



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Προσδιορισμός της θέσης και της αντίστασης σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Φοιτητής: ΤΖΕΚΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΑΜ: 46118

Επιβλέπων Καθηγητής

ΜΑΝΟΥΣΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Determination of fault location and resistance in power transmission lines

Student: TZEKOS GEORGIOS
Registration Number: 46118

Supervisor

MANOUSAKIS NIKALAOS
Assistant Professor

ATHENS-EGALEO, OCTOBER 2021

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Μανουσάκης Νικόλαος, Επίκουρος Καθηγητής	Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος, Καθηγητής	Καλκάνης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ (Τζέκος Γεώργιος), Οκτώβριος, 2021

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τζέκος Γεώργιος του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 46118 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 14/10/2026 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών
Τζέκος Γεώργιος



(Υπογραφή φοιτητή)

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την εύρεση της θέσης σφάλματος καθώς και την αντίσταση του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, έχει δημιουργήσει την ανάγκη για εξυπνότερους και πιο αποτελεσματικούς τρόπους ανάλυσης και προσδιορισμού του σφάλματος σε γραμμές μετάδοσης ώστε οι μηχανικοί συντήρησης να διορθώνουν το πρόβλημα όσο το δυνατόν πιο άμεσα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και αναφορά στις βασικές έννοιες αυτών. Ακολουθεί αναφορά στην δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και ανάλυση των επιμέρους αυτών συστημάτων, όπως το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς, το σύστημα διανομής και το φορτίο. Στην συνέχεια περιγράφονται τα συστήματα προστασίας έναντι των βραχυκυκλωμάτων και στο τέλος παραθέτονται οι λόγοι που πρέπει να μεταβούμε από ένα συμβατικό ηλεκτρικό σύστημα σε ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση όλων των βραχυκυκλωμάτων που εμφανίζονται στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και την επίδραση που έχουν στην ποιότητα ισχύος και στο δίκτυο διανομής. Στην ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι αναγκαία η ύπαρξη μοντέλων γραμμών μεταφοράς ανάλογα με τον μετασχηματιστή, το μήκος της γραμμής και το φορτίο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αρχικά γίνεται ανάλυση για την έννοια του φασιθέτη καθώς και της μονάδας μέτρησης φασιθετών (PMU). Μετέπειτα αναλύεται η τυπική δομή μιας μονάδας PMU. Στο τέλος παρουσιάζονται οι εφαρμογές που έχουν τα PMU όπως η εκτίμηση παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς και θέσης σφάλματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, δεδομένου ότι με το πέρασμα των ετών τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας μεγαλώνουν ολοένα και περισσότερο, έχει προκύψει η ανάγκη για αποδοτικότερους και ταχύτερους αλγορίθμους εκτίμησης κατάστασης. Η ανάλυση παρατηρησιμότητας είναι απαραίτητη, προκειμένου να ελέγξουμε αν τα δεδομένα του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης είναι επαρκή, ούτως ώστε ο αλγόριθμος να μπορεί να επιλυθεί. Σε περίπτωση που ένα σύστημα δεν είναι παρατηρήσιμο, τότε πρέπει να αποκατασταθεί η παρατηρησιμότητα, για να δώσει λύση ο εκτιμητής κατάστασης και να λάβουμε τους παραστατικούς μιγαδικούς των τάσεων των ζυγών. Μετέπειτα, αναλύεται εκτενώς ο γενικευμένος ζυγός, με την αναγραφή όλων των θεωρητικών εξισώσεων και των μητρών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά η πιο διαδεδομένη μέθοδος βέλτιστης επίλυσης του προβλήματος με χρήση του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων, όπου το διάνυσμα κατάστασης το εκφράζουμε με πολικές συντεταγμένες, ενώ οι μετρήσεις ρεύματος γραμμών των PMUs εκφράζονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις του προτεινόμενου εκτιμητή κατάστασης με σκοπό την εύρεση της θέσης και της αντίστασης σφάλματος. Τέλος σε κάθε δοκιμή, στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας, υπολογίστηκαν τα σφάλματα εκτίμησης από τα οποία φαίνεται πόσο αποκλίνει το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης από το πραγματικό.

Λέξεις – κλειδιά

Άεργος ισχύς, Αιχμή φορτίου, Γραμμή μεταφοράς, Εκτίμηση Κατάστασης, Μονάδα μέτρησης φασιθετών, Παρατηρησιμότητα θέσης σφάλματος, Συγχρονισμένη μέτρηση φασιθετών, Συμμετρικές συνιστώσες, Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Abstract

The objective of this diploma thesis is to find the fault location as well as the fault resistance in power transmission lines. The complexity of the analysis of power systems has created the need for smarter and more efficient ways of analyzing and determining fault in transmission lines, so that maintenance engineers can fix the problem as quick as possible.

The first chapter introduces the electrical systems and refers to their basic concepts. The following is a reference to the structure of power systems and an analysis of these individual systems, such as the production system, the transmission system, the distribution system and the load flow. The following describes the short circuit protection systems and at the end explained the reasons why we should change a conventional electrical system to intelligent electrical networks.

The second chapter analyzes all the short circuits that occur in power transmission lines as well as the effect that they have on the quality of power and the distribution network. In the analysis of the electrical systems it is necessary to have transmission line models depending on the transformer, the line length and the load analysis.

In the third chapter, first one we analyzed the concept of the phasor as well as the phasor measurement units. Then, the typical structure of PMU is analyzed. Finally, we present the applications of PMUs, such as the estimation of transmission line parameters and error location.

In the fourth chapter, over the years, power networks are getting increasingly larger. Therefore, arises the need for faster and more efficient state estimation algorithms. Observability analysis is indispensable, in order to find out whether input data is adequate to solve state estimation's algorithm. In case where a power system is unobservable, observability has to be restored, otherwise the algorithm cannot be solved. After observability restoration, the state estimator can determine the bus voltage phasors. Then, the generalized electrical system is analyzed extensively, with the indication of all theoretical equations and matrices.

In the fifth chapter, we present in detail the most common method of optimal solution of the problem using weighted least squares estimation algorithm, where the condition vector is expressed in polar coordinates, while the line current measurements of PMUs are expressed in Cartesian coordinates. Then, simulations of the proposed estimator were performed in order to find the position and the resistance of the error. Finally in each test, at the end of the iterative procedure, the estimation errors were calculated from which it appears how much the estimated state vector deviates from the real one.

Keywords

Distributed state estimation, Electrical system, Fault location observability, Peak load, Phasor measurement unit, Reactive power, Symmetric components, Synchronized phasor measurements, Transmission line.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	10
Κατάλογος Εικόνων	10
Αλφαβητικό Ευρετήριο	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	13
1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	13
1.3 Θερμοηλεκτρικός σταθμός παραγωγής.....	14
1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	14
1.4.1 Γεννήτριες.....	15
1.4.2 Υποσταθμός.....	15
1.4.3 Μετασχηματιστής.....	17
1.5 Σύστημα μεταφοράς.....	19
1.6 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	21
1.7 Βασικά χαρακτηριστικά Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	22
1.7.1 Προστασία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	23
1.7.2 Φορτίο.....	26
1.7.3 Ποιότητα ισχύος.....	29
1.7.3.1 Βυθίσεις Τάσης.....	30
1.7.3.2 Διακοπές Ισχύος.....	32
1.7.3.3 Υπερτάσεις.....	33
1.7.3.4 Διακυμάνσεις Τάσης (voltage fluctuation).....	34
1.7.3.5 Αρμονικές.....	34
1.8 Ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα.....	35

Κεφάλαιο 2^ο Ανάλυση βραχυκυκλωμάτων

2.1 Μέθοδος Συμμετρικών Συνιστωσών.....	40
---	----

2.2 Κυκλωματική Ανάλυση σε κατασταση σφαλματος.....	43
2.2.1 Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα.....	45
2.2.2 Μονοφασικό βραχυκυκλωμα προς γη.....	47
2.2.3 Διφασικό βραχυκυκλωμα χωρίς γη.....	50
2.2.4 Διφασικό σφάλμα με γη.....	53
2.2.5 Σφάλμα αποκοπής αγωγού.....	57
2.3 Ταξινόμηση βραχυκυκλωμάτων ανάλογα με τη διάρκεια.....	57
2.4 Συνέπειες βραχυκυκλωμάτων.....	58
2.5 Τρόποι αντιμετώπισης βραχυκυκλωμάτων.....	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών

3.1 Ορισμός φασιθέτη.....	60
3.2 Συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη.....	61
3.3 Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών.....	62
3.4 Εφαρμογές Μονάδας Μέτρησης Φασιθετών.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Εκτίμηση Κατάστασης

4.1 Καταστάσεις λειτουργίας.....	65
4.2 Μοντέλο Μετρήσεων και Υποθέσεις.....	67
4.3 Αλγόριθμος Εκτίμησης Κατάστασης Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων.....	69
4.4 Μη γραμμική συνάρτηση μετρήσεων	70
4.5 Εξισώσεις συμβατικών μετρήσεων	70
4.6 Ιακωβιανή Μήτρα Μετρήσεων H	71
4.7 Μήτρα κέρδους G	73
4.8 Παραγοντοποίηση LU.....	73

4.9 Διευρυμένος εκτιμητής κατάστασης λαμβάνοντας υπόψη μετρήσεις μονάδων μέτρησης φασιθετών PMU.....	74
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο Προτεινόμενος αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης με ενσωμάτωση της θέσης και αντίστασης σφάλματος

5.1 Εισαγωγή.....	79
5.2 Κατάστροφη εξισώσεων σε περίπτωση σφάλματος σε μία γραμμή.....	79
5.3 Δοκιμές προσομοίωσης του εκτιμητή κατάστασης.....	88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη της εργασίας.....	94
6.2 Επεκτάσεις της εργασίας.....	95

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές ...Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.....
.....	96

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.1: Στοιχεία δοκιμών

Πίνακας 5.2: Εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης 1^{ης} δοκιμής

Πίνακας 5.3: Σφάλματα εκτίμησης μετά το πέρας της 1^{ης} δοκιμής

Πίνακας 5.4: Εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης 2^{ης} δοκιμής

Πίνακας 5.5: Σφάλματα εκτίμησης μετά το πέρας της 2^{ης} δοκιμής

Πίνακας 5.6: Εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης 3^{ης} δοκιμής

Πίνακας 5.7: Σφάλματα εκτίμησης μετά το πέρας της 3^{ης} δοκιμής

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Εικόνα 1.2: Γραμμικό διάγραμμα βασικών στοιχείων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή έως την κατανάλωση

Εικόνα 1.3: Διάγραμμα σύνδεσης υποσταθμού διανομής

Εικόνα 1.4: Μετασχηματιστές διανομής

Εικόνα 1.5: Τυπική γραμμή μεταφοράς ΥΤ διπλού κυκλώματος

Εικόνα 1.6: Υποσταθμός υψηλής/υπερυψηλής τάσης

Εικόνα 1.7: Υποσταθμός καταναλωτή μέσης τάσης

Εικόνα 1.8: Διαφορετικές ζώνες προστασίας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Εικόνα 1.9: Back-up προστασία

Εικόνα 1.10: Απεικόνιση λειτουργίας μέσω προστασίας

Εικόνα 1.11: Οι χρόνοι εκκαθάρισης σφαλμάτων στους τερματικούς σταθμούς

Εικόνα 1.12: Τυπικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Εικόνα 1.13: Προβλέψεις εξέλιξης της συνολικής καθαρής ζήτησης κατά την περίοδο 2020 - 2030

Εικόνα 1.14: Εικοσιτετράωρη καμπύλη φορτίου ενός καταναλωτή

Εικόνα 1.15: Τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου

Εικόνα 1.16: Ποιότητα ισχύος

Εικόνα 1.17: Μέτρηση βύθισης τάσης (α) Κυματομορφές τάσης, (β) Η ενεργός τιμή της τάσης για κάθε φάση

Εικόνα 1.18: Καμπύλη ITIC (υπό συνθήκες υπέρτασης η συσκευή κινδυνεύει από βλάβη, ενώ υπό συνθήκες μειωμένης τάσης η συσκευή ενδέχεται να σταματήσει να λειτουργεί)

Εικόνα 1.19: Κυματομορφές βύθισης τάσης

Εικόνα 1.20: Αρμονικές 1ης, 3ης, 5ης και 7ης τάξης.

Εικόνα 1.21: Συμβατικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Εικόνα 1.22: Ευφύες ηλεκτρικό δίκτυο

Εικόνα 1.23: Οι πόλεις του μέλλοντος

Εικόνα 2.1: Διανύσματα συμμετρικών συνιστωσών, (α) Ορθό σύστημα, (β) Αντίστροφο σύστημα, (γ) Ομοπολικό σύστημα

Εικόνα 2.2: Μονοφασικά ακολουθιακά δίκτυα

Εικόνα 2.3: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα

Εικόνα 2.4: Δίκτυα ακολουθίας συμμετρικού 3-φασικού σφάλματος

Εικόνα 2.5: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη

Εικόνα 2.6: Ακολουθιακά δίκτυα μονοφασικού βραχυκυκλώματος

Εικόνα 2.7: Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη

Εικόνα 2.8: Ακολουθιακά δίκτυα διφασικού σφάλματος χωρίς γη.

Εικόνα 2.9: Διφασικό σφάλμα με γη

Εικόνα 2.10: Δίκτυα ακολουθίας διφασικού σφάλματος με γη

Εικόνα 2.11: Σφάλμα αποκοπής αγωγού γης, (α) πολυγραμμικό διάγραμμα, (β) ισοδύναμο κύκλωμα

Εικόνα 3.1: Αναπαράσταση φασιθέτη τάσης

Εικόνα 3.2: Δομή αρχείων PMU

Εικόνα 3.3: Λειτουργικό διάγραμμα μονάδας PMU

Εικόνα 4.1: Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Εικόνα 4.2: Διάγραμμα λειτουργίας εκτίμησης κατάστασης

Εικόνα 4.3: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης

Εικόνα 4.4: Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ

Εικόνα 5.1: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς κατά τη διάρκεια σφάλματος

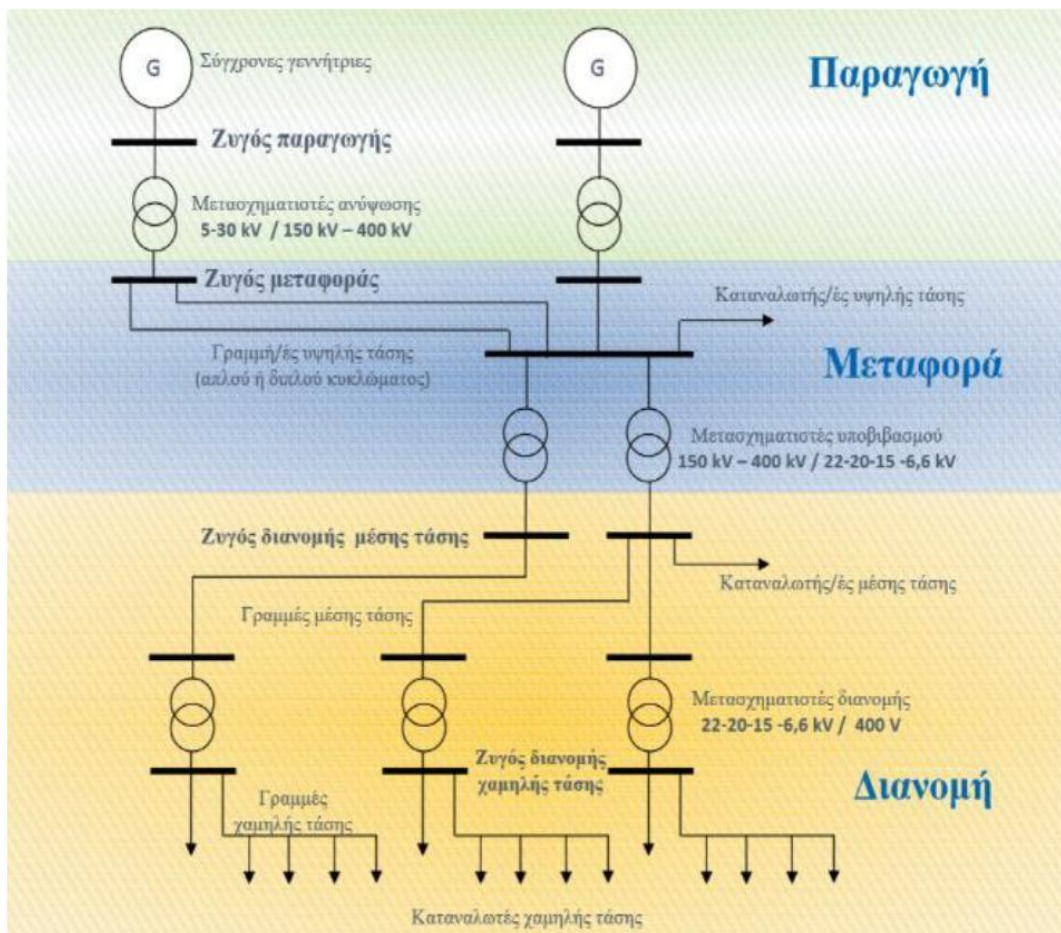
Εικόνα 5.2: Το πρότυπο δίκτυο IEEE-14 με βέλτιστα τοποθετημένα PMU

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα σύνολο εγκαταστάσεων και εξοπλισμού (γραμμές μεταφοράς, γεννήτριες, μετασχηματιστές, διατάξεις αντιστάθμισης, διακόπτες) που ο απώτερος σκοπός τους είναι όταν συνδυάζονται μεταξύ τους να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές. Τα συστήματα ΣΗΕ εμφανίζουν κάποια χαρακτηριστικά τα οποία είναι κοινά:

- 1) Τα συστήματα είναι τριφασικά και λειτουργούν σε σταθερή τάση. Στις εγκαταστάσεις μεταφοράς και παραγωγής τα φορτία και ο εξοπλισμός είναι τριφασικά.
- 2) Για απόδοτικότερη μεταφορά της ισχύος, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από διάφορα υποσυστήματα στα οποία η τάση λειτουργεί σε διαφορετικά επίπεδα.
- 3) Οι πόροι κάθε περιοχής εκμετάλλευονται για την παραγωγή της ενέργειας. Με την βοήθεια κατάλληλων και σύγχρονων μηχανών αφού προηγηθεί η μετατροπή της αρχικής ενέργειας σε μηχανική, παράγεται, τελικώς η ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 1.1: Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η διαδικασία κατά την οποία μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγωγή μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους όπως με την καύση των ορυκτών καυσίμων, στους θερμοηλεκτρικούς, ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς αξιοποιώντας την ροή και την πτώση των υδάτων, στους πυρηνικούς σταθμούς και τους σταθμούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια. Τα ΣΗΕ όπου λειτουργούν στην Ελλάδα είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος και συχνότητας 50 Hz.

1.3 Θερμοηλεκτρικός σταθμός παραγωγής

Για την εγκατάσταση αυτόνομων σταθμών ηλεκτρισμού χρησιμοποιούνται μηχανές diesel δηλαδή μηχανές εσωτερικής καύσης. Οι σταθμοί αυτοί εγκαθίστανται κυρίως στα νησιά διότι η ζήτηση είναι χαμηλή και δεν συνφέρει την εταιρία ηλεκτρισμού από οικονομικής πλευράς μια εγκατάσταση με μικρή ισχύ. Όσον αφορά τις μηχανές εσωτερικής καύσης μίγμα καυσίμου αναμειγνύεται μαζί με τον αέρα συμπιέζονται στον κύλινδρο και αναφλέγονται με την βοήθεια των εμβόλων. Με την ανάφλεξη του μείγματος τα έμβολα κινούνται στην αντίθετη κατεύθυνση σύμφωνα με τον νόμο της αδράνειας. Οπότε με την κίνηση αυτή καθώς και με τους μηχανισμούς στο εσωτερικό της μηχανής γίνεται περιστροφική και μεταδίδεται η ενέργεια στην γεννήτρια. Κυρίως στις μηχανές αυτές έχουμε παρουσία θερμότητας η οποία είναι μια μορφή ενέργειας που παρουσιάζεται στα ενδιάμεσα στάδια που αναφέραμε προηγουμένως, επομένως η ηλεκτροπαραγωγή μονάδα που έχει παρουσία θερμότητας λέγεται θερμοηλεκτρική ή ατμοηλεκτρική μονάδα. Επιπλέον επειδή το ρεύμα παραγωγής αφορά χαμηλή τάση δεν χρειάζονται αυτόματοι διακόπτες και μετασχηματιστές. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός των αυτοματισμών και των οργάνων ελέγχου είναι επιγραμματικά σε (βαρόμετρα, αμπερόμετρα, μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας και βολτόμετρα). Στην Ελλάδα χρησιμοποιούμε κυρίως ντιζελοηλεκτρικούς σταθμούς.

1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι πηγές οι οποίες προέρχονται από πράσινη ενέργεια ή από ήπιες μορφές ενέργειας δηλαδή από φυσική κατεργασία μη ρυπογόνες όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η βροχή, η παλίρροια, τα κύματα και η γεωθερμία ονομάζονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι μορφές αυτές υπάρχουν γεωγραφικά σε μεγάλες περιοχές. Η ραγδαία ανάπτυξη των πράσινων μορφών ενέργειας και συνάμα η ενεργειακή απόδοση έχει σημαντικά οφέλη έναντι της κλιματικής αλλαγής, των οικονομικών προβλημάτων και των οικολογικών καταστροφών που αντιμετωπίζει ο πλανήτης. Οι ανανεώσιμες πηγές αφορούν εναλλακτικές μορφές ενέργειας έναντι του πετρελαίου του φυσικού αερίου και του λιγνίτη. Οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί και ορισθεί ως η απάντηση στα ενεργειακά προβλήματα που μαστίζουν τον πλανήτη μας καθώς θεωρείται η λύση στο πρόβλημα επικείμενης εξάντλησης των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο φυσικό αέριο). Πρόσφατα από την Ευρωπαϊκή ένωση αλλά και από πολλά κράτη μέλη ανεξάρτητα μη ενταγμένα εφαρμόζονται εκτεταμένα νέες πολιτικές χρήσης ΑΠΕ για ευρεία χρήση των πηγών αυτών. Οι ΑΠΕ αποτελούν το μεγαλύτερο στοίχημα για την υιοθέτηση της πράσινης οικονομίας.

Επιγραμματικά οι μορφές ΑΠΕ είναι οι εξής:

- Το φως του ήλιου
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Από καύση απορριμάτων

- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια απο τις παλλίροιες
- Ενέργεια απο τους ανέμους(ανεμογεννήτριες)
- Τα κύματα της θάλασσας
- Θερμότητα απο την θάλασσα

1.4.1 Γεννήτριες

Οι τριφασικές γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος (EP), γνωστές ως σύγχρονες γεννήτριες ή αλλιώς εναλλάκτες, αποτελούν ένα από τα κυριότερα στοιχεία των ΣΗΕ με την ισχύ τους να κυμαίνεται από 50MW στα 1.500MW. Σε ένα σταθμό παραγωγής το κύριο κινητήριο σύστημα, δηλαδή η πηγή της μηχανικής ισχύς, μπορεί να προέρχεται από τη δυναμική ενέργεια των υδάτων μέσω υδροστροβίλων, από την καύση γαιάνθρακα, πετρελαίου, φυσικού αερίου και πυρηνικά καύσιμα μέσω ατμοστροβίλων, αεριοστροβίλων και ενίοτε μέσω κινητήρων εσωτερικής καύσης. Η πλειονότητα του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής, προέρχεται από τις θερμικές μονάδες, που αναβαθμίζονται μέσω νέων μονάδων συνδυασμένου κύκλου (περίπου 2032MW την τελευταία πενταετία τέθηκαν σε εμπορική λειτουργία) και με νέες προς κατασκευή μονάδες, αλλά και μέσω απόσυρσης παλαιών μονάδων. Οι υδροηλεκτρικές μονάδες χρησιμοποιούνται κυρίως για την κάλυψη φορτίου αιχμής λόγω της εξάρτησης παραγωγής τους από την διαθεσιμότητα των νερών, γεγονός που αποτυπώνεται και στην συμμετοχή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο ενώ και νέες εντάξεις υδροηλεκτρικών σταθμών αναμένονται.

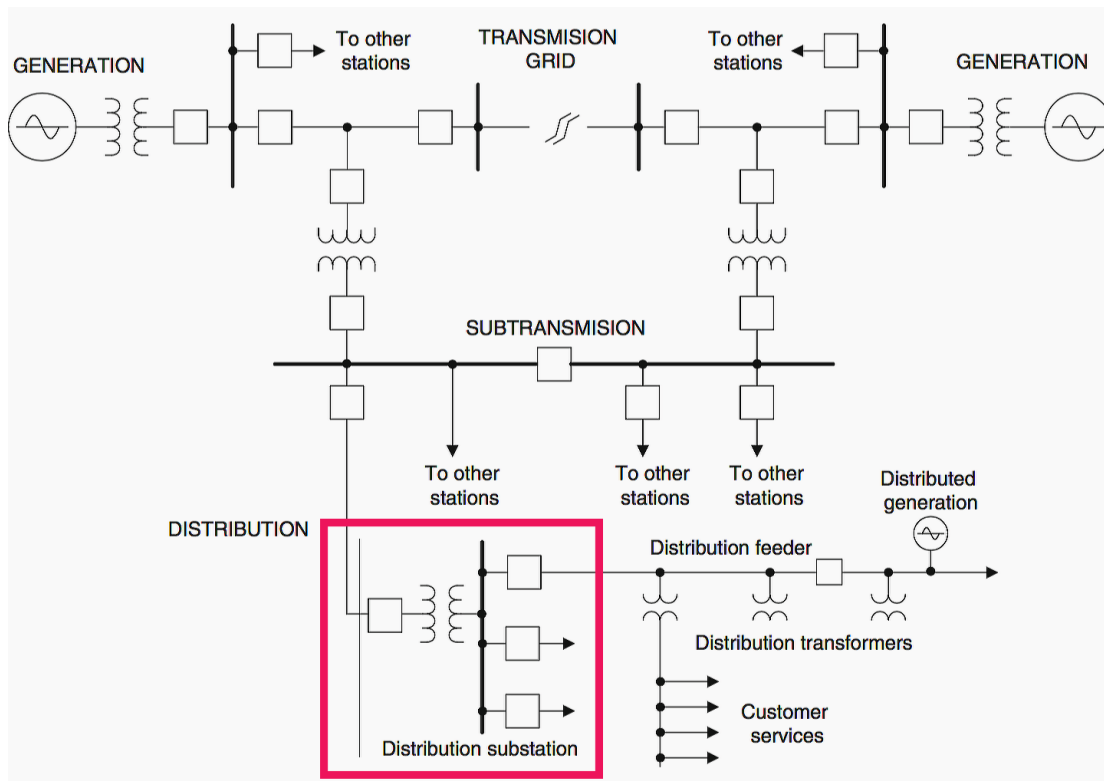
1.4.2 Υποσταθμός

Ο υποσταθμός διανομής συνήθως λειτουργεί σε 2,4 - 34,5 kV επίπεδα τάσης, και παραδίδει απευθείας την ηλεκτρική ενέργεια σε βιομηχανικούς και οικιακούς καταναλωτές. Η ενέργεια διανέμεται μέσω γραμμών από τους υποσταθμούς διανομής στους χώρους των τελικών καταναλωτών. Αυτές οι γραμμές εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό εγκαταστάσεων και συνήθως περιέχουν πολλούς κλάδους.

