V_i^{sp}|\} / \Delta V_i^{lim} \}^{2n} + \sum_{i=1}^{N_G} (W/2n) \{Q_i / Q_i^{max}\}^{2n}$$

Όπου:

Q_i : η άεργος ισχύς του ζυγού i ,
 Q_i^{max} : το όριο της άεργου ισχύος του ζυγού i ,
 N_G : ο αριθμός των γεννητριών του συστήματος
 W : ένας μη αρνητικός παράγοντας βάρους. [12]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΗ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 9 ΖΥΓΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Για την μελέτη συστημάτων ισχύος χρησιμοποιούνται λογισμικά όπως είναι το Siemens PSS-E, προκειμένου να αντληθούν συμπεράσματα κατά τη μελέτη ενός συστήματος. Το Siemens PSS-E είναι ένα λογισμικό που αποτελείται από ένα ολοκληρωμένο σύνολο εργαλείων που χρησιμοποιούνται στη μελέτη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε σταθερές όσο και σε μεταβατικές συνθήκες. Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού επιτρέπει στο χρήστη να εκτελεί όλες τις εργασίες για τη μελέτη της κατάστασης ενός συστήματος, όπως είναι η ανάλυση ροής φορτίου, η ανάλυση σφαλμάτων, η δυναμική ανάλυση κ.ά. Στις δυνατότητες του λογισμικού συμπεριλαμβάνονται:

- Η εισαγωγή, τροποποίηση και διαγραφή δεδομένων του δικτύου χρησιμοποιώντας υπολογιστικά φύλλα
- Η δημιουργία δικτύων και των μονογραμμικών τους απεικονίσεων.
- Ανάλυση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων μελέτης σταθερής κατάστασης του δικτύου. [13]

4.2 Ανάλυση Στατικής Ασφάλειας συστήματος 9 ζυγών

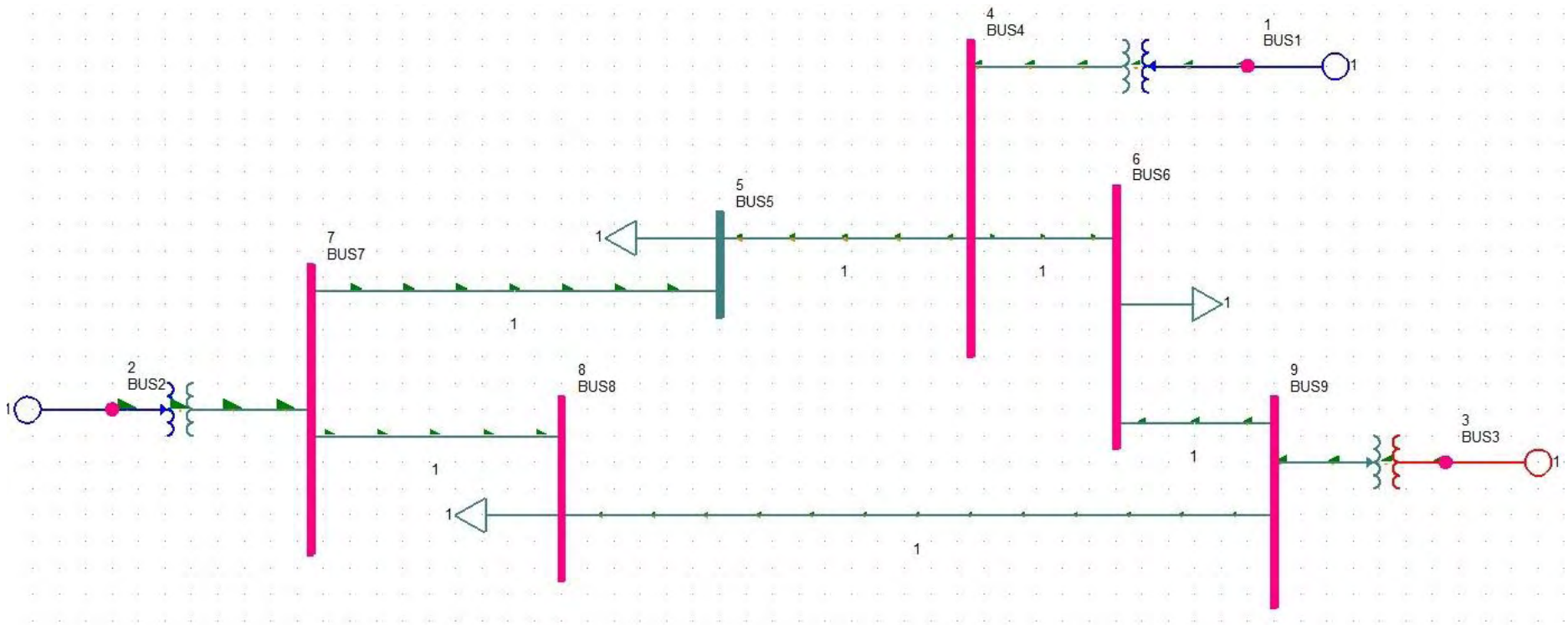
Το IEEE-9bus System του Σχήματος 4.1, επιλέχθηκε ώστε να πραγματοποιηθεί μελέτη στατικής ασφάλειας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1 αποτελείται από 9 ζυγούς, 3 γεννήτριες, 3 μετασχηματιστές και 3 φορτία συνδεδεμένα σε αντίστοιχους ζυγούς. Διακρίνονται 4 επίπεδα τάσης των 230kV, 16.5kV, 18kV, 13.8kV. Το σύστημα είναι χωρισμένο σε 2 περιοχές, σε καθεμία από τις οποίες ανήκουν οι εξής ζυγοί:

- Περιοχή 1: ανήκουν οι ζυγοί 1, 4, 5, 6.
- Περιοχή 2: ανήκουν οι ζυγοί 2, 3, 7, 8, 9.

Και σε 6 ζώνες:

- Ζώνη 1: Ανήκουν οι ζυγοί 1 και 4.
- Ζώνη 2: Ανήκουν οι ζυγοί 2 και 7.

- Ζώνη 3: Ανήκουν οι ζυγοί 3 και 9.
- Ζώνη 4: Ανήκει ο ζυγός 5.
- Ζώνη 6: Ανήκει ο ζυγός 8.



Σχήμα 4.1 Το πρότυπο σύστημα 9 ζυγών που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις

Τα ονομαστικά στοιχεία των εγκαταστάσεων του συστήματος παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.1, 4.2, 4.2, 4.3 και 4.4.

Πίνακας 4.1: Ονομαστικά στοιχεία γεννητριών

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	ΖΥΓΟΣ	kV	MVA	R(ρμ)	Χ(ρμ)
1	1 (swing)	16,500	260,00	0,000100	0,100000
2	2	18,000	310,00	0,000100	0,210000
3	3	13,800	280,00	0,000100	0,210000

Πίνακας 4.2: Ονομαστικά στοιχεία μετασχηματιστών

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	ΖΥΓΟΣ Χ – ΖΥΓΟΣ Υ	kV	Χ(ρμ)
T1	1 - 4	16,500 / 230,000	0,05760
T2	2 - 7	18,000 / 230,000	0,06250
T3	3 - 9	13,800 / 230,000	0,05860

Πίνακας 4.3: Ονομαστικά στοιχεία γραμμών μεταφοράς

ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	kV	R (ρμ)	Χ(ρμ)	B(ρμ)
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

Πίνακας 4.4: Ονομαστικά στοιχεία ζυγών

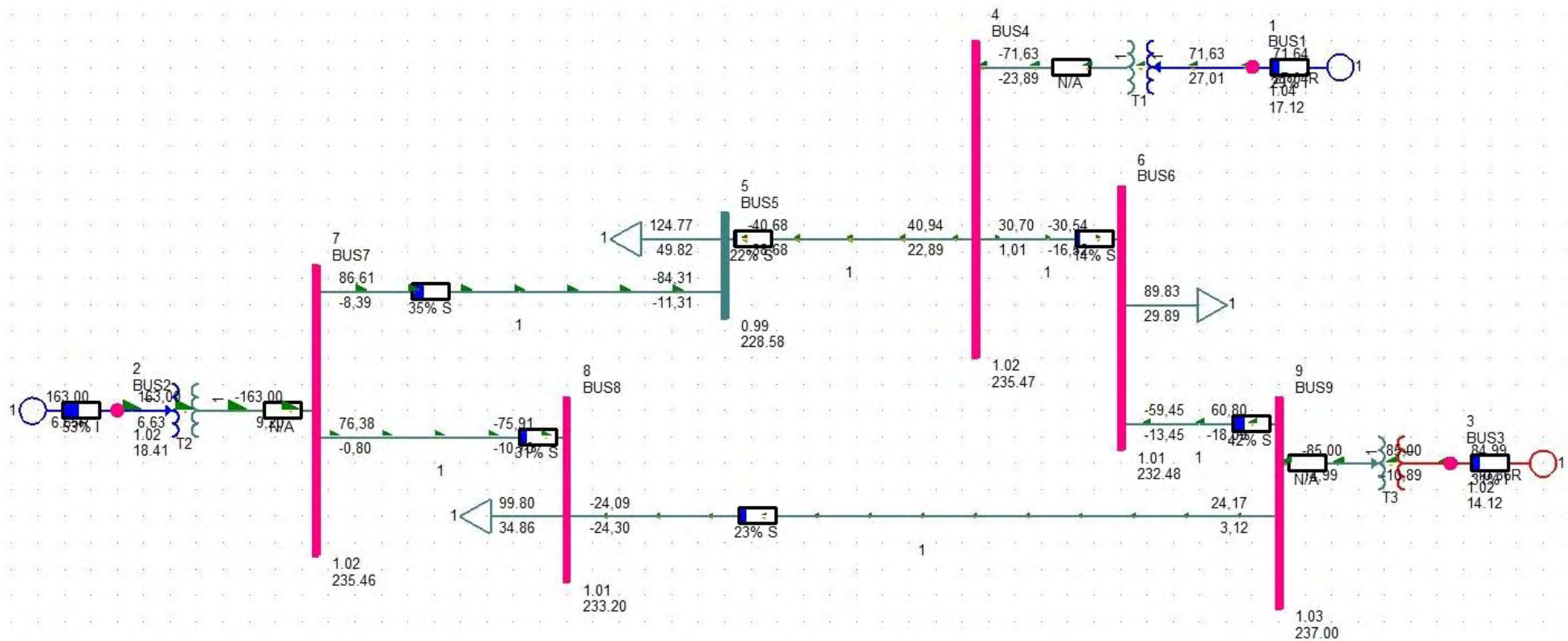
ΖΥΓΟΣ	Τάση (pu)
1	1,0400
2	1,0250
3	1,0250
4	1,0129
5	0,9795
6	0,9922
7	1,0185
8	1,0052
9	1,0176

Για τα παραπάνω ονομαστικά στοιχεία του συστήματος πραγματοποιείται ανάλυση ροής φορτίου ώστε να βρεθούν οι τάσεις των ζυγών στην κανονική λειτουργία του συστήματος που φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Τάσεις ζυγών στην κανονική λειτουργία

ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ(pu)
1	1,0400
2	1,0250
3	1,0250
4	1,0258
5	0,9957
6	1,0127
7	1,0258
8	1,0159
9	1,0324

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου και οι φορτίσεις των γραμμών φαίνονται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2: Ροές ισχύος και φορτίσεις γραμμών μεταφοράς μετά την ανάλυση ροής φορτίου σε κανονική λειτουργία

4.3 Σενάρια Μελέτης αξιοπιστίας συστήματος 9 ζυγών

Για να γίνει μελέτη αξιοπιστίας στο σύστημα των 9 ζυγών ελέγχονται τα παρακάτω σενάρια συμβάντων τα οποία περιλαμβάνουν αφαίρεση γεννητριών και γραμμών μεταφοράς. Τα εν λόγω σενάρια ανταποκρίνονται στη συνθήκη N-1 για την αξιολόγηση τη ασφάλειας ενός συστήματος ισχύος. Κατά την προσομοίωση του κάθε συμβάντος πραγματοποιείται ανάλυση ροής φορτίου και αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Τα σενάρια που προσομοιώνονται είναι:

1. Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 4-5
2. Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 4-6
3. Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 5-7
4. Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 6-9
5. Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 7-8
6. Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 8-9
7. Αφαίρεση γεννήτριας 2
8. Αφαίρεση γεννήτριας 3

4.3.1 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 4-5

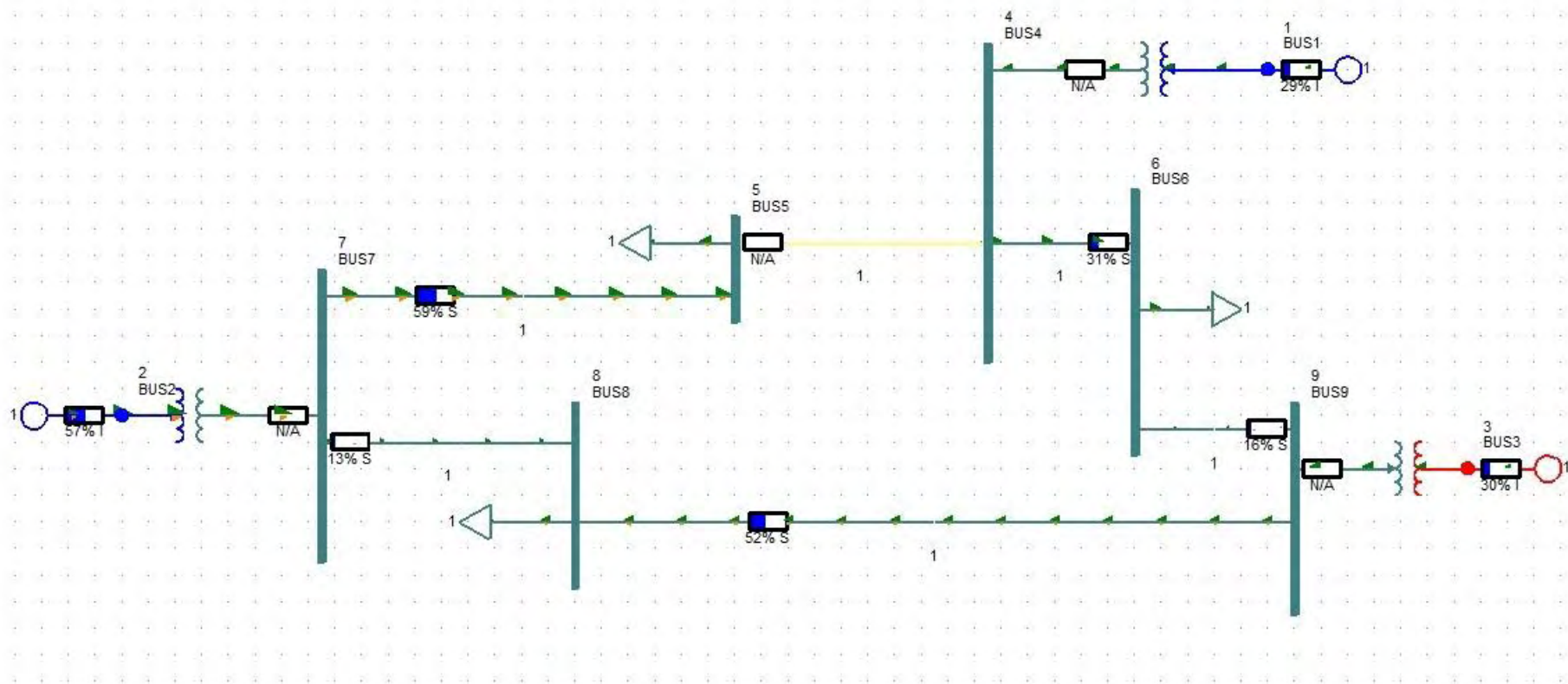
Σε αυτό το σενάριο πραγματοποιείται αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 4 και 5. Τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτό το σενάριο είναι η επαναφορά του συστήματος στην κανονική του κατάσταση, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς, η ανάλυση ροής φορτίου μετά την αφαίρεση. Οι τάσεις των ζυγών πριν και μετά το συμβάν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.6:

Πίνακας 4.6: Τάσεις ζυγών πριν και μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-5

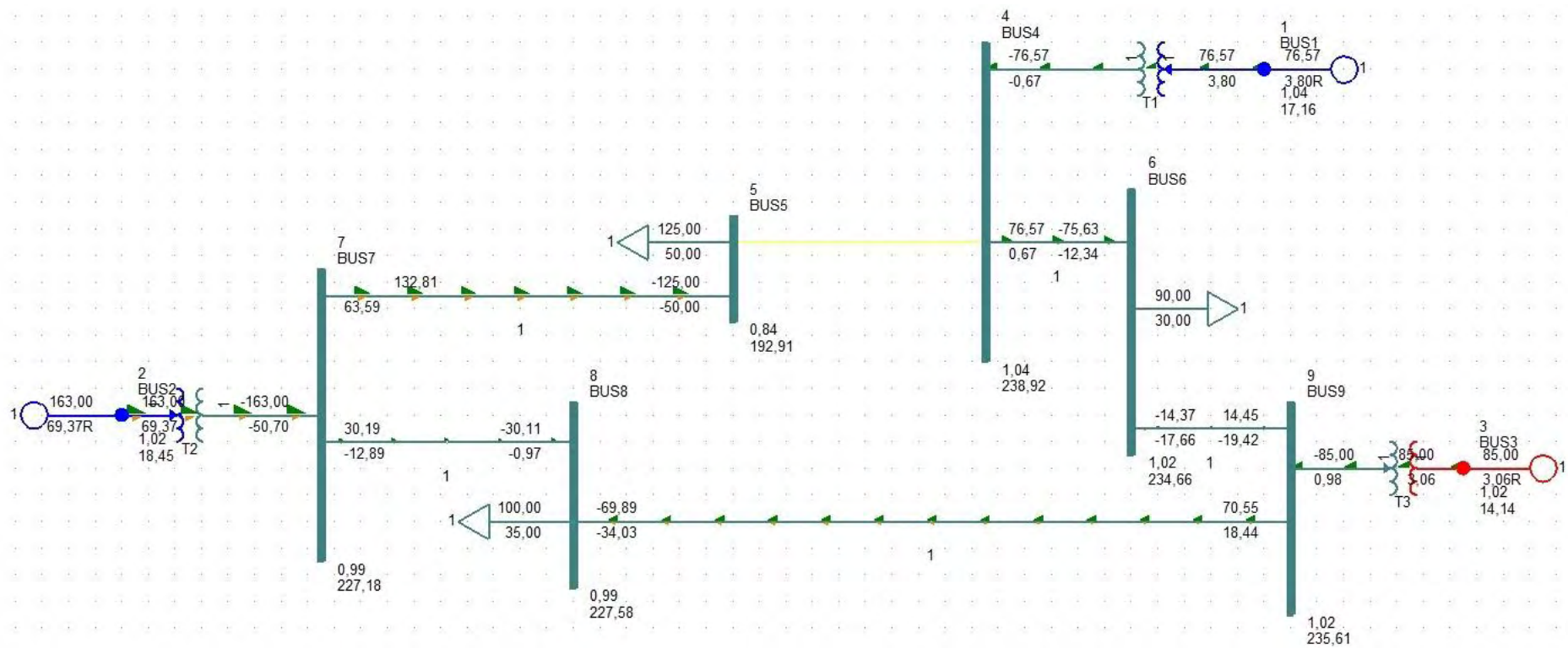
ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ (pu)	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΥΜΒΑΝ (pu)
1	1,0400	1,0400
2	1,0250	1,0250
3	1,0250	1,0250
4	1,0258	1,0388
5	0,9957	0,8388
6	1,0127	1,0203
7	1,0258	0,9877
8	1,0159	0,9895
9	1,0324	1,0244

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται πως η τάση στο ζυγό 5 είναι χαμηλότερη του επιτρεπόμενου ορίου $\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης, με αποτέλεσμα να απαιτείται αντιμετώπιση του συμβάντος.

Στο Σχήμα 4.3 και Σχήμα 4.4 φαίνονται οι ροές ισχύος και τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών, τα οποία καθορίζουν και την ανάγκη παρέμβασης στο σύστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η γραμμή που αφαιρέθηκε.



Σχήμα 4.3: Φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-5



Σχήμα 4.4: Ροές ισχύος μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-5

4.3.2 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 4-6

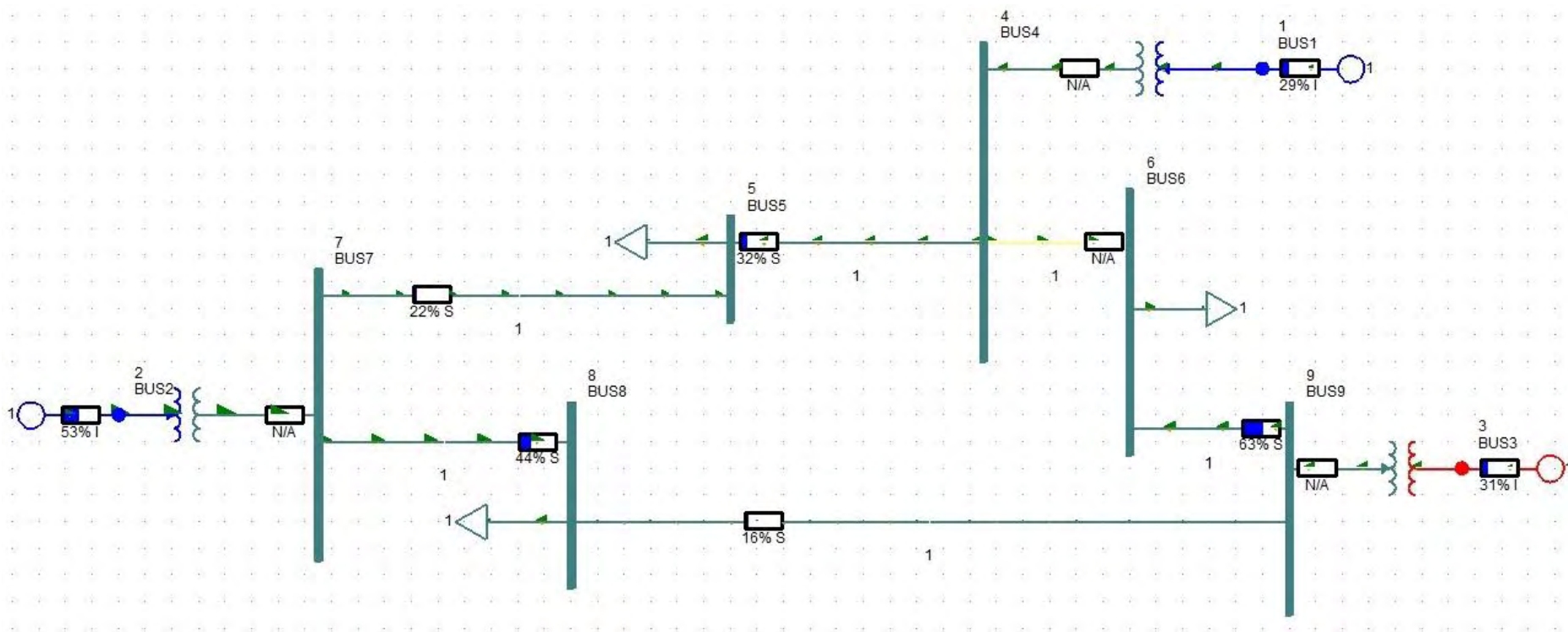
Σε αυτό το σενάριο πραγματοποιείται αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 4 και 6. Τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτό το σενάριο είναι η επαναφορά του συστήματος στην κανονική του κατάσταση, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς, η ανάλυση ροής φορτίου μετά την αφαίρεση. Οι τάσεις των ζυγών πριν και μετά το συμβάν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.7:

Πίνακας 4.7: Τάσεις ζυγών πριν και μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-6

