



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ανάλυση Αξιοπιστίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία

Τσιάκας Ματθαίος Δημήτριος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Σεπτέμβριος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

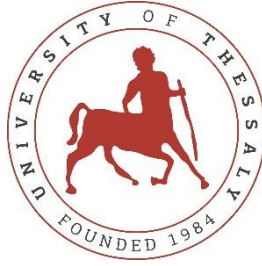
Ανάλυση Αξιοπιστίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία

Τσιάκας Ματθαίος Δημήτριος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Σεπτέμβριος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Reliability Analysis of Power Systems

Diploma Thesis

Tsiakas Matthaïos Dimitrios

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

September 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Μπαργιώτας Δημήτριος

Βαθμίδα/ιδιότητα επιβλέποντα, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Δασκαλοπούλου Ασπασία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Φεύγας Αθανάσιος

Ε.ΔΙ.Π, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

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, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Τσιάκας Ματθαίος Δημήτριος

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Tsiakas Matthaios Dimitrios

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα, Καθηγητή Δημήτριο Μπαργιώτα, για την καθοδήγηση και τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για την άμεση ανταπόκριση στις απορίες και τους προβληματισμούς μου. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την Καθηγήτρια Ασπασία Δασκαλοπούλου και τον Δρ. Αθανάσιο Φεύγα, μέλος Ε.ΔΙ.Π, για την συμβολή τους στην επίβλεψη και αξιολόγηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στην οικογένειά μου, για την υπομονή και την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχαν όχι μόνο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου, αλλά και σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Χωρίς τη δική τους συνεχή έμπνευση και ενθάρρυνση, τίποτα από αυτά δεν θα ήταν εφικτό.

Τέλος, νιώθω ευγνωμοσύνη για όλους εκείνους που συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας, προσφέροντάς μου γνώσεις, υποστήριξη και έμπνευση.

Διπλωματική Εργασία

Ανάλυση Αξιοπιστίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τσιάκας Ματθαίος Δημήτριος

Περίληψη

Η αξιοπιστία αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο για την ασφαλή και απρόσκοπτη λειτουργία των σύγχρονων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη και την ποσοτική αξιολόγηση της αξιοπιστίας, εστιάζοντας στις δύο θεμελιώδεις συνιστώσες της: την Ασφάλεια και την Επάρκεια.

Η εργασία θεμελιώνεται αρχικά σε ένα αναλυτικό θεωρητικό πλαίσιο. Στο πρώτο μέρος, εξετάζεται η δομή και η λειτουργία των Σύγχρονων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, από την παραγωγή και τη μεταφορά μέχρι τη διανομή. Στη συνέχεια, αναλύεται η μεθοδολογία της ανάλυσης ροής φορτίου, η οποία αποτελεί το θεμελιώδες εργαλείο για τον υπολογισμό των τάσεων, των γωνιών και των ρών ισχύος του δικτύου σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Το θεωρητικό μέρος ολοκληρώνεται με μια σε βάθος εξέταση της έννοιας της αξιοπιστίας, διαχωρίζοντάς την στις δύο βασικές συνιστώσες της: την Ασφάλεια, που αφορά την ικανότητα του συστήματος να αντέχει σε αιφνίδιες διαταραχές, και την Επάρκεια, που εξετάζει την ύπαρξη επαρκών πόρων για την κάλυψη της ζήτησης. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζονται και αναλύονται οι βασικοί πιθανοτικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίησή τους (LOLP, LOLE, EENS, PI_p , κ.λπ.).

Το τελικό μέρος της εργασίας εστιάζει σε μια ολοκληρωμένη μελέτη περίπτωσης, όπου εφαρμόζεται η θεωρητική ανάλυση στο τυποποιημένο σύστημα δοκιμών IEEE 14-bus. Για την προσομοίωση και την ανάλυση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το εξειδικευμένο λογισμικό PowerWorld Simulator. Η μεθοδολογία περιλάμβανε μια πλήρη ανάλυση ασφάλειας N-1, η οποία μας έδειξε ότι το σύστημα δεν είναι N-1 ασφαλές, εντοπίζοντας πέντε (5) κρίσιμες διαταραχές που οδηγούν σε παραβίαση των ορίων λειτουργίας. Η πιο σοβαρή εξ αυτών είναι η απώλεια της γραμμής μεταφοράς 1-2, η οποία προκαλεί ολική κατάρρευση της ευστάθειας του συστήματος.

Για κάθε κρίσιμη βλάβη, πραγματοποιήθηκε ανάλυση επάρκειας για τον υπολογισμό της απαιτούμενης περικοπής φορτίου (Ci) που είναι αναγκαία για την αποκατάσταση της ασφαλούς λειτουργίας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ποσοτικοποιήθηκαν μέσω των δεικτών αξιοπιστίας, αποδεικνύοντας ότι το σύστημα αναμένεται να έχει συνολική απώλεια ενέργειας 1061.69 MWh ετησίως (EENS), με την απώλεια της γραμμής 1-2 να ευθύνεται για το 57% αυτού του ποσού.

Τέλος, τα συμπεράσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι η κύρια δομική αδυναμία του συστήματος εντοπίζεται στον διάδρομο μεταφοράς ισχύος από τις κύριες μονάδες παραγωγής προς το κέντρο του δικτύου. Για την ενίσχυση της αξιοπιστίας, προτείνονται συγκεκριμένες λύσεις, όπως η εγκατάσταση μιας νέας γραμμής μεταφοράς και η αναβάθμιση υπαρχόντων κλάδων.

Λέξεις-κλειδιά:

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ασφάλεια, Επάρκεια, Ανάλυση Ροής Φορτίου, Ανάλυση Ενδεχομένων N-1, Δείκτες Αξιοπιστίας, Δείκτες Ασφάλειας, EENS, LOLE, LOLF, LOLP, PowerWorld Simulator, IEEE 14-bus.

Diploma Thesis

Reliability Analysis of Power Systems

Tsiakas Matthaios Dimitrios

Abstract

Reliability constitutes the cornerstone for the safe and uninterrupted operation of modern Electric Power Systems (EPS). This diploma thesis addresses the study and quantitative assessment of reliability, focusing on its two fundamental components: Security and Adequacy.

The thesis is initially founded on an analytical theoretical framework. The first part examines the structure and operation of modern Electric Power Systems, from generation and transmission to distribution. Subsequently, the methodology of power flow analysis is analyzed, which is the fundamental tool for calculating the voltages, angles, and power flows of the network under steady-state conditions. The theoretical part concludes with an in-depth examination of the concept of reliability, distinguishing it into its two basic components: Security, which relates to the system's ability to withstand sudden disturbances, and Adequacy, which examines the existence of sufficient resources to meet the load demand. In this context, the main probabilistic indices used for their quantification (LOLP, LOLE, EENS, PI_p , etc.) are presented and analyzed.

The main part of the thesis focuses on a comprehensive case study, where the theoretical analysis is applied to the standard IEEE 14-bus test system. The specialized software PowerWorld Simulator was used for the simulation and analysis of the system. The methodology included a full N-1 security analysis, which revealed that the system is not N-1 secure, identifying five (5) critical contingencies that lead to violations of its operating limits. The most severe of these is the loss of the 1-2 transmission line, which causes a total collapse of the system's stability.

For each critical contingency, an adequacy analysis was performed to calculate the required load curtailment (C_i) necessary to restore the system to a secure operating state. The

results of the analysis were quantified through reliability indices, demonstrating that the system is expected to have a total energy loss of 1061.69 MWh annually (EENS), with the loss of the 1-2 line being responsible for 57% of this amount.

Finally, the conclusions of the study indicate that the main structural weakness of the system is in the power transmission corridor from the main generation units to the center of the network. To enhance reliability, specific solutions are proposed, such as the installation of a new transmission line and the upgrade of existing branches.

Keywords:

Power Systems, Power System Reliability, Security, Adequacy, Power Flow Analysis, N-1 Contingency Analysis, Reliability Indices, Security Indices, EENS, LOLE, LOLE, LOLP, PowerWorld Simulator, IEEE 14-bus.

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες.....</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη.....</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων.....</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>xxi</i>
<i>Κατάλογος σχημάτων.....</i>	<i>xxiii</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxv</i>
<i>Κεφάλαιο 1</i>	<i>1</i>
<i>Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας</i>	<i>1</i>
1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	1
1.2 Δομικά Συστατικά ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	2
1.3 Αναπαράσταση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	3
1.4 Συνιστώσες των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	6
1.4.1 Η Σύγχρονη Γεννήτρια.....	6
1.4.2 Ο Μετασχηματιστής	10
1.4.3 Η Γραμμή Μεταφοράς	14
1.4.4 Τα Φορτία	16
<i>Κεφάλαιο 2</i>	<i>17</i>
<i>Ανάλυση Ροής Φορτίου.....</i>	<i>17</i>
2.1 Εξισώσεις Ροής Φορτίου	18
2.1.1 Τρόποι Επίλυσης Εξισώσεων Ροής Φορτίου	20
2.2 Ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Gauss-Seidel	22
2.2.1 Βήματα επίλυσης με Gauss – Seidel	23
2.3 Ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson	24
2.3.1 Βήματα επίλυσης με Newton – Raphson.....	26

Κεφάλαιο 3	28
Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	28
3.1 Εισαγωγή στην Αξιοπιστία των ΣΗΕ	28
3.2 Επάρκεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	29
3.2.1 Μελέτη Επάρκειας ΣΗΕ	32
3.2.2 Δείκτες Επάρκειας ΣΗΕ	35
3.3 Ασφάλεια ΣΗΕ	39
3.4 Στατική Ασφάλεια ΣΗΕ	40
3.4.1 Ιεράρχηση Διαταραχών	41
Κεφάλαιο 4	44
Μελέτη Αξιοπιστίας	44
4.1 Εισαγωγή.....	44
4.2 Μεθοδολογία και Σύστημα Μελέτης	44
4.2.1 Το Σύστημα Μελέτης	45
4.2.2 Βασικές Παραδοχές Μελέτης	49
4.2.3 Ανάλυση Ασφάλειας	49
4.2.4 Αποτελέσματα Ανάλυσης Επάρκειας & Δείκτες Επάρκειας	54
Κεφάλαιο 5	66
Συμπεράσματα και Σχολιασμός	66
5.1 Γενικά Συμπεράσματα & Σχολιασμός	66
Βιβλιογραφία.....	68

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Το πρότυπο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της εργασίας	46
Εικόνα 2: Το πρότυπο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της εργασίας με εκτέλεση ροής φορτίου	48
Εικόνα 3: Επίλυση χωρίς την ΓΜ 2-3	57
Εικόνα 4: Η βλάβη #3 μετά την περικοπή φορτίου	57
Εικόνα 5: Επίλυση χωρίς τον Μ/Σ 5-6	58
Εικόνα 6: Η βλάβη #10 μετά την περικοπή φορτίου	59
Εικόνα 7: Επίλυση χωρίς την ΓΜ 1-5	60
Εικόνα 8: Η βλάβη #2 μετά την περικοπή φορτίου	60
Εικόνα 9: Επίλυση χωρίς την ΓΜ 1-5	61
Εικόνα 10: Η βλάβη #7 μετά την περικοπή φορτίου	62
Εικόνα 11: Επίλυση χωρίς την ΓΜ 1-2	63
Εικόνα 12: Η βλάβη #1 μετά την περικοπή φορτίου	64

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Δομή ενός ΣΗΕ [1].....	2
Σχήμα 2: Μονογραμμικό διάγραμμα ενός ΣΗΕ [1]	4
Σχήμα 3: Τομή σύγχρονης μηχανής [1]	7
Σχήμα 4: Ισοδύναμο κύκλωμα σε μία φάση [2].....	8
Σχήμα 5: Ρεύμα στάτη μετά από βραχυκύκλωμα [1]	9
Σχήμα 6: Ενεργός τιμή του ρεύματος($I_{\max}/\sqrt{2}$) [1].....	9
Σχήμα 7: Τα τρία επίπεδα βηματικής προσέγγισης [1].....	10
Σχήμα 8: Τρόποι σύνδεσης τυλιγμάτων για τριφασικούς μετασχηματιστές [1]	11
Σχήμα 9: Μονοφασικά ισοδύναμα [1]	12
Σχήμα 10: Ισοδύναμο κύκλωμα για Υ-Υ και Δ-Δ συνδεσμολογία [1].....	13
Σχήμα 11: Ισοδύναμο κύκλωμα για Υ-Δ και Δ-Υ συνδεσμολογία [1].....	13
Σχήμα 12: Πυλώνες μεταφοράς	14
Σχήμα 13: Παράδειγμα μορφής ζυγού σε ένα ΣΗΕ [4]	18
Σχήμα 14: Ισοδύναμη αναπαράσταση του ζυγού [4]	19
Σχήμα 15: Σύστημα n ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου [4].....	19
Σχήμα 16: Αξιοπιστία Συστήματος και Υποκατηγορίες.....	29
Σχήμα 17: Οι Ζώνες Λειτουργίας.....	30
Σχήμα 18: Επίπεδα Ιεραρχίας.....	31
Σχήμα 19: Ιεραρχικό Επίπεδο 1 (HL1)	32
Σχήμα 20: Ιεραρχικό Επίπεδο 2 (HL2)	33
Σχήμα 21: Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	40

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Βάσεις στο ανά μονάδα σύστημα [1]	5
Πίνακας 2: Λόγοι φασικών τάσεων πρωτεύοντος – δευτερεύοντος [1]	12
Πίνακας 3: Τύποι ζυγών για την λύση της ανάλυσης ροής φορτίου [4].....	21
Πίνακας 4: Τερματικές συνθήκες για τις γεννήτριες.....	46
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών του συστήματος	47
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά φορτίων του συστήματος	47
Πίνακας 7: Βασικές Παραδοχές.....	49
Πίνακας 8: Ανάλυση Ενδεχομένων μέσα από το PowerWorld.....	50
Πίνακας 9: Branches State στην απώλεια M/Σ 5-6	52
Πίνακας 10: Branches State στην απώλεια γραμμής 2-3.....	53
Πίνακας 11: Branches State στην απώλεια γραμμής 1-5.....	53
Πίνακας 12: Branches State στην απώλεια γραμμής 4-5.....	53
Πίνακας 13: Δείκτης ενεργού ισχύος (P_{IP}).....	54
Πίνακας 14: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ανάλυσης Αξιοπιστίας	65

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα **Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)** αναφέρεται σε ένα σύνολο εγκαταστάσεων που αποτελείται από γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς διακόπτες και άλλα. Αυτό το σύνολο εξυπηρετεί σε έναν σκοπό ο οποίος είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε ένα πλήθος καταναλωτών διασφαλίζοντας την υψηλότερη ποιότητα καθώς και το χαμηλότερο δυνατό κόστος [1].

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Για να μπορέσει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να διασφαλίσει την αξιοπιστία του, την ασφάλεια καθώς και την καλή ποιότητα ενέργειας που παράγει διαθέτει κάποια θεμελιώδη στοιχεία τα οποία είναι:

- **οι Σταθμοί Παραγωγής**, στους οποίους παράγεται η επαρκής ενέργεια που θέλουμε να διαθέσουμε στους καταναλωτές,
- **οι Γραμμές Μεταφοράς**, που μεταφέρουν την παραγόμενη ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής έως τα κέντρα κατανάλωσης,
- **το Δίκτυο Διανομής**, το οποίο διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια στον κάθε καταναλωτή.

Έτσι, για να μπορεί ένα σύστημα να λειτουργήσει όπως πρέπει αποτελείται από τρεις βασικές λειτουργίες, την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται στους σταθμούς παραγωγής. Αυτοί ανάλογα με την πηγή ενέργειας που εκμεταλλεύονται διαχωρίζονται σε Ατμοηλεκτρικούς (ΑΗΣ), υδροηλεκτρικούς (ΥΗΣ) και πυρηνικούς (ΠΣ). Σε μικρότερες ποσότητες, ωστόσο, η ηλεκτρική ενέργεια είναι δυνατόν να παραχθεί και από τον άνεμο, τη γεωθερμία ακόμα και από την ηλιακή ενέργεια.

Οι γραμμές μεταφοράς απαιτούνται για την κάλυψη της ανάγκης για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Οι γραμμές μεταφοράς μπορεί να είναι

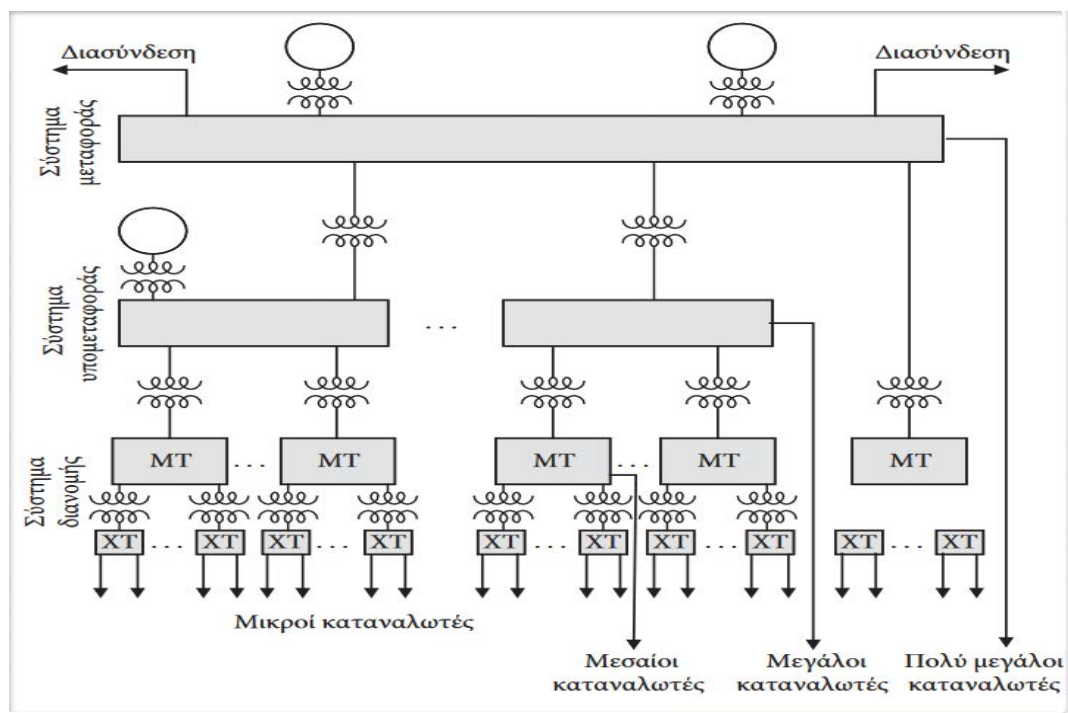
εναέρια ή και (λιγότερο συνηθισμένα) υπόγεια. Επίσης, μπορούν να έχουν διαφορετικά επίπεδα τάσεων που ανάλογα με αυτά έχουν και διαφορετικές χωρητικότητες.

Όσο αφορά την διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος, αυτή γίνεται με το δίκτυο διανομής το οποίο μπορεί να είναι μέσης αλλά και χαμηλής τάσης ώστε να έχει την ικανότητα να ικανοποιεί ακόμα και τον πιο απομονωμένο και απομακρυσμένο καταναλωτή [1].

1.2 Δομικά Συστατικά ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Κάθε Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας λόγω της διαφοράς που υπάρχει στο μέγεθος τους και τις ανάγκες που έχει να καλύψει το καθένα έχει διαφορετική δομή. Όμως, όλα τα ΣΗΕ έχουν πάντα κάποια κοινά χαρακτηριστικά έχουν πολλαπλά επίπεδα τάσης που χωρίζονται μεταξύ τους με τους **μετασχηματιστές**. Ανάλογα της τάσης λειτουργίας, οι μετασχηματιστές διαχωρίζουν το ΣΗΕ σε κάποια υποσυστήματα, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 1 και είναι:

- Σύστημα διανομής
- Σύστημα υπομεταφοράς
- Σύστημα μεταφοράς



Σχήμα 1: Δομή ενός ΣΗΕ [1]

Το σύστημα διανομής μπορεί να χρησιμοποιεί δύο κατηγορίες τάσεων διανομής, την πρωτεύουσα ή τάση τροφοδοσίας το οποίο ονομάζεται και μέση τάση (ΜΤ) και την δευτερεύουσα τάση ή τάση κατανάλωσης που ονομάζεται αλλιώς και χαμηλή τάση (ΧΤ). Έτσι στο σύστημα διανομής περιέχονται τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης, χαμηλής τάσης καθώς και οι μετασχηματιστές διανομής οι οποίοι υποβαθμίζουν την μέση τάση σε χαμηλή. Το σύστημα αυτό παραλαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής και την προσφέρει στους μεσαίους και μικρούς καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής είναι κυρίως υπόγεια αλλά υπάρχουν και κάποιες περιοχές στις οποίες είναι και εναέρια.

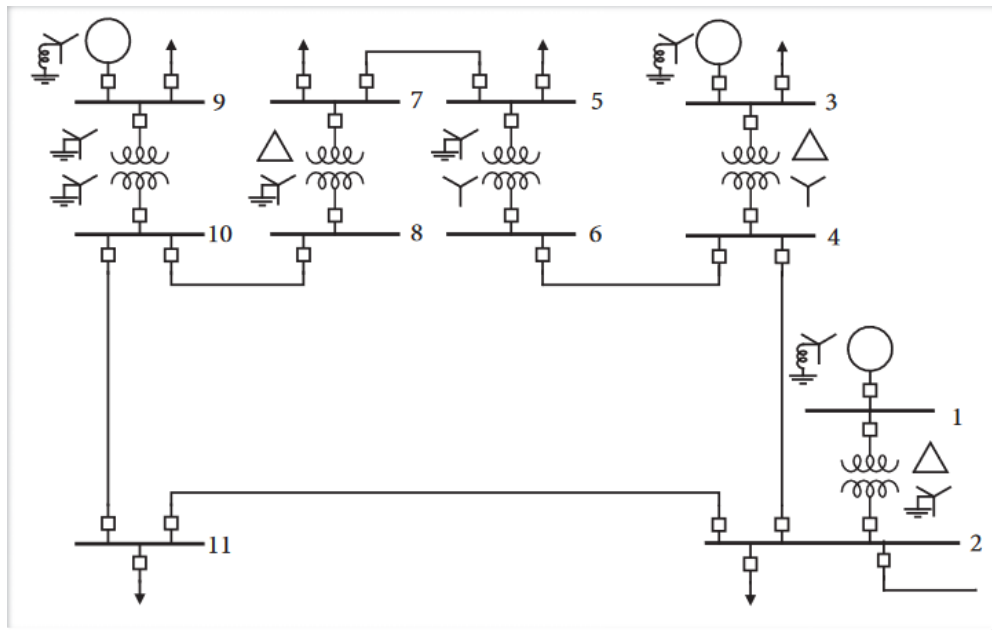
Το σύστημα υπομεταφοράς λαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια από σταθμούς παραγωγής ή ακόμα και από το σύστημα μεταφοράς με τη βοήθεια των υποσταθμών. Η ηλεκτρική ενέργεια προσφέρεται σε ένα πλήθος υποσταθμών διανομής -οι οποίοι βρίσκονται σε περιοχές που η τάση κυμαίνεται από 23kV έως 150kV- και σε κάποιους μεγάλους καταναλωτές. Η λειτουργία του είναι παρόμοια με το σύστημα διανομής με την κύρια διαφορά να είναι ότι η ενέργεια που διανέμει έχει υψηλότερη τάση και ισχύ και η εκτενέστερη γεωγραφική περιοχή την οποία καλύπτει το σύστημα υπομεταφοράς.

Το σύστημα μεταφοράς λαμβάνει την ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από τους σταθμούς παραγωγής διαμέσου των μετασχηματιστών ανύψωσης τάσης και μπορεί να την διαθέσει απευθείας σε πολύ μεγάλους καταναλωτές. Συνδέει τους σταθμούς παραγωγής με όλα τα σημεία υψηλής κατανάλωσης και μέσω των διασυνδεδετικών γραμμών μπορεί να ενώνει ένα ενεργειακό σύστημα με άλλα κοντινά συστήματα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χάρη στην ικανότητά του να διαχειρίζεται μεγάλες ποσότητες ισχύος [1].

1.3 Αναπαράσταση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας εξαιτίας του αυξημένου αριθμού συνιστωσών (πχ γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς, μετασχηματιστές, φορτία), των πολλών διαφορετικών επιπέδων λόγω διαφοράς τάσης αλλά και λόγω της τριφασικής φύσης τους, παρουσιάζουν κάποιες δυσκολίες στην αναπαράσταση της λειτουργίας τους. Αυτό το πρόβλημα λύνεται με την χρήση του μονογραμμικού διαγράμματος ενός ΣΗΕ, όπως στο Σχήμα 2. Σε αυτό, με

μία γραμμή αποτυπώνεται η μορφή του συστήματος καθώς και κάθε συνιστώσα και επιπλέον στοιχείο που μπορεί να υπάρχει με συγκεκριμένα σύμβολα.