Στις εγκαταστάσεις των καταναλωτών, οι μετασχηματιστές διανομής υποβιβάζουν την τάση διανομής στο επίπεδο λειτουργίας της τάσης που χρησιμοποιείται απευθείας σε νοικοκυριά και βιομηχανικές εγκαταστάσεις και είναι συνήθως από 110 έως 600 V.

Ο υποσταθμός διανομής αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

- Γραμμές παροχής
- Μετασχηματιστές
- Βύσματα
- Διακόπτες
- Προηγούμενα τροφοδότες
- Συσκευές μεταγωγής
- Διακόπτες
- Ασφάλειες
- Διακόπτες
- Απαγωγείς υπερτάσεων
- Γείωση

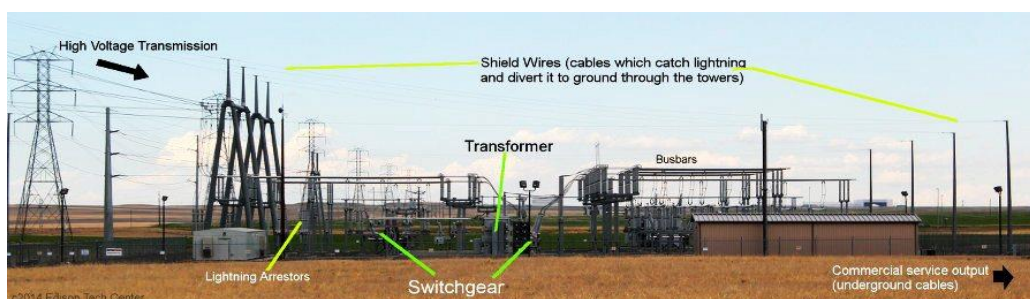


Εικόνα 1.2: Γραμμικό διάγραμμα βασικών στοιχείων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή έως την κατανάλωση

Ο υποσταθμός διανομής συνδέεται με ένα υποσύστημα τροφοδοσίας μέσω τουλάχιστον μιας γραμμής τροφοδοσίας, η οποία συχνά ονομάζεται πρωτεύων τροφοδότης. Ωστόσο, είναι χαρακτηριστικό ότι ένας υποσταθμός διανομής πρέπει να τροφοδοτείται από δύο ή περισσότερες γραμμές παροχής για την αύξηση της αξιοπιστίας της τροφοδοσίας σε περίπτωση αποσύνδεσης μιας γραμμής παροχής.

Μια γραμμή τροφοδοσίας μπορεί να είναι μια εναέρια γραμμή ή μία υπόγειο τροφοδότη, ανάλογα με τη θέση του υποσταθμού, με υπόγεια καλώδια κυρίως σε αστικές περιοχές και εναέρια γραμμές σε αγροτικές περιοχές και προάστια.

Οι γραμμές παροχής συνδέονται με τον υποσταθμό μέσω διακοπών υψηλής τάσης, προκειμένου να απομονωθούν γραμμές από υποσταθμούς για εργασίες συντήρησης ή επισκευής.



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα σύνδεσης υποσταθμού διανομής

1.4.3 Μετασχηματιστής (Μ/Σ)

Ο υποσταθμός διανομής συνήθως χρησιμοποιεί τριφασικούς μετασχηματιστές. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τράπεζες μονοφασικών μετασχηματιστών.

Για λόγους αξιοπιστίας και συντήρησης χρησιμοποιούνται συνήθως δύο μετασχηματιστές στον υποσταθμό, αλλά ο αριθμός μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τη σημασία των καταναλωτών που τροφοδοτούνται από τον υποσταθμό και του σχεδιασμού του συστήματος διανομής εν γένει.

Οι μετασχηματιστές μπορούν να ταξινομηθούν με τους ακόλουθους παράγοντες:

Ονομαστική ισχύς: Εκφράζεται σε kVA ή σε MVA και υποδεικνύει την ποσότητα ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί μέσω του μετασχηματιστή. Οι μετασχηματιστές υποσταθμού διανομής κυμαίνονται συνήθως από 3 kVA έως 25 MVA.

Μόνωση. Ανάλογα με την μόνωση των μετασχηματιστών, αυτοί χωρίζονται σε υγρού ή ξηρού τύπου μετασχηματιστές. Η υγρή μόνωση μπορεί να είναι ορυκτέλαιο, μη εύφλεκτα ή χαμηλής ανάφλεξης υγρά. Οι ξηρού τύπου μετασχηματιστές κατατάσσονται στους αεριζόμενους μεχτυευμένο πηνίο, στους κλειστούς μη αεριζόμενους και στους σφραγισμένου τύπου με πλήρωση αερίου. Επιπλέον, η μόνωση μπορεί να είναι ένας συνδυασμός μονάδας υγρού, ατμού και αερίου.

Ονομαστική Τάση. Καθορίζεται από τα επίπεδα τάσης του υποσταθμού στον οποία είναι εγκατεστημένος ο μετασχηματιστής. Οι τυπικές ονομαστικές τάσεις καθορίζονται από ισχύοντα πρότυπα. Η ονομαστική τάση του μετασχηματιστή δηλώνεται από τον κατασκευαστή. Για παράδειγμα, 115/ 34,5 kV σημαίνει ότι η τάση υψηλής τάσης του μετασχηματιστή έχει ονομαστική τιμή 115 kV, και η περιέλιξη χαμηλής τάσης έχει ονομαστική τιμή 34,5 kV μεταξύ διαφορετικών φάσεων. Καθορίζει τις απαιτήσεις κατασκευής και μόνωσης του μετασχηματιστή ώστε να αντέχει την ονομαστική τάση ή τις υψηλότερες τάσεις κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Ψύξη: Υπαγορεύεται από την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή και τη μέγιστη επιτρεπτή αύξηση της θερμοκρασίας στην αναμενόμενη αιχμή. Η διαστασιολόγηση του μετασχηματιστή περιλαμβάνει την αυτόματη διαστασιολόγηση στην καθορισμένη αύξηση της θερμοκρασίας ή την αναγκαστική ψύξη του μετασχηματιστή. Η χαρακτηριστική αύξηση της θερμοκρασίας τύλιξης του μετασχηματιστή είναι 55 °C/65 °C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 30 °C, για μετασχηματιστές με πλήρωση υγρού, ώστε να επιτρέπεται η πλήρης φόρτιση (ή υψηλότερη, εάν απαιτείται προσωρινά για τη λειτουργία του συστήματος). Οι σύγχρονοι μετασχηματιστές χαμηλής απώλειας επιτρέπουν ακόμα μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας. Ωστόσο, η λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες ενδέχεται να επηρεάσει τη μόνωση και να μειώσει τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Συνδέσεις τυλιγμάτων: Δείχνουν πώς οι τρεις φάσεις των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή συνδέονται μεταξύ τους σε κάθε πλευρά. Υπάρχουν δύο βασικές συνδέσεις των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών:

- Τρίγωνο, όπου το τέλος του κάθε τυλίγματος της φάσης συνδέεται με την αρχή του τυλίγματος της επόμενης φάσης και
- Αστέρας, όπου το ένα άκρο κάθε τυλίγματος φάσης συνδέεται σε ένα ουδέτερο σημείο.

Συνήθως οι μετασχηματιστές διανομής συνδέονται σε τρίγωνο στην πλευρά της υψηλής τάσης και σε αστέρα στην πλευρά χαμηλής τάσης. Η σύνδεση τριγώνου απομονώνει τα δύο συστήματα εφόσον αφορά ορισμένες αρμονικές (ιδιαίτερα την τρίτη αρμονική), οι οποίες δεν είναι επιθυμητές στο σύστημα. Μια σύνδεση αστέρα δημιουργεί ένα βολικό ουδέτερο σημείο για σύνδεση με το έδαφος.

Ρύθμιση τάσης: Επιτρέπει στον μετασχηματιστή να αλλάζει την τάση στην πλευρά της χαμηλής προκειμένου να διατηρηθεί η ονομαστική τάση. Η τάση μπορεί να κυμανθεί είτε λόγω μιας πρωταρχικής διακύμανσης τάσης του συστήματος είτε λόγω υπερβολικής πτώσης τάσης εξαιτίας ενός υψηλού ρεύματος φορτίου. Για να επιτευχθεί αυτό, οι μετασχηματιστές είναι εξοπλισμένοι με ενδιάμεσες λήψεις. Οι μεταγωγές μπορεί να γίνουν είτε εν κενώ, απαιτώντας αποσύνδεση του φορτίου για αλλαγή της ενδιάμεσης λήψης, είτε υπό φορτίο επιτρέποντας την αλλαγή της ενδιάμεσης λήψης υπό συνθήκες κανονικού φορτίου. Οι ενδιάμεσες λήψεις του μετασχηματιστή αλλάζουν αποτελεσματικά τον λόγο μετασχηματισμού και επιτρέπουν ρύθμιση τάσης της τάξης του 10-15% σε βήματα 1,75-2,5% ανά λήψη. Η αλλαγή της λήψης του μετασχηματιστή μπορεί να γίνει χειροκίνητα ή αυτόματα. Συνήθως, μόνο υποβρύχιοι διακόπτες, υπό φορτίο, μπορεί να λειτουργήσουν αυτόματα.



Εικόνα 1.4: Μετασχηματιστές διανομής

1.5 Σύστημα μεταφοράς

Το Ελληνικό σύστημα μεταφοράς αποτελείται από τις 3 γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV, οι οποίες μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια από τον σπουδαιότερο εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται στην Πτολεμαΐδα. Στην περιοχή αυτή της Δυτικής Μακεδονίας παράγεται περίπου το 70% του ηλεκτρισμού της χώρας που στην συνέχεια μεταφέρεται στην υπόλοιπη Ελλάδα όπου καταναλώνεται το 65% του ηλεκτρισμού. Επιπλέον το σύστημα μεταφοράς αυτό διαθέτει και επιπλέον γραμμές από 400kV, οι οποίες είναι εναέριες, υπόγειες καθώς και υποβρύχια καλώδια από 150kV τα οποία συνδέουν τα Ιόνια νησιά της Ελλάδας όπως Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλλονιά, Ζάκυνθο και την Άνδρο με διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς καθώς επίσης και η σύνδεση με υποβρύχιο καλώδιο στα 66kV.

Το 2013 το σύστημα μεταφοράς αποτελούνταν από γραμμές απόστασης 11.232 χιλιομέτρων καθώς επίσης και από 331 υποσταθμούς και κέντρα υπερυψηλής τάσης όπου είναι εγκατεστημένοι 732 M/Σ και αυτομετασχημαστές συνολικής ισχύς εγκατεστημένη 55.391 MVA.

Ο βασικός στόχος του συστήματος μεταφοράς είναι η σύνδεση των σταθμών παραγωγής και η μεταφορά του ηλεκτρισμού από τα σημεία παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης, προκειμένου να μην έχουμε απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας και το σύστημα να λειτουργεί βέλτιστα. Η τάση ανυψώνεται στα (400kV, 150kV) και στην υποβιβάζεται στους υποσταθμούς διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακή και βιομηχανική χρήση

Τα κυριότερα στοιχεία του συστήματος μεταφοράς είναι:

- 1) Εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας 400kV, 150kV, 66kV
- 2) Υπόγειες γραμμές και υποβρύχια καλώδια 150kV, 400kV
- 3) Υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας 150/20kV
- 4) Κέντρα υπερυψηλής τάσης (KYT) των 400/150kV

Το ελληνικό μας σύστημα μεταφοράς λειτουργεί με σύγχρονο τρόπο και παράλληλα με το Ευρωπαϊκό σύστημα μεταφοράς. Η αμοιβαία λειτουργία του Ελληνικού συστήματος και του Ευρωπαϊκού γίνεται μέσω γραμμών μεταφοράς των 400kV, με τα συστήματα μεταφοράς των κρατών όπως: Αλβανία, Βουλγαρία, Βόρεια Μακεδονία, Τουρκία. Ακόμη το Ελληνικό σύστημα συνδέεται με ασύγχρονο τρόπο με την Ιταλία μέσω υποβρυχίου καλωδίου DC 400kV.

Πιο αναλυτικά:

A) Ελλάδα / Αλβανία

- μία γραμμή 400kV, 1400 MVA, μεταξύ του KYT Καρδιάς και Zemblak μίας γραμμής 150 kV, 138 MVA, μεταξύ του Υ/Σ Μούρτου και του ΥΗΣ Bistrica

B) Ελλάδα / Βόρεια Μακεδονία

- μία γραμμή 400 kV, 1400 MVA, μεταξύ του KYT Θεσσαλονίκης και Υ/Σ Dubrovo
- μία γραμμή 400 kV, 1400 MVA, μεταξύ KYT Μελίτης και Υ/Σ bitola

Γ) Ελλάδα - Βουλγαρία

Η σύνδεση Ελλάδας-Βουλγαρίας γίνεται μέσω μίας γραμμής μεταφοράς 400 kV, 1400 MVA, μεταξύ του ΚΥΤ Θεσσαλονίκης και του Υ/Σ Blagoevgrad.

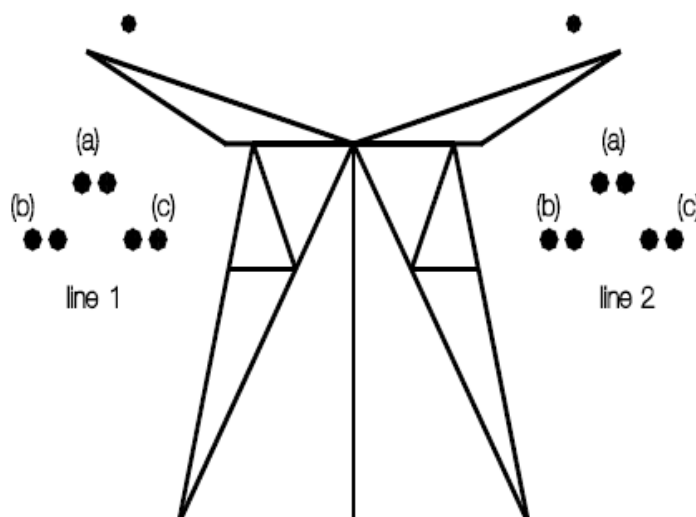
Δ) Ελλάδα - Ιταλία

Συνδέεται μέσω του ΚΥΤ Αράχθου με τον Υ/Σ Galatina με (DC) 400kV, 500 MW.

Ε) Ελλάδα - Τουρκία

Συνδέεται μέσω μίας γραμμής μεταφοράς 400 kV, 2000 MVA, μεταξύ του ΚΥΤ Νέας Σάντας και του Υ/Σ Babaeski.

Στο Ελληνικό σύστημα μεταφοράς συνδέονται μέσω υποβρυχίων και υπογείων καλωδίων 150kV, τα Ιόνια νησιά, οι Κυκλάδες και η Εύβοια. Το επίπεδο αξιοπιστίας και ποιότητας έχει ανέβει με τον εκσυγχρονισμό του υπάρχοντος ηλεκτρικού συστήματος καθώς αναπτύσσονται συνδέσεις νησιών με το Ηπειρωτικό σύστημα (Κυκλάδες, Βόρειο Αιγαίο, Σποράδες). Υπό εργασία βρίσκεται και η διασύνδεση της Κρήτης. Αρχικά η διασύνδεση της Αττικής-Κρήτης είναι υποβρύχια AC (εναλλασσόμενου ρεύματος διπλού κυκλώματος 150kV και 2x200MVA. Η δεύτερη διασύνδεση Αττικής-Κρήτης είναι DC (συνεχούς ρεύματος 500kV, 2x500 MW)



Εικόνα 1.5: Τυπική γραμμή μεταφοράς ΥΤ διπλού κυκλώματος



Εικόνα 1.6: Υποσταθμός υψηλής/υπερυψηλής τάσης

1.6 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το σύνολο των εγκαταστάσεων ηλεκτρισμού και όλων των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου ονομάζεται σύστημα διανομής και αποτελεί το σύστημα που πραγματοποιεί την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία και τους οικιακούς καταναλωτές. Στους υποσταθμούς όταν φτάνει η ηλεκτρική ενέργεια γίνεται αμέσως υποβιβασμός της τάσης με την βοήθεια των μετασχηματιστών ώστε να είναι κατάλληλη προς χρήση για τις οικιακές συσκευές.

Συγκεκριμένα η δομή του αποτελείται απο:

A) το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (15kV, 20kV)απο τους υποσταθμούς μεταφοράς μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια στους υποσταθμούς διανομής

B) το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (230/400V)απο τους υποσταθμούς διανομής μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές

Γ)τους υποσταθμούς διανομής, που μέσω του συνόλου του εξοπλισμού τους υποβιβάζουν την μέση τάση (15-20kV) σε χαμηλή τάση (230/400V). Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η χαμηλή τάση είναι η τάση που είναι (<1000V) ενώ η μέση τάση είναι η τάση που κυμαίνεται (1000V-30.000V)

Τα βασικά μεγέθη της Διανομής συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1)1.7500000 καταναλωτές (σημεία μέτρησης κατανάλωσης) 9400 στη μέση τάση (MT) και οι υπόλοιποι στη χαμηλά τάση (XT)

2)Διανομή 49000 GWh ετησίως (13000 στη MT & 36000 στη XT). Δεν περιλαμβάνονται οι καταναλώσεις των πελατών Υψηλής Τάσης και οι απώλειες των δικτύων

3)102000 km δίκτυο Μέσης Τάσης

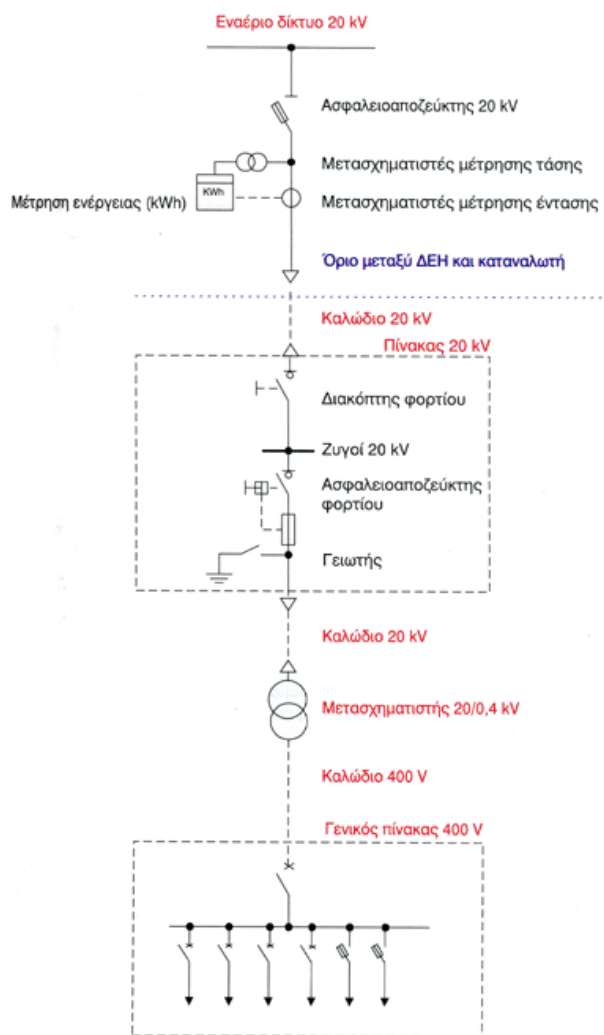
4)15000 km δίκτυο Χαμηλής Τάσης

5)Συνολικά 217000 km δικτύου, δηλαδή 5 φορές η περίμετρος της γης

6)Ετήσια αύξηση του μήκους δικτύου 1,7%, ήτοι 3600 χλμ. δικτύου.

7)146000 υποσταθμοί MT/XT με ετήσια αύξηση 1,9%, ήτοι 2800 τεμ. νέωνΥ/Σ

8) 196 km δίκτυο ΥΤ και 14 Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ στην Αττική.



Εικόνα 1.7:Υποσταθμός καταναλωτή μέσης τάσης

1.7 Βασικά χαρακτηριστικά Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα κύρια χαρακτηριστικά αναφοράς ενός ηλεκτρικού δικτύου, βάση των οποίων γίνεται ο σχεδιασμός αυτού είναι τα κάτωθι :

- **Τάση δικτύου (Vn):** Είναι η τάση λειτουργίας του δικτύου. Το μέγεθος της καθορίζεται από τον τύπο του δικτύου δηλαδή για τα δίκτυα της υπερυψηλής τάσης είναι τα 400kV, για το δίκτυο υψηλής τάσης είναι τα 150kV και τέλος για της μέσης τάσης στα 15kV ή 20kV. Αυτά τα μεγέθη επικρατούν στην Ελλάδα.

Η φασική τάση είναι 230V για δίκτυο χαμηλής τάσης(φάση με ουδέτερο) και η πολική τάση είναι 400V μεταξύ δύο φάσεων. Για τους υπόλοιπους τύπους δικτύων που δεν υπάρχει ουδέτερος αφορά πολικές τάσεις. Η μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση τάσης από το μετασχηματιστή ΜΤ μέχρι το ρολόι της ΔΕΗ μπορεί να φτάσει μέχρι και 10% της ονομαστικής τάσης, ενώ η πτώση τάσης από το ρολόι της ΔΕΗ μέχρι το σημείο σύνδεσης οποιασδήποτε ηλεκτρικού φορτίου δεν πρέπει να ξεπεράσει το 4% της ονομαστικής τάσης της εγκατάστασης.

- **Συχνότητα δικτύου (f):** Το δίκτυο στην Ελλάδα έχει συχνότητα στα 50Hz και δεν μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου ακόμα και στις ώρες υψηλού φορτίου. Τα όρια

διακύμανσης είναι $\pm 0.05\%$, αλλιώς αν ξεφύγει παραπάνω, το δίκτυο μπορεί να καταρεύσει.

• **Ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου (S_n):** Εκφράζει την ισχύ η οποία στην ουσία είναι η μέγιστη ισχύς η οποία παρουσιάζεται στο δίκτυο στην περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος. Χρησιμοποιείται για την μελέτη βραχυκύκλωσης ενός ηλεκτρικού δικτύου και την διαστασιολόγηση της αντοχής του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και δίνεται από την σχέση:

$$S_n = \sqrt{3}U_n I_k, \quad (1.1)$$

όπου I_k είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης.

Η Τοπική διεύθυνση της ΔΕΗ ορίζει, ανάλογα με την περιοχή, το μέγεθος για την μελέτη της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης. Για όλη την επικράτεια η ΔΕΗ δίνει για λόγους απλοποίησης 250MVA

• **Στάθμη μόνωσης:** Εκφράζει την διηλεκτρική αντοχή του εξοπλισμού του υποσταθμού και τις περισσότερες φορές αναφέρεται ως κρουστική αντοχή(ισχύουν οι προδιαγραφές IEC, που εξασφαλίζονται μέσω κατάλληλων δοκιμών τύπου και σειράς).

1.7.1 Προστασία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Με τις μελέτες βραχυκυκλωμάτων προσδιορίζουμε τα ρεύματα που ρέουν στις γραμμές ενός ενεργειακού δικτύου και τις τάσεις που επικρατούν στους ζυγούς του κατά τη διάρκεια διαφορετικών τύπων βραχυκυκλωμάτων που συμβαίνουν σε διαφορετικές θέσεις ΣΗΕ. Το ρεύμα που ρέει σε ένα ΣΗΕ αμέσως μετά από ένα βραχυκύκλωμα είναι πολύ μεγαλύτερο από το ρεύμα μερικούς κύκλους αργότερα (λίγο πριν λειτουργήσουν οι διακόπτες ισχύος) και αυτά τα ρεύματα είναι πολλαπλάσια των κανονικών ρευμάτων φορτίου που ρέουν πριν συμβεί το βραχυκύκλωμα. Γι αυτό τα ρεύματα βραχυκυκλώματος προκαλούν μεγάλες δυναμικές και θερμικές καταπονήσεις και πρέπει να διακόπτονται το ταχύτερο δυνατόν. Σκοπός του συστήματος προστασίας του ΣΗΕ είναι να εντοπίσει το ταχύτερο δυνατόν την έναρξη κάποιου βραχυκυκλώματος και να απομονώσει με το άνοιγμα εκείνων των διακοπών ισχύος που θέτουν εκτός λειτουργίας το μικρότερο τμήμα του ΣΗΕ. Όταν η διακοπή της μόνωσης γίνεται μέσω ιονισμένου δρόμου(οπότε λέμε ότι έχουμε παροδικό βραχυκύκλωμα) με το άνοιγμα των κατάλληλων διακοπών διακόπτεται το ρεύμα στον ιονισμένο δρόμο και αρχίζει ο απιονισμός του. Μετά από ένα χρονικό διάστημα 300ms οι διακόπτες ισχύος συνήθως ξανακλείνουν και αποκαθιστούν την κανονική λειτουργία ΣΗΕ. Σύμφωνα με την θεωρητική μελέτη του τρόπου υπολογισμού των τάσεων όταν συμβαίνει βραχυκύκλωμα, μπορούμε με τα κατάλληλα υπολογιστικά προγράμματα να υπολογίσουμε με ακρίβεια τα μεγέθη αυτά. Οι μελέτες βραχυκυκλωμάτων είναι χρήσιμες:

- Για τη σχεδίαση του κατάλληλου συστήματος προστασίας του ΣΗΕ.
- Για τον καθορισμό των ρυθμίσεων του συστήματος προστασίας.
- Για την σωστή επιλογή των διακοπών προστασίας.

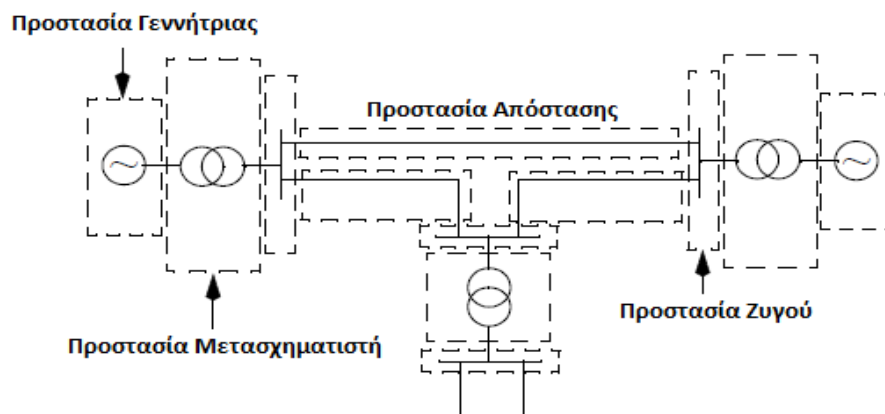
Επειδή μέχρι σήμερα δεν έχουμε βρει οικονομικούς τρόπους αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ΣΗΕ για να βρίσκεται σε ευσταθή κατάσταση λειτουργίας πρέπει να εξασφαλίζει κάθε χρονική στιγμή ισότητα μεταξύ της μηχανικής ισχύος εισόδου(που παρέχεται από τους στρόβιλους του) και του τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού φορτίου. Οποιαδήποτε διαταραχή προκαλεί

ανισορροπία μεταξύ των δύο αυτών ισχύων δημιουργεί μηχανικές ταλαντώσεις στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών και πιθανό αποσυγχρονισμό τους (αστάθεια).

