



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

Τσιάτας Γεώργιος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Σεπτέμβριος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

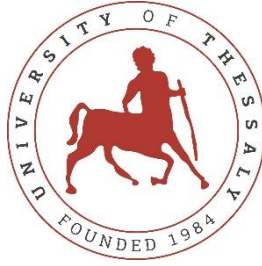
**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

Τσιάτας Γεώργιος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Σεπτέμβριος 2022



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**STUDY AND ANALYSIS OF THE OPERATION OF
POWER SYSTEMS**

Diploma Thesis

Tsiatas Georgios

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

September 2022

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων: **Μπαργιώτας Δημήτριος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος : **Τσουκαλάς Ελευθέριος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος : **Δασκαλοπούλου Ασπασία**

Επίκουρος Καθηγήτρια, 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

Τσιάτας Γεώργιος

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

Tsiatas Georgios

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Μπαργιώτα Δημήτριο για την πολύτιμη βοήθεια του και καθοδήγηση του τόσο για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής, όσο και κατά τη διάρκεια των σπουδών.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Τσουκαλά Ελευθέριο και την κυρία Δασκαλοπούλου Ασπασία που δέχτηκαν να αποτελέσουν τα υπόλοιπα δυο μέλη της τριμελούς επιτροπής για την αξιολόγηση της παρούσας διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, τη σύντροφο μου και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τσιάτας Γεώργιος

Περίληψη

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν πλέον αναπόσπαστο και αναντικατάστατο κομμάτι στην καθημερινότητα της κοινωνίας, διότι χωρίς τη δημιουργία και την παρουσία τους θα ήταν αδύνατη αυτή η τεράστια οικονομική ανάπτυξη των κρατών, όπως επίσης και η βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Προκειμένου να συνεχιστούν τα παραπάνω με τους ίδιους ρυθμούς, καθίσταται αναγκαία η καλύτερη μελέτη και ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, με τη χρήση των κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων, τη σωστή λήψη τεχνικών αποφάσεων που λαμβάνονται μετά την εφαρμογή προγραμμάτων προσομοίωσης, την προστασία και αναβάθμιση του εξοπλισμού του δικτύου. Οι τρεις βασικές συνιστώσες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η σύγχρονη γεννήτρια, οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές, είναι απαραίτητο να διατηρούν την ευστάθεια και αξιοπιστία του δικτύου, είτε βρίσκονται στην κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, είτε σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας η οποία προκαλείται με την εμφάνιση σφαλμάτων ή διαταραχών σε μία από τις παραπάνω συνιστώσες. Η απότομη και ταχύτατη αύξηση των αναγκών της κοινωνίας έχει οδηγήσει το υπάρχον σύστημα να λειτουργεί στα όρια του με πιθανό τον κίνδυνο φθοράς των εγκαταστάσεων. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η κατάσταση είναι απαραίτητο πλέον το υπάρχον σύστημα να αναβαθμιστεί με τη χρήση των κατάλληλων τεχνολογιών και συσκευών σε ένα ευφυές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όπου ο έλεγχος και η παρακολούθησή του θα πραγματοποιείται πιο άμεσα, πιο έγκαιρα και με ακρίβεια.

Diploma Thesis

STUDY AND ANALYSIS OF THE OPERATION OF POWER SYSTEMS

Tsiatas Georgios

Abstract

Electricity systems have become an integral and indispensable part of the everyday life of society, because without their creation and presence, the huge economic development of countries and the improvement of the quality of life of citizens would be impossible. In order to continue at the same pace, it becomes necessary to better study and analyze the power systems, using the appropriate mathematical models, the correct technical decisions taken after the application of simulation programs, the protection and upgrading of the network equipment. The three basic components of power systems, such as the synchronous generator, transmission lines and transformers, are necessary to maintain the stability and reliability of the grid, whether they are in the steady state or in a transient state of operation caused by the occurrence of faults or disturbances in one of the above components. The sudden and rapid increase in the needs of society has led the existing system to operate at its limits with a possible risk of deterioration of the facilities. In order to address this situation, it is now necessary to upgrade the existing system by using the appropriate technologies and devices to an intelligent electricity grid, where control and monitoring will be more direct, timely and accurate.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	vii
Περίληψη	viii
Abstract.....	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	3
ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Η σύγχρονη γεννήτρια	5
2.2.1 Εικονική σύγχρονη γεννήτρια	7
2.3 Ο μετασχηματιστής	10
2.3.1 Μερική εκκένωση των μετασχηματιστών ισχύος	12
2.4 Οι γραμμές μεταφοράς.....	13
2.4.1 Η ικανότητα φόρτισης της γραμμής μεταφοράς.....	16
2.5 Φορτία.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	18
ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	18
3.1 Εισαγωγή.....	18
3.2 Εξισώσεις ροής φορτίου.....	19
3.2.1 Κατηγορίες μεταβλητών των εξισώσεων ροής φορτίου.....	23
3.2.2 Κατηγορίες ζυγών.....	24
3.3 Μέθοδος Gauss – Seidel (G-S)	25
3.4 Μέθοδος Newton-Raphson (N-R).....	26
3.5 Βέλτιστη ροή ισχύος.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	29
ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.....	29

4.1 Εισαγωγή στα βραχυκυκλώματα	29
4.2 Συμμετρικές συνιστώσες	30
4.3 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα	34
4.3.1 Τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα.....	34
4.4 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα	36
4.4.1 Ακολουθιακά δίκτυα γεννητριών.....	36
4.4.2. Ακολουθιακά δίκτυα μετασχηματιστών	37
4.4.3 Ακολουθιακά κυκλώματα γραμμών.....	38
4.4.4 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γη (SLG)	39
4.4.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα (LL)	41
4.4.6 Διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη (DLG)	42
4.5 Ανάλυση μελέτης σφαλμάτων με τη χρήση προσομοίωσης	44
4.5.1 Μελέτη μονοφασικού βραχυκυκλώματος προς τη γη (SLG).....	45
4.5.2 Μελέτη διφασικού βραχυκυκλώματος (LL)	46
4.5.3 Μελέτη διφασικού βραχυκυκλώματος με τη γη (DLG)	47
4.5.4 Μελέτη τριφασικού βραχυκυκλώματος.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	50
ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	50
5.1 Εισαγωγή.....	50
5.2 Εξίσωση ταλάντωσης.....	53
5.3 Σχέση μεταξύ ισχύος και γωνίας	55
5.4 Τρόποι μελέτης μεταβλητών ευστάθειας	57
5.5 Κριτήριο ίσων εμβαδών.....	57
5.5.1 Βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου	57
5.5.2 Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής	59
5.5.3 Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή.....	60
5.6 Παράγοντες επιρροής της μεταβατικής ευστάθειας.....	63
5.7 Ανάλυση μελέτης μεταβατικής ευστάθειας σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο ..	63

5.7.1	Ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας με τέσσερις γραμμές μεταφοράς	65
5.7.2	Ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας με πέντε γραμμές μεταφοράς.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....		70
6.1	Εισαγωγή.....	70
6.2	Αρχές λειτουργίας ηλεκτρονόμων προστασίας.....	71
6.3	Προστασία γραμμών μεταφοράς με ηλεκτρονόμους.....	73
6.3.1	Προστασία με ηλεκτρονόμους υπέρτασης.....	73
6.3.2	Προστασία γραμμών μεταφοράς με ηλεκτρονόμους απόστασης.....	74
6.3.3	Προστασία γραμμών μεταφοράς με ηλεκτρονόμους οδηγούς	75
6.4	Προστασία σύγχρονης γεννήτριας.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7		77
ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		77
7.1	Εισαγωγή.....	77
7.2	Χαρακτηριστικά του ευφυούς δικτύου	79
7.3	Υποδομές επικοινωνίας στο ευφυές δίκτυο.....	81
7.4	Έξυπνα συστήματα μετρήσεων και παρακολούθησης δικτύου.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8		89
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη και την ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος της αποτελεί η παρουσίαση των μεθόδων ανάλυσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με τα μαθηματικά τους μοντέλα, ώστε να δημιουργηθεί το μοντέλο του συνολικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για να μπορεί να μελετηθεί στη κατάσταση μόνιμης και μεταβατικής λειτουργίας, καθώς επίσης παρουσιάζεται το ευφυές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και οι τρόποι εξέλιξης και αναβάθμισης του ήδη υπάρχοντος δικτύου για την αντιμετώπιση της αυξημένης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών.

Η ανακάλυψη της ηλεκτρικής ενέργειας έδωσε τη δυνατότητα στην κοινωνία να αναπτυχθεί, να βελτιώσει την ποιότητα ζωής της και να επιτύχει τεράστια τεχνολογική πρόοδο. Αυτή η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία των διάφορων συνιστωσών των ΣΗΕ, οι οποίες κάθε φορά με την ενσωμάτωση τους στο δίκτυο επέφεραν την ανάπτυξη και την αναβάθμιση του. Η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί στα πλαίσια της οικονομικής αγοράς καθώς αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες παγκοσμίως. Οι συνεχόμενες αυξανόμενες ανάγκες θέτουν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργούν στα όρια για να επιτευχθεί η ομαλότητα, η ευστάθεια και η αξιοπιστία του δικτύου με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προκλήσεις κατά τη λήψη τεχνικών αποφάσεων λόγω του μεγέθους τους και της πολυπλοκότητας τους. Η αναβάθμιση του δικτύου με τις νέες τεχνολογίες για την προστασία των συνιστωσών του και η σταδιακή μετατροπή του σε ένα ευφυές δίκτυο θα επιτρέψει την καλύτερη διαχείριση του, την ευκολότερη παρακολούθηση του και την αντιμετώπιση των προκλήσεων και προβλημάτων με τον κατάλληλο τρόπο, ώστε να μην διακυβευτεί η τροφοδοσία των καταναλωτών.

Το 2^ο Κεφάλαιο στοχεύει στην μελέτη των βασικών συνιστωσών που απαρτίζουν ένα σύγχρονο ΣΗΕ, όπως η σύγχρονη γεννήτρια, η εικονική σύγχρονη γεννήτρια, οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές. Το 3^ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται

στην Ανάλυση Ροής φορτίου, στη δημιουργία των εξισώσεων αυτών και την επίλυση τους με τις μεθόδους Newton – Raphson και Gauss – Seidel. Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των ειδών βραχυκυκλωμάτων με τις κατάλληλες μεθοδολογίες τους καθώς και η μελέτη ενός ΣΗΕ με εφαρμογή των συμμετρικών και ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων. Στο 5^ο Κεφάλαιο μελετάται η μεταβατική ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα της συνιστώσας της σύγχρονης μηχανής, όπως επίσης πραγματοποιείται μελέτη και ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας συστήματος. Το 6^ο Κεφάλαιο στοχεύει στους ηλεκτρονόμους προστασίας τόσο των γραμμών μεταφοράς όσο και της σύγχρονης γεννήτριας. Τέλος το 7^ο Κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάλυση του ευφυούς δικτύου, των χαρακτηριστικών στοιχείων του και των βασικών υποδομών του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) χαρακτηρίζεται ως το σύνολο των εγκαταστάσεων (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες, διατάξεις αντιστάθμισης) που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτηθεί ένα σύνολο καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια. Ένας σημαντικός παράγοντας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η πρακτικότητά του, δηλαδή ο τρόπος σχεδίασης και λειτουργίας του πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να είναι ασφαλές, αξιόπιστο, φιλικό προς το περιβάλλον και να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια καλής ποιότητας με το χαμηλότερο δυνατό κόστος στους καταναλωτές. Η ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος αναφέρεται στη τήρηση θεσμοθετημένων ορίων διακύμανσης της τάσης και της συχνότητας, που είναι συνήθως 5% και 0,5% αντίστοιχα [1] [2]. Η συνολική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες την παραγωγή, την μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει :

- Σταθμούς παραγωγής οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στις πιο κατάλληλες περιοχές, όπου εκεί γίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε επαρκείς ποσότητες.
- Γραμμές μεταφοράς οι οποίες μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης.
- Δίκτυο διανομής το οποίο διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές ώστε να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες μορφές.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται στους εξής τρεις σταθμούς παραγωγής:

- Ατμοηλεκτρικούς, όπου η χημική ενέργεια της πρωτογενούς πηγής (π.χ λιγνίτης, κάρβουνο, φυσικό αέριο) με τη διαδικασία της καύσης μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Έπειτα ο ατμός μέσω ενός ατμοστροβίλου θέτει σε λειτουργία μια γεννήτρια με αποτέλεσμα τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας του στροβίλου σε ηλεκτρική ενέργεια.
- Υδροηλεκτρικούς, όπου η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε ηλεκτρική.
- Πυρηνικούς, όπου η παραγωγή αρχικά της θερμικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω του πυρηνικού αντιδραστήρα και τη διαδικασία της σχάσης. Στη συνέχεια, αυτή η θερμική ενέργεια διοχετεύεται για την κίνηση μια ηλεκτρικής γεννήτριας ατμού με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης και της μεγάλης ανάγκης μείωσης των ρύπων για την προστασία του περιβάλλοντος, έχει ξεκινήσει η εισχώρηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε) στο δίκτυο όπως η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμία και η βιομάζα. Οι ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν αυτές οι πηγές είναι μικρότερες σε σχέση με τους προαναφερθείς τρόπους.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης πραγματοποιείται μέσω των γραμμών μεταφοράς υπερύψηλης (400KV) και υψηλής τάσης (150KV). Αρχικά η τάση των 400 KV μεταφέρεται στα κέντρα υψηλής τάσης όπου εκεί υποβιβάζεται στην τάση των 150KV. Εδώ να σημειωθεί ότι μπορούν να συνδεθούν απευθείας στα 150KV μεγάλες βιομηχανικές μονάδες. Η διαδικασία συνεχίζεται και η τάση των 150KV υποβιβάζεται στους υποσταθμούς υψηλής τάσης στα 20KV (μέση τάση) ,με την οποία γίνεται η τροφοδοσία των βιομηχανικών και αστικών περιοχών. Τέλος η μέση τάση (20KV) υποβιβάζεται μέσω των υποσταθμών διανομής σε χαμηλή τάση (400V για τριφασική τροφοδότηση - 220V για μονοφασική τροφοδότηση) , η οποία καταλήγει στους καταναλωτές. Για την μεταφορά χρησιμοποιούνται εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος. Σπάνια γίνεται και η χρήση συνεχούς ρεύματος, κυρίως όμως σε υποθαλάσσιες διασυνδέσεις.

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ισχύος σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας βρίσκεται σε ένα πρώιμο στάδιο και είναι μια απαιτητική και κοστοβόρα διαδικασία. Για αυτόν τον λόγο επιζητείται η συνεχής προσαρμογή της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος στη ζήτηση των καταναλωτών. Καθώς αυτό δεν είναι πάντα τεχνικά εφικτό ή και οικονομικά βέλτιστο, έχει θεσμοθετηθεί η διασύνδεση των εθνικών δικτύων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με τις κατάλληλες γραμμές μεταφοράς. Κατά αυτόν τον τρόπο πραγματοποιούνται αγοραπωλησίες ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης παρέχεται υποστήριξη σε περιπτώσεις ανωμαλιών στα γειτονικά δίκτυα.

Τα δομικά στοιχεία ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η σύγχρονη γεννήτρια, ο τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος και οι γραμμές μεταφοράς. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, γίνεται μια διεξοδική περιγραφή των παραπάνω συνιστωσών.

2.2 Η σύγχρονη γεννήτρια

Η πρώτη βασική συνιστώσα που αναλύεται είναι οι τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες παράγουν το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής που απαιτείται σε ένα σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η σύγχρονη γεννήτρια είναι το πλέον αξιόπιστο και αποδοτικό μέσο για την μετατροπή άλλων μορφών ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι τιμές της ονομαστικής ισχύος αυτών των γεννητριών έχουν εύρος από μερικές εκατοντάδες μέχρι και πάνω από χιλιάδες MVA. Η λειτουργία της γίνεται με βάση το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday.

Τα δύο βασικά μέρη μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι ο στάτης, που είναι το ακίνητο μέρος και ο δρομέας ο οποίος, είναι αυτός που περιστρέφεται. Για να λειτουργήσει μια σύγχρονη γεννήτρια χρειάζεται η τροφοδότηση με συνεχές ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης ή πεδίου που βρίσκεται στο δρομέα. Το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας και καθώς ο δρομέας περιστρέφεται το πεδίο περιστρέφεται μαζί του. Αυτό το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασική τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία κάνει την εμφάνισή της στην έξοδο της γεννήτριας.

Ο δρομέας διακρίνεται σε δύο είδη. Είτε είναι κυλινδρικός όπου οι πόλοι είναι στο ίδιο επίπεδο με την υπόλοιπη επιφάνεια, είτε έκτυπων πόλων όπου οι πόλοι είναι διακριτοί. Ο στάτης είναι μία κοίλη κυλινδρική κατασκευή από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή ελασμάτων. Εσωτερικά στην επιφάνειά του βρίσκονται διαμήκεις αυλακώσεις, στις οποίες γίνεται η τοποθέτηση των τυλιγμάτων του στάτη. Τα τυλίγματα αυτά τοποθετούνται σε τρεις συμμετρικές ζώνες (μία για κάθε φάση) με τέτοιο τρόπο ώστε να απέχουν από το χώρο 120° .

Ο σχεδιασμός του στάτη και του δρομέα γίνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε για σταθερή ταχύτητα δρομέα, να παράγεται μια ημιτονοειδής τάση σε κάθε ένα από τα τυλίγματα του στάτη. Μεταξύ των τριών παραγόμενων τάσεων έχουμε συγχρονισμό της συχνότητας τους και της ταχύτητας περιστροφής τους. Η σχέση της συχνότητας της παραγόμενης τάσης είναι η εξής:

$$f = \frac{P}{2} \frac{N}{60} \text{ Hz}$$

όπου P = ο αριθμός των πόλων.

N = η ταχύτητα του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό.

f = η συχνότητα σε Hz [1]

Η σύγχρονη γεννήτρια σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και κάτω από συμμετρική φόρτιση εμφανίζει τριφασική συμμετρία. Έτσι γίνεται μελέτη ανά φάση χρησιμοποιώντας το μονοφασικό ισοδύναμο.

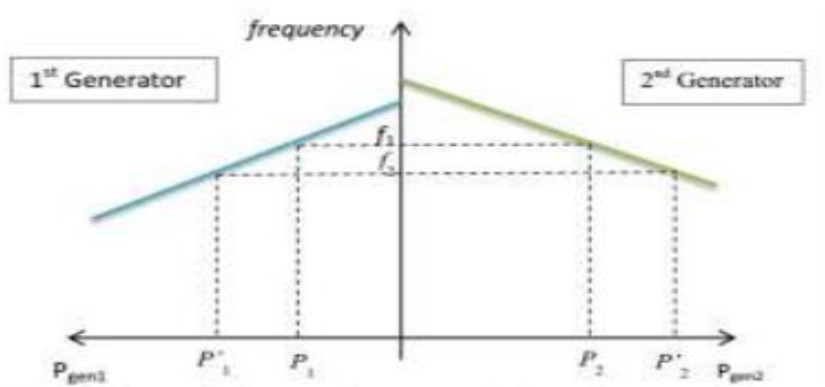
Τέλος, η μιγαδική ισχύς που παρέχει μια σύγχρονη γεννήτρια ανά φάση είναι:

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

Επειδή το ρεύμα ορίζεται θετικό όταν εξέρχεται της γεννήτριας τα P και Q έχουν θετικό πρόσημο.

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση ταλάντωσης (η οποία αναλύεται στο Κεφάλαιο 5), σε περιπτώσεις αστάθειας μεταξύ της μηχανικής ισχύς εισόδου στη γεννήτρια και της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου στο δίκτυο, η ταχύτητα του ρότορα θα αλλάξει. Η

εξάρτηση ταχύτητας-φορτίου των σύγχρονων γεννητριών συνδεδεμένες παράλληλα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστικά μείωσης ταχύτητας από μια σύγχρονη γεννήτρια [3]

Η παράλληλη και απομονωμένη λειτουργία δύο σύγχρονων γεννητριών έχει ως αποτέλεσμα να έχουν την ίδια συχνότητα f_1 όπως στο Σχήμα 2.1. Αν το φορτίο στο σύστημα αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό, το επιπλέον φορτίο θα διανεμηθεί σύμφωνα με τις ρυθμίσεις ελάττωσης των δύο γεννητριών και η συχνότητα θα μεταβληθεί σε f_2 . Παρόλα αυτά, ουσιαστικές μειώσεις της συχνότητας κάτω από τα κρίσιμα όρια, μπορεί να είναι επικίνδυνο για τα στοιχεία του συστήματος. Για αυτό το λόγο θέτονται θεσμικά πλαίσια από το κράτος, ώστε να υπάρχει αύξηση της παραγόμενης ισχύος σε P'_1 και P'_2 και να μη χρειαστεί να φτάσει στα όρια το σύστημα [3].

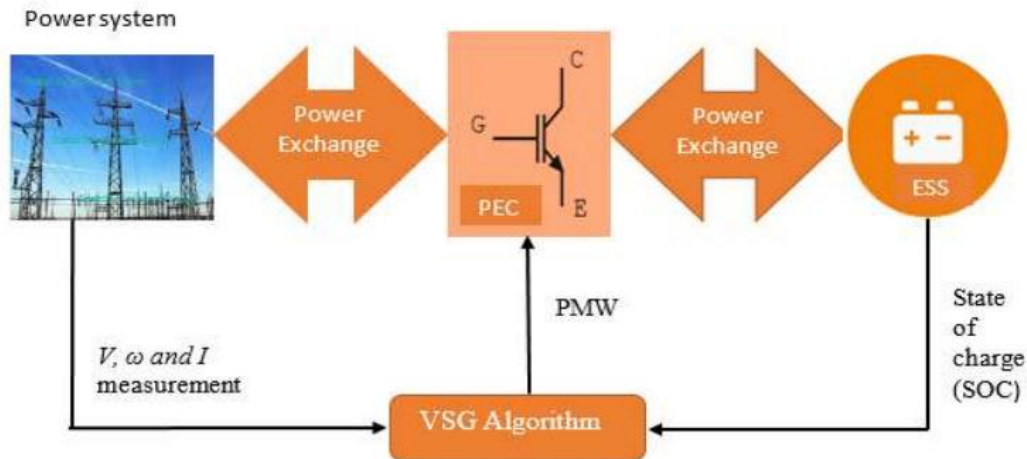
2.2.1 Εικονική σύγχρονη γεννήτρια

Η μείωση των αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων καθώς και η αδυναμία τους να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες της βιώσιμης ανάπτυξης, έχει οδηγήσει στην αυξανόμενη διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο συμβατικό δίκτυο. Προκειμένου να διευκολυνθεί η διεύθυνση των Α.Π.Ε στο ήδη υπάρχον σύστημα, απαιτούνται ανεπτυγμένα σχέδια ελέγχου και ηλεκτρονικοί μετατροπείς για να εξασφαλιστεί η ευστάθεια και η υποστήριξη του συστήματος. Η εικονική σύγχρονη γεννήτρια, συνδυάζει τη δυναμική της σύγχρονης γεννήτριας και ενισχύει την ευστάθεια του συστήματος. Στην πραγματικότητα, η εικονική σύγχρονη γεννήτρια είναι μετατροπείς συνδεδεμένοι στο δίκτυο, οι οποίοι με τις κατάλληλες τεχνικές ελέγχου συμπεριφέρονται ως σύγχρονες γεννήτριες για τις ηλεκτρονικά καταναεμημένες πηγές παραγωγής. Προτιμότερη τεχνική ελέγχου είναι αυτή της

τάσης, καθώς έχει ως στόχο η εικονική σύγχρονη γεννήτρια να προσομοιάζει την αδράνεια του ρότορα και να διαμορφώνει τη συχνότητα του συστήματος με βάση τα χαρακτηριστικά μιας σύγχρονης γεννήτριας. Ταυτόχρονα, η άεργη τάση ελέγχει την σταθερή παραγόμενη τάση [4].

Τα τρία ξεχωριστά στοιχεία της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας είναι το PEC, το οποίο περιλαμβάνει δύο στάδια μετατροπής, ένα DC σε DC και ένα DC σε AC, μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας όπως, μπαταρία, σφόνδυλοι, υπερπυκνωτές και ένα σχέδιο ελέγχου το οποίο έχει υπό την επίβλεψή του την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του αποθηκευτικού μέσου και του συστήματος ενέργειας.

Αυτή η ανταλλαγή ενέργειας υποστηρίζει το σύστημα αποτρέποντας τις διακυμάνσεις της συχνότητας, οι οποίες, εμφανίζονται με τη χρήση των σύγχρονων γεννητριών λόγω της περιστροφικής αδράνειας. Η εικονική σύγχρονη γεννήτρια τοποθετείται μεταξύ μιας πηγής συνεχούς ρεύματος (DC) και του δικτύου [3]. Η DC πηγή που συνδέεται με τον αλγόριθμο της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας εκτελεί τις λειτουργίες της σύγχρονης γεννήτριας προσφέροντας υποστήριξη στην απόσβεση και την αδράνεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται από τους κανονισμούς λειτουργίας της πραγματικής ισχύος του μετατροπέα, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας του ρότορα. Η παρουσία της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας δίνει τη δυνατότητα στην εικονική σύγχρονη γεννήτρια να απορροφά ή να διαχέει ενέργεια μέσα στο σύστημα. Η προτεινόμενη κατάσταση φόρτισης του αποθηκευτικού μέσου είναι 50% με το κατώτερο όριο να είναι 20% και το υψηλότερο 80% [5]. Όταν η κατάσταση φόρτισης της συσκευής αποθήκευσης βρίσκεται μέσα στα όρια, η εικονική σύγχρονη γεννήτρια βρίσκεται στην ενεργή λειτουργία ενώ όταν υπάρχει υπέρβαση ενέργειας στο σύστημα η εικονική γεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία εικονικού φορτίου [3]. Η επιλογή των παραμέτρων για την εφαρμογή της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας δεν περιορίζεται από το φυσικό σχεδιασμό όπως οποιασδήποτε συμβατικής σύγχρονης γεννήτριας, και οι παράμετροι μπορεί να είναι συγκεκριμένες ή να οριστούν στη συνέχεια αναλόγως της ανάπτυξης του συστήματος ελέγχου και των χαρακτηριστικών που απαιτούνται [5]. Μια τυπική διαμόρφωση της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Βασική διαμόρφωση και σχέδιο της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας [3]

Η παραγόμενη ισχύς της εικονικής σύγχρονης γεννήτριας είναι

$$P_{VSG} = P_0 + K_\omega \frac{d\Delta\omega}{dt} + K_D \Delta\omega$$

Όπου : P_{VSG} = Παραγόμενη ισχύς

$\Delta\omega = \omega - \omega_0$, ω_0 Ονομαστική συχνότητα δικτύου

P_0 = Αρχική ισχύς που μεταφέρεται στον μετατροπέα

K_ω = Χαρακτηριστικά εξομοίωσης αδράνειας

K_D = Απόσβεση ενέργειας

$\frac{d\Delta\omega}{dt}$ = Αρχικός ρυθμός μεταβολής της συχνότητας

Ο όρος $\frac{d\Delta\omega}{dt}$ αναλόγως της τιμής του, θετικής ή αρνητικής, σημαίνει ότι η ενέργεια είτε θα απορροφάται είτε θα διαχέεται στο σύστημα. Η τιμή του όρου K_d πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά ώστε να είναι ανάλογη των διακυμάνσεων της συχνότητας του συστήματος. Παρόλο που η συχνότητα του συστήματος και η περιστροφική ταχύτητα βυθίζονται, υπάρχει η δυνατότητα της ελαχιστοποίησης του φαινομένου με την αύξηση της εικονικής μάζας (K_ω). Ωστόσο, υπάρχει η πιθανότητα τα σύγχρονα στοιχεία να αυξήσουν την ταλάντωση του συστήματος. Σε μια κατάσταση διαταραχής το K_ω ελαχιστοποιεί τη μέγιστη μεταβολή της ταχύτητας

του ρότορα, με την φυσική συχνότητα και τον λόγο απόσβεσης να έχουν την πιθανότητα να μειωθούν. Σε αντίδραση το K_ω καταστέλλει την βύθιση συχνότητας του συστήματος και το K_D (εικονικός αποσβεστήρας) αντιμετωπίζει τη συχνότητα ταλάντωσης του δικτύου. Τα K_ω και K_D είναι αρνητικά σταθερά κέρδη και θα έπρεπε να διορθωθούν ώστε να πραγματοποιηθεί η ανταλλαγή μέγιστης πραγματικής ισχύς [3]

2.3 Ο μετασχηματιστής

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε τμήματα, που το καθένα λειτουργεί σε ένα διαφορετικό επίπεδο τάσης. Η σύνδεση μεταξύ αυτών των τμημάτων για ένα αδιαίρετο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τη χρήση μετασχηματιστών. Οι μετασχηματιστές χωρίζονται σε 2 κατηγορίες ανάλογα με την λειτουργία που επιτελούν. Η πρώτη κατηγορία είναι οι μετασχηματιστές ισχύος που είναι η επόμενη βασική συνιστώσα που θα αναλυθεί. Η σπουδαιότητά τους έγκειται στο γεγονός ότι δίνει την δυνατότητα χρήσης διαφορετικών επιπέδων τάσεων ανάλογα με τις οικονομικές προϋποθέσεις που ορίζουμε. Ο λόγος μετασχηματισμού των εν λόγω μετασχηματιστών είναι σταθερός. Η δεύτερη κατηγορία είναι οι μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν τη τάση ή τη ροή ισχύος του συστήματος. Ο λόγος μετασχηματισμού μπορεί να μεταβάλλεται με μικρά βήματα μετά από σχετική εντολή.