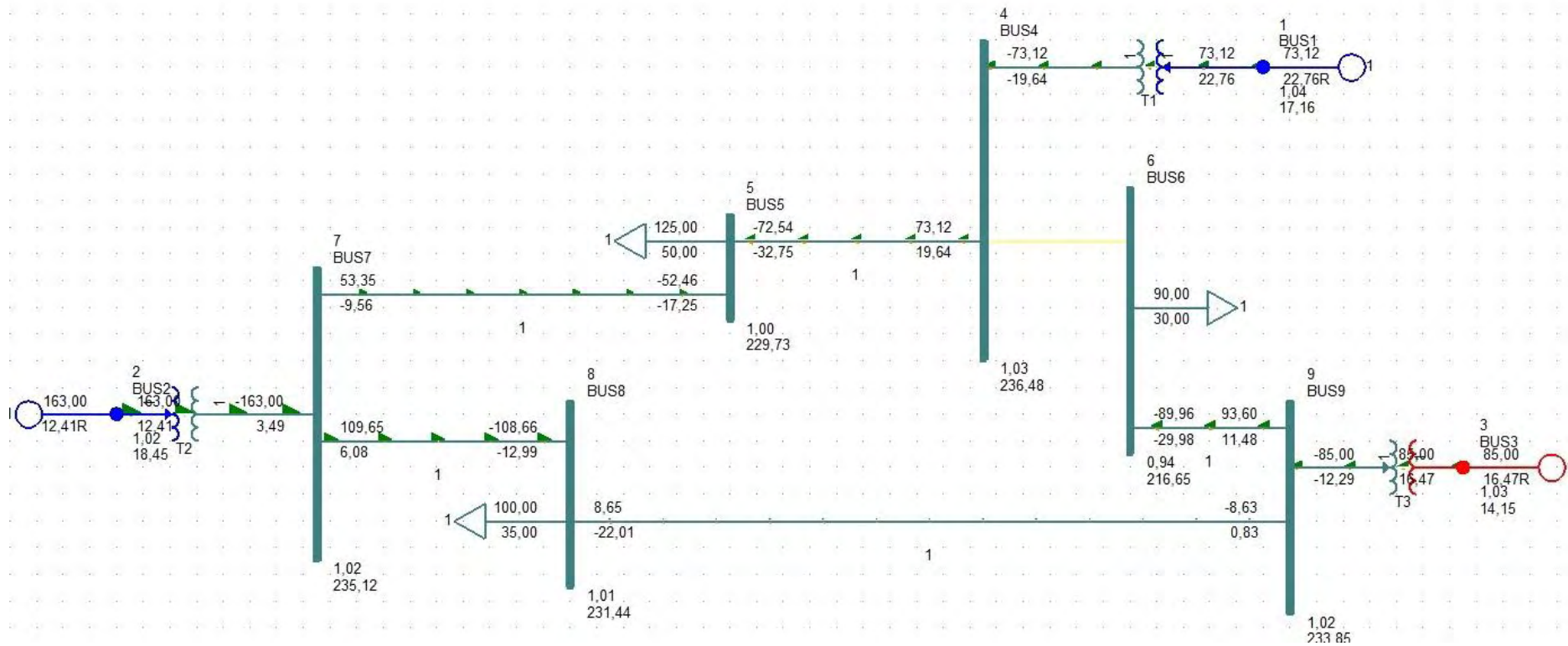
ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ (pu)	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΥΜΒΑΝ (pu)
1	1,0400	1,0400
2	1,0250	1,0250
3	1,0250	1,0250
4	1,0258	1,0282
5	0,9957	0,9988
6	1,0127	0,9419
7	1,0258	1,0223
8	1,0159	1,0063
9	1,0324	1,0167

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται πως οι τάσεις των ζυγών μεταβάλλονται ελαφρώς, και πως η τάση στο ζυγό 6 είναι χαμηλότερη του επιτρεπόμενου ορίου $\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης, αλλά με μικρότερη απόκλιση από το προηγούμενο σενάριο.

Στο Σχήμα 4.5 και Σχήμα 4.6 φαίνονται οι ροές ισχύος και τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών, τα οποία καθορίζουν και την ανάγκη παρέμβασης στο σύστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η γραμμή που αφαιρέθηκε.



Σχήμα 4.5: Φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-6



Σχήμα 4.6: Ροές ισχύος μετά την αφαίρεση της γραμμής 4-6

4.3.3 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 5-7

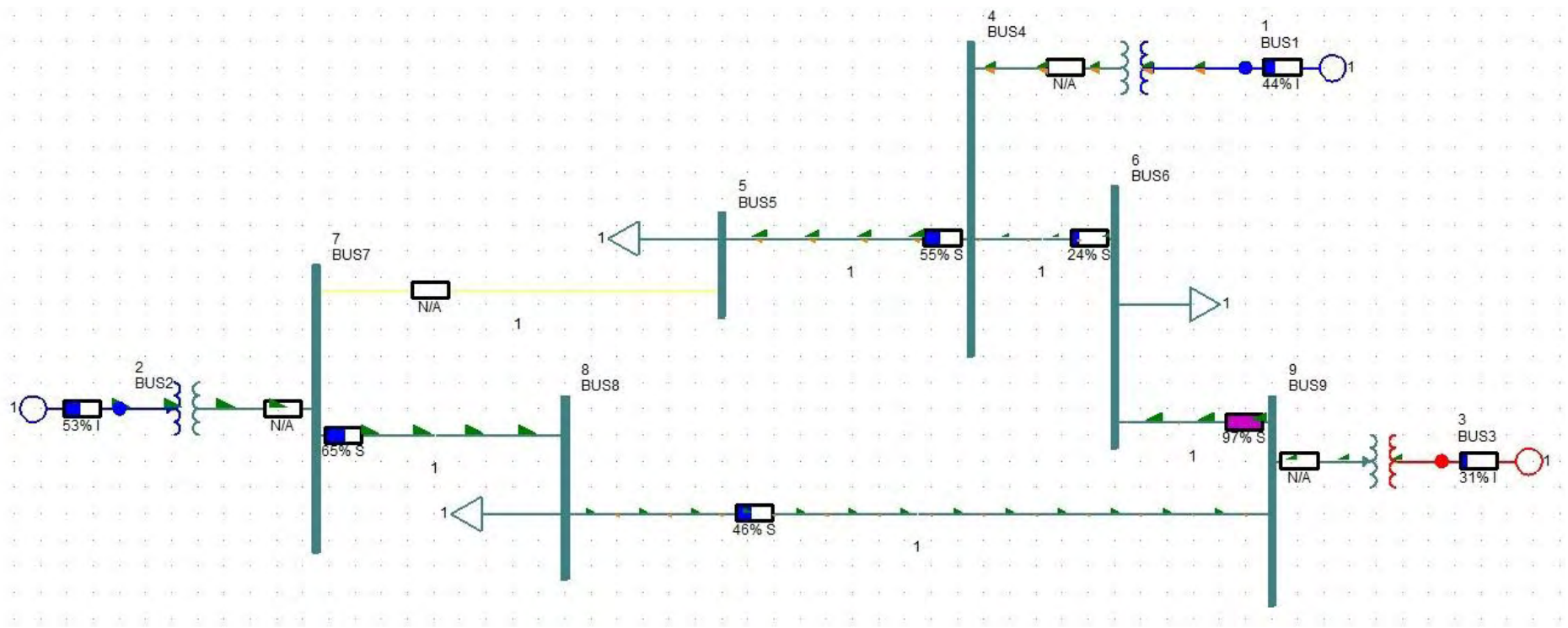
Σε αυτό το σενάριο πραγματοποιείται αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 5 και 7. Τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτό το σενάριο είναι η επαναφορά του συστήματος στην κανονική του κατάσταση, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς, η ανάλυση ροής φορτίου μετά την αφαίρεση. Οι τάσεις των ζυγών πριν και μετά το συμβάν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.8:

Πίνακας 4.8: Τάσεις ζυγών πριν και μετά την αφαίρεση της γραμμής 5-7

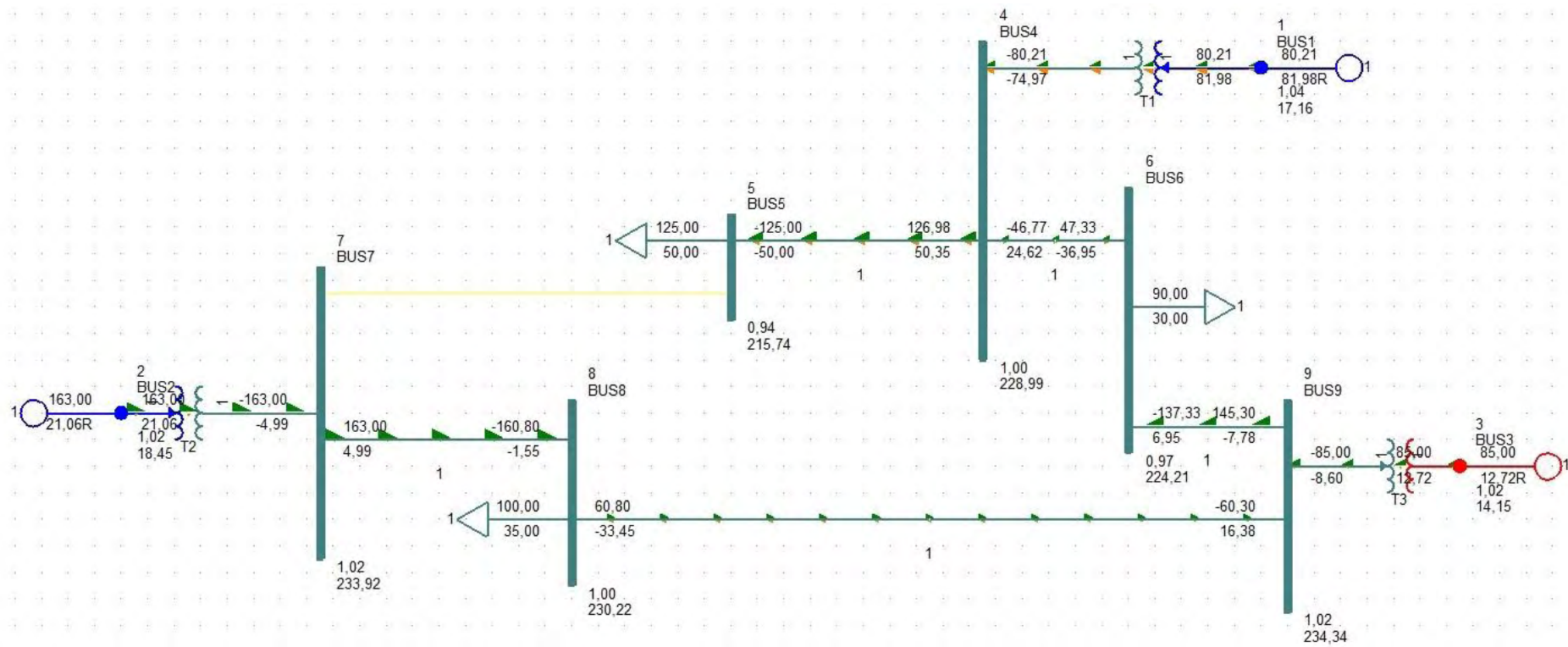
ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ (pu)	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΥΜΒΑΝ (pu)
1	1,0400	1,0400
2	1,0250	1,0250
3	1,0250	1,0250
4	1,0258	0,9956
5	0,9957	0,9380
6	1,0127	0,9748
7	1,0258	1,0170
8	1,0159	1,0010
9	1,0324	1,0189

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται πως οι τάσεις των ζυγών μεταβάλλονται ελαφρώς, και πως η τάση στο ζυγό 5 είναι χαμηλότερη του επιτρεπόμενου ορίου $\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης, με αποτέλεσμα να απαιτείται αντιμετώπιση του συμβάντος.

Στο Σχήμα 4.7 και στο Σχήμα 4.8 φαίνονται οι ροές ισχύος και τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών, τα οποία καθορίζουν και την ανάγκη παρέμβασης στο σύστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η γραμμή που αφαιρέθηκε. Παρατηρείται υπερφόρτιση της γραμμής 6-9 σε ποσοστό 97%, με αποτέλεσμα να απαιτείται αντιμετώπιση του συμβάντος.