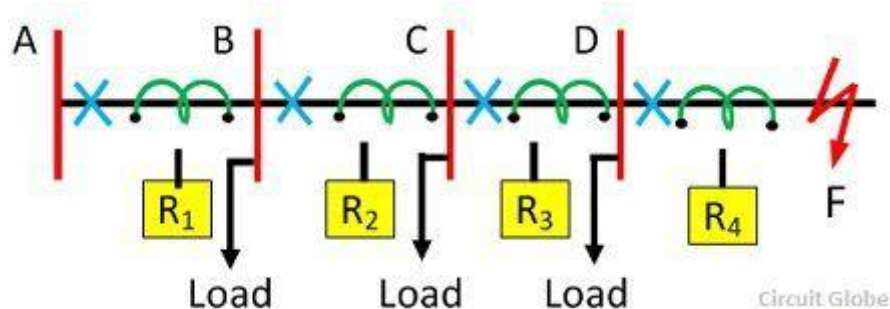
Τα κύρια μέρη που δομούν ένα σύστημα προστασίας είναι:

- οι συσκευές μετρήσεων με μετασχηματιστές ρεύματος ή/και τάσεως και άλλους αισθητήρες που επιμετρούν τις ανάλογες ποσότητες,
- τα ρελέ ή ηλεκτρονόμοι οι οποίοι αποστέλλουν σήματα ενεργοποίησης στους διακόπτες ισχύος ή σε άλλου τύπου διακοπτικό υλικό, κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες,
- οι διακόπτες ισχύος που εκτελούν την δοθείσα από τον ηλεκτρονόμο οδηγία και
- το σύστημα τροφοδοσίας ισχύος που εξασφαλίζουν την ασφαλή παροχή ισχύος στο σύστημα προστασίας, ακόμα και κατά την ύπαρξη σφάλματος στο σύστημα.

Οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται από ένα σύστημα προστασίας είναι η ανεξαρτησία, η αξιοπιστία, η επιλεκτικότητα, η ευαισθησία και η ταχύτητα απόκρισής αυτού, ενώ θα πρέπει να υπάρχει εφεδρική προστασία (προστασία 2ης βαθμίδας – εφεδρική προστασία) ώστε να εκκαθαρίζει κάθε σφάλμα σε περίπτωση βλάβης του προστατευτικού εξοπλισμού στο κυρίως σύστημα προστασίας (προστασία 1ης βαθμίδας). Οι προστασίες συνήθως κατηγοριοποιούνται βάση του εξοπλισμού που προστατεύουν, δημιουργώντας τις αντίστοιχες ζώνες προστασίας, παράδειγμα των οποίων απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Κάθε ζώνη αποτελείται τόσο από τις συσκευές ανίχνευσης σφάλματος όσο και από τους προστατευτικούς διακόπτες.



Εικόνα 1.8: Διαφορετικές ζώνες προστασίας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας



Εικόνα 1.9: Εφεδρική προστασία

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους των συστημάτων προστασίας, εκτός των συνεχώς μετρούμενων μεγεθών όπως τάση και ρεύμα, είναι ο χρόνος εκκαθαρίσεως (clearing time)TC, και αφορά τον χρόνο που απαιτείται για να εκτελεστεί μια απαραίτητη διορθωτική ενέργεια. Όταν παρουσιαστεί η διαταραχή, το μετρούμενο μέγεθος θα διαφοροποιηθεί σε σχέση με μια προκαθορισμένη τιμή (βάση της μελέτης προστασίας). Αν η διαφοροποίηση αυτή υποδείξει ανεπιθύμητη κατάσταση, τότε θα δοθεί εντολή ενεργοποίησης στο στοιχείο απόφασης, και αν ο χρόνος διάρκειας της διαταραχής συνεχίσει, θα ενεργοποιηθεί τελικά το στοιχείο δράσης. Το στοιχείο δράσης με τη σειρά του θα ενεργοποιήσει το διακόπτη ισχύος απομονώνοντας κατά αυτό τον τρόπο το σφάλμα.

Βάσει και των ως άνω ο χρόνος εκκαθαρίσεως ορίζεται από την σχέση:

$$T_c = T_p + T_d + T_a \quad (1.2)$$

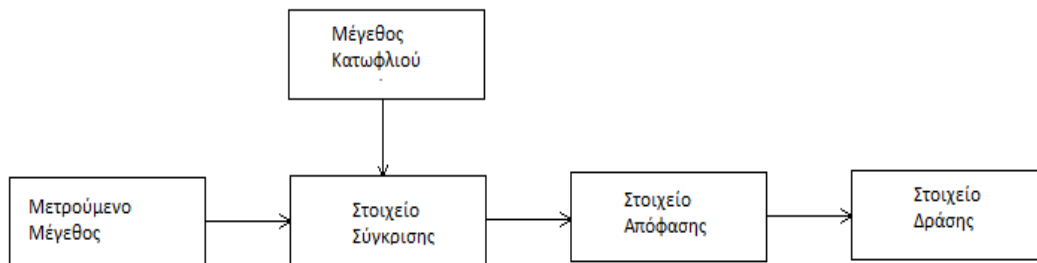
όπου

T_p : Εκφράζει τον χρόνο που συγκρίνουμε

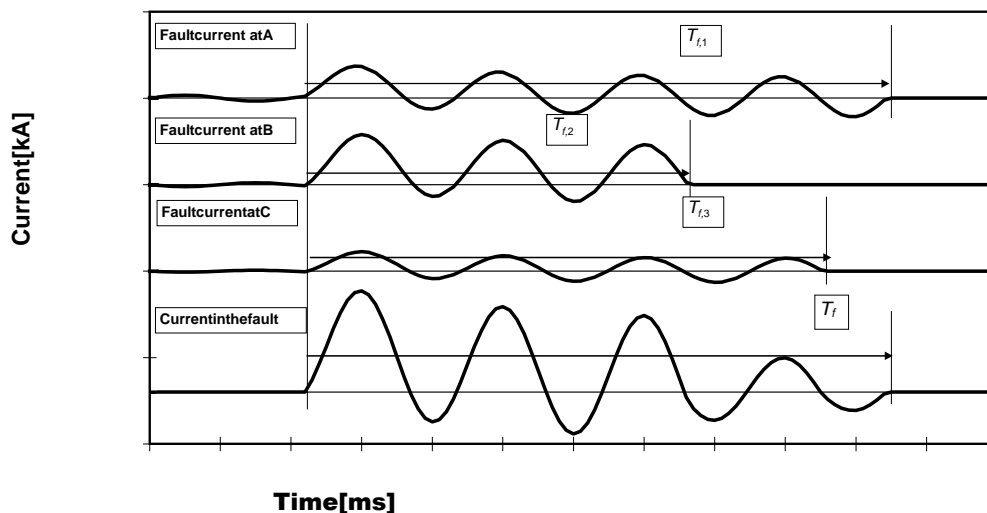
T_d : Εκφράζει τον χρόνο της απόφασης

T_a : Εκφράζει τον χρόνο δράσης και συνάμα το χρόνο που λειτουργεί ο διακόπτης

Η σημαντικότητα αυτής της παραμέτρου βρίσκεται στο γεγονός ότι παρέχετε κατάλληλη επιλογικότητα (*selectivity*) στην ενεργοποίηση του διακοπτικού υλικού, καθώς ενώ πολλά μέσα προστασίας μπορεί να εντοπίζουν το σφάλμα τα πλησιέστερα σε αυτό ενεργοποιούνται πρώτα απομονώνοντας το σφάλμα. Τέλος, η ευστάθεια του συστήματος εξασφαλίζεται μέσω της κατάλληλης ρύθμισης του χρόνου αυτού, αφού η ύπαρξη βραχυκυκλώματος απαιτεί ταχεία εκκαθάριση.



Εικόνα 1.10: Απεικόνιση λειτουργίας μέσω προστασίας



Εικόνα 1.11: Οι χρόνοι εκκαθάρισης σφαλμάτων στους τερματικούς σταθμούς

1.7.2 ΦΟΡΤΙΟ

Στο Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΔΗΕ) το φορτίο ενός καταναλωτή ή μίας ομάδας καταναλωτών μεταβάλλεται συνεχώς. Κάθε φορά που ένας λαμπτήρας ή μία ηλεκτρική συσκευή ανάβει ή σβήνει, το φορτίο της αντίστοιχης γραμμής διανομής αλλάζει. Τα φορτία των ΔΔΗΕ μεταβάλλονται, επειδή οι ανθρώπινες δραστηριότητες ακολουθούν ημερήσιες, εβδομαδιαίες και μηνιαίες κυκλικές μεταβολές. Η ζήτηση του φορτίου είναι γενικά υψηλότερη κατά τη διάρκεια της ημέρας και νωρίς το απόγευμα, όταν τα βιομηχανικά και εμπορικά φορτία είναι υψηλά, και χαμηλότερη από αργά το βράδυ έως νωρίς το πρωί, όταν οι περισσότεροι άνθρωποι κοιμούνται.

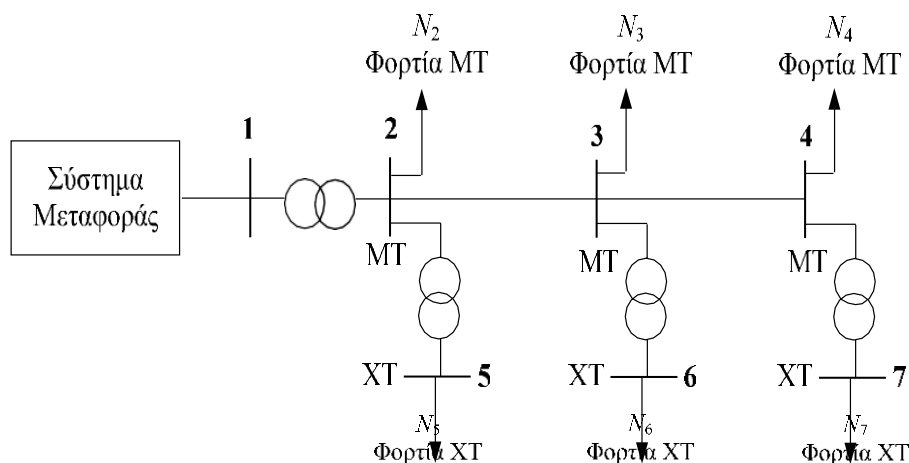
Τα φορτία ταξινομούνται σε κατηγορίες με όμοια χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες είναι τα οικιακά, τα εμπορικά και τα βιομηχανικά φορτία. Στα οικιακά φορτία, η αιχμή φορτίου είναι συνήθως νωρίς το βράδυ, ενώ στα εμπορικά φορτία είναι τις μεσημεριανές ώρες. Στη βιομηχανική κατηγορία, το φορτίο είναι χαμηλό νωρίς το πρωί, στη συνέχεια αυξάνεται και διατηρείται περίπου σταθερό μέχρι το απόγευμα, οπότε και μειώνεται σημαντικά, καθώς μειώνεται ή σταματά η βιομηχανική δραστηριότητα.

Η Εικόνα 1.12 δείχνει ένα τυπικό ΔΔΗΕ, το οποίο αποτελείται από 7 κόμβους (αριθμούνται από 1 έως 7). Το ΔΔΗΕ τροφοδοτεί φορτία Μέσης Τάσης στους κόμβους 2, 3 και 4, καθώς και φορτία Χαμηλής Τάσης στους κόμβους 5, 6 και 7. Ο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ (υποσταθμός υψηλής τάσης / μέσης τάσης) μεταξύ των κόμβων 1 και 2, συνδέει το ΔΔΗΕ (κόμβοι 1 έως 7) με το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το ΔΔΗΕ έχει τρεις Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ (υποσταθμούς μέσης τάσης / χαμηλής τάσης), που βρίσκονται στους κλάδους 2-5, 3-6 και 4-7, αντίστοιχα. Κάθε Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ διαθέτει μετασχηματιστή (Μ/Σ) διανομής ΜΤ/ΧΤ. Το ΔΔΗΕ διαθέτει τη γραμμή τροφοδοσίας (γραμμή διανομής μέσης τάσης) 2-3-4, μέσω της οποίας συνδέονται οι κόμβοι ΜΤ 2, 3 και 4 με τον Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ. Στα ΔΔΗΕ έχει ενδιαφέρον η μελέτη των φορτίων στα ακόλουθα επίπεδα:

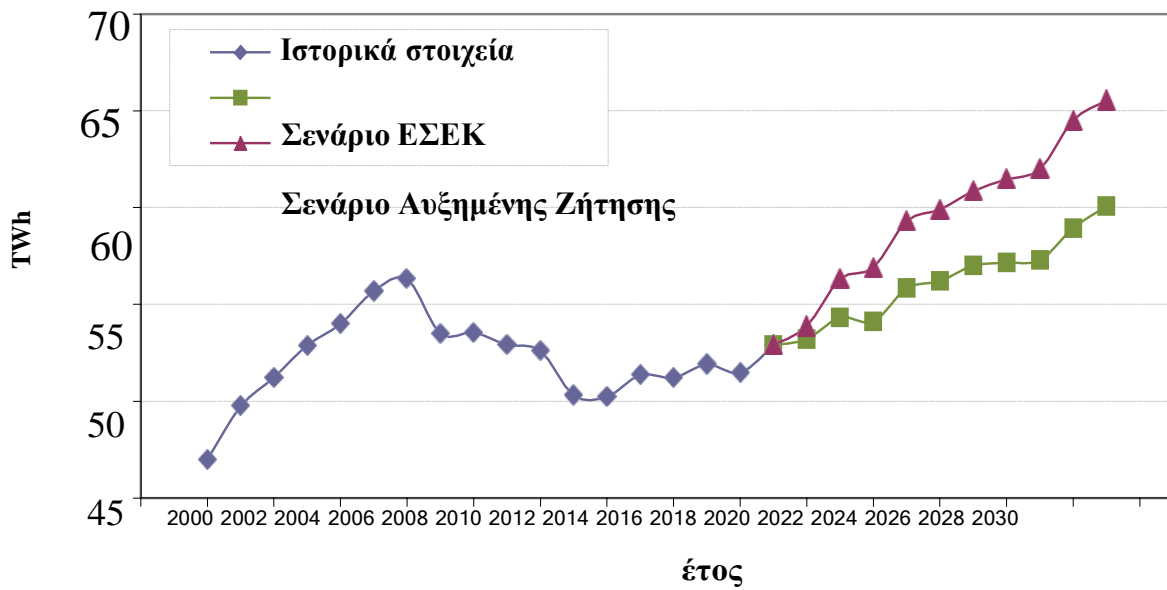
1. Στο επίπεδο του καταναλωτή (ΜΤ και ΧΤ), δηλαδή στο σημείο σύνδεσης του καταναλωτή με το ΔΔΗΕ, όπου και τοποθετείται ο μετρητής της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

2. Στο επίπεδο του Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ, όπου έχει ενδιαφέρον η μελέτη του φορτίου ανά αναχώρηση ΧΤ (γραμμή διανομής ΧΤ) και συνολικά για όλες τις αναχωρήσεις ΧΤ.

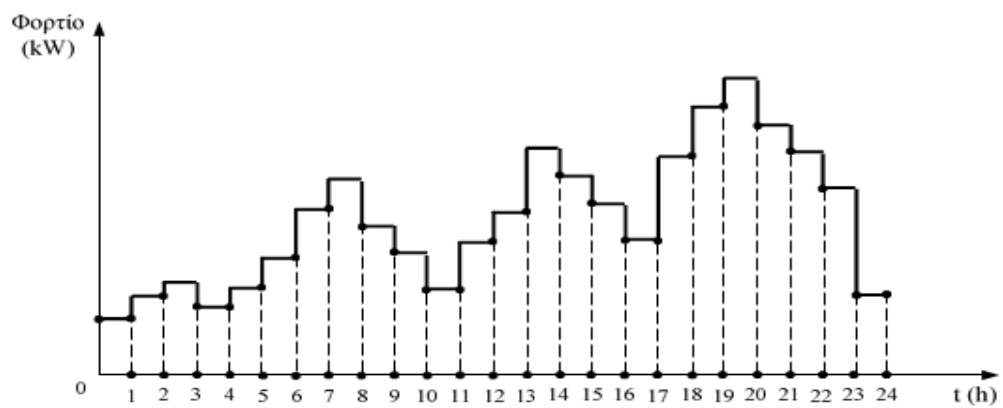
3. Στο επίπεδο του Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ, όπου έχει ενδιαφέρον η μελέτη του φορτίου ανά αναχώρηση ΜΤ (γραμμή διανομής ΜΤ) και συνολικά για όλες τις αναχωρήσεις ΜΤ



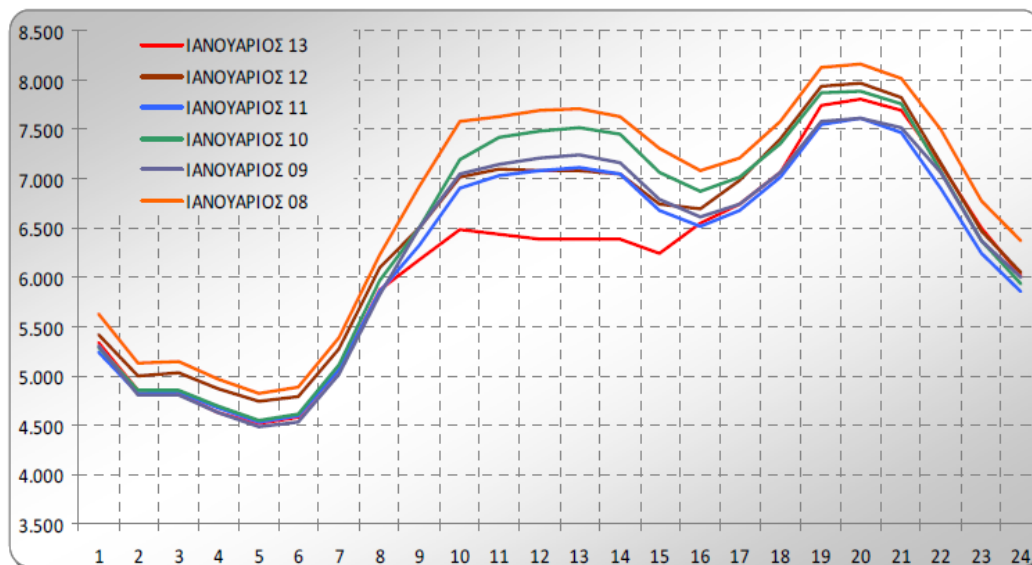
Εικόνα 1.12: Τυπικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας



Εικόνα 1.13: Προβλέψεις εξέλιξης της συνολικής καθαρής ζήτησης κατά την περίοδο 2020 - 2030



Εικόνα 1.14: Εικοσιτετράωρη καμπύλη φορτίου ενός καταναλωτή



Εικόνα 1.15:Τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου

Για να κατασκευαστεί η καμπύλη φορτίου, θα πρέπει η καμπύλη του στιγμιαίου φορτίου να χωριστεί σε ίσα χρονικά διαστήματα και σε κάθε χρονικό διάστημα να υπολογιστεί η μέση τιμή του φορτίου. Για παράδειγμα, τα χρονικά αυτά διαστήματα μπορούν να έχουν διάρκεια 15 λεπτά ή 30 λεπτά ή μία ώρα, οπότε για να κατασκευαστεί η ημερήσια καμπύλη φορτίου (24 ώρες) απαιτούνται 96 ή 48 ή 24 μέσες τιμές του φορτίου, αντίστοιχα. Όσο πιο μικρό είναι το χρονικό διάστημα τόσο πιο ακριβής είναι η τιμή του φορτίου. Η διαδικασία αυτή για την κατασκευή της καμπύλης φορτίου είναι παρόμοια με την αριθμητική ολοκλήρωση.

Στην εικόνα 1.14 φαίνεται η ημερήσια (εικοσιτετράωρη) καμπύλη φορτίου ενός καταναλωτή, όπου τα ευθύγραμμα τμήματα που είναι παράλληλα στον άξονα του χρόνου αναπαριστούν τη μέση τιμή του φορτίου σε κάθε χρονικό διάστημα. Η ημερήσια καμπύλη φορτίου του σχήματος αποτελείται από 24 επίπεδα φορτίου, ένα για κάθε μία ώρα του 24ώρου, το οποίο σημαίνει ότι για την κατασκευή της συγκεκριμένης καμπύλης φορτίου έχουν επιλεγεί 24 ίσα χρονικά διαστήματα διάρκειας μίας ώρας το καθένα.

Η καμπύλη φορτίου αποτελείται από το φορτίο βάσης (P_b), που αφορά το ελάχιστο φορτίο ζήτησης και είναι σταθερό κατά τη διάρκεια μιας περιόδου. Η μεγαλύτερη τιμή φορτίου κατά τη διάρκεια του 24-ώρου ονομάζεται φορτίο αιχμής ή μέγιστη ζήτηση (peak load, P_{max}), διαρκεί λίγο χρόνο και καλύπτεται από μικρές μονάδες παραγωγής με ταχεία ανάληψη φορτίου. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η εκτίμηση χρησιμότητας των σταθμών παραγωγής εισάγεται ο όρος του συντελεστή φορτίου (Σ.Φ.) και που ισούται με την αναλογία της μέσης τιμής φορτίου (P_a) για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο έναντι του φορτίου αιχμής για την περίοδο αυτή.

- Ο ημερήσιος συντελεστής φορτίου ισούται με:

$$\text{Ημερήσιος } \Sigma.\Phi = \frac{\text{Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας}}{\text{Φορτίο αιχμής} \times 24h} \quad (1.3)$$

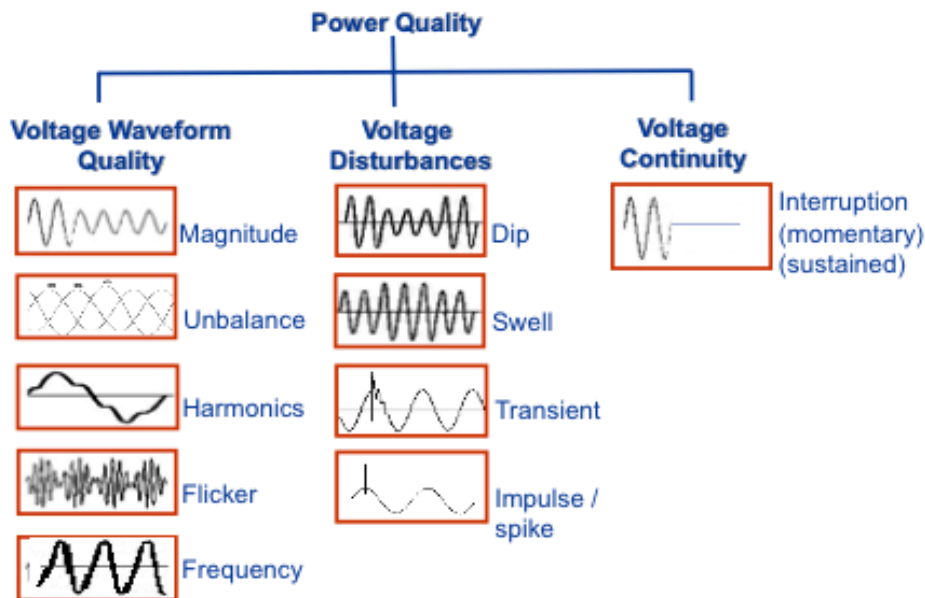
- Ο ετήσιος συντελεστής φορτίου ισούται με:

$$\text{Ετήσιος } \Sigma.\Phi = \frac{\text{Ετήσια κατανάλωση ενέργειας}}{\text{Φορτίο αιχμής} \times 8760h} \quad (1.4)$$

Όσο μεγαλύτερος είναι ο $\Sigma.\Phi$, τόσο αποδοτικότερη θεωρείται η λειτουργία των σταθμών παραγωγής και άρα τόσο οικονομικότερη είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς τα φορτία αιχμής διαφέρουν χρονικά ανάλογα με το είδος του καταναλωτή, επιτυγχάνεται επί του συνόλου βελτίωση του $\Sigma.\Phi$., με μια ενδεικτική τιμή αυτού να κυμαίνεται από 55% έως 70% .

1.7.3 Ποιότητα ισχύος

Για την λειτουργία των φορτίων χωρίς κάποια σημαντικά προβλήματα θα πρέπει οι εκάστοτε εταιρίες ηλεκτρισμού ανά τον κόσμο να ικανοποιούν τις προϋποθέσεις της παρεχόμενης ισχύς σε ομαλή λειτουργία. Αξιοσημειώτο δε, είναι και ο περιορισμός των οικονομικών απωλειών που προκαλούνται από βλάβες της ηλεκτρικής ισχύς. Γι αυτό το λόγο οι αρμόδιοι οργανισμοί εντάσσουν διάφορες προδιαγραφές που λειτουργούν ως όρια. Στο μέλλον θεωρήται πως οι περιορισμοί θα ισχύουν για όλους τους αρμόδιους των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το δίκτυο θα πρέπει να λειτουργεί με τις παραμέτρους εκείνες που πετυχαίνουν την αδιάκοπη και συγχρόνως την οικονομική λειτουργία του (πχ ισχύς, συχνότητα). Η ποιότητα ισχύος είναι με λίγα λόγια μια θεωρία των πραγμάτων και στο επίκεντρο βρίσκονται οι καταναλωτές. Ωστόσο υπάρχουν πολλά προβλήματα όπως το αυξημένο κόστος κυρίως για τους βιομηχανικούς καταναλωτές και ακόμη πιο σοβαρά θεωρούνται τα προβλήματα που αφορούν ανθρώπινες ζωές όπου οι καταναλωτές είναι στα νοσοκομεία και στα αεροδρόμια.