Οι μετασχηματιστές ισχύος ανάλογα της λειτουργίας τους χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Μετασχηματιστές γεννήτριας, που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση της τάσης από το επίπεδο της γεννήτριας στο επίπεδο μεταφοράς (25/150 kV ή 20/400 kV).
- Μετασχηματιστές μεταφοράς, που χρησιμοποιούνται για το μετασχηματισμό της ισχύος μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης του συστήματος μεταφοράς (150/400 kV).

- Μετασχηματιστές διανομής, που χρησιμοποιούνται για τον υποβιβασμό της τάσης στα χαμηλά επίπεδα τάσης που ζητούνται από τους καταναλωτές (15kV/380V) [1].

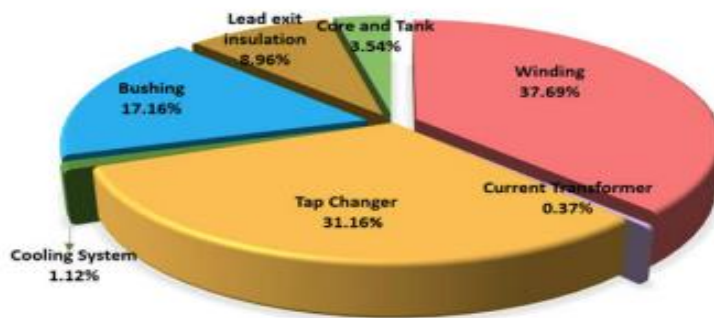
Οι διατάξεις, ενός μετασχηματιστή ισχύος, που χρησιμοποιούνται στα τριφασικά συστήματα, είναι δύο. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές κατασκευάζονται συνήθως από τρεις ξεχωριστούς μονοφασικούς μετασχηματιστές ενώ οι μικροί έχουν ολοκληρωμένη τριφασική κατασκευή με ενιαίο πυρήνα και για τις τρεις φάσεις.

Οι εν δυνάμει συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων των τριφασικών μετασχηματιστών είναι τέσσερις. Η συνδεσμολογία που θα επιλέξουμε κάθε φορά γίνεται σε συνάρτηση της λειτουργίας που πρέπει να πραγματοποιήσει ο μετασχηματιστής. Αυτές είναι:

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

Οι μετασχηματιστές ισχύος αποτελούν θεμέλιο κομμάτι των συστημάτων ενέργειας με την απόδοση και τη σταθερότητά τους να είναι άμεσα εξαρτώμενες από τους μετασχηματιστές. Η σωστή λειτουργία και η καλή κατάσταση των μετασχηματιστών είναι σημαντική για την ευστάθεια και την αξιοπιστία του δικτύου, ενώ, με μια οποιαδήποτε αστοχία τους, δημιουργούνται ενδεχόμενες οικονομικές απώλειες και διαταράξεις στην προσφορά ενέργειας. Οι καταστάσεις πίεσης που δέχεται ένας μετασχηματιστής είναι πολλών ειδών όπως θερμική, μηχανική, ηλεκτρική και περιβαλλοντική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά σφάλματα στον μετασχηματιστή, εξαιτίας της φθοράς του συστήματος μόνωσής του. Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή, προκαλούνται ποικίλα σφάλματα, τα οποία, πρέπει να προβλέπονται και να παρακολουθούνται για την ομαλή λειτουργία των υπηρεσιών κοινωνικής ωφέλειας. Το 70-80% των σφαλμάτων, είναι εσωτερικά στο μετασχηματιστή. Τα εσωτερικά σφάλματα ξεκινούν αρχικά με μια ασήμαντη εκκένωση στη μόνωση του

μετασχηματιστή η οποία στη συνέχεια μπορεί να αυξηθεί με αποτέλεσμα να οδηγηθεί ο μετασχηματιστής στην πλήρη καταστροφή του. Τα εσωτερικά σφάλματα διακρίνονται σε πολλές κατηγορίες όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Τα εξωτερικά σφάλματα οφείλονται σε εξωτερικά μικροκυκλώματα, υπερχείλιση και υπερφόρτωση [6].



Σχήμα 2.3 Αστοχίες μετασχηματιστή σε υποσταθμό (>100 kV) [6]

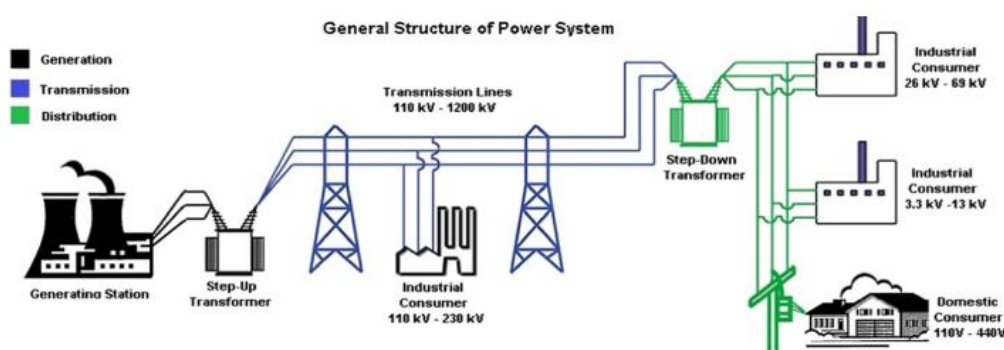
2.3.1 Μερική εκκένωση των μετασχηματιστών ισχύος

Η μερική εκκένωση είναι η ηλεκτρική κατάρρευση της μόνωσης, η οποία δε συνδέει τα ηλεκτρόδια σε μια τοπική ηλεκτρική πίεση. Αυτή η διαδικασία μειώνει αργά τη διάρκεια ζωής της μόνωσης του μετασχηματιστή ισχύος. Η μερική εκκένωση αυξάνεται όταν υπάρχει ένα μεγαλύτερο ηλεκτρικό πεδίο από την οριακή τιμή προκαλώντας μερική βλάβη στο περιβάλλον μέσον. Η μεταβατική συμπεριφορά από την μερική εκκένωση έχει την ιδιότητα να δημιουργεί παλλόμενα ρεύματα με διάρκεια από νανοδευτερόλεπτα σε μικροδευτερόλεπτα. Το επίπεδο της μερικής εκκένωσης δεν κρίνεται με αυστηρότητα εξαιτίας της πιθανότητας παρεμβολής από τυχαία εξωτερικά φαινόμενα. Η πλήρης καταστροφή της μόνωσης δεν διατηρεί καμία πληροφορία σχετική με τον τύπο της μερικής εκκένωσης. Για αυτό το λόγο απαιτείται συνεχής παρακολούθηση ώστε να επιλυθούν τα προβλήματα σε πρώιμο επίπεδο. Κάθε ελάττωμα έχει διακεκριμένες ιδιότητες αποδόμησης και αναλόγως το μοτίβο της μερικής εκκένωσης που δημιουργείται, μπορεί να γίνει αντιληπτή η κατάσταση της μόνωσης. Τέλος, για να μειωθούν οι πιθανότητες δημιουργίας μερικής εκκένωσης του μετασχηματιστή, χρειάζεται καλύτερος σχεδιασμός της μόνωσης καθώς και μείωση των κατασκευαστικών σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της κατασκευής της [6]

2.4 Οι γραμμές μεταφοράς

Η τρίτη σημαντική συνιστώσα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που θα αναλυθεί είναι η γραμμή μεταφοράς. Η κύρια λειτουργία της είναι η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, με τις λιγότερες δυνατές απώλειες, από τους σταθμούς παραγωγής προς τα απομακρυσμένα κέντρα κατανάλωσης. Η τοποθέτηση τους γίνεται πάνω σε πύργους μεταφοράς, οι οποίοι μπορεί να έχουν είτε απλά είτε διπλά κυκλώματα. Το υλικό κατασκευής όλων των εναέριων γραμμών μεταφοράς είναι αλουμίνιο γιατί δεν έχει υψηλό κόστος, έχει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και είναι ελαφρύ. Παρόλα αυτά, σε κάποιες περιπτώσεις οι αγωγοί αυτοί ενισχύονται με χάλυβα ή κράμα.

Η εγκατάσταση γραμμών μεταφοράς σε υπόγεια συστήματα έχει μεγαλύτερο κόστος και ταυτόχρονα ο έλεγχος της τάσης των μεγάλου μήκους καλωδίων, είναι δύσκολος. Οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς εγκαθίστανται κατά προτίμηση σε περιοχές μεγάλων αστικών κέντρων καθώς επίσης και σε περιπτώσεις όπου οι εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι επικίνδυνες για τη δημόσια ασφάλεια. Αξίζει να τονιστεί ότι οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς αντιμετωπίζουν συνεχόμενη και γρηγορότερη φθορά εξαιτίας της παρατεταμένης διάρκειας των συνθηκών υπερφόρτωσης. Ο χρόνος αποκατάστασης των σφαλμάτων και η ικανότητα αναβάθμισης σε υψηλότερες τάσεις των εναέριων γραμμών μεταφοράς παράλληλα με το χαμηλό τους κόστος, τις καθιστά προτιμότερες για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας [7]. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η υποδομή ενός ΣΗΕ.



Σχήμα 2.4 Γενική υποδομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [7]

Οι παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνουν συνεχόμενα τη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η αυξανόμενη ζήτηση, γίνονται προσθήκες μεγάλης κλίμακας νέων πηγών ενέργειας στο δυναμικό, με

ταυτόχρονη απαίτηση για δημιουργία μεγάλων εγκαταστάσεων μεταφοράς μεταξύ της παραγωγής και των σημείων κατανάλωσης.

Τα τελευταία χρόνια μια συνεχής τάση είναι η χρήση αυξανόμενων υψηλών τάσεων γραμμών μεταφοράς καθώς και η εισαγωγή νέων τεχνολογιών. Μια από αυτές είναι η χρήση DC γραμμών μεταφοράς αντί των παραδοσιακών AC, καθώς απαιτούν το 70% συνολικού επενδυτικού κόστους που απαιτείται για τις AC γραμμές ίδιας χωρητικότητας, ενώ παρουσιάζουν 25-30% λιγότερες ωμικές απώλειες σε σχέση με τις AC. Όμως, υπάρχει μια μεγάλη πρόκληση και αυτή είναι η μετατροπή του ρεύματος από εναλλασσόμενο (AC) σε συνεχές (DC) και το αντίστροφο, διατηρώντας ταυτόχρονα την αξιοπιστία του συστήματος και μέσα στα κατάλληλα οικονομικά πλαίσια. Οι DC γραμμές μεταφοράς είναι καταλληλότερες για μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς ενέργειας καθώς αντισταθμίζει την επένδυση του κόστους κεφαλαίου σε σταθμούς μετατροπής. Μερικά από τα πλεονεκτήματα και στόχοι των παρόχων με τη χρήση υψηλών τάσεων γραμμών μεταφοράς είναι η βελτιωμένη χωρητικότητα μεταφοράς, η μείωση απωλειών στις γραμμές, μειωμένο κόστος κατασκευής, πρόσβαση στις απομακρυσμένες πηγές ενέργειας. Τέλος, να σημειωθεί ότι η απόσταση μεταξύ των φάσεων στις γραμμές μεταφοράς υψηλών τάσεων ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες για εμφάνιση τριφασικών ή φασικών σφαλμάτων και ταυτόχρονα οι γραμμές αυτές απαιτούν λιγότερες εγκαταστάσεις [7]

Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει αυξηθεί ο αριθμός των HVDC γραμμών (High Voltage Direct Current) και FACTS ελεγκτών (Flexible Alternating Current Transmission Systems) για τη ρύθμιση της ροής ισχύος. Τα AC συστήματα δεν είναι άμεσα ελεγχόμενα καθώς η αντίσταση του συστήματος καθορίζει τη ροή ισχύος και για αυτόν τον λόγο είναι σημαντική η αύξηση του βαθμού ελέγχου της ροής ισχύος, για να έχουν οι πηγές μεταφοράς αποτελεσματική χρήση. Οι συμβατικές συσκευές ελέγχου της ροής ισχύος όπως, συσκευές διακλάδωσης, μετασχηματιστές ρύθμισης τάσης και συσκευές αλλαγής φάσης δεν είναι ευέλικτα καθώς εφαρμόζουν μηχανικούς διακόπτες, οι οποίοι είναι αργοί στη λειτουργία τους και φθείρονται και καταστρέφονται πιο εύκολα. Τα συστήματα HVDC προσφέρουν πιο ευέλικτο έλεγχο της ροής φορτίου γιατί, μπορούν να τον πραγματοποιήσουν με ακρίβεια και άμεσα με τη χρήση μετατροπών, ικανών να αλλάξουν την AC ισχύ σε DC ισχύ και αντίστροφα, μαζί με την τροποποίηση των AC τάσεων σε έναν ή

περισσότερους μετατροπείς. Οι ελεγκτές FACTS που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ροής ισχύος είναι STATCOM (Static synchronous compensator) SSSC (Static synchronous series compensator) και UPFC (Unified Power Flow Control). Τα συστήματα HVDC και ελεγκτές FACTS ενισχύουν τα συστήματα ενέργειας και βελτιώνουν την επίδοση των αυξανόμενων κατανεμημένων πηγών ενέργειας[7].

Οι τρεις βασικές ηλεκτρικές παράμετροι μιας γραμμής μεταφοράς, οι οποίες μετρούνται ανά μονάδα μήκους είναι οι εξής:

- 1) Η εν σειρά αντίσταση r , σε Ω/m .
- 2) Η εν σειρά επαγωγή L , σε H/m .
- 3) Η εγκάρσια χωρητικότητα C , σε F/m .

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

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

όπου A = η διατομή του αγωγού σε mm^2 .

l = το μήκος του αγωγού σε m .

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

Η κατανομή του ρεύματος γίνεται ομοιόμορφη σε όλη τη διατομή του αγωγού μόνο όταν το ρεύμα είναι συνεχές. Αν είναι εναλλασσόμενο υπάρχει ανομοιομορφία στην κατανομή και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ενεργούς αντίστασης του αγωγού κατά 3-5%.

Η εν σειρά σύνθετη αντίσταση μιας γραμμής μεταφοράς διαμορφώνεται από τις εξής παραμέτρους, την επαγωγή και την αντίσταση. Η εν σειρά επαγωγή L , η οποία προκαλείται από την τάση που επάγεται στους αγωγούς λόγω της αλληλεπίδρασής τους με τα μαγνητικά πεδία που τους περιβάλλουν, είναι η σημαντικότερη της γραμμής γιατί επηρεάζει την ικανότητα μεταφοράς της γραμμής. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι αυτά τα μαγνητικά πεδία εμφανίζονται όταν ένας αγωγός διαρρέεται από μεταβαλλόμενο ρεύμα με αποτέλεσμα τη δημιουργία

μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Τέλος, για τον υπολογισμό των επαγωγικών χαρακτηριστικών της γραμμής μεταφοράς χρειάζεται να βρεθεί η μαγνητική ροή που εμπλέκει κάθε αγωγό της γραμμής.[1]

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των αγωγών έχει ως αποτέλεσμα τη χωρητικότητα μια γραμμής μεταφοράς, η οποία εκφράζεται με το φορτίο ανά μονάδα διαφοράς δυναμικού και είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη κατά μήκος της γραμμής. Όπως η επαγωγή L έτσι και η χωρητικότητα C μια γραμμής μεταφοράς είναι βασική παράμετρος που διαμορφώνει την εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής και παριστάνει ένα δρόμο για τα εγκάρσια ρεύματα διαρροής. Τα ρεύματα αυτά, που είναι ανεξάρτητα από τη φόρτιση της γραμμής, έχουν επιρροή στην πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, την απόδοση, το συντελεστή ισχύος αυτής καθώς και στην ευστάθεια του συστήματος που ανήκει η γραμμή. Η χωρητικότητα C εξαρτάται από το μήκος της γραμμής μεταφοράς όπως επίσης και από την απόσταση των αγωγών μεταξύ τους.

2.4.1 Η ικανότητα φόρτισης της γραμμής μεταφοράς

Για να γίνει ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ληφθεί υπόψη ένας σοβαρός παράγοντας, η ικανότητα φόρτισης των γραμμών μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς κατασκευάζονται για να λειτουργούν υπό ορισμένο επίπεδο τάσης. Δηλαδή, η επιλογή του μεγέθους των αγωγών, της γεωμετρίας τους, της απόστασης μεταξύ των φάσεων και της μόνωσης καθορίζονται με βάση το επίπεδο τάσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Η ενέργεια που μπορεί να μεταφερθεί δεν είναι απεριόριστη. Στις εναέριες γραμμές μικρού μήκους όπως και στα υπόγεια καλώδια υπάρχει ένα όριο, το οποίο καθορίζεται από την θερμική αντοχή των αγωγών της γραμμής. Για τις εναέριες μεγάλου μήκους γραμμές το όριο προκύπτει από τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής, η οποία περιορίζει την ισχύ που μπορεί να μεταφερθεί μέσω αυτής. Κατά τη ροή ρεύματος μέσω των αγωγών αναπτύσσεται θερμότητα λόγω των απωλειών, με αποτέλεσμα, την αύξηση της θερμοκρασίας τους. Τα προβλήματα που θα προκύψουν λόγω της υπέρβασης των ορίων είναι το τάνυσμα των αγωγών ενώ, στα καλώδια που τα θερμικά όρια είναι πιο περιοριστικά, η καταπόνηση ή η καταστροφή της μόνωσης.

Η –θεωρητικά- μέγιστη τιμή πραγματικής ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί μέσω μιας γραμμής μεταφοράς ονομάζεται όριο στατικής ευστάθειας P_{max} . Όσο το μήκος της γραμμής αυξάνεται, τόσο το όριο στατικής ευστάθειας μειώνεται. Το πρακτικό όριο φόρτισης μιας γραμμής είναι κάτω από το όριο στατικής ευστάθειας.

2.5 Φορτία

Φορτίο ονομάζεται μια συσκευή ή ένα σύνολο συσκευών που απορροφούν πολλή ενέργεια απ' το δίκτυο. Οι τιμές της ισχύος, που καταναλώνονται απ' τα φορτία, κυμαίνονται μέσα σε ένα μεγάλο εύρος που έχει αρχή μερικά Watt και φτάνει αρκετά MW.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που έχει ένα τυπικό σύνθετο ηλεκτρικό φορτίο είναι τα εξής:

1. Το μέγεθος του αλλά και ο τρόπος μεταβολής του με το χρόνο προβλέπονται σε μεγάλο βαθμό.
2. Μεταβάλλεται πολύ αργά με το χρόνο, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν σταθερό από λεπτό σε λεπτό.
3. Η ισχύς που καταναλώνεται είναι πάντα άεργη. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ότι τα πιο βασικά στοιχεία ενός φορτίου είναι οι κινητήρες που είναι πάντα επαγωγικοί.
4. Είναι πάντοτε συμμετρικό.
5. Εξαρτάται από την τάση και τη συχνότητα.[8]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση ροής φορτίου ενδείκνυται για τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, κάτω από συγκεκριμένη φόρτιση, στη μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση λειτουργίας. Με τη βοήθεια αυτής της ανάλυσης μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις όλων των ζυγών του δικτύου, καθώς και οι ροές ισχύος σε όλες τις γραμμές μεταφοράς και των μετασχηματιστών.

Η ανάλυση ροής φορτίου είναι σημαντική για τον σχεδιασμό μεταβολών ή μελλοντικών επεκτάσεων σε ένα υφιστάμενο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας όπως:

- Ανάπτυξη νέων μονάδων παραγωγής
- Τροφοδοσία νέων φορτίων
- Όδευση νέων γραμμών μεταφοράς
- Διασύνδεση με άλλα συστήματα [8]

Καθώς θα πρέπει, πριν προχωρήσει η υλοποίησή τους, να μελετηθούν οι επιπτώσεις που θα έχουν στην λειτουργία του συστήματος. Επίσης, θα χρειαστεί να αναλυθεί η αποδοτικότητα και η αποτελεσματικότητα των διάφορων λύσεων ώστε να συγκριθούν μεταξύ τους και να γίνει η επιλογή της βέλτιστης για το σύστημα. Η ανάλυση ροής φορτίου είναι χρήσιμη και απαραίτητη για την εκτίμηση της εύρυθμης λειτουργίας ενός συστήματος, όταν τεθούν εκτός λειτουργίας μια ή περισσότερες μονάδες παραγωγής ή γραμμές μεταφοράς, λόγω της επίδρασης που έχουν σε διάφορες συνθήκες φόρτισής του καθώς και για την εξεύρεση απαραίτητων αρχικών συνθηκών που χρησιμοποιούνται σε μελέτες βραχυκυκλωμάτων, μεταβατικής ευστάθειας.

Η σχεδίαση ενός υπολογιστικού προγράμματος ανάλυσης ροής φορτίου απαιτεί τη μαθηματική περιγραφή του προβλήματος μέσω μη γραμμικών εξισώσεων, καθώς και την επίλυση αυτών με την κατάλληλη επαναληπτική μέθοδο. Οι δύο πιο

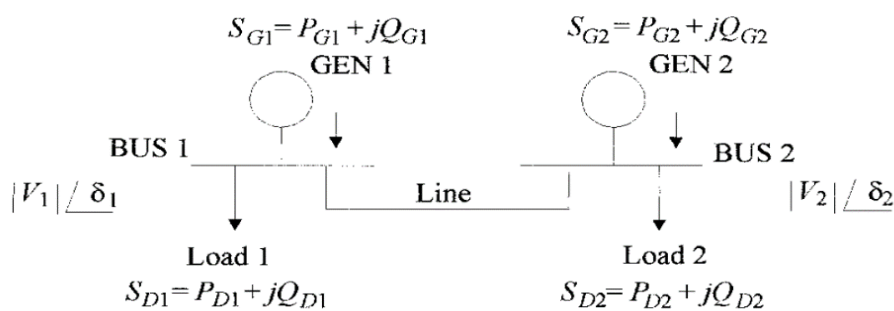
γνωστές μέθοδοι για τη λύση αυτών των προβλημάτων είναι η Gauss-Seidel και Newton-Raphson.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι σε όλες τις επαναληπτικές μεθόδους, πρέπει να τηρούνται οι κάτωθι περιορισμοί:

- Να μην γίνεται υπέρβαση των ορίων των πηγών άεργου ισχύος
- Να μην γίνεται υπέρβαση των ορίων λήψης των μετασχηματιστών ελέγχου
- Να μην προκαλείται υπερφόρτωση στις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές
- Οι τάσεις των ζυγών να μην ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια [8]

3.2 Εξισώσεις ροής φορτίου

Για το σχεδιασμό των Εξισώσεων Ροής Φορτίου θα γίνει χρήση ενός συστήματος δύο ζυγών όπως το Σχήμα 3.1:



Σχήμα 3.1: Σύστημα δύο ζυγών

$$P_G = \text{Παραγωγή πραγματικής ισχύος}$$

$$Q_G = \text{Παραγωγή άεργου ισχύος}$$

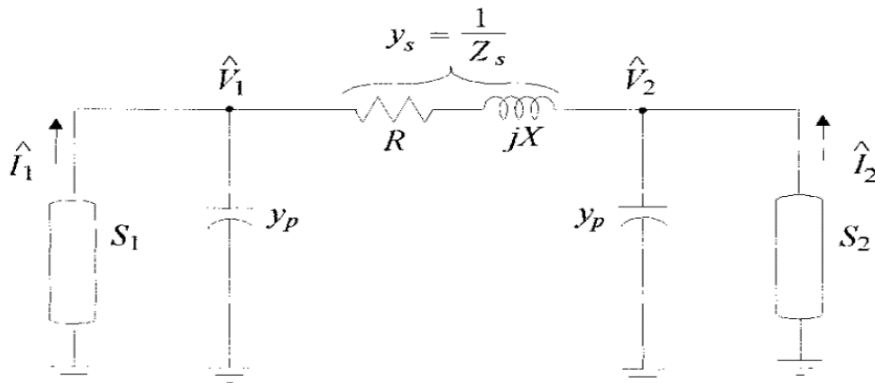
$$P_D = \text{Κατανάλωση πραγματικής ισχύος}$$

$$Q_D = \text{Κατανάλωση άεργου ισχύος}$$

$$|V| = \text{μέτρο τάσης}$$

$$\delta = \text{Γωνία τάσης}$$

Για να γίνει η μελέτη της ροής του φορτίου του παραπάνω σχήματος είναι απαραίτητη η χρήση ισοδύναμου κυκλώματος όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Ισοδύναμο κύκλωμα δύο ζυγών, για τη μελέτη ροής φορτίου

Όπως φαίνεται, η γεννήτρια με τα φορτία έχουν αντικατασταθεί από την ισχύ των αντίστοιχων ζυγών S_i . Στη γραμμή μεταφοράς τα στοιχεία εκφράζονται μέσω των αγωγιμοτήτων (Y).

Ισχύσουν οι παρακάτω σχέσεις

$$S_{G1} = P_{G1} + jQ_{G1}$$

$$S_{D1} = P_{D1} + jQ_{D1}$$

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (3.1)$$

Ομοίως:

$$S_{G2} = P_{G2} + jQ_{G2}$$

$$S_{D2} = P_{D2} + jQ_{D2}$$

$$S_2 = S_{G2} - S_{D2} = (P_{G2} - P_{D2}) + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \quad (3.2)$$

Στη συνέχεια, γίνεται υπολογισμός των ρευμάτων του σχήματος 3.2 με τον εξής τρόπο:

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

$$I_1 = (Y_D + Y_S) V_1 - Y_S V_2 \quad (3.3)$$

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

$$I_2 = (Y_D + Y_S) V_2 - Y_S V_1 \quad (3.4)$$

Θεωρώντας:

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

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

Και αντικαθιστώντας στις (2.3) και (2.4) έχουμε:

$$I_1 = Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 \quad (3.5)$$

$$I_2 = Y_{22} V_2 + Y_{21} V_1 \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = I_{BUS} = Y_{BUS} V_{BUS} \quad (3.7)$$

Ο πίνακας Y_{BUS} ονομάζεται πίνακας αγωγιμοτήτων όπου τα στοιχεία του περιγράφονται ως εξής :

- Τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{ii} ισούται με το άθροισμα των αγωγιμοτήτων που συνδέονται στο ζυγό i

- Τα μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα αγωγιμότητων Y_{ij} ισούνται με το αντίθετο (-) άθροισμα των αγωγιμότητων μεταξύ των ζυγών i και j όπου $i \neq j$

Στη συνέχεια οι εξισώσεις (2.5) και (2.6) γράφονται και ως :

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \quad (3.8)$$

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \quad (3.9)$$

Λύνοντας τις σχέσεις ως προς S_1^* και S_2^* έχουμε τις εξισώσεις ροής φορτίου του συστήματος του Σχ.1

$$S_1^* = P_1 - jQ_1 = Y_{11}V_1V_1^* + Y_{12}V_2V_1^* \quad (3.10)$$

$$S_2^* = P_2 - jQ_2 = Y_{21}V_1V_2^* + Y_{22}V_2V_2^* \quad (3.11)$$

Οι οποίες στη συνέχεια γράφονται ως :

$$P_1 - jQ_1 = V_1^* \sum_{k=1}^2 Y_{1k}V_k \quad (3.12)$$

$$P_2 - jQ_2 = V_2^* \sum_{k=1}^2 Y_{2k}V_k \quad (3.13)$$

Επομένως για σύστημα n ζυγών οι εξισώσεις ροής φορτίου είναι οι ακόλουθες

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.14)$$

Όπου $V_i = |V_i| < \delta_i$ και $Y_{ik} = |Y_{ik}| < y_{ik}$

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |Y_{ik}| |V_k| e^{j(\delta_k - \delta_i + y_{ik})} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.15)$$

Εξισώνοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη στη σχέση (2.15) προκύπτουν οι πραγματικές εξισώσεις ροής φορτίου για ένα σύστημα n ζυγών [3,4] :

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |Y_{ik}| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_i + y_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.16)$$

$$Q_i = - \sum_{k=1}^n |V_i| |Y_{ik}| |V_k| \sin(\delta_k - \delta_i + y_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.17)$$

3.2.1 Κατηγορίες μεταβλητών των εξισώσεων ροής φορτίου

Η κατάσταση κάθε ζυγού ενός ΣΗΕ έχει εξάρτηση απ' τις τιμές των ακόλουθων έξι μεταβλητών:

$$P_{Gi}, Q_{Gi}, |V_i|, \delta_i, P_{Di}, Q_{Di}$$

Οι μεταβλητές κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- 1) Μη ελέγξιμες μεταβλητές ή μεταβλητές διαταραχής: είναι αυτές που δεν τίθενται υπό έλεγχο (P_{Di}, Q_{Di})
- 2) Μεταβλητές ελέγχου: είναι αυτές που είναι υπό έλεγχο (P_{Gi}, Q_{Gi})

3) Μεταβλητές κατάστασης είναι αυτές οι οποίες επηρεάζονται αλλάζοντας τις μεταβλητές ελέγχου (P_{Gi}, Q_{Gi}), δηλαδή, τα μέτρα των τάσεων $|V_i|$ και οι φασικές γωνίες δ_i [8]

3.2.2 Κατηγορίες ζυγών

Από τις συνολικά έξι μεταβλητές όπου έχουν σχέση με τους ζυγούς είναι εφικτή η πρόβλεψη δύο εξ' αυτών. Αυτό γίνεται μέσω ιστορικών στοιχείων σχετικά με τις απαιτήσεις των φορτίων. Αυτές είναι η πραγματική και άεργος ισχύς των φορτίων δηλαδή P_{Di} και Q_{Di} . Επομένως, οι εναπομείνουσες τέσσερις άγνωστες μεταβλητές ανά ζυγό είναι που χρειάζονται να υπολογιστούν. Σε ένα σύστημα n ζυγών έχουμε $4n$ μεταβλητές και $2n$ εξισώσεις. Ο μοναδικός τρόπος επίλυσης του συστήματος γίνεται με τον προκαθορισμό δύο από τις τέσσερις μεταβλητές, ανά ζυγό. Ανάλογα με το ποιες απ' τις τέσσερις ποσότητες $P_G, Q_G, |V_i|, \delta_i$ γνωρίζουμε, υπάρχουν τρεις κατηγορίες ζυγών:

1) Ζυγοί φορτίου: Είναι οι ζυγοί όπου δε γίνεται παραγωγή επομένως, $P_{Gi} = Q_{Gi} = 0$. Οι ζυγοί αυτοί αποτελούν το 85% του συνόλου των ζυγών ενός δικτύου και ονομάζονται έτσι γιατί σ' αυτό υπάρχουν μόνο φορτία. Οι μεταβλητές που υπολογίζονται απ' την λύση των εξισώσεων ροής φορτίου σ' αυτούς τους ζυγούς είναι $|V_i|$ και δ_i .