Σχήμα 4.7: Φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 5-7



Σχήμα 4.8: Ροές ισχύος μετά την αφαίρεση της γραμμής 5-7

4.3.4 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 6-9

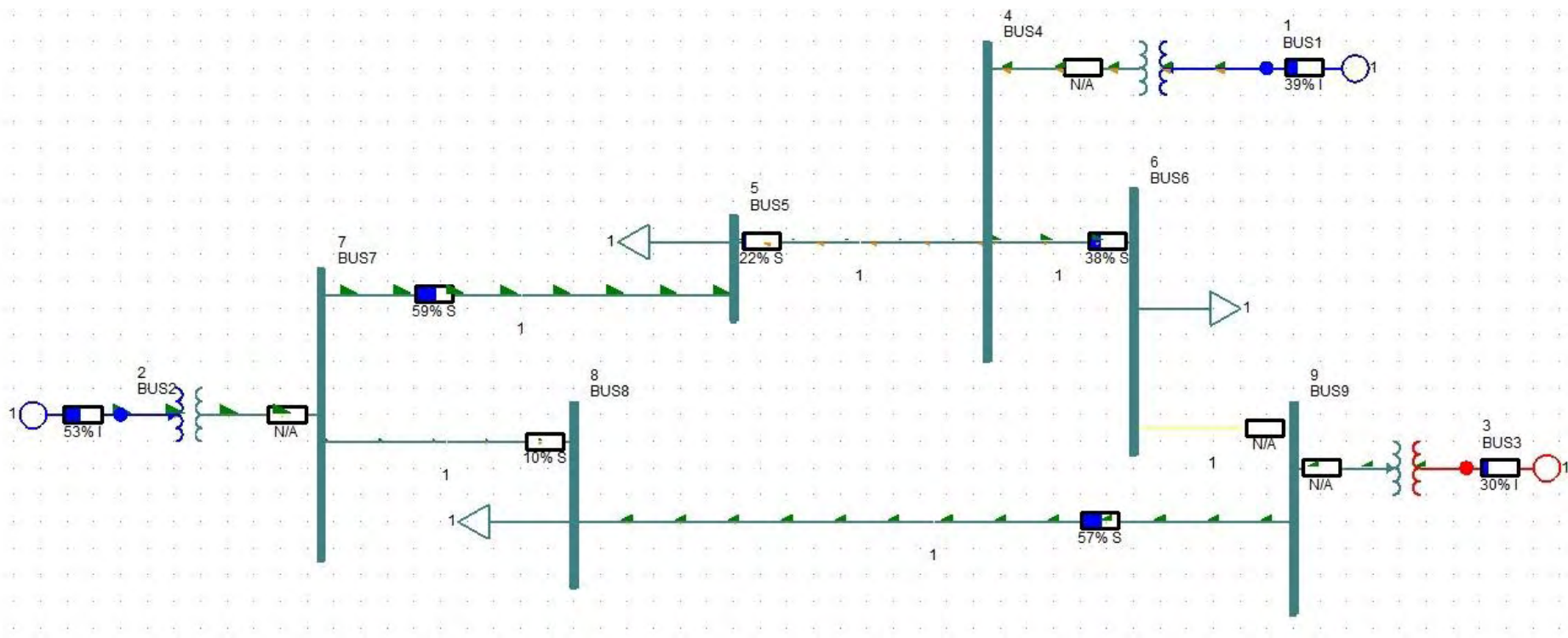
Σε αυτό το σενάριο πραγματοποιείται αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 6 και 9. Τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτό το σενάριο είναι η επαναφορά του συστήματος στην κανονική του κατάσταση, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς, η ανάλυση ροής φορτίου μετά την αφαίρεση. Οι τάσεις των ζυγών πριν και μετά το συμβάν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.9:

Πίνακας 4.9: Τάσεις ζυγών πριν και μετά την αφαίρεση της γραμμής 6-9

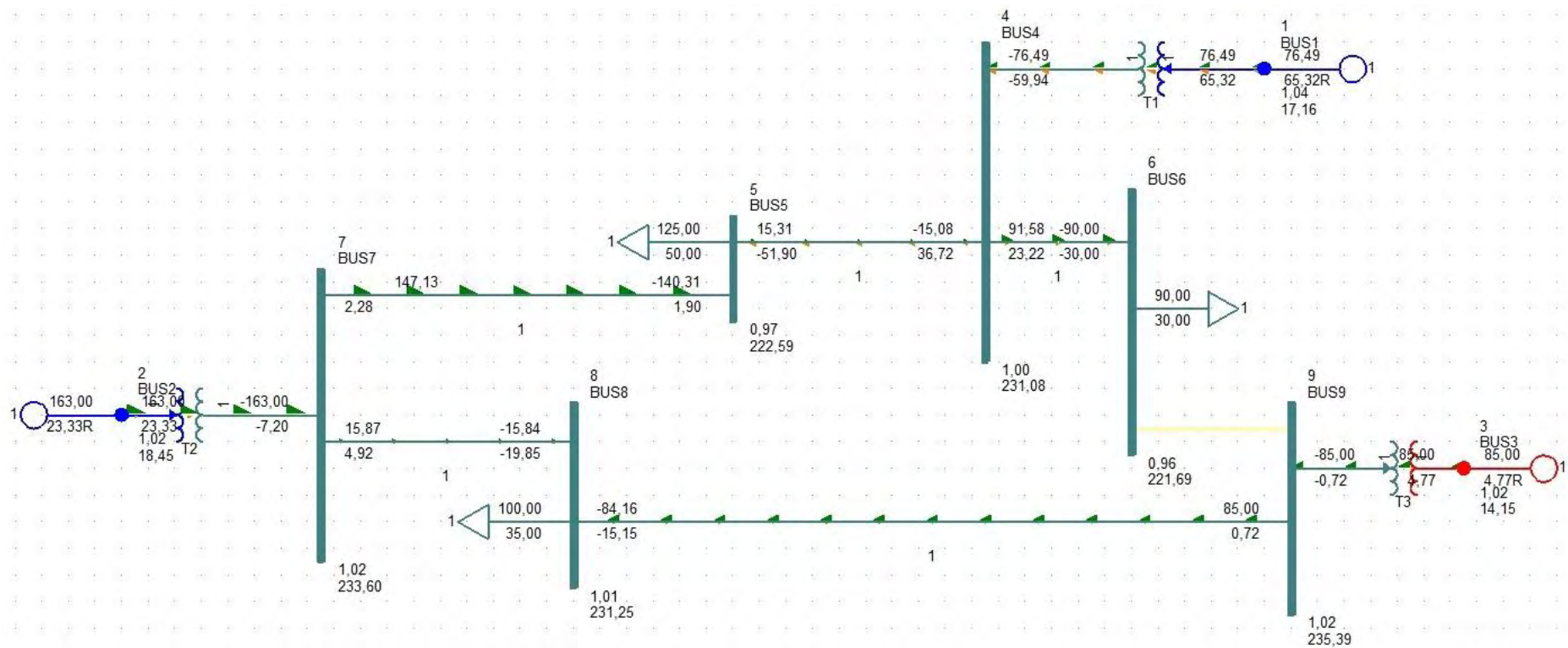
ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ (pu)	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΥΜΒΑΝ (pu)
1	1,0400	1,0400
2	1,0250	1,0250
3	1,0250	1,0250
4	1,0258	1,0047
5	0,9957	0,9678
6	1,0127	0,9639
7	1,0258	1,0156
8	1,0159	1,0054
9	1,0324	1,0234

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται πως οι τάσεις των ζυγών μεταβάλλονται ελαφρώς, χωρίς να παρεκκλίνουν των επιτρεπόμενων ορίων.

Στο Σχήμα 4.9 και στο Σχήμα 4.10 φαίνονται οι ροές ισχύος και τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών, τα οποία καθορίζουν και την ανάγκη παρέμβασης στο σύστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η γραμμή που αφαιρέθηκε.



Σχήμα 4.9: Φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 6-9



Σχήμα 4.10: Ροές ισχύος μετά την αφαίρεση της γραμμής 6-9

4.3.5 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 7-8

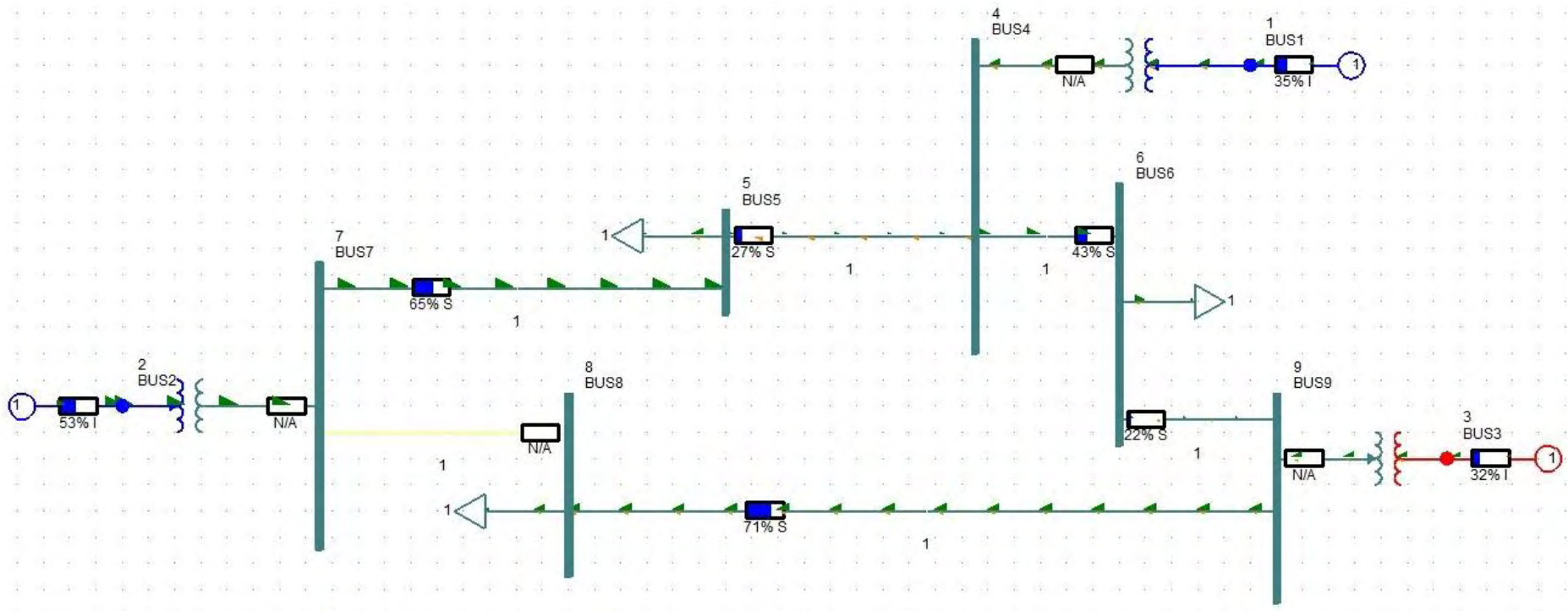
Σε αυτό το σενάριο πραγματοποιείται αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 7 και 8. Τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτό το σενάριο είναι η επαναφορά του συστήματος στην κανονική του κατάσταση, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς, η ανάλυση ροής φορτίου μετά την αφαίρεση. Οι τάσεις των ζυγών πριν και μετά το συμβάν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.10.