Σχήμα 2: Μονογραμμικό διάγραμμα ενός ΣΗΕ [1]

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύπλοκα συστήματα όπως είδαμε και περιέχουν πολλές λεπτομέρειες και στοιχεία που μπορεί να δυσκολέψουν τους υπολογισμούς πάνω σε αυτά. Για την απλοποίηση των υπολογισμών αυτών χρησιμοποιείται η μέθοδος του ανά μονάδα σύστημα. Με την χρήση του ανά μονάδα συστήματος μεταφέρουμε με την βοήθεια μιας παραμέτρου (σχετική τιμή) όλες τις τιμές τάσης, ισχύος, ρεύματος, αντιστάσεων κ.λπ. σε κάποιες τιμές που έχουν μικρό εύρος και έτσι διευκολύνονται οι πράξεις που πρέπει να γίνουν είτε με το χέρι αλλά και με υπολογιστή. Επίσης, με το σύστημα αυτό γίνεται πιο εύκολα ο εντοπισμός λαθών και οι τάσεις (φασικές-πολικές, μονοφασικές-τριφασικές) είναι πιο δύσκολο να μπερδευτούν. Ωστόσο, το ανά μονάδα σύστημα φέρνει μαζί του και κάποιες αδυναμίες. Αυτές είναι ότι χάνονται ενίοτε κάποιες φασικές μετατοπίσεις που συμβαίνουν στα κανονικά κυκλώματα και υπάρχουν τροποποιήσεις μερικές φορές στις εξισώσεις λόγω εμφάνισης ή απόκρυψης κάποιων παραγόντων ($\sqrt{3}$, 3).

Μία τιμή σε ανά μονάδα σύστημα γίνεται με την βοήθεια μίας επιλεγμένης τιμής βάσης ($|X_{pu}|$).

$$\text{Ανά μονάδα τιμή} = \frac{\text{Πραγματική Τιμή}}{\text{Τιμή Βάσης}} \quad \text{ή} \quad X_{pu} = \frac{X}{|X_b|}$$

Για να μπορούμε να υπολογίσουμε τις βάσεις των τεσσάρων βασικών μεγεθών (S, V, Z, I) που χρειαζόμαστε στα ΣΗΕ, χρειάζεται απλά να γνωρίζουμε δύο από αυτά αφού συνδέονται μεταξύ τους όπως ακριβώς συνδέονται και με πραγματικές τιμές. Έτσι αυτά υπολογίζονται ως εξής:

$$\text{Για την τάση: } |V_b| = |Z_b| * |I_b|, \text{ οπότε } V_{pu} = \frac{V}{|V_b|} = \frac{Z}{|Z_b|} * \frac{I}{|I_b|} = Z_{pu} * I_{pu}$$

$$\text{Ομοίως για την ισχύ: } |S_b| = |V_b| * |I_b|, \text{ οπότε } S_{pu} = \frac{S}{|S_b|} = \frac{V}{|V_b|} * \frac{I^*}{|I_b|} = V_{pu} * I_{pu}^*$$

$$\text{Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε και τα υπόλοιπα: } Z_{pu} = \frac{Z}{|Z_b|} = \frac{R+jX}{|Z_b|} = \frac{R}{|Z_b|} + j \frac{X}{|Z_b|} = R_{pu} + jX_{pu}$$

$$\text{Και όπως και με τις πραγματικές τιμές: } S_{pu} = \frac{S}{|S_b|} = \frac{P+jQ}{|S_b|} = \frac{P}{|S_b|} + j \frac{Q}{|S_b|} = P_{pu} + jQ_{pu}$$

Για τις βάσεις των μεγεθών αυτών και την κατανόηση της διαφοράς μεταξύ τους στο μονοφασικό και το τριφασικό σύστημα φαίνεται στον Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Βάσεις στο ανά μονάδα σύστημα [1]

Ποσότητα	Μονοφασικό σύστημα	Τριφασικό σύστημα	Τριφασικό σύστημα που αναλύεται ανά φάση
Τάση	$ V_b _{1\phi}$	$ V_b _{3\phi}$	$ V_b _{1\phi} = \frac{ V_b _{3\phi}}{\sqrt{3}}$
Ισχύς	$ S_b _{1\phi}$	$ S_b _{3\phi}$	$ S_b _{1\phi} = \frac{ S_b _{3\phi}}{3}$
Ρεύμα	$ I_b _{1\phi} = \frac{ S_b _{1\phi}}{ V_b _{1\phi}}$	Πολικό: $ I_b _{3\phi} = \frac{ S_b _{3\phi}}{\sqrt{3} V_b _{3\phi}}$ Φασικό Υ συνδεσμολ.: $ I_b^Y _{3\phi} = I_b _{3\phi}$ Φασικό Δ συνδεσμολ.: $ I_b^\Delta _{3\phi} = \frac{ I_b _{3\phi}}{\sqrt{3}}$	$ I_b _{1\phi} = I_b _{3\phi}$ $= I_b^Y _{3\phi}$ $= \sqrt{3} I_b^\Delta _{3\phi}$
Αντίσταση	$ Z_b _{1\phi} = \frac{ V_b _{1\phi}^2}{ S_b _{1\phi}}$	Υ φορτίο: $ Z_b^Y _{3\phi} = \frac{ V_b _{3\phi}^2}{ S_b _{3\phi}}$ Δ φορτίο: $ Z_b^\Delta _{3\phi} = 3 Z_b^Y _{3\phi}$	$ Z_b _{1\phi} = Z_b^Y _{3\phi}$ $= \frac{ Z_b^\Delta _{3\phi}}{3}$

Πολλές φορές χρειάζεται να αλλάξουμε την βάση μίας αντίστασης σε ένα άλλο σύστημα βάσεων. Γι' αυτό χρησιμοποιούμε αυτούς τους τύπους [1]:

$$Z = Z_{pu}^{new} * |Z_{pu}^{new}| = Z_{pu}^{old} * |Z_{pu}^{old}|,$$

$$\text{άρα } Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} * \frac{|Zb(old)|}{|Zb(new)|} = Z_{pu}^{old} * \left(\frac{|Vb(old)|}{|Vb(new)|} \right)^2 * \frac{|Sb(new)|}{|Sb(old)|}$$

1.4 Συνιστώσες των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα σύγχρονο ΣΗΕ έχει κάποιες συνιστώσες που αποτελούν τα βασικά στοιχεία του, όπως η σύγχρονη γεννήτρια (σύγχρονη μηχανή), ο μετασχηματιστής ισχύος και οι γραμμές μεταφοράς.

1.4.1 Η Σύγχρονη Γεννήτρια

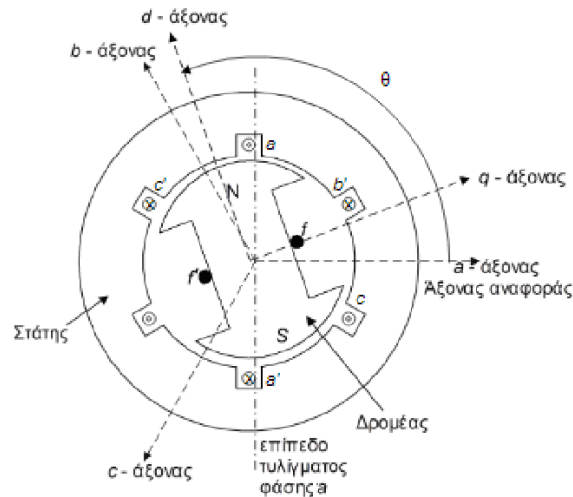
Η σύγχρονη γεννήτρια απαρτίζεται από δύο κύρια μέρη: τον **στάτη** και τον **δρομέα**. Ο στάτης είναι το σταθερό τμήμα της γεννήτριας, το οποίο περιλαμβάνει το τύλιγμα που παράγει την έξοδο της ηλεκτρικής ισχύος. Ο δρομέας ο οποίος περιστρέφεται από στρόβιλο, δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο που είναι απαραίτητο για την επαγωγή τάσης στον στάτη.

Ο **στάτης** έχει κοίλη κυλινδρική μορφή και είναι κατασκευασμένος από υλικό με σιδηρομαγνητικές ιδιότητες. Στο εσωτερικό του διαθέτει αυλακώσεις που εξυπηρετούν στην τοποθέτηση τυλιγμάτων του στάτη. Ο πυρήνας μπορεί να είναι κυλινδρικός ή να περιλαμβάνει μαγνητικούς πόλους που προεξέχουν. Σε τριφασικό σύστημα έχουμε τυλίγματα για κάθε φάση (a, b, c) και κάθε τύλιγμα τοποθετείται συμμετρικά μέσα στις αυλακώσεις ώστε να απέχουν μεταξύ τους 120°. Ο στάτης έχει τρεις άξονες (έναν για κάθε φάση: a, b, c) και ο καθένας είναι κάθετος στο αντίστοιχο τύλιγμα του (άξονας a-κάθετος στο τύλιγμα a κ.ο.κ). Ο άξονας του a θεωρείται πάντα ως άξονας αναφοράς.

Το κινητό τμήμα της μηχανής περιέχει τον πυρήνα του **δρομέα**, ο οποίος είναι και αυτός κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό αλλά διαφέρει στη συμπαγή κατασκευή του. Είναι περιστρεφόμενο μέσα στον στάτη. Στο εσωτερικό του, ο δρομέας διαθέτει αυλακώσεις για την τοποθέτηση των τυλιγμάτων ή μαγνητικούς πόλους που προεξέχουν. Τα τυλίγματα του δρομέα, γνωστά και ως τυλίγματα πεδίου, δημιουργούν ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο και τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος, τη διεγέρτρια. Αυτή τοποθετείται συνήθως στον ίδιο άξονα με το τύλιγμα ή συνδέεται με αυτό μέσω των ψυχτρών. Ο κυλινδρικός δρομέας χρησιμοποιείται κυρίως σε γεννήτριες υψηλών ταχυτήτων που περιστρέφονται γύρω από τον οριζόντιο άξονα. Αντίθετα, οι δρομείς με

προεξέχοντες μαγνητικούς πόλους προτιμώνται για γεννήτριες χαμηλών ταχυτήτων που περιστρέφονται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα.

Στο Σχήμα 3 φαίνεται η τομή μιας σύγχρονης μηχανής.



Σχήμα 3: Τομή σύγχρονης μηχανής [1]

Ο στάτης και ο δρομέας έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ο σχηματισμός μιας τριφασικής τάσης στην έξοδο. Αυτό γίνεται όταν ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, δίνοντας τάση στα τρία τυλίγματα του στάτη. Οι παραγόμενες τάσεις έχουν το ίδιο μέτρο και συχνότητα, ενώ η φάση τους διαφέρει κατά 120° μεταξύ τους. Αυτή η διάταξη διασφαλίζει τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα της τριφασικής γεννήτριας.

Οι σύγχρονες γεννήτριες ονομάζονται «σύγχρονες» επειδή η συχνότητα της τάσης τους είναι ακριβώς συγχρονισμένη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου. Ο δρομέας τους, ο οποίος είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης, περιστρέφεται με την ίδια κατεύθυνση όπως και το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί. Η σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής συχνότητας του στάτη και της ταχύτητας περιστροφής του μαγνητικού πεδίου είναι:

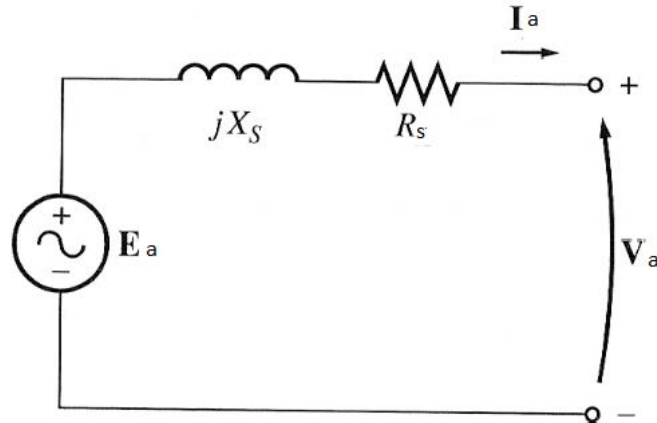
$$f_e = \frac{n_p \cdot P}{120}$$

f_e : Η ηλεκτρική συχνότητα (Hz),

n_p : Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σε στροφές ανά λεπτό (rpm),

P: Ο αριθμός των πόλων του δρομέα.

Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται το ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα μίας σύγχρονης γεννήτριας:



Σχήμα 4: Ισοδύναμο κύκλωμα σε μία φάση [2]

Από το σχήμα μπορούμε να υπολογίσουμε:

$$E_a = V_a + jX_s * I_a + R_s * I_a$$

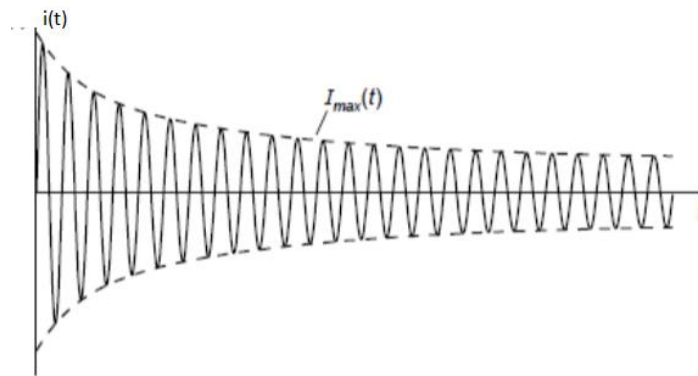
Μπορούμε να πούμε, λοιπόν, πως η μιγαδική ισχύς της γεννήτριας ανά φάση θα είναι:

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

Όταν η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια τα P_G και Q_G είναι θετικά γιατί το I_a είναι θετικό όταν εξέρχεται από την μηχανή.

Η απλούστερη μορφή λειτουργίας της μηχανής είναι στην μόνιμη λειτουργία, η οποία είναι όταν λειτουργεί χωρίς φορτίο και σε αυτήν την λειτουργία έχει μηδενικά ρεύματα στάτη, σταθερό ρεύμα διέγερσης και σταθερή ταχύτητα. Η μόνιμη λειτουργία εφαρμόζεται συνήθως στην μηχανή αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις σφαλμάτων που πρέπει να λειτουργεί υπό συνθήκες **μεταβατικής κατάστασης**, αυτό όμως δεν αλλάζει το ότι συνεχίζει να έχει ημιτονοειδή μορφή, απλά με μεταβατικό χαρακτήρα.

Το ρεύμα του στάτη της γεννήτριας μετά από ένα βραχυκύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 5:

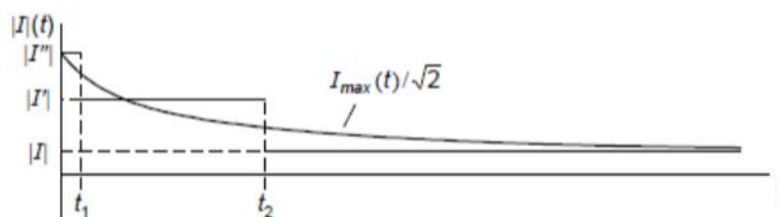


Σχήμα 5: Ρεύμα στάτη μετά από βραχυκύκλωμα [1]

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος δεν είναι σταθερή και φθίνει εκθετικά, ενώ συνεχίζει να έχει την ημιτονοειδή του μορφή. Για την ανάλυση της συμπεριφοράς αυτής στη μεταβατική περίοδο, θα πρέπει να θεωρηθεί ότι είτε η τάση της πηγής (E) είτε η σύνθετη αντίσταση (Z) του συστήματος μεταβάλλονται σε σχέση με το χρόνο.

Για απλούστευση, γίνεται η παραδοχή ότι η εσωτερική ΗΕΔ της γεννήτριας ($|E|$) παραμένει σταθερή. Συνεπώς, η φθίνουσα συμπεριφορά του ρεύματος εξηγείται από τη μεταβολή της αντίστασης του συστήματος. Η μεταβολή αυτή δεν οφείλεται στο σταθερό δίκτυο, αλλά δυναμική συμπεριφορά της ίδιας της σύγχρονης γεννήτριας, της οποίας η εσωτερική αντίδραση μεταβάλλεται σε τρία διακριτά στάδια.

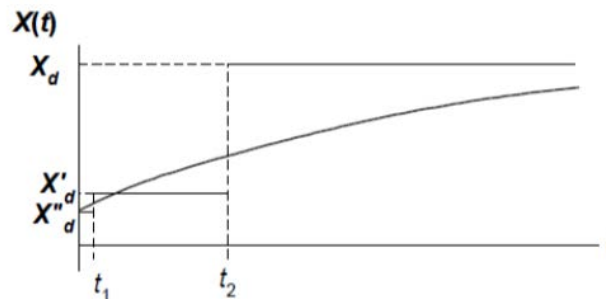
Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα να προσεγγίζεται σε τρία διαφορετικά επίπεδα: το **υπομεταβατικό** ($|I''|$), το **μεταβατικό** ($|I'|$), και το **ρεύμα μόνιμης κατάστασης** ($|I|$), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Ενεργός τιμή του ρεύματος ($I_{max}/\sqrt{2}$) [1]

Οι χρονικές περίοδοι που αντιστοιχούν σε αυτά τα επίπεδα η υπομεταβατική (0 - 0.1 sec), η μεταβατική (0.1 sec - 6 sec) και η περίοδος μόνιμης κατάστασης (>6 sec). Έτσι και οι αντίστοιχες αντιδράσεις είναι οι εξής (Σχήμα 7) [1][2]:

- Η υπομεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα: $X_d'' = \frac{|E|}{|I''|}$
- Η μεταβατική αντίδραση ευθέος άξονα: $X_d' = \frac{|E|}{|I'|}$
- Η σύγχρονη αντίδραση ευθέος άξονα: $X_d = \frac{|E|}{|I|}$



Σχήμα 7: Τα τρία επίπεδα βηματικής προσέγγισης [1]

1.4.2 Ο Μετασχηματιστής

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν τμήματα με διαφορετικά επίπεδα τάσης το καθένα. Για να μπορούμε να συνδέουμε αυτά τα τμήματα -ώστε να γίνεται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το ένα τμήμα στο άλλο- χρειαζόμαστε τους **μετασχηματιστές**. Οι μετασχηματιστές που κάνουν αυτή τη δουλειά της σύνδεσης των τμημάτων με διαφορετική τάση ονομάζονται **μετασχηματιστές ισχύος**, ενώ υπάρχει και ένας άλλος τύπος, οι **μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης**, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν την τάση ή τη ροή ισχύος του ΣΗΕ.

Όσο αφορά τους μετασχηματιστές ισχύος, αυτοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Τους μετασχηματιστές γεννήτριας: χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης από επίπεδο της γεννήτριας στο επίπεδο της μεταφοράς (έως 1000 MVA),
- τους μετασχηματιστές μεταφοράς: χρησιμοποιούνται στο επίπεδο της μεταφοράς για να μετασχηματίζουν την ισχύ μεταξύ των διαφορετικών επιπέδων τάσης (έως 1000 MVA),
- και τους μετασχηματιστές διανομής: χρησιμοποιούνται για την μείωση της τάσης σε χαμηλά επίπεδα (συνήθως τους καταναλωτές) (για λίγα kVA).

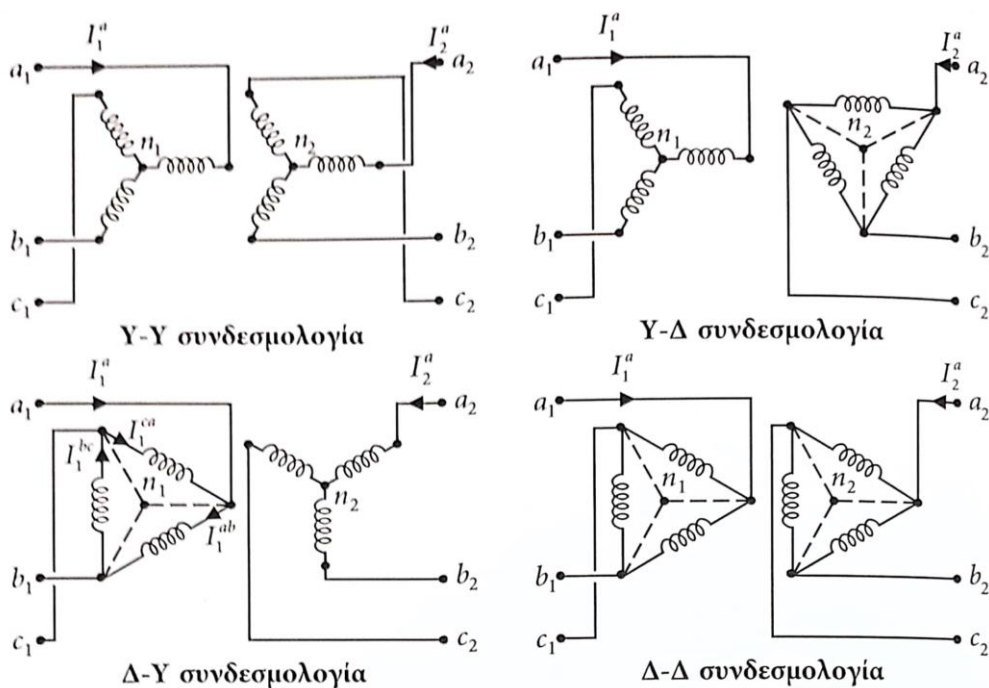
Οι διατάξεις των μετασχηματιστών είναι δύο ειδών. Είτε με την χρήση τριών μονοφασικών μετασχηματιστών είτε με ένα σύσσωμο τριφασικό σύστημα που εξυπηρετεί και τις τρεις

φάσεις. Η διαφορά στην χρησιμοποίησή τους είναι το επίπεδο τάσης και ισχύος που χρειαζόμαστε σε κάθε περίπτωση.

Οι πιθανές συνδεσμολογίες για τα τυλίγματα των τριφασικών μετασχηματιστών είναι:

- ✓ **Συνδεσμολογία Υ-Υ:** (αστέρα-αστέρα), συνήθως χρησιμοποιούνται για μετασχηματιστές μεταφοράς,
- ✓ **συνδεσμολογία Υ-Δ:** (αστέρα-τρίγωνο), συνήθως χρησιμοποιούνται για μετασχηματιστές διανομής,
- ✓ **συνδεσμολογία Δ-Υ:** (τρίγωνο-αστέρα), συνήθως χρησιμοποιούνται για μετασχηματιστές γεννητριών,
- ✓ **συνδεσμολογία Δ-Δ:** (τρίγωνο-τρίγωνο).

Στο Σχήμα 8 φαίνονται οι τέσσερις πιθανοί τρόποι σύνδεσης των τυλιγμάτων των τριφασικών μετασχηματιστών:



Σχήμα 8: Τρόποι σύνδεσης τυλιγμάτων για τριφασικούς μετασχηματιστές [1]

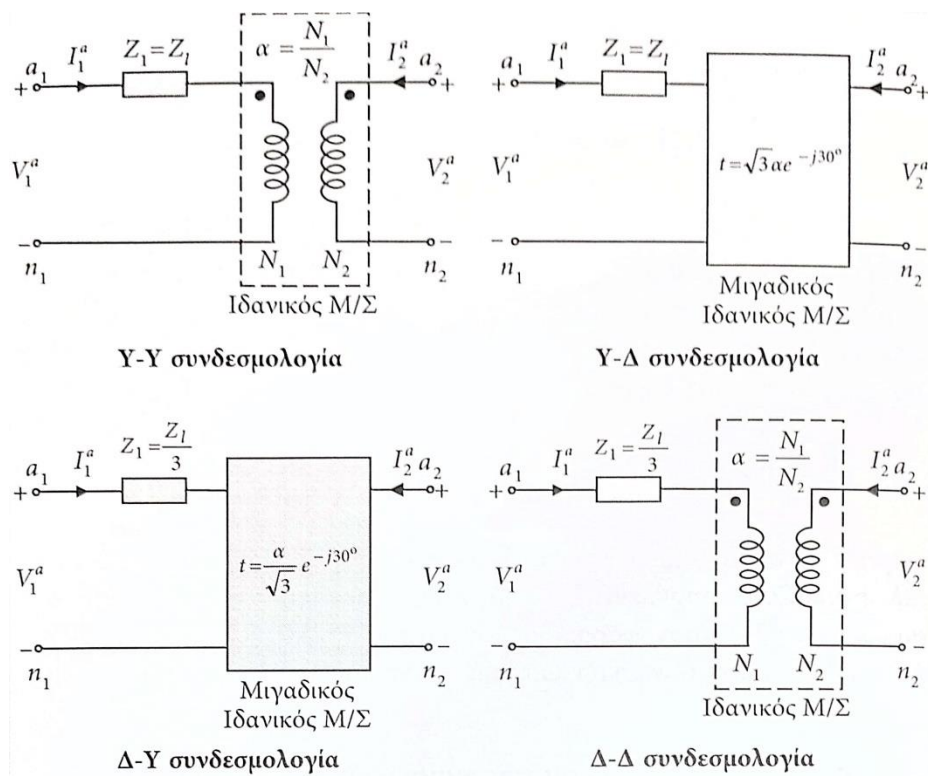
Για να μπορέσουμε να αναλύσουμε τις συνδεσμολογίες αυτές πρέπει να τις μετατρέψουμε σε μονοφασικά ισοδύναμα. Τα μονοφασικά ισοδύναμα χρησιμοποιούν φασικές τάσεις και ρεύματα, άρα για να το καταφέρουμε αυτό πρέπει να μετατρέψουμε τις συνδεσμολογίες σε Υ-Υ συνδεσμολογία. Διαλέγουμε την φάση a για να γίνει ανάλυση και έτσι προκύπτει

όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 παρακάτω οι εξής λόγοι των φασικών τάσεων V_1^a/V_2^a που βοηθάνε στην μετατροπή σε Υ-Υ συνδεσμολογία.