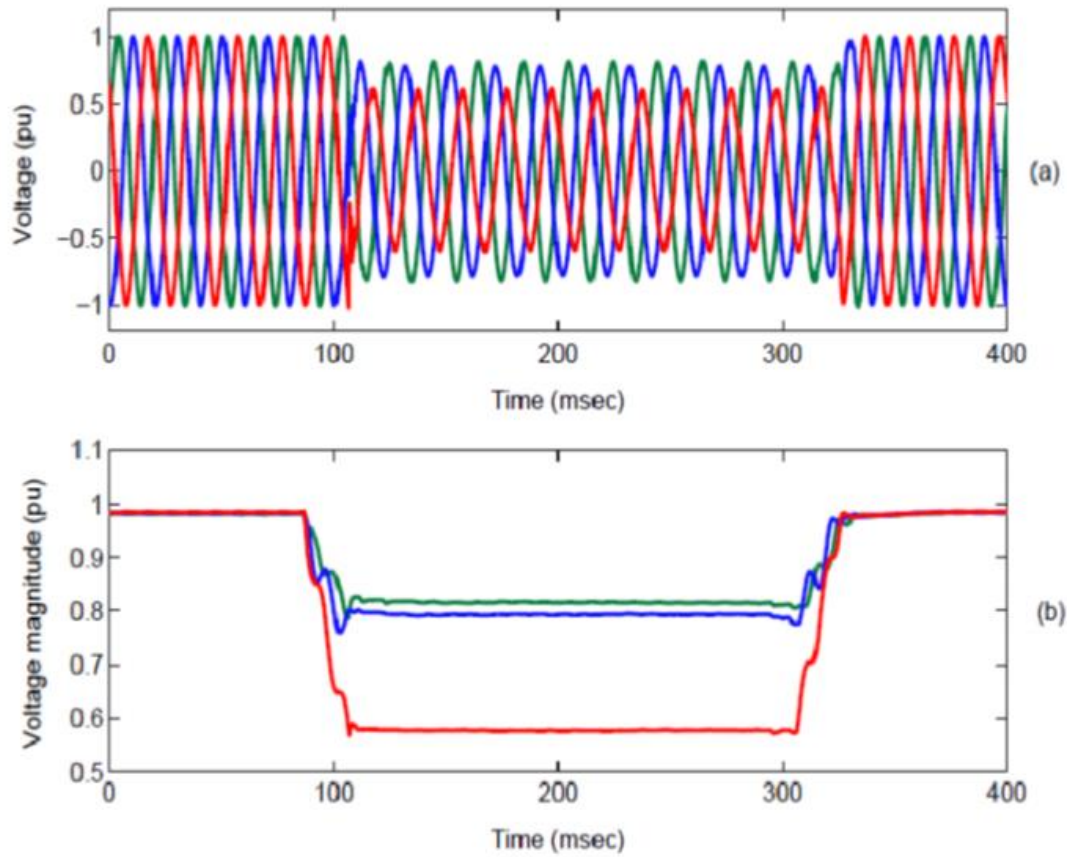


Εικόνα 1.16: Ποιότητα ισχύος

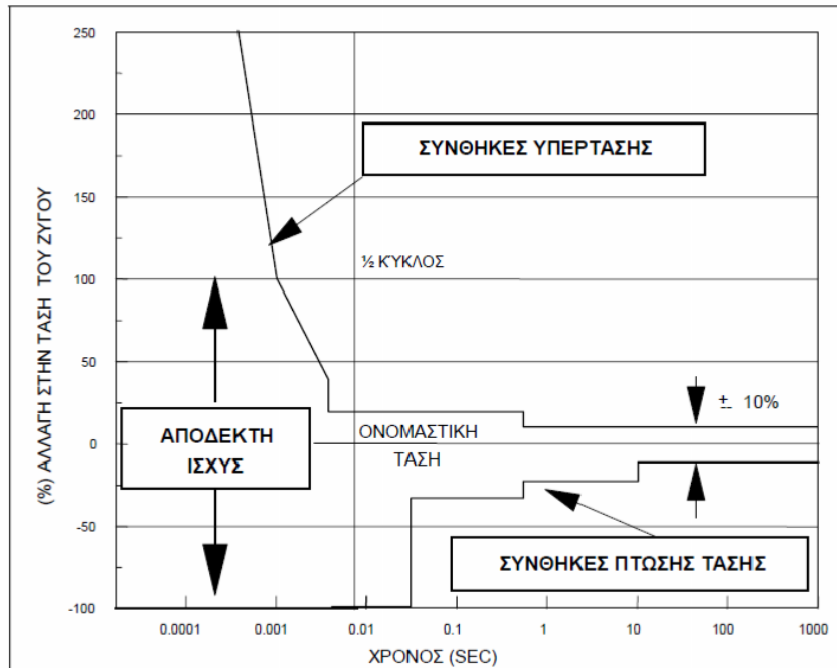
1.7.3.1 Βυθίσεις Τάσης

Όταν συμβαίνουν σφάλματα στο δίκτυο ή γίνεται εκκίνηση μεγάλων κινητήρων μειώνεται η ενεργός τιμή της τάσης για ένα μικρό χρονικό διάστημα, αυτό λέγεται βύθιση της τάσης, η οποία παρατηρείται και κατά την προσωρινή λειτουργία ενός μετασχηματιστή στην περιοχή κορεσμού εξαιτίας των μεγάλων ασύμμετρων ρευμάτων. Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά της είναι η διάρκεια και το μέγεθος της τάσης. Όταν παρουσιάζονται βυθίσεις τάσης από σφάλματα, η τιμή της τάσης εξαρτάται από την απόσταση από το φορτίο μέχρι το σφάλμα, από τις διασυνδέσεις του δικτύου, καθώς επίσης και από το αν ένα δίκτυο είναι ασθενές ή υγιές. Για την τιμή της τάσης οι παράγοντες που την καθορίζουν είναι το είδος του σφάλματος, καθώς και οι συνδεσμολογίες του μετασχηματιστή μεταξύ του σφάλματος και του φορτίου. Επιπροσθέτως, σημαντική είναι και η διάρκεια η οποία θα δείξει πόσο γρήγορα θα λειτουργήσει το σύστημα προστασίας προκειμένου να αντιμετωπιστεί το σφάλμα στο συγκεκριμένο σημείο του δικτύου. Σημαντικές έννοιες είναι ο χρόνος εντοπισμού του σφάλματος δηλαδή με απλά λόγια ο τύπος προστασίας όπως ηλεκτρονόμοι απόστασης, ηλεκτρονόμοι υπερέυματος, η διαφορική προστασία, οι ασφάλειες και ο χρόνος λειτουργίας των συσκευών του ρεύματος όπως (πχ διακόπτης ισχύος, ασφάλεια). Οι εταιρίες ηλεκτρισμού για να μειώσουν τα σφάλματα πρέπει να μειώσουν αρχικά τις βυθίσεις των τάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται κυρίως με την σωστή και αποτελεσματική συντήρηση και τον συνεχή έλεγχο του εξοπλισμού. Αξιοσημείωτο δε, είναι η χρήση των υπογείων καλωδίων έναντι των εναερίων όπου μειώνεται η συχνότητα των σφαλμάτων από κεραυνούς. Ακόμη βελτιώνεται πολύ ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος, περιορίζοντας παράλληλα και τις βυθίσεις της τάσης. Επίσης μπορούν να γίνουν αλλαγές στον τρόπο κατά τον οποίο συνδέεται το φορτίο με το δίκτυο και έτσι μπορούμε να μειώσουμε την πτώση τάσης και να καταφέρουμε την σύνδεση του δικτύου από διαφορετικά σημεία. Σημαντικές συσκευές είναι οι συσκευές

αποθήκευσης ενέργειας (UPS) ή υποστήριξης της τάσης (DVR). Τα UPS σύμφωνα με τους λογικούς ελεγκτές PLC δείχνουν ότι είναι απαραίτητα και οικονομικά. Για τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές τα UPS στις μέρες μας χρησιμοποιούνται εκτεταμένα.



Εικόνα 1.17: Μέτρηση βύθισης τάσης (α) Κυματομορφές τάσης, (β) Ενεργός τιμή της τάσης για κάθε φάση



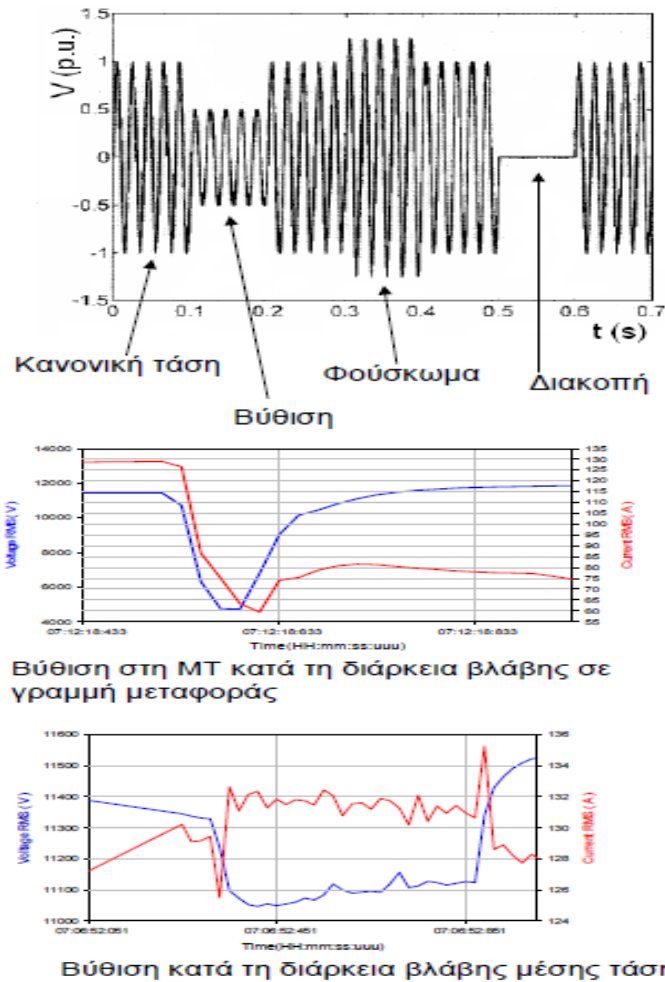
Εικόνα1.18: Καμπύλη ITIC (υπό συνθήκες υπέρτασης η συσκευή κινδυνεύει από βλάβη, ενώ υπό συνθήκες μειωμένης τάσης η συσκευή ενδέχεται να σταματήσει να λειτουργεί)

1.7.3.2 Διακοπές Ισχύος

Οι διακοπές ισχύος σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές χωρίζονται στα εξής μέρη:

- A)Μικρής διάρκειας(<3 λεπτα)
- B)Μεγάλης διάρκειας(>3 λεπτα)

Όταν συμβαίνουν στο δίκτυο πολύ μεγάλες διακοπές, που οφείλονται απο κάποιο σοβαρό σφάλμα ή στη μη συντήρηση του δικτύου και το οποίο δεν ενεργοποιεί το σύστημα προστασίας, χρειάζεται αποκατάσταση αμέσως απο τους μηχανικούς. Για τις διακοπές μικρής διάρκειας οφείλονται κατά κύριο λόγο απο τους διακόπτες αυτόματης επαναφοράς καθώς και την επαναφορά του δικτύου μετά απο το σφάλμα. Μεγάλο ποσοστό των σφαλμάτων δεν έχουν μονιμότητα και εξαφανίζονται εντελώς μετα την ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας. Οι διακοπές ισχύος έχουν παρόμοια δράση και συγχρόνως αποτελούν ειδική περίπτωση βύθισης της τάσης ($V=0$) με ίδια περίπου επίδραση στα φορτία μας. Σε ένα εργοστάσιο μια διακοπή μπορεί να προκαλέσει τεράστια καταστροφή στην παραγωγή και στα προϊόντα. Ακόμη οι διακοπές ισχύος συνεπάγονται και καταστροφή του οικιακού εξοπλισμού και τραυματισμούς του εργατικού δυναμικού του εργοστασίου.



Εικόνα 1.19: Κυματομορφές βύθισης τάσης

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για την αποφυγή προβλημάτων από τις διακοπές είναι η εγκατάσταση συστημάτων UPS και ηλεκτροπαραγωγών ζευγών. Βελτίωση από την μεριά του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας αφενός την συχνότητα των σφαλμάτων και αφετέρου μειώνοντας την διάρκεια των διακοπών. Μείωση της διάρκειας των διακοπών μπορεί να γίνει με αξιοποίηση των μοντέρνων συστημάτων προστασίας. Σχήματα τα οποία προβλέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών μέσω τηλεπικοινωνιακών συστημάτων αυξάνουν την αποτελεσματικότητα στον εντοπισμό του σφάλματος, επιταχύνουν τους χρόνους προστασίας αλλά και μειώνουν τον χρόνο αποκατάστασης σφαλμάτων.

1.7.3.2 Υπερτάσεις

Υπερτάσεις θεωρούμε τις στιγμιαίες ανυψώσεις της τάσης, οι οποίες αποτελούν τα αντίθετα των βυθίσεων. Σε σχέση με τις βυθίσεις οι ανυψώσεις έχουν τις ίδιες παραμέτρους στην κατηγοριοποίησή τους. Κατά την λειτουργία του δικτύου οι υπερτάσεις όταν εμφανίζονται μπορούν να καταστρέψουν τον εξοπλισμό αλλά και τα φορτία. Οι υπερτάσεις χωρίζονται σε υπερτάσεις κεραυνικές και σε υπερτάσεις εσωτερικών σφαλμάτων. Υπερτάσεις μεγαλύτερης διάρκειας μπορούν να εμφανιστούν σε μονοφασικά σφάλματα με αγείωτα δίκτυα ή δίκτυα γειωμένα με σύνθετη αντίσταση. Η δυσμενέστερη περίπτωση είναι μια υπέρταση να ισούται με

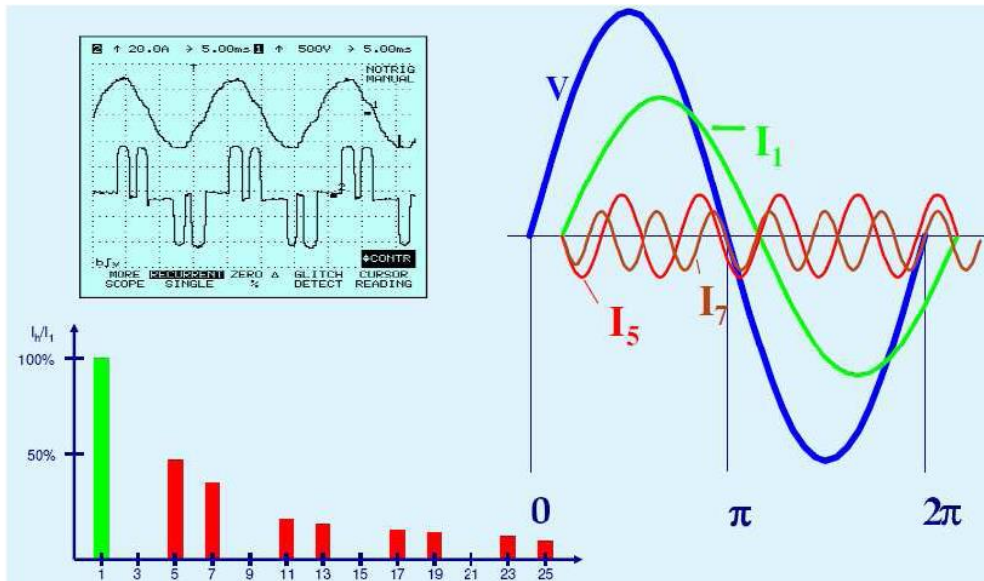
την πολική τάση. Οι τρόποι αντιμετώπισης των υπερτάσεων μοιάζουν με αυτά των βυθίσεων. Στην πράξη για μικρή συχνότητα και έντασης φαινόμενα δεν λαμβάνονται κάποια ιδιαίτερα μέτρα. Η αντιμετώπιση άλλων διαταραχών εξομαλύνουν συγχρόνως και τις υπερτάσεις.

1.7.3.3 Διακυμάνσεις τάσης

Η διακύμανση της τάσης που οδηγεί στο τρεμόπαιγμα του φωτός αποτελεί μια οπτική ενόχληση λόγω της αστάθειας της έντασης του φωτός. Η εν λόγω διακύμανση κυμαίνεται σε ποσοστό κάτω του 3% και δεν έχει κάποια αξιοσημείωτη επίδραση στον εξοπλισμό. Το μόνο που προκαλείται είναι η ενόχληση στα μάτια. Το τρεμόπαιγμα αυτό εξαρτάται από το πλάτος της αλλαγής της έντασης του φωτός, από τον παρατηρητή και από την συχνότητα. Τα αίτια που δημιουργούν τα φαινόμενα διακύμανσης της τάσης είναι επιγραμματικά οι μηχανές συγκόλλησης, τα ηλεκτρικά τόξα που προκαλούνται από τους ηλεκτρικούς κλιβάνους και βαριά φορτία που καταναλώνουν μεγάλα ρεύματα. Οι διακυμάνσεις της τάσης, εμφανίζονται όταν τα φορτία καταναλώνουν μεγάλα ρεύματα τα οποία έχουν αιφνίδες διακυμάνσεις. Το ρεύμα που καταναλώνεται από την παροχή προκαλεί επιπλέον μείωση της τάσης στην τροφοδοσία. Τα φορτία που παρουσιάζουν γρήγορες διακυμάνσεις είναι οι ηλεκτροσυγγολητές, εγκαταστάσεις με συχνές εκκινήσεις κινητήρων, κλιματιστικά, ανεμιστήρες, πριόνια που πιθανόν προκαλούν διακύμανση της τάσης. Οι κινητήρες όταν εκκινούν το ρεύμα τους συνήθως είναι 3-5 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα για ένα χρονικό περιθώριο. Αν υπάρχουν πολλοί κινητήρες οι οποίοι εκκινούν ταυτόχρονα, αυτό θα προκαλέσει τρεμόπαιγμα του φωτός.

1.7.3.4 Αρμονικές

Η ύπαρξη αρμονικών τόσο στην τάση όσο και στην ένταση (50Hz συχνότητα) οφείλεται κατά κύριο λόγο στα μη γραμμικά φορτία στα οποία το ρεύμα διαφέρει στην κυματομορφή από την τάση. Μέσω της τάσης και σε συνάρτηση με την ισχύ βαρχυκύκλωσης του δικτύου όπως αναφέραμε και προηγουμένως οι αρμονικές που δημιουργούνται μπορούν να προκαλέσουν μεγάλα προβλήματα στα φορτία. Οποιαδήποτε περιοδική απόκλιση από την καθαρά ημιτονική μορφή της τάσης μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα άθροισμα από καθαρά συνημίτονα με συχνότητα ίση με την ονομαστική και ακέραια πολλαπλάσια αυτής. Θεμελιώδη συχνότητα ονομάζουμε την ονομαστική συχνότητα. Μια ημιτονική κυματομορφή όπου η συχνότητα είναι (x) φορές μεγαλύτερη από την θεμελιώδη ονομάζεται αρμονική διαταραχή. Ο λόγος μεταξύ της θεμελιώδης και της αρμονικής συχνότητας ονομάζεται τάξη της αρμονικής.



Εικόνα 1.20: Αρμονικές 1ης, 3ης, 5ης και 7ης τάξης.

1.8 Ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρισμού έχουν αρχίσει να ενσωματώνουν πλήθος ψηφιακών τεχνολογιών και νέων ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων στις δραστηριότητες:

- της παραγωγής ηλεκτρισμού,
- της μεταφοράς ηλεκτρισμού,
- της διανομής ηλεκτρισμού και
- της προμήθειας ηλεκτρισμού.

Τα ηλεκτρικά δίκτυα που επιτυγχάνουν την πιο αξιόπιστη, αποδοτική και με λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λειτουργία τους αξιοποιώντας τις παραπάνω τεχνολογίες σε συνδυασμό με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, χαρακτηρίζονται ως έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα (ή ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα). Στα σημερινά συμβατικά ηλεκτρικά δίκτυα (ή αφυή ηλεκτρικά δίκτυα), η επικοινωνία είναι μονόπλευρη αφού η ροή του ηλεκτρισμού γίνεται από την παραγωγή προς τα κέντρα κατανάλωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι αυξομειώσεις της ζήτησης ισχύος να επιτυγχάνονται με την ρύθμιση της παραγωγής προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Παράλληλα, η αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ιδιαίτερα των διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών όπως είναι η αιολική και η ηλιακή ενέργεια) σε ένα ηλεκτρικό σύστημα μειώνει την αξιοπιστία του προκαλώντας αβεβαιότητα στην απρόσκοπτη παροχή ηλεκτρισμού. Επιπλέον, το ηλεκτρικό σύστημα επιβαρύνεται περαιτέρω, αφού η ηλεκτρική ισχύς που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παράγεται σε γεωγραφικά απομακρυσμένες περιοχές.

Όλοι οι παραπάνω λόγοι οδηγούν στην ανάγκη της μεταμόρφωσης του υπάρχοντος συμβατικού ηλεκτρικού δικτύου, από ένα ηλεκτρικό δίκτυο όπου η παραγωγή είναι συγκεντρωμένη και η ισχύς ρέει προς μία κατεύθυνση σε ένα «έξυπνο» δίκτυο, όπου η παραγωγή ισχύος είναι αμφίδρομη. Με αυτό το τρόπο η ισχύς ρέει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση αυξάνοντας συνάμα την αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος.

Στην ψηφιακή εποχή που ζούμε σήμερα είναι πλέον εφικτή η μετάβαση σε ένα ταχύτερο, πιο έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο, που θα μπορεί:

- να παρέχει καλύτερη ποιότητα ηλεκτρισμού με επικοινωνία διπλής κατεύθυνσης,
- να εξισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση ισχύος σε πραγματικό χρόνο, εξομαλύνοντας τις αιχμές της ζήτησης ισχύος και
- να καθιστά τους καταναλωτές σε ενεργούς συμμετέχοντες στην παραγωγή και κατανάλωση του ηλεκτρισμού.

Το έξυπνο δίκτυο επιτρέπει την αποδοτικότερη χρήση της υπάρχουσας εγκατεστημένης ισχύος και των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού, με μείωση των απωλειών στη μεταφορά και διανομή μέσω της χρήσης τοπικής, αποκεντρωμένης ηλεκτροπαραγωγής. Καθώς αυξάνεται το μερίδιο παραγωγής από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να χειριστεί καλύτερα τις αυξομειώσεις της ηλεκτρικής ισχύος όταν για παράδειγμα ο άνεμος καταλαγιάζει ή τα σύννεφα κρύβουν τον ήλιο. Με κατάλληλη τιμολόγηση, θα επιτρέψει επίσης στα ηλεκτρικά οχήματα να αποθηκεύουν ηλεκτρισμό για τις ανάγκες τους ή/και να τον προσφέρουν πίσω στο ηλεκτρικό δίκτυο όταν αυτό απαιτείται.

Οι έξυπνες τεχνολογίες, όπως οι έξυπνοι μετρητές, τα αυτόματα συστήματα ελέγχου, οι ψηφιακοί αισθητήρες, κλπ., θα προσφέρουν στους καταναλωτές πληροφόρηση, σε πραγματικό χρόνο, σχετικά με την κατανάλωση και την τιμολόγηση. Με αυτό τον τρόπο θα τους επιτρέπουν να εξοικονομούν ενέργεια και χρήματα με την απενεργοποίηση αχρείαστων ηλεκτρικών συσκευών, συστημάτων θέρμανσης-ψύξης και βιομηχανικών φορτίων, σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (π.χ., όταν η τιμή του ηλεκτρισμού ξεπερνά μια προκαθορισμένη τιμή ή όταν υπάρχει μείωση παραγωγής ισχύος από αιολικά συστήματα). Μπορούν, επίσης, να βοηθήσουν στη μεταφορά φορτίων σε περιόδους χαμηλής ζήτησης μειώνοντας έτσι τις απώλειες των ηλεκτρικών γραμμών. Εάν εξασφαλιστεί στους καταναλωτές άμεση πρόσβαση, τότε τα έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα θα ανοίξουν την πόρτα στην επιχειρηματική καινοτομία, που θα αυξήσει την απόδοση, την αξιοπιστία και την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών προς τους καταναλωτές.

Πιο αναλυτικά, το έξυπνο δίκτυο είναι μια αναβάθμιση του ηλεκτρικού συστήματος, το οποίο χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνιών, αυτοματοποιημένου ελέγχου, αυτοματοποιημένες συσκευές μέτρησης και γενικότερα αξιοποιεί την τεχνολογία της πληροφορίας. Αυτή η ιδέα συνδυάζει την βασική υποδομή του ηλεκτρικού συστήματος, την πληροφορία και τους κανόνες της αγοράς ηλεκτρισμού (π.χ., τιμολόγηση) σε μια ολοκληρωμένη διαδικασία με σκοπό την καλύτερη παροχή, έλεγχο και γενικότερα διαχείριση του ηλεκτρισμού. Ένα έξυπνο δίκτυο επιτρέπει στις συσκευές όλων των επιπέδων να επικοινωνούν με το ηλεκτρικό σύστημα και να έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο ώστε να μπορούν να λειτουργούν όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά. Με τη χρήση έξυπνων συσκευών οι καταναλωτές έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν την κατανάλωσή τους και να εξοικονομούν ηλεκτρισμό. Επιπλέον προηγμένες επικοινωνιακές ικανότητες επιτρέπουν την άμεση ενημέρωση για την τιμολόγηση του ηλεκτρισμού, για τα κίνητρα μείωσης της ζήτησης ισχύος και για τον άμεσο έλεγχο φορτίων.

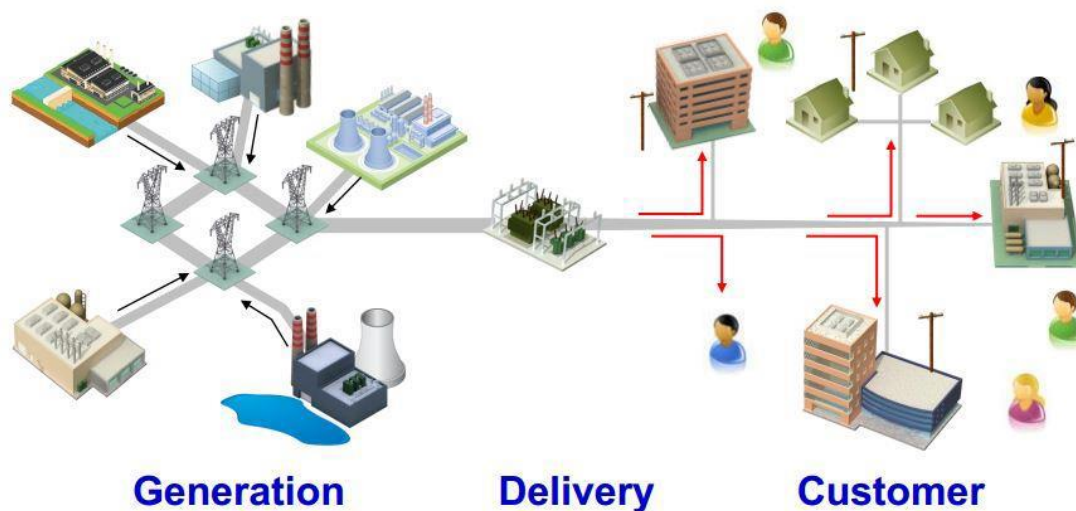
Σήμερα, επειδή η ζήτηση ισχύος δεν είναι σταθερή αλλά έχει διακυμάνσεις απαιτούνται, όταν χρειαστεί, να καλύψουν την επιπλέον ζήτηση οι στρεφόμενες εφεδρείες με αποτέλεσμα το υψηλό κόστος. Όμως, το έξυπνο δίκτυο προσφέρει αλληλεπίδραση μεταξύ ζήτησης ισχύος και παραγωγής ισχύος σε πραγματικό χρόνο, που επιτρέπει τον καλύτερο υπολογισμό του ισοζυγίου και επιτρέπει στους

διαχειριστές να ανιχνεύουν σφάλματα και να βρίσκουν ταχύτατα εναλλακτική διαδρομή για τη ροή του ηλεκτρισμού παρακάμπτοντας το σφάλμα, με αποτέλεσμα την αύξηση της αξιοπιστίας και την μείωση του κόστους. Επίσης, αλλάζει και ο μηχανισμός κοστολόγησης (π.χ., υψηλές τιμές ηλεκτρισμού τις ώρες αιχμής και χαμηλότερες τις υπόλοιπες ώρες) αφού μπορεί να γίνει μετατόπιση φορτίων και έτσι μειώνονται οι ανάγκες για εφεδρεία. Συνάμα θα μπορούσε σε ένα έξυπνο δίκτυο η τιμή να μεταβάλλεται συνεχώς ανάλογα με τη ζήτηση ισχύος. Ενθαρρύνεται επίσης και η χρήση των αιεφόρων τεχνολογιών που μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν καθώς κάθε καταναλωτής μπορεί να γίνει και παραγωγός χρησιμοποιώντας τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και να προσφέρει την περίσσεια παραγόμενου ηλεκτρισμού στο ηλεκτρικό σύστημα ή απλά να καλύπτει μέρος των αναγκών του. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας ένα έξυπνο μετρητή ο καταναλωτής μπορεί άμεσα να γνωρίζει την ισχύ που απορροφά ή προσφέρει στο δίκτυο.