2) Ζυγοί με ελεγχόμενη τάση: Είναι οι ζυγοί οι οποίοι συνδέονται σε γεννήτριες και είναι εφικτό με αυτό τον τρόπο να έχουν υπό έλεγχο και να διατηρούν σταθερό σε μια τιμή το μέτρο της τάσης $|V_i|$ και την παραγόμενη ισχύ P_{Gi} . Αποτελούν το υπόλοιπο 15% του συνόλου των ζυγών του δικτύου. Οι μεταβλητές που μπορούν να υπολογιστούν από τη λύση των εξισώσεων ροής φορτίου είναι Q_G και δ_i .

Ζυγός αναφοράς: Είναι ο μοναδικός και είναι ορισμένο το μέτρο της τάσης του, καθώς και η φασική του γωνία ίση με 0° . Δηλαδή, $V = 1 < 0^\circ$. Έτσι, οι μεταβλητές που υπολογίζονται είναι P_{Gi} και Q_{Gi} . Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται συνοπτικά η ταξινόμηση των μεταβλητών αναλόγως το είδος του ζυγού.

Πίνακας 3.1: Ταξινόμηση μεταβλητών συστήματος ανάλογα με το είδος του ζυγού

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

Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι οι μεταβλητές που θα προκύπτουν απ' τη λύση των εξισώσεων ροής φορτίου πρέπει να πληρούν κάποιες προδιαγραφές. Οι τιμές των μέτρων των τάσεων πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ $\pm 5-10\%$ των ονομαστικών τιμών $|V_i|_{min} < |V_i| < |V_i|_{max}$.

- Οι τιμές της γωνίας ισχύος έχουν μια μέγιστη τιμή και ως συνέχεια, έχουμε μια μέγιστη τιμή πραγματικής ισχύος, που μπορεί να μεταφερθεί απ' τη γραμμή μεταφοράς. $|\delta_i - \delta_j| < (\delta_i - \delta_j)_{max}$.
- Η παραγωγή πραγματικής και άεργος ισχύς στους ζυγούς κυμαίνεται μεταξύ

$$P_{Gi_{min}} < P_{Gi} < P_{Gi_{max}}$$

$$Q_{Gi_{min}} < Q_{Gi} < Q_{Gi_{max}}$$

ενώ όσοι δεν έχουν παραγωγή όπως οι ζυγοί φορτίου έχουμε $P_{Gi} = Q_{Gi} = 0$

3.3 Μέθοδος Gauss – Seidel (G-S)

Η μέθοδος Gauss-Seidel είναι μια από τις πιο απλές επαναληπτικές μεθόδους. Συνήθως χρησιμοποιείται για την ανάλυση μικρών ενεργειακών συστημάτων ενώ στα μεγάλα δεν μπορεί να εφαρμοστεί παρά μόνο για την πρώτη προσεγγιστική λύση, η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια, στη μέθοδο Newton-Raphson. Για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου με τη μέθοδο G-S χρησιμοποιείται η μιγαδική μορφή των εξισώσεων.

Τα βήματα είναι τα εξής :

1. Ορίζουμε $|V_i| = 1 < 0^\circ$ για τον ζυγό αναφοράς
2. Ορίζουμε τον πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου Y_{BUS}
3. Υπολογισμός τάσης V_i για τους ζυγούς φορτίου με τον τύπο :

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(v)*}} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k^{(v)} \right) \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (3.18)$$

Ο υπολογισμός του V_i τερματίζει όταν $|V_i^{(v+1)} - V_i^{(v)}| < \varepsilon$ όπου $\varepsilon \leq 10^{-4}$

4. Υπολογισμός άεργους ισχύος για του ζυγούς ελέγχου τάσης με τον τύπο:

$$Q_i^{(v+1)} = -|V_i|_{spec} \left[\sum_{k=1}^{i-1} |y_{ik}| |V_k|^{(v+1)} \sin(\delta_k^{(v+1)} - \delta_i^{(v)} + y_{ik}) + \sum_{k=i+1}^n |y_{ik}| |V_k|^{(v)} \sin(\delta_k^{(v)} - \delta_i^{(v)} + y_{ik}) \right] \quad (3.19)$$

όπου $|V_i|_{spec}$ η προκαθορισμένη τιμή της τάσης του ζυγού. Επίσης υπάρχει ο έλεγχος $|V_i^{(v+1)} - V_i^{(v)}| < \varepsilon$, όπου $\varepsilon \leq 10^{-4}$.

5. Υπολογισμός των άγνωστων μεταβλητών του ζυγού αναφοράς (P_{Gi}, Q_{Gi}) με τη βοήθεια των εξισώσεων ροής φορτίου (3.16, 3.17) [8,9]

3.4 Μέθοδος Newton-Raphson (N-R)

Η μέθοδος N-R είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος για την επίλυση των εξισώσεων ροής φορτίου. Σε αντίθεση με την G-S η οποία είναι απλή και συγκλίνει αργά, η N-R είναι πολύπλοκη αλλά συγκλίνει γρήγορα τόσο για μικρά όσο και μεγάλα συστήματα. Γίνεται χρήση των πραγματικών μορφών των εξισώσεων ροής φορτίου.

Τα βήματα είναι τα εξής :

1. Δημιουργία του πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{BUS}
2. Ορίζουμε ως γνωστές τις τάσεις στους ζυγούς των φορτίων καθώς και τις φασικές γωνίες δ των ζυγών με ελεγχόμενη τάση και των ζυγών φορτίων.
3. Υπολογισμός P_i και Q_i των ζυγών φορτίου και ελέγχου τάσης σύμφωνα με τις σχέσεις 2.16 και 2.17
4. Υπολογισμός των $P_{i,spec}$ και $Q_{i,spec}$ σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{i,spec} = P_{Gi} - P_{Di}, \quad Q_{i,spec} = Q_{Gi} - Q_{Di}.$$

5. Υπολογισμός ΔP_i και ΔQ_i με τη βοήθεια των εξής σχέσεων :

$$\Delta P_i^{(v)} = P_{i,spec} - P_i^{(v)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.20)$$

$$\Delta Q_i^{(v)} = Q_{i,spec} - Q_i^{(v)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.21)$$

6. Έλεγχος $|V_i^{(v+1)} - V_i^{(v)}| < \varepsilon$ όπου $\varepsilon \leq 10^{-4}$, μετά τον υπολογισμό των $\Delta P_i^{(v)}$, $\Delta Q_i^{(v)}$. Αν η λύση είναι αποδεκτή συνεχίζουμε και υπολογίζουμε τα P_i , Q_i για το ζυγό αναφοράς με τις σχέσεις 3.16, 3.17

7. Αν η λύση είναι μη αποδεκτή τότε βρίσκουμε για την επόμενη επανάληψη τα νέα δ , $|V|$ ως εξής :

$$\begin{bmatrix} \delta^{(v+1)} \\ |V|^{(v+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(v)} \\ |V|^{(v)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H^{(v)} & N^{(v)} \\ M^{(v)} & L^{(v)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(v)} \\ \Delta Q^{(v)} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Έπειτα ο αλγόριθμος επιστρέφει στο δεύτερο βήμα και συνεχίζει μέχρι να συγκλίνει, δηλαδή να ισχύει ο περιορισμός $|V_i^{(v+1)} - V_i^{(v)}| < \varepsilon$ [8,9]

3.5 Βέλτιστη ροή ισχύος

Η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας έχει ξεπεράσει την ανάπτυξη των υποδομών, προσθέτοντας έτσι πίεση στο ήδη γηράσκων σύστημα. Συγχρόνως η αυξανόμενη διείσδυση μη αποσπώμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως, η αιολική και η ηλιακή, προσθέτουν ένα ακόμα βαθμό πολυπλοκότητας στη ρύθμιση της ροής ισχύος. Όλοι αυτοί οι παράγοντες, συμβάλλουν στην ανάγκη για γρήγορες και αξιόπιστες μεθόδους βελτιστοποίησης, εργαλεία και λογισμικά τα οποία θα εξασφαλίζουν την ασφάλεια και τα οικονομικά ζητήματα αμφότερα, με στόχο την υποστήριξη του ελέγχου και της λειτουργίας των συστημάτων ενέργειας. Η βέλτιστη ροή ισχύος, είναι η κυρίαρχη μέθοδος για τέτοιες αναλύσεις, αν και οι υπάρχουσες μέθοδοι επίλυσης για τη βέλτιστη ροή ισχύος αποδεικνύονται ανεπαρκής, εξαιτίας της αυξημένης πολυπλοκότητας των σύγχρονων προβλημάτων βέλτιστης ροής ισχύος. Η βέλτιστη ροή ισχύος στοχεύει στη βελτιστοποίηση ενός δεδομένου κόστους, του σχεδιασμού ή της αξιοπιστίας ελέγχοντας τη ροή ισχύος σε ένα δίκτυο, χωρίς να παραβιάζει τους περιορισμούς

και τα όρια τόσο του συστήματος, όσο και του εξοπλισμού του. Η βέλτιστη ροή ισχύος, καθορίζει την τάση, το ρεύμα και την διαχεόμενη ενέργεια στο σύστημα με ένα μη περιοριστικό τρόπο παρουσιάζοντας πολλαπλές, ταυτοποιημένες ροής λύσεις ροής ισχύος, προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος στόχος [10].

Το γενικό πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος είναι μη γραμμικό, μη κυρτό, μεγάλης κλίμακας, του οποίου η βελτιστοποίηση ίσως περιέχει συνεχείς και διακριτές μεταβλητές ελέγχου. Ανεξαρτήτως ονόματος, οποιαδήποτε πρόβλημα βελτιστοποίησης συστήματος ισχύος, το οποίο περιέχει εξισώσεις... ροής ισχύος στους περιορισμούς του, ορίζεται σαν ένα πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος. Η δυσκολία επίλυσης των προβλημάτων βέλτιστης ροής ισχύος αυξάνεται σημαντικά λόγω της ανάπτυξης του μεγέθους του δικτύου και της πολυπλοκότητάς του. Οι τελευταίες βιομηχανικές εξελίξεις, έχουν δημιουργήσει τεράστια αύξηση στην πολυπλοκότητα τους συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο πλέον αποτελείται από ανεξάρτητους παραγωγούς ενέργειας, καταναμημένων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ταυτόχρονα, τα συστήματα απόκρισης ζήτησης προσθέτουν επιπλέον μεταβλητές στην πλευρά φόρτισης των προβλημάτων βέλτιστης ροής ισχύος. Ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης, η χρήση της βέλτιστης ροής ισχύος δεν αποφεύγεται σε πολλές πραγματικές εφαρμογές [10].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή στα βραχυκυκλώματα

Βραχυκύκλωμα ή σφάλμα ονομάζεται κάθε μη προβλεπόμενη και ξαφνική, δομική αλλαγή που συμβαίνει πάνω στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε ένα δίκτυο η πλειοψηφία των βραχυκυκλωμάτων συμβαίνει στις γραμμές μεταφοράς (περίπου 70-80% δεν είναι μόνιμα) και η κυριότεροι λόγοι που τα δημιουργούν είναι διάφορα καιρικά φαινόμενα όπως, πτώση κεραυνών, ανθρώπινα λάθη, καθώς και φθορά του ηλεκτρικού εξοπλισμού.

Μαζί με την εμφάνιση των βραχυκυκλωμάτων έρχεται πάντα ένα μικρό ή μεγάλο βύθισμα της τάσης σε όλο το σύστημα, καθώς και μια απότομη αύξηση του ρεύματος, η οποία προκαλεί και τη φθορά των υλικών.

Τα βραχυκυκλώματα χωρίζονται σε συμμετρικά και μη συμμετρικά. Στην πρώτη κατηγορία κατατάσσονται τα τριφασικά συμμετρικά βραχυκυκλώματα, (είτε στερεά δηλαδή, $Z_{\sigma} = 0$ είτε όχι $Z_{\sigma} \neq 0$) τα οποία είναι πιο δύσκολα να αντιμετωπιστούν γιατί, διακόπτεται εντελώς η μεταφορά ισχύς στη γραμμή. Αποτελούν το 5% του συνόλου των βραχυκυκλωμάτων. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκει το υπόλοιπο 95% των σφαλμάτων, και είναι τα παρακάτω:

- Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη Γη (Single-Line-to-Ground fault – SLG)
- Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο οποιονδήποτε φάσεων (Line-to-Line fault – LL)
- Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και τη Γη (Double-Line-to-Ground fault – DLG)

Τέλος, να αναφερθεί ότι οι τρόποι για να αντιμετωπιστούν τα βραχυκυκλώματα είναι οι εξής:

1. Εκκαθάριση μέσω διακοπτικών συσκευών.

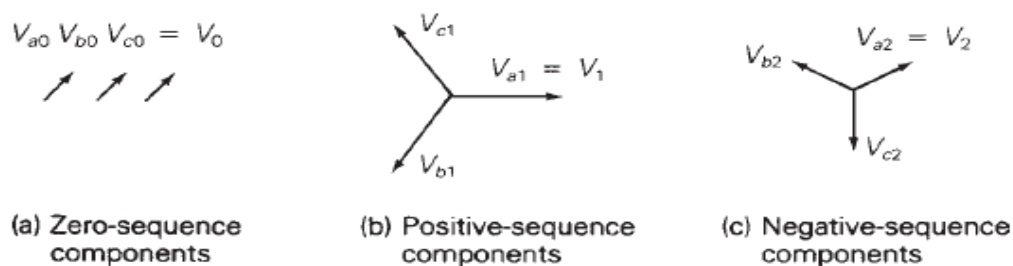
2. Μελέτη για όλα τα είδη του βραχυκυκλώματος και καθορισμός κρίσιμων χρόνων εκκαθάρισης.
3. Επιλογή κατάλληλων διακοπτικών στοιχείων και ρύθμισή τους.

Τα μη συμμετρικά βραχυκυκλώματα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μελετώνται με τη βοήθεια των συμμετρικών συνιστωσών και των συμμετρικών ακολουθιακών δικτύων, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω, στο κεφάλαιο [8,11].

4.2 Συμμετρικές συνιστώσες

Η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών είναι μια τεχνική που μοντελοποιεί και επιτρέπει την ανάλυση μη συμμετρικών τριφασικών συστημάτων. Πιο αναλυτικά, ορίστηκε ένας γραμμικός μετασχηματισμός από φασικές συνιστώσες σε συμμετρικές συνιστώσες που είχε ως συνέπεια, τη δημιουργία τριών νέων δικτύων, των ακολουθιακών. Με αυτό τον τρόπο απλοποιήθηκε η μελέτη και ανάλυση των βραχυκυκλωμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Έστω τρεις φασικές συνιστώσες της τάσης V_a, V_b, V_c κάθε μια απ' αυτές αναλύεται σε τρεις κατηγορίες ακολουθιακών συνιστωσών όπως το Σχήμα 4.1 και είναι οι εξής:



Σχήμα 4.1: Συνιστώσες μηδενικής, θετικής, αρνητικής ακολουθίας

- Οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας (zero sequence components) που αποτελούνται από τρία διανύσματα με ίσα μέτρα και μηδενική διαφορά στη φάση.
- Οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας (positive sequence components) που αποτελούνται από τρία διανύσματα με ίσα μέτρα με διαφορά τάσης 120° και φασική ακολουθία a,b,c, (δείκτης + ή 1).

- Οι συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας (negative sequence components) που αποτελούνται από τρία διανύσματα με ίσα μέτρα αλλά με διαφορά φάσεις 120° και φασική ακολουθία a,c,b, (δείκτης – ή 2). [8,11]

Για τη μελέτη και την ανάλυση των βραχυκυκλωμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η αναφορά για τις μηδενικές, θετικές και αρνητικές συνιστώσες γίνεται στη φάση a. Επομένως για να απλοποιηθεί το πρόβλημα γράφουμε τις ακολουθιακές συνιστώσες ως V_0, V_1, V_2 αντίστοιχα.

Ορίζεται ένα διάνυσμα V_p που αποτελείται από τις φασικές τάσεις

$$V_p = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Το διάνυσμα V_s το οποίο αποτελείται από τις ακολουθιακές τάσεις είναι ως εξής

$$V_s = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Με τη χρήση του 3X3 πίνακα μετασχηματισμού A όπου :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}, \quad \alpha = 1 < 120^\circ \quad (4.3)$$

Συνοψίζοντας τις παραπάνω σχέσεις 4.1 , 4.2 , 4.3 έχουμε:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\text{Επομένως } V_p = AV_s \quad (4.5)$$

Στη συνέχεια από τη σχέση 4.4 έχουμε

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \quad (4.6)$$

$$V_b = V_0 + \alpha^2 V_1 + \alpha V_2 \quad (4.7)$$

$$V_c = V_0 + \alpha V_1 + \alpha^2 V_2 \quad (4.8)$$

Από τη σχέση 4.5 μπορεί εύκολα να γίνει υπολογισμός των ακολουθιακών τάσεων:

$$V_s = A^{-1}V_p, \text{ όπου } A = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \quad (4.9) \quad \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (4.10) \quad \Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (4.11)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + \alpha V_b + \alpha^2 V_c) \quad (4.12)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + \alpha^2 V_b + \alpha V_c) \quad (4.13)$$

Όλη αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται αντίστοιχα και για τον υπολογισμό των ακολουθιακών ρευμάτων.

Αρχικά ορίζουμε το διάνυσμα των φασικών ρευμάτων

$$I_p = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Ορισμός διανύσματος ακολουθιακών ρευμάτων

$$I_s = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$\text{Προκύπτει ότι } I_p = AI_s \quad (4.16) \quad \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Από τη σχέση 4.17 έχουμε :

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \quad (4.18)$$

$$I_b = I_0 + \alpha^2 I_1 + \alpha I_2 \quad (4.19)$$

$$I_c = I_0 + \alpha I_1 + \alpha^2 I_2 \quad (4.20)$$

Στη συνέχεια $I_s = A^{-1} I_p$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.21) \quad \Rightarrow$$

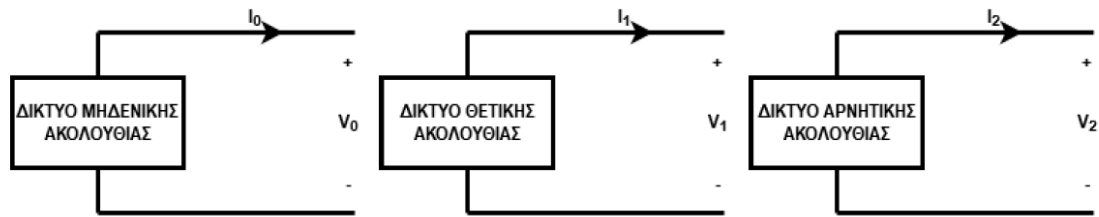
$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (4.22)$$

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c) \quad (4.23)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c) \quad (4.24)$$

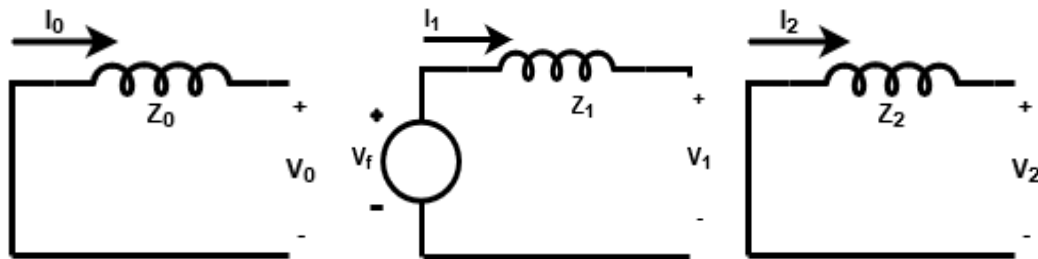
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για την εύρεση του ρεύματος ή της τάσης σε άλλο σημείο της γραμμής και όχι του σφάλματος, θα πρέπει να γίνει και εκεί ο υπολογισμός των συμμετρικών συνιστωσών και μετέπειτα των φασικών ρευμάτων και τάσεων.

Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζονται τα δίκτυα μηδενικής, θετικής, αρνητικής ακολουθίας.



Σχήμα 4.2: Δίκτυα μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας

Όμως για την ανάλυση των συμμετρικών και ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων γίνεται χρήση των κατά Thevenin ισοδύναμων κυκλωμάτων τα οποία έχουν την παρακάτω μορφή στο Σχήμα 4.3 :



Σχήμα 4.3: Τα κατά Thevenin ισοδύναμα κυκλώματα των ακολουθιακών δικτύων (μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας).

4.3 Συμμετρικά βραχυκυκλώματα

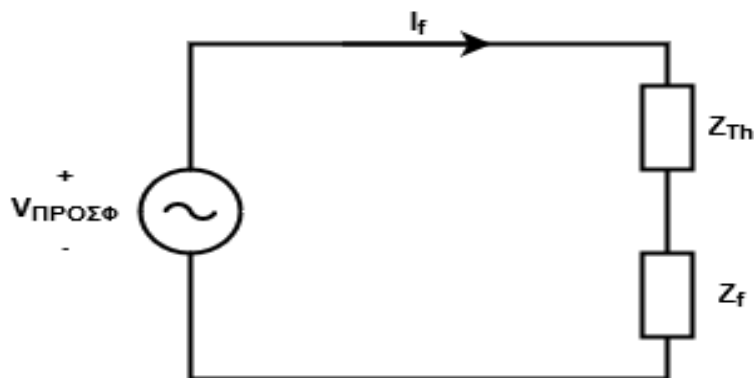
4.3.1 Τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα

Για τη μελέτη και την ανάλυση ενός τριφασικού συμμετρικού βραχυκυκλώματος απαιτείται μόνο η χρήση του κατά Thevenin θετικού ακολουθιακού δικτύου. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτά τα βραχυκυκλώματα έχουν ως χαρακτηριστικό να διατηρούν τη συμμετρία τους. Έτσι, επιτρέπεται η ανάλυσή τους αρχικά, μέσω του μονοφασικού ισοδύναμου και στη συνέχεια, επεκτείνεται η ανάλυση στο τριφασικό σύστημα όπου οι τιμές των μέτρων των τάσεων και των ρευμάτων παραμένουν οι ίδιες ενώ, οι φάσεις έχουν διαφορά 120° .

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το κατά Thevenin ισοδύναμο δίκτυο της θετικής ακολουθίας όπου συμβαίνει ένα τριφασικό συμμετρικό βραχυκύκλωμα, με σύνθετη

αντίσταση Z_f σε ένα ζυγό k ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αν το $Z_f = 0$ τότε το βραχυκύκλωμα είναι στέρεο όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Οι μεταβλητές που χρειάζονται για την ανάλυση του τριφασικού σφάλματος και τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_f , είναι η προσφαλματική τάση $V_{\pi\rho\sigma\phi}$ του ζυγού k τη στιγμή πριν γίνει το βραχυκύκλωμα, καθώς και η κατά Thevenin ισοδύναμη αντίσταση Z_{TH} του δικτύου προς το ζυγό k .



Σχήμα 4.4: Κατά Thevenin ισοδύναμο δίκτυο της θετικής ακολουθίας για την μελέτη ενός συμμετρικού βραχυκυκλώματος

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm στο παραπάνω δίκτυο προκύπτει :

$$V_{\pi\rho\sigma\phi} = I_f (Z_{TH} + Z_f) \quad (4.25)$$

$$\text{Κάνοντας επίλυση ως προς } I_f \text{ έχουμε : } I_f = \frac{V_{\pi\rho\sigma\phi}}{(Z_{TH} + Z_f)} \quad (4.26)$$

Να σημειωθεί ότι αν το βραχυκύκλωμα είναι στέρεο το $Z_f = 0$ όπως και το $V_f = 0$. Κατ' επέκταση η παραπάνω σχέση διαμορφώνεται ως :

$$I_f = \frac{V_{\pi\rho\sigma\phi}}{(Z_{TH})} \quad (4.27)$$

Κατά τη διάρκεια του τριφασικού συμμετρικού βραχυκυκλώματος παρατηρείται ότι οι τάσεις όλων των ζυγών του υπόλοιπου δικτύου μειώνονται. Το μέγεθος αυτής της πτώσης τάσης είναι ένδειξη της αντοχής του δικτύου. Η αντοχή σε βραχυκύκλωμα (Short Circuit Capacity – SCC) ή επίπεδο σφάλματος εκφράζει το μέτρο αυτής της αντοχής καθώς και το μέτρο της σοβαρότητας του

βραχυκυκλώματος. Η ποσότητα αυτή ορίζεται με τον παρακάτω τύπο εκφρασμένο σε p.u :

$$|SCC| = |V_{\pi\rho\sigma\phi}| |I_f| \text{ p.u} \quad (4.28)$$

ενώ αν χρησιμοποιηθεί η πολική τάση και το φασικό ρεύμα η SCC εκφράζεται σε τριφασικό

$$|SCC| = \sqrt{3} |V_{\pi\rho\sigma\phi}| |I_f| \text{ MVA} \quad (4.29)$$

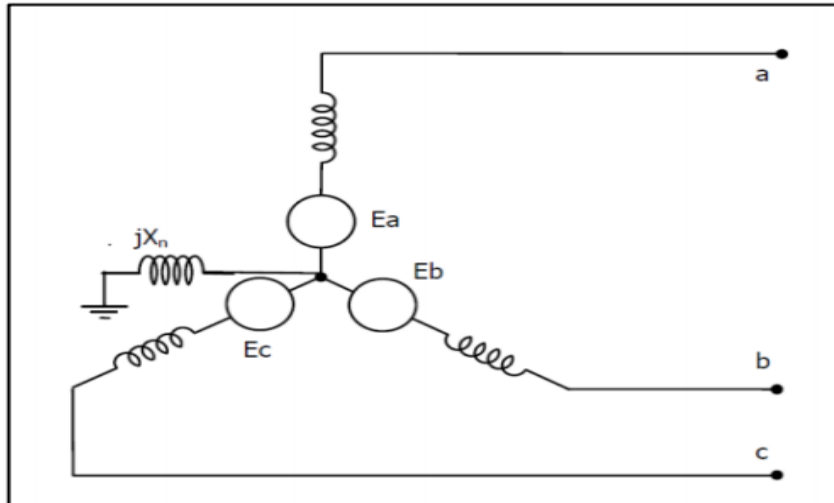
4.4 Ασύμμετρα βραχυκυκλώματα

4.4.1 Ακολουθιακά δίκτυα γεννητριών

Έστω μια αφόρτιστη γεννήτρια όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 4.5, όπου a,b,c τρεις φάσεις E_a, E_b, E_c οι πηγές κάθε φάσης και jX_n αντίσταση ουδετέρου.

Οι γεννήτριες δεν απεικονίζονται με τον ίδιο τρόπο στα ακολουθιακά δίκτυα. Οι διαφορές είναι οι εξής:

- Ο σχεδιασμός της πηγής τάσης γίνεται μόνο στο δίκτυο της θετικής ακολουθίας.
- Η αντίδραση στα δίκτυα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας είναι διαφορετική λόγω του ότι οι πηγές είναι ενεργά στοιχεία.
- Το ρεύμα του ουδετέρου είναι τρεις φορές πιο μεγάλο από το ρεύμα I_0 . επίσης, και η αντίδραση του ουδετέρου ισούται με $3 jX_n$ εξαιτίας της πτώσης τάσης που είναι ίση με $(3I_0) jX_n$ [8].