Πίνακας 2: Λόγοι φασικών τάσεων πρωτεύοντος – δευτερεύοντος [1]

Συνδεσμολογία μετασχηματιστή	$t = V_1^a / V_2^a$
Υ-Υ	$N_1 : N_2 = a$
Υ-Δ	$(N_1 : N_2 / \sqrt{3}) e^{-j30^\circ} = \sqrt{3} a e^{-j30^\circ}$
Δ-Υ	$(N_1 / \sqrt{3} : N_2) e^{-j30^\circ} = \frac{a}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ}$
Δ-Δ	$(N_1 / \sqrt{3} : N_2 / \sqrt{3}) = a$

Τα μονογραμμικά ισοδύναμα των τριφασικών μετασχηματιστών για τις τέσσερις συνδεσμολογίες γίνονται όπως φαίνονται στο Σχήμα 9:

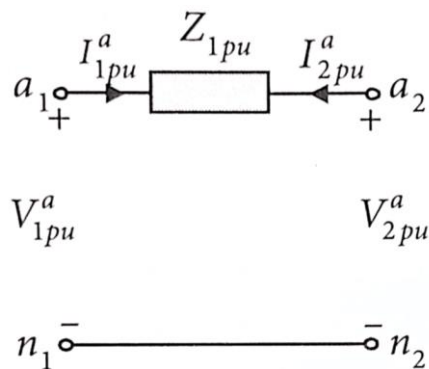


Σχήμα 9: Μονοφασικά ισοδύναμα [1]

Για να γίνει η ανάλυση χρησιμοποιούμε την ίδια βάση ισχύος και στις δύο μεριές των μετασχηματιστών ($|S_b|_{1\phi}$). Για τις βάσεις δεν ισχύει το ίδιο και αυτές πρέπει να έχουν λόγο:

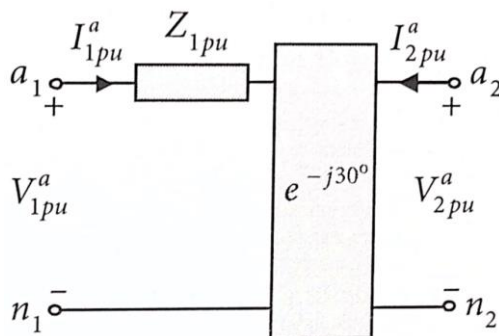
$$\frac{|V_{b1}|_{1\phi}}{|V_{b2}|_{1\phi}} = \begin{cases} a & \text{για τις Υ-Υ και Δ-Δ συνδεσμολογίες} \\ \sqrt{3}a & \text{για τη Υ-Δ συνδεσμολογία} \\ a/\sqrt{3} & \text{για τη Δ-Υ συνδεσμολογία} \end{cases}$$

Έτσι, τα ανά μονάδα μονοφασικά ισοδύναμα των τριφασικών μετασχηματιστών που μας βοηθούν την ανάλυση γίνονται για τις Υ-Υ και Δ-Δ συνδεσμολογίες όπως στο Σχήμα 10:



Σχήμα 10: Ισοδύναμο κύκλωμα για Υ-Υ και Δ-Δ συνδεσμολογία [1]

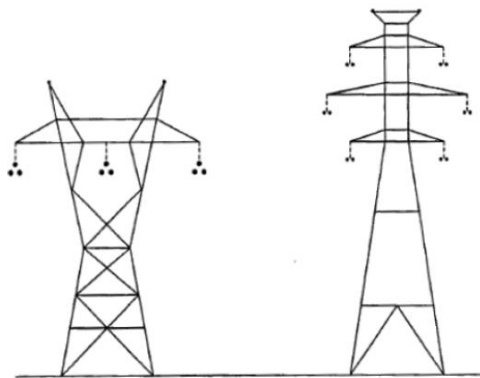
Ενώ για τις Υ-Δ και Δ-Υ συνδεσμολογίες αντίστοιχα γίνονται όπως στο Σχήμα 11 [1]:



Σχήμα 11: Ισοδύναμο κύκλωμα για Υ-Δ και Δ-Υ συνδεσμολογία [1]

1.4.3 Η Γραμμή Μεταφοράς

Οι **γραμμές μεταφοράς** είναι πολύ σημαντικές για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. κύριος σκοπός της είναι η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τα κέντρα κατανάλωσης, διασφαλίζοντας τις ελάχιστες δυνατές απώλειες ενέργειας, ακόμα και σε μεγάλες αποστάσεις. Βρίσκονται πάνω σε πυλώνες μεταφοράς οι οποίοι μπορεί να φέρουν ένα ή δύο κυκλώματα και διακρίνονται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Πυλώνες μεταφοράς

Το αλουμίνιο αποτελεί το κύριο υλικό κατασκευής των αγωγών. Ο λόγος είναι ότι το αλουμίνιο είναι αρκετά οικονομικό σε σχέση με τις εναλλακτικές και οι αγωγοί που κατασκευάζονται από αυτό είναι πιο ελαφριοί και έχουν καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι τύποι αγωγών από αλουμίνιο είναι είτε αγωγοί εξ ολοκλήρου από αλουμίνιο ή κράματα αυτού είτε αλουμινίου που έχουν ενισχυθεί με χάλυβα ή επιπλέον κράματα.

Η τιμή αντίστασης της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_{dc} = \rho * \frac{l}{A} \text{ (}\Omega\text{)},$$

με A = διατομή του αγωγού (mm^2),

ρ = ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$),

l = μήκος του αγωγού (m).

Η ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\rho_2 = \rho_1 * \frac{T_0 + T_2}{T_0 + T_1},$$

όπου ρ_1 και ρ_2 είναι ειδικές αντιστάσεις στις θερμοκρασίες T_1 και T_2 και το T_0 είναι μία σταθερά για το αλουμίνιο.

Όταν το ρεύμα που υπάρχει είναι συνεχές κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη τη διατομή ενός αγωγού. Όταν όμως το ρεύμα είναι εναλλασσόμενο, παρατηρείται αύξηση στην αντίσταση του αγωγού.

Η εν σειρά επαγωγή αποτελεί μια σημαντική παράμετρο που καθορίζει την τάση που δημιουργείται στους αγωγούς εξαιτίας των μαγνητικών πεδίων που προκαλούνται από τη ροή του μεταβαλλόμενου ρεύματος. Εάν υπάρχουν πολλοί αγωγοί στον ίδιο χώρο, καθένας από αυτούς παράγει το δικό του μαγνητικό πεδίο. Αυτά τα πεδία αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους, δημιουργώντας μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή που οδηγεί στην εμφάνιση εξωτερικών επαγόμενων τάσεων. Το μέγεθος αυτών των τάσεων εξαρτάται από τις επαγωγικές ιδιότητες των αγωγών. Η επαγωγή είναι καθοριστική για τη γραμμή μεταφοράς, γιατί επηρεάζει τη ικανότητα της να μεταφέρει ενέργεια με τον βέλτιστο τρόπο [1].

1..4.3.1 Χωρητικότητα γραμμής

Η χωρητικότητα μιας γραμμής μεταφοράς παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία της, καθώς συνδέεται με τη δυνατότητά της να αποθηκεύει και να μεταφέρει ηλεκτρικό φορτίο. Η χωρητικότητα εξαρτάται από το μήκος των αγωγών, την απόσταση μεταξύ τους, καθώς και την τάση της γραμμής. Σε γραμμές μικρού μήκους και χαμηλής τάσης, η επίδραση της χωρητικότητας είναι αμελητέα, ενώ σε γραμμές που έχουν μικρού μήκους καλώδια αλλά έχουν υψηλή τάση, οι επιδράσεις της γίνονται ιδιαίτερα σημαντικές. Επιπλέον, η χωρητικότητα επηρεάζεται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των αγωγών, το οποίο καθορίζει τη ροή του ρεύματος και τις τάσεις που αναπτύσσονται. Ο τρόπος φόρτισης τους είναι παρόμοιος με τον τρόπο που φορτίζονται οι οπλισμοί ενός πυκνωτή με διαφορά δυναμικού. Αυτές οι παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη και τη σχεδίαση των γραμμών μεταφοράς γιατί επηρεάζουν την απόδοσή τους, ειδικά όταν οι απαιτήσεις του φορτίου είναι υψηλές ή όταν υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους [1].

1.4.4 Τα Φορτία

Τα φορτία ενός ΣΗΕ μπορούν κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το είδος, τη χρήση τους και τις απαιτήσεις των καταναλωτών. Οι κατηγορίες περιλαμβάνουν τέσσερις καταναλωτές οι οποίοι είναι: οι βιομηχανικοί, οι οικιακοί, οι εμπορικοί και αγροτικοί. Κάθε κατηγορία φορτίου παρουσιάζει χαρακτηριστικά, όπως η ενεργή, άεργη και φαινόμενη ισχύς, αλλά και η μεταβλητότητα στη συμπεριφορά τους, η οποία εξαρτάται από την ώρα της ημέρας ή την εποχή. Επιπλέον, τα φορτία επηρεάζουν σημαντικά το σύστημα, καθώς επηρεάζουν τη ροή ισχύος, τη σταθερότητα τάσης και τη συνολική αξιοπιστία του δικτύου, ενώ απαιτούν τη διασφάλιση επαρκούς χωρητικότητας στις γραμμές μεταφοράς και διανομής για την κάλυψη των αναγκών τους. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι υπάρχει συμμετρία. Στους τριφασικούς μεγάλους κινητήρες, η συμμετρία γίνεται αυτόματα, ενώ στα μονοφασικά φορτία χρειάζεται ειδική κατανομή των φορτίων στο δίκτυο διανομής, ώστε να μοιράζονται και στις τρεις φάσεις [1].

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση Ροής Φορτίου

Η **ανάλυση ροής φορτίου** αποτελεί μια από τις βασικότερες διαδικασίες στη μελέτη και λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Αφορά τη μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος όταν βρίσκεται στη μόνιμη λειτουργία, προσδιορίζοντας σημαντικές μεταβλητές, όπως οι **τάσεις που υπάρχουν στους ζυγούς, οι ροές ισχύος στις γραμμές και στους μετασχηματιστές**. Το μαθηματικό πρόβλημα της ανάλυσης ροής φορτίου βασίζεται στην επίλυση συστημάτων μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων, χωρίς να εμπλέκονται διαφορικές εξισώσεις. Αυτή η διαδικασία έχει καθοριστικό ρόλο, καθώς διευκολύνει τον σχεδιασμό, την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός ΣΗΕ.

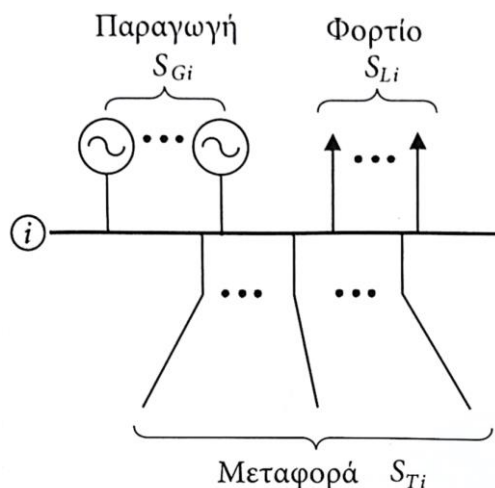
Η ανάλυση ροής φορτίου προσφέρει πληροφορίες για την αποδοτικότητα του συστήματος και τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να δώσουν λύσεις για διάφορες ανάγκες του συστήματος. Δηλαδή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη επεκτάσεων ή αλλαγών στο σύστημα, όπως η προσθήκη νέων μονάδων παραγωγής, γραμμών μεταφοράς ή φορτίων, επιτρέποντας την αξιολόγηση των επιπτώσεών τους και την επιλογή αποδοτικότερων λύσεων. Μπορεί, επίσης, να μας βοηθήσει στο να μελετήσουμε τις διαταραχές και τις και τις επιπτώσεις τους, συγκρίνοντας την κατάσταση του συστήματος πριν και μετά από αυτές, ενώ υποστηρίζει τον προγραμματισμό της κατανομής του φορτίου, ώστε η απόδοση του να βελτιωθεί. Πολλές φορές τα συστήματα παρουσιάζουν απώλειες μονάδων παραγωγής ή γραμμών μεταφοράς ή συμβαίνουν κάποια βραχυκυκλώματα. Σε αυτά, η ανάλυση ροής φορτίου μας προετοιμάζει ώστε να τα αντιμετωπίσουμε όσο γρηγορότερα γίνεται ή να θέσουμε το σύστημα σε λειτουργία για όσο συμβαίνουν αυτά τα προβλήματα.

Ένα πρόγραμμα ανάλυσης ροής φορτίου για να είναι αποτελεσματικό πρέπει να μπορεί να φέρει εις πέρας δύο «εμπόδια»:

- Την μαθηματική περιγραφή του προβλήματος κατά την οποία κατασκευάζονται οι εξισώσεις κόμβων,
- και την εφαρμογή μιας αριθμητικής μεθόδου για να λύνει τις εξισώσεις που εμφανίζονται κατά την μαθηματική περιγραφή του προβλήματος [3][4][5].

2.1 Εξισώσεις Ροής Φορτίου

Για να γίνει η κατασκευή των εξισώσεων ροής φορτίων χρησιμοποιούνται τα μονοφασικά ισοδύναμα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι στις εξισώσεις, οι ποσότητες που αναφέρονται είναι ανά φάση (φασικές τάσεις και μονοφασικές ισχύες). Στο Σχήμα 13 φαίνεται ο ι ζυγός από ένα σύστημα η ζυγών, στον οποίο είναι συνδεδεμένες γεννήτριες που τον τροφοδοτούν μιγαδική ισχύ (S_{Gi}), φορτία που καταναλώνουν μιγαδική ισχύ (S_{Li}) και οι γραμμές μεταφοράς που μεταφέρουν μιγαδική ισχύ (S_{Ti}).

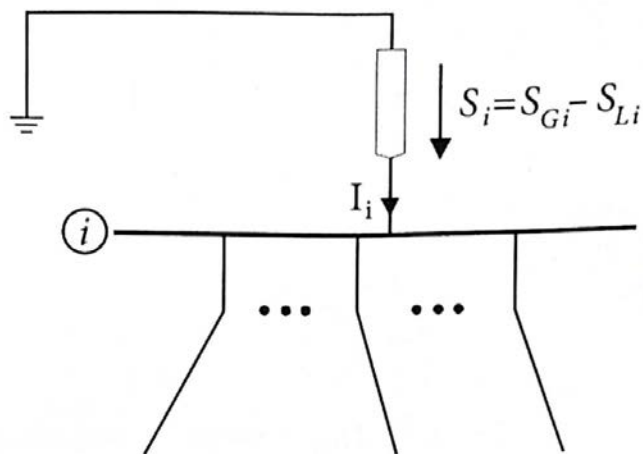


Σχήμα 13: Παράδειγμα μορφής ζυγού σε ένα ΣΗΕ [4]

Οι ισχύες των στοιχείων αυτών συνδέονται με τη σχέση:

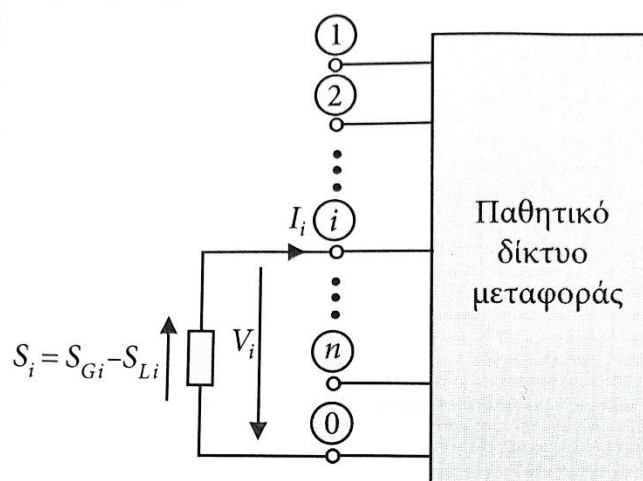
$$S_{Gi} = S_{Li} + S_{Ti}$$

Μια ισοδύναμη αναπαράσταση του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 14. Η τιμή του S_i ορίζεται ως η **καθαρή ισχύς** που υπάρχει στον ζυγό και προκύπτει από τη διαφορά ανάμεσα στην ισχύ που παράγεται από τις γεννήτριες και στην ισχύ που καταναλώνεται από το φορτίο. Η συγκεκριμένη παρέχεται από μια ισοδύναμη πηγή ενέργειας.



Σχήμα 14: Ισοδύναμη αναπαράσταση του ζυγού [4]

Με τη βοήθεια αυτής της ισοδυναμίας μπορούμε να εκφράσουμε όλο το ΣΗΕ με n ζυγούς όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 15. Σε κάθε ζυγό αντιστοιχεί ένας ακροδέκτης ο οποίος αντικαθιστά το παθητικό τμήμα του συστήματος (δηλαδή τις γραμμές μεταφοράς και τα φορτία). Η σχέση που παραλαμβάνει και το ρεύμα που εγχέεται είναι $S_i = S_{Gi} - S_{Li}$.



Σχήμα 15: Σύστημα n ζυγών για ανάλυση ροής φορτίου [4]

Με την βοήθεια της μεθόδου των κόμβων, διαμορφώνονται οι παρακάτω εξισώσεις που περιγράφουν το δίκτυο:

$$I_{bus} = Y_{bus} * V_{bus}$$

Δηλαδή:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \vdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \vdots & Y_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

με I_{bus} να είναι το διάνυσμα των ρευμάτων I_i που εισέρχονται στους ζυγούς,

V_{bus} είναι το διάνυσμα των τάσεων ζυγών ως προς το ζυγό αναφοράς,

και Y_{bus} είναι ο πίνακας αγωγιμοτήτων ζυγών.

Το ρεύμα που εισέρχεται στον ζυγό i δίνεται από το τύπο:

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

Οπότε και η μιγαδική ισχύς που μεταφέρουν οι γραμμές μεταφοράς:

$$S_{Ti} = V_i * I_i^* = V_i * \left(\sum_{j=1}^n (y_{ij} * V_j) \right)^*$$

Γνωρίζουμε ότι $S_{Ti} = S_{Gi} - S_{Li}$ και $S_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$, $S_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li}$, οπότε η παραπάνω εξίσωση γίνεται [4]:

$$P_i - jQ_i = V_i * \left(\sum_{j=1}^n (y_{ij} * V_j) \right)^*,$$

με $P_i = P_{Gi} - P_{Li}$ και $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li}$.

Επίσης μπορούν να διαχωριστούν τα πραγματικά με τα φανταστικά μέρη με:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Li} = \text{Re} \left(V_i * \left(\sum_{j=1}^n (y_{ij} * V_j) \right)^* \right)$$

$$\text{Και } Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} = -\text{Im} \left(V_i * \left(\sum_{j=1}^n (y_{ij} * V_j) \right)^* \right).$$

2.1.1 Τρόποι Επίλυσης Εξισώσεων Ροής Φορτίου

Κάθε ζυγός σχετίζεται με 6 μεταβλητές: το μέτρο της τάσης του ($|V_i|$), την γωνία της

τάσης (δ_i), την ενεργό και άεργο ισχύ κατανάλωσης (P_{Li} , Q_{Li}), την ενεργό και άεργο ισχύ παραγωγής (P_{Gi} , Q_{Gi}). Για να γίνει η ανάλυση πιο εύκολα, οι παραπάνω μεταβλητές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- **Μη ελέγξιμες μεταβλητές ή μεταβλητές διαταραχής:** Πρόκειται για τις P_{Li} και Q_{Li} , οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν. Αντιπροσωπεύουν την πραγματική και άεργη ισχύ που καταναλώνεται από τα φορτία και εξαρτώνται από τις απαιτήσεις του συστήματος.
- **Μεταβλητές ελέγχου:** Αυτές μπορούμε να τις ρυθμίσουμε και να τις ελέγχουμε, καθώς αντιστοιχούν στις παραγόμενες ποσότητες πραγματικής και άεργης ισχύος από τις γεννήτριες (P_{Gi} , Q_{Gi}).
- **Μεταβλητές κατάστασης:** Είναι τα μέτρα των τάσεων $|V_i|$ και οι φασικές γωνίες δ_i , τα οποία επηρεάζονται όταν υπάρχουν μεταβολές στις μεταβλητές ελέγχου, P_{Li} και Q_{Li} αντίστοιχα.

Με βάση τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι για σύστημα n ζυγών έχουμε $6n$ αγνώστους και $2n$ εξισώσεις. Οι μη ελέγξιμες μεταβλητές είναι, συνήθως, γνωστές οπότε έχουμε $2n$ γνωστές μεταβλητές. Για να μπορέσουμε να προχωρήσουμε στην λύση των εξισώσεων, χρειαζόμαστε τουλάχιστον άλλες $2n$ μεταβλητές (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Τύποι ζυγών για την λύση της ανάλυσης ροής φορτίου [4]

Τύπος ζυγού	Γνωστές ποσότητες που προκαθορίζονται	Άγνωστες ποσότητες που υπολογίζονται	Πλήθος ζυγών
Ζυγός αναφοράς	$ V_i $, δ_i	P_{Gi} , Q_{Gi}	1
Ζυγός φορτίου	P_{Gi} , Q_{Gi}	$ V_i $, δ_i	85%
Ζυγός με ελεγχόμενη τάση	P_{Gi} , $ V_i $	Q_{Gi} , δ_i	15%

Για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου εφαρμόζονται επαναληπτικές μέθοδοι, οι οποίες είναι κατάλληλες για την ύπαρξη της μη γραμμικότητας και του μεγάλου πλήθους εξισώσεων που προκύπτουν. Διακρίνονται για την υψηλή ακρίβειά τους και τον σχετικά σύντομο χρόνο υπολογισμού.

Με τις μεθόδους αυτές γίνονται κάποιες εκτιμήσεις για ορισμένες τιμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να προκύψει μια νέα, πιο ακριβής προσέγγιση του αποτελέσματος.

Ως αρχικές τιμές λαμβάνονται η τάση του ζυγού αναφοράς, η οποία τίθεται ως $1 \angle 0^\circ$ pu, καθώς και τα μέτρα των τάσεων στους ζυγούς με ελεγχόμενη τάση. Επίσης, γίνονται εκτιμήσεις για τις φασικές γωνίες των ζυγών χωρίς έλεγχο τάσης, καθώς και για τα μέτρα των τάσεων και τις φασικές γωνίες στους ζυγούς φορτίων [3][4].

2.2 Ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Gauss-Seidel

Η μέθοδος **Gauss-Seidel** είναι μια επαναληπτική αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων ροής φορτίου στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Παρόλο που είναι πιο απλή από τη μέθοδο Newton-Raphson, παρουσιάζει αργή σύγκλιση, ειδικά σε μεγάλα και πολύπλοκα συστήματα. Χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση μικρών συστημάτων ενέργειας και για να γίνει κάποια προσέγγιση όταν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο Newton-Raphson.