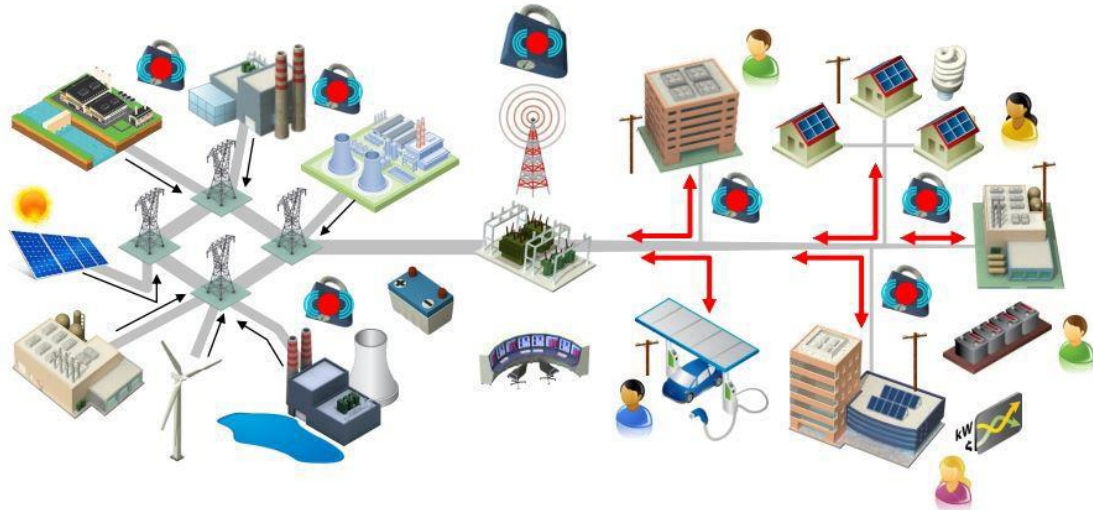
Συνοψίζοντας, το έξυπνο δίκτυο υποβοηθούμενο από:

- τεχνολογίες έξυπνης μέτρησης,
- αποθήκευσης ενέργειας,
- πολιτικών απόκρισης στη ζήτηση ισχύος και διαχείρισης της ζήτησης και
- υπηρεσιών πληροφορικής

αποτελεί ένα βέλτιστο σύστημα διαχείρισης του ηλεκτρικού συστήματος για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της αιεφόρου ανάπτυξης (δηλ., την ανάπτυξη, που καλύπτει τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύεται η ικανότητα των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες).



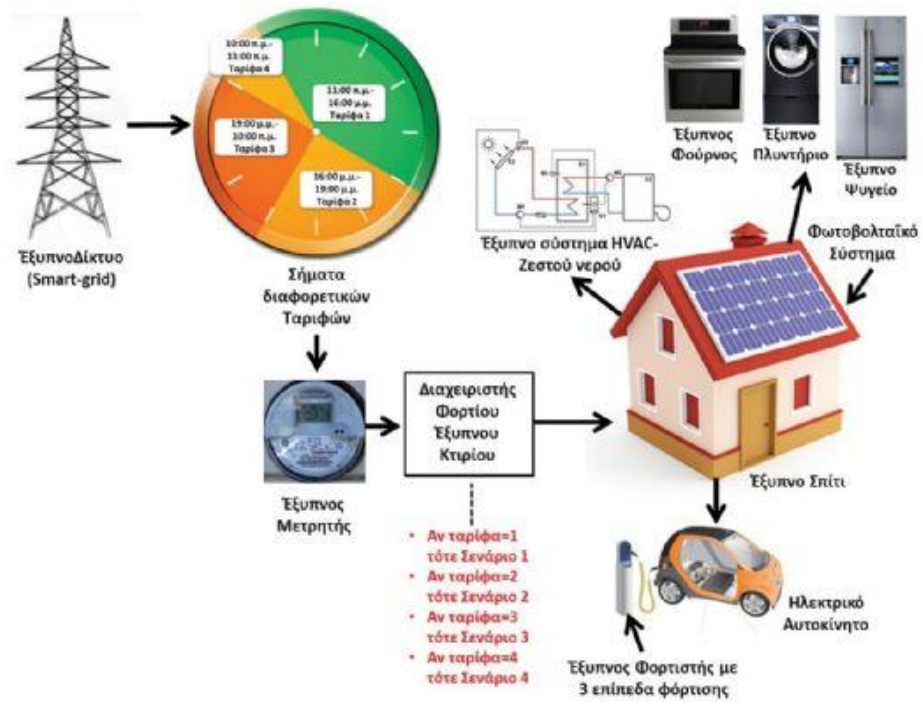
Εικόνα 1.21: Συμβατικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας



Εικόνα 1.22: Ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο

Το Τμήμα Εμπορίου του Εθνικού Ινστιτούτου Προτύπων και Τεχνολογιών (National Institute of Standards and Technology - NIST) των ΗΠΑ και η Συντονιστική Επιτροπή Έξυπνων Δικτύων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Smart Grid Coordination Group - SG-CG), σε κοινή τους ανακοίνωση δήλωσαν την πρόθεσή τους να συνεργαστούν για την ανάπτυξη κοινών προτύπων για τη σχεδίαση και λειτουργία των ευφύων δικτύων, ώστε να επιτευχθεί η μεταξύ τους διαλειτουργικότητα. Οι δύο αυτοί οργανισμοί εκδίδουν κατά καιρούς διάφορες αναφορές. Τα πλεονεκτήματα τα οποία αναμένονται να παρέχει το έξυπνο δίκτυο ηλεκτροδότησης συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Μεγαλύτερη αξιοπιστία και καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας (μέσω υιοθέτησης ενός κατακευματισμένου μοντέλου παραγωγής ενέργειας).
- Καλύτερη αξιοποίηση της υφιστάμενης υποδομής και των εναλλακτικών μορφών ενέργειας προκειμένου να μη χρειάζεται πλέον η χρήση απαρχαιωμένων ηλεκτροπαραγωγών σταθμών (που μολύνουν το περιβάλλον) για κάλυψη της ζήτησης.
- Ευέλικτος σχεδιασμός που να επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί αυτοάνοσα σε περιπτώσεις βλάβης.
- Προστασία του περιβάλλοντος μέσω της αξιοποίησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση εκπομπής ρυπογόνων παραγόντων στην ατμόσφαιρα.
- Ενεργός συμμετοχή του καταναλωτή στην προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας (μέσω προγραμμάτων demand response και δυναμικής χρέωσης κιλοβατώραν αναλόγως της ώρας της ημέρας).
- Δυνατότητα πιο ακριβούς πρόβλεψης της ζήτησης μέσω επεξεργασίας δεδομένων που λαμβάνονται από έξυπνους μετρητές (πράγμα το οποίο συνεπάγεται μειωμένη σπατάλη ενέργειας και μικρότερο ρίσκο για διακοπές παροχής).



Εικόνα 1.23:Οι πόλεις του μέλλοντος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο Ανάλυση βραχυκυκλωμάτων

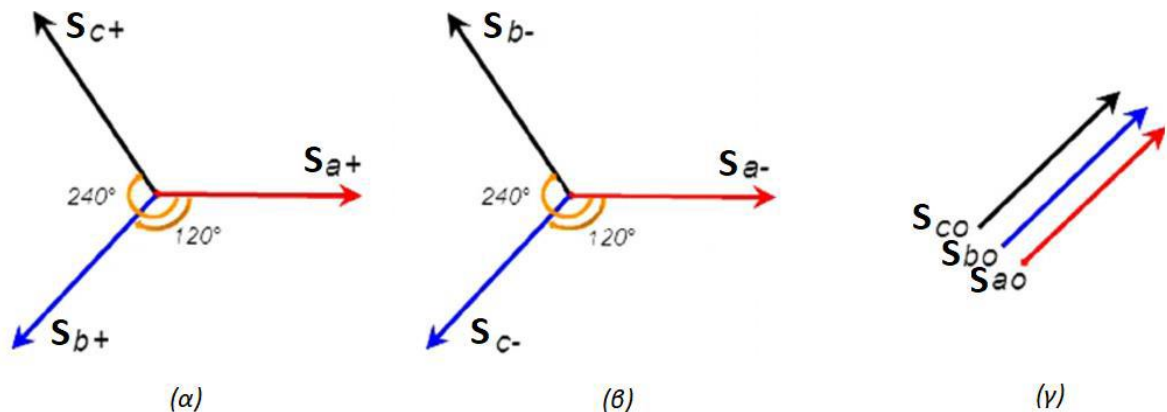
2.1 Μέθοδος Συμμετρικών Συνιστωσών(ΜΣΣ)

Το 1918 ο C.L.Fortescue απέδειξε ότι ένα ασύμμετρο σύστημα με n συσχετιζόμενα ασύμμετρα διανύσματα, μπορεί να αναλυθεί σε n συστήματα το καθένα, που ονομάζονται συμμετρικές ή ακολουθιακές συνιστώσες των αρχικών διανυσμάτων, ενώ τα επιμερούς συστήματα ονομάζονται ακολουθιακά. Τα n συμμετρικά διανύσματα κάθε συνιστώσας έχουν ίσο μέτρο και οι γωνίες μεταξύ διαδοχικών διανυσμάτων του ίδιου συνόλου είναι ίσες.

Σε οποιοδήποτε ασύμμετρο πολυφασικό μπορούμα να εφαρμόσουμε την μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών. Λόγω του ότι τα μεγέθη στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι τριφασικά, θα αναλυθεί η μέθοδος συμμετρικών συνιστωσών για τριφασικό ασύμμετρο σύστημα.

Στην περίπτωση του τριφασικού συστήματος, το ασύμμετρο σύστημα διανυσμάτων μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συμμετρικές συνιστώσες. Η μία συνιστώσα λέγεται ορθή συνιστώσα και αποτελείται από ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα το οποίο στρέφεται με την θετική φορά και η φασική μετατόπιση των διανυσμάτων είναι ίση με 120° . Η άλλη η συνιστώσα λέγεται αντίστροφη και είναι ένα συμμετρικό σύστημα διανυσμάτων το οποίο στρέφεται με την ωρολογιακή φορά και έχει επίσης φασική μετατόπιση 120° . Η τελευταία συνιστώσα λέγεται ομοπολική και είναι ένα συμμετρικό σύστημα τα οποία έχουν μηδενική διαφορά φάσης μεταξύ τους.

Στην παρακάτω εικόνα δίνεται η ανάλυση με την μέθοδο συμμετρικών συνιστωσών (ΜΣΣ) ενός ασύμμετρου συστήματος διανυσμάτων στις προαναφερθείσες συνιστώσες.



Εικόνα 2.1: Διανύσματα συμμετρικών συνιστωσών, (α) Ορθό σύστημα, (β) Αντίστροφο σύστημα, (γ) Ομοπολικό σύστημα

Τα τρία δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούνται για την μαθηματική ανάλυση είναι τα εξής:

- Δίκτυο θετικής ακολουθίας. Αποτελείται από τρία διανύσματα (συνιστώσες) ίδιου μέτρου, τα οποία ακολουθούν τη διαδοχή φάσεων abc και συνεπώς

διαφέρουν μεταξύ τους κατά 120° . Ο εκθέτης με τον οποίο θα γίνεται αναφορά στη συνέχεια στη συγκεκριμένη ακολουθία θα είναι το + ή το (1).

- Δίκτυο αρνητικής ακολουθίας. Αποτελείται από τρία διανύσματα (συνιστώσες) ίδιου μέτρου, τα οποία ακολουθούν τη διαδοχή φάσεων acb και διαφέρουν μεταξύ τους κατά 120° . Ο εκθέτης με τον οποίο θα γίνεται αναφορά στη συνέχεια στη συγκεκριμένη ακολουθία θα είναι το - ή το (2).
- Δίκτυο μηδενικής ακολουθίας. Αποτελείται από τρία διανύσματα (συνιστώσες) ίδιου μέτρου, τα οποία έχουν και ίδια φάση. Ο εκθέτης με τον οποίο θα γίνεται αναφορά στη συνέχεια στη συγκεκριμένη ακολουθία θα είναι το (0).

Σύμφωνα με τα παραπάνω αν θέλουμε να εκφράσουμε τα φασικά ρεύματα ενός ασύμμετρου τριφασικού συστήματος με τη βοήθεια των τριών ακολουθιών, θα προκύψει το παρακάτω σύστημα:

$$\begin{aligned} I_a &= I_a^{(1)} + I_a^{(2)} + I_a^{(0)} \\ I_b &= I_b^{(1)} + I_b^{(2)} + I_b^{(0)} \\ I_c &= I_c^{(1)} + I_c^{(2)} + I_c^{(0)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Έστω ένας τελεστής $a=1 \angle 120^\circ$ ο οποίος έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ \\ a^3 &= 1 \angle 0^\circ \\ a + a^2 + a^3 &= a + a^2 + 1 = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Έτσι προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} I_a^{(0)} &= I_b^{(0)} = I_c^{(0)} \\ I_b^{(1)} &= a^2 I_a^{(1)}, I_c^{(1)} = a I_a^{(1)} \\ I_b^{(2)} &= a I_a^{(2)}, I_c^{(2)} = a^2 I_a^{(2)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Με αντικατάσταση προκύπτει το εξής σύστημα:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} I_a^{(0)} & I_a^{(1)} & I_a^{(2)} \\ I_a^{(0)} & a^2 I_a^{(1)} & a I_a^{(2)} \\ I_a^{(0)} & a I_a^{(1)} & a^2 I_a^{(2)} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

ή

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Για τον υπολογισμό των φασικών ρευμάτων χρησιμοποιείται το συγκεκριμένο σύστημα εξισώσεων μέσω των ακολουθιακών ενός ασύμμετρου τριφασικού συστήματος και συνάμα με το αντίστροφο του πίνακα, υπάρχει η δυνατότητα να ακολουθηθεί η αντίστροφη διαδικασία:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Οι συγκεκριμένες εξισώσεις μπορούν επίσης να εφαρμοστούν και για τον υπολογισμό των τάσεων:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Η βασική επομένως φυσική σημασία της ΜΣΣ είναι ότι προσφέρει τη δυνατότητα μετασχηματισμού ενός τυχαίου ασύμμετρου τριφασικού συστήματος τάσεων ή ρευμάτων σε τρία ανεξάρτητα συμμετρικά συστήματα τάσεων ή ρευμάτων, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να παρασταθεί με ένα ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα. Η ΜΣΣ έχει σημαντική εφαρμογή στον υπολογισμό σφαλμάτων, όπως είναι τα εξής:

- Ενιαία βλάβη γραμμής-εδάφους (LG).
- Σφάλμα γραμμής-γραμμής (LL).
- Διπλόσφάλμα Line-to-Ground (LLG).
- Τριφασική βλάβη βραχυκυκλώματος (LLL).
- Βλάβη τριών φάσεων-εδάφους (LLLG).
- Διακοπή αγωγού μιας φάσης

Σε σφάλμα απλής γραμμής-εδάφους, ένας αγωγός έρχεται σε επαφή με το έδαφος ή τον ουδέτερο αγωγό. Υπάρχει σφάλμα γραμμής σε γραμμή όταν βραχυκυκλωθούν δύο αγωγοί. Υπάρχει διπλή αστοχία γείωσης-γείωσης όταν δύο αγωγοί πέσουν στο έδαφος ή έρθουν σε επαφή με τον ουδέτερο αγωγό. Τα LG, LL και LLG είναι ασύμμετρα, ενώ τα LLL και LLLG είναι τα συμμετρικά σφάλματα. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται ισορροπημένος υπολογισμός βραχυκυκλώματος για τον προσδιορισμό αυτών των μεγάλων ρευμάτων.

Η σημασία της μέθοδου συμμετρικών συνιστωσών για τον υπολογισμό των σφαλμάτων θα αναλυθεί παρακάτω μέσω των διασυνδέσεων των ισοδύναμων για την εκάστοτε συνιστώσα διαγραμμάτων. Η ΜΣΣ εκτός από τον υπολογισμό των σφαλμάτων, μας δίνει και σημαντικές πληροφορίες ως προς την συμπεριφορά των ΣΗΕ και του εξοπλισμού τους.

Ένα σημαντικό παράδειγμα αποτελεί η επίπτωση των αντίστροφης συνιστώσας η οποία προκαλεί ηλεκτρική πέδηση και θέρμανση των δρομέων στις γεννήτριες και στους κινητήρες. Στις στρεφόμενες μηχανές, μόνο η ορθή συνιστώσα συμμετέχει στη μετατροπή ενέργειας, ενώ η ομοπολική συνιστώσα δεν παράγει ροπή σε μηχανές

Κατά την διάρκεια των βραχυκύκλωμάτων εμφανίζεται η ομοπολική συνιστώσα και προκαλεί σοβαρές διαταραχές σε γειτονικά ηλεκτρικά δίκτυα ή δίκτυα τηλεπικοινωνιών. Ένα μεγάλο μέρος των σφαλμάτων εμφανίζεται στα εξωτερικά μέρη του δικτύου, όπως στις γραμμές μεταφοράς και στους μονωτήρες, τα οποία είναι εκτεθειμένα στις έντονες καιρικές συνθήκες (π.χ. κεραυνοί, χιονοπτώσεις) και λιγότερο στα εσωτερικά μέρη του δικτύου, όπως στις γεννήτριες και στους μετασχηματιστές (π.χ. λόγω καταστροφής της μόνωσης). Ακόμη, βραχυκυκλώματα είναι δυνατόν να προκληθούν μετά από ατυχήματα και εσφαλμένους χειρισμούς διακοπών.

Σε ασύμμετρο τριφασικό σύστημα τάσεων οι φασικές τάσεις μπορεί να έχουν μηδενικής ακολουθίας συνιστώσες.

Οι πολικές τάσεις δεν έχουν ποτέ συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας, αφού ο νόμος τάσεων Kirchhoff δίνει το άθροισμα τους πάντα μηδέν.

2.2 Κυκλωματική ανάλυση σε κατάσταση σφάλματος

Τα περισσότερα σφάλματα που εμφανίζονται στα ΣΗΕ είναι τα μονοφασικά σφάλματα. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μονοφασικό σφάλμα στην φάση α. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν υπάρχει αντίσταση σφάλματος τότε πρέπει οπωσδήποτε να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς. Με την μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών αναλύονται τα σφάλματα για να υπολογιστούν οι τάσεις και τα ρεύματα σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου. Στις παρακάτω σχέσεις

παρουσιάζονται τα φασικά μεγέθη σε μητρική μορφή και οι συμμετρικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος. Οι σχέσεις (2.8) και (2.9) μπορούν να γραφούν και ως:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

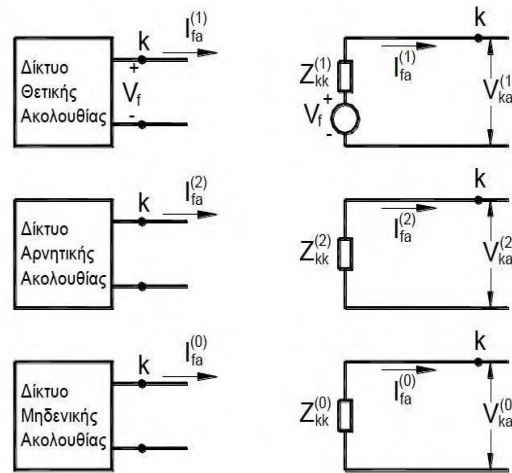
Επίσης:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha^{(0)} \\ I_\alpha^{(1)} \\ I_\alpha^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Στην σχέση (2.13) παρουσιάζονται οι εξισώσεις των ακολουθιακών κυκλωμάτων στο ζυγό j για ένα σφάλμα στο ζυγό k του δικτύου, ενώ στην σχέση (2.14) εκφράζονται οι ακολουθιακές τάσεις για το ζυγό k .

$$\begin{aligned} V_{ja}^{(0)} &= -Z_{jk}^{(0)} I_{fa}^{(0)} \\ V_{ja}^{(1)} &= V_{jf} - Z_{jk}^{(1)} I_{fa}^{(1)} \\ V_{ja}^{(2)} &= -Z_{jk}^{(2)} I_{fa}^{(2)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} V_{ka}^{(0)} &= -Z_{kk}^{(0)} I_{fa}^{(0)} \\ V_{ka}^{(1)} &= V_f - Z_{kk}^{(1)} I_{fa}^{(1)} \\ V_{ka}^{(2)} &= -Z_{kk}^{(2)} I_{fa}^{(2)} \end{aligned} \quad (2.14)$$



Εικόνα 2.2:Μονοφασικά ακολουθιακά δίκτυα

Στα πλαίσια της ακόλουθης ανάλυσης βραχυκυκλωμάτων σημειώνεται ότι:

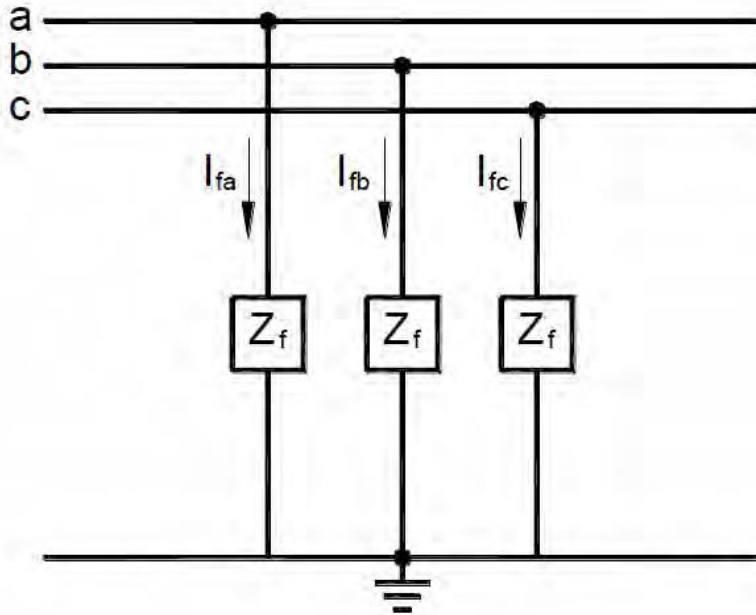
- Τα ρεύματα τα οποία ρέουν στο δίκτυο προς το σημείο του σφάλματος από τις φάσεις a, b και c συμβολίζονται ως I_{fa}, I_{fb}, I_{fc}
- Οι τάσεις ως προς γη σε οποιοδήποτε ζυγό j του συστήματος συμβολίζονται ως V_{ja}, V_{jb}, V_{jc}
- Οι δείκτες 1,2 και 0 καθορίζουν τα μεγέθη θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.

Η φασική τάση ως προς τον ουδέτερο στο σημείο του σφάλματος συμβολίζεται ως V_f , ενώ $Z_{ij}(x)$ είναι η σύνθετη αντίσταση που βρίσκεται στην θέση (i,j) του πίνακα σύνθετων αντιστάσεων κάθε ακολουθιακού κυκλώματος.

2.2.1 Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα

Η ανάλυση μπορεί να γίνει είτε στις τρεις φάσεις(3Φ) είτε στη μία φάση(1Φ) λόγω της συμμετρικότητας. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα τριφασικό σφάλμα με αντίσταση σφάλματος Z_f , οπότε οι εξισώσεις που περιγράφουν τις συνθήκες είναι οι εξής:

$$\begin{aligned}
 V_a &= I_{fa} \cdot Z_f \\
 V_b &= I_{fb} \cdot Z_f \\
 V_c &= I_{fc} \cdot Z_f
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$



Εικόνα 2.3: Τριφασικό συμμετρικό σφάλμα

Η αντίστοιχη μητρική σχέση παρουσιάζεται στην εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Με την χρήση των μητρών μετασχηματισμού, σχηματίζεται η παρακάτω μητρική εξίσωση η οποία περιγράφει τα μεγέθη με την χρήση των συμμετρικών συνιστωσών στην παρακάτω εξίσωση.

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{pmatrix} A \begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Z_f & 0 & 0 \\ 0 & Z_f & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Από την παραπάνω εξίσωση συμπαίρνουμε ότι και τα τρία κυκλώματα ακολουθίας είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αυτό είναι λογικό καθώς το σύστημα διατηρεί τη συμμετρία του μετά από ένα συμμετρικό τριφασικό σφάλμα. Στην εικόνα 2.14 διακρίνεται η συνδεσμολογία των τριών κυκλωμάτων ακολουθίας.

Οι εξισώσεις (2.18) και (2.19) εκφράζουν τις ακολουθιακές τάσεις και ρεύματα κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

$$I_{fa}^{(0)} = 0$$

$$I_{fa}^{(1)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f} \quad (2.18)$$

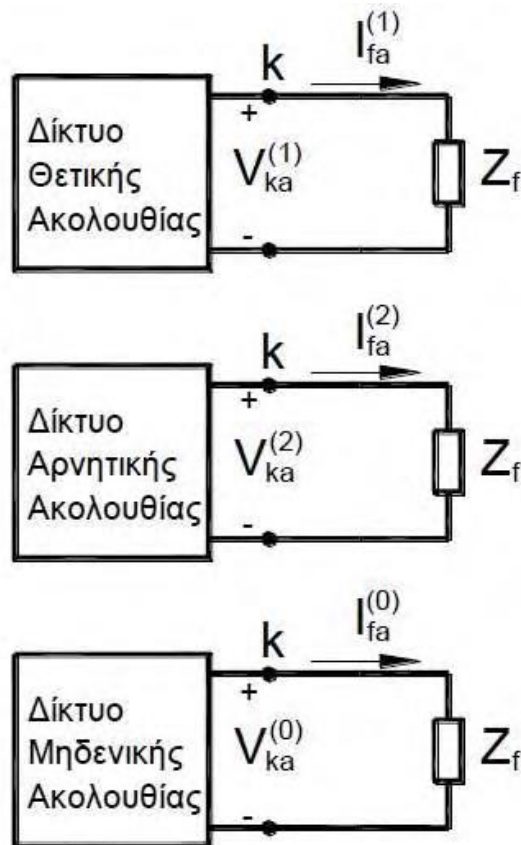
$$I_{fa}^{(2)} = 0$$

$$V_{ka}^{(0)} = 0$$

$$V_{ka}^{(1)} = V_f \frac{Z_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_f} \quad (2.19)$$

$$V_{ka}^{(2)} = 0$$

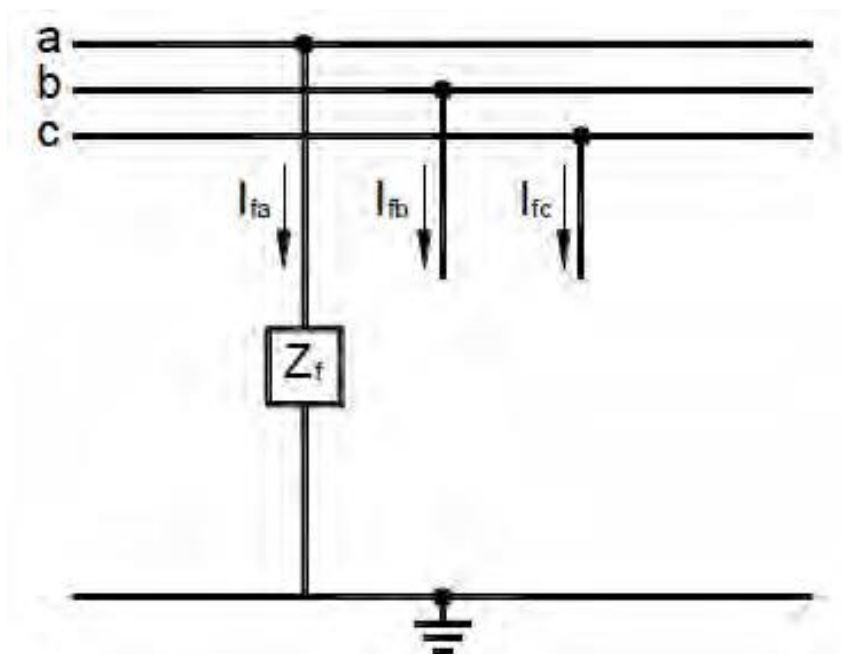
Η τάση θετικής ακολουθίας είναι μηδενική στο σημείο σφάλματος όταν η μηδενική αντίσταση σφάλματος είναι μηδέν, $Z_f = 0$.