Πίνακας 4.10: Τάσεις ζυγών πριν και μετά την αφαίρεση της γραμμής 7-8

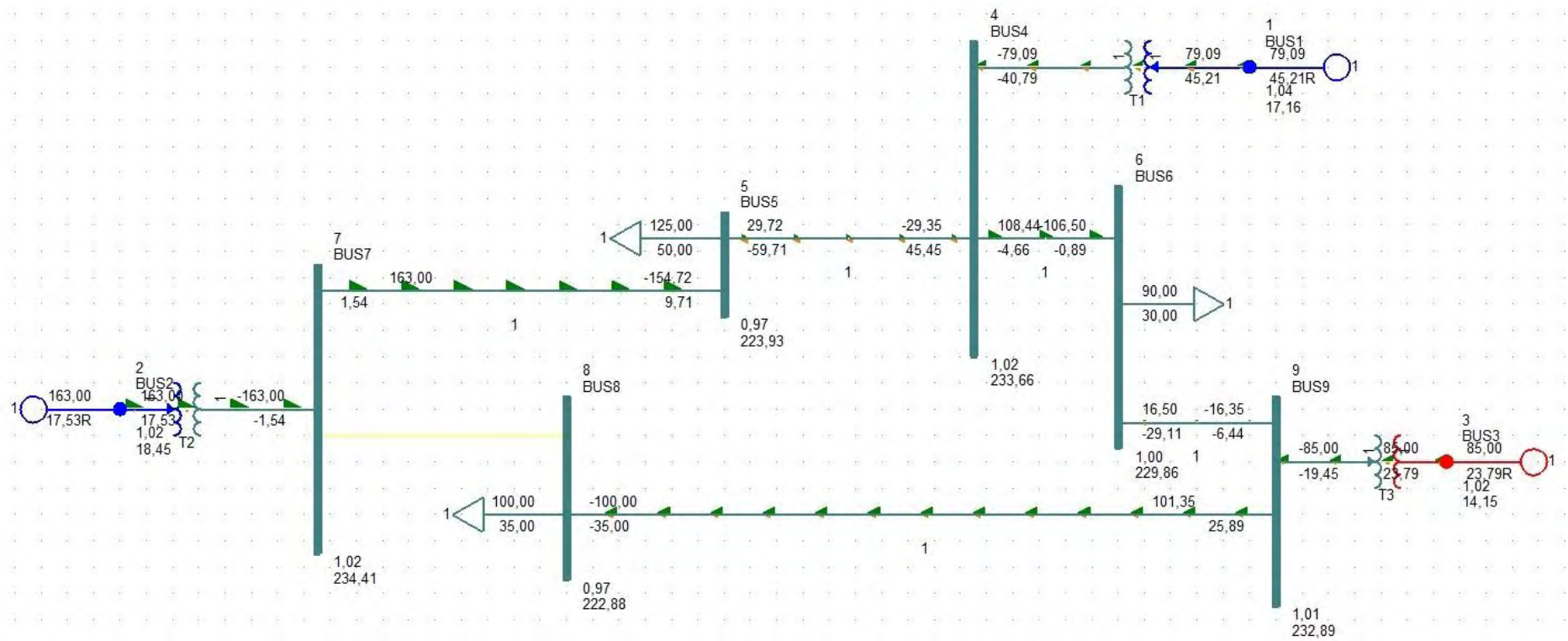
ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ (pu)	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΥΜΒΑΝ (pu)
1	1,0400	1,0400
2	1,0250	1,0250
3	1,0250	1,0250
4	1,0258	1,0047
5	0,9957	0,9678
6	1,0127	0,9639
7	1,0258	1,0156
8	1,0159	1,0054
9	1,0324	1,0234

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται πως οι τάσεις των ζυγών μεταβάλλονται ελαφρώς, χωρίς να παρεκκλίνουν των επιτρεπόμενων ορίων.

Στο Σχήμα 4.11 και στο Σχήμα 4.12 φαίνονται οι ροές ισχύος και τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών, τα οποία καθορίζουν και την ανάγκη παρέμβασης στο σύστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η γραμμή που αφαιρέθηκε.



Σχήμα 4.11: Φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 7-8



Σχήμα 4.12: Ροές ισχύος μετά την αφαίρεση της γραμμής 7-8

4.3.6 Αφαίρεση γραμμής μεταφοράς 8-9

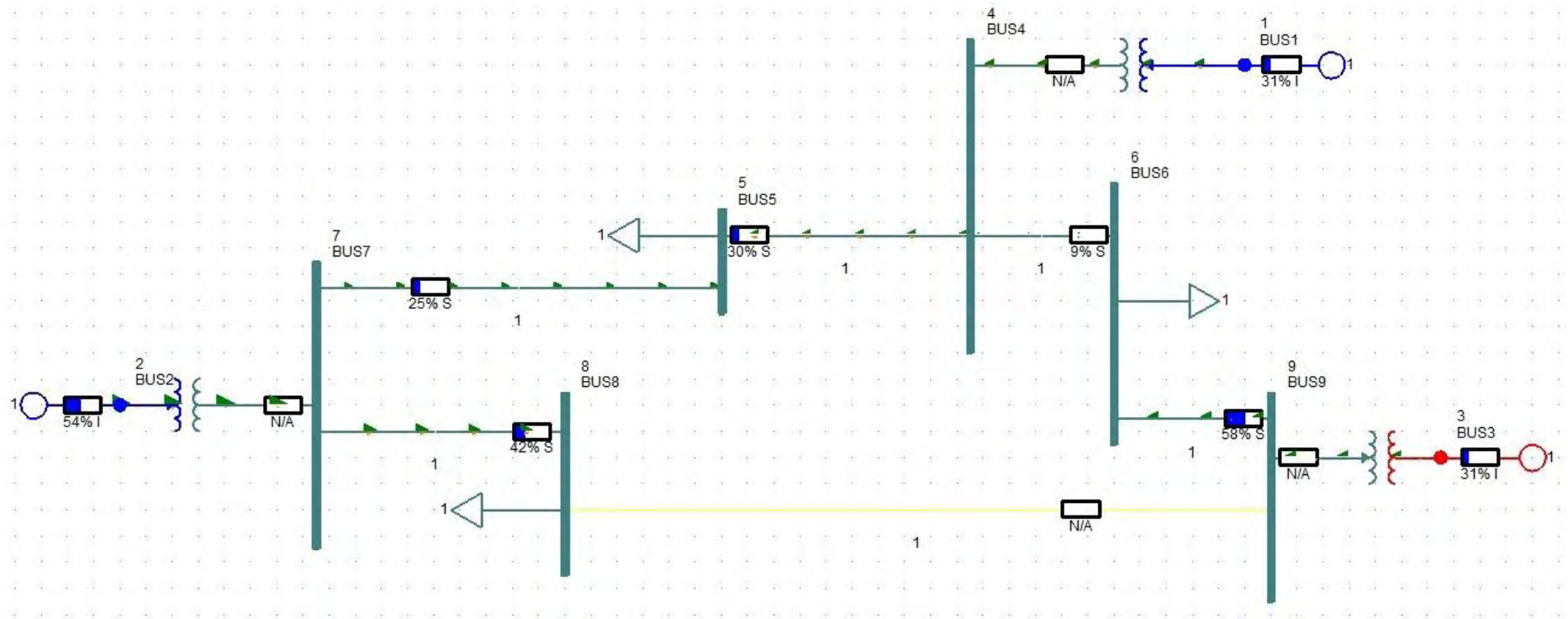
Σε αυτό το σενάριο πραγματοποιείται αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 8 και 9. Τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτό το σενάριο είναι η επαναφορά του συστήματος στην κανονική του κατάσταση, η αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς, η ανάλυση ροής φορτίου μετά την αφαίρεση. Οι τάσεις των ζυγών πριν και μετά το συμβάν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.11: Τάσεις ζυγών πριν και μετά την αφαίρεση της γραμμής 8-9

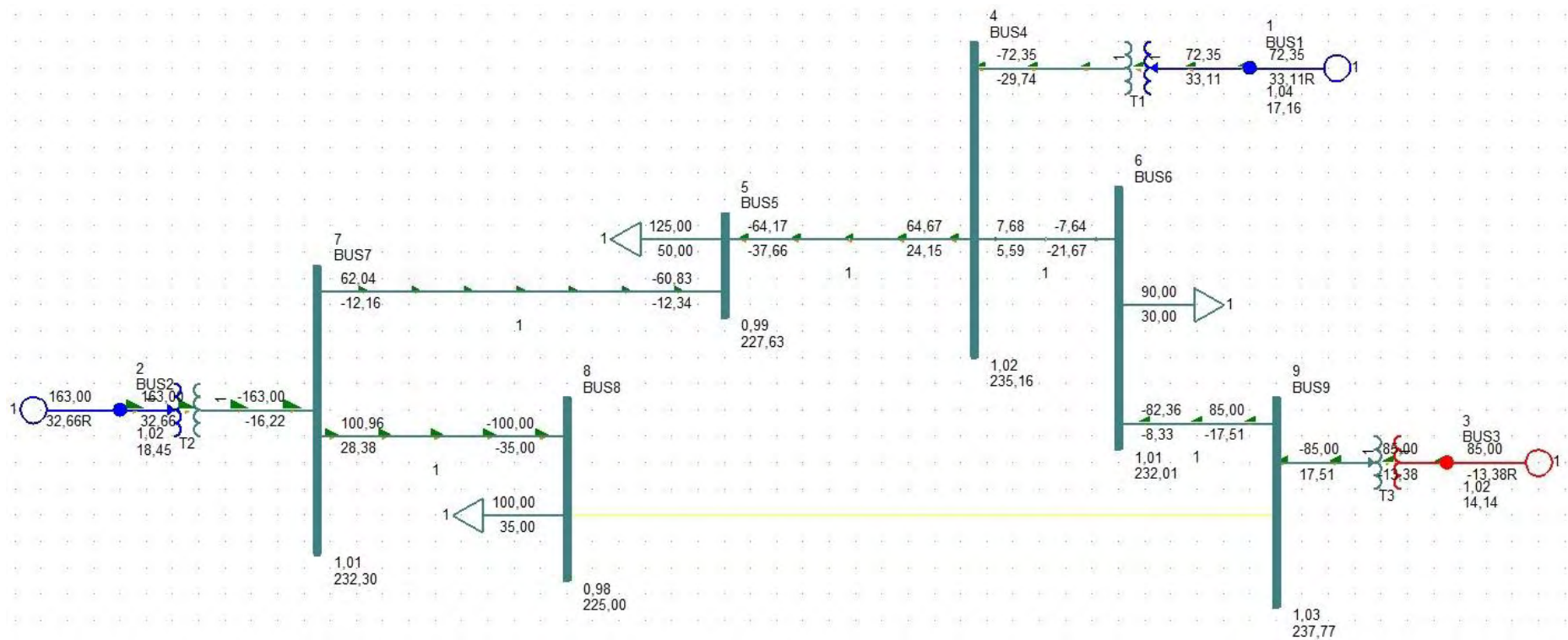
ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ (pu)	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΥΜΒΑΝ (pu)
1	1,0400	1,0400
2	1,0250	1,0250
3	1,0250	1,0250
4	1,0258	1,0224
5	0,9957	0,9897
6	1,0127	1,0087
7	1,0258	1,0100
8	1,0159	0,9783
9	1,0324	1,0338

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται πως οι τάσεις των ζυγών μεταβάλλονται ελαφρώς, χωρίς να παρεκκλίνουν των επιτρεπόμενων ορίων.

Στο Σχήμα 4.13 και στο Σχήμα 4.14 φαίνονται οι ροές ισχύος και τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών, τα οποία καθορίζουν και την ανάγκη παρέμβασης στο σύστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η γραμμή που αφαιρέθηκε.