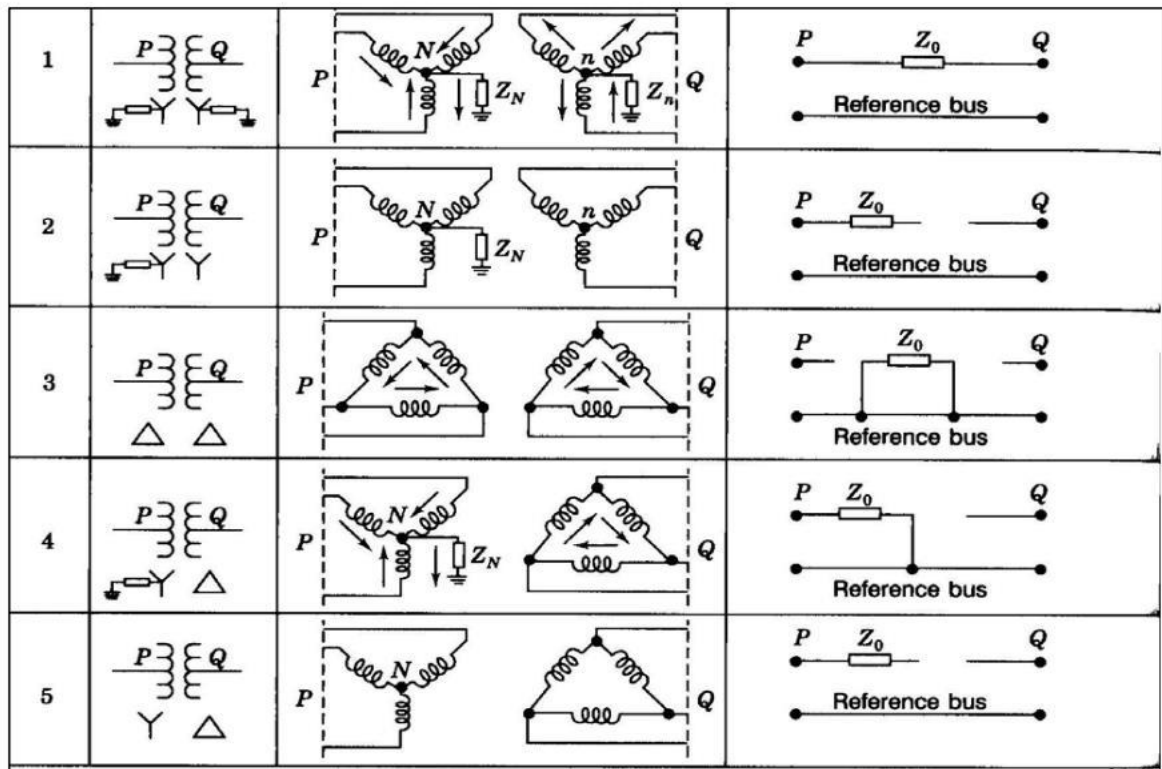


Σχήμα 4.5: Αφόρτιστη γεννήτρια

4.4.2. Ακολουθιακά δίκτυα μετασχηματιστών

Οι σύνθετες αντιστάσεις της θετικής και αρνητικής ακολουθίας ενός μετασχηματιστή, έχουν ίδια τιμή και ταυτίζονται με τις σύνθετες αντιστάσεις του όταν βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση. Όμως, η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας ενός μετασχηματιστή έχει εξάρτηση απ' τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων (Δ ή Y) καθώς και, από το αν ο ουδέτερος του αστέρα είναι γειωμένος ή όχι.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζονται οι διάφορες συνδεσμολογίες που χρησιμοποιούνται για τα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας ενός μετασχηματιστή



Σχήμα 4.6: Δίκτυα μηδενικής ακολουθίας Μετασχηματιστών

4.4.3 Ακολουθιακά κυκλώματα γραμμών

Οι γραμμές μεταφοράς, όπως και οι μετασχηματιστές είναι στατικά στοιχεία. Επομένως, οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας, έχουν ίδια τιμή και ταυτίζονται με τη σύνθετη αντίσταση, όταν οι γραμμές μεταφοράς βρίσκονται σε μόνιμη κατάσταση. Η σύνθετη αντίσταση της μηδενικής ακολουθίας των γραμμών μεταφοράς, έχει συνήθως, πιο μεγάλες τιμές από αυτές της θετικής και αρνητικής. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ρεύματα μηδενικής ακολουθίας επιστρέφουν προς τη Γη μέσω γραμμών ή εναέριων γραμμών γείωσης. Τέλος, αν η τιμή της σύνθετης αντίστασης μηδενικής ακολουθίας είναι άγνωστη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικά, ανάλογα με το είδος της γραμμής.

Αυτές παρουσιάζονται παρακάτω :

1. Για γραμμή απλού κυκλώματος :

$$\frac{Z_0}{Z_1} = 3,5 \text{ αν δεν υπάρχει αγωγός γείωσης}$$

$$\frac{Z_0}{Z_1} = 2 \text{ αν υπάρχει αγωγός γείωσης}$$

2. Για γραμμή διπλού κυκλώματος :

$$\frac{Z_0}{Z_1} = 5,5 \text{ αν δεν υπάρχει αγωγός γείωσης}$$

$$\frac{Z_0}{Z_1} = 3 \text{ αν υπάρχει αγωγός γείωσης}$$

3. Για υπόγεια καλώδια

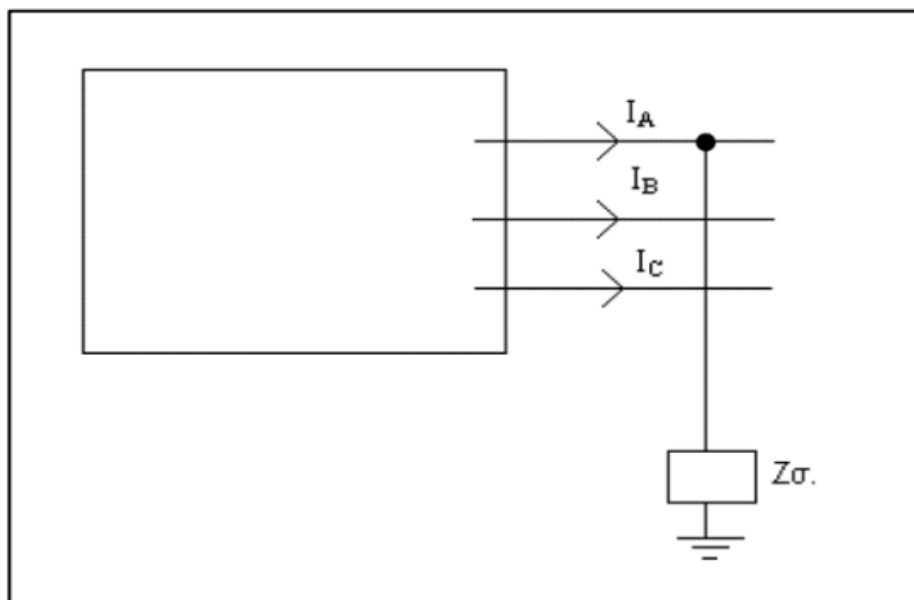
$$\frac{Z_0}{Z_1} = 1 \text{ εως } 1.25 \text{ για απλό πυρήνα}$$

$$\frac{Z_0}{Z_1} = 3 \text{ εως } 5 \text{ για τριπλό πυρήνα [8]}$$

4.4.4 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γη (SLG)

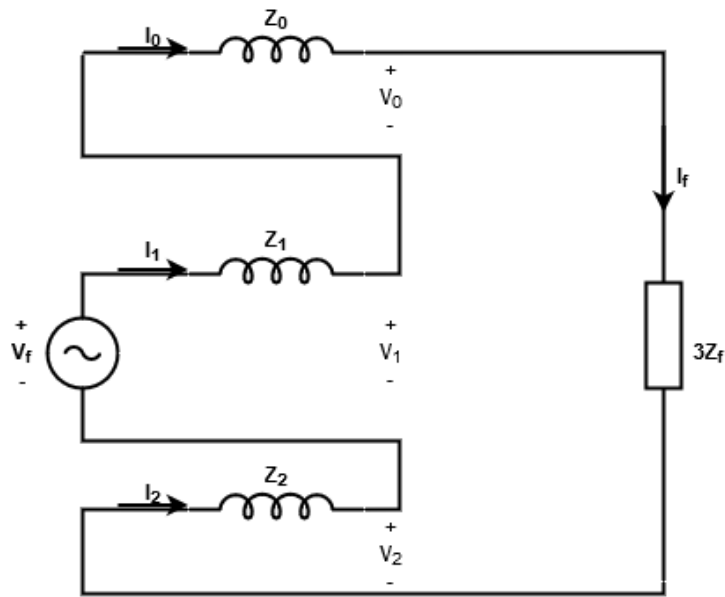
Έστω ότι θεωρούμε ένα μονοφασικό σφάλμα στη φάση a ενός τριφασικού συστήματος με την παρουσία αντίστασης βραχυκύκλωσης Z_f όπως το Σχήμα 4.7.

Οι φάσεις b και c δεν συμμετέχουν στο βραχυκύκλωμα. Επομένως το ρεύμα στις δύο αυτές φάσεις είναι μηδέν.



Σχήμα 4.7: Μονοφασικό Βραχυκύκλωμα προς τη γη μέσω σύνθετης αντίστασης Z_σ

Στη συνέχεια τα τρία ακολουθιακά δίκτυα συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους με την αντίσταση $3Z_f$. Το μονογραμμικό τους διάγραμμα δίνεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Το δίκτυο που περιγράφει την συνδεσμολογία των ακολουθιακών κυκλωμάτων για τη μελέτη ενός SLG βραχυκυκλώματος.

Από το διάγραμμα προκύπτει :

$$I_0 = I_1 = I_2 = I_f \quad (4.30)$$

Και

$$I_f = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (4.31)$$

Αν το βραχυκύκλωμα είναι στερεό τότε $Z_f = 0$.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_0 \\ I_0 \end{bmatrix}$$

Επομένως:

$$I_a = 3I_0 \quad (4.32)$$

$$I_b = 0 \quad (4.33)$$

$$I_c = 0 \quad (4.34)$$

δεδομένου ότι ισχύει η ιδιότητα $1 + \alpha + \alpha^2 = 0$

Στη συνέχεια από το διάγραμμα επίσης προκύπτει ότι :

$$V_0 = -Z_0 I_0 \quad (4.35)$$

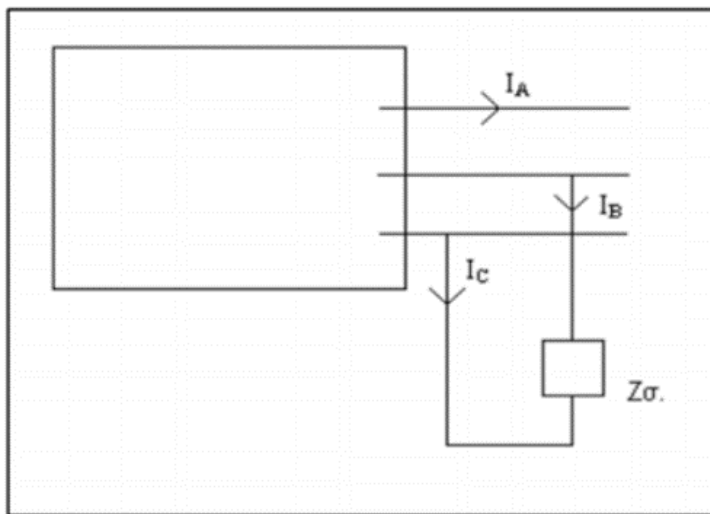
$$V_1 = V_f - I_1 Z_1 \quad (4.36)$$

$$V_2 = -Z_2 I_2 \quad (4.37)$$

Τέλος μπορούν να υπολογιστούν οι φασικές τάσεις από τη σχέση 4.4. Από αυτόν τον υπολογισμό θα πρέπει η τάση της φάσης a να είναι μηδέν, δηλαδή $V_a = 0$ και οι τάσεις των φάσεων b και c να είναι αντίθετες.

4.4.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα (LL)

Σε αυτού το είδος το σφάλμα δύο οποιεσδήποτε φάσεις ενώνονται μεταξύ τους έστω οι B,C όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9: Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων μέσω σύνθετης αντίστασης Z_f

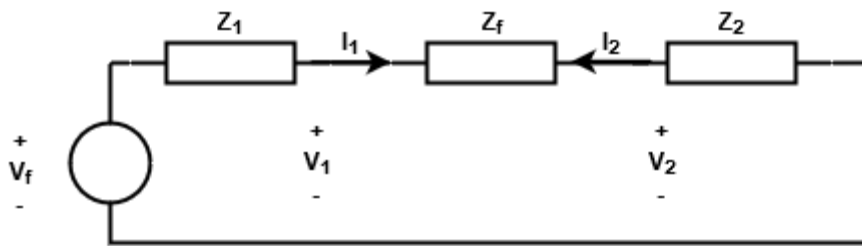
Από το Σχήμα 4.9 εξάγονται οι σχέσεις :

$$I_a = 0 \quad (4.38)$$

$$I_b = -I_c \quad (4.39)$$

$$V_b - V_c = Z_f I_b \quad (4.40)$$

Στη συνέχεια συνδέονται παράλληλα τα δίκτυα θετικής και αρνητικής ακολουθίας ενώ το δίκτυο της μηδενικής δεν συμμετέχει. Αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Το δίκτυο που περιγράφει την συνδεσμολογία των ακολουθιακών κυκλωμάτων για τη μελέτη ενός LL βραχυκυκλώματος.

Από το μονογραμμικό διάγραμμα προκύπτει :

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (4.41)$$

$$I_0 = 0 \quad (4.42)$$

$$V_1 = V_f - I_1 Z_1 \quad (4.43)$$

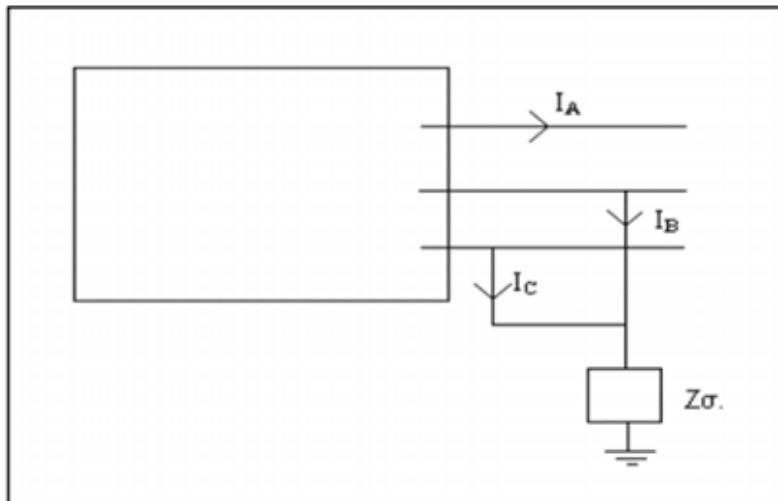
$$V_2 = -Z_2 I_2 \quad (4.44)$$

$$V_0 = 0 \quad (4.45)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις και με τη βοήθεια των 4.4 και 4.17 προκύπτουν οι φασικές τάσεις και τα φασικά ρεύματα.

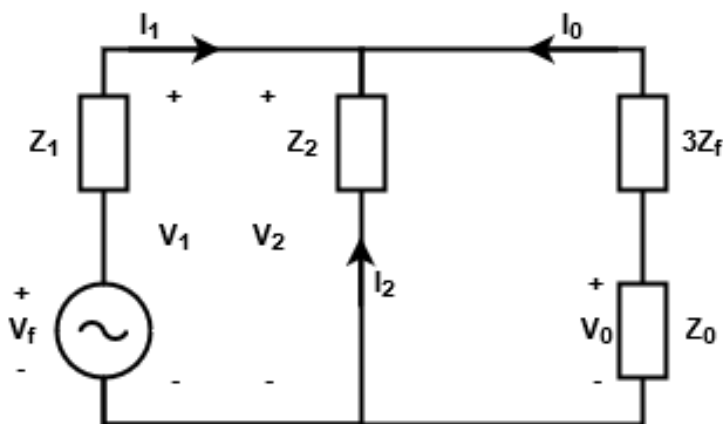
4.4.6 Διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη (DLG)

Για να μελετηθεί το διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη θεωρούμε ένα σφάλμα μεταξύ των φάσεων, έστω b, c και της γης μέσω μιας σύνθετης αντίστασης βραχυκύκλωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 :



Σχήμα 4.11: Βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο φάσεων και της γης μέσω σύνθετης αντίστασης Z_f

Στη συνέχεια συνδέοντας τα τρία ακολουθιακά δίκτυα παράλληλα μεταξύ τους και ταυτόχρονα το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας σε σειρά με τη σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης, όπως στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Το δίκτυο που περιγράφει την συνδεσμολογία των ακολουθιακών κυκλωμάτων για τη μελέτη ενός DLG βραχυκυκλώματος

Από το μονογραμμικό διάγραμμα προκύπτει :

$$I_0 = I_1 = I_2 = 0 \quad (4.46)$$

$$V_1 = V_f - I_1 Z_1 \quad (4.47)$$

$$V_0 = V_1 = V_2 \quad (4.48)$$

Από τους νόμους του Κίρχοφ έχουμε :

$$I_1 = \frac{V_f}{Z_1 + [Z_2 || (Z_0 + 3Z_f)]} \quad (4.49)$$

Με τη χρήση διαιρέτη ρεύματος καταλήγουμε :

$$I_2 = -I_1 \frac{(Z_0 + 3Z_f)}{Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)} \quad (4.50)$$

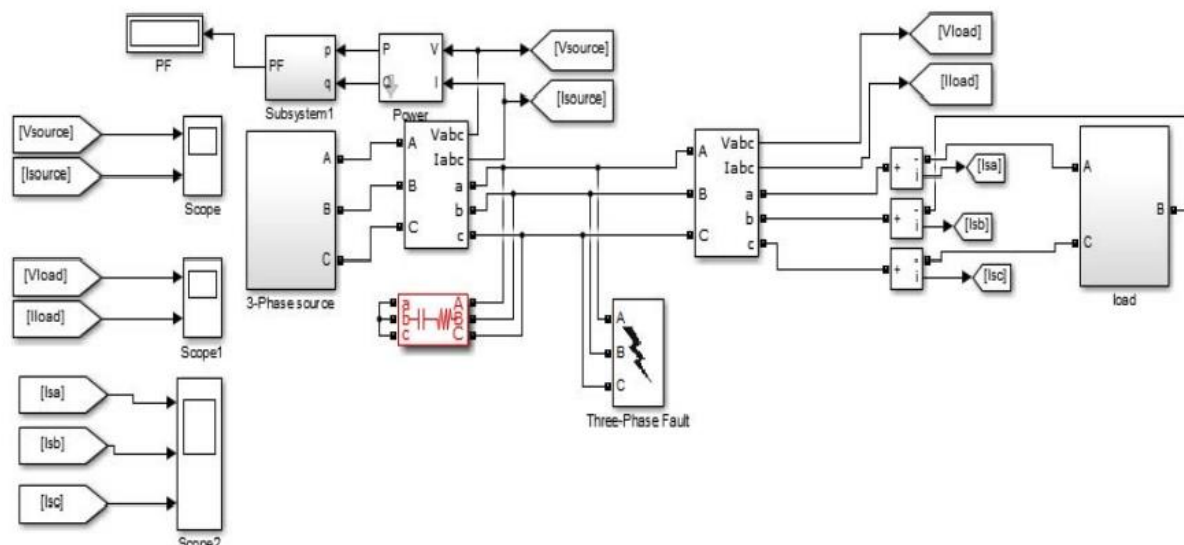
$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{Z_2 + (Z_0 + 3Z_f)} \quad (4.51)$$

Τέλος να σημειωθεί ότι $I_\alpha = 0$ (4.52) λόγω του ότι η φάση α δεν συμμετέχει στο βραχυκύκλωμα.

Από τις παραπάνω σχέσεις γίνεται υπολογισμός των ακολουθιακών ρευμάτων και τάσεων και στη συνέχεια με τη βοήθεια των σχέσεων 4.4 και 4.17 βρίσκουμε τα φασικά ρεύματα και τάσεις.

4.5 Ανάλυση μελέτης σφαλμάτων με τη χρήση προσομοίωσης

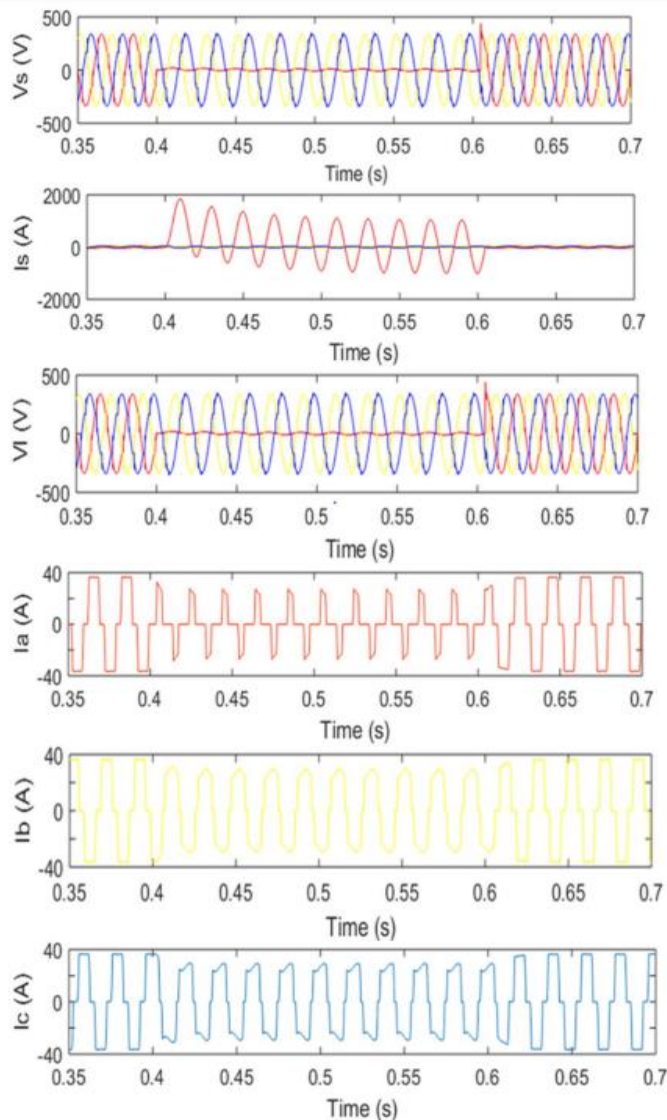
Έστω το διάγραμμα στο Σχήμα 4.13 με τα συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα.



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα για συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα [12]

Το παραπάνω μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιείται για την ανάλυση διάφορων σφαλμάτων κάτω από σταθερή συνθήκη φόρτισης. Το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιείται, είναι το Simulink/MATLAB. Το σφάλμα δημιουργείται σε κάθε περίπτωση για $t=0.4\text{s}$ ενώ εκκαθαρίζεται στο $t=0.6\text{s}$.

4.5.1 Μελέτη μονοφασικού βραχυκυκλώματος προς τη γη (SLG)

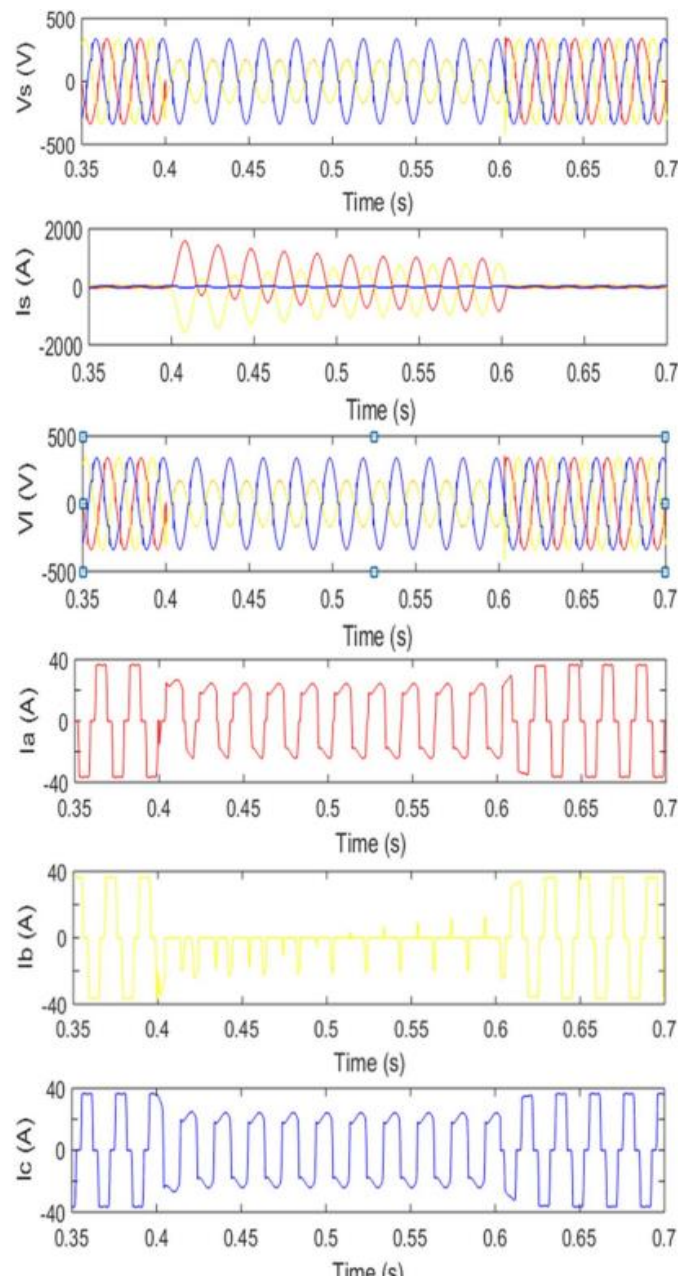


Σχήμα 4.14 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος κατά τη διάρκεια σφάλματος SLG [12]

Το μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς τη γη δημιουργείται συνδέοντας τη φάση α στο έδαφος. Παρατηρείται ότι το σύστημα, πριν δημιουργηθεί το σφάλμα, λειτουργεί σε σταθερή κατάσταση. Μόλις η φάση α γειώνεται εξαιτίας του SLG

σφάλματος, το ρεύμα του φορτίου γίνεται ασταθές και άνισο, ενώ το ρεύμα πηγής της φάσης a φτάνει στην μέγιστη τιμή του, ενώ των φάσεων b και c διατηρούν την ίδια τιμή με πριν. Την ίδια ώρα, οι τάσεις τροφοδοσίας των φάσεων b και c παραμένουν σταθερές, ενώ της φάσης a μειώνεται απότομα. Με την εκκαθάριση του σφάλματος, το σύστημα επανέρχεται στην προηγούμενη σταθερή κατάσταση [12].

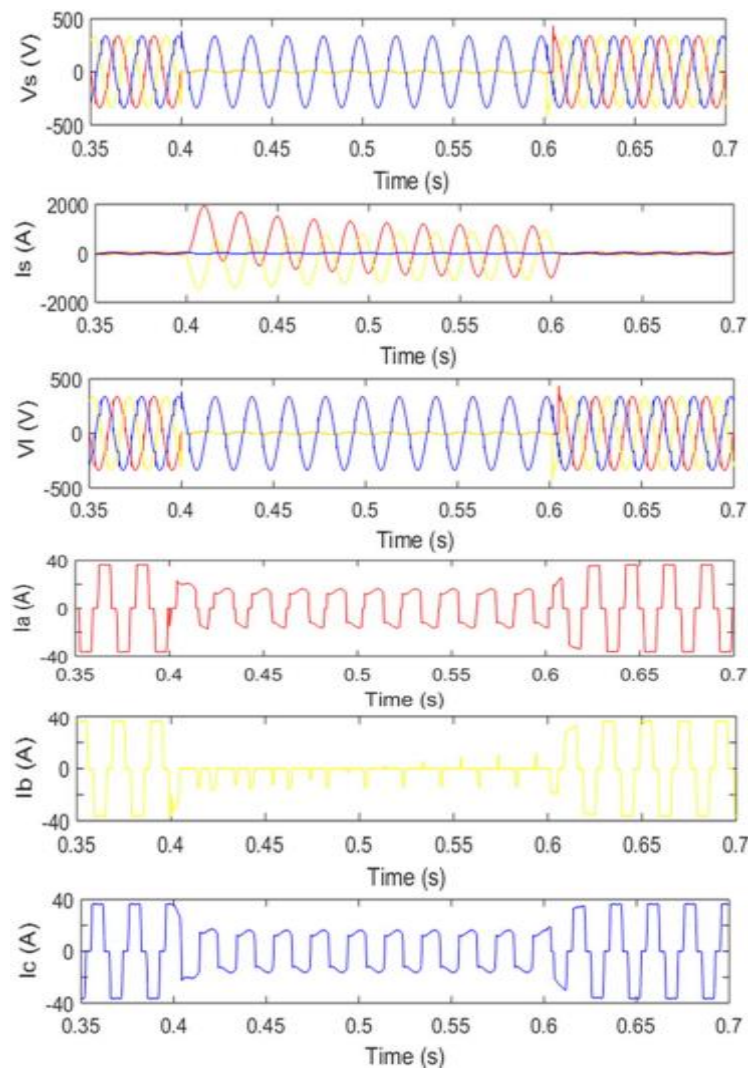
4.5.2 Μελέτη διφασικού βραχυκυκλώματος (LL)



Σχήμα 4.15 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος κατά τη διάρκεια σφάλματος LL [12]

Οι φάσεις a και b βραχυκυκλώνονται από $t=0.4\text{s}$ έως $t=0.6\text{s}$. Κατά την περίοδο του σφάλματος οι τιμές του ρεύματος πηγής για τις φάσεις a και b είναι ίδιες και μέγιστες αλλά αντίθετες. Η τιμή του ρεύματος πηγής της φάσης c δεν επηρεάζεται και παραμένει η ίδια. Οι τιμές των τάσεων της πηγής στις φάσεις a και b έχουν μειωθεί κατά τη διάρκεια του σφάλματος και είναι ίδιες ενώ στη φάση c παραμένει σταθερή. Δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στις τάσεις απ' τη μεριά του φορτίου. Οι τιμές του ρεύματος φορτίου παραμένουν ίδιες μετά την εκκαθάριση του σφάλματος με την a και b να έχουν ωστόσο αντίθετες τιμές [12]

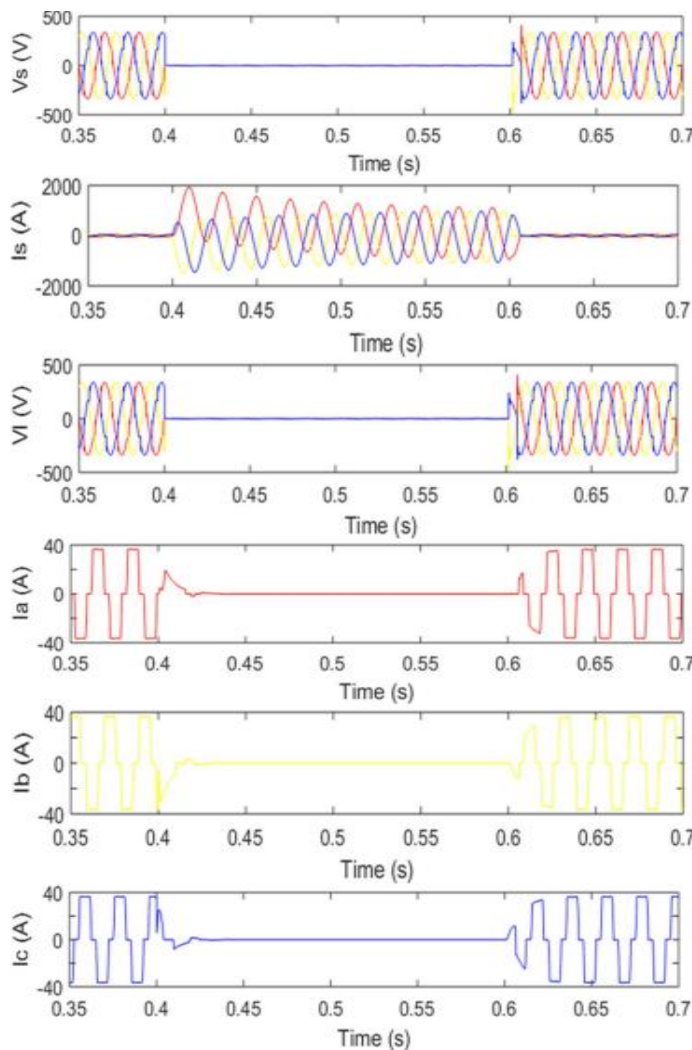
4.5.3 Μελέτη διφασικού βραχυκυκλώματος με τη γη (DLG)



Σχήμα 4.16 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος κατά τη διάρκεια σφάλματος DLG [12]

Το σφάλμα δημιουργείται βραχυκυκλώνοντας τις φάσεις a και b στο έδαφος. Το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση μέχρι να συμβεί το σφάλμα. Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια του σφάλματος, οι τιμές του ρεύματος πηγής για τις φάσεις a και b βρίσκονται στιγμιαία στο μέγιστο, ενώ η τιμή της φάσης c παραμένει σταθερή. Οι τιμές των φάσεων a και b της τάσης πηγής μειώνονται αισθητά και είναι ίδιες, ενώ η τιμή της φάσης c παραμένει σταθερή. Επίσης, κατά τη διάρκεια του σφάλματος οι τιμές των φάσεων a και b για το ρεύμα φορτίου είναι ίδιες αλλά με αντίθετη κατεύθυνση.