Εικόνα 2.4: Δίκτυα ακολουθίας συμμετρικού 3-φασικού σφάλματος

2.2.2 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μονοφασικό βραχυκύκλωμα του αγωγού a με τη γη με αντίσταση σφάλματος Z_f .



Εικόνα 2.5: Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη

Οι συνθήκες για το συγκεκριμένο σφάλμα είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned} I_{fb} &= 0 \\ I_{fc} &= 0 \\ V_{ka} &= Z_f I_{fa} \end{aligned} \tag{2.20}$$

Οι συμμετρικές συνιστώσες των ρευμάτων θα είναι:

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

Από τη μητρική μορφή της σχέσης (2.21) έχουμε:

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{1}{3} I_{fa} \tag{2.22}$$

Με αντικατάσταση προκύπτει:

$$\begin{aligned}
V_{ka}^{(0)} &= -Z_{kk}^{(0)} I_{fa}^{(o)} \\
V_{ka}^{(1)} &= V_f - Z_{kk}^{(1)} I_{fa}^{(0)} \\
V_{ka}^{(2)} &= -Z_{kk}^{(2)} I_{fa}^{(0)}
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Στη συνέχεια, προσθέτοντας κατά μέλη τις εξισώσεις της σχέσης (2.23) προκύπτει:

$$V_{ka} = V_{ka}^{(0)} + V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)} = V_f - \left(Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} \right) I_{fa}^{(0)} = 3Z_f I_{fa}^{(0)} \tag{2.24}$$

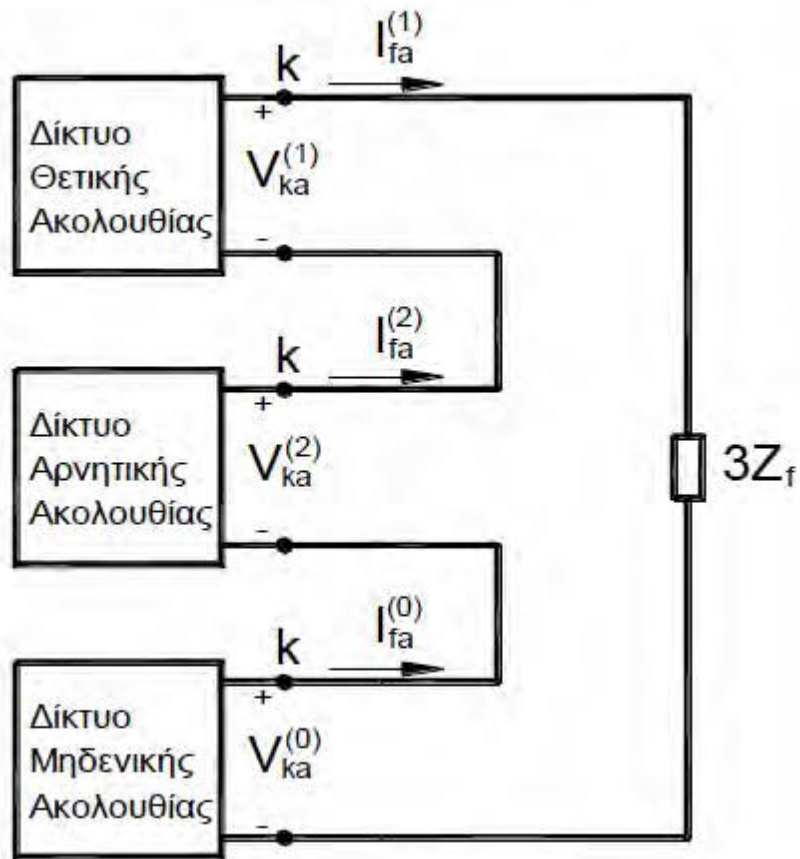
Τελικά, προκύπτει:

$$I_{fa}^{(0)} = I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3Z_f} \tag{2.25}$$

Για να υπολογίσουμε τις τάσεις των ακολουθιακών δικτύων στο σημείο του σφάλματος χρησιμοποιούμε τις σχέσεις (2.23) και (2.25)

$$\begin{aligned}
V_{ka}^{(0)} &= -Z_{kk}^{(0)} I_{fa}^{(o)} = -V_f \frac{Z_{kk}^{(0)}}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3Z_f} \\
V_{ka}^{(1)} &= V_f - Z_{kk}^{(1)} I_{fa}^{(o)} = V_f \frac{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)} + 3Z_f}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3Z_f} \\
V_{ka}^{(2)} &= -Z_{kk}^{(2)} I_{fa}^{(o)} = -V_f \frac{Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + 3Z_f}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Οπότε είναι προφανές ότι μέσω της σύνθετης αντίστασης $3Z_f$ τα ακολουθιακά κυκλώματα είναι συνδεδεμένα εν σειρά μεταξύ τους.



Εικόνα 2.6: Ακολουθιακά κυκλώματα μονοφασικού βραχυκυκλώματος

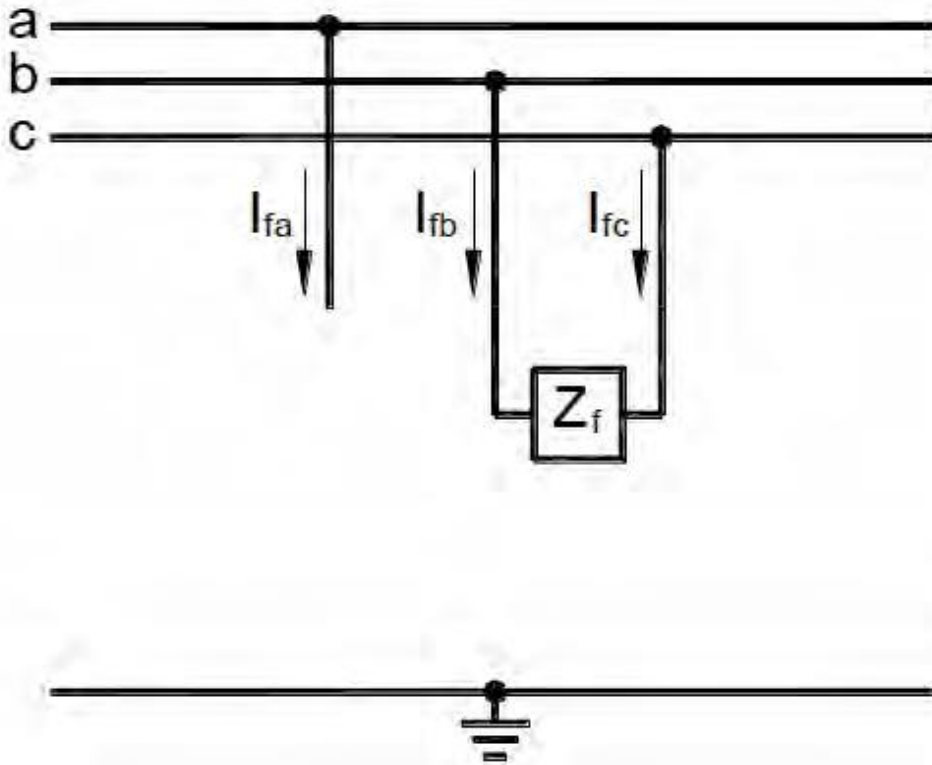
Σε περίπτωση μηδενικής αντίστασης σφάλματος ($Z_f = 0$), τότε οι αρχικές συνθήκες διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 I_{fb} &= 0 \\
 I_{fc} &= 0 \\
 V_{ka} &= Z_f I_{fa}
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

Τα ρεύματα και τις τάσεις στο σημείο του σφάλματος εκφράζονται από τις σχέσεις (2.25) και (2.26) θέτοντας $Z_f = 0$.

2.2.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη μεταξύ των αγωγών b και c .



Εικόνα 2.7: Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη

Οι συνθήκες για το συγκεκριμένο σφάλμα είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned}
 I_{fa} &= 0 \\
 I_{fb} &= -I_{fc} \\
 V_{kb} - V_{kc} &= Z_f I_{fb}
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Σύμφωνα με τις συνθήκες του σφάλματος, τα ρεύματα ακολουθίας δίνονται σε μητρική μορφή ως εξής:

$$\begin{bmatrix} I_{fa}^{(0)} \\ I_{fa}^{(1)} \\ I_{fa}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{fb} \\ -I_{fb} \end{bmatrix} \tag{2.29}$$

Συνεπώς έχουμε:

$$\begin{aligned}
 I_{fa}^{(0)} &= 0 \\
 I_{fa}^{(1)} &= -I_{fa}^{(2)}
 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Είναι προφανές ότι για το διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας δεν συμμετέχει στους υπολογισμούς. Αναλύοντας περαιτέρω τα φασικά μεγέθη της τρίτης εξίσωσης της σχέσης (2.28) σε συμμετρικές συνιστώσες έχουμε τα εξής:

$$\begin{aligned}
V_{kb} - V_{kc} &= Z_f I_{fb} \Rightarrow (V_{kb}^{(1)} + V_{kb}^{(2)}) - (V_{kc}^{(1)} + V_{kc}^{(2)}) = (I_{fb}^{(1)} + I_{fb}^{(2)}) Z_f \Rightarrow \\
(V_{kb}^{(1)} - V_{kc}^{(1)}) + (V_{kb}^{(2)} - V_{kc}^{(2)}) &= (I_{fb}^{(1)} + I_{fb}^{(2)}) Z_f \Rightarrow \\
(a^2 - a)(V_{ka}^{(1)} - V_{ka}^{(2)}) &= (a^2 I_{fa}^{(1)} + a I_{fa}^{(2)}) Z_f
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Οπότε με αντικατάσταση προκύπτει:

$$V_{ka}^{(1)} - V_{ka}^{(2)} = I_{fa}^{(1)} Z_f \tag{2.32}$$

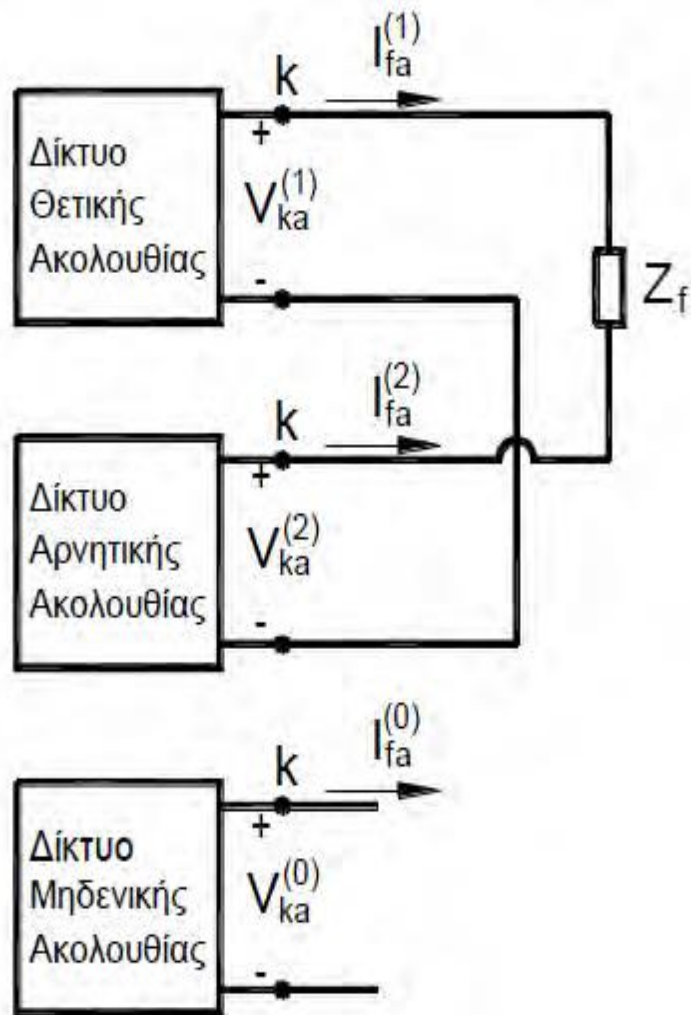
Τέλος αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.28) και (2.10) έχουμε:

$$\begin{aligned}
V_f - I_{fa}^{(1)} Z_{kk}^{(1)} - I_{fa}^{(2)} Z_{kk}^{(2)} &= I_{fa}^{(1)} Z_f \Rightarrow \\
I_{fa}^{(1)} = -I_{fa}^{(2)} &= \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f}
\end{aligned} \tag{2.33}$$

Οι ακολουθιακές τάσεις στο σημείο του σφάλματος είναι:

$$\begin{aligned}
V_{ka}^{(0)} &= -Z_{kk}^{(0)} I_{fa}^{(0)} = 0 \\
V_{ka}^{(1)} &= V_f - Z_{kk}^{(1)} I_{fa}^{(0)} = V_f \frac{Z_{kk}^{(2)} + Z_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f} \\
V_{ka}^{(2)} &= -Z_{kk}^{(2)} I_{fa}^{(0)} = V_f \frac{Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_f}
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η συνδεσμολογία των ακολουθιακών δικτύων για την περίπτωση του διφασικού σφάλματος χωρίς γη. Από τις σχέσεις γίνεται αντιληπτό ότι τα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας συνδέονται παράλληλα μέσω της αντίστασης Z_f ενώ το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο.



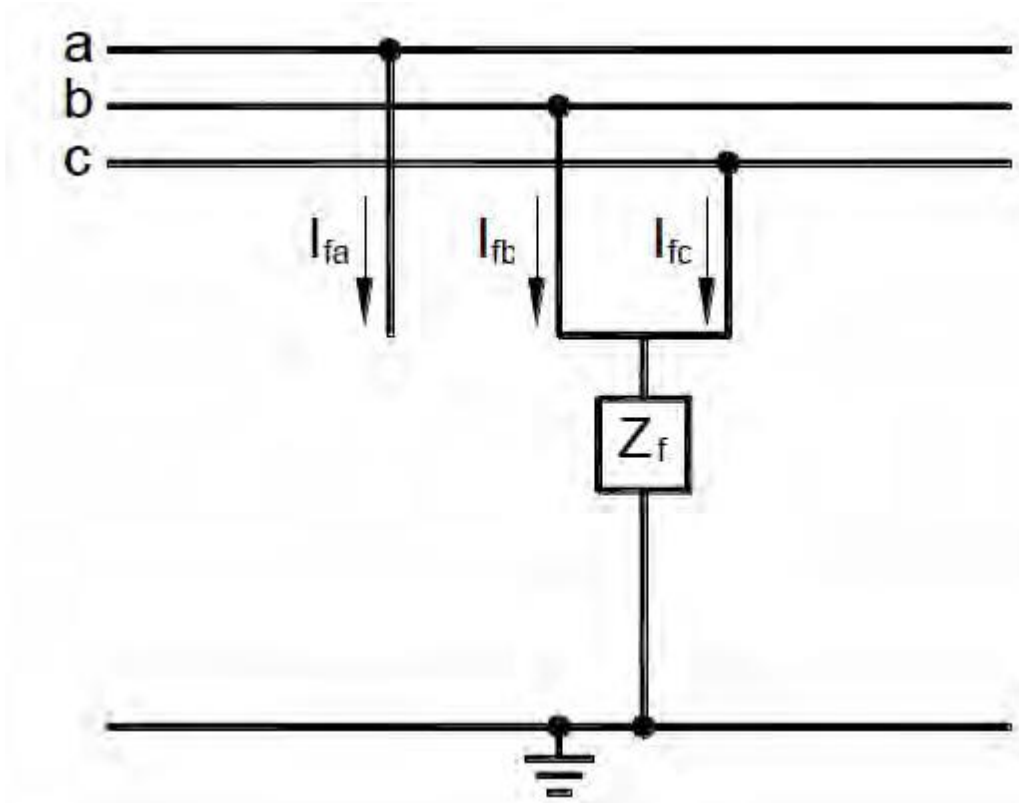
Εικόνα 2.8: Ακολουθιακά κυκλώματα διφασικού σφάλματος χωρίς γη. Όταν $Z_f = 0$, οι αρχικές συνθήκες διαμορφώνονται ως:

$$\begin{aligned}
 I_{fa} &= 0 \\
 I_{fb} &= -I_{fc} \\
 V_{kb} - V_{kc} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

Τα ρεύματα και τις τάσεις στο σημείο του σφάλματος υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.30) και (2.34) θέτοντας $Z_f = 0$.

2.2.4 Διφασικό σφάλμα με γη

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το διφασικό βραχυκύκλωμα με τη γη μεταξύ των αγωγών b,c με αντίσταση σφάλματος Z_f .



Εικόνα 2.9: Διφασικό σφάλμα με γη.

Θα ισχύει:

$$I_{fa} = 0$$

$$V_{kb} = V_{kc} = Z_f (I_{fb} + I_{fc}) \quad (2.36)$$

Το ρεύμα την φάσης a είναι μηδενικό, συνεπώς το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας είναι:

$$I_{fa}^{(0)} = \frac{I_{fb} + I_{fc}}{3} \quad (2.37)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.36) και (2.37) έχουμε για τις τάσεις:

$$V_{kb} = V_{kc} = 3Z_f I_{fa}^{(0)} \quad (2.38)$$

Η μητρική σχέση των συμμετρικών συνιστωσών είναι η εξής:

$$\begin{bmatrix} V_{ka}^{(0)} \\ V_{ka}^{(1)} \\ V_{ka}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_{ka} \\ V_{kb} \\ V_{kc} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Προκύπτει ότι η τάση θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι ίσες

$$V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)} \quad (2.40)$$

Από την πρώτη γραμμή της μητρικής σχέσης (2.39) ισχύει:

$$3V_{ka}^{(0)} = V_{ka} + 2V_{kb} = (V_{ka}^{(0)} + V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)}) + 2(3Z_f I_{fa}^{(0)}) \Rightarrow$$

$$2V_{ka}^{(0)} - 2(3Z_f I_{fa}^{(0)}) = V_{ka}^{(1)} + V_{ka}^{(2)} \quad (2.41)$$

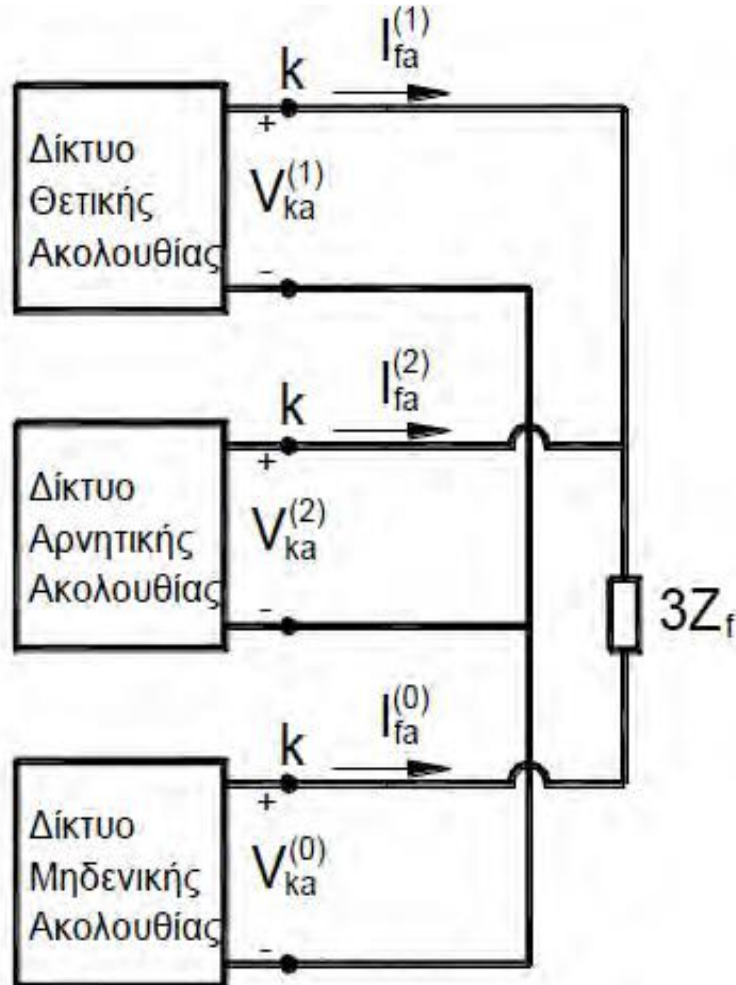
Αντικαθιστώντας την σχέση (2.40) στην παραπάνω εξίσωση και παρατηρώντας ότι $I_{fa} = 0$, προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$V_{ka}^{(0)} - 3Z_f I_{fa}^{(0)} = V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)} \quad (2.42)$$

$$I_{fa}^{(0)} + I_{fa}^{(1)} + I_{fa}^{(2)} = 0 \quad (2.43)$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις (2.42) και (2.43) συμπαίρνουμε ότι τα τρία κυκλώματα ακολουθίας συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους. Το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας συνδέεται με τα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας πρώτα μέσω της σύνθετης αντίστασης βραχυκύκλωσης $3Z_f$.

Τα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας συνδέονται απευθείας. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η συνδεσμολογία των ακολουθιακών κυκλωμάτων.



Εικόνα 2.10: Δίκτυα ακολουθίας διαφασικού σφάλματος με γη

Από την συνδεσμολογία των ισοδύναμων κυκλωμάτων Thevenin προκύπτει:

$$I_{fa}^{(1)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + \frac{Z_{kk}^{(2)}(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f}} \Rightarrow$$

$$I_{fa}^{(1)} = \frac{V_f(Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(1)}(Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f) + Z_{kk}^{(2)}(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)} \quad (2.44)$$

Τα ρεύματα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας υπολογίζονται εφαρμόζοντας διαιρέτες τάσης στα ισοδύναμα κυκλώματα Thevenin:

$$I_{fa}^{(2)} = -I_{fa}^{(1)} \frac{Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \Rightarrow$$

$$I_{fa}^{(2)} = -\frac{V_f(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)}{Z_{kk}^{(1)}(Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f) + Z_{kk}^{(2)}(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)} \quad (2.45)$$

$$I_{fa}^{(0)} = -I_{fa}^{(1)} \frac{Z_{kk}^{(0)}}{Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \Rightarrow$$

$$I_{fa}^{(0)} = -\frac{V_f Z_{kk}^{(0)}}{Z_{kk}^{(1)}(Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f) + Z_{kk}^{(2)}(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)} \quad (2.46)$$

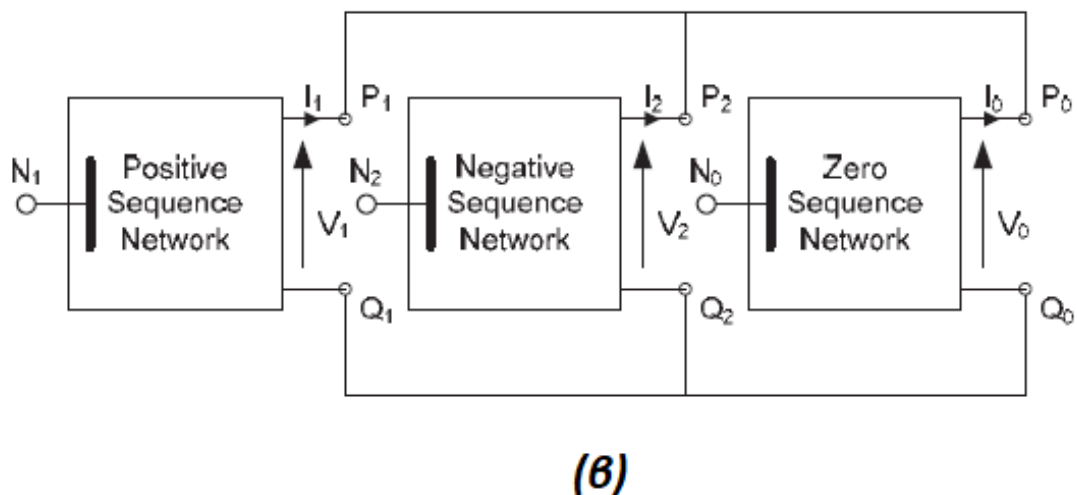
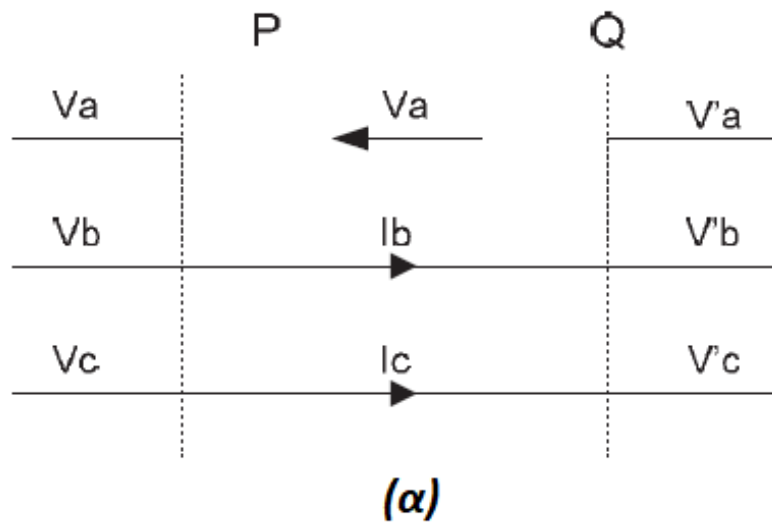
Τέλος,οιακολουθιακές τάσεις θα είναι:

$$V_{ka}^{(0)} = -Z_{kk}^{(0)} I_{fa}^{(0)} = V_f \frac{Z_{kk}^{(0)} Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(1)}(Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f) + Z_{kk}^{(2)}(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)} \quad (2.47)$$

$$V_{ka}^{(1)} = V_{ka}^{(2)} = -Z_{kk}^{(2)} I_{fa}^{(2)} = V_f \frac{(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f) Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(1)}(Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f) + Z_{kk}^{(2)}(Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f)} \quad (2.48)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.45) και (2.48) και για $Z_f = 0$ ή $Z_f \rightarrow \infty$ υπολογίζουμε αμφότερα τα ακολουθιακά ρεύματα και τις τάσεις. Στη δεύτερη περίπτωση το δίκτυο μηδενικής ακολουθίας ανοιχτοκυκλώνεται, οπότε το σφάλμα εκφράζεται όπως τα διφασικά σφάλματα χωρίς γη.