Σχήμα 4.13: Φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γραμμής 8-9



Σχήμα 4.14: Ροές ισχύος μετά την αφαίρεση της γραμμής 8-9

4.3.7 Αφαίρεση γεννήτριας 2

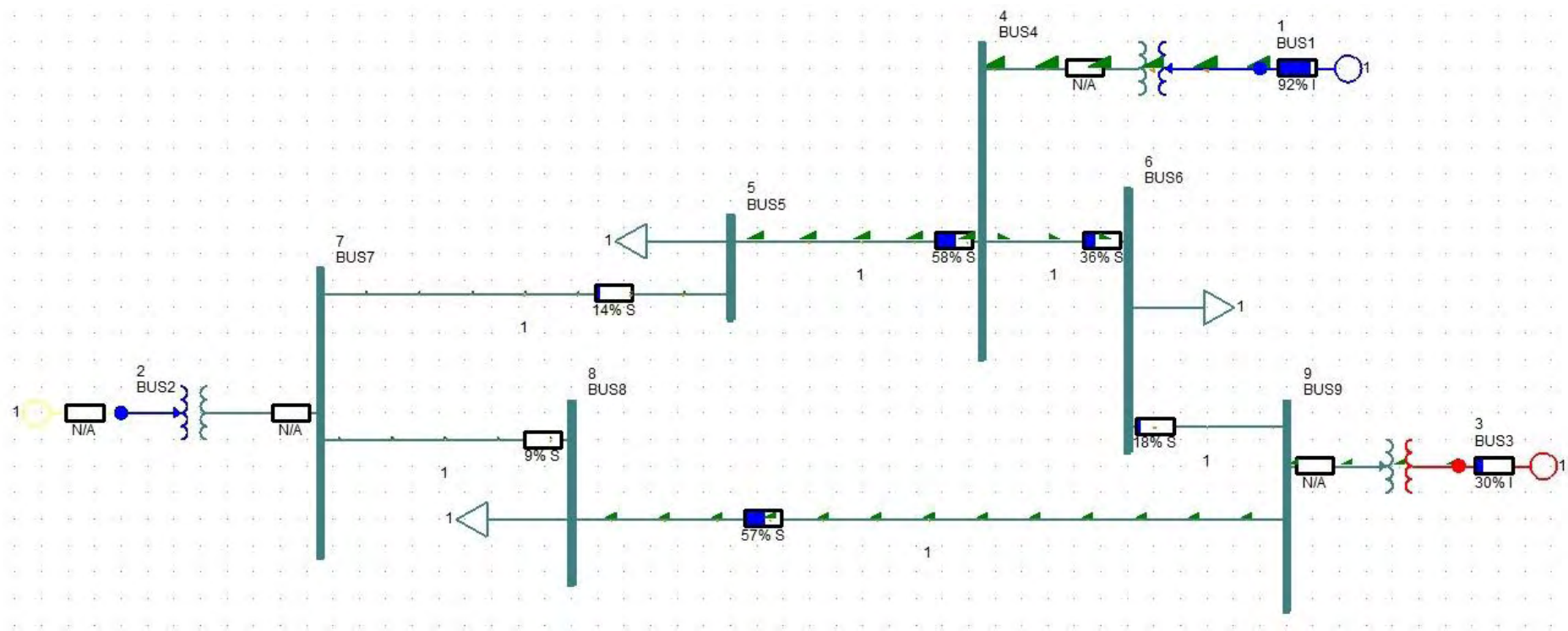
Σε αυτό το σενάριο πραγματοποιείται αφαίρεση της γεννήτριας 2 που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 2. Τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτό το σενάριο είναι η επαναφορά του συστήματος στην κανονική του κατάσταση, η αφαίρεση της γεννήτριας, η ανάλυση ροής φορτίου μετά την αφαίρεση. Οι τάσεις των ζυγών πριν και μετά το συμβάν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12: Τάσεις ζυγών πριν και μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 2

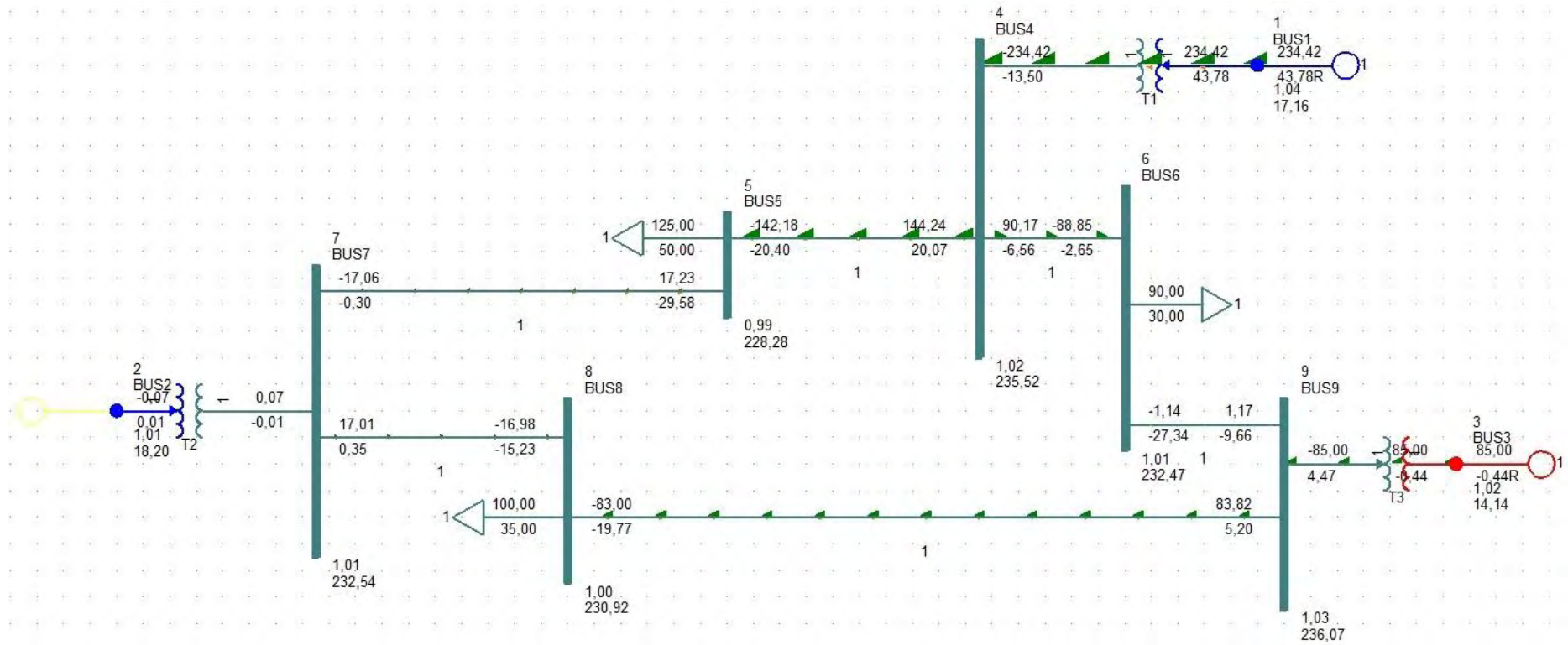
ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ (pu)	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΥΜΒΑΝ (pu)
1	1,0400	1,0400
2	1,0250	1,0110
3	1,0250	1,0250
4	1,0258	1,0240
5	0,9957	0,9925
6	1,0127	1,0107
7	1,0258	1,0110
8	1,0159	1,0040
9	1,0324	1,0264

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται πως οι τάσεις των ζυγών μεταβάλλονται ελαφρώς, χωρίς να παρεκκλίνουν των επιτρεπόμενων ορίων.

Στο Σχήμα 4.15 και στο Σχήμα 4.16 φαίνονται οι ροές ισχύος και τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών, τα οποία καθορίζουν και την ανάγκη παρέμβασης στο σύστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η γραμμή που αφαιρέθηκε. Παρατηρείται ότι η φόρτιση της γεννήτριας φτάνει το 92% και απαιτείται αντιμετώπιση του συμβάντος.



Σχήμα 4.15: Φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 2



Σχήμα 4.16: Ροές ισχύος μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 2

4.3.8 Αφαίρεση γεννήτριας 3

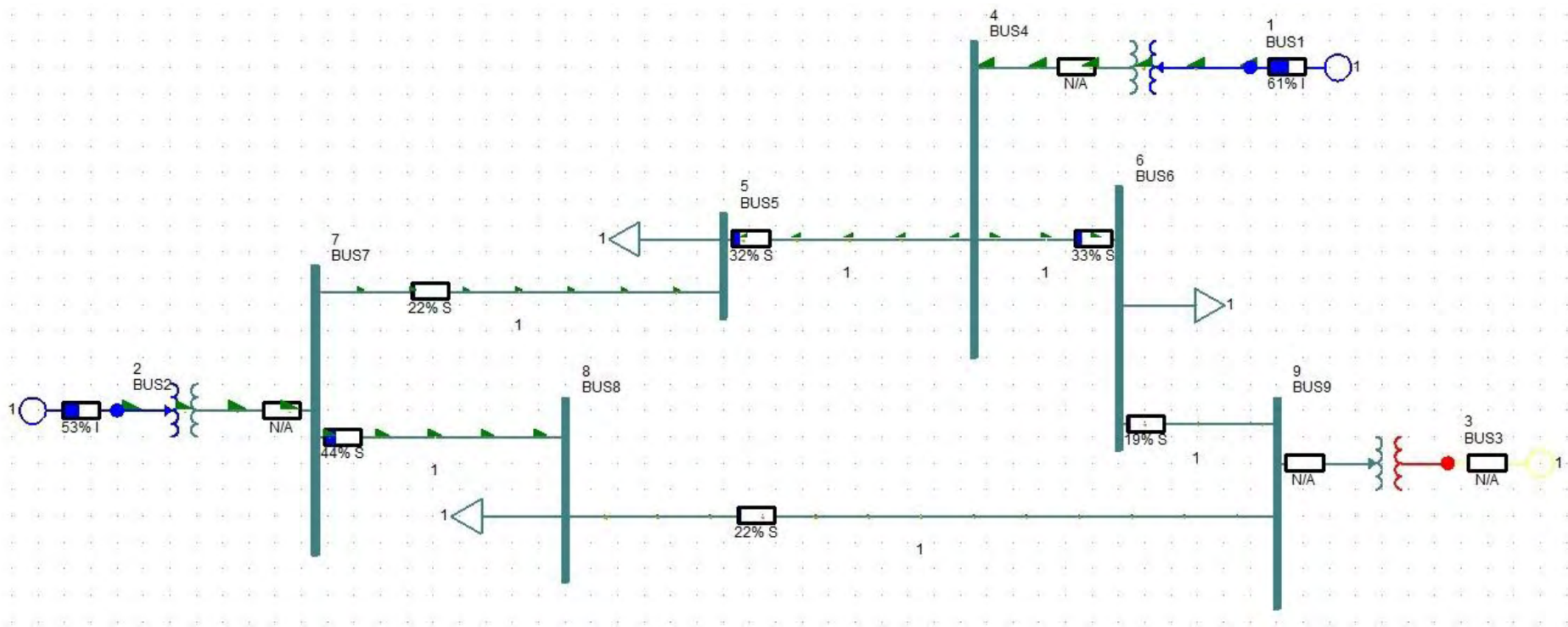
Σε αυτό το σενάριο πραγματοποιείται αφαίρεση της γεννήτριας 3 που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 3. Τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτό το σενάριο είναι η επαναφορά του συστήματος στην κανονική του κατάσταση, η αφαίρεση της γεννήτριας, η ανάλυση ροής φορτίου μετά την αφαίρεση. Οι τάσεις των ζυγών πριν και μετά το συμβάν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.13.