Με τη μέθοδο Gauss-Seidel, αρχικά, μετασχηματίζουμε μια εξίσωση της μορφής $f(x) = 0$ σε μια εναλλακτική μορφή που είναι: $x = F(x)$. Η προσέγγιση της λύσης γίνεται επαναληπτικά με την σχέση: $x^{(v+1)} = F(x^{(v)})$, με το $x^{(v)}$ να είναι η εκτίμηση της ν-οστής επανάληψης. Η επαναληπτική διαδικασία σταματάει όταν η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών προσεγγίσεων γίνει μικρότερη από μία προκαθορισμένη ανοχή:

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

Για να μπορέσουμε να κάνουμε την ανάλυση μεταφέρουμε τις εξισώσεις ροής φορτίου στη μορφή:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = y_{ii} * V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij} * V_j,$$

$$\text{με } P_i = \text{Re} \left(y_{ii} * V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij} * V_j \right) \text{ και } Q_i = -\text{Im} \left(y_{ii} * V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij} * V_j \right).$$

Το οποίο γίνεται:

$$V_i = \frac{1}{y_{ii}} * \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^n y_{ij} V_j \right]$$

Εφαρμόζουμε και την επαναληπτική μορφή στην παραπάνω εξίσωση:

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

Με απλοποίηση [4]:

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

2.2.1 Βήματα επίλυσης με Gauss – Siedel

1. Κατασκευή του πίνακα Y_{BUS} αγωγιμοτήτων
2. Γίνονται οι αρχικές εκτιμήσεις των $|V_i|$ και των δ_i για όλους τους ζυγούς (και συνήθως $|V_1| = 1, \delta_1 = 0$)
3. Γίνονται υπολογισμοί για τα V_i

Αν είναι ζυγός φορτίου: $V_i^{v+1} = \frac{1}{y_{ii}} * \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^v)^*} - \sum_{j \neq i}^n y_{ij} V_j \right]$

Αν είναι ζυγός ελεγχόμενης τάσης:

Βρίσκουμε της άεργο ισχύ: $Q_i = -\text{Im} \left(y_{ii} * V_i^v + \sum_{j \neq i}^n y_{ij} * V_j^v \right).$

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

Ορισμένες φορές χρησιμοποιείται κάποιος συντελεστής επιτάχυνσης a για να γίνεται πιο γρήγορα η σύγκλιση, άρα: $V_{i,acc}^{(v+1)} = V_{i,acc}^v + a * (V_i^v - V_{i,acc}^v).$

4. Έλεγχος σύγκλισης

Γίνεται έλεγχος για το αν ισχύει η συνθήκη:

$$|\Delta V^{(v+1)}| = |V_i^{(v+1)} - V_i^v| < \varepsilon$$

Αν οι όροι αυτοί δεν είναι μικρότεροι της ανοχής, τότε επαναλαμβάνουμε το τρίτο βήμα.

Αν όμως ισχύει η ανισότητα και είναι μικρότεροι της ανοχής ε , σημαίνει ότι η σύγκλιση πέτυχε και συνεχίζουμε στο επόμενο βήμα.

- 5. Βρίσκουμε την ενεργό και άεργο ισχύ παραγωγής του ζυγού αναφοράς με τους παραπάνω τύπους, οι οποίοι είναι:**

$$P_i = \operatorname{Re} \left(y_{ii} * V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} * V_j \right) \text{ και } Q_i = -\operatorname{Im} \left(y_{ii} * V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} * V_j \right).$$

- 6. Γίνεται υπολογισμός ρών ισχύος σε όλες τις γραμμές**

Αυτός γίνεται ως εξής: $I_{ij} = I_s + I_{pi} * (V_i - V_j)_{ys} + V_i * Y_{pi}$

Το I_{ij} δίνει το ρεύμα γραμμής από έναν ζυγό i στο ζυγό j .

Οι ισχύες των ζυγών αυτών είναι [4]:

$$\begin{aligned} S_{ij} &= P_{ij} + jQ_{ij} = V_i * I_{ij}^* = V_i * (V_i^* - V_j^*) * Y_s^* + |V_i|^2 * Y_{pi}^* \\ S_{ji} &= P_{ji} + jQ_{ji} = V_j * I_{ji}^* = V_j * (V_j^* - V_i^*) * Y_s^* + |V_j|^2 * Y_{pi}^* \end{aligned}$$

2.3 Ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson

Η μέθοδος **Newton-Raphson** είναι και αυτή μία επαναληπτική αριθμητική μέθοδος, η οποία είναι πιο αποδοτική για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου, λόγω της γρήγορης σύγκλισης και της υψηλής ακρίβειάς και αποτελεσματικότητά της. Γι' αυτό και χρησιμοποιείται περισσότερο από την μέθοδο Gauss-Siedel τόσο για μικρά αλλά και για μεγάλα συστήματα.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη μέθοδο του αναπτύγματος Taylor. Σύμφωνα με αυτό, μία συνάρτηση με μια μεταβλητή γύρω από το $(x - a)$ μπορεί να αναπτυχθεί με την παρακάτω σχέση:

$$f(x) = f(a) + (x - a) * \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=a} + \frac{(x - a)^2}{2!} * \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x=a} + \dots + \frac{(x - a)^n}{n!} * \left. \frac{\partial^n f}{\partial x^n} \right|_{x=a} + K_n$$

Η σειρά συγκλίνει όταν $\lim_{n \rightarrow \infty} K_n = 0$.

Σε περιπτώσεις όπου $(x - a) \ll 1$, οι όροι υψηλότερης τάξης παραλείπονται οπότε η σχέση γίνεται:

$$f(x) \approx f(a) + (x - a) * \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=a}$$

Η ανάπτυξη Taylor για συναρτήσεις που εξαρτώνται από περισσότερες μεταβλητές γύρω από τα σημεία $(x_1 - a_1), (x_2 - a_2), \dots, (x_n - a_n)$, είναι:

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= f(a_1, a_2, \dots, a_n) + (x_1 - a_1) * \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x_1=a_1} + (x_2 - a_2) * \left. \frac{\partial f}{\partial x_2} \right|_{x_2=a_2} + \dots \\ &+ (x_n - a_n) * \left. \frac{\partial f}{\partial x_n} \right|_{x_n=a_n} + K_n \end{aligned}$$

Αν τώρα έχουμε ένα σύνολο με k μη γραμμικές εξισώσεις με n μεταβλητές η καθεμία

$$f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_k, k=1,2,\dots,n$$

Η μέθοδος Newton-Raphson στηρίζεται σε αρχικές εκτιμήσεις των τιμών $x_k^{(0)}$ για κάθε μεταβλητή, στις οποίες αν προστεθεί ένας αριθμός Δx_k προκύπτουν οι καινούριες τιμές $x_k^{(1)}$. Το ανάπτυγμα Taylor χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει τις συναρτήσεις $f_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$ γύρω από τις αρχικές τιμές ως εξής:

$$\begin{aligned} f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) &= f_k(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1 * \left. \frac{\partial f_k}{\partial x_1} \right|_{x_1^{(0)}=a} + \Delta x_2 * \left. \frac{\partial f_k}{\partial x_2} \right|_{x_2^{(0)}=a} + \dots + \\ \Delta x_n * \left. \frac{\partial f_k}{\partial x_n} \right|_{x_n^{(0)}=a} &= y_k, \text{ με } k=1,2,\dots,n \end{aligned}$$

Σε μορφή πινάκων γίνεται:

$$\begin{bmatrix} y_k - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ y_k - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{x_1^{(0)}=a} & \dots & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \right|_{x_n^{(0)}=a} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \right|_{x_1^{(0)}=a} & \dots & \left. \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \right|_{x_n^{(0)}=a} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix}$$

Αυτό μπορεί να εκφραστεί ως $[\Delta U]^{(0)} = [J]^{(0)} * [\Delta X]^{(0)}$,

όπου $[J]$ είναι ο Ιακωβιανός πίνακας που περιέχει τις μερικές παραγώγους,

$[\Delta U]^{(0)}$ είναι το διάνυσμα με τις λάθος προβλέψεις στις πραγματικές και άεργες ισχύες,

και $[\Delta X]^{(0)}$ είναι το διάνυσμα που περιέχει τις διορθώσεις στις τιμές των αγνώστων παραμέτρων (γωνίες και μέτρα τάσης).

Η παραπάνω σχέση γίνεται: $[\Delta X]^{(0)} = ([J]^{(0)})^{-1} * [\Delta U]^{(0)}$

Η επόμενη προσέγγιση των τιμών είναι: $[X]^{(1)} = [X]^{(0)} * [\Delta X]^{(0)}$,

οπότε γενικά οι επόμενες προσεγγίσεις θα έχουν την μορφή: $[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} * [\Delta X]^{(k)}$.

Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται επαναληπτικά, με το $[\Delta X]$ να υπολογίζεται σε κάθε βήμα, μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

Η μέθοδος Newton-Raphson εφαρμόζεται στις εξισώσεις ροής φορτίου χρησιμοποιώντας την πραγματική τους μορφή, δηλαδή:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| * |j| * |V_{ij}| * \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = f_{ip}, i=1, 2, \dots, n$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| * |j| * |V_{ij}| * \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = f_{iq}, i=1, 2, \dots, n$$

Σε αυτές τις εξισώσεις, οι ζυγοί που δεν είναι ο ζυγός αναφοράς (ζυγός 1) θεωρούνται ως ζυγοί φορτίου. Επομένως, οι άγνωστοι παράμετροι είναι τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων στους ζυγούς, πλήθους $n-1$.

Σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{2p}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial f_{2p}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial f_{2p}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial f_{2p}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{np}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial f_{np}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial f_{np}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial f_{np}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial f_{2q}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial f_{2q}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial f_{2q}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial f_{2q}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_{nq}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial f_{nq}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial f_{nq}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial f_{nq}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \Delta |V_2|^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^{(0)} \end{bmatrix}$$

Αυτό εκφράζεται ως $[\Delta U]^{(0)} = [J]^{(0)} * [\Delta X]^{(0)}$ [3][4].

2.3.1 Βήματα επίλυσης με Newton – Raphson

1. Κατασκευή του πίνακα Y_{BUS} αγωγιμοτήτων

2. Γίνεται ορισμός των αρχικών τιμών

Για τις γωνίες τάσης και τα μέτρα τάσης στους ζυγούς φορτίων οι αρχικές τιμές είναι συνήθως $\delta_i = 0$ και $|V_i| = 1$ για όλους τους ζυγούς. Οι τιμές για τον ζυγό αναφοράς είναι γνωστές και παραμένουν σταθερές.

3. Καθορισμός διανύσματος αστοχιών ΔU για την επανάληψη k

4. Διαμόρφωση του Ιακωβιανού πίνακα για την επανάληψη k

5. Υπολογισμός διανύσματος λάθους ΔX

Γίνεται με βάση τον τύπο $[\Delta U]^{(0)} = [J]^{(0)} * [\Delta X]^{(0)}$.

Για την επόμενη επανάληψη (k+1) χρησιμοποιούμε τον τύπο $[X]^{(k+1)} = [X]^{(k)} * [\Delta X]^{(k)}$.

Έπειτα γίνεται έλεγχος των προβλέψεων ισχύος. Αν δεν έχει επιτευχθεί η σύγκλιση, η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 3. Διαφορετικά, συνεχίζουμε στο επόμενο βήμα.

6. Βρίσκουμε την ενεργό και άεργο ισχύ παραγωγής του ζυγού αναφοράς

Για τον υπολογισμό χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις:

$$\text{a. } P_i = \operatorname{Re} \left(y_{ii} * V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} * V_j \right) \text{ και } Q_i = -\operatorname{Im} \left(y_{ii} * V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} * V_j \right).$$

7. Γίνεται υπολογισμός ρών ισχύος σε όλες τις γραμμές

Αυτός γίνεται ως εξής:

$$I_{ij} = I_s + I_{pi} * (V_i - V_j)_{ys} + V_i * Y_{pi}$$

Το I_{ij} δίνει το ρεύμα γραμμής από έναν ζυγό i στο ζυγό j.

Οι ισχύες των ζυγών αυτών είναι [4]:

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

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

Κεφάλαιο 3

Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.1 Εισαγωγή στην Αξιοπιστία των ΣΗΕ

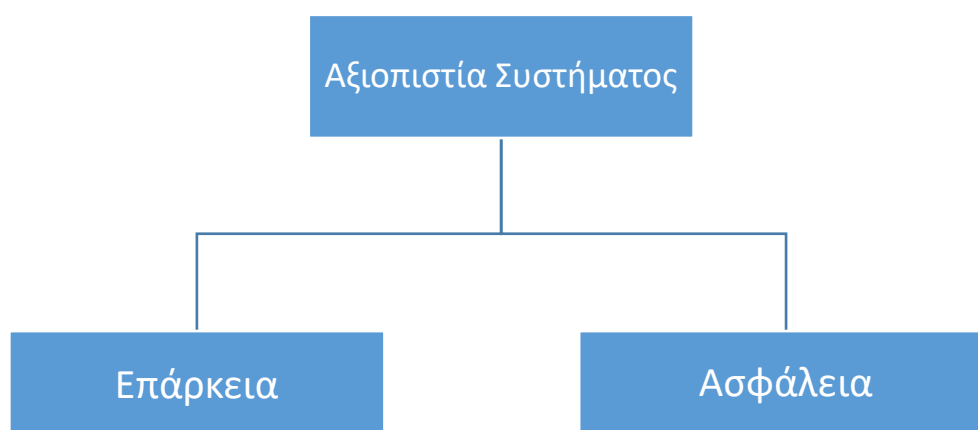
Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς και τα συστήματα μεταφοράς και διανομής ενέργειας γίνονται ολοένα και πιο σύνθετα. Στην προσπάθεια των συστημάτων αυτών να ικανοποιήσουν την αυξανόμενη ζήτηση, είναι φυσικό να δημιουργούνται διάφορα μηχανικά προβλήματα και σφάλματα που επηρεάζουν την λειτουργία τους και απαιτούν περαιτέρω επίβλεψη και προσοχή.

Για να θεωρείται ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πλήρως λειτουργικό και αξιόπιστο απαιτεί τη διατήρηση της τάσης και, της ισχύος και της συχνότητας εντός στενών ορίων, ώστε να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία των συσκευών του συστήματος και η αποφυγή βλαβών στο δίκτυο. Τέτοιο ρόλο έχει η **μελέτη αξιοπιστίας ενός ΣΗΕ**. Αυτή γίνεται με την χρήση μεθόδων πρόβλεψης και ανάλυσης των παραγόντων που μπορεί να παρουσιάσουν σφάλματα.

Η **ανάλυση αξιοπιστίας ενός ΣΗΕ** περιέχει την μελέτη των επιμέρους τμημάτων ενός συστήματος (παραγωγή, μεταφορά και διανομή), ώστε να εκτιμηθεί η ανθεκτικότητα ολόκληρου του συστήματος. Η αποτελεσματική μελέτη της αξιοπιστίας έχει σημαντικό ρόλο στη σταθερότητα ενός ηλεκτρικού δικτύου τόσο σε κανονική λειτουργία αλλά και σε κατάσταση σφάλματος. Η αξιοπιστία δείχνει την ικανότητα ενός συστήματος να λειτουργεί σωστά και αδιάλειπτα, ακόμα και υπό απρόβλεπτες συνθήκες ή και μετά από κάποια διαταραχή. Συνδέεται άμεσα με την εκτίμηση της ασφάλειας και την ανάλυση διαταραχών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνεχής και ασφαλής λειτουργία ενός δικτύου.

Η αξιοπιστία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 16, χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες: **την επάρκεια και την ασφάλεια**. Η **επάρκεια** αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να παρέχει επαρκή ηλεκτρική ενέργεια ώστε να καλύπτει τη ζήτηση των καταναλωτών, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής, των γραμμών μεταφοράς και των υπόλοιπων υποδομών. Η

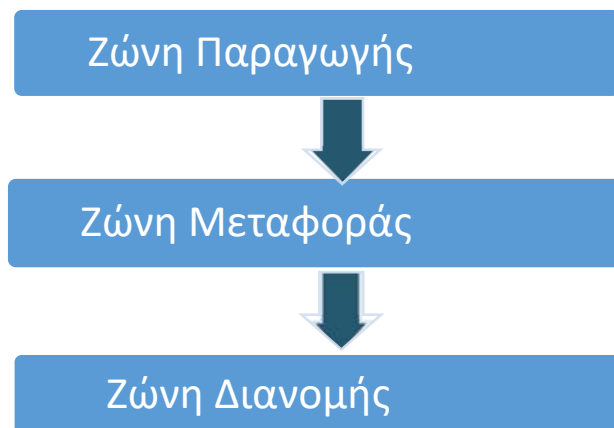
ασφάλεια σχετίζεται με την ικανότητα του συστήματος να αντέχει σε απρόβλεπτες διαταραχές, όπως βλάβες σε γραμμές μεταφοράς ή γεννήτριες, και να επανέρχεται σε ασφαλή κατάσταση χωρίς διακοπή της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συνδυασμός αυτών των δύο στοιχείων καθορίζει τη συνολική αξιοπιστία του συστήματος, διασφαλίζοντας τη σταθερή και τη συνεχή λειτουργία του [6][7].



Σχήμα 16: Αξιοπιστία Συστήματος και Υποκατηγορίες

3.2 Επάρκεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η μελέτη της επάρκειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι βασική για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας και της σταθερότητας του συστήματος. Για να γίνει πιο εύκολος ο υπολογισμός της επάρκειας, το σύστημα κατηγοριοποιείται σε τμήματα, τα οποία συνήθως διακρίνονται σε τρεις λειτουργικές ζώνες. Αυτές είναι η ζώνη παραγωγής, η ζώνη μεταφοράς και η ζώνη διανομής, όπως παρουσιάζονται και στο Σχήμα 17. Ο διαχωρισμός στα τρία αυτά τμήματα είναι κατάλληλος, καθώς τα περισσότερα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι οργανωμένα σε αυτές τις ζώνες, με σκοπό τη βελτίωση της λειτουργίας και της οργάνωσης του συστήματος.



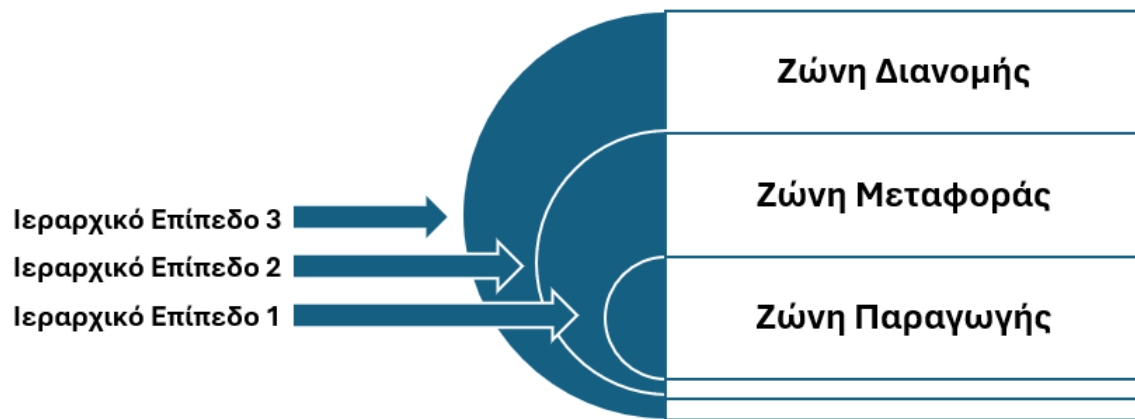
Σχήμα 17: Οι Ζώνες Λειτουργίας

Οι μελέτες επάρκειας πραγματοποιούνται σε κάθε μία από αυτές τις τρεις λειτουργικές ζώνες και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μελέτη της επάρκειας είναι προσαρμοσμένες σε κάθε ζώνη. Στη ζώνη παραγωγής, οι μελέτες επικεντρώνονται στην ικανότητα παραγωγής ενέργειας και στη διασφάλιση ότι η παραγωγή καλύπτει τις απαιτήσεις του συστήματος. Στη ζώνη μετάδοσης, οι μελέτες αναλύουν την ικανότητα των γραμμών μεταφοράς να διαχειριστούν την ενέργεια που παράγεται και να την μεταφέρουν στους τελικούς χρήστες. Στη ζώνη διανομής, οι μελέτες επικεντρώνονται στην επάρκεια του συστήματος διανομής ενέργειας μέχρι τα σημεία κατανάλωσης.

Οι ζώνες λειτουργίας συνδυάζονται και μας δίνουν τα **επίπεδα ιεραρχίας** τα οποία και αυτά με τη σειρά τους χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της επάρκειας του συστήματος. Τα ιεραρχικά επίπεδα είναι τα εξής και μπορούμε να τα διακρίνουμε στο Σχήμα 18:

- Το **ιεραρχικό επίπεδο 1 (HL1)**, στο οποίο η ανάλυση αφορά μόνο τις εγκαταστάσεις παραγωγής,
- Το **ιεραρχικό επίπεδο 2 (HL2)**, το οποίο εξετάζει τις εγκαταστάσεις παραγωγής αλλά και μεταφοράς,

- **Και το ιεραρχικό επίπεδο 3 (HL3)**, στο οποίο εξετάζονται οι εγκαταστάσεις παραγωγής, μεταφοράς αλλά και οι εγκαταστάσεις διανομής για μια πιο ολοκληρωμένη αξιολόγηση της επάρκειας σε επίπεδο καταναλωτών.



Σχήμα 18: Επίπεδα Ιεραρχίας

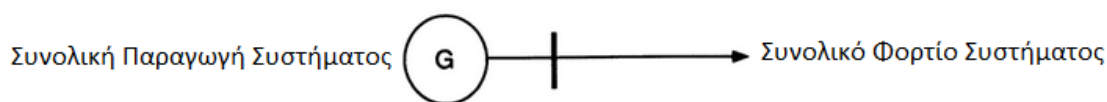
Όταν γίνεται μελέτη σε κάποια από τις λειτουργικές ζώνες, η μελέτη αυτή δεν περιλαμβάνει όλα τα ιεραρχικά επίπεδα λόγω μεγέθους. Τέτοιες μελέτες μπορεί να γίνουν στην ζώνη διανομής και στην ζώνη υπομεταφοράς και σκοπό έχουν την εξέταση κάποιας διαμόρφωσης στο σύστημα ή στην τοπολογία. Στο ιεραρχικό επίπεδο 2 (HL2), οι μελέτες περιορίζονται σε μια περιοχή μελέτης και με αυτόν τον τρόπο παρέχουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα από την αξιολόγηση του συνολικού συστήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η προσθήκη μιας εγκατάστασης στο σύστημα μεταφοράς μπορεί να επηρεάσει σημαντικά μια μικρή περιοχή, αλλά να έχει ελάχιστο αντίκτυπο σε απομακρυσμένες περιοχές του συστήματος. Η συνεισφορά στην αξιοπιστία ολόκληρου του συστήματος από την προσθήκη τοπικής γραμμής μεταφοράς μπορεί να είναι τόσο μικρή που να φαίνεται σαν απλά υπολογιστικά σφάλματα και άρα δεν θα αντικατοπτρίζεται στην αξιοπιστία του συνολικού συστήματος. Αυτή η συνεισφορά όμως, μπορεί να παίζει σχετικά μεγάλο ρόλο στην αλλαγή αξιοπιστίας στην τοπική περιοχή [8].

3.2.1 Μελέτη Επάρκειας ΣΗΕ

Η μελέτη της επάρκειας ενός συστήματος γίνεται σε κάθε επίπεδο ιεραρχίας ξεχωριστά για να μπορεί να θεωρηθεί η μελέτη ικανοποιητική και αξιόπιστη.

Μελέτη επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 1 (HL1)

Στην μελέτη του συστήματος παραγωγής (HL1) εξετάζεται στο αν η ικανότητα παραγωγής του συστήματος μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις φορτίου. Η διαδικασία αυτή συνήθως ονομάζεται «Αξιολόγηση της Αξιοπιστίας της Παραγωγικής Ικανότητας» και μία εικόνα του συστήματος σε αυτό το επίπεδο φαίνεται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19: Ιεραρχικό Επίπεδο 1 (HL1)

Το βασικό μέλημα της μελέτης αυτού του ιεραρχικού επιπέδου είναι να εκτιμηθεί η παραγωγική ικανότητα που απαιτείται για να καλυφθεί η ζήτηση του συστήματος και να υπάρχει η δυνατότητα να προληφθούν ή να αντιμετωπιστούν τυχόν σφάλματα στις εγκαταστάσεις παραγωγής. Η βασική τεχνική, που χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν για να προσδιοριστεί αυτή η απαιτούμενη ποσότητα ισχύος ήταν η μέθοδος ποσοστού αποθεματικού. Σε αυτήν την προσέγγιση, το απαιτούμενο αποθεματικό είναι ένα σταθερό ποσοστό είτε της εγκατεστημένης παραγωγικής ικανότητας είτε του προβλεπόμενου φορτίου. Αυτή η προσέγγιση πλέον έχει αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από πιθανοτικές μεθόδους που ανταποκρίνονται και αντικατοπτρίζουν τους πραγματικούς παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία του συστήματος.