4.5.4 Μελέτη τριφασικού βραχυκυκλώματος



Σχήμα 4.17 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος κατά τη διάρκεια τριφασικού σφάλματος [12]

Το σφάλμα συμβαίνει όταν και οι τρεις φάσεις βραχυκυκλώνονται. Η εμφάνιση τέτοιου σφάλματος είναι πολύ σπάνια. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, οι τιμές των φάσεων a, b και c στην πηγή ρεύματος φτάνουν στιγμιαία στις μέγιστες τιμές τους. Το ρεύμα των φάσεων b και c έχει ίδια κατεύθυνση και αντίθετη από αυτή της a . οι τιμές των φάσεων στην τάση πηγής και την τάση φορτίου είναι περίπου μηδέν, καθώς επίσης, σχεδόν μηδενικές είναι και οι τιμές των φάσεων του ρεύματος φορτίου. Κατά τη διάρκεια αυτής της μορφής σφάλματος, η πλευρά του φορτίου είναι ασφαλής και παρατηρείται ελάχιστη ζημιά. Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος οι τιμές των τάσεων και των ρευμάτων επιστρέφουν στην σταθερή κατάσταση [12].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Η ευστάθεια του συστήματος ενέργειας έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα για την ασφαλή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη της οικονομίας και της τεχνολογίας ταυτόχρονα με την απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει τα συστήματα ισχύος να λειτουργούν σε υψηλά φορτία και κοντά στα όρια της ευστάθειάς τους. Παράλληλα, οι καταναλωτές γίνονται ολοένα και πιο εξαρτημένοι από την αξιοπιστία της ηλεκτρικής τροφοδοσίας. Αυτό συμβαίνει λόγω της ανάγκης που έχουν για αυτήν στην καθημερινότητά τους. Επίσης, η εμφάνιση των σφαλμάτων είναι συχνή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα, να απειλείται η ευστάθειά τους. Επιπλέον, με τη συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξαιτίας της δυναμικής συμπεριφοράς και χαμηλής αδράνειάς που έχουν, μπορούν να θέσουν σε αμφισβήτηση τη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος.

Όλα τα παραπάνω, υποχρεώνουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργεί αξιόπιστα και να μπορεί να διατηρηθεί όσο το δυνατόν είναι εφικτό, σε μια κανονική κατάσταση λειτουργίας. [13]

Ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται η ικανότητα να μπορεί να διατηρηθεί η λειτουργία τους σε κατάσταση ισορροπίας, κάτω από κανονικές συνθήκες, καθώς και να επανέρχονται σε μια αποδεκτή κατάσταση λειτουργίας, αφού έχουν εκτεθεί σε διαταραχές.

Η εκτίμηση της ευστάθειας ενός συστήματος γίνεται με τη μελέτη της συμπεριφοράς του, κάτω από την επίδραση διαταραχών, είτε μικρών, είτε μεγάλων. Μικρές διαταραχές με τη μορφή αλλαγών στην ισχύ των φορτίων, συμβαίνουν συνέχεια, με το σύστημα να αυτοπροσαρμόζεται στις νέες απαιτήσεις και να συνεχίζει την τροφοδοσία ομαλά και επιτυχώς του μέγιστου δυνατού φορτίου. Επίσης, το σύστημα πρέπει να είναι ικανό να διατηρήσει τη λειτουργία

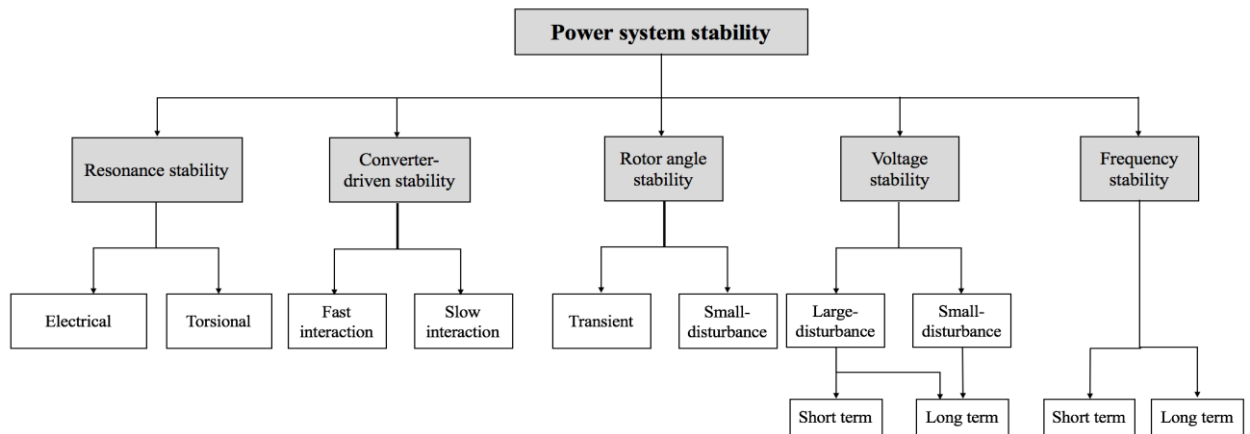
του και την αξιοπιστία του όταν συμβαίνουν μεγάλες διαταραχές, όπως, βραχυκυκλώματα σε γραμμές μεταφοράς, απώλειες γεννητριών, φορτίων.

Τα τελευταία χρόνια τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αντιμετωπίσει σημαντικές αλλαγές σε παγκόσμιο επίπεδο καθώς έχει αυξηθεί σημαντικά η διείσδυση των τεχνολογιών διεπαφών ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος. Ανάμεσα σε αυτές τις τεχνολογίες είναι η παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας, η πληθώρα τεχνολογιών αποθήκευσης, ευέλικτα AC συστήματα μεταφοράς (FACTS), τεχνολογία HVDC γραμμών και ηλεκτρονικά φορτία ισχύος. Ως αποτέλεσμα της σημαντικής διείσδυσης τεχνολογιών διεπαφών μετατροπών παραγωγής (Converter Interfaced Generation, CIG) η δυναμική απόκριση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έχει γίνει εξαρτώμενη των περίπλοκων γρήγορης ανταπόκρισης ηλεκτρονικών συσκευών επηρεάζοντας ταυτόχρονα και τη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου [14].

Η συνολική απόδοση των CIG κυριαρχείται από τα συστήματα ελέγχου και τη στρατηγική που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ηλεκτρικού μετατροπέα ισχύος μεταξύ της πηγής ενέργειας και του δικτύου. Η πλειονότητα των CIGS χρησιμοποιούν μετατροπείς πηγής τάσης, έχοντας τη δυνατότητα με αυτόν τον τρόπο να ελέγχουν ξεχωριστά το πραγματικό και άεργο ρεύμα, το οποίο ανταλλάσσεται στο δίκτυο. Ο έλεγχος αυτός για πραγματική και άεργη ισχύ είναι άμεσος και ακριβής στις περισσότερες των περιπτώσεων και ταυτόχρονα παρουσιάζεται μια ευκαιρία για μια πρωτοφανή ελαστικότητα στον έλεγχο των πηγών ενέργειας [14].

Η μελέτη της ευστάθειας ενός ΣΗΕ κατηγοριοποιείται σε ευστάθεια γωνίας δρομέα, τάσης, συχνότητας ανάλογα με το μέγεθος το οποίο ελέγχεται. Καθώς και σε μεσοπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη, ανάλογα με την περίοδο που μελετάται μετά τη διαταραχή.

Εξαιτίας της προσθήκης των δυναμικών ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, δύο νέες κατηγορίες εισάγονται, η ευστάθεια καθοδηγούμενη από τον μετατροπέα και η ευστάθεια συντονισμού [14].



Σχήμα 5.1: Κατηγοριοποίηση μορφών ευστάθειας ΣΗΕ [14].

Το σχήμα 5.1 μας δείχνει συνοπτικά τους τύπους της ευστάθειας.

Πιο αναλυτικά:

- Η ευστάθεια γωνίας δρομέα (Rotor angle stability) έχει ως ιδιότητα οι διασυνδεδεμένες σύγχρονες μηχανές, που αποτελούν τη ραχοκοκαλιά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, να παραμένουν σε συγχρονισμό. Δηλαδή, να διατηρούν σταθερή σχετική ταχύτητα περιστροφής μεταξύ τους, μετά από κάποια διαταραχή. Αυτό το είδος της ευστάθειας χωρίζεται σε δύο κατηγορίες με βάση το μέγεθος της διαταραχής. Αυτές είναι:
 - a) Για μεγάλες διαταραχές, όπως είναι τα βραχυκυκλώματα (είτε συμμετρικά είτε ασύμμετρα) ονομάζεται μεταβατική ευστάθεια η οποία είναι αυτή που θα μελετηθεί παρακάτω.
 - b) Για μικρές διαταραχές, όπως είναι οι μεταβολές στο φορτίο, ονομάζεται ευστάθεια μικρών διαταραχών.
- Η ευστάθεια τάσης (Voltage stability) έχει σχέση με την ιδιότητα ενός συστήματος, να διατηρεί τις τάσεις των ζυγών σταθερές στα επιτρεπτά όρια είτε βρίσκεται σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας, είτε κατά τη διάρκεια διαταραχών. Η αστάθεια σε αυτή την περίπτωση έχει τη μορφή σταδιακής πτώσης ή αύξησης τάσης συγκεκριμένων ζυγών. Δηλαδή, το σύστημα δε μπορεί να ανταπεξέλθει στη ζήτηση ή στην απορρόφηση της άεργου ισχύος. Αυτό το είδος ευστάθειας χωρίζεται όπως και παραπάνω, σε ευστάθεια τάσης μεγάλων ή μικρών διαταραχών.
- Η ευστάθεια συχνότητας σχετίζεται με την ιδιότητα ενός συστήματος ενέργειας να διατηρεί την συχνότητα λειτουργίας του σταθερή, μετά από μια

μεγάλη διαταραχή που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας ανισορροπίας μεταξύ της παραγωγής και του φορτίου. Η αποκατάσταση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και φορτίου, με την ελάχιστη δυνατή απώλεια φορτίου, επαναφέρει το σύστημα σε ευσταθή κατάσταση.

- Η ευστάθεια συντονισμού επιτυγχάνεται όταν η ανταλλαγή ενέργειας δε δημιουργεί ταλαντώσεις, οι οποίες προκαλούν αύξηση της τάσης, του ρεύματος, της ροπής ξεπερνώντας τα κρίσιμα όριά τους λόγω της ανεπαρκούς ροής ενέργειας στο δίκτυο. Η ευστάθεια συντονισμού διαχωρίζεται σε περιστροφικό συντονισμό και ηλεκτρικό.
- Η ευστάθεια καθοδηγούμενη απ' τους μετατροπείς επιτυγχάνεται όταν δεν δημιουργούνται εγκάρσιοι σύνδεσμοι μεταξύ ηλεκτρομηχανικών δυναμικών των μηχανών και του ηλεκτρομαγνητισμού του δικτύου, εξαιτίας της δυναμικής συμπεριφοράς των CIGS και τη χρήση μετατροπένων τάσης πηγής. Η ευστάθεια διαχωρίζεται σε γρήγορες και αργές αλληλεπιδράσεις και ως συμπέρασμα αποφεύγονται ταλαντώσεις στο σύστημα ενέργειας με μεγάλο εύρος.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα εστιάσουμε στη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μελέτες μεταβατικής ευστάθειας γίνονται πριν την εισχώρηση νέων μονάδων και γραμμών μεταφοράς. Για να γίνει κατανοητή η έννοια της μεταβατικής ευστάθειας χρειάζονται δύο έννοιες. Η εξίσωση ταλάντωσης και η σχέση μεταξύ της ισχύος και της γωνίας. [15,16,17]

5.2 Εξίσωση ταλάντωσης

Έστω n -οστή γεννήτρια συστήματος με n μονάδες. Η γεννήτρια παίρνει μέσω του άξονα του στροβίλου μηχανική ισχύ P_{Tn} , ενώ αποδίδει στο δίκτυο ηλεκτρική ισχύ P_{Gn} . Αν αμεληθούν οι απώλειες της γεννήτριας και ταυτόχρονα θεωρηθεί ότι $P_{Tn} = P_{Gn}$ τότε η γεννήτρια στρέφεται με σταθερή σύγχρονη ταχύτητα. Αν δημιουργηθεί διαφορά μεταξύ των παραπάνω ισχύων, αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- Για να αλλάξει την κινητική ενέργεια, δηλαδή την ταχύτητα της μονάδας
- Για να ξεπεράσει κυρίως κάθε ροπή που εμποδίζει την περιστροφή

Τα παραπάνω εκφράζονται με τη σχέση:

$$P_{Tv} - P_{Gv} = \frac{d(W_{κιν,ν})}{dt} + P_{αποσ,ν} \quad MW \quad (5.1)$$

Όπου: $\frac{d(W_{κιν,ν})}{dt} = \frac{W_{κιν,ν}^0}{\pi f^0} \frac{d^2\delta_v}{dt^2} \quad MW \quad (5.2)$

$W_{κιν,ν}$: κινητική ενέργεια της μονάδας ν στην ονομαστική συχνότητα

$\delta_v (rad)$: γωνιακή θέση του δρομέα ως προς τον άξονα αναφορά που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα

Ο όρος $P_{αποσ,ν}$ αναφέρεται στην ισχύ που καταναλώνουν για πηνία απόσβεσης. Όσο η ταχύτητα του δρομέα αλλάζει, τα ρεύματα που επάγονται στα πηνία απόσβεσης του δρομέα δημιουργούν ροπές που εμποδίζουν τη μεταβολή της ταχύτητας.

Αν θεωρηθεί ότι η ροπή είναι ανάλογη με τη γωνιακή ταχύτητα τότε ο όρος $P_{αποσ,ν}$ γράφεται : $P_{αποσ,ν} = D_v \frac{d\delta_v}{dt} \quad MW \quad (5.3)$

Στη συνέχεια αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$P_{Tv} - P_{Gv} = \frac{W_{κιν,ν}^0}{\pi f^0} \frac{d^2\delta_v}{dt^2} + D_v \frac{d\delta_v}{dt} \quad MW \quad (5.4)$$

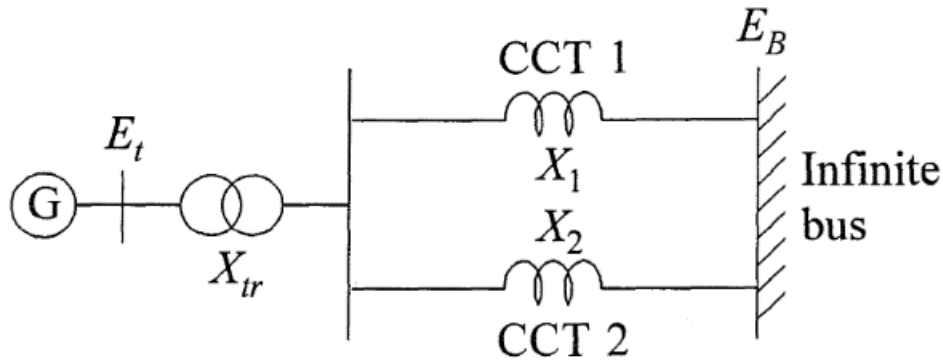
Διαιρώντας με τη βάση ισχύος της γεννήτριας, δηλαδή την ονομαστική ισχύ η εξίσωση (5.4) εκφράζεται σε p.u ως :

$$P_{Tv} - P_{Gv} = \frac{H_v}{\pi f^0} \frac{d^2\delta_v}{dt^2} + D_v \frac{d\delta_v}{dt} \quad p.u \quad (5.5)$$

Όπου H_v : Σταθερά αδράνειας της μονάδας ν, η οποία εκφράζει τα MJ της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας της μονάδας στη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα ανά MVA ονομαστικό της μονάδας. [18]

5.3 Σχέση μεταξύ ισχύος και γωνίας

Έστω μια γεννήτρια που προσφέρει ισχύ μέσω δυο γραμμών μεταφοράς σε ένα άπειρο ζυγό όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Σύστημα γεννήτριας – άπειρου ζυγού

Η ισχύς που μεταφέρει η γεννήτρια στον άπειρο ζυγό δίνεται από τη σχέση

$$P_e = \frac{E' E_B \sin \delta}{X_T} \quad (5.6)$$

Όπου:

E' : τάση γεννήτριας

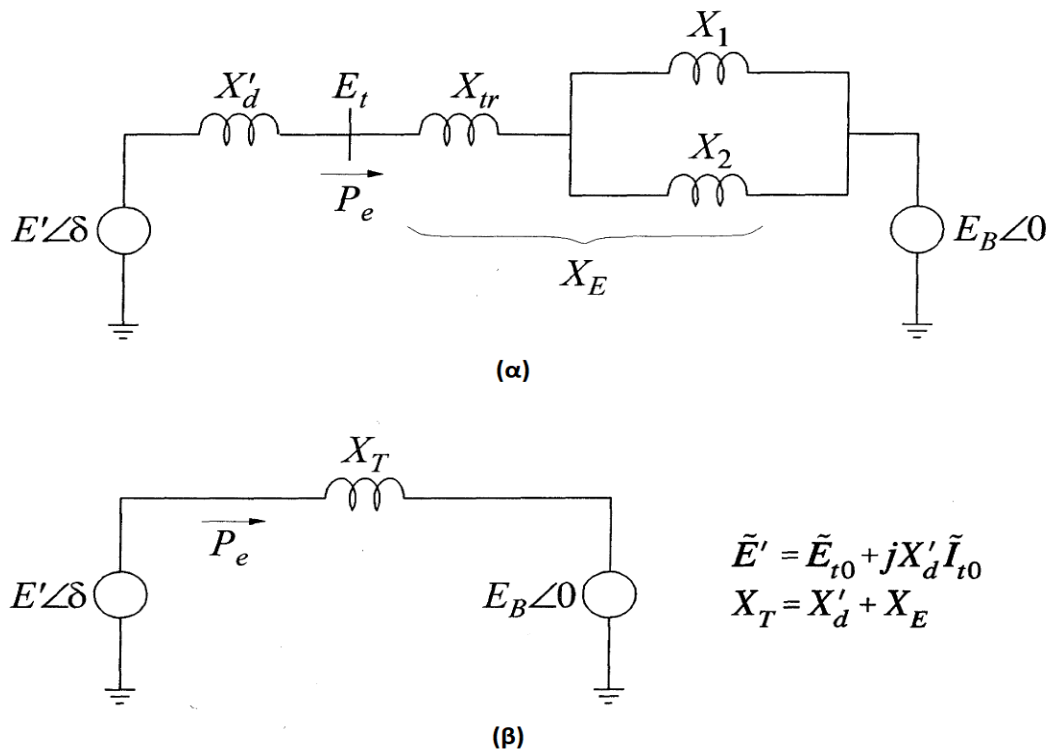
E_B : τάση άπειρου ζυγού

X_T : συνολική αντίσταση συστήματος μεταφοράς

δ : γωνία που δείχνει πόσο προηγείται η τάση E' σε σχέση με την τάση του άπειρου ζυγού E_B

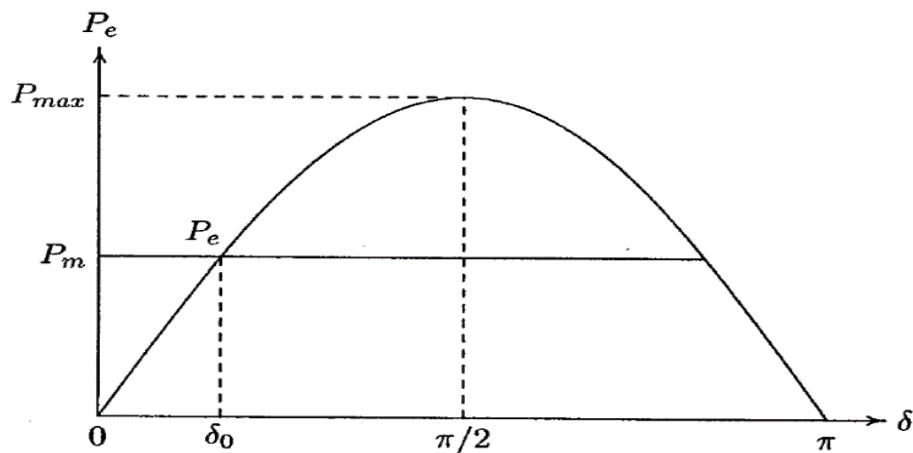
Όταν $\delta = 90^\circ \Rightarrow \sin \delta = 1$ τότε η παραπάνω σχέση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της $P_{e_{max}} = \frac{E' E_B}{X_T}$ που αναφέρεται ως όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης. Πέρα από τις 90° η ισχύς αρχίζει να μειώνεται. Μέχρι να γίνει $\delta = 180^\circ$ και το P_e γίνει ίσο μηδέν, με αποτέλεσμα να αποσυγχρονιστεί η γεννήτρια. Αυτή είναι η σχέση

γωνίας - ισχύος και περιγράφει τη μεταδιδόμενη ισχύ σε συνάρτηση με τη γωνία του ρότορα.



Σχήμα 5.3: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα (β) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα

Τέλος, από τη σχέση (5.6) βγαίνει το συμπέρασμα ότι η καμπύλη της ισχύος P_e συναρτήσει της γωνίας δ έχει ημιτονοειδή μορφή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Καμπύλη ισχύος-γωνίας

5.4 Τρόποι μελέτης μεταβλητών ευστάθειας

Δύο είναι οι πιο γνωστές μέθοδοι για τη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

- Οι μέθοδοι απευθείας ανάλυσης με τις οποίες γίνεται η εξέταση της ευστάθειας χωρίς να είναι απαραίτητη η λύση των διαφορικών εξισώσεων. Αυτές οι μέθοδοι εφαρμόζονται δύσκολα στην ανάλυση μεγάλων συστημάτων κι έχουν μόνο θεωρητικό κι ακαδημαϊκό ενδιαφέρον. Η πιο δημοφιλής είναι η μέθοδος των ίσων εμβαδών που εφαρμόζεται στη μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας μιας μηχανής που τροφοδοτεί έναν άπειρο ζυγό. Άλλη γνωστή μέθοδος είναι η μέθοδος Liapunov, της οποίας η χρήση είναι περιορισμένη στην ανάλυση των ΣΗΕ.
- Η μέθοδος έμμονης λύσης όπου οι αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις του συστήματος επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους, μέσω υπολογιστή. Η ευστάθεια ή όχι προσδιορίζεται από τη μελέτη των καμπυλών ταλάντωσης που προκύπτουν μετά την εφαρμογή τους, και λογίζεται ως μόνος τρόπος για την επίλυση πραγματικών συστημάτων.[17]

5.5 Κριτήριο ίσων εμβαδών

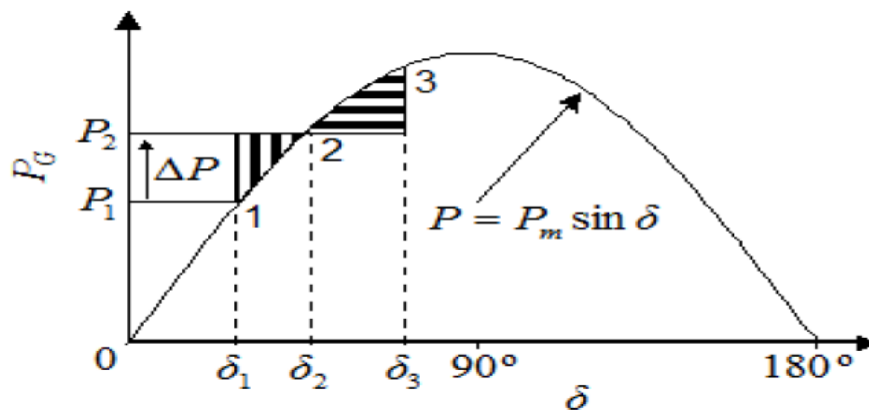
Το κριτήριο των ίσων εμβαδών είναι ένας γρήγορος και απλός τρόπος για να βρεθεί η ευστάθεια, σε θεωρητικό επίπεδο, σε συστήματα, είτε με δύο διασυνδεδεμένες μηχανές, είτε με μια μηχανή συνδεδεμένη με έναν άπειρο ζυγό. Αν γίνει η διαπίστωση ότι η γωνία ταλάντωσης της μηχανής δ αυξάνει απεριόριστα, τότε το σύστημα χαρακτηρίζεται ασταθές. Ενώ, αν η δ ταλαντώνεται γύρω από μια θέση ισορροπίας, το σύστημα είναι ευσταθές. Παρακάτω θα μελετηθούν οι πιο κύριες εφαρμογές του κριτηρίου.

5.5.1 Βηματική αύξηση της μηχανικής ισχύος του στροβίλου

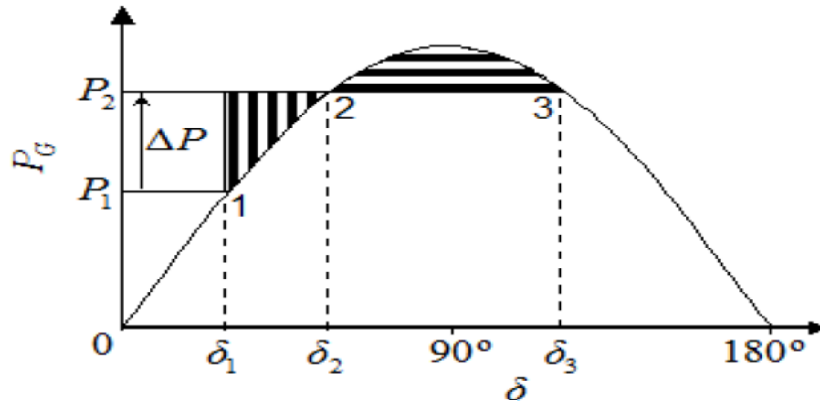
Έστω ένα σύστημα που αποτελείται από μια σύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη σε έναν άπειρο ζυγό. Η γεννήτρια έχει σταθερό μέτρο ΗΕΔ E' ενώ το δίκτυο είναι επαγωγικό. Στο σημείο 1 είναι η αρχική κατάσταση λειτουργίας (Σχήμα 5.5). Με μια αύξηση της ισχύος του στροβίλου κατά ΔP μέχρι το σημείο 2 η γωνία δ μεταβάλλεται από δ_1 σε δ_2 , ο δρομέας απορροφά κινητική ενέργεια με συνέπεια

να αυξάνονται οι στροφές του. Όταν η ισχύς της γεννήτριας γίνει P_2 με $\delta = \delta_2$, τότε η γεννήτρια έχει λίγο μεγαλύτερη ταχύτητα από τη σύγχρονη, ενώ παράλληλα η γωνία δ δεν σταματάει να αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει μέχρι η ταχύτητα του δρομέα να γίνει ίση με τη σύγχρονη, δηλαδή $\delta = \delta_3$. Ο δρομέας έχει επιστρέψει όλη την κινητική ενέργεια που απορρόφησε όσο το δ άλλαζε από δ_1 σε δ_2 . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δύο σκιασμένα εμβαδά του σχήματος να είναι ίσα. Στην πράξη δηλαδή ο δρομέας ταλαντώνεται μεταξύ δ_1 και δ_3 , ενώ παράλληλα λόγω των απωλειών, οι ταλαντώσεις θα αποσβήσουν μέχρι να ισορροπήσει στη νέα μόνιμη κατάσταση που είναι $\delta = \delta_2$.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι για δεδομένη αρχική κατάσταση $\delta = \delta_1$ υπάρχει η μέγιστη μεταβολή ισχύος ΔP , που οδηγεί σε $\delta_3 = \pi - \delta_2$, για την οποία το σύστημα παραμένει σε ευστάθεια. Για μεγαλύτερη μεταβολή, τα δύο σκιασμένα εμβαδά δεν μπορούν να είναι ίσα, με συνέπεια στο σύστημα να δημιουργηθεί αστάθεια (Σχήμα 5.6) [17,18].