2.2.5 Σφάλμα αποκοπής αγωγού



Εικόνα 2.11: Σφάλμα αποκοπής αγωγού γης, (α) πολυγραμμικό διάγραμμα, (β) ισοδύναμο κύκλωμα

Στις παρακάτω σχέσεις εκφράζονται οι συνθήκες του σφάλματος:

$$I_a = 0$$

$$V_b = V_c = 0$$

$$V_0 = V_1 = V_2 = \frac{1}{3} V_a \quad (2.49)$$

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 = 0$$

2.3 Ταξινόμηση βραχυκυκλωμάτων ανάλογα με τη διάρκεια

Ανάλογα με τη διάρκειά τους, τα βραχυκυκλώματα διακρίνονται σε:

- Υπερταχέα μεταβατικά φαινόμενα. Συνήθως δημιουργούνται από κεραυνούς τα οποία δε μπορούν να ελεγχθούν και απο διακόπτες (υπερτάσεις ή υποτάσεις) που δεν είναι καταστροφικές αλλά δημιουργούν προβλήματα ευστάθειας στο σύστημα. Επίσης τα φαινόμενα αυτά δεν δημιουργούν προβλήματα στις γεννήτριες ούτε στους κινητήρες αλλά ούτε και στα φορτία.
- Ταχέως μεταβατικά φαινόμενα. Δημιουργούνται από την κακοκαιρία (κεραυνοί, πέσιμο δέντρων, δυνατός αέρας οπότε πέσιμο γραμμών, διακοπή γραμμής), ατυχήματα (π.χ., να πέσει μία κολώνα, το πολύ χιόνι που προκαλεί βάρος στην γραμμή κ.α.)
- Βραδέα μεταβατικά φαινόμενα. Λόγω της διάρκειας τους είναι σημαντικό να δωθεί περισσότερο έμφαση σε αυτά τα φαινόμενα. Συνήθως οδηγούν σε σοβαρές διαταραχές μεταβατικής κατάστασης διότι είναι βραχυκυκλώματα σε ζωτικής σημασίας γραμμές μεταφοράς και προκαλούνται από ταλαντώσεις του δρομέα των μηχανών. Οπότε πραγματοποιούμε μελέτες (αποσυγχρονισμού, μεταβατικής ευστάθειας, ρύθμισης διακοπών).

2.4 Συνέπειες βραχυκυκλωμάτων

Οι συνέπειες των βραχυκυκλωμάτων συνοψίζονται στις ακόλουθες:

- Μηχανική και θερμική βλάβη ηλεκτρικού εξοπλισμού.
- Πυρκαγιά σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.
- Μείωση της στάθμης τάσης στο δίκτυο, που οδηγεί σε μείωση της ροπής των ηλεκτρικών κινητήρων, φρεναρίσματος, μειωμένης απόδοσης ή ακόμα και κλίσης τους.
- Απώλεια ατομικών γεννητριών, σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και τμημάτων του ηλεκτρικού συστήματος από το συγχρονισμό και την εμφάνιση ατυχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των ατυχημάτων του συστήματος.
- Ηλεκτρομαγνητική επίδραση στις γραμμές επικοινωνίας, τις επικοινωνίες κ.λπ.

Ένα βραχυκύκλωμα είναι μια ηλεκτρική σύνδεση διαφόρων φάσεων που δεν είναι χαρακτηριστικές για κανονική λειτουργία. Ως αποτέλεσμα, το ρεύμα στον αγωγό αυξάνεται απότομα, πράγμα που έχει αρνητικές συνέπειες. Συνεπώς, θα πρέπει να εξετάζονται το είδος του βραχυκυκλώματος, η ταξινόμηση του φαινομένου, οι πιθανές επιπτώσεις και οι τρόποι αποτροπής τους.

2.5 Τρόποι αντιμετώπισης βραχυκυκλωμάτων

Η κύρια αιτία των βραχυκυκλωμάτων είναι ηλεκτρική συσκευή αποτυχίας μόνωσης.

Τα προβλήματα μόνωσης προκαλούνται από:

- Υπέρταση (ειδικά σε δίκτυα με απομονωμένα ουδέτερα).
- Αστραπές.
- Γύρανση μόνωσης.
- Η μηχανική ζημιά στη μόνωση που περνά κάτω από τις γραμμές των υπερμεγεθών μηχανισμών.

- Κακή συντήρηση του εξοπλισμού.

Συχνά η αιτία βλάβης στο ηλεκτρικό μέρος των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων είναι η βεβαιότητα που διακατέχει το προσωπικό (χειριστές).

Με την χρήση των ηλεκτρονόμων, δηλαδή των ηλεκτρικών διακοπών ισχύος, πετυχαίνουμε την εξάλειψη των σφαλμάτων. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το ρεύμα που ρέει από τις γραμμές προς τη γη και εξαρτάται από τη γείωση των Μ/Σ και των μηχανών. Το ρεύμα ρέει από αγωγούς απευθείας στη γη ή μέσω γειώσεων των Μ/Σ ή των γεννητριών και κινητήρων.

Ο βασικός εξοπλισμός προστασίας υπερέντασης που χρησιμοποιείται στα ΣΗΕ, αλλά και σε βιομηχανικά δίκτυα, είναι:

- 1) Διακόπτες ισχύος
- 2) Ασφάλειες
- 3) Διακόπτες αυτόματης επαναφοράς
- 4) Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης

Η πιο κοινή μορφή προστασίας έναντι των σφαλμάτων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης, όμως δεν πρέπει να είναι το μόνο μέσο προστασίας των συστημάτων έναντι των υπερφορτίσεων, καθώς η προστασία υπερέντασης πρέπει να λειτουργεί αποκλειστικά μόνο σε καταστάσεις βραχυκυκλωμάτων. Οι καταστάσεις υπερέντασης και υπερφορτίσεων αντιμετωπίζονται με τις κατάλληλες ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών

3.1 Ορισμός φασιθέτη

Φασιθέτης (phasor) ονομάζεται ο παραστατικός μιγαδικός αριθμός που χρησιμοποιείται για την περιγραφή ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενων μεγεθών της ίδιας συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα, έστω ένα ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενο μέγεθος που είναι γενικά συνάρτηση και του χώρου και του χρόνου, δηλαδή εξαρτάται από τη θέση και τη χρονική στιγμή:

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi_0(\vec{r}) \cos[\omega t + \varphi(\vec{r})] \quad (3.1)$$

όπου $\psi_0(\vec{r})$ είναι το πλάτος της ταλάντωσης (σε τυχόν σημείο του χώρου), ενώ η γωνία $\varphi(\vec{r})$ (στο εξής απλώς φ) είναι, ως γνωστόν, η σταθερά φάσης της ταλάντωσης.

Παρατηρούμε ότι η ανωτέρω έκφραση μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$\psi(\vec{r}, t) = \text{Re} \left\{ \psi_0(\vec{r}) e^{j(\omega t + \varphi)} \right\} = \text{Re} \left\{ \psi_0(\vec{r}) e^{j\varphi} e^{j\omega t} \right\} = \text{Re} \left\{ \dot{\psi}(\vec{r}) e^{j\omega t} \right\} \quad (3.2)$$

όπου ορίσαμε την ποσότητα:

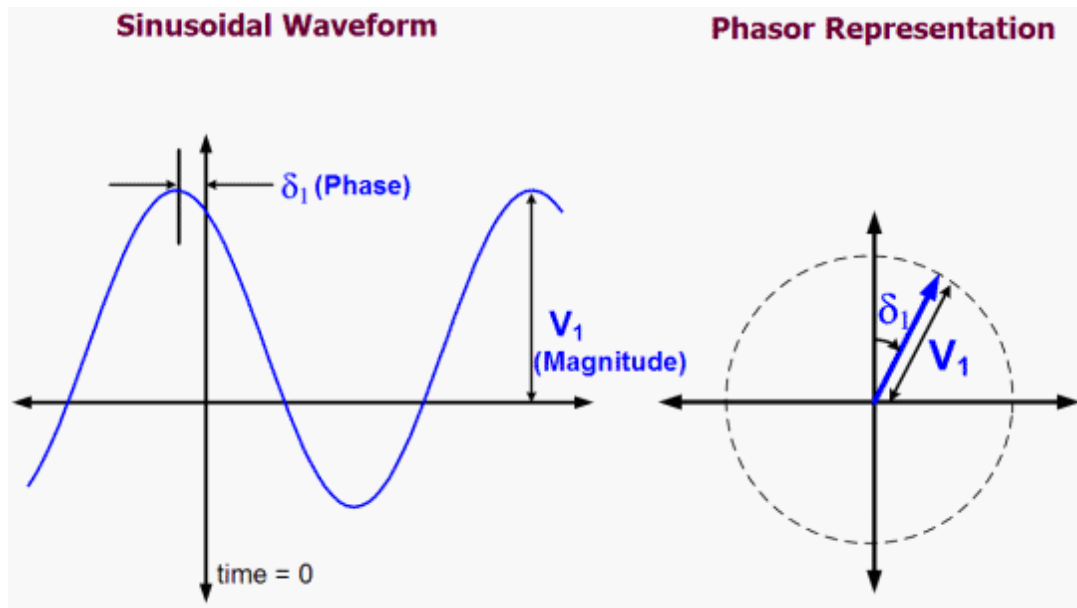
$$\dot{\psi}(\vec{r}) \stackrel{\Delta}{=} \psi_0(\vec{r}) e^{j\varphi} = \psi_0(\vec{r}) \exp[j\varphi] \quad (3.3)$$

Ο μιγαδικός αριθμός $\dot{\psi}(\vec{r})$ είναι ο φασιθέτης του μεγέθους $\psi(\vec{r}, t)$. Όπως είναι γνωστό, η έννοια του φασιθέτη ορίζεται στη θεωρία των εναλλασσομένων ρευμάτων χαμηλής συχνότητας (συχνά και με άλλες ονομασίες όπως παραστατικός μιγαδικός ή στροφέας) και με τη μόνη διαφορά ότι εκεί εφαρμόζεται ως επί το πλείστον σε μεγέθη $\psi(t)$ που δεν εξαρτώνται από τη θέση παρά μόνο από τη χρονική στιγμή (π.χ. τάσεις ή ρεύματα σε ορισμένο σημείο κυκλώματος). Αν όλα τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενα (εναλλασσόμενα) με την ίδια (κυκλική) συχνότητα ω , τότε ο ανωτέρω παράγοντας $\exp[j\omega t]$ είναι κοινός σε όλα. Έτσι τον παραλείπουμε και παριστάνουμε τα εναλλασσόμενα.

Η βασική ιδιότητα των φασιθετών προκύπτει από την παρατήρηση ότι:

$$\frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \text{Re} \left\{ j\omega \psi_0(\vec{r}) \exp[j(\omega t + \varphi)] \right\} = \text{Re} \left\{ j\omega \dot{\psi}(\vec{r}) \exp[j\omega t] \right\} \quad (3.4)$$

η οποία σημαίνει ότι αν $\dot{\psi}(\vec{r})$ είναι ο φασιθέτης του μεγέθους $\psi(\vec{r}, t)$, τότε $j\omega \dot{\psi}(\vec{r})$ είναι ο φασιθέτης της χρονικής παραγώγου $\partial \psi(\vec{r}, t) / \partial t$. Με άλλα λόγια, η χρήση φασιθετών μετατρέπει τη χρονική παραγωγή $\partial / \partial t$ σε πολλαπλασιασμό επί $j\omega$.

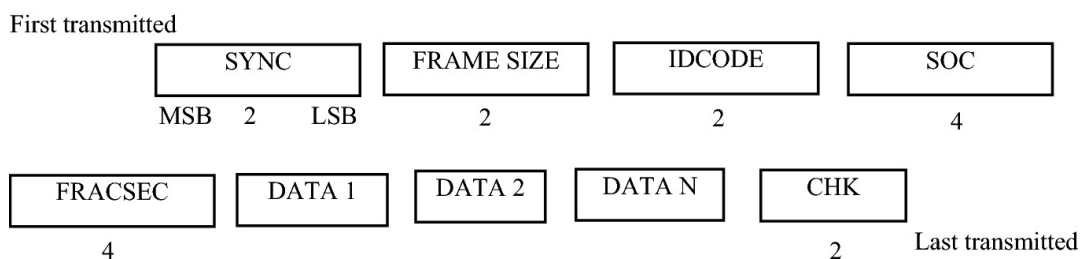


Εικόνα 3.1: Αναπαράσταση φασιθέτη τάσης

3.2 Συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη

Η συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη (synchrophasor) εκφράζεται ως μια οποιαδήποτε μέτρηση η οποία καταγράφεται σε κάποια χρονική στιγμή. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η δομή αρχείων συγχρονισμένων φασιθετών η οποία μάλιστα ταιριάζει και με την δομή COMTRADE, η οποία είναι υπεύθυνη για την συλλογή, ανάλυση και αποστολή των δεδομένων και τέλος για τον τύπο των αρχείων. Το μορφότυπο COMTRADE είναι η θεμελιώδης μορφή αρχείου, το οποίο χρησιμοποιείται από την διεθνή ηλεκτροτεχνική επιτροπή (IEC) και αποτελείται από:

- Ψηφιακούς καταγραφείς σφαλμάτων
- Ψηφιακούς ηλεκτρονόμους
- Διάφορες παραγώγους μεταβατικών δεδομένων του συστήματος



Εικόνα 3.2: Δομή αρχείων PMU

Η μέτρηση αυτή εκφράζει, σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, σε ένα ημιτονοειδές σήμα την φασική γωνία και την ενεργό τιμή. Η συχνότητα παραμένει

σταθερή ενώ η φασική γωνία βρίσκεται μεταξύ του διαστήματος $[-\pi, \pi]$. Πρακτικά, όμως, υπάρχουν διακυμανσεις στην συχνότητα του δικτύου, λόγω μεταβολών της ζήτησης του φορτίου που αυτό καθορίζεται από την ΔΕΗ. Επομένως, για την ακρίβεια της μέτρησης θα πρέπει εκ των προτέρων να ξέρουμε την συχνότητα του δικτύου για τον ορθό υπολογισμό της φασικής γωνίας.

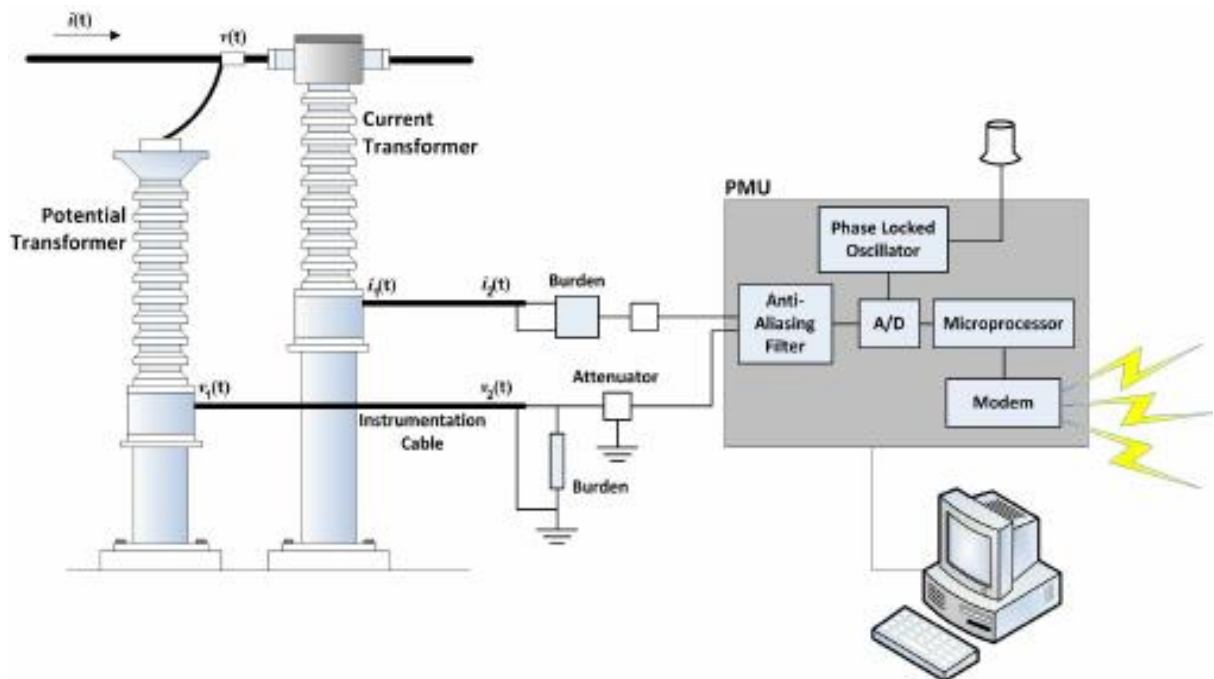
3.3 Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών

Οι μονάδες μέτρησης φασιθετών (Phasor measurement units, PMU) είναι όργανα που συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής, μεσαίας ή υψηλής τάσης και πραγματοποιούν μέτρηση της τάσης, της έντασης και της συχνότητας των γραμμών. Ταυτόχρονα, μετρούν τη γωνία φάσης της κάθε μιας από τις τρεις συνιστώσες τάσης και έντασης αποδίδοντάς τες ως ανύσματα με χαρακτηριστικό μέτρο και διεύθυνση. Αναφορά για τη μέτρηση της φάσης αποτελεί το παγκόσμιο σήμα χρόνου UTC (Universal Time Coordinated), διαθέσιμο σε οποιαδήποτε γεωγραφική θέση μέσω του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης GPS (Global Positioning System). Κάθε μονάδα PMU διαθέτει κεραία GPS με την οποία λαμβάνει τις γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου στον οποίο είναι εγκατεστημένο και τον παγκόσμιο χρόνο UTC, με τη μορφή ενός παλμού κάθε δευτερόλεπτο (1pps-pulsepersecond). Η μονάδα PMU δημιουργεί ένα σήμα αναφοράς μοναδιαίου πλάτους και φάσης συγχρονισμένης με το παλμικό σήμα 1pps του GPS. Ακολουθώς, μετρά τις γωνίες φάσης όλων των ανυσμάτων ως προς την αναφορά αυτή, επομένως οι μετρήσεις της μονάδας PMU, σε όποιον τόπο και αν είναι εγκατεστημένη έχουν την ίδια παγκόσμια αναφορά. Καταλαβαίνουμε ότι η εγκατάσταση μονάδων PMU σε πολλά σημεία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλει στην εκτίμηση της κατάστασης του δικτύου και παρέχει πληροφορίες απαραίτητες για τη σταθερότητα του δικτύου και για την πρόληψη ταλαντώσεων ή διακοπών.

Η αρχική ανάπτυξη, και εφαρμογή των μονάδων PMU στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε με αφορμή την καθολική διακοπή ηλεκτροδότησης που συνέβη στις 14 Αυγούστου 2003 στις ΗΠΑ. Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) δίνει μια ακρίβεια στο χρόνο $\pm 0.5 \mu s$. Η μονάδα PMU παράγει ένα σήμα αναφοράς συγχρονισμένο με το σήμα του GPS. Στη συνέχεια, μετρά τα ανύσματα της τάσης και έντασης του δικτύου και καταγράφει τα πλάτη και τις γωνίες φάσης σε σχέση με την αναφορά αυτή. Επίσης καταγράφεται η συχνότητα και ο ρυθμός μεταβολής της. Οι διάφοροι τύποι μονάδων PMUs από διαφορετικό κατασκευαστή χρησιμοποιούν κοινά πρωτόκολλα για την εξαγωγή δεδομένων, τα IEEE Std 1344 - 1995 και IEEE C37.118-2011.

Μια τυπική μονάδα PMU αποτελείται από:

- φίλτρα αντι-αναδίπλωσης (anti-aliasing filters)
- μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (A/D converter)
- μικροεπεξεργαστή (microprocessor)
- κρυσταλλικό ταλαντωτή
- δέκτη GPS (global positioning system)
- αποδιαμορφωτή (modem)



Εικόνα 3.3: Λειτουργικό διάγραμμα μονάδας PMU

Από τα δευτερεύοντα τυλίγματα του μετασχηματιστή οι τάσεις και τα ρεύματα αποτελούν τις αναλογικές εισόδους. Σε σύγκριση με έναν ηλεκτρονόμο, μια μονάδα pmu μπορεί να παρέχει τις τάσεις και τα ρεύματα σε πολλές τοποθεσίες και ζυγούς του υποσταθμού. Στην συνέχεια απο την λήψη των σημάτων γίνεται επεξεργασία απο τα φίλτρα αντιαναδίπλωσης. Αυτά τα φίλτρα καλούνται βαθυπερατά διότι αποτρέπει την αναδίπλωση του φάσματος στα σήματα και την διαδικασία της δειγματοληψίας και έχει απόκριση συχνότητας που καθορίζεται απο την συχνότητα την οποία κάνουμε την δειγματοληψία. Υπάρχει όμως ένα αξιοσημείωτο μειονέκτημα είναι ότι εγκαθιστούν στα σήματα μια ολίσθηση φάσης εξαρτημένη μόνο απο την συχνότητα η οποία θα πρέπει να αντισταθμιστεί και την διάρκεια υπολογισμού των φασιθετών των μικροεπεξεργαστών. Στην συνέχεια ακολουθεί η δειγματοληψία που πραγματοποιείται στον μετατροπέα του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Η τιμή του σήματος καταγράφεται σε χρονικές στιγμές που καθορίζονται απο την συχνότητα της δειγματοληψίας. Τα σήματα συνεχούς χρόνου γίνονται με αυτόν τον τρόπο διακριτού χρόνου. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι μεταξύ 12 δειγμάτων ανα κύκλο μέχρι 128 δείγματα ανα κύκλο. Πολύ σημαντικό είναι η μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας καθώς βελτιώνει την ακρίβεια του υπολογισμού των μονάδων PMU. Στην συνέχεια ο μικροεπεξεραστής της μονάδας PMU δέχεται για είσοδο τα ψηφιακά συστήματα απο το μετατροπέα και για κάθε σήμα υπολογίζει παράλληλα τον φασιθέτη με χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Για την φάση των φασιθετών χρησιμοποιείται το GPS. Μετά απο τους φασιθέτες που δημιουργεί, υπολογίζει απο την θετική ακολουθία το ρεύμα και την τάση. Στις περισσότερες φορές η μία φάση αρκεί. Ο μικροεπεξεργαστής υπολογίζει και παρουσιάζει στην έξοδο του φασιθέτη την συχνότητα και τον ρυθμό μεταβολής. Κάθε μέτρηση πρέπει να έχει και την χρονική σφραγίδα απο το GPS. Τέλος ο διαποδιαμορφωτής (modem) ή ο δρομολογητής (router) αποτελούν την διεπαφή του επικοινωνιακού συστήματος. Οι μετρήσεις που

παράγονται από μία μονάδα PMU μπορούν να αποθηκευτούν σε τοπικό επίπεδο ή να μεταδίδονται μέσω δικτύου Ethernet ή οπτικής ίνας σε έναν κεντρικό σταθμό.

3.4 Εφαρμογές Μονάδας Μέτρησης Φασιθετών

Οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών (synchronized phasor measurements) έχουν ωριμάσει αρκετά από την εισαγωγή τους στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και χρησιμοποιούνται πλέον ολοένα και περισσότερο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι πρότινος, η χρήση τους αφορούσε κυρίως εφαρμογές απλής εποπτείας και οπτικοποίησης των Σ.Η.Ε, βελτίωσης του μοντέλου κατάστασης - σε σχέση με αυτό που προκύπτει από τους συμβατικούς εκτιμητές κατάστασης και την ανάλυση διαταραχών. Με την ενσωμάτωση όμως της τεχνολογίας των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών σε υπάρχουσες ψηφιακές συσκευές προστασίας και ελέγχου, οι οποίες βρίσκονται διάσπαρτες σε κάθε Σ.Η.Ε, και την υιοθέτηση σύγχρονων τεχνικών επικοινωνίας σε υποσταθμούς υψηλής και υπερυψηλής τάσης καθίσταται πλέον δυνατή η ανάπτυξη προηγμένων εφαρμογών προστασίας, ελέγχου και εποπτείας στα Σ.Η.Ε σε πραγματικό και μη πραγματικό χρόνο.

Για την ανάπτυξη των εφαρμογών, χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι, οι οποίοι έχουν δυνατότητα συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών.

- **Εκτίμηση παραμέτρων γραμμής μεταφοράς και θέσης σφάλματος.** Οι παραδοσιακές τεχνικές υπολογισμού των παραμέτρων μιας γραμμής μεταφοράς μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές, ιδιαίτερα για τη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας. Οι αποκλίσεις αυτές μεταφράζονται σε λανθασμένες ρυθμίσεις των H/N προστασίας, των ανιχνευτών της θέσης του σφάλματος (fault locators) κτλ. Οι υπολογισμοί των παραμέτρων της γραμμής που βασίζονται σε συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών και στα δύο άκρα της, παρέχουν με σχετικά απλό τρόπο πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα. Ταυτόχρονα, γίνεται εύκολος και ακριβής ο υπολογισμός της θέσης του σφάλματος.
- **Σχήμα εφεδρικής προστασίας γραμμής μεταφοράς έναντι σφάλματος γης υψηλής αντίστασης.** Το προτεινόμενο σχήμα, που βασίζεται σε ανταλλαγή χρονικά “σφραγισμένων” (time-stamped) ρευμάτων μεταξύ των H/N στο τοπικό και στο απομακρυσμένο άκρο μιας γραμμής μεταφοράς, ξεπερνά τους περιορισμούς σε κάλυψη αντίστασης σφάλματος R_f των παραδοσιακών σχημάτων προστασίας που χρησιμοποιούν σύγκριση γωνίας (phase comparison schemes). Το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας ανιχνεύει σφάλματα γης με αντίσταση σφάλματος μεγαλύτερη από 300 Ω, μέσα σε 100 ms το αργότερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Εκτίμηση Κατάστασης

Οι μαθηματικοί Gauss και Legendre το 1800 εισήγαγαν την θεωρία εκτίμησης κατάστασης. Το βασικό νόημα της θεωρίας αυτής είναι οι μεταβλητές κατάστασης να ρυθμίζονται με τον βέλτιστο τρόπο μέσω ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων γνωστή και ως μέθοδος σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (LS) το οποίο χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στις μέρες μας στον τομέα της κλασικής στατιστικής. Η μέθοδος (LS) είναι η βέλτιστη για την επίλυση της γκαουσιανής κατανομής σφαλμάτων.