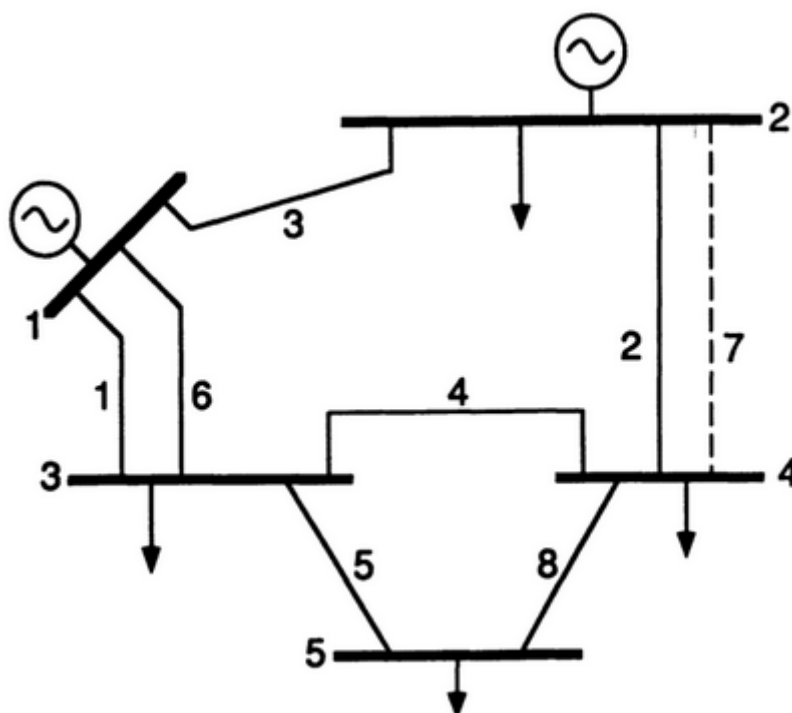
Αν και, ως επί το πλείστον το σύστημα μεταφοράς και οι ικανότητες του δεν εξετάζονται στην μελέτη επάρκειας του επιπέδου 1 (HL1), υπάρχουν κάποιοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη αυτή και είναι η διαμόρφωση των απομακρυσμένων εγκαταστάσεων παραγωγής και οι διασυνδέσεις μεταξύ γειτονικών συστημάτων. Στην περίπτωση των απομακρυσμένων εγκαταστάσεων παραγωγής η μελέτη αξιοπιστίας

ταυτίζεται με την μελέτη που γίνεται για τις γραμμές που συνδέουν τις εγκαταστάσεις αυτές. Για την δεύτερη περίπτωση, δηλαδή τις διασυνδέσεις γειτονικών συστημάτων, εφαρμόζεται μια μέθοδος που ονομάζεται **μέθοδος ροής δικτύου** [8].

Μελέτη επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 2 (HL2)

Σε αντίθεση με το Επίπεδο Ιεραρχίας 1, όπου το σύστημα μεταφοράς θεωρείται ιδανικό, η μελέτη στο Επίπεδο Ιεραρχίας 2 (HL2) αξιολογεί το σύνθετο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς ως ένα ενιαίο σύνολο. Σε αυτό το επίπεδο, το δίκτυο μεταφοράς μοντελοποιείται με τα πραγματικά του χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβανομένων των περιορισμών ροής ισχύος (θερμικά όρια) και των πιθανοτήτων βλάβης των στοιχείων του (γραμμές, μετασχηματιστές).

Ο στόχος της ανάλυσης HL2 είναι να εξετάσει αν το σύστημα στο σύνολό του έχει την επάρκεια όχι μόνο να παράγει την απαιτούμενη ενέργεια, αλλά και να την μεταφέρει με ασφάλεια από τις μονάδες παραγωγής προς τα σημεία φορτίου. Το Σχήμα 20 αποτυπώνει σχηματικά ένα τέτοιο σύστημα.



Σχήμα 20: Ιεραρχικό Επίπεδο 2 (HL2)

Η ανάλυση επάρκειας σε αυτό το επίπεδο αναφέρεται συνήθως ως «Μελέτη Αξιοπιστίας Σύνθετου Συστήματος» ή «Μελέτη Αξιοπιστίας Συστήματος Μεγάλου Όγκου Μεταφοράς».

Η μελέτη αυτού του επιπέδου γίνεται για την ανάλυση ήδη υπαρχόντων συστημάτων ή για την ανάλυση κάποιων καινούριων συστημάτων που θέλουμε να κατασκευαστούν, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση διαφόρων αλλαγών στο επίπεδο της παραγωγής και στο επίπεδο της μεταφοράς. Οι αλλαγές αυτές αξιολογούνται μέσω δύο συμπληρωματικών ειδών δεικτών: τους **δείκτες μεμονωμένων ζυγών** και τους **δείκτες συνολικού συστήματος**. Οι δείκτες συνολικού συστήματος παρέχουν μια συνολική εκτίμηση της επάρκειας για όλο το σύστημα. Οι δείκτες ζυγών δείχνουν της επίδραση σε κάθε επιμέρους ζυγό και παρέχουν δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη επάρκειας του συστήματος διανομής, δηλαδή του ιεραρχικού επιπέδου 3 (HL3). Και τα δύο είδη δεικτών διακρίνονται σε **δείκτες ανοιγμένους σε ετήσια βάση** και σε **ετήσιους δείκτες**. Οι πρώτοι υπολογίζονται βάσει ενός σταθερού επιπέδου φορτίου (συνήθως της μέγιστης ζήτησης του συστήματος) και εκφράζονται σε ετήσια βάση, ενώ οι ετήσιοι δείκτες λαμβάνουν υπόψη τις λεπτομερείς μεταβολές του φορτίου για την διάρκεια ενός έτους. Οι δείκτες ανοιγμένοι σε ετήσια βάση δίνουν πιο αξιόπιστες ενδείξεις όταν χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση της επάρκειας σε διάφορες αλλαγές στο σύστημα. Οι ετήσιοι δείκτες προσφέρουν μια πιο ρεαλιστική και ολοκληρωμένη εικόνα της επάρκειας του συστήματος [8].

Μελέτη επάρκειας επιπέδου ιεραρχίας 3 (HL3)

Η αξιολόγηση της επάρκειας στο τρίτο ιεραρχικό επίπεδο (HL3) είναι ιδιαίτερα απαιτητική, καθώς ξεκινάει από την παραγωγή και καταλήγει στην τελική κατανάλωση του φορτίου. Εξαιτίας αυτής της πολυπλοκότητας, η ζώνη της διανομής εξετάζεται κατά κανόνα ως ξεχωριστό τμήμα. Οι δείκτες επάρκειας που σχετίζονται με το HL3 εξάγονται με τη βοήθεια των δεικτών των ζυγών από το επίπεδο HL2.

Στην ζώνη της διανομής, διακρίνονται δύο κύριες μορφές δικτύου: η μορφή βρόγχου και η ακτινική μορφή. Στα πρώτα, η ανάλυση γίνεται με μεθόδους παρόμοιες με εκείνες που εφαρμόζονται σε σύνθετα συστήματα, ενώ στα δεύτερα η προσέγγιση βασίζεται στην ανάλυση αστοχίας λειτουργίας και παρέχει όλα τα αποτελέσματα για κάθε περίπτωση

δυσλειτουργίας και αποκατάστασης του συστήματος. Αρκετά συχνά, τα προβλήματα επάρκειας που δημιουργούνται στα συστήματα οφείλονται στο δίκτυο διανομής [8].

3.2.2 Δείκτες Επάρκειας ΣΗΕ

Η επάρκεια ενός συστήματος υπολογίζεται με την χρήση των δεικτών. Οι δείκτες είναι διαφορετικοί για κάθε ιεραρχικό επίπεδο και για διαφορετικές τοποθεσίες του συστήματος.

Δείκτες επάρκειας ιεραρχικού επιπέδου 1 (HL1)

LOLP (Loss Of Load Probability) - Πιθανότητα Απώλειας Φορτίου: Εκφράζει την πιθανότητα η ζήτηση να υπερβεί τη διαθέσιμη παραγωγική ισχύ σε μια δεδομένη χρονική περίοδο (π.χ. σε οποιαδήποτε ώρα ή ημέρα του έτους). Ουσιαστικά, δίνει το ποσοστό του χρόνου στο οποίο το σύστημα ενδέχεται να μην μπορεί να καλύψει το φορτίο, χωρίς όμως να υποδεικνύει τη διάρκεια ή το μέγεθος του ελλείμματος. Ένας μικρός LOLP σημαίνει υψηλή επάρκεια, ενώ μεγαλύτερες τιμές υποδηλώνουν αυξημένο κίνδυνο ανεπάρκειας παραγωγής.

LOLE (Loss of Load Expectation) - Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου:

Πρόκειται για τον αναμενόμενο συνολικό χρόνο μη ικανοποίησης φορτίου μέσα σε ένα έτος. Ο LOLE εκφράζεται συνήθως σε μέρες/έτος ή ώρες/έτος και αντιστοιχεί στο μέσο πλήθος των χρονικών διαστημάτων (ημερών ή ωρών) κατά τα οποία η αιχμή του φορτίου προβλέπεται μεγαλύτερη από τη διαθέσιμη παραγωγή.

EENS (Expected Energy Not Supplied) - Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργειας (ή και LOEE – Loss of Energy Expectation): Καταγράφει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας (συνήθως σε MWh ανά έτος) που δεν μπορεί να δοθεί στο σύστημα λόγω ανεπαρκούς ισχύος παραγωγής. Ο δείκτης αυτός μετρά το ενεργειακό έλλειμμα και ενσωματώνει τόσο

τη συχνότητα όσο και τη διάρκεια των ελλείψεων αυτών. Ένας μικρός αριθμός EENS δείχνει ότι οι ανεπαρκείς καταστάσεις είναι σπάνιες και μικρής διάρκειας/έντασης, ενώ οι υψηλότερες τιμές EENS υποδηλώνουν σοβαρότερα ενεργειακά ελλείμματα.

$$EENS = \sum_{i \in S} 8760 * C_i * p_i.$$

LOLF (Loss of Load Frequency) - Συχνότητα Απώλειας Φορτίου: Εκφράζει τον αναμενόμενο αριθμό περιστατικών ανά έτος κατά τα οποία το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αδυνατεί να καλύψει τη ζήτηση (δηλαδή εμφανίζεται απώλεια φορτίου λόγω ανεπαρκούς διαθέσιμης ισχύος). Δηλαδή, ο δείκτης αυτός είναι η στατιστική συχνότητα εμφάνισης ανεπαρκειών ισχύος σε έναν χρόνο. ($LOLF = \frac{LOLE}{r}$, με r : χρόνος επισκευής)

Frequency and duration of expected outages - Συχνότητα και διάρκεια αναμενόμενων

Διακοπών: Ο δείκτης αυτός εκφράζει τον βαθμό επίδρασης των διακοπών ηλεκτροδότησης στους καταναλωτές και συνδέεται με τις στρατηγικές διαχείρισης που εφαρμόζονται όταν η παραγωγή δεν καλύπτει τη ζήτηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο διαχειριστής του συστήματος προχωρά σε αποφάσεις που στοχεύουν στον περιορισμό των επιπτώσεων μέσω ελεγχόμενων αποσυνδέσεων φορτίου [8][9][10].

Δείκτες επάρκειας ιεραρχικού επιπέδου 2 (HL2)

Το ιεραρχικό επίπεδο 2 επεκτείνει την ανάλυση αξιοπιστίας στο σύνθετο σύστημα παραγωγής-μεταφοράς (bulk power system). Σε αυτό το επίπεδο λαμβάνονται υπόψη, πέρα από τις τυχόν αστοχίες μονάδων παραγωγής, οι βλάβες ή οι περιορισμοί του δικτύου μεταφοράς που μπορεί να εμποδίσουν τη μεταφορά ισχύος προς ορισμένα φορτία. Οι βασικοί δείκτες επάρκειας που χρησιμοποιούνται στο HL2 είναι οι ίδιοι με του HL1, προσαρμοσμένοι στο συνολικό σύστημα:

LOLP και LOLE (για το HL2): Η πιθανότητα και ο αναμενόμενος χρόνος απώλειας φορτίου υπολογίζονται τώρα για το ολοκληρωμένο δίκτυο παραγωγής-μεταφοράς. Οι ορισμοί των δεικτών παραμένουν αντίστοιχοι (LOLP ως πιθανότητα ανεπάρκειας, LOLE σε ώρες/μέρες ανά έτος), όμως λαμβάνουν υπόψη τόσο τις ελλείψεις ισχύος παραγωγής όσο και τις πιθανές αδυναμίες του δικτύου (π.χ. υπερφόρτωση γραμμών ή βλάβες μετασχηματιστών)

που μπορεί να οδηγήσουν σε απομόνωση ή μη τροφοδότηση κάποιων περιοχών. Έτσι, ένας δείκτης LOLE στο HL2 αντικατοπτρίζει το αναμενόμενο πλήθος ωρών ή ημερών μη τροφοδότησης φορτίου λόγω συνολικής ανεπάρκειας του συστήματος και όχι μόνο του δυναμικού παραγωγής. Σε ένα αξιόπιστο σύστημα μεταφοράς, οι τιμές των δεικτών LOLE/LOLP στο HL2 είναι κοντά σε αυτές του HL1. Αντίθετα, αν υπάρχουν σημαντικές διαφορές υποδηλώνουν ότι το δίκτυο μεταφοράς μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα για την κάλυψη της ζήτησης.

EENS (για το HL2): Ομοίως, η Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια υπολογίζεται για το σύνθετο σύστημα. Ο δείκτης EENS στο HL2 αντιπροσωπεύει την ετήσια ενέργεια (MWh) που αναμένεται να μην τροφοδοτηθεί, είτε λόγω έλλειψης συνολικής παραγωγής είτε λόγω αδυναμίας του δικτύου να μεταφέρει την ενέργεια στους καταναλωτές. Για παράδειγμα, αν μια περιοχή απομονωθεί δικτυακά και υποστεί διακοπή παρά το επαρκές συνολικό δυναμικό παραγωγής, η μη εξυπηρετούμενη ενέργεια σε αυτή την περίπτωση συνεισφέρει στον συνολικό EENS του HL2. Συνεπώς, ο EENS στο HL2 παρέχει ένα συνολικό μέτρο κινδύνου ανεφοδιασμού στο δίκτυο, αντανakλώντας τόσο την επάρκεια παραγωγής όσο και την αξιοπιστία του δικτύου μεταφοράς [9][11][12][13][14].

Δείκτες επάρκειας ιεραρχικού επιπέδου 3 (HL3)

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) - Δείκτης Μέσης Συχνότητας Διακοπών ανά Χρήστη: Αντιπροσωπεύει τον μέσο αριθμό διακοπών τροφοδότησης που παθαίνει κάθε καταναλωτής σε ένα έτος. Υπολογίζεται ως το συνολικό πλήθος διακοπών σε όλο το δίκτυο διανομής διαιρεμένο με το πλήθος των καταναλωτών, δίνοντας τη μέση συχνότητα διακοπών ανά πελάτη ανά έτος. Ο δείκτης μπορεί να υπολογιστεί από την εξής εξίσωση:

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

όπου N_i : ο αριθμός των καταναλωτών που έχουν διακοπή τροφοδότησης κατά τη διάρκεια κάποιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου,

N_T : ο συνολικός αριθμός καταναλωτών που εξυπηρετούνται σε όλο το δίκτυο διανομής

CI: οι καταναλωτές που δέχονται την διακοπή τροφοδότησης.

SAIDI (System Average Interruption Duration Index) - Δείκτης Μέσης Διάρκειας Διακοπών ανά Χρήστη: Αυτός ο δείκτης εκφράζει τον μέσο συνολικό χρόνο (σε λεπτά ή ώρες) διακοπής ρεύματος που υφίσταται κάθε καταναλωτής μέσα σε ένα έτος. Υπολογίζεται αθροίζοντας τη διάρκεια όλων των διακοπών (σε λεπτά/ώρες) για όλους τους πελάτες και διαιρώντας την με τον συνολικό αριθμό καταναλωτών, δίνοντας έτσι τον μέσο χρόνο μη τροφοδότησης ανά πελάτη ετησίως. Ο δείκτης υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

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

όπου r_i : ο χρόνος αποκατάστασης τροφοδότησης για κάθε καταναλωτή,

CMI: τα λεπτά που οι καταναλωτές δέχονται τη διακοπή τροφοδοσίας.

CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) - Δείκτης Μέσου Χρόνου Διακοπής Πελατών: Ο δείκτης αυτός ισοδυναμεί με τον λόγο SAIDI/SAIFI και εκφράζει τον μέσο χρόνο αποκατάστασης ανά διακοπή στην τροφοδοσία για τους πελάτες.

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI}.$$

CAIFI (Customer Average Interruption Frequency Index) - Δείκτης Μέσης Συχνότητας Διακοπών ανά Επηρεαζόμενο Πελάτη: Δείχνει τη μέση συχνότητα διακοπών ανά πελάτη που επηρεάστηκε από διακοπές. Υπολογίζεται ως το συνολικό πλήθος των διακοπών τροφοδότησης διαιρεμένο με τον αριθμό πελατών που επηρεάστηκαν από τις διακοπές. Ουσιαστικά, ο δείκτης αυτός αξιολογεί πόσες φορές κατά μέσο όρο διακόπηκε η παροχή στους καταναλωτές που πραγματικά υπέστησαν διακοπή μέσα σε μια περίοδο αναφοράς. Μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης:

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

όπου CN: ο αριθμός των πελατών που υπέστησαν τουλάχιστον μία διακοπή.

ASAI (Average Service Availability Index) - Μέσος Δείκτης Διαθεσιμότητας Υπηρεσίας: Ο δείκτης αυτός είναι ένα ποσοστό το οποίο μας δείχνει την διαθεσιμότητα της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους πελάτες για μία προκαθορισμένη χρονική διάρκεια (συνήθως

για ένα έτος). Υπολογίζεται ως τον συνολικό χρόνο που οι πελάτες λαμβάνουν όντως ισχύ διαιρεμένο με τον συνολικό χρόνο που οι πελάτες «ζητούσαν» να λάβουν ισχύ. Η εξίσωση για αυτόν τον δείκτη:

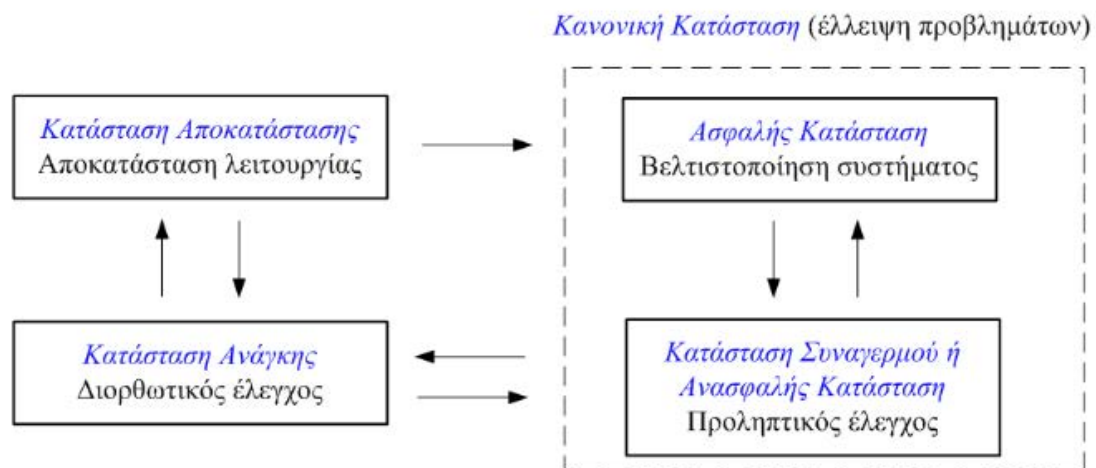
$$ASAI = \frac{\sum 8760 * N_i - \sum U_i N_i}{\sum 8760 * N_i},$$

όπου U_i : η διάρκεια κάθε διακοπής [6][8][10][12][14].

3.3 Ασφάλεια ΣΗΕ

Σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) η ασφάλεια του ορίζεται από κάποιες διακριτές καταστάσεις λειτουργίας με βάση το αν τηρούνται τα όρια και τα κριτήρια ασφαλούς λειτουργίας. Κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες του συστήματος και η μετάβαση από τη μία στην άλλη συμβαίνει όταν αλλάζει το επίπεδο ασφαλείας λόγω διαταραχών ή βλαβών. Αυτές οι καταστάσεις είναι οι παρακάτω και μπορούμε να τις δούμε στο Σχήμα 21:

- **Κατάσταση Ασφάλειας:** Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε ομαλή λειτουργία, καλύπτει πλήρως τη ζήτηση και κανένα λειτουργικό όριο δεν παραβιάζεται, δηλαδή ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια ασφαλείας του συστήματος.
- **Κατάσταση Συναγερμού:** Όλα τα μεγέθη του συστήματος παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων, όμως τα περιθώρια ασφαλείας έχουν μειωθεί και δεν πληρούνται τα κριτήρια ασφαλείας απέναντι σε πιθανές διαταραχές.
- **Κατάσταση Ανάγκης:** Μια διαταραχή έχει οδηγήσει σε υπέρβαση ορίων λειτουργίας σε μέρος του εξοπλισμού του συστήματος και έτσι απαιτούνται άμεσες διορθώσεις για να αποτραπεί περαιτέρω επιδείνωση και να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία.
- **Κατάσταση Αποκατάστασης:** Είναι η μεταβατική φάση μετά από εκτεταμένη διαταραχή ή μερική κατάρρευση, όπου έχουν διακοπεί τροφοδοσίες (είτε από το σύστημα, είτε από τους διαχειριστές) σε τμήμα των φορτίων και διεξάγονται ενέργειες επαναφοράς.



Σχήμα 21: Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Απόλυτη προτεραιότητα έχει η εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας, γεγονός που απαιτεί τη λήψη των αναγκαίων μέτρων για την επαναφορά του συστήματος είτε στην ασφαλή κατάσταση είτε τουλάχιστον στην ανασφαλή κατάσταση. Μόνο όταν πληρούνται πλήρως τα κριτήρια ασφαλείας και όλες οι μονάδες λειτουργούν εντός των ορίων τους, θέτεται ως στόχος η οικονομική λειτουργία, μέσω της ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής [15].

3.4 Στατική Ασφάλεια ΣΗΕ

Στην ανάλυση της ασφάλειας ενός ΣΗΕ σημαντικό ρόλο έχει και η μελέτη της στατικής ασφάλειας. Η στατική ασφάλεια αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να παραμείνει εντός αποδεκτών ορίων λειτουργίας μετά από μια διαταραχή, αφού περάσει το μεταβατικό φαινόμενο. Η μελέτη στατικής ασφάλειας εξετάζει αν στις νέες συνθήκες μόνιμης κατάστασης (steady-state) που προκύπτουν μετά τη διαταραχή, υπερβαίνονται όρια τάσης, ρεύματος ή φόρτισης εξοπλισμού. Αν το σύστημα μπορεί (μετά τη διαταραχή) να βρεθεί σε μια νέα ισορροπημένη κατάσταση όπου όλες οι τάσεις βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων και κανένα στοιχείο δεν υπερφορτίζεται, τότε λέμε ότι διαθέτει στατική ασφάλεια έναντι της συγκεκριμένης διαταραχής. Η στατική ασφάλεια αφορά κυρίως την τελική κατάσταση του συστήματος και διασφαλίζει ότι το σύστημα μπορεί να σταθεροποιηθεί σε λειτουργικό σημείο χωρίς παραβίαση περιορισμών. Η γενική θεώρηση

της μελέτης λαμβάνει υπόψη τα ακόλουθα κριτήρια ασφάλειας για τον προσδιορισμό των διαταραχών:

- Το Κριτήριο Ασφάλειας N-1, στο οποίο γίνεται μια απλή διακοπή οποιουδήποτε στοιχείου του συστήματος (γεννήτρια, γραμμή μεταφοράς, μετασχηματιστή).
- Το Κριτήριο Ασφάλειας N-2, στο οποίο γίνεται ταυτόχρονη διακοπή δύο στοιχείων του συστήματος. Αυτό εφαρμόζεται συνήθως σε μεγάλα συστήματα που τα κριτήρια ασφαλείας είναι αυστηρά.
- Το Κριτήριο διακοπής λειτουργίας της μεγαλύτερης γεννήτριας, στο οποίο συμβαίνει ταυτόχρονη διακοπή.

Οι διαταραχές που συμβαίνουν μπορούν να φέρουν το σύστημα σε κατάσταση ανισορροπίας και να μην υπάρχει σωστή λειτουργία του. Πραγματοποιείται η «επιλογή διαταραχών» στην οποία επιλέγονται και ιεραρχούνται οι διαταραχές που είναι σοβαρότερες και μπορούν να φέρουν το σύστημα εκτός της ασφαλούς κατάστασης. Η ιεράρχηση αυτή γίνεται μέσω των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από την ανάλυση ροής φορτίου για κάθε σενάριο και έτσι ξεκινάνε οι διαδικασίες για την καταπολέμηση της διαταραχής [15][16].

3.4.1 Ιεράρχηση Διαταραχών

Για τον παραπάνω σκοπό (ιεράρχηση διαταραχών) ορίζονται κατάλληλοι δείκτες απόδοσης (PI) που ποσοτικοποιούν την επιβάρυνση του συστήματος, ένας **δείκτης ενεργού ισχύος (PI_P)** και ένας **δείκτης τάσης (PI_V)**. Στη συνέχεια υπολογίζεται η επίδραση κάθε διαταραχής στους δείκτες αυτούς (δηλαδή η μεταβολή των δεικτικών τιμών λόγω της διακοπής μιας γραμμής ή γεννήτριας). Με βάση το μέγεθος αυτής της μεταβολής, οι διαταραχές κατατάσσονται κατά σειρά σοβαρότητας, επιτρέποντας μας να εντοπίσουμε και να επικεντρωθούμε στις πλέον κρίσιμες περιπτώσεις για περαιτέρω ανάλυση.