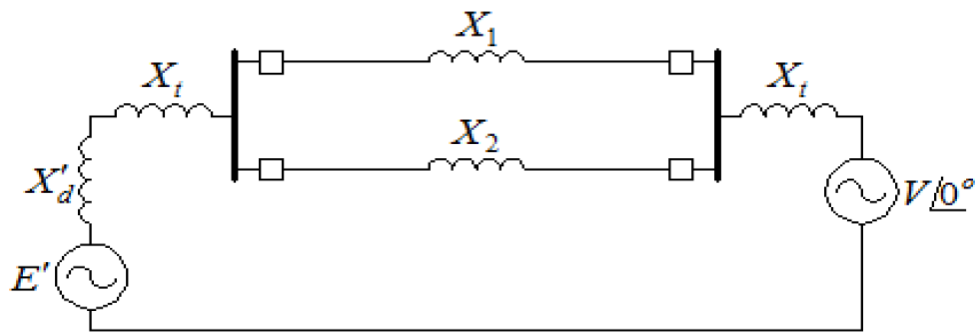
Σχήμα 5.5: Κριτήριο ίσων εμβαδών για βηματική αύξηση PT



Σχήμα 5.6: Οριακή περίπτωση, όταν $\delta_3 = \pi - \delta_2$

5.5.2 Αποσύνδεση παράλληλης γραμμής

Έστω μια σύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη σε έναν άπειρο ζυγό μέσω δύο παράλληλων γραμμών μεταφοράς όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Σύνδεση γεννήτριας με άπειρο ζυγό μέσω δύο παράλληλων γραμμών μεταφοράς

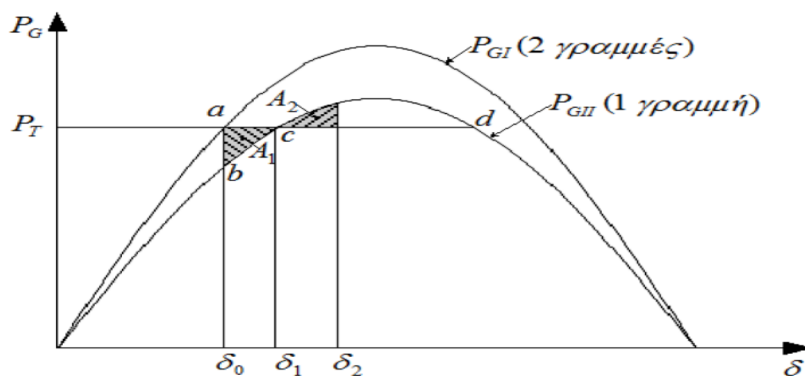
Η αρχική ισχύς που παρέχεται στο ζυγό είναι:

$$P_G = \frac{|E'| |V|}{X'_d + 2X_t + (X_1 || X_2)} \sin \delta \quad (5.7)$$

Αν αποσυνδεθεί η γραμμή L_2 από το σύστημα η ισχύς τροφοδοτείται στο ζυγό μόνο από τη γραμμή L_1 με αποτέλεσμα να μειώνεται.

$$P_{GII} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + 2X_t + X_1} \sin \delta \quad (5.8)$$

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση των εξισώσεων.

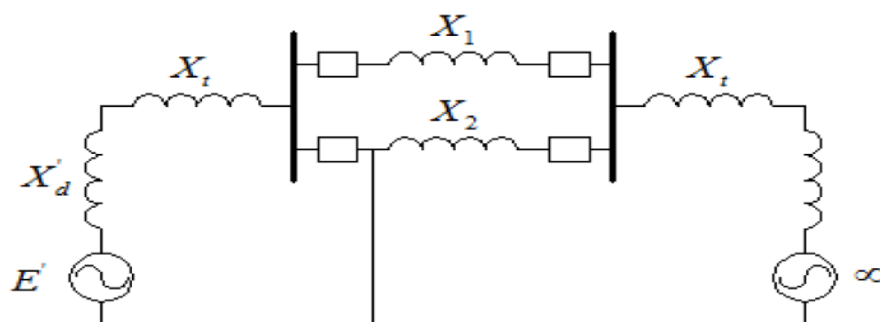


Σχήμα 5.8: Εφαρμογή του κριτηρίου ίσων εμβαδών, για την αποσύνδεση της μίας παράλληλης γραμμής

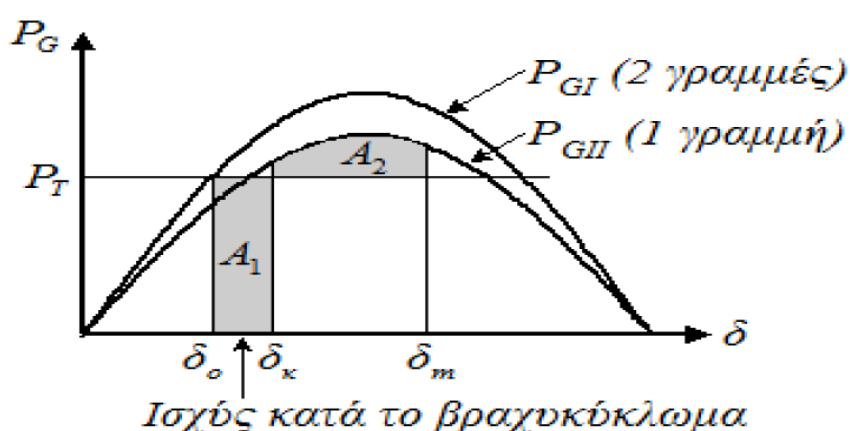
Η αρχική λειτουργία κατάστασης του συστήματος είναι για $P_T = P_G$ με γωνία δ_0 . Με την αποσύνδεση της γραμμής L_2 , η ισχύς που παρέχεται αντιστοιχεί στο σημείο b της P_{GII} , με αποτέλεσμα την αύξηση της γωνίας δ , λόγω του ότι P_T είναι σταθερό. Η ενέργεια επιτάχυνσης του δρομέα ορίζεται από το εμβαδόν A_1 , ενώ η ενέργεια για την επιβράδυνσή του ορίζεται από το ίσο εμβαδόν A_2 . Το νέο σημείο λειτουργίας είναι c με γωνία ισχύος $\delta_1 > \delta_0$. Όπως και πριν ορίζεται μέγιστη τιμή ισχύος, η οποία αν ξεπεραστεί, αυτόματα το σύστημα γίνεται ασταθές. Αυτό συμβαίνει γιατί τα εμβαδόν A_2 δεν μπορεί να είναι ίσο με το A_1 . Το όριο μεταβατικής ευστάθειας βρίσκεται στη τιμή του P_T και του P_{GII} με γωνία $\delta_2 = \pi - \delta_1$ [18].

5.5.3 Τριφασικό βραχυκύκλωμα σε παράλληλη γραμμή

Έστω ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στο άκρο της μιας γραμμής ενός κυκλώματος δυο παράλληλων γραμμών μεταφοράς όπως στο Σχήμα 5.9 :



Σχήμα 5.9: Τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ένα άκρο της γραμμής

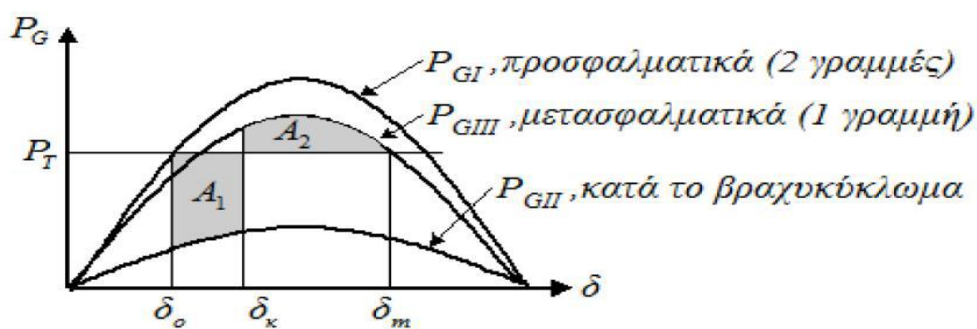


Σχήμα 5.10: Κριτήριο ίσων εμβαδών για στερεό 3Φ βραχυκύκλωμα και απομόνωσής του μέσω αποσύνδεσης της γραμμής

Σε αυτή την περίπτωση όλο το ρεύμα μέσω της επαγωγικής αντίδρασης έχει κατεύθυνση προς τη γη. Επιπλέον λόγω του ότι το ρεύμα είναι επαγωγικό η γεννήτρια τροφοδοτεί μόνο άεργο ισχύ καθώς η πραγματική είναι ίση με το μηδέν. Με τη διατήρηση του βραχυκυκλώματος η γεννήτρια επιταχύνεται και η γωνία δ αυξάνεται απεριόριστα. Πριν το βραχυκύκλωμα είναι P_{GI} . Μετά την απομόνωση του βραχυκυκλώματος, με τη βοήθεια του ανοίγματος των διακοπών της μιας γραμμής, η ισχύς που προσφέρεται στον άπειρο ζυγό γίνεται μέσω της άλλης γραμμής, δηλαδή της καμπύλης P_{GII} . Η εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος γίνεται για $\delta = \delta_k$. Αν η εκκαθάριση δεν πραγματοποιηθεί σύντομα τότε είναι πιθανό το εμβαδόν A_2 να μην ίσο με το εμβαδόν A_1 , με αποτέλεσμα το σύστημα να γίνει ασταθές. Επομένως για κάθε P_T υπάρχει μια κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης,

η οποία αν ξεπεραστεί, δηλαδή αν η εκκαθάριση του σφάλματος γίνει αργότερα από αυτή τη γωνία, δημιουργείται αστάθεια. Ο χρόνος για να φτάσει η γωνία δ στη τιμή της κρίσιμης γωνίας εκκαθάρισης, λέγεται κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισης. Η σημασία αυτού του χρόνου αποτελεί σημαντικό κομμάτι για τον καθορισμό της λειτουργίας των συστημάτων προστασίας του ΣΗΕ.

Τέλος, αν υπάρχει παροχή ισχύος στον άπειρο ζυγό κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος τότε οι καμπύλες του κριτηρίου ίσων εμβαδών φαίνονται στο Σχήμα 5.12 :



Σχήμα 5.12: Κριτήριο ίσων εμβαδών, όταν μεταφέρεται ισχύς κατά τη διάρκεια του σφάλματος

Όπου $P_{mI} \sin \delta(P_{GI})$: ισχύς πριν το βραχυκύκλωμα

$P_{mII} \sin \delta(P_{GII})$: ισχύς κατά τη διάρκει του βραχυκυκλώματος

$P_{mIII} \sin \delta(P_{GIII})$: ισχύς μετά την απομόνωση του σφάλματος

Η κρίσιμη γωνία εκκαθάρισης υπολογίζεται εξισώνοντας τα εμβαδά A_1 και A_2 όπου:

$$A_1 = P_T(\delta_\kappa - \delta_0) + P_{mII}(\cos \delta_\kappa - \cos \delta_0) \quad (5.9)$$

$$A_2 = P_{mIII}(\cos \delta_m - \cos \delta_\kappa) - P_T(\delta_m - \delta_\kappa) \quad (5.10)$$

Μετά από πράξεις προκύπτει ότι :

$$\delta_k = \cos^{-1} \frac{P_T(\delta_m - \delta_0) - P_{mII} \cos \delta_0 + P_{mIII} \cos \delta_m}{P_{mIII} - P_{mII}} \quad (5.11)$$

[18]

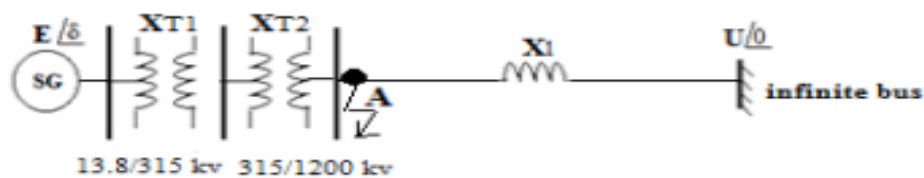
5.6 Παράγοντες επιρροής της μεταβατικής ευστάθειας

Η μεταβατική ευστάθεια είναι εξαρτώμενη από τα παρακάτω:

- Το μέγεθος του φορτίου της γεννήτριας.
- Την ισχύ εξόδου της γεννήτριας κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Αυτό εξαρτάται από την τοποθεσία που συμβαίνει το σφάλμα καθώς και το είδος του.
- Τον χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος.
- Την αντίδραση του συστήματος μεταφοράς μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.
- Την αντίδραση της γεννήτριας. Χαμηλή αντίδραση αυξάνει τη μέγιστη ισχύ και ταυτόχρονα μειώνει την αρχική γωνία του δρομέα.
- Την αδράνεια της γεννήτριας. Όσο πιο υψηλή είναι η αδράνεια τόσο πιο αργός είναι ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας.
- Την τιμή της εσωτερικής ΗΕΔ E' της γεννήτριας, η οποία εξαρτάται από τη διέγερσή της.
- Την τάση του άπειρου ζυγού E_B , ο οποίος τροφοδοτείται από τη γεννήτρια.[17]

5.7 Ανάλυση μελέτης μεταβατικής ευστάθειας σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο

Έστω το παρακάτω μοντέλο συστήματος ενέργειας στο Σχήμα 5.13



Σχήμα 5.13 Μοντέλο συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [19]

Τα στοιχεία του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Παραμετρικά στοιχεία του συστήματος

Parameter elements of the system.		
Electrical system parameters		
GS	X_d' (pu)	0.25
	H (MJ/MVA)	3
	P (MW)	9000
IR1	X_{T1} (pu)	0.12
IR2	X_{T2} (pu)	0.15
Ligne	X_i (pu)	1.875
	$Y/2$ (pu)	0.382
	R_c (Ω)	250
Power Base: 9000MVA (60 Hz)		
Voltage Base: 1200 KV		
Impedance Base: 160 Ω		

Στο παραπάνω σύστημα, γίνεται μελέτη της ευστάθειάς του εφαρμόζοντας ένα τριφασικό σφάλμα στο σημείο A, ώστε να αποφασιστεί ο κατάλληλος αριθμός γραμμών μεταφοράς για να διασφαλίζεται η ευστάθειά του. Λαμβάνεται υπόψη ότι το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση πριν εμφανιστεί το σφάλμα καθώς επίσης, η τάση στα τερματικά διατηρείται σταθερή εξαιτίας του συστήματος διέγερσης. Η προσομοίωση του παραπάνω συστήματος γίνεται σε Simulink/Matlab και πραγματοποιείται για δύο δευτερόλεπτα με την εκκαθάριση του σφάλματος να γίνεται στο $t=0.1s$

Η πραγματική ισχύς της γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται από τον τύπο

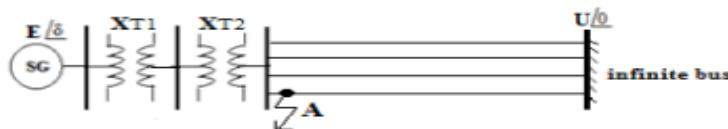
$$P = \frac{V^2}{R_c} \quad (5.12)$$

$$\text{Δηλαδή } P = \frac{1200^2}{250} = 5760 \text{ MW}$$

5.7.1 Ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας με τέσσερις γραμμές μεταφοράς

Η πραγματική ισχύς της γραμμής μεταφοράς υπολογίστηκε στα 5760 MW με αποτέλεσμα να καθίσταται ανεπαρκής η χρήση δύο γραμμών μεταφοράς ενέργειας.

Μια ρεαλιστική υπόθεση είναι η χρήση τεσσάρων γραμμών μεταφοράς όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.15 Μοντέλο συστήματος ενέργειας με τέσσερις γραμμές μεταφοράς [19]

Η μεταφερόμενη ενέργεια πριν το σφάλμα είναι ενιαία, καθιστώντας εφικτό τον υπολογισμό της γωνιάς δ_0 . Κατά τη διάρκεια του σφάλματος δεν υπάρχει μεταφορά ενέργειας.

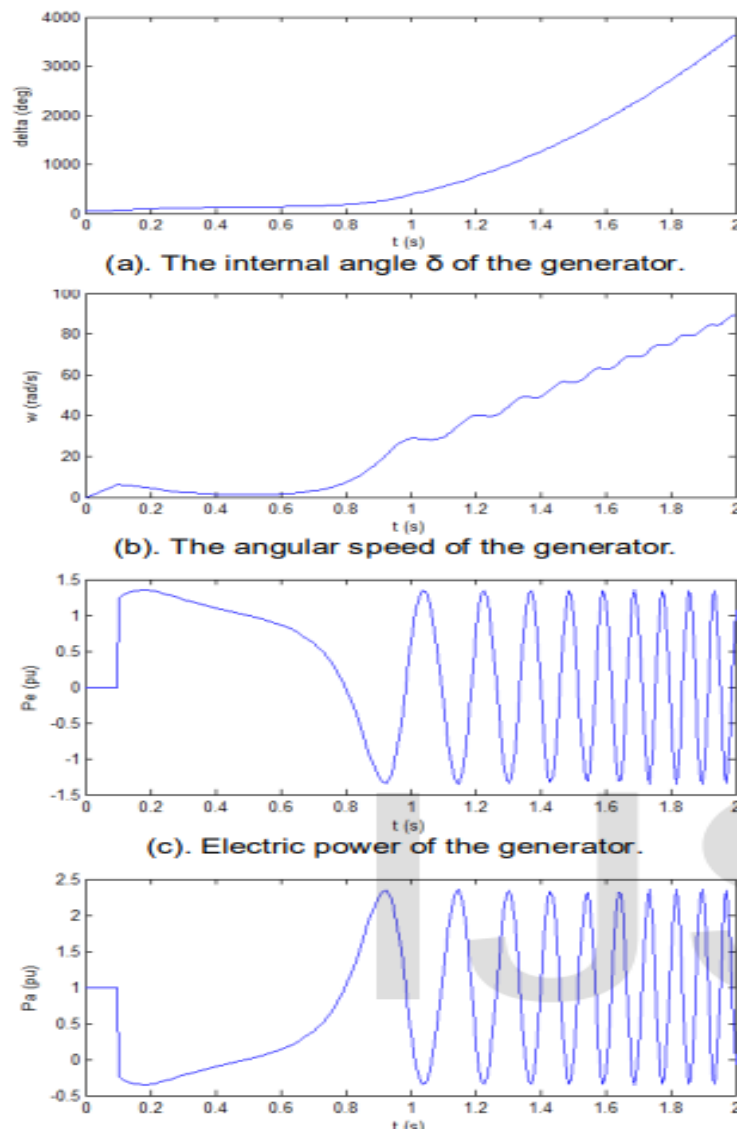
Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, το σύστημα επανέρχεται, η γωνία όμως δ δεν έχει την ίδια τιμή με τη δ_0 . Επομένως, η ενέργεια δεν είναι ενιαία και η σύγχρονη γεννήτρια συνεχίζει να ταλαντώνεται.

Στη συνέχεια, με τη χρήση του προγράμματος Simulink γίνεται ο υπολογισμός της γωνιάς δ μέχρι τα δύο δευτερόλεπτα που πραγματοποιείται η προσομοίωση και δημιουργείται ο Πίνακας 5.2.

Πίνακας 5.2: Τιμές γωνιάς δ στο χρόνο για τέσσερις γραμμές μεταφοράς

Angle variation δ in time for four lines.					
t (sec)	Pe (pu)	Pa (pu)	$[(\Delta t \dot{\delta})/M] Pa$ (deg)	$\Delta \delta$ (deg)	δ (deg)
0-	1.00	0.00	0.00	0.00	47.62
0+	0.00	1.00	0.00	0.00	47.62
0avg	0.00	0.50	4.5	4.5	47.62
0.05	0.00	1.00	9.00	13.5	52.12
0.1-	0.00	1.00	0.00	0.00	65.62
0.1+	1.23	-0.23	0.00	0.00	65.62
0.1avg	0.00	0.38	3.42	16.92	65.62
0.15	1.34	-0.34	-3.06	13.86	82.36
0.20	1.34	-0.34	-3.06	10.80	96.14
0.25	1.29	-0.29	-2.61	8.19	106.86
0.30	1.22	-0.22	-1.98	6.21	114.95
0.35	1.15	-0.15	-1.35	4.86	121.02
0.40	1.09	-0.09	-0.81	4.05	125.66
0.45	1.04	-0.04	-0.36	3.69	129.41
0.50	0.99	0.008	0.072	3.76	132.77
0.55	0.93	0.06	0.54	4.30	136.19
0.60	140.20

Από την προσομοίωση οι παρακάτω καμπύλες δείχνουν την απόκριση του συστήματος στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.16 Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος με τέσσερις γραμμές μεταφοράς για ένα τριφασικό σφάλμα.

Από το Σχήμα 5.16 (a) και τον Πίνακα 2 προκύπτει ότι η ταχύτητα ρότορα μεγαλώνει με αυξανόμενο ρυθμό επ' αόριστον χωρίς όμως να ξεπεράσει το μέγιστο. Το Σχήμα 5.16 (b) δείχνει ότι υπάρχει μια συνεχόμενη ταχύτατη αύξηση της γωνιακής ταχύτητας, της σύγχρονης γεννήτριας.

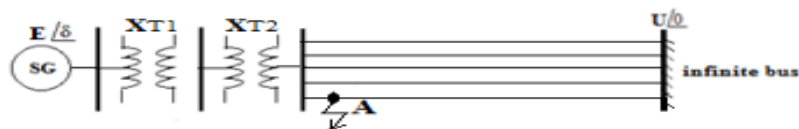
Κατά τη διάρκεια του σφάλματος, η ηλεκτρική ενέργεια γίνεται μηδέν, ο ρότορας επιταχύνεται και η παραγωγή γίνεται μεγαλύτερη από την ενέργεια. Παρατηρείται επίσης ότι, η κινητική ενέργεια περιστροφής συνεχίζει να ταλαντώνεται ταχύτατα

και επ' αόριστον. Αυτό εξηγείται διότι η μηχανική ροπή είναι υψηλότερη από την ηλεκτρική. Η συσσώρευση μεγάλης ποσότητας ενέργειας από τη σύγχρονη γεννήτρια έχει ως αποτέλεσμα, ο ρότορας να έχει ταχύτητα μεγαλύτερη του επιτρεπτού μετά την εκκαθάριση του σφάλματος.

Εν κατακλείδι η προσομοίωση υποδηλώνει ότι το σύστημα είναι ασταθές με τη χρήση τεσσάρων γραμμών μεταφοράς, καθώς μετά το σφάλμα η γεννήτρια αποσυγχρονίστηκε και δεν κατάφερε να επιστρέψει στην ευστάθειά του [19]

5.7.2 Ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας με πέντε γραμμές μεταφοράς

Έστω το Σχήμα 5.17 με πέντε γραμμές μεταφοράς.



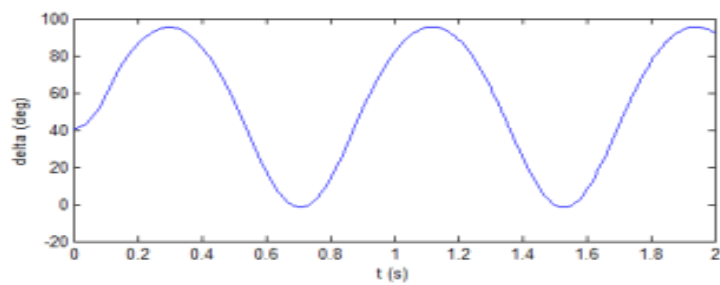
Σχήμα 5.17 Μοντέλο συστήματος ενέργειας με τέσσερις γραμμές μεταφοράς

Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος προκύπτει ότι η τιμή της δ δεν είναι ίδια με την δ_0 .

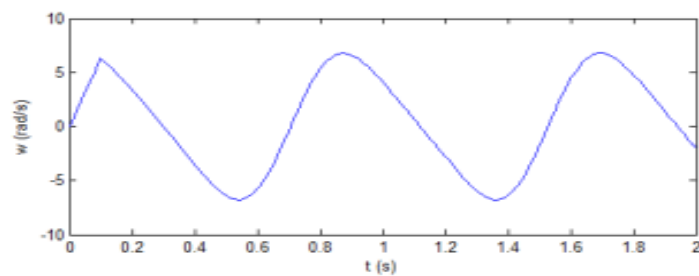
Οι υπολογισμοί της γωνίας δ μέχρι τα δύο δευτερόλεπτα πραγματοποιείται με το πρόγραμμα Simulink και προκύπτει ο Πίνακας 5.3 καθώς επίσης και οι καμπύλες που δείχνουν την απόκριση του συστήματος στο Σχήμα 5.18.

Πίνακας 5.3: Τιμές γωνίας δ στο χρόνο για πέντε γραμμές μεταφοράς

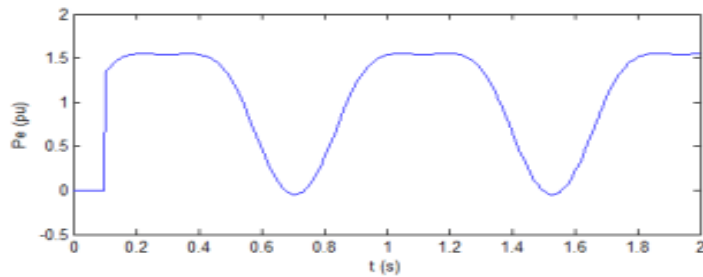
t (sec)	Re (pu)	Pa (pu)	$[(\Delta t^2)/M]$ Pa (deg)	$\Delta\delta_n$ (deg)	δ_n (deg)
0-	1.00	0.00	0.00	0.00	40.2
0+	0.00	1.00	0.00	0.00	40.2
0.05	0.00	0.50	4.5	4.5	40.2
0.1	0.00	1.00	9.00	13.5	44.7
0.1-	0.00	1.00	0.00	0.00	58.2
0.1+	1.32	-0.32	0.00	0.00	58.2
0.15	0.00	0.34	3.06	16.56	58.2
0.15	1.49	-0.49	-4.41	12.15	74.44
0.20	1.54	-0.54	-4.86	7.29	86.34
0.25	1.54	-0.54	-4.86	2.43	93.25
0.30	1.54	-0.54	-4.86	-2.43	95.44
0.35	1.54	-0.54	-4.86	-7.29	92.62
0.40	1.54	-0.54	-4.86	-12.15	84.87
0.45	1.47	-0.47	-4.23	-16.38	72.27
0.50	1.27	-0.27	-2.43	-18.81	55.48
0.55	0.91	0.08	0.72	-18.09	36.32
0.60	----	----	----	----	14.44



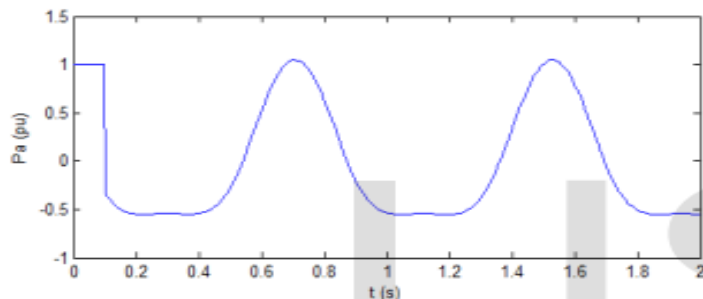
(a). The internal angle δ of the generator.



(b). The angular speed of the generator.



(c). Electric power of the generator.



Σχήμα 5.18 Αποτελέσματα προσομοίωσης συστήματος με πέντε γραμμές μεταφοράς για ένα τριφασικό σφάλμα

Από τον Πίνακα 3 και από το Σχήμα 5.18 (a) προκύπτει ότι η γωνία δ μεταβάλλεται σύμφωνα με έναν αποσβενώμενο ταλαντωτικό ρυθμό με σημείο ισορροπίας το $\delta_{max} = 95.44^\circ$. Το ίδιο συμβαίνει και για τη γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας Σχήμα 5.18 (b).

Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η γεννήτρια ταλαντώνεται συνεχόμενα με τον ίδιο τρόπο πριν την εμφάνιση του σφάλματος, διατηρώντας την ίδια ταχύτητα. Παρατηρείται ότι λόγω της ταλάντωσης του ρότορα γύρω από το σημείο ισορροπίας η ηλεκτρική ενέργεια δεν παρουσιάζει απότομη αύξηση.