Πίνακας 4.13: Τάσεις ζυγών πριν και μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 3

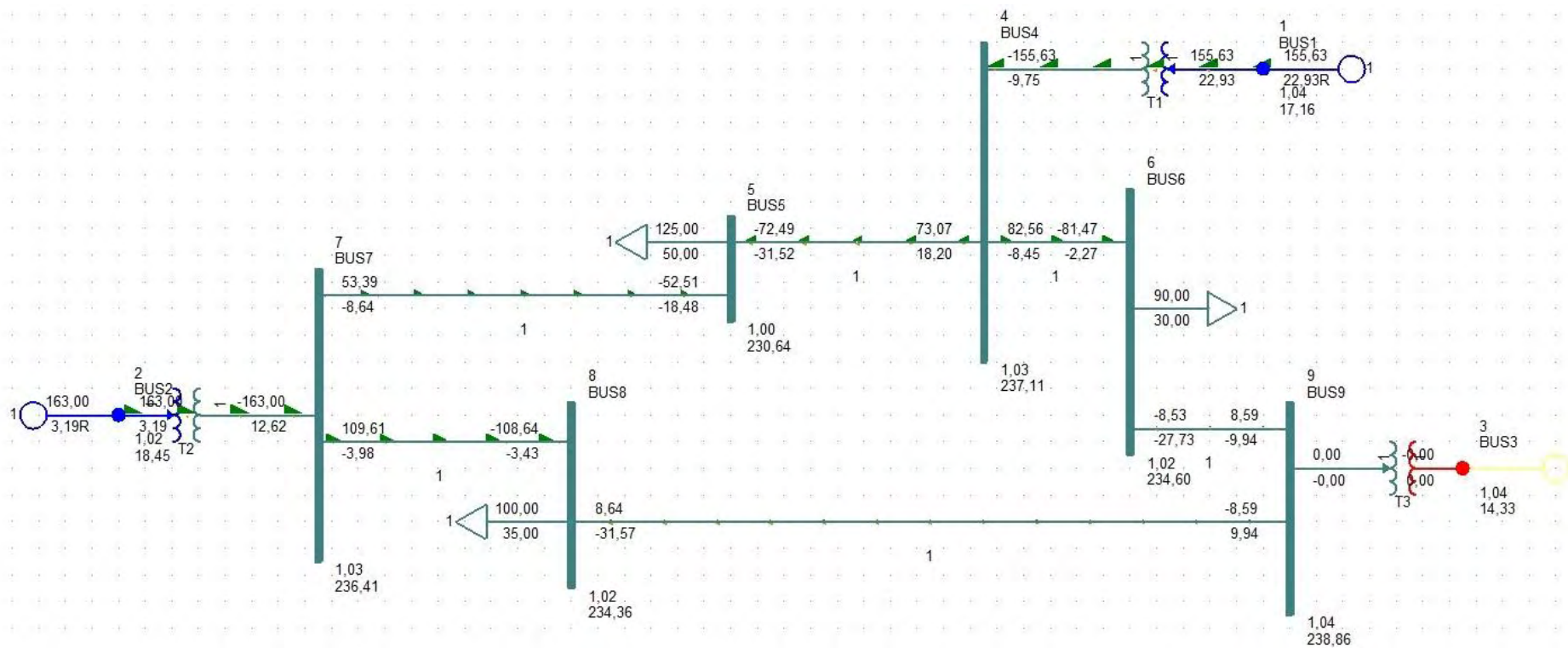
ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙΑΣ (pu)	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΣΥΜΒΑΝ (pu)
1	1,0400	1,0400
2	1,0250	1,0250
3	1,0250	1,0385
4	1,0258	1,0309
5	0,9957	1,0028
6	1,0127	1,0200
7	1,0258	1,0279
8	1,0159	1,0190
9	1,0324	1,0385

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρείται πως οι τάσεις των ζυγών μεταβάλλονται ελαφρώς, χωρίς να παρεκκλίνουν των επιτρεπόμενων ορίων.

Στο Σχήμα 4.17 και στο Σχήμα 4.18 φαίνονται οι ροές ισχύος και τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών, τα οποία καθορίζουν και την ανάγκη παρέμβασης στο σύστημα. Με κίτρινο χρώμα φαίνεται η γραμμή που αφαιρέθηκε.



Σχήμα 4.17: Φορτίσεις γραμμών μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 3



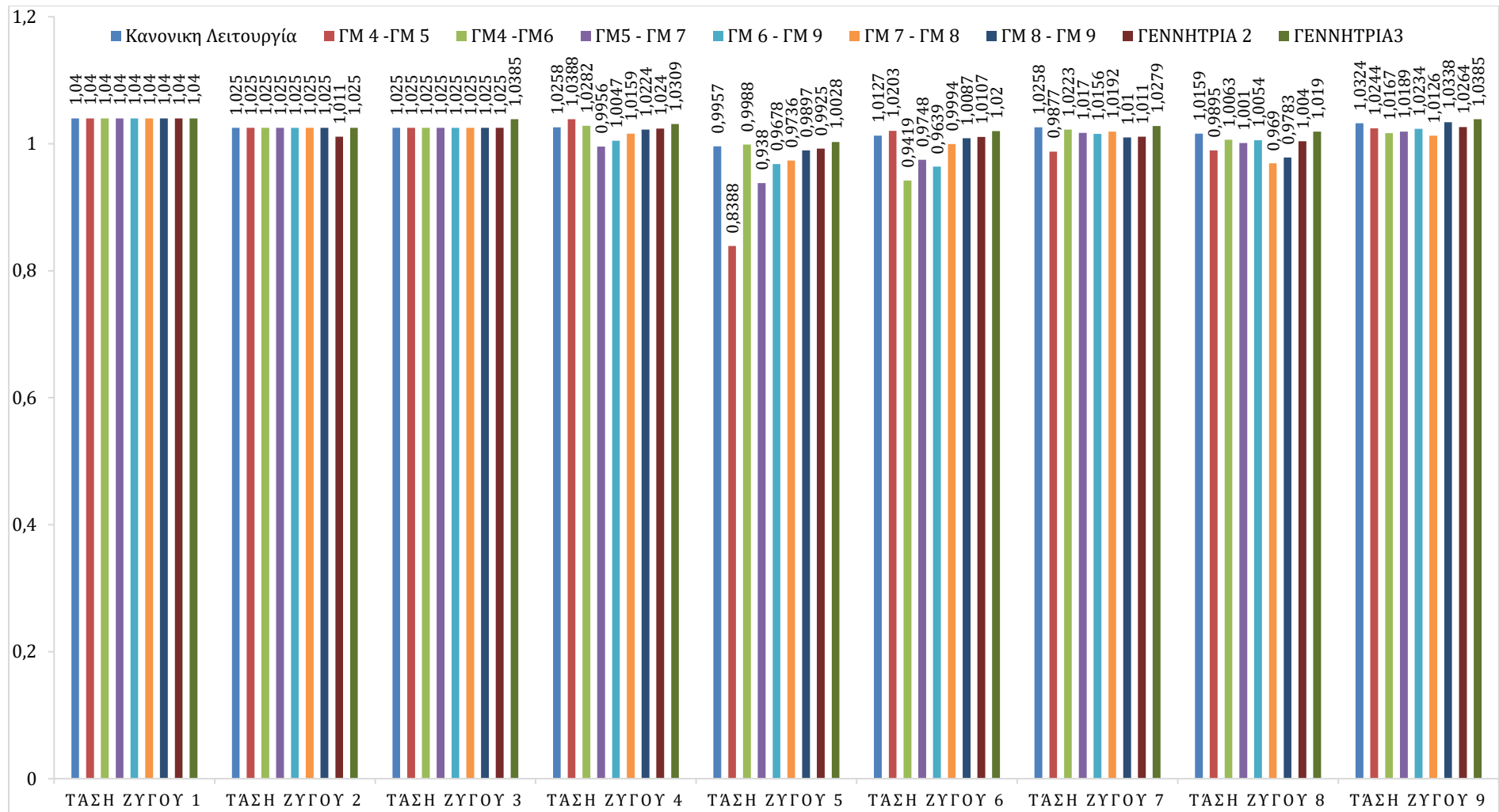
Σχήμα 4.18: Ροές ισχύος μετά την αφαίρεση της γεννήτριας 3

4.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων την προσομοίωσης

Μετά το πέρας της προσομοίωσης και τη συλλογής των αποτελεσμάτων για κάθε σενάριο, το τελικό στάδιο είναι η αξιολόγηση τους ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την αντιμετώπιση των πιθανών συμβάντων, με στόχο τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος των 9 ζυγών. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται με βάση τις τάσεις των ζυγών και τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών μεταφοράς για κάθε σενάριο. Στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τιμές των τάσεων σε ρυ όλων των ζυγών κατά τη διάρκεια όλων των συμβάντων. Το Σχήμα 4.19 παριστά γραφικά της μεταβολές των τάσεων των ζυγών για κάθε διαταραχή.

Πίνακας 4.14: Τάσεις ζυγών για όλα τα σενάρια

ΣΥΜΒΑΝΤΑ		Αρχική Κατάσταση	Αφαίρεση Γ.Μ 4-5	Αφαίρεση Γ.Μ 4-6	Αφαίρεση Γ.Μ 5-7	Αφαίρεση Γ.Μ 6-9	Αφαίρεση Γ.Μ 7-8	Αφαίρεση Γ.Μ 8-9	Αφαίρεση γεν 2	Αφαίρεση γεν 3
ΤΑΣΕΙΣ ΖΥΓΩΝ (ρμ)	Ζυγός 1	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,0400	1,040	1,0400	1,0400
	Ζυγός 2	1,0250	1,0250	1,0250	1,0250	1,0250	1,0250	1,0250	1,0110	1,0250
	Ζυγός 3	1,0250	1,0250	1,0250	1,0250	1,0250	1,0250	1,0250	1,0250	1,0385
	Ζυγός 4	1,0258	1,0388	1,0282	0,9956	1,0047	1,0159	1,0224	1,0240	1,0309
	Ζυγός 5	0,9957	0,8388	0,9988	0,9380	0,9678	0,9736	0,9897	0,9925	1,0028
	Ζυγός 6	1,0127	1,0203	0,9419	0,9748	0,9639	0,9994	1,0087	1,0107	1,0200
	Ζυγός 7	1,0258	0,9877	1,0223	1,0170	1,0156	1,0192	1,0100	1,0110	1,0279
	Ζυγός 8	1,0159	0,9895	1,0063	1,0010	1,0054	0,9690	0,9783	1,0040	1,0190
	Ζυγός 9	1,0324	1,0244	1,0167	1,0189	1,0234	1,0126	1,0338	1,0264	1,0385



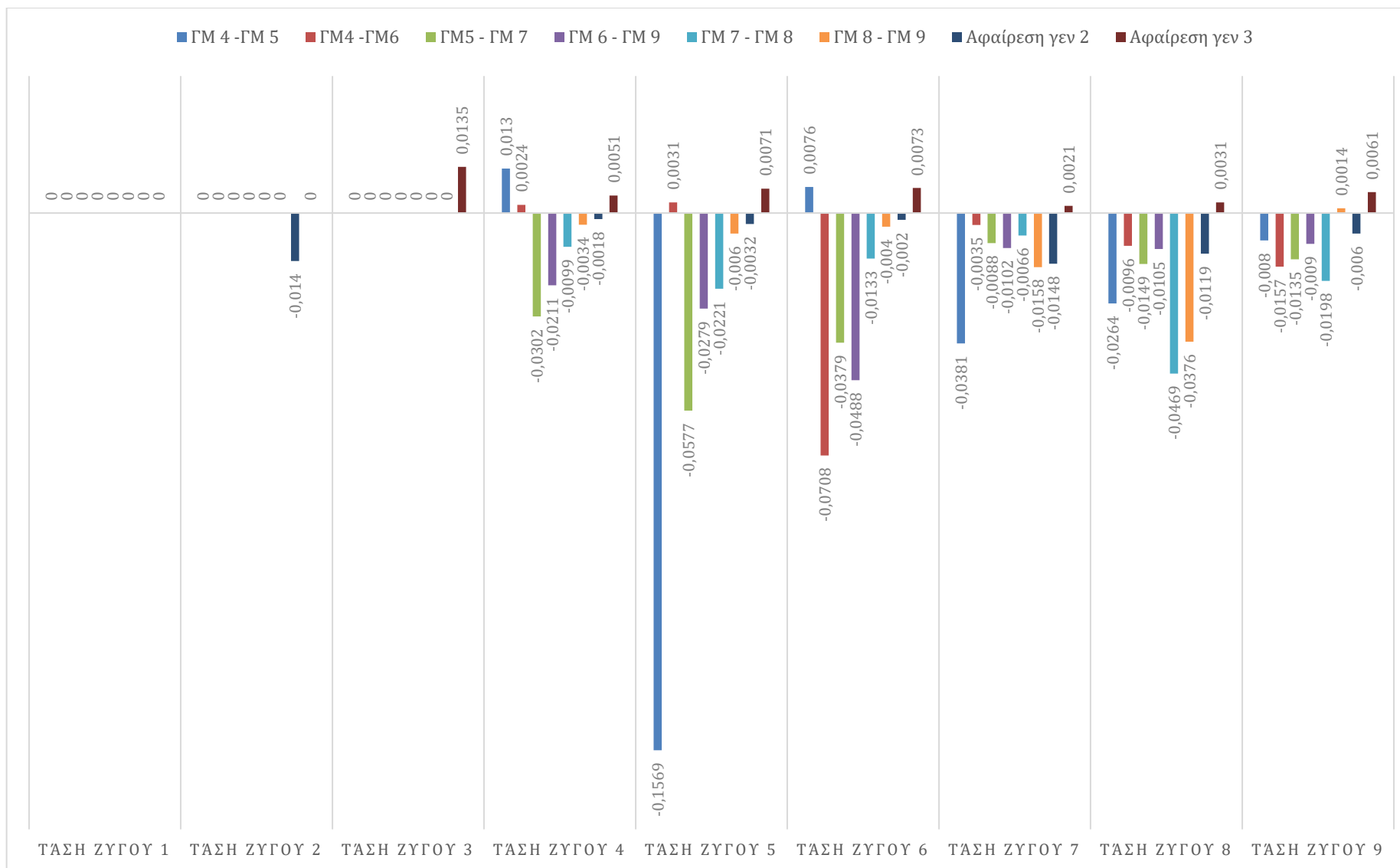
Σχήμα 4.19: Μεταβολές τάσεων κάθε ζυγού για κάθε σενάριο