Ο **δείκτης ενεργού ισχύος (PI_P)** δείχνει το ποσό υπερφόρτισης των γραμμών και υπολογίζεται:

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

Όπου P_i : η ισχύς της γραμμής,

P_i^{max} : η χωρητικότητα της γραμμής,

N_L : ο αριθμός των γραμμών του συστήματος,

W : ένας μη αρνητικός παράγοντας βάρους,

n : συνάρτηση λάθους,

και $P_i^{max} = \frac{V_i \cdot V_j}{X}$,

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

X : η αντίδραση της γραμμής.

Ο δείκτης τάσης (PI_V) δείχνει μας ενημερώνει αν οι τάσεις κάποιων ζυγών είναι εκτός των επιτρεπτών ορίων και υπολογίζεται:

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

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.

Οι τάσεις των ζυγών επηρεάζονται από την παραγόμενη άεργο ισχύ των γεννητριών, ενώ ο δείκτης PI_V εκφράζει τη σοβαρότητα της διαταραχής όταν η άεργος ισχύς βρίσκεται εντός επιτρεπτών ορίων. Έτσι, ο τύπος για τον υπολογισμό του δείκτη διαμορφώνεται παίρνοντας υπόψη τη διαταραχή αυτή που γίνεται λόγω της υπέρβασης των ορίων άεργου ισχύος. Αυτός είναι:

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

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 [15][17].

Κεφάλαιο 4

Μελέτη Αξιοπιστίας

4.1 Εισαγωγή

Για την πρακτική μελέτη της αξιοπιστίας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα λογισμικά ανάλυσης συστημάτων ισχύος. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, για την προσομοίωση και την εξαγωγή αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **PowerWorld**. Το PowerWorld Simulator είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως από μηχανικούς συστημάτων, πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα για τη μελέτη συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το διαδραστικό και γραφικό του περιβάλλον επιτρέπει την εύκολη μοντελοποίηση των δικτύων, την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και την εκτέλεση σύνθετων αναλύσεων, όπως η ανάλυση ροής ισχύος, η ανάλυση σφαλμάτων, η δυναμική ανάλυση και η ανάλυση αξιοπιστίας [18][19].

4.2 Μεθοδολογία και Σύστημα Μελέτης

Ως σύστημα μελέτης επιλέχθηκε το τυποποιημένο σύστημα δοκιμών **IEEE 14-bus**, το οποίο αποτελεί διεθνές πρότυπο για την αξιολόγηση αλγορίθμων και μεθοδολογιών ανάλυσης. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. **Μοντελοποίηση Συστήματος και Ανάλυση Ροής Φορτίου:** Αρχικά, το σύστημα μοντελοποιήθηκε στο περιβάλλον του PowerWorld Simulator και εκτελέστηκε ανάλυση ροής φορτίου για τον προσδιορισμό της κατάστασης λειτουργίας του συστήματος υπό κανονικές συνθήκες.
2. **Ανάλυση Ασφάλειας (N-1 Contingency Analysis):** Στη συνέχεια, διενεργήθηκε μια πλήρης ανάλυση ασφάλειας N-1 για τον εντοπισμό των κρίσιμων διαταραχών. Για την ποσοτικοποίηση της σοβαρότητας των επιπτώσεων κάθε διαταραχής, υπολογίστηκαν οι **δείκτες ασφαλείας ενεργού ισχύος (PI_P) και τάσης (PI_V)**.

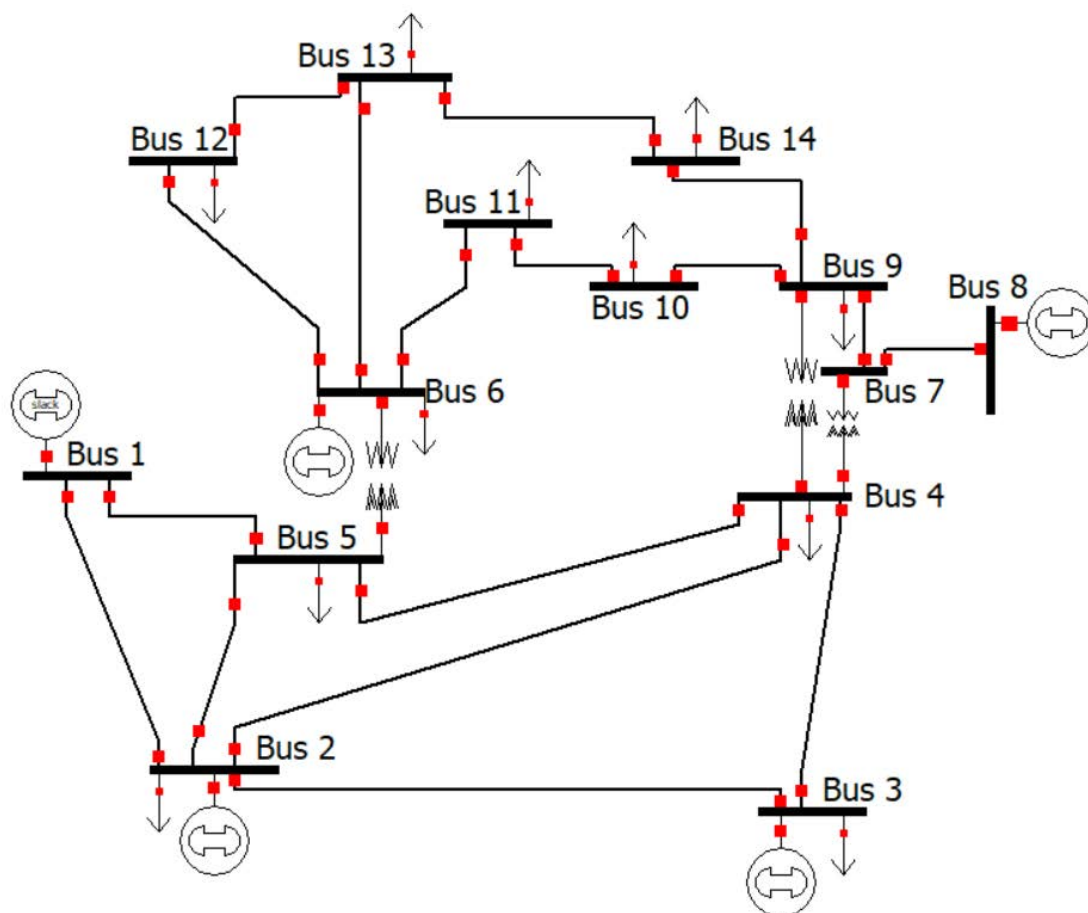
3. **Ανάλυση Επάρκειας:** Τέλος, για κάθε κρίσιμη διαταραχή, πραγματοποιήθηκε ανάλυση επάρκειας. Μέσω της διαδικασίας περικοπής φορτίου, ποσοτικοποιήθηκε η επίπτωση κάθε βλάβης και υπολογίστηκαν οι πιθανοί δείκτες αξιοπιστίας **EENS (Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργειας), LOLE (Αναμενόμενη Απώλεια Φορτίου), LOLF (Συχνότητα Απώλειας Φορτίου) και LOLP (Πιθανότητα Απώλειας Φορτίου).**

Μέσω αυτής της ολοκληρωμένης προσέγγισης, αξιολογείται τόσο η στατική ασφάλεια όσο και η μακροπρόθεσμη επάρκεια του συστήματος, βοηθώντας μας στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις δομικές του αδυναμίες [18].

4.2.1 Το Σύστημα Μελέτης

Το σύστημα **IEEE 14-bus** που φαίνεται στην Εικόνα 1 είναι το σύστημα στο οποίο γίνεται η μελέτη αξιοπιστίας. Αυτό αποτελεί μια απλοποιημένη αναπαράσταση ενός τμήματος του Αμερικανικού Δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας (American Electric Power System) και η δομή του περιλαμβάνει 14 ζυγούς, 5 μονάδες παραγωγής (γεννήτριες), 11 φορτία και 20 κλάδους (17 γραμμές μεταφοράς και 3 μετασχηματιστές).

Η ύπαρξη πολλαπλών βρόχων στο δίκτυο το καθιστά ιδανικό για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των διαταραχών αφού η ισχύς ανακατανέμεται με μη τετριμμένους τρόπους μετά από μια βλάβη και για αυτό το λόγο επιλέχθηκε για την πρακτική εφαρμογή της ανάλυσης αξιοπιστίας [18].



Εικόνα 1: Το πρότυπο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της εργασίας

Στους Πίνακες 4, 5 και 6 φαίνονται τα χαρακτηριστικά όλων των γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών (R , X , B), τα χαρακτηριστικά φορτίων του συστήματος (P , Q) καθώς και οι συνθήκες του συστήματος με την ανάλυση ροής φορτίου, έχοντας ως βάση ισχύος τα 100 MVA:

Πίνακας 4: Τερματικές συνθήκες για τις γεννήτριες

Bus	V [kV]	δ [deg]	P [pu]	Q [pu]
1	146.28	0	2.3239	-0.1655
2	144.21	-4.9826	0.4000	0.4356
3	139.38	-12.7250	0.0000	0.2508
6	147.66	-14.2209	0.0000	0.1273
8	150.42	-13.3596	0.0000	0.1762

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών του συστήματος

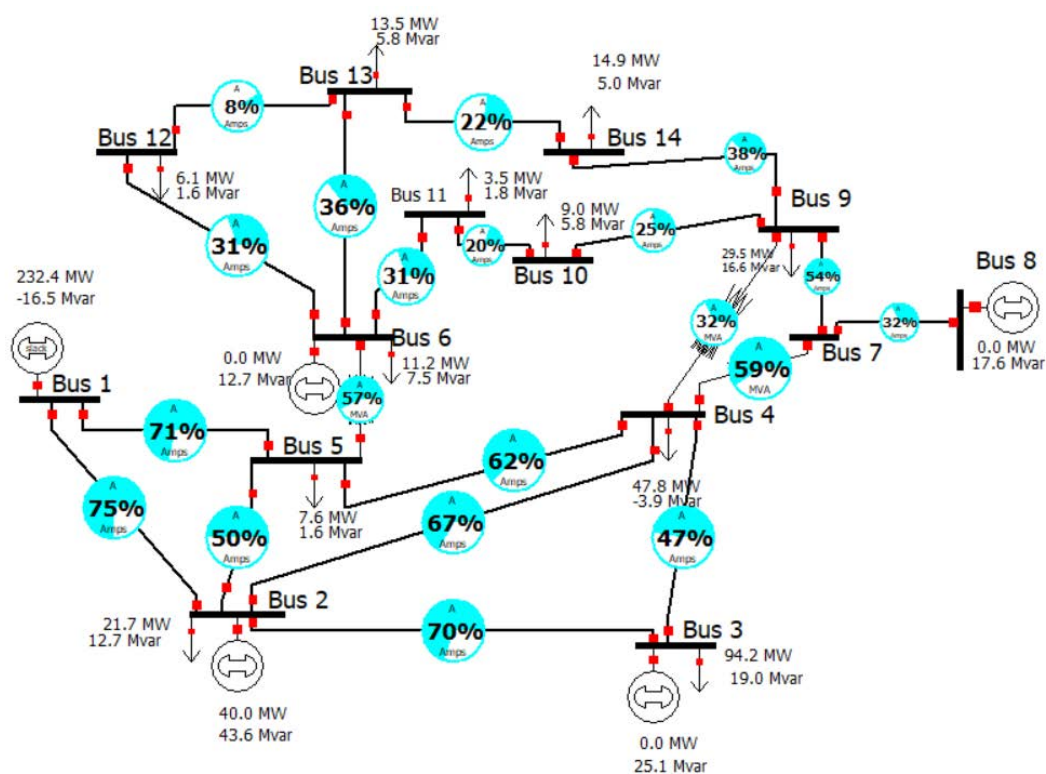
Line		R [pu/m]	X [pu/m]	B [pu/m]
From Bus	To Bus			
1	2	0.0194	0.0592	0.0528
1	5	0.054	0.223	0.0492
2	3	0.047	0.198	0.0438
2	4	0.0581	0.176	0.034
2	5	0.057	0.174	0.0346
3	4	0.067	0.171	0.0128
4	5	0.0134	0.0421	0.0001
6	11	0.095	0.199	0.0001
6	12	0.123	0.256	0.0001
6	13	0.0662	0.1302	0.0001
7	8	0.0001	0.176	0.0001
7	9	0.0001	0.11	0.0001
9	10	0.0318	0.0845	0.0001
9	14	0.127	0.27	0.0001
10	11	0.0821	0.192	0.0001
12	13	0.221	0.2	0.0001
13	14	0.171	0.348	0.0001
Transformer				
5	6	0.0001	0.252	0.0001
4	7	0.0001	0.2091	0.0001
4	9	0.0001	0.5562	0.0001

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά φορτίων του συστήματος

Bus	P [pu]	Q [pu]
2	0.217	0.127
3	0.942	0.19
4	0.478	-0.039
5	0.076	0.016

6	0.112	0.075
9	0.295	0.166
10	0.09	0.058
11	0.035	0.018
12	0.061	0.016
13	0.135	0.058
14	0.149	0.05

Με την επίλυση της ροής φορτίου, το σύστημα διαμορφώνεται όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 2 [18][19][20]:



Εικόνα 2: Το πρότυπο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της εργασίας με εκτέλεση ροής φορτίου

4.2.2 Βασικές Παραδοχές Μελέτης

Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση και ο υπολογισμός των πιθανοτικών δεικτών αξιοπιστίας, πρέπει να ορίσουμε τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά κάθε στοιχείου του δικτύου υπό συνθήκες βλάβης. Δεδομένου ότι το σύστημα IEEE 14-bus είναι ένα τυποποιημένο μοντέλο, οι παράμετροι αυτές δεν είναι πάντοτε διαθέσιμες και πρέπει να γίνουν παραδοχές βασισμένες σε τυπικές τιμές που βρίσκονται στη διεθνή βιβλιογραφία και τα βιομηχανικά πρότυπα.

Οι βασικές παραδοχές που υιοθετήθηκαν για την μελέτη αυτή, τόσο για τους δείκτες επάρκειας όσο και για τους δείκτες ασφάλειας φαίνονται στον Πίνακα 7 [11].

Πίνακας 7: Βασικές Παραδοχές

Παράμετρος	Τιμή	Αιτιολόγηση
Ρυθμός Βλαβών Γραμμής (λ)	0.5 βλάβες/έτος	Τυπική τιμή βιβλιογραφίας [11]
Χρόνος Επισκευής Γραμμής (r)	10 ώρες	Τυπική τιμή βιβλιογραφίας [11]
Ρυθμός Βλαβών Μ/Τ (λ)	0.1 βλάβες/έτος	Τυπική τιμή βιβλιογραφίας [11]
Χρόνος Επισκευής Μ/Τ (r)	20 ώρες	Τυπική τιμή βιβλιογραφίας [11]
Παράγοντας Βάρους (W)	1	Ίση σπουδαιότητα για όλους του κλάδους
Εκθέτης Σφάλματος (n)	1	Τυπική τετραγωνική ποινή για τις υπερφορτώσεις

4.2.3 Ανάλυση Ασφάλειας

Το πρώτο στάδιο της μελέτης περιλαμβάνει την αξιολόγηση της στατικής ασφάλειας του συστήματος IEEE 14-bus. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε μια πλήρης ανάλυση ενδεχομένων (contingency analysis) βάσει του κριτηρίου N-1, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 8. Εξετάστηκαν όλες οι μεμονωμένες διαταραχές που αφορούν την απώλεια γραμμών μεταφοράς, μετασχηματιστών και μονάδων παραγωγής, προκειμένου να

εντοπιστούν οι κρίσιμες βλάβες που οδηγούν το σύστημα σε παραβίαση των ορίων λειτουργίας του.

Πίνακας 8: Ανάλυση Ενδεχομένων μέσα από το PowerWorld

	Name	Skip	Category	Processed	Solved	Include Remedial Actions	Screen Allow	Post-CTG AUX	Islanded Load	Islanded Gen	Global Actions	Transient Actions	Remedial Actions	Custom Monitor Violation	Violation	Max Branch %
1	L_000001Bus1-000002Bus2C1	NO		YES	NO	YES	NO	none				0	0	0	Unsolved	Unsolved
2	L_000001Bus1-000005Bus5C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	2
3	L_000002Bus2-000003Bus3C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	3
4	L_000002Bus2-000004Bus4C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
5	L_000002Bus2-000005Bus5C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
6	L_000003Bus3-000004Bus4C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
7	L_000004Bus4-000005Bus5C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	1
8	T_000004Bus4-000007Bus7C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
9	T_000004Bus4-000009Bus9C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
10	T_000005Bus5-000006Bus6C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	6
11	L_000006Bus6-000011Bus11C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
12	L_000006Bus6-000012Bus12C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
13	L_000006Bus6-000013Bus13C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
14	L_000007Bus7-000008Bus8C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
15	L_000007Bus7-000009Bus9C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
16	L_000009Bus9-000010Bus10C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
17	L_000009Bus9-000014Bus14C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
18	L_000010Bus10-000011Bus11C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
19	L_000012Bus12-000013Bus13C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
20	L_000013Bus13-000014Bus14C1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
21	G_000001Bus1U1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
22	G_000002Bus2U1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
23	G_000003Bus3U1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
24	G_000006Bus6U1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0
25	G_000008Bus8U1	NO		YES	YES	YES	NO	none				0	0	0	0	0

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 8 πέντε διαταραχές οδηγούν σε παραβιάσεις, καθιστώντας το σύστημα **μη N-1 ασφαλές**. Για την ποσοτική αξιολόγηση και την ιεράρχηση της σοβαρότητας αυτών των κρίσιμων βλαβών, υπολογίστηκε ο **δείκτης ασφάλειας ενεργού ισχύος (PI_P)** για κάθε περίπτωση.

Για τον υπολογισμό του δείκτη, χρησιμοποιήθηκε ο γενικός τύπος της βιβλιογραφίας:

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

Για τις ανάγκες της παρούσας στατικής ανάλυσης ασφάλειας, όπου το ενδιαφέρον εστιάζεται στις θερμικές υπερφορτώσεις, ως όριο ισχύος P_i^{max} ορίστηκε το θερμικό όριο (Rate A) του κάθε κλάδου. Επιπλέον, τέθηκαν οι τυπικές παραδοχές από τον Πίνακα7: $W=1$ και $n=1$. Ο παράγοντας βάρους τέθηκε ίσος με τη μονάδα ($W=1$), καθώς σε ένα σύστημα δοκιμών όπου δεν υπάρχουν πληροφορίες για την κρισιμότητα των φορτίων, όλοι οι κλάδοι θεωρούνται εξίσου σημαντικοί. Ο εκθέτης της συνάρτησης τέθηκε ίσος με $n=1$, οδηγώντας σε έναν τελικό τετραγωνικό εκθέτη ($2n=2$). Η τετραγωνική αυτή συνάρτηση επιλέγεται συχνά σε τέτοιες αναλύσεις, καθώς δίνει δυσανάλογα μεγαλύτερο βάρος σε

μεγάλες υπερφορτώσεις, αποτυπώνοντας έτσι με μεγαλύτερη ακρίβεια τη μη-γραμμική αύξηση του κινδύνου.

Έτσι, ο τύπος γίνεται πια:

$$PI_P = \sum_{i=1}^{N_L} \frac{1}{2} * \left(\frac{Poή MVA}{Όριο MVA} \right)^2$$

Κατά την ανάλυση, δεν παρατηρήθηκαν παραβιάσεις των προκαθορισμένων ορίων τάσης (0.90-1.10 p.u.) για τις τέσσερις επιλύσιμες κρίσιμες διαταραχές. Ωστόσο, για την κρισιμότερη βλάβη (απώλεια της γραμμής 1-2), το σύστημα δεν μπόρεσε να συγκλίνει σε λύση υποδεικνύοντας ένα σενάριο **κατάρρευσης τάσης (voltage collapse)**. Αυτό αποτελεί την ακραία μορφή παραβίασης της ευστάθειας τάσης. Άρα, ο **δείκτης τάσης (PI_V) είναι μηδενικός για τις τέσσερις επιλύσιμες περιπτώσεις**, ενώ για την περίπτωση της κατάρρευσης, η σοβαρότητα της παραβίασης καθιστά τον δείκτη μη υπολογίσιμο, αφού βρίσκεται σε μια κατάσταση ολικής αστάθειας.

Μέσω του Branches State σε κάθε μία περίπτωση βλάβης που βλέπουμε στον Πίνακα 9 υπολογίζουμε τον δείκτη ενεργούς ισχύος παίρνοντας τις στήλες MVA From και LimMVA στις γραμμές που είναι υπερφορτωμένες. Έτσι έχουμε:

Στην περίπτωση **απώλειας της γραμμής 1-2**, έχουμε κατάρρευση συστήματος (Unsolved) και συμπεραίνουμε ότι αυτή η ενέργεια οδηγεί σε αστάθεια άρα δεν υπολογίζεται ο δείκτης.

Στην περίπτωση **απώλειας του μετασχηματιστή ανάμεσα στους ζυγούς 5-6**, έχουμε τις παρακάτω υπερφορτώσεις:

Πίνακας 9: Branches State στην απώλεια Μ/Σ 5-6

	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)
1	1	Bus 1	2	Bus 2	1	Closed	Line	NO	161.5	-21.5	162.9	200.0	81.5
2	1	Bus 1	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	73.9	1.8	74.0	100.0	74.0
3	2	Bus 2	3	Bus 3	1	Closed	Line	NO	76.0	3.3	76.1	100.0	76.1
4	2	Bus 2	4	Bus 4	1	Closed	Line	NO	61.6	-0.7	61.6	80.0	77.0
5	2	Bus 2	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	37.7	-0.7	37.7	80.0	47.1
6	3	Bus 3	4	Bus 4	1	Closed	Line	NO	-20.7	5.5	21.4	50.0	43.7
7	4	Bus 4	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	-99.3	8.7	99.7	100.0	100.7
8	4	Bus 4	7	Bus 7	1	Closed	Transforme	YES	57.4	-5.1	57.6	50.0	117.0
9	4	Bus 4	9	Bus 9	1	Closed	Transforme	YES	32.7	3.2	32.9	50.0	65.8
10	5	Bus 5	6	Bus 6	1	Open	Transforme	YES	0.0	0.0	0.0	80.0	0.0
11	6	Bus 6	11	Bus 11	1	Closed	Line	NO	-19.5	5.4	20.2	25.0	81.4
12	6	Bus 6	12	Bus 12	1	Closed	Line	NO	4.3	3.3	5.4	25.0	21.7
13	6	Bus 6	13	Bus 13	1	Closed	Line	NO	3.9	7.9	8.8	50.0	17.5
14	7	Bus 7	8	Bus 8	1	Closed	Line	NO	-0.0	-21.9	21.9	50.0	45.3
15	7	Bus 7	9	Bus 9	1	Closed	Line	NO	57.4	10.4	58.3	50.0	116.6
16	9	Bus 9	10	Bus 10	1	Closed	Line	NO	33.1	4.9	33.5	25.0	133.9
17	9	Bus 9	14	Bus 14	1	Closed	Line	NO	27.5	3.9	27.8	25.0	111.1
18	10	Bus 10	11	Bus 11	1	Closed	Line	NO	23.8	-1.8	23.8	20.0	119.2
19	12	Bus 12	13	Bus 13	1	Closed	Line	NO	-1.8	1.6	2.4	20.0	12.0
20	13	Bus 13	14	Bus 14	1	Closed	Line	NO	-11.4	3.5	12.0	25.0	48.3

Από τον Πίνακα 9 παίρνουμε τις τιμές που έχουμε αναφέρει για κάθε μια υπερφόρτωση και στην συνέχεια τις αθροίζουμε για να βρούμε την τιμή του δείκτη ενεργού ισχύος για αυτή τη βλάβη. Μετά από υπολογισμούς, η τιμή του $PI_P = 3.5677$.