Τα δεδομένα αυτής της προσομοίωσης υποδεικνύουν ότι οι πέντε γραμμές μεταφοράς ενέργειας επαρκούν καθώς το σύστημα διατήρησε την ευστάθεια του μετά την εκκαθάριση του σφάλματος και η γεννήτρια διατήρησε τον συγχρονισμό της με το δίκτυο[19].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

6.1 Εισαγωγή

Οι επενδυτικές δαπάνες που πραγματοποιούνται τα τελευταία χρόνια για την ανάπτυξη των ΣΗΕ (παραγωγή, μεταφορά, διανομή) είναι τεράστιες. Εξαιτίας αυτού, είναι αναγκαίο, να ληφθούν κατάλληλα μέτρα για την προστασία των συστημάτων από διάφορα σφάλματα ώστε, να είναι διασφαλισμένες οι επενδύσεις. Ένα σφάλμα, αν δεν αντιμετωπιστεί άμεσα, μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες στο δίκτυο και το κόστος αποκατάστασής τους να είναι υπέρογκο. Επίσης, τα βραχυκυκλώματα μπορούν να μειωθούν δραστικά αν γίνει κατάλληλος και προσεκτικός σχεδιασμός. Παρόλα αυτά, δε μπορούν να αποφευχθούν εντελώς, εξαιτίας είτε των έντονων καιρικών φαινομένων είτε ατυχημάτων που οφείλονται στον άνθρωπο ή την αστοχία υλικού.

Η προστασία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με τη χρήση των ηλεκτρονόμων προστασίας, οι οποίοι έχουν ως λειτουργία να εντοπίζουν και να απομονώνουν τα σφάλματα ενεργοποιώντας τους κατάλληλους διακόπτες ισχύος. Κατά αυτό τον τρόπο γίνεται αποσύνδεση, όσο το δυνατόν γρηγορότερα, των κομματιών του ΣΗΕ που έχουν πάθει τη ζημιά, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες να καταστραφούν περαιτέρω τμήματα του δικτύου.

Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας πρέπει να καλύπτουν τι παρακάτω απαιτήσεις:

1. Υψηλός βαθμός αξιοπιστίας
2. Ικανοποιητική ευαισθησία, η οποία ορίζεται ως το μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης που θέτει σε λειτουργία τον ηλεκτρονόμο, μέσα στη ζώνη προστασίας του δικτύου που επιβλέπει
3. Επιλεκτικότητα
4. Μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας, με σκοπό την άμεση αντιμετώπιση και ελαχιστοποίηση των καταστροφικών αποτελεσμάτων του βραχυκυκλώματος, καθώς και τη διατήρηση της ευστάθειας και συγχρονισμού των σύγχρονων γεννητριών[20]

Η σπουδαιότητα των συστημάτων προστασίας είναι τεράστια γιατί συμβάλουν στην καλύτερη και οικονομικότερη εξυπηρέτηση των πελατών, καθώς στον αποδοτικότερο και αποτελεσματικότερο τρόπο αντιμετώπισης των σφαλμάτων, με τη χρήση των ηλεκτρονόμων. Επίσης βοηθούν στο να διατηρηθεί η ευστάθεια των ΣΗΕ και ως αποτέλεσμα επιτρέπουν την καλύτερη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του συστήματος. Όταν αντιμετωπίζεται έγκαιρα μια μεγάλη διαταραχή, περιορίζοντας τις ζημιές, τότε ταυτόχρονα ελαττώνεται:

- Το κόστος επισκευής των ζημιών λόγω του βραχυκυκλώματος
- Η πιθανότητα επέκτασης των ζημιών στο υπόλοιπο δίκτυο καθώς και η διακοπή λειτουργίας κάποιων τμημάτων η εξοπλισμού, συσκευών στο δίκτυο
- Ο χρόνος που παραμένουν απενεργοποιημένες οι συσκευές
- Η απώλεια εισοδήματος καθώς και η διατάραξη του τρόπου ζωής των πολιτών κατά τη διάρκεια που τα συστήματα είναι εκτός λειτουργίας [20]

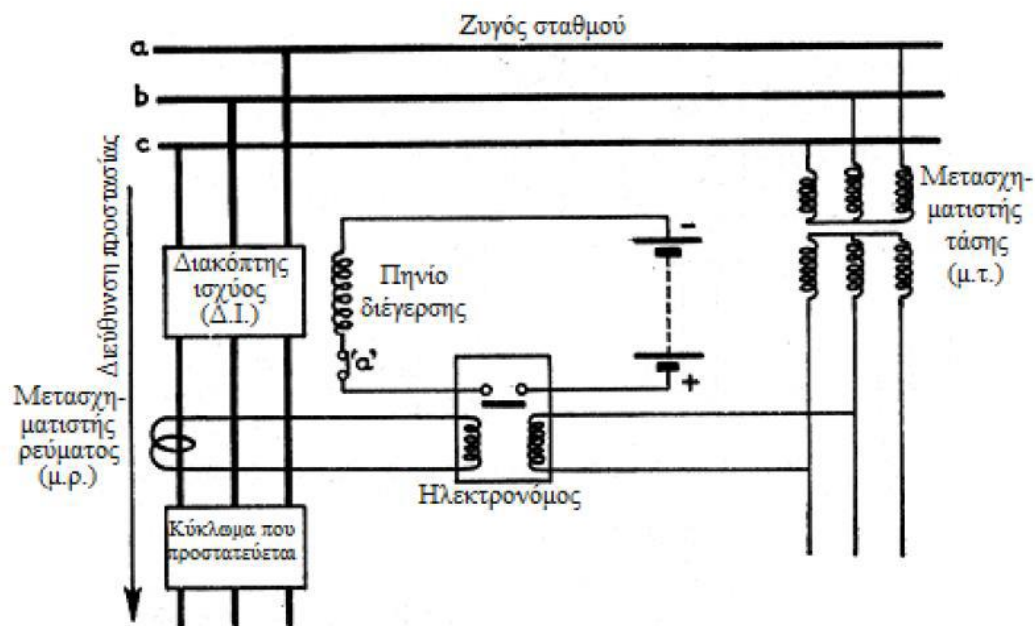
6.2 Αρχές λειτουργίας ηλεκτρονόμων προστασίας

Όλοι οι ηλεκτρονόμοι που χρησιμοποιούνται για την προστασία από βραχυκυκλώματα και άλλους τύπους σφαλμάτων, τίθενται σε λειτουργία από κάποιο ρεύμα ή τάση ή και τα δύο. Η τροφοδοσία και ενεργοποίηση τους προέρχεται από μετασχηματιστές ρεύματος ή τάσης, που συνδέονται με διάφορους τρόπους μεταξύ τους, στο τμήμα του δικτύου, το οποίο έχουν υπό επιτήρηση οι ηλεκτρονόμοι. Ο τύπος και η θέση του βραχυκυκλώματος επηρεάζει τις ποσότητες του ρεύματος ή τάσης που λαμβάνει ο ηλεκτρονόμος. Η διαθεσιμότητα διάφορων τύπων ηλεκτρονόμων βοηθάει στην αναγνώριση των παραπάνω ποσοτήτων και ο κάθε ένας τίθεται σε λειτουργία αποκρινόμενος σε αυτές. Παρόλα αυτά εμφανίζονται περισσότερες διαφορές σε ένα ή περισσότερα απ τα παρακάτω μεγέθη, που συσχετίζονται με το ρεύμα κ την τάση:

- Μέτρο
- Συχνότητα

- Φασική γωνία
- Διάρκεια
- Ρυθμό μεταβολής
- Διεύθυνση ή διαδοχή των μεταβολών
- Αρμονικές ή κυματομορφή [20]

Οι ηλεκτρονόμοι έχουν μια συνεχή επιτήρηση του δικτύου που προστατεύουν, μετρώντας τις ηλεκτρικές ποσότητες. Βρίσκονται σε ετοιμότητα ανά πάσα στιγμή να αποσυνδέσουν ένα κύκλωμα, μόλις μια ποσότητα λάβει μια περίεργη τιμή. Στο σχήμα 6.1 παρουσιάζεται μια κλασική συνδεσμολογία του ηλεκτρονόμου με το πηνίο ενεργοποίησης του διακόπτη ισχύος.



Σχήμα 6.1: Συνδεσμολογία σύνδεσης ηλεκτρονόμου προστασίας

Με το κλείσιμο των επαφών του ηλεκτρονόμου εξαιτίας κάποιου σφάλματος ο μεγάλος λόγος L/R του πηνίου διέγερσης καθυστερεί τη γρήγορη αύξηση του ρεύματος, ενώ ταυτόχρονα ένας διακόπτης ισχύος ανοίγει πριν το ρεύμα φτάσει στην ονομαστική τιμή. Για αυτό το λόγο οι επαφές των ηλεκτρονόμων έχουν ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας 5 A ενώ τα πηνία 30 A. Μόλις τεθεί σε λειτουργία ο διακόπτης ισχύος και αποκοπεί το σύστημα που εποπτεύεται, ανοίγει ο

βοηθητικός διακόπτης 'α' , ώστε να επιτύχει ο ηλεκτρονόμος την επαναφορά του στην κανονική του κατάσταση, λόγω της αποδιέγερσης που αντιμετωπίσε με το άνοιγμα του διακόπτη ισχύος. [20]

6.3 Προστασία γραμμών μεταφοράς με ηλεκτρονόμους

Η προστασία μιας γραμμής μεταφοράς επιτυγχάνεται μέσω των παρακάτω ηλεκτρονόμων :

1. Ηλεκτρονόμων Υπέρτασης (Overcurrent Relaying)
2. Ηλεκτρονόμων Απόστασης (Distance relaying)
3. Ηλεκτρονόμων Οδηγού (Pilot Relaying) [20]

6.3.1 Προστασία με ηλεκτρονόμους υπέρτασης

Η προστασία με ηλεκτρονόμους υπέρτασης είναι η πιο απλή, φθηνή μέθοδος, αλλά ταυτόχρονα και η πιο δύσκολη για να εφαρμοστεί. Αυτό συμβαίνει γιατί οι ηλεκτρονόμοι χρειάζονται επαναρύθμιση άμεσα, σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, ή ακόμα και να αντικατασταθούν όσο αλλάζουν οι συνθήκες του δικτύου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μόνο στα χαμηλής τάσης δίκτυα, καθώς τα σφάλματα σε αυτά τα συστήματα δεν επηρεάζουν την ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στους ηλεκτρονόμους χρόνου-υπέρτασης, ο χρόνος λειτουργίας είναι αντιστρόφως ανάλογος με την ένταση του ρεύματος, με αποτέλεσμα ο ηλεκτρονόμος που βρίσκεται πιο κοντά στο σφάλμα - μεγαλύτερη ροή ρεύματος στο σημείο αυτό – να τεθεί σε λειτουργία άμεσα. Ταυτόχρονα ανοίγει τον διακόπτη ισχύος για την εκκαθάριση του σφάλματος, πριν ενεργοποιηθούν οι πιο απομακρυσμένοι ηλεκτρονόμοι.

Ένας διαφορετικός τύπος των παραπάνω ηλεκτρονόμων είναι αυτοί του ορισμένου χρόνου. Ο χρόνος λειτουργίας τους ορίζεται και παραμένει σταθερός, ανεξάρτητα της τιμής του ρεύματος. Η χρήση τους γίνεται για την προστασία ακτινωτών γραμμών ή βρόχων, όπου τα ρεύματα βραχυκυκλώματος κατά μήκος των γραμμών δε διαφοροποιούνται πολύ. [20]

6.3.2 Προστασία γραμμών μεταφοράς με ηλεκτρονόμους απόστασης.

Η προστασία γραμμής με ηλεκτρονόμους απόστασης χρησιμοποιείται όταν, η χρονική καθυστέρηση, για την αντιμετώπιση ενός βραχυκυκλώματος, δεν είναι αποδεκτή. Ένας ηλεκτρονόμος απόστασης υπολογίζει συνέχεια το $Z = \frac{V}{I}$ που είναι η σύνθετη αντίσταση από τη θέση του ηλεκτρονόμου μέχρι το σημείο του βραχυκυκλώματος. Επειδή, το Z είναι ανάλογο με το μήκος της γραμμής, η ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου μπορεί να ρυθμιστεί μόνο για βραχυκυκλώματα μέσα στην προστατευμένη γραμμή, καθώς και όταν ο λόγος αυτός είναι μικρότερος από την τιμή που έχει οριστεί. Η επιλεκτικότητα ενός ηλεκτρονόμου απόστασης είναι πιο εύκολο να επιτευχθεί, επειδή, η επέκτασή τους δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές του ρεύματος, εξαιτίας των μεταβολών στις συνθήκες παραγωγής και διακοπτικών λειτουργιών του συστήματος.

Οι τύποι ηλεκτρονόμων απόστασης που χρησιμοποιούνται, είναι οι εξής:

- Σύνθετης αντίστασης
- Επαγωγικής αντίδρασης
- Σύνθετης αγωγιμότητας
- Συνδυασμός ηλεκτρονόμων σύνθετης αγωγιμότητας και αντίστασης που έχουν τροποποιηθεί.

Οι ηλεκτρονόμοι απόστασης εφαρμόζονται κυρίως για την προστασία γραμμής.

Η προστασία απόστασης, είναι η πιο γνωστή μέθοδος και αξιόπιστη για την προστασία φάσεων και Γης γραμμών μεταφοράς, καθώς και έχουν ως χαρακτηριστικό τη γρήγορη αντιμετώπιση των σφαλμάτων. Επίσης, μένουν ανεπηρέαστες απ' τις μεταβολές στο σύστημα και τις συνθήκες φόρτισης. [20]

6.3.3 Προστασία γραμμών μεταφοράς με ηλεκτρονόμους οδηγούς

Οι ηλεκτρονόμοι οδηγοί χρησιμοποιούνται για την προστασία γραμμών μεταφοράς ενώ, το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι προσφέρουν μια πρωτεύουσα προστασία εξαιτίας, της άμεσης αντίδρασης σε όλα τα είδη βραχυκυκλωμάτων, για κάθε σημείο που μπορεί να συμβούν.

Έτσι, γίνεται με επιτυχία, το ταυτόχρονο άνοιγμα και κλείσιμο των διακοπών ισχύος στα άκρα της γραμμής. Ως αποτέλεσμα, το σύστημα γραμμών μεταφοράς λειτουργεί κοντά στο όριο μεταβατικής ευστάθειας, δηλαδή, την βέλτιστη χρησιμοποίησή του.

Ο τρόπος λειτουργίας των ηλεκτρονόμων οδηγού γίνεται μέσα από ένα κανάλι διασύνδεσης (pilot) που βρίσκεται ανάμεσα από τα άκρα των γραμμών μεταφοράς, μεταφέροντας οποιαδήποτε πληροφορία όπως, τι σφάλμα προκλήθηκε και σε ποιο σημείο. Οι τύποι ενός καναλιού διασύνδεσης είναι τρεις: οδηγοί σύρματος (wire pilot), οδηγοί φέροντος ρεύματος (carrier current pilot) και μικροκυματικοί οδηγοί (microwave pilot). Αν η πληροφορία είναι ψηφιακής μορφής, τότε, ο οδηγός χρησιμοποιεί οπτικές ίνες. Οι οδηγοί σύρματος είναι πιο οικονομικοί και ιδανικοί για μικρές αποστάσεις, ή μικρού μήκους γραμμές σε αστικές περιοχές. Για πιο μεγάλες αποστάσεις, ένας οδηγός φέροντας ρεύματος είναι ο οικονομικότερος. Τέλος, οι μικροκυματικοί οδηγοί χρησιμοποιούνται όταν οι δυνατότητες του φέροντος ρεύματος (οικονομικές και τεχνικές) δεν επαρκούν για τη μεταφορά του πλήθους των πληροφοριών. [20]

6.4 Προστασία σύγχρονης γεννήτριας

Οι γεννήτριες χαρακτηρίζονται ως οι πιο ακριβές και οι πιο πολύπλοκες συσκευές ενός ΣΗΕ, με ως συνέπεια να υπόκεινται σε πολλούς και διαφορετικούς τύπους σφαλμάτων. Η επιλογή του συστήματος προστασίας τους πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή και ακρίβεια, γιατί τυχόν δυσλειτουργία του μπορεί να προκαλέσει αν όχι τα ίδια προβλήματα με την αποτυχία λειτουργίας του. Αν χρειαστεί να γίνει μια μη απαραίτητη απομόνωση μιας μεγάλης γεννήτριας, τότε το σύστημα οδηγείται σε υπερφόρτωση, με πιθανό αποσυγχρονισμό και άλλων

γεννητριών. Αν πάλι δεν γίνει η σωστή εκκαθάριση των σφαλμάτων, τότε οι γεννήτριες μπορούν να πάθουν ανεπανόρθωτες βλάβες.

Τα βραχυκυκλώματα στα τυλίγματα των γεννητριών, η υπερθέρμανση, η υπέρταση, οι ταλαντώσεις που προκαλούν φθορά στα ρουλεμάν στήριξης, σφάλματα είτε στον στάτη είτε στον δρομέα είτε και στα δύο, είναι μερικοί από τους λόγους που μπορούν να θέσουν εκτός λειτουργίας μια γεννήτρια. Το μέγεθος και το κόστος της γεννήτριας ορίζουν τον αριθμό των συστημάτων προστασίας που θα διαθέτουν.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την προστασία αποσυγχρονισμού μοιάζουν με αυτών των γραμμών μεταφοράς. Οι πιο διαδεδομένοι για τις γεννήτριες είναι οι ηλεκτρονόμοι κατεύθυνσης, οι οποίοι συνδέονται στους ακροδέκτες των γεννητριών. Αυτοί έχουν την ιδιότητα να ενεργοποιούνται όταν η ισχύς κατευθύνεται προς την αντίθετη φορά από την κανονική, δηλαδή από το δίκτυο προς τη γεννήτρια, θέτοντας σε λειτουργία τον αντίστοιχο διακόπτη ισχύος, που θα απομονώσει τη γεννήτρια στην οποία έχει συμβεί το βραχυκύκλωμα. [20]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΕΥΦΥΕΣ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

7.1 Εισαγωγή

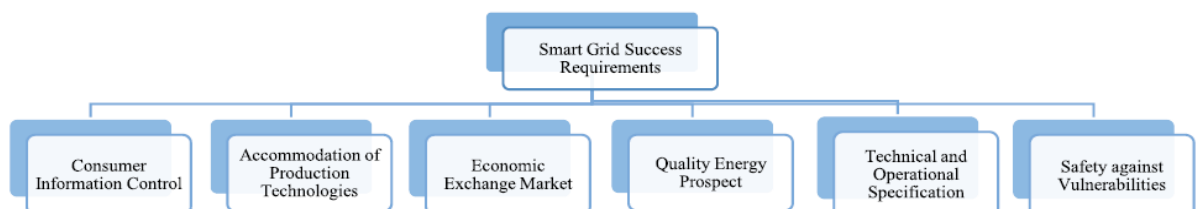
Η πλειονότητα του παγκόσμιου δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκε όταν η τιμή της ενέργειας ήταν χαμηλή. Έκτοτε, μικρές αναβαθμίσεις έχουν υπάρξει στο αρχικό δίκτυο προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αυξανόμενη ζήτηση της ενέργειας. Η λειτουργία του δικτύου είναι η ίδια με πριν από εκατό χρόνια, η ενέργεια παρέχεται στους καταναλωτές από κεντρικές μονάδες παραγωγής αποτρέποντας το πλεόνασμα ενέργειας και διασφαλίζοντας την αξιοπιστία του συστήματος [21]. Παρόλα αυτά είναι απαραίτητο να εκσυγχρονιστεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Παγκοσμίως αναπτύσσονται ηλεκτρικά δίκτυα με την εξέλιξη των τεχνολογιών του ευφυούς δικτύου και όχι η μαζική αντικατάσταση και ενίσχυση του υπάρχοντος δικτύου [22].

Το ευφύες δίκτυο είναι ένα προηγμένο, ψηφιακό, διπλής κατεύθυνσης ροής ισχύος ενεργειακό σύστημα το οποίο έχει την ικανότητα να αυτοθεραπεύεται, να είναι προσαρμοστικά βιώσιμο, με διορατικότητα να προβλέπει κάτω από διάφορες αβέβαιες συνθήκες. Για να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα είναι εξοπλισμένο με συσκευές, συστατικά και συστήματα στα πρότυπα του παρόντος και του μέλλοντος, τα οποία είναι προστατευμένα από κακόβουλες επιθέσεις στον κυβερνοχώρο. Με τις επαναστατικές αλλαγές στα συστήματα επικοινωνίας, οι οποίες διευκολύνθηκαν από την ανάπτυξη του ίντερνετ, παρουσιάζεται μεγαλύτερη δυνατότητα παρακολούθησης και ελέγχου όλου του συστήματος ενέργειας και ως εκ τούτου μικρότερο κόστος, ευέλικτη και αποτελεσματική λειτουργία.

Με το ευφύες δίκτυο υπάρχει η δυνατότητα να αξιοποιηθούν οι νέες τεχνολογίες και να φέρει επανάσταση στο συμβατικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η διείσδυση των Α.Π.Ε με τη χρήση του ευφυούς δικτύου βοηθά στη μείωση των εκπομπών άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου ταυτόχρονα με προγράμματα διατήρησης της ενέργειας και διαχείρισης της ζήτησης, τα οποία συμπεριλαμβάνονται στο ευφύες δίκτυο, επιτυγχάνεται η μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας [21].

Για να μπορέσει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να μετατραπεί σε ευφυές πρέπει να εκπληρώνονται έξι βασικές προϋποθέσεις (Σχήμα 7.1) :

- Έλεγχος πληροφοριών καταναλωτή, όπου παρέχεται η δυνατότητα στον καταναλωτή να ενημερωθεί για την κατανάλωσή του και να την προσαρμόσει αναλόγως στις ανάγκες που προκύπτουν απ' τη διαχείριση του δικτύου.
- Προσαρμογή των τεχνολογιών παραγωγής στο έξυπνο δίκτυο, όπως, διασκορπισμένες γεννήτριες και συσκευές αποθήκευσης, χωρίς να δημιουργείται συμφόρηση στο δίκτυο ή ανισορροπία μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς, καθώς και να σχηματίζονται οι κατάλληλες ρυθμιστικές και οικονομικές συνθήκες για την ανάπτυξη αυτών των συσκευών από ιδιωτικούς, οικονομικούς φορείς.
- Οικονομικές αγορές, συναλλάγματα μεταξύ των ανταγωνιστών στο πεδίο του έξυπνου δικτύου, μπορεί να δημιουργήσει οικονομική αποτελεσματικότητα και καινοτομία.
- Ποιοτική ενεργειακή προοπτική, όπου το ευφυές δίκτυο θα παρέχει σταθερού επιπέδου ποιότητα ενέργειας με τη χρήση νέων και καλύτερων μεθόδων ποιότητας ελέγχου.
- Τεχνικές και λειτουργικές προδιαγραφές, όπου το ευφυές δίκτυο θα αποτελείται από συσκευές, οι οποίες θα ρυθμίζουν την κατανάλωση και την παραγωγή, προκειμένου να συναντήσουν τους περιορισμούς του δικτύου και παράλληλα νέες τεχνικές που επιτρέπουν την παρατήρηση του δικτύου ώστε να βελτιώσουν τη γνώση τους για την κατάσταση του δικτύου.
- Ασφάλεια απέναντι στις αδυναμίες του συστήματος, όπως, η αντοχή σε ποικίλες διαταραχές που μπορεί να υποστεί απ' το περιβάλλον [22].



Σχήμα 7.1: Απαιτήσεις για επιτυχές έξυπνο δίκτυο [22]

Η επιλογή του ευφυούς δικτύου έχει εξελιχθεί από ένα όραμα σε πραγματικό στόχο. Οι πρωτοβουλίες για την εφαρμογή των έξυπνων δικτύων παγκοσμίως διευκολύνονται από τις συμπαγείς ενεργειακές πολιτικές ελέγχου και διαχείρισης καθώς πολλές, κυρίως ανεπτυγμένες χώρες έχουν προβεί στις παραπάνω ενέργειες και ήδη έχουν εγκαταστήσει τεχνολογίες του έξυπνου δικτύου στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. [21]

7.2 Χαρακτηριστικά του ευφυούς δικτύου

Ο στόχος του έξυπνου δικτύου είναι να εξασφαλίζει την ισορροπία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης οποιαδήποτε στιγμή με αυξημένη ανταπόκριση, αξιοπιστία και βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου. Έτσι, το ηλεκτρικό σύστημα μετατρέπεται σε ένα δίκτυο όπου όλοι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν και συνεισφέρουν στην ποικιλία του έξυπνου δικτύου. Στην πραγματικότητα, η αρχιτεκτονική του έξυπνου δικτύου αποτελείται από τρία επίπεδα:

- Το πρώτο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του ηλεκτρισμού με τη χρήση συμβατικών υποδομών όπως, γραμμές και μετασχηματιστές.
- Το δεύτερο σχηματίζεται από διάφορα επικοινωνιακά μέσα όπως, οπτικές ίνες, GPRS, PLC, τα οποία συλλέγουν πληροφορίες από αισθητήρες που έχουν εγκατασταθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- Το τρίτο αποτελείται από εφαρμογές και υπηρεσίες, όπως τα απομακρυσμένα για την αντιμετώπιση προβλημάτων συστήματα ή αυτόματα προγράμματα ανταπόκρισης ζήτησης χρησιμοποιώντας πραγματικού χρόνου πληροφορίες [22].

Η παραπάνω αρχιτεκτονική του έξυπνου δικτύου χωρίζεται σε υποσυστήματα με επίπεδα τεχνολογίας, ευφυΐας, καινοτομίας και νέων εργαλείων. Περιλαμβάνει τη μαζική παραγωγή ενέργειας, τη μεταφορά, τη διανομή και το επίπεδο κατανάλωσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα στοιχεία και οι λειτουργίες του που τα επιτυγχάνουν είναι τα εξής:

- Στοιχείο αποθήκευσης: Εξαιτίας της ασυνέπειας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της αναντιστοιχίας μεταξύ της κορύφωσης της κατανάλωσης και της κορύφωσης της διαθεσιμότητας, είναι σημαντικό να βρεθούν μέθοδοι για την αποθήκευση της ενέργειας και τη χρήση της στο μέλλον. Το

στοιχείο αποθήκευσης βελτιώνει την αξιοπιστία και την ανθεκτικότητα για τη χρησιμότητα του δικτύου και τους καταναλωτές ρεύματος. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνουν μπαταρίες ροής, υπερ-πυκνωτές, συμπιεσμένο αέρα, υπερ-αγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας και υδροάντληση.

- Στοιχείο υποσυστήματος μετάδοσης: Το σύστημα μετάδοσης που συνδέει όλους του κύριους υποσταθμούς και κεντρικά σημεία φόρτισης αποτελούν τη ραχοκοκαλιά ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού συστήματος. Η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα με ένα φυσιολογικό κόστος είναι ο απόλυτος στόχος για τους χειριστές και τους σχεδιαστές του συστήματος μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς πρέπει να αντέχουν απρόοπτες και δυναμικές αλλαγές φορτίου, χωρίς να χρειάζεται να υπάρχει διακοπή για την επισκευή. Για να επιτευχθεί η αποδοτικότητα, η ποιότητα στην παροχή και η αξιοπιστία, προτιμώνται ορισμένες σταθερές. Οι προχωρημένες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της απόδοσης όπως, η πραγματικού χρόνου ευστάθεια, αξιοπιστία και δυναμική προτεινόμενη ροή φορτίου. Η πραγματικού χρόνου παρακολούθηση του συστήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση του PMU συσκευών, τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών και αισθητήρων. Όλα αυτά αποτελούν ευφυή υποσυστήματα μετάδοσης, τα οποία επιτρέπουν στα εργαλεία για την ανάπτυξη της λειτουργικότητάς του έξυπνου δικτύου μεταφοράς.
- Στοιχείο τεχνολογίας ελέγχου και παρακολούθησης: Το στοιχείο αυτό αποτελείται από συσκευές αυτό-παρακολούθησης, αυτοθεραπείας, προβλεπτικότητας, ευφυές διαδίκτυο και συσκευές ικανές να διαχειριστούν θέματα αξιοπιστίας, αστάθειας και συμφόρησης. Το σύστημα πρέπει να είναι ευέλικτο και αξιόπιστο για να παρέχει πραγματικού χρόνου αλλαγές κατά τη χρήση του. Τέλος, οι συσκευές αυτές έχουν αυτογνωσία και λαμβάνουν δράση ανεξάρτητα και χωρίς εξωτερική παρέμβαση.
- Στοιχείο ευφυούς υποσυστήματος δικτύου διανομής: Το δίκτυο διανομής αποτελεί το τελευταίο στάδιο στη μεταφορά της ενέργειας στους καταναλωτές. Η σειρά με την οποία γίνεται η τροφοδοσία είναι πρώτα στις μικρές βιομηχανίες και μετά στους εμπορικούς και οικιακούς καταναλωτές. Για το δίκτυο διανομής, υπάρχουν ευφυή βοηθητικά συστήματα τα οποία θα παρακολουθούν τη δυνατότητα για αυτοματοποίηση, χρησιμοποιώντας

συνδέσμους επικοινωνίας μεταξύ των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας, των καταναλωτών, τους έξυπνους μετρητές και τα στοιχεία ενεργειακής διαχείρισης. Η αυτοματοποίηση θα επιτυγχάνεται με αυτοδίδακτες δυνατότητες όπως, η αυτόματη τιμολόγηση, ανίχνευση σφαλμάτων, αποκατάσταση και αναδιαμόρφωση της τροφοδοσίας, βελτιστοποίηση της τάσης και μεταφοράς φορτίου.