4.4.1 Αξιολόγηση ως προς τις τάσεις των ζυγών

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση διαπιστώνεται η αύξηση ή η πτώση της τάσης των στοιχείων του συστήματος κατά τη διάρκεια του συμβάντος. Τα συγκριτικά αποτελέσματα των τάσεων μεταξύ της κανονικής λειτουργίας του συστήματος και των επιπτώσεων κάθε σεναρίου παρουσιάζονται σε ρυ στον Πίνακα 4.15. Στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζονται τα γραφικά τις εν λόγω αυξήσεων ή μειώσεων της τάσης που παρατηρούνται στο σύστημα.

Πίνακας 4.15: Μεταβολή τάσης (pu) ζυγών κατά την προσομοίωση κάθε σεναρίου

διαφορά κανονικής λειτουργίας - συμβάντος	Αφαίρεση ΓΜ 4 -ΓΜ 5	Αφαίρεση ΓΜ4 -ΓΜ6	Αφαίρεση ΓΜ5 - ΓΜ 7	Αφαίρεση ΓΜ 6 - ΓΜ 9	Αφαίρεση ΓΜ 7 - ΓΜ 8	Αφαίρεση ΓΜ 8 - ΓΜ 9	Αφαίρεση γεννήτριας 2	Αφαίρεση γεννήτριας 3
Τάση ζυγού 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Τάση ζυγού 2	0	0	0	0	0	0	-0,014	0
Τάση ζυγού 3	0	0	0	0	0	0	0	0,0135
Τάση ζυγού 4	0,013	0,0024	-0,0302	-0,0211	-0,0099	-0,0034	-0,0018	0,0051
Τάση ζυγού 5	-0,1569	0,0031	-0,0577	-0,0279	-0,0221	-0,006	-0,0032	0,0071
Τάση ζυγού 6	0,0076	-0,0708	-0,0379	-0,0488	-0,0133	-0,004	-0,002	0,0073
Τάση ζυγού 7	-0,0381	-0,0035	-0,0088	-0,0102	-0,0066	-0,0158	-0,0148	0,0021
Τάση ζυγού 8	-0,0264	-0,0096	-0,0149	-0,0105	-0,0469	-0,0376	-0,0119	0,0031
Τάση ζυγού 9	-0,008	-0,0157	-0,0135	-0,009	-0,0198	0,0014	-0,006	0,0061



Σχήμα 4.20: Μεταβολή τάσης ζυγών σε κάθε σενάριο

Από τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του Σχήματος 4.20 διαπιστώνεται ότι η μέγιστη αύξηση της τάσης παρατηρείται στον ζυγό 3 κατά την αφαίρεση της γεννήτριας 3. Η αύξηση τάσης στο ζυγό συγκριτικά με την κανονική λειτουργία του συστήματος, είναι κατά 0.0135 pu. Ομοίως από τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι κατά το σενάριο αφαίρεσης της γραμμής μεταφοράς 7-8, εντοπίζεται η μέγιστη πτώση τάσης στο ζυγό 5. Η πτώση τάσης σε αυτή την περίπτωση είναι 0.1569 pu. Η δεύτερη κατά σειρά μέγιστη πτώση τάσης παρατηρείται στον ζυγό 6 κατά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς 4-6.

Ο Πίνακας 4.16 παρουσιάζει ταξινομημένα τα σενάρια κατά φθίνουσα σειρά, λαμβάνοντας υπόψιν την μέγιστη μεταβολή τάσης σε απόλυτη τιμή.

Πίνακας 4.16: Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών ως προς τις τάσεις των ζυγών

ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΣΗΣ (pu)	ΖΥΓΟΣ
ΑΦΑΙΡΕΣΗ Γ.Μ. 4-5	0,1569	5
ΑΦΑΙΡΕΣΗ Γ.Μ. 4-6	0,0708	6
ΑΦΑΙΡΕΣΗ Γ.Μ. 5-7	0,0577	5
ΑΦΑΙΡΕΣΗ Γ.Μ. 6-9	0,0488	6
ΑΦΑΙΡΕΣΗ Γ.Μ. 7-8	0,0469	8
ΑΦΑΙΡΕΣΗ Γ.Μ. 8-9	0,0376	8
ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 2	0,0148	7
ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 3	0,0135	3

4.4.2 Αξιολόγηση ως προς τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών μεταφοράς.

Οι επιπτώσεις των πιθανών σεναρίων στο σύστημα αξιολογούνται και ως προς τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών μεταφοράς κατά τη διάρκεια τους. Ο Πίνακας 4.16 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα ποσοστά φόρτισης των γραμμών του συστήματος. Η χειρότερη περίπτωση εντοπίζεται κατά την αφαίρεση της γραμμής μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 5 και 7, όπου το ποσοστό φόρτισης της γραμμής μεταξύ των ζυγών 6-9 εκτοξεύεται στο 97%. Η αμέσως

επόμενη χειρότερη περίπτωση εντοπίζεται στο σενάριο που αφαιρείται η γεννήτρια 2, με αποτέλεσμα η γραμμή που συνδέει τη γεννήτρια 1 με το ζυγό της να φορτίζεται στο 92%.

Πίνακας 4.17: Ποσοστά φόρτισης των γραμμών κατά την προσομοίωση κάθε σεναρίου

Σενάρια		Αρχική Κατάσταση	Αφαίρεση Γ.Μ 4-5	Αφαίρεση Γ.Μ 4-6	Αφαίρεση Γ.Μ 5-7	Αφαίρεση Γ.Μ 6-9	Αφαίρεση Γ.Μ 7-8	Αφαίρεση Γ.Μ 8-9	Αφαίρεση γεν 2	Αφαίρεση γεν 3
ΠΟΣΟΣΤΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	Γεν1	29%	29%	29%	44%	39%	35%	31%	92%	61%
	Γεν 2	53%	57%	53%	53%	53%	53%	54%	N/A	53%
	Γεν 3	31%	30%	31%	31%	30%	32%	31%	30%	N/A
	4-5	22%	N/A	32%	55%	22%	27%	30%	58%	32%
	4-6	14%	31%	N/A	24%	38%	43%	9%	36%	33%
	5-7	35%	59%	22%	N/A	59%	65%	25%	14%	22%
	6-9	42%	16%	63%	97%	N/A	22%	58%	18%	19%
	7-8	31%	13%	44%	65%	10%	N/A	42%	9%	44%
	8-9	23%	52%	16%	46%	57%	71%	N/A	57%	22%

Από τον Πίνακα 4.17 προκύπτει ο Πίνακας 4.18 στον οποίο παρουσιάζονται ταξινομημένα όλα τα σενάρια για τα οποία προκύπτουν τα μέγιστα ποσοστά φόρτισης των γραμμών μεταφοράς και των γεννητριών.

Πίνακας 4.18: Ταξινόμηση σεναρίων διαταραχών ως προς τα ποσοστά φόρτισης

ΔΙΑΤΑΡΡΑΧΗ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΣΗΜΕΙΟ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ
Αφαίρεση Γ.Μ 5-7	97%	Γ.Μ. 6-9
Αφαίρεση GEN 2	92%	GEN 1
Αφαίρεση Γ.Μ. 7-8	71%	Γ.Μ. 8-9
Αφαίρεση Γ.Μ. 4-6	63%	Γ.Μ. 6-9
Αφαίρεση GEN 3	61%	GEN 1
Αφαίρεση Γ.Μ. 4-5	59%	Γ.Μ. 5-7
Αφαίρεση Γ.Μ. 6-9	59%	Γ.Μ. 5-7
Αφαίρεση Γ.Μ. 8-9	58%	Γ.Μ 6-9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια εκτενής βιβλιογραφική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται στην μελέτη αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η βιβλιογραφική έρευνα κατέληξε σε μελέτη στατικής ασφάλειας ενός συστήματος 9 ζυγών. Κύριος σκοπός ήταν να γίνει προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος, υπό ορισμένες συνθήκες, και η άντληση συμπερασμάτων για τα αποτελέσματα. Για τις διάφορες διαταραχές που επιλέχθηκαν πραγματοποιήθηκε ανάλυση ροής φορτίου, απ' όπου προέκυψαν κάποιες μεταβολές στις τάσεις των ζυγών και στις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς, οι οποίες σε ορισμένα σενάρια καθιστούν κρίσιμη τη λειτουργία του συστήματος. Στα περισσότερα σενάρια που εξετάστηκαν οι τάσεις και οι φορτίσεις έμειναν εντός των ορίων κανονικής λειτουργίας.

Το σύστημα που εξετάστηκε ήταν μικρό, συνεπώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις μέσω του λογισμικού PSS-E της Siemens, εφαρμόζοντας τη μέθοδο Newton-Raphson, συνέκλιναν γρήγορα μετά από μικρό αριθμό επαναλήψεων.

Τα αλματώδη βήματα που γίνονται στα συστήματα ισχύος σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις σε ενέργεια, επιβάλλουν την διασφάλιση της αξιοπιστίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρόληψη μέσω της μελέτης και η αποφυγή καταστροφικών επιπτώσεων σε ένα σύστημα κρίνεται αναγκαία. Καθοριστικό ρόλο παίζουν τα λογισμικά ανάλυσης ροής ισχύος που διασφαλίζουν την ταχύτητα και την ορθότητα των μελετών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Λαμπρίδης Δ., Ντοκόπουλος Π., Παπαγιάννης Γ., Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Τόμος Α', Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2007
- [2] Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Βοβός Νικόλαος Α., Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2015
- [3] Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2013
- [4] Βοβός Νικόλαος Α., Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2016
- [5] Xi-Fan Wang, Yonghua Song, Malcolm Irving, Modern Power Systems Analysis, Εκδοσεις Springer US, 2009
- [6] Anumaka, Michael, Fundamentals of Reliability of Electric Power System and Equipment, International Journal of Engineering Science and Technology, June 2011
- [7] R. Billinton και W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, New York, Springer US, 1994
- [8] European Commission, Identification of Appropriate Generation and System Adequacy Standards for the Internal Electricity Market Final Report, Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2014
- [9] IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices," in *IEEE Std 1366-2003 (Revision of IEEE Std 1366-1998)*, vol., no., pp.1-50, 14 May 2004, doi: 10.1109/IEEESTD.2004.94548
- [10] Π. Σ. Γεωργιλάκης, Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Κάλλιπος, Αθήνα, 2015
- [11] Srivani, J. & Swarup, Shanti. (2008). Power system static security assessment and evaluation using external system equivalents. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2007
- [12] A. A. Abdulrazzaq, "Contingency ranking of power systems using a performance index," International Research Journal of Engineering and Technology, p. 4, 2015
- [13] LAB1 – INTRODUCTION TO PSS/E,COLORADO STATE UNIVERSITY