Ομοίως εργαζόμαστε και για τις υπόλοιπες 3 βλάβες (απώλειας της γραμμής μεταφοράς ανάμεσα στους ζυγούς 2-3, 1-5 και 4-5) που φαίνονται στους Πίνακες 10, 11 και 12:

Πίνακας 10: Branches State στην απώλεια γραμμής 2-3

	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfrmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)
1	1	Bus 1	2	Bus 2	1	Closed	Line	NO	148.3	-18.4	149.5	200.0	74.7
2	1	Bus 1	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	95.0	9.1	95.4	100.0	95.4
3	2	Bus 2	3	Bus 3	1	Open	Line	NO	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0
4	2	Bus 2	4	Bus 4	1	Closed	Line	NO	93.6	2.2	93.7	80.0	117.1
5	2	Bus 2	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	69.1	2.9	69.2	80.0	86.5
6	3	Bus 3	4	Bus 4	1	Closed	Line	NO	-94.2	21.0	96.5	50.0	202.4
7	4	Bus 4	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	-100.9	17.3	102.4	100.0	103.1
8	4	Bus 4	7	Bus 7	1	Closed	Transforme	YES	26.1	-14.7	30.0	50.0	61.8
9	4	Bus 4	9	Bus 9	1	Closed	Transforme	YES	14.9	-2.4	15.1	50.0	30.7
10	5	Bus 5	6	Bus 6	1	Closed	Transforme	YES	47.3	6.3	47.7	80.0	59.6
11	6	Bus 6	11	Bus 11	1	Closed	Line	NO	9.3	4.9	10.5	25.0	41.9
12	6	Bus 6	12	Bus 12	1	Closed	Line	NO	8.1	2.6	8.5	25.0	34.0
13	6	Bus 6	13	Bus 13	1	Closed	Line	NO	18.8	7.9	20.4	50.0	40.7
14	7	Bus 7	8	Bus 8	1	Closed	Line	NO	-0.0	-22.5	22.5	50.0	46.6
15	7	Bus 7	9	Bus 9	1	Closed	Line	NO	26.1	5.9	26.8	50.0	53.6
16	9	Bus 9	10	Bus 10	1	Closed	Line	NO	3.4	3.0	4.5	25.0	18.0
17	9	Bus 9	14	Bus 14	1	Closed	Line	NO	8.2	2.8	8.6	25.0	34.6
18	10	Bus 10	11	Bus 11	1	Closed	Line	NO	-5.6	-2.8	6.3	20.0	31.8
19	12	Bus 12	13	Bus 13	1	Closed	Line	NO	1.9	0.9	2.1	20.0	10.4
20	13	Bus 13	14	Bus 14	1	Closed	Line	NO	6.9	2.5	7.4	25.0	29.4

Πίνακας 11: Branches State στην απώλεια γραμμής 1-5

	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfrmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)
1	1	Bus 1	2	Bus 2	1	Closed	Line	NO	240.0	-21.8	241.0	200.0	120.5
2	1	Bus 1	5	Bus 5	1	Open	Line	NO	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0
3	2	Bus 2	3	Bus 3	1	Closed	Line	NO	87.2	-2.3	87.2	100.0	87.2
4	2	Bus 2	4	Bus 4	1	Closed	Line	NO	83.3	-4.8	83.4	80.0	104.3
5	2	Bus 2	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	77.9	-2.0	77.9	80.0	97.4
6	3	Bus 3	4	Bus 4	1	Closed	Line	NO	-10.4	6.8	12.4	50.0	26.1
7	4	Bus 4	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	-24.7	14.3	28.5	100.0	28.5
8	4	Bus 4	7	Bus 7	1	Closed	Transforme	YES	29.2	-13.3	32.1	50.0	66.0
9	4	Bus 4	9	Bus 9	1	Closed	Transforme	YES	16.7	-2.0	16.8	50.0	34.1
10	5	Bus 5	6	Bus 6	1	Closed	Transforme	YES	42.3	4.1	42.5	80.0	53.1
11	6	Bus 6	11	Bus 11	1	Closed	Line	NO	6.2	5.2	8.1	25.0	32.3
12	6	Bus 6	12	Bus 12	1	Closed	Line	NO	7.7	2.7	8.2	25.0	32.6
13	6	Bus 6	13	Bus 13	1	Closed	Line	NO	17.2	8.0	19.0	50.0	38.0
14	7	Bus 7	8	Bus 8	1	Closed	Line	NO	-0.0	-20.5	20.5	50.0	42.3
15	7	Bus 7	9	Bus 9	1	Closed	Line	NO	29.2	5.1	29.7	50.0	59.3
16	9	Bus 9	10	Bus 10	1	Closed	Line	NO	6.4	2.6	6.9	25.0	27.5
17	9	Bus 9	14	Bus 14	1	Closed	Line	NO	10.1	2.6	10.4	25.0	41.6
18	10	Bus 10	11	Bus 11	1	Closed	Line	NO	-2.7	-3.2	4.2	20.0	21.0
19	12	Bus 12	13	Bus 13	1	Closed	Line	NO	1.5	1.0	1.8	20.0	9.0
20	13	Bus 13	14	Bus 14	1	Closed	Line	NO	5.0	2.8	5.7	25.0	22.9

Πίνακας 12: Branches State στην απώλεια γραμμής 4-5

	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfrmr	MW From	Mvar From	MVA From	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)
1	1	Bus 1	2	Bus 2	1	Closed	Line	NO	178.0	-22.8	179.4	200.0	89.7
2	1	Bus 1	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	57.1	5.7	57.4	100.0	57.4
3	2	Bus 2	3	Bus 3	1	Closed	Line	NO	89.2	1.5	89.2	100.0	89.2
4	2	Bus 2	4	Bus 4	1	Closed	Line	NO	89.0	-6.5	89.2	80.0	111.6
5	2	Bus 2	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	12.6	8.4	15.1	80.0	21.3
6	3	Bus 3	4	Bus 4	1	Closed	Line	NO	-8.5	0.7	8.5	50.0	17.4
7	4	Bus 4	5	Bus 5	1	Open	Line	NO	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0
8	4	Bus 4	7	Bus 7	1	Closed	Transforme	YES	18.1	-9.9	20.6	50.0	42.1
9	4	Bus 4	9	Bus 9	1	Closed	Transforme	YES	10.4	-0.0	10.4	50.0	20.7
10	5	Bus 5	6	Bus 6	1	Closed	Transforme	YES	60.3	14.4	62.0	80.0	77.5
11	6	Bus 6	11	Bus 11	1	Closed	Line	NO	17.3	1.6	17.3	25.0	69.4
12	6	Bus 6	12	Bus 12	1	Closed	Line	NO	9.0	2.1	9.3	25.0	37.0
13	6	Bus 6	13	Bus 13	1	Closed	Line	NO	22.8	6.3	23.7	50.0	47.4
14	7	Bus 7	8	Bus 8	1	Closed	Line	NO	-0.0	-19.9	19.9	50.0	40.9
15	7	Bus 7	9	Bus 9	1	Closed	Line	NO	18.1	9.1	20.3	50.0	40.5
16	9	Bus 9	10	Bus 10	1	Closed	Line	NO	-4.4	6.9	8.2	25.0	32.8
17	9	Bus 9	14	Bus 14	1	Closed	Line	NO	3.3	5.4	6.4	25.0	25.5
18	10	Bus 10	11	Bus 11	1	Closed	Line	NO	-13.4	1.1	13.4	20.0	67.7
19	12	Bus 12	13	Bus 13	1	Closed	Line	NO	2.8	0.3	2.8	20.0	14.2
20	13	Bus 13	14	Bus 14	1	Closed	Line	NO	11.8	0.1	11.8	25.0	47.3

Από τους Πίνακες 10, 11 και 12 υπολογίσαμε τις τιμές του δείκτη ενεργού ισχύος κάθε φορά και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

Πίνακας 13: Δείκτης ενεργού ισχύος (PI_P)

Νούμερο Βλάβης	Περιγραφή Βλάβης	Δείκτης Ασφάλειας Ενεργού Ισχύος (PI_P)	Λεπτομέρειες για την βλάβη
1	Απώλεια Γραμμής 1-2	Κατάρρευση Συστήματος	Η διαταραχή αυτή οδηγεί σε αστάθεια.
10	Απώλεια Μ/Σ 5-6	3.5677	Η σοβαρότερη βλάβη από πλευράς (PI_P).
3	Απώλεια Γραμμής 2-3	3.0727	Προκαλεί την υψηλότερη μεμονωμένη υπερφόρτωση (202.4%).
2	Απώλεια Γραμμής 1-5	1.2694	Προκαλεί δύο υπερφορτώσεις.
7	Απώλεια Γραμμής 4-5	0.6216	Προκαλεί μία υπερφόρτωση.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα, η απώλεια της γραμμής 1-2 αποτελεί την αχίλλειο πτέρνα του συστήματος, καθώς η κρισιμότητά της είναι τέτοια που οδηγεί σε αδυναμία σύγκλισης της ροής φορτίου. Από τις υπόλοιπες διαταραχές που προκαλούν θερμικές υπερφορτώσεις, η απώλεια του μετασχηματιστή 5-6 παρουσιάζει τον υψηλότερο δείκτη PI_P , καθώς προκαλεί ένα εκτεταμένο ντόμινο πέντε ταυτόχρονων υπερφορτώσεων σε διάφορα σημεία του δικτύου [11][18][19].

4.2.4 Αποτελέσματα Ανάλυσης Επάρκειας & Δείκτες Επάρκειας

Μετά τον εντοπισμό των πέντε κρίσιμων N-1 διαταραχών στο προηγούμενος, το επόμενο στάδιο είναι η ανάλυση της επάρκειας του συστήματος. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων κάθε κρίσιμης βλάβης, μέσω του υπολογισμού της

απαιτούμενης ενέργειας αποκατάστασης για την επαναφορά του συστήματος σε μια ασφαλή κατάσταση λειτουργίας. Ως μέτρο αποκατάστασης χρησιμοποιήθηκε **η μέθοδος της περικοπής φορτίου (load shedding)**.

Για κάθε μία από τις πέντε κρίσιμες βλάβες, προσομοιώθηκε η κατάσταση του συστήματος μετά τη διαταραχή και μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας υπολογίστηκε η ελάχιστη απαιτούμενη περικοπή ισχύος (C_i) σε MW που ήταν αναγκαία για την εξάλειψη όλων των παραβιάσεων των ορίων λειτουργίας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην πιο κρίσιμη διαταραχή - την απώλεια της γραμμής 1-2 - η οποία οδηγούσε σε κατάρρευση του συστήματος.

Ο υπολογισμός των θεμελιωδών πιθανοτικών δεικτών επάρκειας (LOLP, LOLE, EENS) γίνεται με βάση την περικοπή ισχύος (C_i) και των άλλων παραδοχών που θέσαμε στον Πίνακα 7.

Έτσι έχουμε για την κάθε βλάβη τους παρακάτω υπολογισμούς:

Ο δείκτης LOLP είναι ουσιαστικά η μη διαθεσιμότητα του στοιχείου που αστοχεί (Unavailability, P_i).

Υπολογίζεται ως εξής: $LOLP = P_i = \frac{\lambda \cdot r}{8760}$.

Άρα για τις γραμμές μεταφοράς είναι $LOLP_{\text{γραμμής}} = P_i = \frac{0.5 \cdot 10}{8760} = \frac{5}{8760} = \sim 0.00057$.

Ενώ για τους μετασχηματιστές είναι $LOLP_{M/\Sigma} = P_i = \frac{0.1 \cdot 20}{8760} = \frac{2}{8760} = \sim 0.00023$.

Το συνολικό LOLP του συστήματος είναι το άθροισμα των LOLP από όλες τις κρίσιμες βλάβες.

Ο δείκτης LOLE ποσοτικοποιεί την αναμενόμενη χρονική διάρκεια (σε ώρες ανά έτος (hours/year)) κατά την οποία η διαθέσιμη παραγωγική ισχύς του συστήματος δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση φορτίου. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται:

$$LOLE_{\text{ώρες/έτος}} = LOLP * 8760 = P_i * 8760$$

Οπότε, με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα έχουμε:

$$\text{Για τις γραμμές : } LOLE_{\text{ώρες/έτος}} = 0.00057 * 8760 = 5 \frac{\text{ώρες}}{\text{έτος}}$$

$$\text{και για τους M/Σ : } LOLE_{\text{ώρες/έτος}} = 0.00023 * 8760 = 2 \frac{\text{ώρες}}{\text{έτος}}$$

Το συνολικό LOLE του συστήματος είναι και εδώ το άθροισμα των LOLE από τις κρίσιμες βλάβες.

Ο δείκτης **LOLF** συμπληρώνει τους δείκτες LOLP και LOLE και η μονάδα μέτρησης του είναι περιστατικά (βλάβες) ανά έτος. Υπολογίζεται και αυτός με την σειρά του:

$LOLF_i = \lambda_i$, οπότε είναι για τις γραμμές μεταφοράς και τους Μ/Σ αντίστοιχα,

$$LOLF_{\text{γραμμής}} = 0.5 \frac{\text{περιστατικά}}{\text{έτος}} \text{ και } LOLF_{\text{Μ/Σ}} = 0.1 \frac{\text{περιστατικά}}{\text{έτος}}.$$

Όπως και στους προηγούμενους δείκτες, έτσι και **ο συνολικός LOLF είναι το άθροισμα των δεικτών LOLF** από τις βλάβες.

Ο τελευταίος από τους βασικούς δείκτες που υπολογίζουμε είναι **ο δείκτης EENS**. Αυτός υπολογίζεται από τον τύπο:

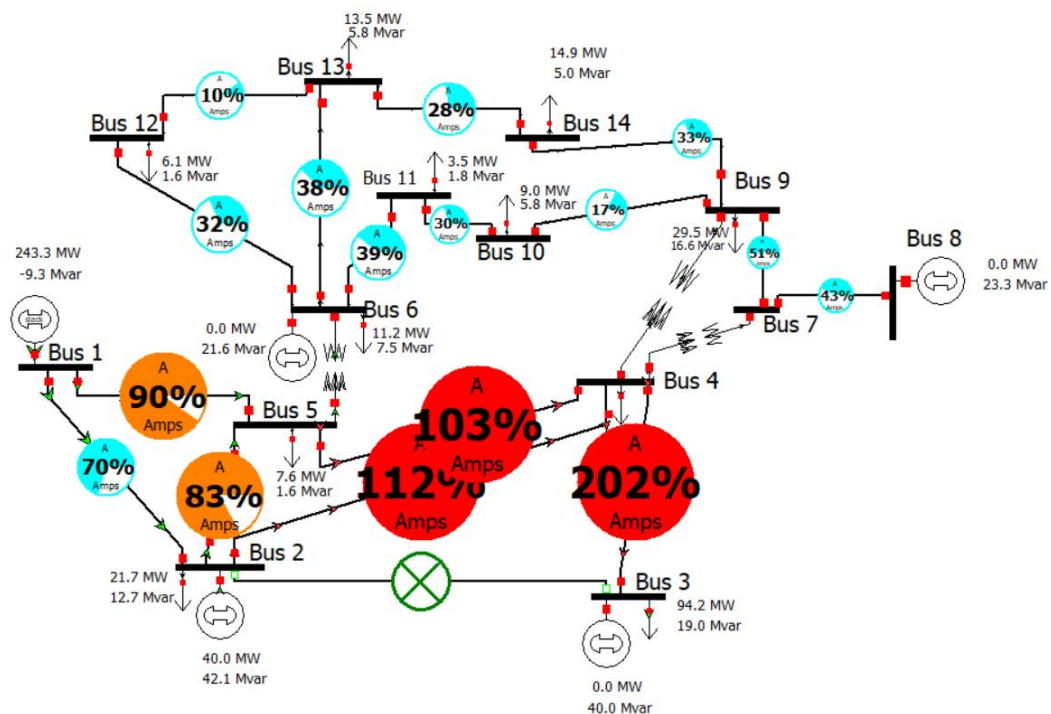
$$EENS_i = C_i * LOLE_i = C_i * P_i * 8760$$

όπου C_i (Curtailed Power): Η ισχύς σε MW που περικόπτεται για τη συγκεκριμένη βλάβη. Αυτή είναι η τιμή που θα υπολογίσουμε μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας στο PowerWorld.

Ο συνολικός EENS του συστήματος είναι το άθροισμα των EENS όλων των κρίσιμων διαταραχών. Επειδή ο EENS αποτυπώνει και το κόστος της μη παρεχόμενης ενέργειας, αποτελεί τον πιο σημαντικό δείκτη για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με επενδύσεις για την ενίσχυση του δικτύου.

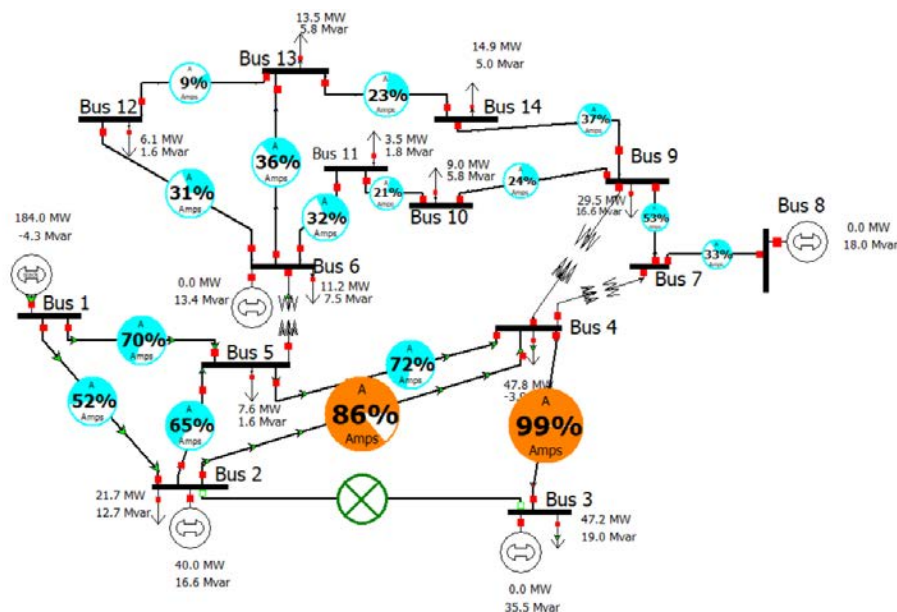
Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου φορτίου αποκοπής (C_i) για κάθε βλάβη, έχουμε:

Η βλάβη #3 (που συμβαίνει κατά την αποκοπή της γραμμής 2-3) προκαλεί υπερφόρτωση 202,4% και όταν συμβαίνει αυτή η βλάβη το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση που βλέπουμε στην Εικόνα 3:



Εικόνα 3: Επίλυση χωρίς την ΓΜ 2-3

Για να έρθει το ρεύμα πίσω στα όρια των γραμμών πρέπει να αποκόψουμε κάποιο φορτίο. Μετά από πολλές δοκιμές, η βέλτιστη περικοπή φορτίου είναι η μείωση του φορτίου του ζυγού 3 από 94,2 MW σε 47,2 MW. Αυτό επιφέρει **περικοπή 47 MW**, το οποίο είναι το C_3 και το σύστημα γίνεται όπως στην Εικόνα 4.

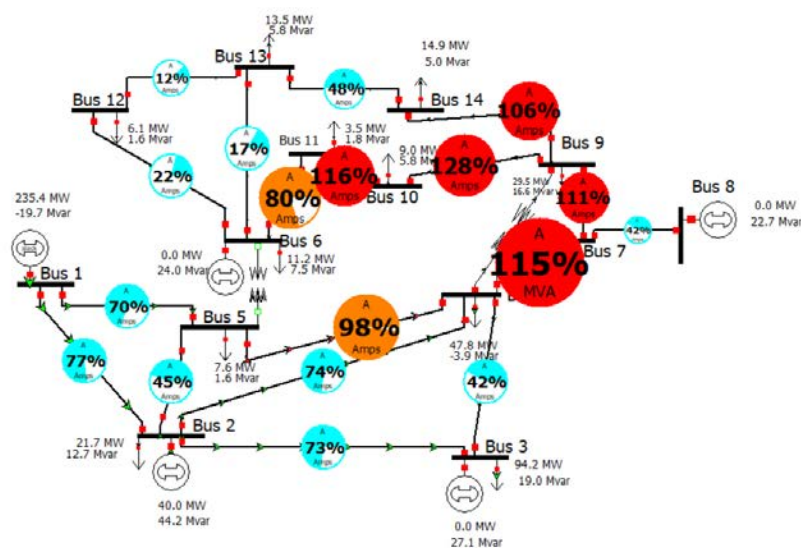


Εικόνα 4: Η βλάβη #3 μετά την περικοπή φορτίου

Επομένως, μπορούμε να υπολογίσουμε πλέον το EENS και είναι:

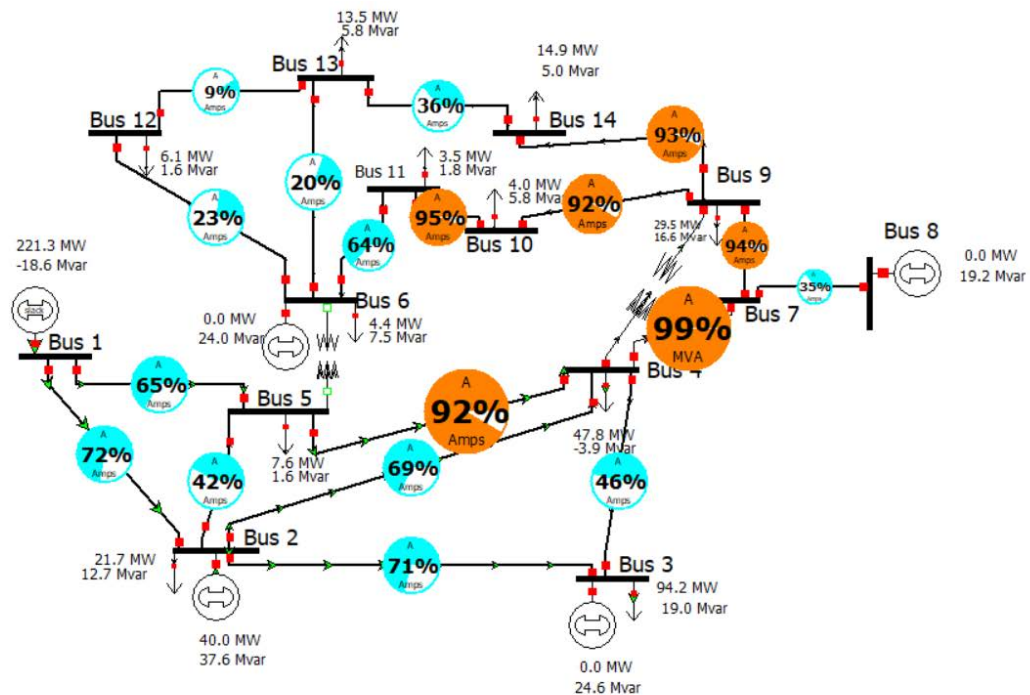
$$EENS_3 = C_3 * LOLE_3 = 47 * P_3 * 8760 = 234,68 \frac{MWh}{έτος}.$$

Ομοίως για την βλάβη #10 (πρόβλημα στον Μ/Σ 5-6) προκαλεί υπερφόρτωση 133.9% και όταν συμβαίνει αυτή η βλάβη το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση που φαίνεται στην Εικόνα 5:



Εικόνα 5: Επίλυση χωρίς τον Μ/Σ 5-6

Με τον ίδιο τρόπο βρήκαμε ότι η βέλτιστη περικοπή φορτίου είναι από το φορτίο του ζυγού 6 με 6,8 MW (από 11,2 MW σε 4,4 MW) και από το φορτίο του ζυγού 10 με 5 MW (από 9 MW σε 4 MW). Άρα η συνολική περικοπή C_{10} είναι **11,8 MW** και το σύστημα γίνεται όπως στην Εικόνα 6.