- Στοιχείο διαχείρισης της ζήτησης: Η διαχείριση της ζήτησης και η αποδοτικότητα της ενέργειας εξελίσσονται για να τροποποιήσουν τη ζήτηση του καταναλωτή, ελαττώνοντας το κόστος λειτουργίας με τη μείωση της χρήσης ακριβών γεννητριών και αναβάλλοντας την προσθήκη χωρητικότητας. Η διαχείριση της ζήτησης συμβάλει στην αξιοπιστία της παραγωγής και στη μείωση των ρύπων. Όλα τα παραπάνω έχουν ένα αντίκτυπο στη χρησιμότητα της καμπύλης φορτίου. Ανεπτυγμένες τεχνολογίες και εφαρμογή πρωτοκόλλων είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Για την επίτευξη των στόχων, έξυπνα ενεργειακά κτήρια και σπίτια, plug-and-play τεχνολογίες, απαιτήσεις για καθαρό αέρα και διεπαφές των καταναλωτών, θα πάρουν θέση στο σύστημα για καλύτερη αποδοτικότητα ενέργειας [21].

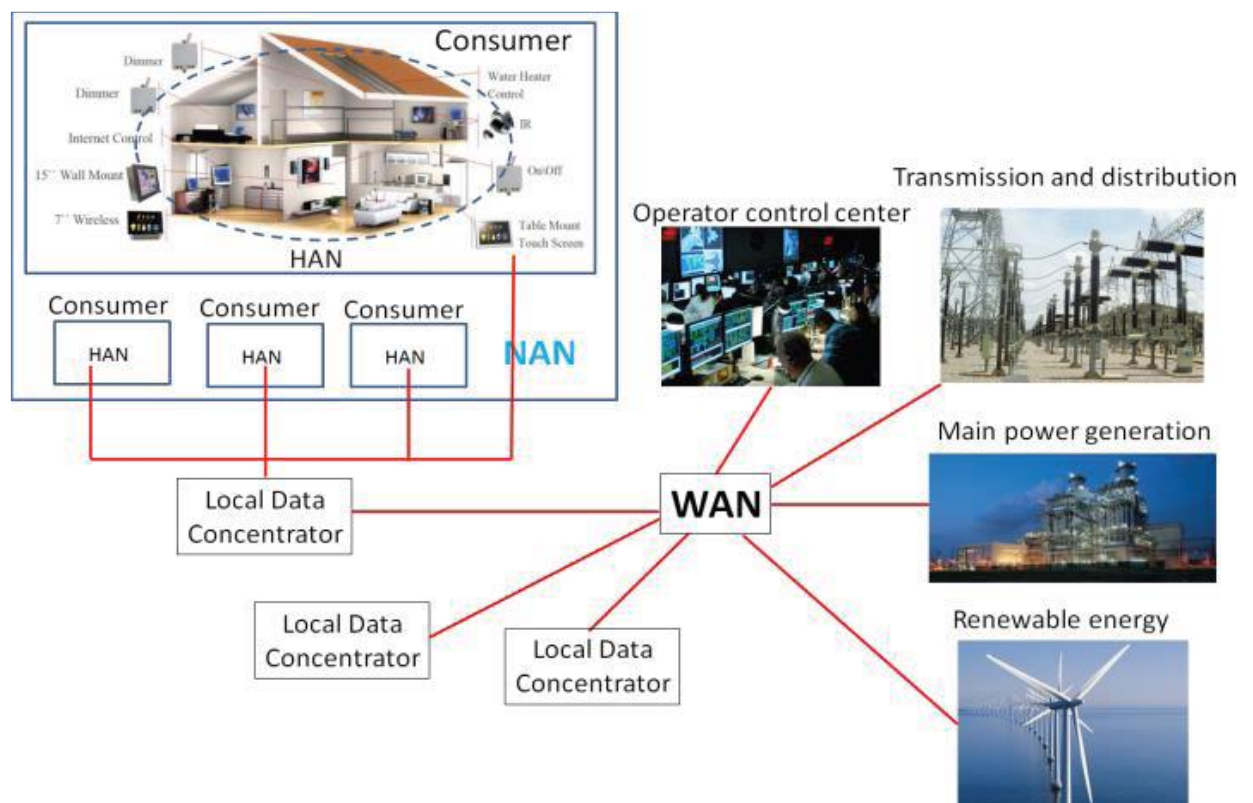
7.3 Υποδομές επικοινωνίας στο ευφυές δίκτυο

Οι υπάρχουσες υποδομές επικοινωνίας στο συμβατικό δίκτυο έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν μονής κατεύθυνσης ροής φορτίου από την κεντρική παραγωγή στους καταναλωτές, με ταυτόχρονα περιορισμένη αποδοτικότητα και διανομή της πληροφορίας. Τα συστήματα πληροφορίας του συμβατικού δικτύου χρησιμοποιούνται κυρίως για την απόκτηση δεδομένων από περιορισμένους αισθητήρες, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε κύρια σημεία μεταφοράς και διανομής, περιορισμένο αριθμό σημάτων ελέγχου μετάδοσης και ανίχνευση σφαλμάτων. Τα δεδομένα αποκτώνται μέσω του συστήματος SCADA [23].

Το ευφυές δίκτυο αποτελείται από ένα υψηλότερο αριθμό αισθητήρων και ενεργοποιητών σε σχέση με το υπάρχον δίκτυο, και τοποθετούνται σε όλα τα επίπεδα του δικτύου απ' τα εργοστάσια παραγωγής, τον εξοπλισμό των υποσταθμών, τις γεννήτριες, τους μετασχηματιστές και τους οικιακούς καταναλωτές. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων και

πληροφοριών και στη συνέχεια ανταλλάσσονται μεταξύ του εξοπλισμού και του κέντρου δεδομένων. Οι ενεργοποιητές έχουν ως λειτουργία τον έλεγχο βελτιστοποίησης όλων των στοιχείων του δικτύου προκειμένου να επιτευχθεί ο χειρισμός της ροής ενός τέτοιου τεράστιου όγκου δεδομένων, το έξυπνο δίκτυο πρέπει να αναβαθμιστεί με αξιόπιστες υποδομές επικοινωνίας οι οποίες, θα μπορούν να παρέχουν πραγματικού χρόνου ασφαλείς επικοινωνίες. Ταυτόχρονα, οι υποδομές χρειάζεται να έχουν ένα ευρύ bandwidth για να εξασφαλίζεται υψηλός ρυθμός ροής της πληροφορίας καθώς, πρέπει να αυτοθεραπεύονται και αυτόματα να προσαρμόζονται στις αλλαγές [23].

Οι υποδομές επικοινωνίας ενός έξυπνου δικτύου βασίζονται σε τρεις τύπους δικτύου: Home Area Network (HAN), Neighborhood Area Network (NAN), Wide Area Network (WAN) όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2 [23].



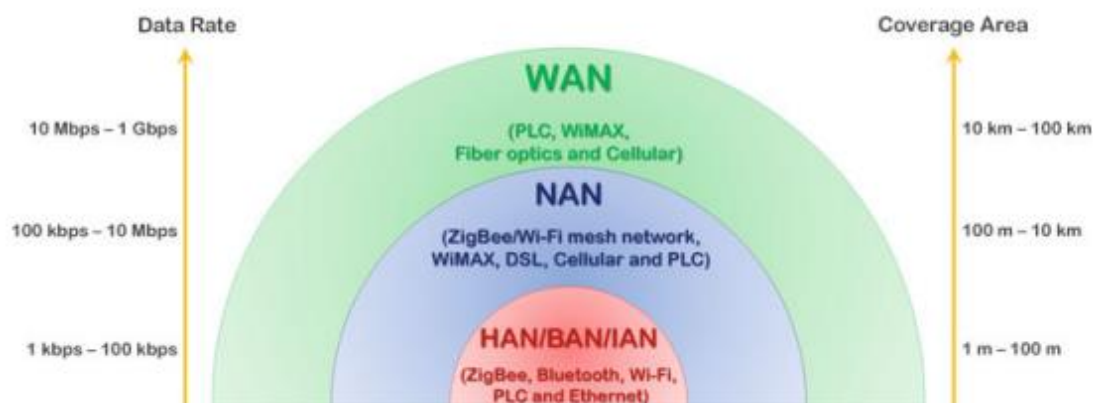
Σχήμα 7.2: Υποδομές έξυπνου δικτύου επικοινωνίας [23]

Το δίκτυο HAN εφαρμόζεται και λειτουργεί σε μια περιοχή δεκάδων μέτρων, συνήθως σε ένα σπίτι ή μικρό γραφείο. Έχει χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και οι τεχνολογίες που μπορεί να χρησιμοποιήσει είναι Zigbee ή Ethernet το οποίο είναι βασισμένο στο IEEE 802.15 πρωτόκολλο. Με τη χρήση του δικτύου HAN

επιτυγχάνεται αποδοτικότερη ενεργειακή διαχείριση διότι συνδέονται πάνω στο δίκτυο όλες οι έξυπνες συσκευές καθώς και οι έξυπνοι μετρητές [23]. Τέλος, να σημειωθεί ότι το δίκτυο HAN έχει ως πλεονέκτημά του, την απλότητα, την ασφαλή επικοινωνία, το χαμηλό κόστος και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας [24].

Το δίκτυο NAN εφαρμόζεται και λειτουργεί καλύπτοντας μια περιοχή εκατοντάδων μέτρων. Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι σε ένα μέσο επίπεδο και η κύρια λειτουργία του είναι να μεταφέρει τα δεδομένα από τους καταναλωτές στα τυπικά κέντρα δεδομένων μέσω του ίντερνετ, και στη συνέχεια, να γίνεται αναγνώριση του μοτίβου για τη ζήτηση παραγωγής ενέργειας. Οι τεχνολογίες επικοινωνίας που χρησιμοποιεί το NAN είναι PLC, WiFi το οποίο είναι βασισμένο στο IEE 802.11 πρωτόκολλο, συστήματα κυψελών [23]. Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως για επιτευχθούν τα παραπάνω, ο καταναλωτής χρειάζεται να έχει εξοπλισμό, τη μέτρηση, ηλεκτρική αποθήκευση, συστήματα EMS, PHEV και διάφορες συσκευές [21].

Το δίκτυο WAN λειτουργεί σε μια ευρεία περιοχή δεκάδων χιλιομέτρων και αποτελείται από μερικά δίκτυα NAN. Παρουσιάζεται σαν μια πλατφόρμα επικοινωνίας μεταξύ των υποσταθμών. Αποτελείται από μονάδες παραγωγής ενέργειας, σταθμούς διανομής και συστήματα μετασχηματισμών, τα οποία χρειάζονται πραγματικό χρόνο μέτρησης και παρακολούθηση πληροφοριών σε μία ευρεία περιοχή. Επιπλέον, απαιτείται ένα δίκτυο επικοινωνίας με υψηλό bandwidth ώστε να ανταπεξέρχεται στις μεγάλες αποστάσεις κατά την μεταφορά της πληροφορίας καθώς και υψηλές ταχύτητες. Οι οπτικές ίνες είναι ευρέως διαδεδομένες μεταξύ των υποσταθμών διανομής και του κέντρου ελέγχου, εξαιτίας της υψηλής χωρητικότητας και των μειωμένων καθυστερήσεων. Πέραν των οπτικών, χρησιμοποιούνται επίσης, συστήματα κυψελών και WI-MAX για να καλύψουν τις εκτεταμένες περιοχές του WAN [23]. Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζονται οι επικοινωνιακές τεχνολογίες των έξυπνων δικτύων.



Σχήμα 7.3: Σύγκριση μερικών επικοινωνιακών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στα έξυπνα δίκτυα [24]

7.4 Έξυπνα συστήματα μετρήσεων και παρακολούθησης δικτύου

Η επιτυχής λειτουργία του έξυπνου δικτύου εξαρτάται από την εφαρμογή αποτελεσματικών επικοινωνιακών συστημάτων για την παρακολούθηση, τη μέτρηση και τον έλεγχό του. Οι υψηλής ταχύτητας, αμφίδρομες τεχνολογίες επικοινωνίας δίνουν τη δυνατότητα στο έξυπνο δίκτυο να είναι δυναμικό, διαδραστικό με τις τεράστιες υποδομές και να λαμβάνει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Για να επιτευχθεί η ασφαλής μεταφορά ευαίσθητων δεδομένων μέσω του δικτύου επικοινωνίας, είναι απαραίτητο να οριστούν κάποια πρωτόκολλα, σε συνδυασμό πάντα με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες ελέγχου, μέτρησης και παρακολούθησης [21].

Η εφαρμογή της τεχνολογίας AMI (Advanced Metering Infrastructure) είναι ένα βασικό βήμα για τον εκσυγχρονισμό του υπάρχοντος δικτύου [21]. Η τεχνολογία AMI είναι ένα σύστημα το οποίο προσθέτει τον δίαυλο επικοινωνίας στο έξυπνο δίκτυο και περιλαμβάνει αμφίδρομες ροές δεδομένων ανάμεσα στους καταναλωτές και τις υπηρεσίες κοινής ασφάλειας. Επίσης, παρέχει ευφυή διαχείριση, καλύτερη συντήρηση, ευκολότερες και καταλληλότερες προσθήκες καθώς και αντικατάσταση των περισσότερων στοιχείων των υπηρεσιών κοινής ασφάλειας που έχει ως αποτέλεσμα καλύτερη ποιότητα ενέργειας. Η τεχνολογία AMI αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: έξυπνες συσκευές μέτρησης στους καταναλωτές, αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των πελατών και των εταιρειών, αυτόματο λογισμικό και κέντρο λειτουργίας για την επεξεργασία των δεδομένων [25].

Με την εφαρμογή της τεχνολογίας AMI και για τον εκσυγχρονισμό του υπάρχοντος δικτύου, χρησιμοποιούνται οι έξυπνοι μετρητές, οι έξυπνοι αισθητήρες και ευφυής ηλεκτρονικές συσκευές [21] [25].

- Έξυπνοι μετρητές: Οι έξυπνοι μετρητές είναι ισχυρά εργαλεία τα οποία βοήθησαν στη θεμελιώδη λειτουργία των ενεργειακών συστημάτων. Προκειμένου να εκτελέσουν τις λειτουργίες ενός συμβατού μετρητή, οι έξυπνοι μετρητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες, κατά μήκος όλου του δικτύου διανομής. Με την τεχνολογία AMI οι έξυπνοι μετρητές μπορούν να μετρήσουν και να καταγράψουν την πραγματική χρήση της ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε ένα συγκεκριμένο διάστημα. Η συλλογή των δεδομένων αποστέλλεται στο κέντρο διαχείρισης δεδομένων μέσω ενός ασφαλούς δικτύου και τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας. Επιπροσθέτως, αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις υπηρεσίες κοινής ασφάλειας για τον εντοπισμό σφαλμάτων και στέλνουν σημειώσεις σχετικά με την αποκατάστασή τους ή την διακοπή της λειτουργίας. Οι πληροφορίες αυτές επιτρέπουν στις υπηρεσίες να παρέχουν πιο αξιόπιστη παροχή ενέργειας, καθώς και τον καλύτερο προγραμματισμό λειτουργίας, άμεση ανταπόκριση στις διακοπές της λειτουργίας του δικτύου. Τέλος, η συλλογή πληροφοριών αυξάνει την ανάλυση των δεδομένων [25]. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, υπάρχει καλύτερη ενημέρωση για την τιμολόγηση, πιο ακριβής λογαριασμός, μείωση του κόστους με βάση την κατανάλωση, καθώς επίσης και σταθεροποίηση της τάσης και αξιολόγηση της ασφάλειας [21].
- Έξυπνοι αισθητήρες: Οι έξυπνοι αισθητήρες παρέχουν αναλογική επεξεργασία καταγραφόμενων σημάτων, ψηφιακή αναπαράσταση των αναλογικών και μεταφορά μέσω ενός αμφίδρομου ψηφιακού ζυγού, καθώς τον χειρισμό και τον υπολογισμό των δεδομένων. Επιτρέπουν την πιο ακριβή και αυτόματη συλλογή δεδομένων με λιγότερο θόρυβο σφάλματος. Η χρήση τους είναι εκτενής για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του έξυπνου δικτύου καθώς και για την αυτοματοποιημένη και αξιόπιστη ανάλυση των δεδομένων. Επιπροσθέτως, παρακολουθούν και ελέγχουν την κατάσταση στους κύριους υποσταθμούς και στον εξοπλισμό της

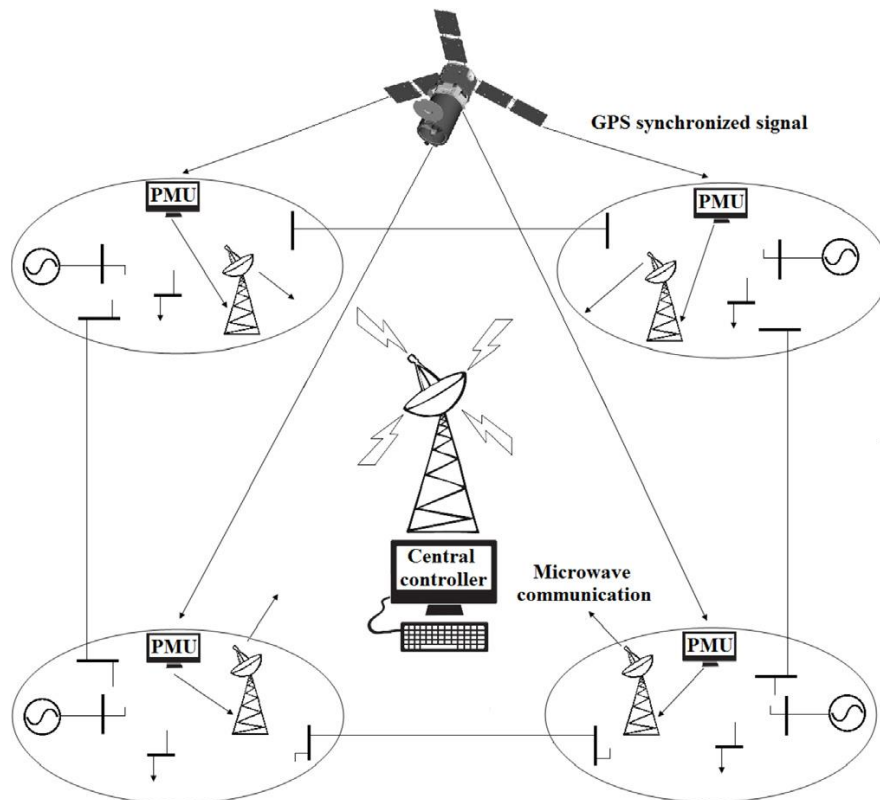
γραμμής όπως μετασχηματιστές, διακόπτες κυκλώματος, ρελέ, καλώδια, πυκνωτές και ζυγούς. Για να παρέχουν καλύτερη πληροφορία, οι έξυπνοι αισθητήρες τοποθετούνται σε τρεις διαφορετικές βαθμίδες ανάλογα με τις ανάγκες: σε τοπικό επίπεδο, σε επίπεδο παροχής και στο κεντρικό δωμάτιο ελέγχου [21].

- Ευφυής ηλεκτρονικές συσκευές: Οι ευφυής ηλεκτρονικές συσκευές είναι μικροεπεξεργαστές με την ικανότητα ανταλλαγής δεδομένων και σημάτων ελέγχου με μια άλλη συσκευή, μέσω ενός δίαυλου επικοινωνίας. Παρέχουν πραγματικού χρόνου συγχρονισμό για την αναφορά των γεγονότων και αποτελούν τον πιο σημαντικό παράγοντα για οποιαδήποτε απομακρυσμένη διαχείριση ενεργειακών συστημάτων. Με την εγκατάστασή τους βελτιώνεται η παρακολούθηση, ο έλεγχος, η ασφάλεια και η συλλογή δεδομένων για τις δυνατότητές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, έχουν τη ικανότητα να συλλέγουν διάφορους τύπους δεδομένων. Μπορούν να συλλέξουν από τον εξοπλισμό και τους αισθητήρες και στη συνέχεια, μπορούν να ρυθμίσουν τις εντολές ελέγχου για τυχόν ανωμαλίες στο ρεύμα, την τάση ή την συχνότητα του συστήματος. Οι ευφυής ηλεκτρονικές συσκευές αποτελούνται από ρυθμιστές τάσης, διακόπτες πυκνωτών, προστατευτικές συσκευές αναμετάδοσης, ελεγκτές [21]

Ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία του ευφυούς δικτύου είναι τα συστήματα WAMS (Wide Area Measurement Systems) τα οποία, σε σχέση με τα συστήματα SCADA κάνουν μετατροπές σε πολύ υψηλότερο ρυθμό (5-60 δείγματα ανά δευτερόλεπτο, σε σχέση με τα 2-6 δείγματα ανά δευτερόλεπτο). Επιπροσθέτως, όλοι οι φάσορες του συστήματος αναπτύσσονται αδιάκοπα και ταυτόχρονα, διαβάζοντας τις πραγματικού χρόνου πληροφορίες, των παραμέτρων των συστημάτων ενέργειας. Ακόμη, με τη χρήση του συστήματος WAMS βελτιώνεται σημαντικά η απόδοση του δικτύου, με την αξιολόγηση της ευστάθειας του δικτύου, την ανίχνευση σφάλματος, τις θεραπευτικές δράσεις ελέγχου για το δίκτυο, καθώς και την υποστήριξη για πιο ακριβή εκτίμηση της κατάστασης. Τα σύγχρονα συστήματα WAMS πέρα από τις μονάδες μέτρησης φάσης (PMU), οι οποίες τοποθετούνται ευρέως σε αυτά, έχουν διαθέσιμα τα διπλής χρήσης ρελέ γραμμής, τα οποία συμβάλουν στην μεταβλητότητα τους. Τα ρελέ αυτά αποτελούν την

προστασία για τους μετασχηματιστές των γραμμών μεταφοράς, παρέχοντας ταυτόχρονη προστασία στο σύστημα και αναφορά των δεδομένων που συλλέγονται. Τα διπλής χρήσης ρελέ γραμμής, παρόλο που έχουν περιορισμένη λειτουργία παρακολούθησης, είναι αρκετά υποσχόμενα χάρη στο χαμηλό κόστος τους [21].

Οι συσκευές μέτρησης φάσης (Phases measurement unit, PMU) αποτελούν και αυτές ένα σημαντικότατο κομμάτι για τα μελλοντικά συστήματα ενέργειας. Κατά τη λειτουργία τους κάνουν μέτρηση των ηλεκτρικών κυμάτων στο δίκτυο. Οι συσκευές αυτές αποτελούνται από διακλαδώσεις με φάσορες ρεύματος και φάσορες τάσης ζυγού, καθώς εντοπίζουν τις πληροφορίες και τις παραμέτρους άλλων δικτύων. Με τον συγχρονισμό του χρόνου, ο οποίος πραγματοποιείται με την τοποθέτηση συσκευών GPS πάνω στα PMU, επιτυγχάνονται άμεσες συγχρονισμένες μετρήσεις από διάφορα απομακρυσμένα σημεία μετρήσεων στο δίκτυο (Σχήμα 7.4). Επιπρόσθετα, είναι κατάλληλες για παρακολούθηση και έλεγχο της ευστάθειας της τάσης, προσφέροντας σε μια ευρεία περιοχή επίγνωση της κατάστασης, περιορίζουν ή αποτρέπουν τις διακοπές του ηλεκτρικού ρεύματος και τέλος, διευκολύνουν την συμφόρηση του συστήματος. Ο συνδυασμός τους με τις τεχνολογίες επικοινωνίας του έξυπνου δικτύου παρέχει δυναμική ορατότητα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πραγματικού χρόνου μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο έξυπνο δίκτυο βελτιώνουν κάθε πτυχή του συστήματος διανομής ενέργειας, περιλαμβάνοντας την παραγωγή, την μεταφορά, τη διανομή και την κατανάλωση [21].



Σχήμα 7.4: Διάγραμμα από ένα συγχρονισμένο σύστημα μέτρησης φάσορα [21]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν συμβάλει σημαντικά στην οικονομική εξέλιξη των κρατών καθώς επίσης και στην αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων, διότι πλέον είναι ένα αναπόσπαστο αγαθό της καθημερινότητας. Για αυτό το λόγο τα ΣΗΕ απαιτείται να έχουν μελετηθεί με ακρίβεια, πλήρως και με προσεκτικότητα, τόσο όταν σχεδιάζονται και κατασκευάζονται, όσο και όταν βρίσκονται σε κατάσταση λειτουργίας. Η μελέτη τους δεν μετριάζεται μόνο κατά τη διάρκεια της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας τους, αλλά διευρύνεται κατά τη διάρκεια εμφάνισης σφαλμάτων ή και άλλων μορφών διαταραχών, οι οποίες θα οδηγούσαν σε αστάθεια του συστήματος και ως συνέπεια θα οδηγούσαν σε κίνδυνο όχι μόνο τις εγκαταστάσεις και τον εξοπλισμό, αλλά και την συνεχόμενη τροφοδοσία των πελατών. Έτσι τίθεται η ανάγκη για την εγκατάσταση και λειτουργία των κατάλληλων προστατευτικών μέσων, τα οποία θα ενεργούν όταν είναι αναγκαίο, για την προστασία των διάφορων τμημάτων του δικτύου. Τα τελευταία χρόνια το μέγεθος αλλά και η πολυπλοκότητα των ΣΗΕ έχει αυξηθεί εξαιτίας των όλο και μεγαλύτερων αναγκών και απαιτήσεων για ηλεκτρική ενέργεια. Για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητο το υπάρχον δίκτυο να αναβαθμιστεί και να εξελιχθεί σε ένα ευφυές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, με την εγκατάσταση και εφαρμογή των κατάλληλων τεχνολογιών και μέσων, ώστε να επιτευχθεί η ομαλή λειτουργία του δικτύου. Τέλος με αυτή την αναβάθμιση του δικτύου και τις συνεχόμενες βελτιώσεις των προγραμμάτων λογισμικού προσομοίωσης, επιτυγχάνεται πιο γρήγορα, πιο εύκολα και πιο αποτελεσματικά η μελέτη, η παρακολούθηση και ο έλεγχος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., Βοβός Νικόλαος Α., *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2017.
- [2] Δ. Λαμπρίδης, Π. Ντοκόπουλος, Γ. Παπαγιάννης, *Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Ζήτη, Αύγουστος 2006, Θεσσαλονίκη.
- [3] O.O Mohammad, et al. , “VIRTUAL SYNCHRONOUS GENERATOR: AN OVERVIEW”, *Nigerian Journal of Technology*, pp. 153-164, 2019
- [4] K.M Cheema, “A comprehensive review of virtual synchronous generator”, *Electrical Power and Energy Systems*, 2020.
- [5] S. D’Arco, J.A Suul, “Virtual Synchronous Machines – Classification of Implementations and Analysis of Equivalence to Droop Controllers for Microgrids”, *IEEE Grenoble Conference*, 2013.
- [6] M.R. Hussain, et al. , “Overview an Partial Discharge Analysis of Power Transformers: A Literature Review”, *IEEE Access*, pp. 64587-64605, 2021.
- [7] T.S. Kishore, S.K. Singal, “Optimal economic planning of power transmission lines: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 949-974, 2014.
- [8] Βοβός Νικόλαος Α., Γιαννακόπουλος Γαβριήλ Β., *Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Ζήτη, 2019, Θεσσαλονίκη.
- [9] Chowdhury Badrul H., “Load-Flow Analysis in Power Systems”, *Handbook of Electric Power Calculations*, pp. 11.1 – 11.16, McGraw-Hill, 2000.
- [10] S. Frank, et al. , “Optimal power flow: a bibliographic survey I. Formulations and deterministic methods”, *Energy Systems*, 2012.
- [11] J. Duncan Glover, Mulukuta S. Sarma, Thomas J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, Fifth Edition, 2012, 2008 Cengage Learning.
- [12] M Srivastava, et al. , “Simulation models for Different Power System Faults”, *ICADEE*, 2020.

- [13] A.R. Sobbouhi, A. Vahedi, “Transient stability prediction of power system; a review on methods, classification and considerations”, *Electric Power Systems Research*, 2021.
- [14] N. Hatziaargyriou, et al. , “Definition and Classification of Power System Stability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020.
- [15] P. Kundur, et al. , “IEEE /CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. Definition and Classification of Power System Stability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1387-1401, 2004.
- [16] Kundur Prabha, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Inc., 1994.
- [17] Saadat Hadi, *Power System Analysis*, McGraw-Hill Inc., New York, 1999.
- [18] Βοβός Νικόλαος Α., Γιαννκόπουλος Γαβριήλ Β., *Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2008.
- [19] F. Selwa, L. Djamel, “Transient Stability Analysis of Synchronous Generator in Electrical Network”, *IJSER*, pp.55-59, 2014.
- [20] Βοβός Νικόλαος Α., *Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2019.
- [21] G. Dileep, “A survey on smart grid technologies and applications”, *Renewable Energy*, pp. 2589-2625, 2020.
- [22] M. Ourahou, W. Ayrir, B. EL Hassouni et al., “Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: Challenges and prospects”, *Mathematics and Computers in Simulation*, pp.19-31 ,2020.
- [23] D. Baimel et al., “Smart Grid Communication Technologies – Overview, Research Challenges and Opportunities”, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2016.
- [24] E. Kabalci, Y. Kabalci, *Smart Grids and Their Communication Systems*, Springer, Singapore, 2018
- [25] G. R. Barai et al., “Smart Metering and Functionalities of Smart Meters in Smart Grid – A Review”, *IEEE Electrical Power and Energy Conference*, 2016.