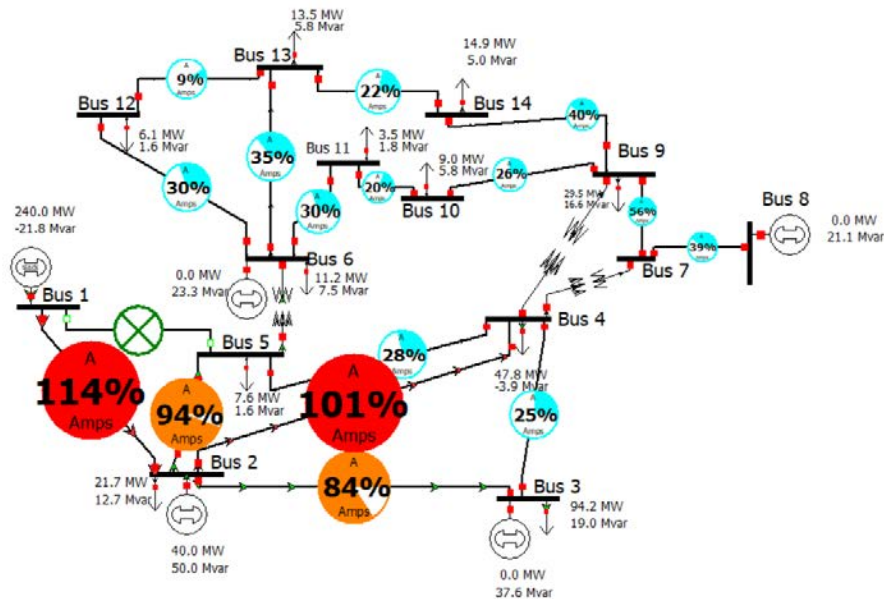


Εικόνα 6: Η βλάβη #10 μετά την περικοπή φορτίου

Επομένως, μπορούμε να υπολογίσουμε πλέον τον EENS και είναι:

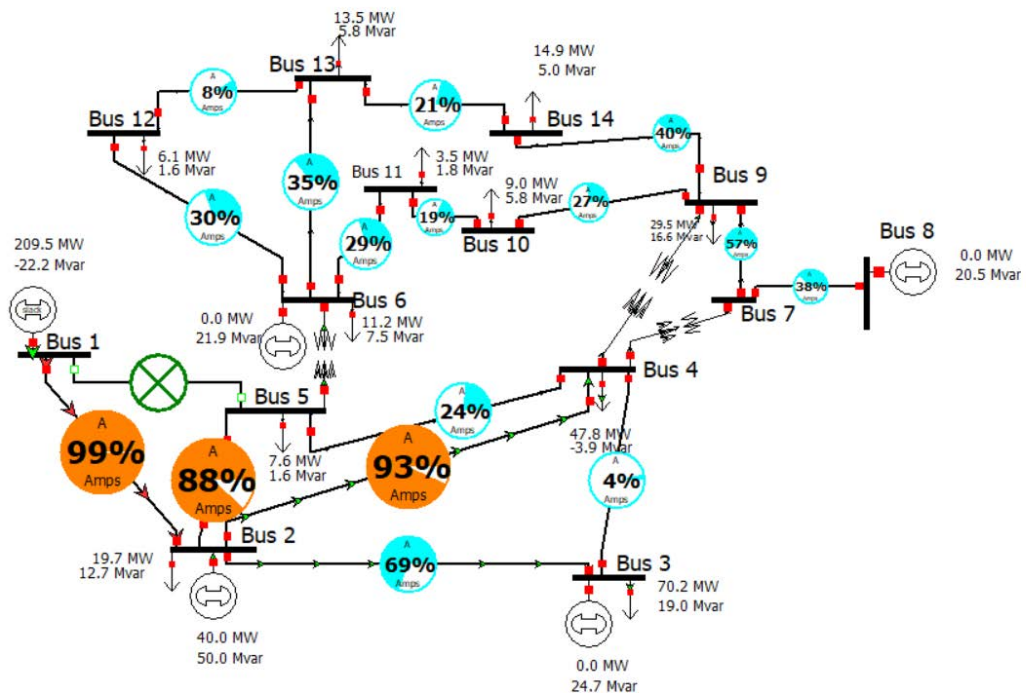
$$EENS_{10} = C_{10} * LOLE_{10} = 11,2 * P_{10} * 8760 = 22,57 \frac{MWh}{\text{έτος}}.$$

Με τον ίδιο τρόπο ασχολούμαστε και με τις υπόλοιπες βλάβες. Σειρά έχει η βλάβη #2 (πρόβλημα κατά την αποκοπή της γραμμής 1-5), η οποία προκαλεί υπερφόρτωση 120.5% και το σύστημα κατά τη διάρκεια της βλάβης διαμορφώνεται όπως στην Εικόνα 7:



Εικόνα 7: Επίλυση χωρίς την ΓΜ 1-5

Μέσω του PowerWorld βρίσκουμε ότι η βέλτιστη περικοπή φορτίου είναι από το φορτίο του ζυγού 2 με 2 MW (από 21,7 MW σε 19,7 MW) και από το φορτίο του ζυγού 3 με 24 MW (από 94,2 MW σε 70,2 MW). Άρα η συνολική περικοπή C_2 είναι 26 MW και το σύστημα γίνεται όπως στην Εικόνα 8.

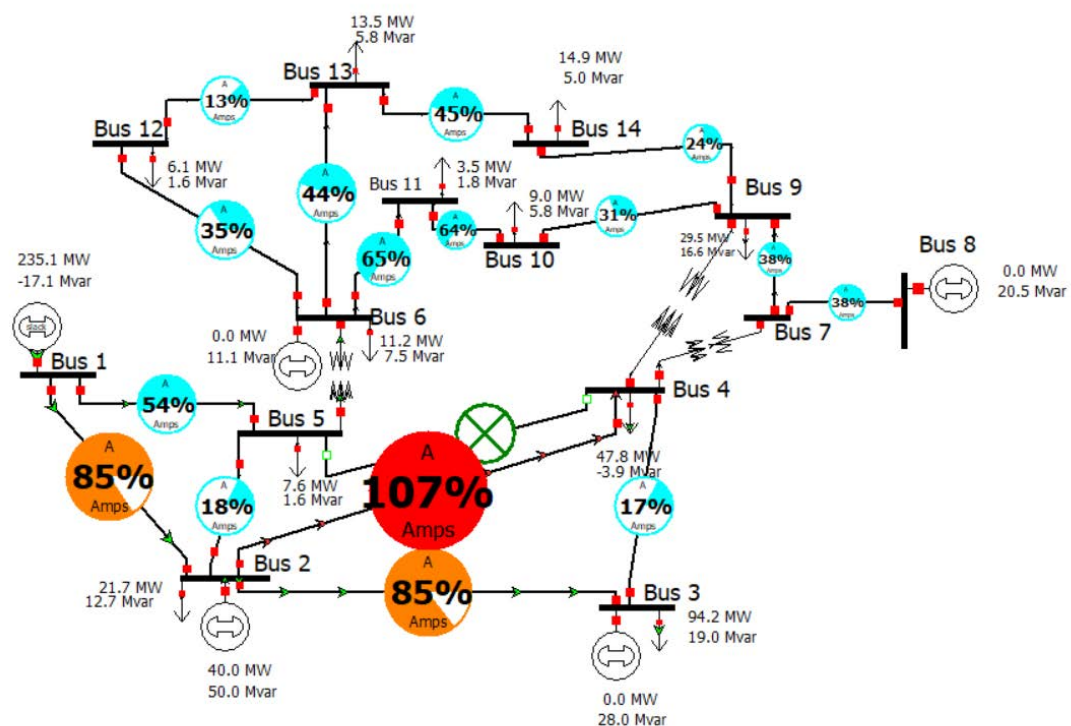


Εικόνα 8: Η βλάβη #2 μετά την περικοπή φορτίου

Έτσι, υπολογίζουμε τον EENS και είναι:

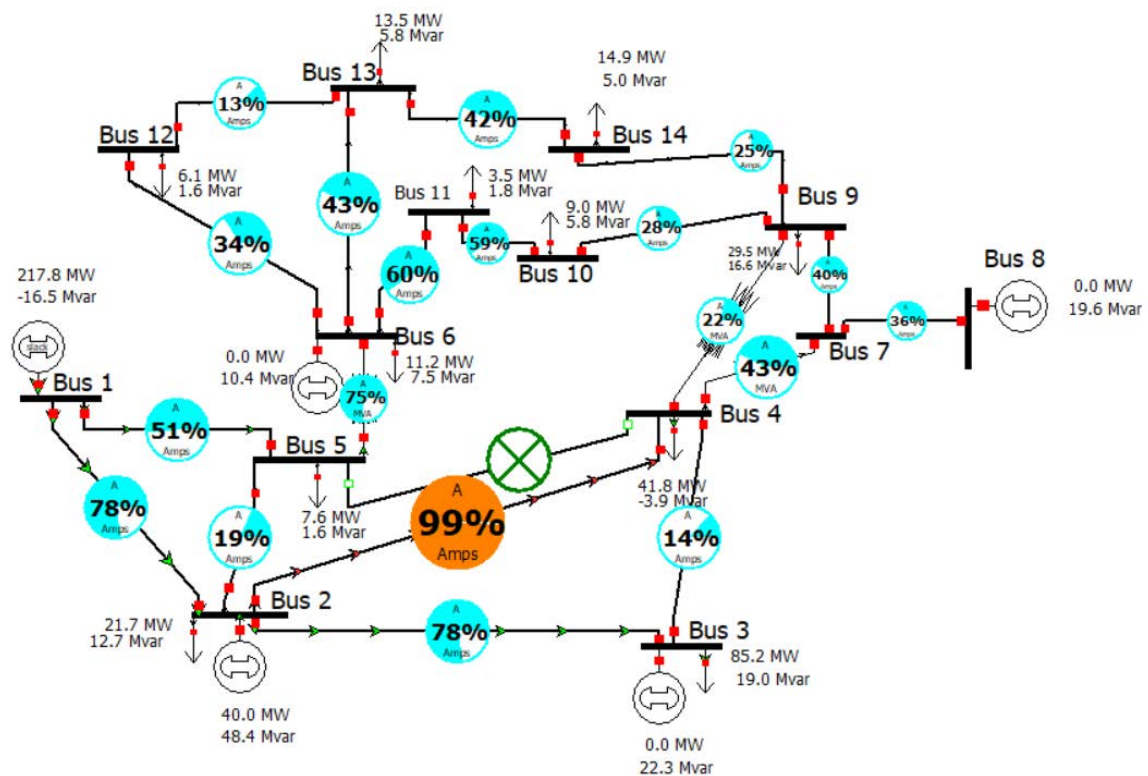
$$EENS_2 = C_2 * LOLE_2 = 26 * P_2 * 8760 = 129.82 \frac{MWh}{\text{έτος}}$$

Για την βλάβη #7 – η οποία συμβαίνει κατά την αποκοπή της γραμμής 4-5 – προκαλεί υπερφόρτωση 111.6% και το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση που διακρίνεται στην Εικόνα 9:



Εικόνα 9: Επίλυση χωρίς την ΓΜ 1-5

Πάλι μέσω του PowerWorld βρίσκουμε ότι η βέλτιστη περικοπή φορτίου είναι από το φορτίο του ζυγού 4 με 6 MW (από 47,8 MW σε 41,8 MW) και από το φορτίο του ζυγού 3 με 9 MW (από 94,2 MW σε 85,2 MW). Άρα η συνολική περικοπή C_7 είναι 15 MW και το σύστημα γίνεται όπως στην παρακάτω Εικόνα 10.

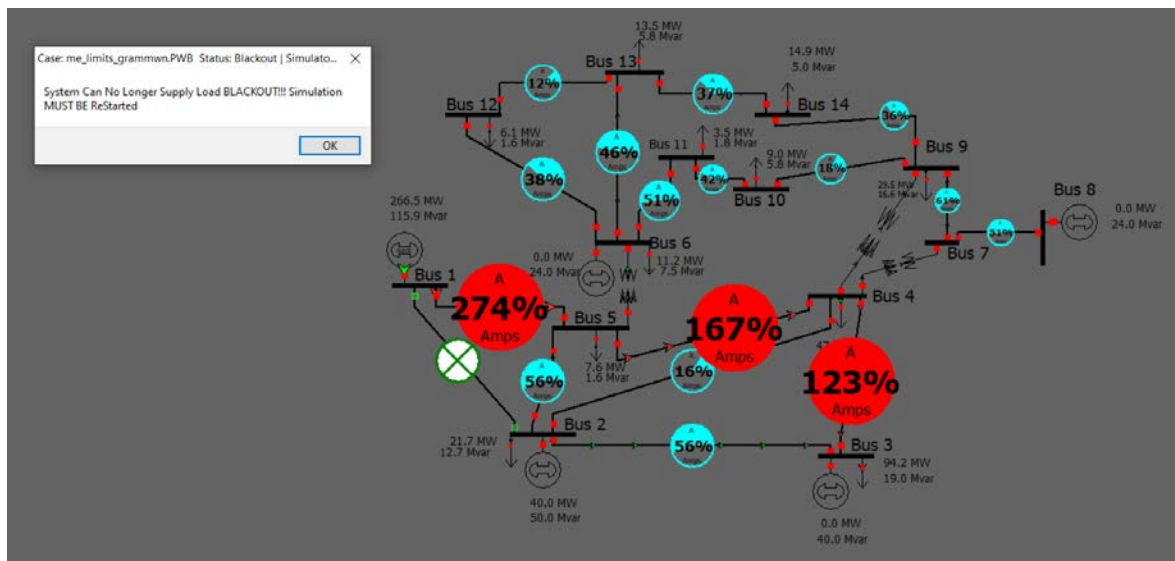


Εικόνα 10: Η βλάβη #7 μετά την περικοπή φορτίου

Ο δείκτης EENS είναι:

$$EENS_7 = C_7 * LOLE_1 = 15 * P_7 * 8760 = \frac{MWh}{\text{έτος}}.$$

Τελευταία βλάβη είναι η βλάβη #1, η οποία συμβαίνει κατά την αποκοπή της γραμμής 1-2. Η συγκεκριμένη βλάβη οδηγεί το σύστημα σε κατάσταση αστάθειας και όπως φαίνεται και από την Εικόνα 11 το πρόγραμμα αδυνατεί να συγκλίνει σε μια έγκυρη λύση ροής φορτίου.



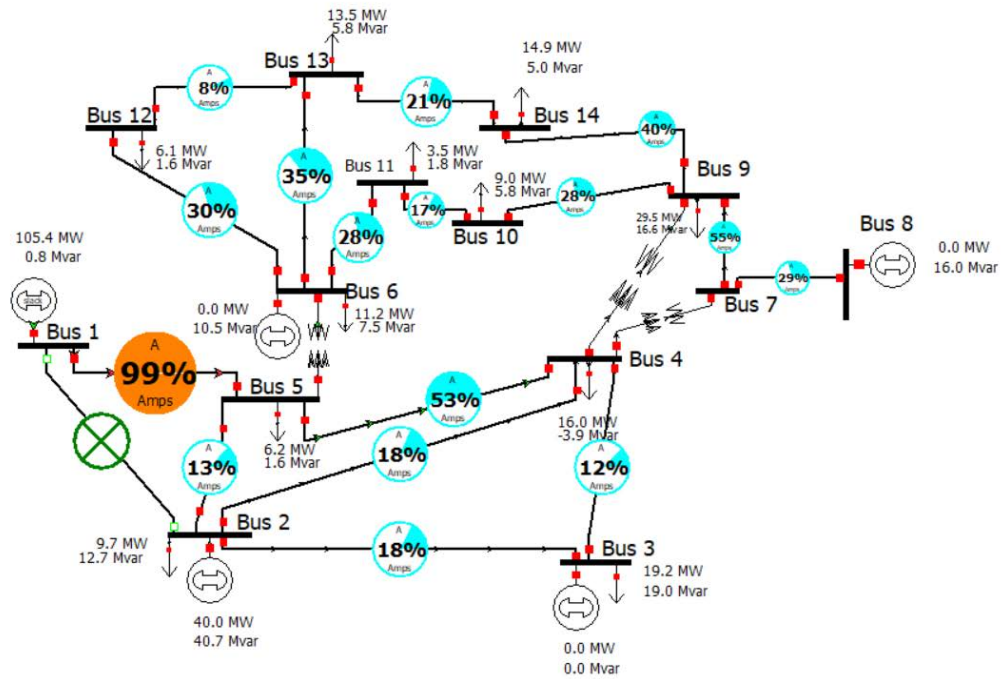
Εικόνα 11: Επίλυση χωρίς την ΓΜ 1-2

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις που προκαλούσαν διαχειρίσιμες θερμικές υπερφορτώσεις, η συγκεκριμένη βλάβη οδηγεί σε ολική κατάρρευση της ευστάθειας του συστήματος, κάνοντας αδύνατη τη σύγκλιση του αλγορίθμου ροής φορτίου (unsolved contingency). Αυτό το φαινόμενο, στην πράξη, αντιστοιχεί σε μια ταχεία κατάρρευση της τάσης και ένα εκτεταμένο, τοπικό μπλακ-άουτ.

Ως εκ τούτου, η ανάλυση επάρκειας για τη συγκεκριμένη βλάβη δεν εστιάζει στην αποκατάσταση μιας μεμονωμένης υπερφόρτωσης, αλλά στον προσδιορισμό της ελάχιστης συνολικής περικοπής φορτίου (C_i) που απαιτείται ώστε το σύστημα να ξαναβρεί ένα σταθερό σημείο λειτουργίας. Γι' αυτό, εφαρμόστηκε μια στρατηγική κατανεμημένης περικοπής φορτίου από τους ζυγούς της πληττόμενης περιοχής (Ζυγοί 2, 3, 4 και 5).

Οι περικοπές αυτές είναι:

Στο φορτίο ζυγού 2, 12 MW (από 21,7 MW σε 9,7 MW), στο φορτίο ζυγού 3, 75 MW (από 94,2 MW σε 19,2 MW), στο φορτίο ζυγού 4, 31,8 MW (από 47,8 MW σε 10,8 MW) και στο φορτίο ζυγού 5, 1,4 MW (από 7,6 MW σε 6,2 MW). Αυτό μας κάνει την συνολική περικοπή φορτίου C_1 ίση με **120,2 MW**. Το σύστημα παίρνει την μορφή της Εικόνας 12:



Εικόνα 12: Η βλάβη #1 μετά την περικοπή φορτίου

Ο δείκτης EENS για αυτή τη βλάβη υπολογίζεται ως εξής:

$$EENS_1 = C_1 * LOLE_1 = 120,2 * P_1 * 8760 = 600,18 \frac{MWh}{\text{έτος}}.$$

Όλα τα αποτελέσματα των δεικτών αξιοπιστίας που μας χρειάζονται για την ανάλυση αξιοπιστίας του ΣΗΕ φαίνονται στον Πίνακα 14 συγκεντρωτικά [11][18][19][20]:

Πίνακας 14: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ανάλυσης Αξιοπιστίας

Νούμερο Βλάβης	Περιγραφή Βλάβης	Δείκτης Ασφάλειας Ενεργού Ισχύος (P_{IP})	Περικόπηση Ισχύος (C_i) [MW]	LOLP	LOLF [περιστάτικα/έτος]	LOL E [ώρες/έτος]	EENS [MWh/έτος]
#1	Απώλεια Γραμμής 1-2	Κατάρρευση	120.2	0.00057	0.5	5	601.0
#10	Απώλεια Μ/Τ 5-6	3.5677	11.2	0.00023	0.1	2	22.57
#3	Απώλεια Γραμμής 2-3	3.0727	47.0	0.00057	0.5	5	234.68
#2	Απώλεια Γραμμής 1-5	1.2694	26.0	0.00057	0.5	5	129.82
#7	Απώλεια Γραμμής 4-5	0.6216	15.0	0.00057	0.5	5	73.62
ΣΥΝΟΛΟ				0.00251	2.1	22	1061.69

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Σχολιασμός

Η ολοκληρωμένη ανάλυση αξιοπιστίας που πραγματοποιήθηκε στο τυποποιημένο σύστημα IEEE 14-bus, μέσω του λογισμικού PowerWorld Simulator, οδήγησε σε μια σειρά από σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την ασφάλεια και την επάρκειά του.

5.1 Γενικά Συμπεράσματα & Σχολιασμός

Η ανάλυση ασφάλειας N-1 αποκάλυψε ότι το σύστημα δεν είναι N-1 ασφαλές, καθώς εντοπίστηκαν συνολικά πέντε (5) κρίσιμες διαταραχές που οδηγούν σε παραβίαση των ορίων λειτουργίας. Η πιο κρίσιμη εξ αυτών είναι η απώλεια της γραμμής 1-2, η οποία δεν προκαλεί απλή υπερφόρτωση, αλλά οδηγεί σε ολική κατάρρευση της ευστάθειας του συστήματος (unsolved contingency), υποδεικνύοντας ένα σενάριο εκτεταμένου μπλακ-άουτ. Η κατάταξη των υπολοίπων βλαβών, βάσει του Δείκτη Επίδοσης Ενεργού Ισχύος (PI_P), ανέδειξε την απώλεια του μετασχηματιστή 5-6 ως τη σοβαρότερη από πλευράς εκτεταμένων υπερφορτώσεων ($PI_P=3.5677$), και την απώλεια της γραμμής 2-3 ως αυτή με την πιο έντονη μεμονωμένη υπερφόρτωση ($PI_P=3.0727$).

Η ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας μέσω των δεικτών επάρκειας έδειξε ότι το σύστημα αναμένεται να έχει 2.1 περιστατικά περικοπής φορτίου ετησίως (LOLF), με συνολική αναμενόμενη διάρκεια 22 ωρών (LOLE) και συνολική απώλεια ενέργειας 1061.69 MWh/έτος (EENS). Είναι αξιοσημείωτο ότι η βλάβη της γραμμής 1-2 είναι υπεύθυνη από μόνη της για το 57% του συνολικού EENS, επιβεβαιώνοντας τη μεγάλη κρισιμότητά της για το σύστημα.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η δομική αδυναμία του συστήματος εντοπίζεται στον διάδρομο μεταφοράς ενέργειας από τις κύριες μονάδες παραγωγής (Ζυγοί 1 και 2) προς το κέντρο του δικτύου. Η εξάρτηση του συστήματος από τις γραμμές 1-2, 1-5 και 2-3 είναι τεράστια, και η απώλεια οποιασδήποτε από αυτές οδηγεί σε σοβαρή ανακατανομή ισχύος που το υπόλοιπο δίκτυο αδυνατεί να διαχειριστεί με ασφάλεια.

Για την επίδειξη της βέλτιστης λύσης όσο αφορά την περικοπή των φορτίων, έγιναν πολλές δοκιμές μείωσης διαφορετικών φορτίων μέχρι να βρεθεί η καταλληλότερη λύση. Η

καταλληλότερη ήταν αυτή που θα είχε την μικρότερη δυνατή περικοπή αλλά και ταυτόχρονα αυτή που δεν θα άφηνε ένα φορτίο να χάσει σχεδόν όλη του την ισχύ για να μπορεί η έρευνα να αντικατοπτρίζει μία μελέτη που θα γίνει σε ένα μεγαλύτερο εύρος (μελέτη για μία πόλη, έναν οικισμό ή μία κοινωνία). Αυτό αναδεικνύει το δίλημμα μεταξύ μιας τεχνικά και μαθηματικά βέλτιστης λύσης (π.χ. ολική αποκοπή δύο περιοχών) και μιας κοινωνικοοικονομικά προτιμότερης λύσης (π.χ. κατανεμημένες και ηπιότερες περικοπές σε περισσότερες περιοχές), δίνοντας στον διαχειριστή του συστήματος την επιλογή στις περικοπές που πρέπει να γίνουν για την διαχείριση της κρίσης.

Για την ουσιαστική βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος, φαίνεται ιδιαίτερα σημαντική η ενίσχυση του διαδρόμου μεταφοράς μεταξύ των Ζυγών 1, 2, 4 και 5. Η πιο αποτελεσματική λύση θα ήταν η μελέτη για την εγκατάσταση μιας νέας γραμμής μεταφοράς που θα συνδέει τον Ζυγό 2 με τον Ζυγό 4, δημιουργώντας μια εναλλακτική διαδρομή για τη ροή ισχύος και μειώνοντας δραστικά την κρισιμότητα των υπαρχουσών γραμμών. Επίσης, θα μπορούσε να εξεταστεί η αναβάθμιση της γραμμής 3-4 (αύξηση του θερμικού της ορίου), καθώς φαίνεται ότι είναι ο "αδύναμος κρίκος" που υπερφορτώνεται σε πολλά σενάρια βλαβών.

Βιβλιογραφία

- [1] Ν. Βοβός και Γ. Γιαννακόπουλος, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, Ιούλιος 2008 (Ανατύπωση Οκτώβριος 2017).
- [2] Παντελής Β. Μαλατέστας, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2021 (4^η έκδοση).
- [3] Xi-Fan Wang, Yonghua Song, Malcolm Irving, Modern Power Systems Analysis, Εκδόσεις Springer US, 2009N.
- [4] Α. Βοβός και Γ. Β. Γιαννακόπουλος, Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 2008.
- [5] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, Jr., *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [6] Anumaka, Michael, Fundamentals of Reliability of Electric Power System and Equipment, International Journal of Engineering Science and Technology, June 2011.
- [7] S. Sreekumaran, L. Nair και H. Nagesh, «Power System Security Assessment and Contingency Analysis Using Supervised Learning Approach» International Journal of Advance Engineering and Research, p. 10, 2015.
- [8] R. Billinton και W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, New York: Springer US, 1994.
- [9] 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.
- [10] David Elmakias, New Computational Methods in Power System Reliability, Springer Science & Business Media, p. 174, 7 July 2008.
- [11] R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd ed., New York: Plenum Press, 1996.
- [12] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices," *IEEE Std 1366-2012*, 2012.
- [13] Hellenic Electricity Distribution Network Operator (HEDNO), *Annual Reliability Indices Report 2023*, [Online].
- [14] ΑΔΜΗΕ – Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, *Δείκτες Αξιοπιστίας Συστήματος Μεταφοράς 2023*, Αθήνα, 2024. [Online].
- [15] Π. Σ. Γεωργιλάκης, Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Κάλλιπος, Αθήνα, 2015.
- [16] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [17] A. A. Abdulrazzaq, "Contingency ranking of power systems using a performance index," International Research Journal of Engineering and Technology, p. 4, 2015.

- [18] PowerWorld CORPORATION. PowerWorld Simulator (Version 24), Champaign, IL, USA, 2024. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.powerworld.com>.
- [19] J. D. Glover, T. J. Overbye, and M. S. Sarma, *Power System Analysis and Design*, 6th ed. Cengage Learning, 2017.
- [20] University of Washington, Power Systems Test Case Archive, "IEEE 14 Bus Test Case,"[Ηλεκτρονικό].Διαθέσιμο:
https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm [Ανακτήθηκε: 17
Αυγούστου 2025].