4.1 Καταστάσεις λειτουργίας

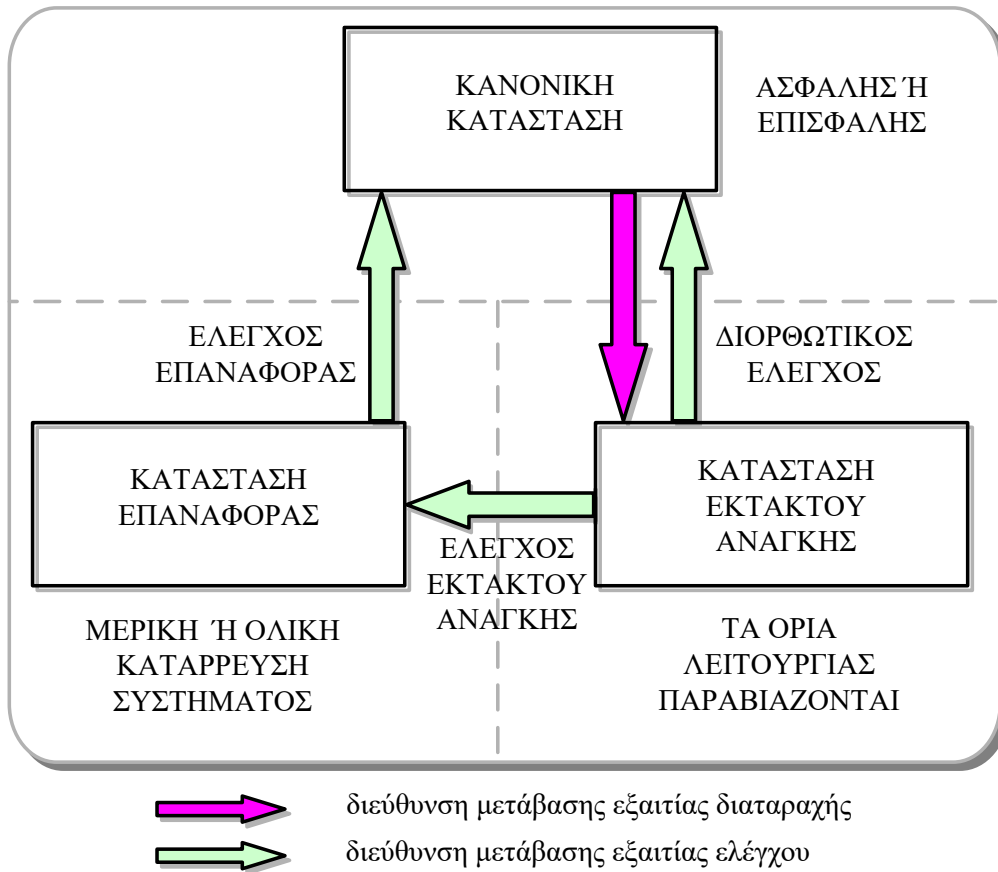
Το μοντέλο του δικτύου καθώς και οι φασιθέτες τάσεων σε κάθε ζυγό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούνται γνωστές τότε μπορούμε να υπολογίσουμε σε οποιοδήποτε χρονικό σημείο τις συνθήκες που λειτουργεί το σύστημα. Στατική κατάσταση λειτουργίας έχουμε όταν το σύνολο των τάσεων των ζυγών καθορίσουν την κατάσταση μόνιμης λειτουργίας. Το σύστημα λοιπόν μπορεί να περιέλθει σε 3 καταστάσεις λειτουργίας:

- Κανονική
- Έκτακτη
- Επαναφοράς

Όταν δεν παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας και όλα τα φορτία έχουν την επιθυμητή ισχύ τότε λέμε ότι το σύστημα είναι σε κανονική κατάσταση. Η κανονική κατάσταση λειτουργίας χωρίζεται σε:

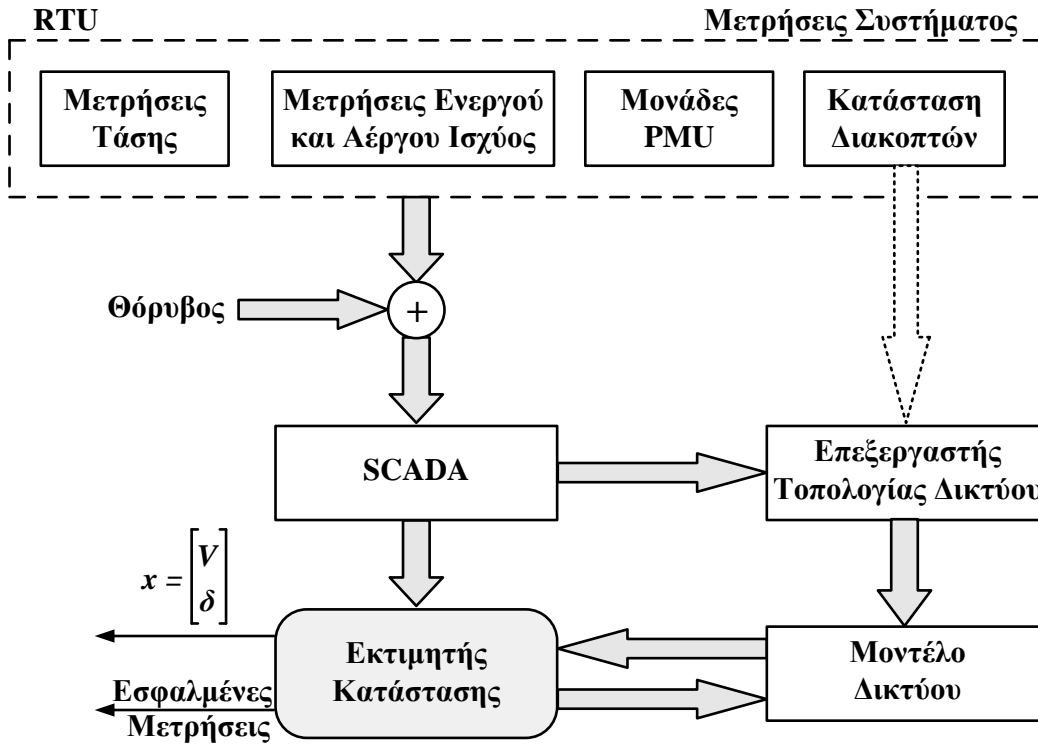
- Ασφαλής
- Επισφαλής

Οι περιορισμοί λειτουργίας συνήθως βρίσκονται στα όρια των τάσεων των ζυγών και στα όρια των ροών ισχύος στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα στην κανονική κατάσταση εάν παρουσιαστεί μία διαταραχή, θα εξασφαλιστεί η λειτουργία του σταθερή, ενώ στην δεύτερη κατάσταση, εάν προκύψουν διαταραχές στο δίκτυο, θα πέσει στην κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Ένα σύστημα ακόμη πέφτει στην κατάσταση έκτακτης ανάγκης εάν παραβιαστούν οι περιορισμοί λειτουργίας του. Οι χειριστές των συνεργείων μπορούν με διορθωτικές κινήσεις να εξασφαλίσουν ξανά την κανονική κατάσταση, αλλιώς θα πέσει το σύστημα στην 3^η περίπτωση, την κατάσταση επαναφοράς στην κατάρρευση δηλαδή του συστήματος. Οι ενέργειες των μηχανικών συντήρησης περιλαμβάνουν αποσύνδεση των φορτίων των γραμμών και του εξοπλισμού για να πραγματοποιηθεί η ευστάθεια του συστήματος και συνάμα η ικανοποίηση των περιορισμών λειτουργίας. Στην παρακάτω εικόνα (4.1) διακρίνουμε τον παραπάνω ισχυρισμό μας.



Εικόνα 4.1: Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Ουσιαστικά, η εκτίμηση κατάστασης είναι ένα φίλτρο ανάμεσα στις μετρήσεις καθώς και απο όλες τις εφαρμογές. Για να προσομοιώσουμε το ηλεκτρικό σύστημα χρησιμοποιήσαμε το μονοφασικό κύκλωμα της θετικής ακολουθίας. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι το σύστημα να λειτουργεί ομαλά δηλαδή στην μόνιμη κατάσταση, θα πρέπει όλα τα φορτία των ζυγών και συνάμα οι γραμμές μεταφοράς να είναι τριφασικές και συμμετρικές.



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα λειτουργίας εκτίμησης κατάστασης

4.2 Μοντέλο Μετρήσεων και Υποθέσεις

Ακολούθως παρουσιάζεται το μοντέλο των μετρήσεων πάνω στις οποίες εφαρμόζεται η μέθοδος των σταθμικών ελαχίστων τετραγώνων που περιγράφηκε προηγουμένως. Έστω το διάνυσμα z που περιέχει όλες τις μετρήσεις:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (4.1)$$

όπου $h^T = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]$ είναι το διάνυσμα των συναρτήσεων μέτρησης (οι μη γραμμικές συναρτήσεις που συσχετίζουν τις μετρήσεις με το διάνυσμα κατάστασης), $x^T = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ είναι το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος και $e^T = [e_1, e_2, \dots, e_m]$ είναι το διάνυσμα σφαλμάτων των μετρήσεων.

Σχετικά με τις στατιστικές ιδιότητες των σφαλμάτων των μετρήσεων γίνονται οι εξής υποθέσεις:

- $E(e_i) = 0, i = 1, \dots, m$
- $E(e_i e_j) = 0, \forall i \neq j$
- $Cov(e) = E(ee^T) = R = diag(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2)$

Ο σταθμισμένος εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων καλείται να ελαχιστοποιήσει την παρακάτω συνάρτηση:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x)] \quad (4.2)$$

Για να είναι ελάχιστη η $J(x)$, πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες πρώτης τάξης, δηλαδή:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x)] = 0 \quad (4.3)$$

όπου $H(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x}$.

Ο πίνακας $H(x)$ (λέγεται και Ιακωβιανή μήτρα) είναι η παράγωγος του διανύσματος των συναρτήσεων μέτρησης $h(x)$ ως προς το διάνυσμα κατάστασης και μπορεί να γραφεί σε αναλυτική μορφή:

$$H(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m}{\partial x_1} & \frac{\partial h_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_m}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Η μη γραμμική συνάρτηση $g(x)$ μπορεί να αναπτυχθεί σε σειρά Taylor γύρω από το διάνυσμα κατάστασης x^k :

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k) \cdot (x - x^k) + \dots = 0 \quad (4.5)$$

Αγνοώντας τους όρους υψηλότερης τάξης, οδηγούμαστε στη λύση με την επαναληπτική μέθοδο Gauss-Newton:

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1} \cdot g(x^k) \quad (4.6)$$

όπου k είναι ο δείκτης επανάληψης και x^k είναι το διάνυσμα κατάστασης στην επανάληψη k . Επίσης:

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot H(x^k) \quad (4.7)$$

$$g(x^k) = -H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot (z - h(x^k))$$

Ο πίνακας $G(x)$ ονομάζεται πίνακας κέρδους. Είναι αραιός, θετικά ορισμένος και συμμετρικός, υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Ο $G(x)$ συνήθως δεν αντιστρέφεται κατά την επίλυση, αλλά παραγοντοποιείται σε άνω και κάτω τριγωνικό πίνακα (LU παραγοντοποίηση) και κατόπιν το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται με εμπρός και πίσω αντικατάσταση σε κάθε επανάληψη k .

Επομένως, η λύση της εκτίμησης κατάστασης με χρήση της μεθόδου σταθμικών ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζεται με την επαναληπτική διαδικασία:

$$G(x^k)\Delta x^{k+1} = H^T \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x^k)] \quad (4.8)$$

όπου $\Delta x^{k+1} = x^{k+1} - x^k$.

4.3 Αλγόριθμος Εκτίμησης Κατάστασης Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων

Στο σημείο αυτό περιγράφεται με λεπτομέρεια ο επαναληπτικός αλγόριθμος για το πρόβλημα εκτίμησης κατάστασης WLS. Η επίλυση των κανονικών εξισώσεων είναι επαναληπτική, επομένως απαιτείται μια αρχικοποίηση του διανύσματος κατάστασης x^0 . Για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η αρχικοποίηση του διανύσματος κατάστασης γίνεται δίνοντας στα μέτρα τάσεων μοναδιαία ανά μονάδα τιμή και στις γωνίες των τάσεων μηδενικές τιμές μετρούμενες σε ακτίνια. Ακολουθούν τα βήματα του αλγορίθμου:

1. Εκκίνηση επαναλήψεων και αρχικοποίηση του δείκτη επανάληψης $k = 0$.
2. Αρχικοποίηση του διανύσματος κατάστασης στην τιμή x^0 (συνήθως επίπεδο διάνυσμα).
3. Υπολογισμός του πίνακα κέρδους $G(x^k)$.
4. Υπολογισμός του δεξιού μέλους $t^k = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot (z - h(x^k))$
5. Παραγοντοποίηση του $G(x^k)$ και επίλυση για την εύρεση του Δx^{k+1} .
6. Έλεγχος για σύγκλιση, δηλαδή αν $\max |\Delta x^{k+1}| \leq \varepsilon$, όπου ε το όριο ανοχής.
7. Αν υπάρχει σύγκλιση, τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται. Αν δεν υπάρχει σύγκλιση, τότε: $x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$, $k = k + 1$ και επιστροφή στο βήμα 3.

Ο παραπάνω αλγόριθμος περιλαμβάνει τους εξής υπολογισμούς σε κάθε επανάληψη k :

1. Υπολογισμός του $t^k = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot (z - h(x^k))$,
 - Υπολογισμός της συνάρτησης μετρήσεων $h(x^k)$
 - Δημιουργία της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων $H(x^k)$
2. Υπολογισμός του πίνακα κέρδους $G(x^k)$ και επίλυση των Κανονικών Εξισώσεων.

- Δημιουργία του πίνακα κέρδους $G(x^k)$
- Παραγοντοποίηση LU του $G(x^k)$
- Εφαρμογή της εμπρός και πίσω αντικατάστασης για την εύρεση του Δx^{k+1}

4.4 Μη γραμμική συνάρτηση μετρήσεων

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι μετρήσεων είναι τα μέτρα τάσεων ζυγών, οι ενεργές και άεργες εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς, καθώς και οι ενεργές και άεργες ροές ισχύος μεταξύ των ζυγών. Ακόμη, υπάρχουν μετρήσεις γωνιών τάσεων ζυγών και μετρήσεις μέτρων ρευμάτων γραμμών. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης του διανύσματος x^k , σε πολικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Εάν πρόκειται για πολικό σύστημα συντεταγμένων, τότε σε ένα ΣΗΕ που έχει N ζυγούς, το διάνυσμα κατάστασης x^k θα έχει $2N-1$ στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά θα είναι τα όλα τα μέτρα τάσεων των ζυγών του δικτύου και όλες οι γωνίες πλην αυτής του ζυγού αναφοράς η οποία θεωρείται γνωστή και ίση με το μηδέν. Επομένως, το διάνυσμα κατάστασης x^k θα είναι:

$$x^k = [\delta_2, \dots, \delta_N, V_1, V_2, \dots, V_N]^T \quad (4.9)$$

4.5 Εξισώσεις συμβατικών μετρήσεων

Η Ιακωβιανή μήτρα για την κλασική εκτίμηση κατάστασης σε υβριδική μορφή είναι:

Ας θεωρήσουμε το γενικευμένο ζυγό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η γραμμή μεταξύ των ζυγών i και j παριστάνεται με το ισοδύναμο μοντέλο "π". Στο ζυγό i είναι επίσης συνδεδεμένη μία εγκάρσια μιγαδική αγωγιμότητα y_i , που παριστάνει οποιοδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων. Η γεννήτρια που συνδέεται στον ζυγό i εγχέει ρεύμα \tilde{I}_{Gi} , ενώ το αντίστοιχο φορτίο \tilde{S}_{Di} απορροφά ρεύμα \tilde{I}_{Di} . Οι τάσεις των ζυγών i και j , συμβολίζονται με V_i και V_j αντίστοιχα. Η μιγαδική αγωγιμότητα σειράς της γραμμής $i-j$ συμβολίζεται με y_{ij} και οι αντίστοιχες εγκάρσιες με y_{sij} και y_{sjj} .

Επίσης, ισχύουν:

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (4.10)$$

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \quad (4.11)$$

$$y_{sjj} = g_{sjj} + jb_{sjj} \quad (4.12)$$

$$y_i = g_i + jb_i \quad (4.13)$$

Με g_{ij} , g_{sij} , g_{sji} συμβολίζονται οι ενεργές αγωγιμότητες και με b_{ij} , b_{sij} , b_{sji} οι άεργες αγωγιμότητες των εν σειρά και εγκάρσιων μιγαδικών αγωγιμοτήτων της γραμμής, ενώ με g_i και b_i η ενεργός αγωγιμότητα και η άεργος αγωγιμότητα του σταθερού εγκάρσιου φορτίου στον ζυγό i , αντίστοιχα.

Το διάνυσμα κατάστασης x απαρτίζεται είτε από της φασικές γωνίες τάσεων δ_i όλων των ζυγών, εκτός του ζυγού αναφοράς, και τα μέτρα των τάσεων των ζυγών V_i , είτε από το πραγματικό μέρος E_i όλων των ζυγών και το φανταστικό μέρος F_i της μιγαδικής τάσης όλων των ζυγών, εκτός του ζυγού αναφοράς, όπου $i=1, \dots, N$ και N ο αριθμός των ζυγών. Οι εξισώσεις των συμβατικών μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

$$P_i = V_i^2 \sum_{j \in a(i)} (g_{ij} + g_{sij}) + V_i^2 g_i - V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \alpha_{ij} \quad (4.14)$$

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{ij} + g_{sij}) - V_i V_j \alpha_{ij} \quad (4.15)$$

$$Q_i = -V_i^2 \sum_{j \in a(i)} (b_{ij} + b_{sij}) - V_i^2 b_i - V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \beta_{ij} \quad (4.16)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ij} + b_{sij}) - V_i V_j \beta_{ij} \quad (4.17)$$

όπου $\alpha_{ij} = g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)$ και $\beta_{ij} = g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)$.

4.6 Ιακωβιανή Μήτρα Μετρήσεων H

Η Ιακωβιανή μήτρα για την κλασική εκτίμηση κατάστασης σε υβριδική μορφή είναι:

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial V_i}{\partial \delta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta} & \frac{\partial P_i}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας είναι οι μερικές παράγωγοι των μετρήσεων ως προς τις μεταβλητές κατάστασης και δίνονται αναλυτικά παρακάτω:

- **Μετρήσεις μέτρου τάσεων**

$$\begin{aligned}\frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} &= 0, \text{ για κάθε ζυγό } i \\ \frac{\partial V_i}{\partial \delta_j} &= 0, \text{ για κάθε ζυγό } i \text{ και κάθε ζυγό } j \\ \frac{\partial V_i}{\partial V_i} &= 1, \text{ για κάθε ζυγό } i \\ \frac{\partial V_i}{\partial V_j} &= 0, \text{ για κάθε ζυγό } i \text{ και κάθε ζυγό } j\end{aligned}\quad (4.19)$$

- **Μετρήσεις έγχυσης ενεργού ισχύος**

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= V_i \sum_{j \in a(i)} V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) = V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \cdot \beta_{ij} \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} &= -V_i V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) = -V_i V_j \cdot \beta_{ij} \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_i} &= 2V_i \sum_{j \in a(i)} (g_{ij} + g_{sij}) + 2V_i g_i - \sum_{j \in a(i)} V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) = \\ &= 2V_i \sum_{j \in a(i)} (g_{ij} + g_{sij}) + 2V_i g_i - \sum_{j \in a(i)} V_j \cdot \alpha_{ij} \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_j} &= -V_i (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) = -V_i \cdot \alpha_{ij}\end{aligned}\quad (4.20)$$

- **Μετρήσεις έγχυσης αέργου ισχύος**

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= -V_i \sum_{j \in a(i)} V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) = -V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \cdot \alpha_{ij} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} &= V_i V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) = V_i V_j \cdot \alpha_{ij} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} &= -2V_i \sum_{j \in a(i)} (b_{ij} + b_{sij}) - 2V_i b_i - \sum_{j \in a(i)} V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) = \\ &= -2V_i \sum_{j \in a(i)} (b_{ij} + b_{sij}) - 2V_i b_i - \sum_{j \in a(i)} V_j \cdot \beta_{ij} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} &= -V_i (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) = -V_i \cdot \beta_{ij}\end{aligned}\quad (4.21)$$

- **Μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος**

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} &= V_i V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) = V_i V_j \cdot \beta_{ij} \\
\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} &= -V_i V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) = -V_i V_j \cdot \beta_{ij} \\
\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} &= -V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) + 2V_i (g_{ij} + g_{sij}) = \\
&= -V_j \alpha_{ij} + 2V_i (g_{ij} + g_{sij}) \\
\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} &= -V_i (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) = -V_i \alpha_{ij}
\end{aligned} \tag{4.22}$$

- **Μετρήσεις ροής αέργου ισχύος**

$$\begin{aligned}
\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} &= -V_i V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) = -V_i V_j \cdot \alpha_{ij} \\
\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} &= V_i V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) = V_i V_j \cdot \alpha_{ij} \\
\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} &= -V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2V_i (b_{ij} + b_{sij}) = \\
&= -V_j \beta_{ij} - 2V_i (b_{ij} + b_{sij}) \\
\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} &= -V_i (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) = -V_i \beta_{ij}
\end{aligned} \tag{4.23}$$

4.7 Μήτρα κέρδους G

Η μήτρα κέρδους G σχηματίζεται από την Ιακωβιανή μήτρα H και τη διαγώνια μήτρα R

$$G(x^k) = H^T \cdot R^{-1} \cdot H \tag{4.24}$$

Η μήτρα G είναι αραιή και συμμετρική και έχει μη αρνητικές ιδιοτιμές. Για πλήρως παρατηρήσιμα δίκτυα είναι θετικά ορισμένη.

4.8 Παραγοντοποίηση LU

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μήτρα κέρδους G μπορεί να αναλυθεί ως γινόμενο δύο τριγωνικών μητρών L και U. Η μήτρα L είναι κάτω τριγωνική, ενώ η μήτρα U είναι άνω τριγωνικής. Επομένως, θα ισχύει:

$$G = L \cdot U \tag{4.25}$$

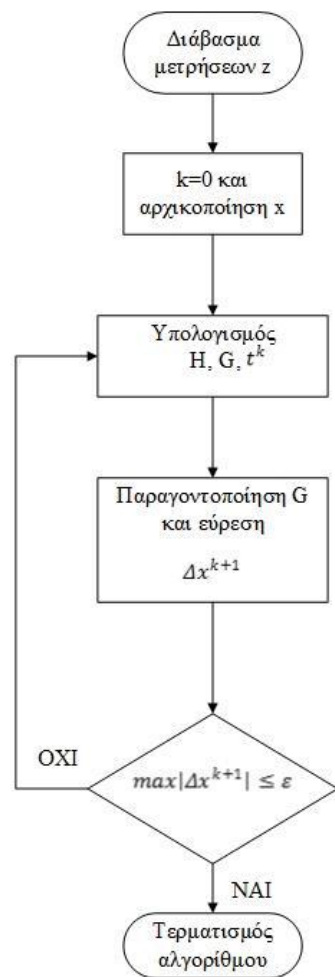
Αφού η G είναι πλέον παραγοντοποιημένη, το επόμενο βήμα είναι η επίλυση της επαναληπτικής εξίσωσης:

$$L \cdot U \cdot \Delta x^k = t^k \quad (4.26)$$

Η λύση βρίσκεται σε δύο βήματα και δεδομένης της αραιότητας των μητρών L και U υπολογίζεται πολύ αποδοτικά. Τα βήματα είναι:

1. Ευθεία αντικατάσταση: $U \cdot \Delta x^k = u$
2. Αντίστροφη αντικατάσταση: $L \cdot u = t^k$

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του γενικού αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης:



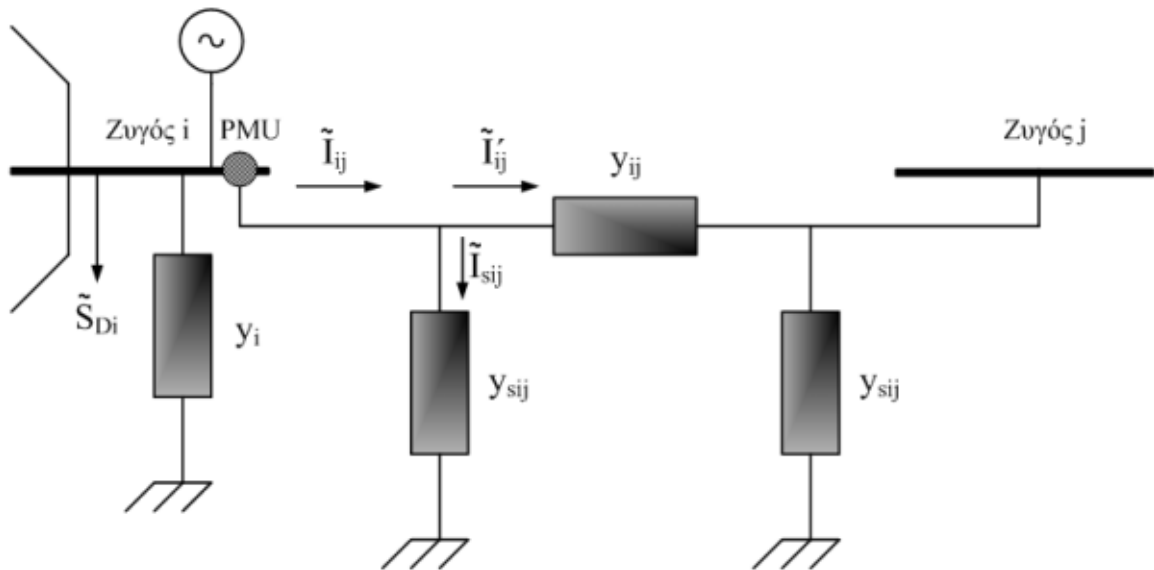
Εικόνα 4.3: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης

4.9 Διευρυμένος εκτιμητής κατάστασης λαμβάνοντας υπόψη μετρήσεις μονάδων μέτρησης φασιθετών PMU

Με σκοπό την παρουσίαση του διευρυμένου εκτιμητή κατάστασης με μετρήσεις μονάδων PMU, θεωρούμε και πάλι τον γενικευμένο ζυγό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η γραμμή μεταφοράς (ή αλλιώς κλάδος) μεταξύ των ζυγών i

και j ενός δικτύου παριστάνεται με το ισοδύναμο μοντέλο «Π». Στο ζυγό i είναι συνδεδεμένη μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα y_i που παριστάνει ένα εγκάρσιο στοιχείο ή ένα φορτίο σταθερής αγωγιμότητας. Στον ίδιο ζυγό έχει συνδεθεί μια γεννήτρια που εγχύει ρεύμα \tilde{I}_G και ένα φορτίο σταθερής ισχύος \tilde{S}_{D_i} που απορροφά ρεύμα \tilde{I}_{D_i} .

Η τάση του ζυγού i συμβολίζεται με \tilde{V}_i και η τάση του ζυγού j με \tilde{V}_j . Το ρεύμα που διαρρέεται μεταξύ του ζυγού i και του ζυγού j συμβολίζεται με \tilde{I}_{ij} . Στην αρχή της γραμμής, στο ζυγό i , έχει τοποθετηθεί μια μονάδα PMU που μετρά την τάση \tilde{V}_i και το ρεύμα \tilde{I}_{ij} .



Εικόνα 4.4: Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ

Μία μονάδα PMU παρέχει απευθείας δύο τύπους μετρήσεων, τον φασιθέτη τάσης του ζυγών στον οποίο εγκαθίσταται και τους φασιθέτες ρεύματος όλων ή ορισμένων γραμμών που συνδέονται με το ζυγό αυτό.

Στην αρχή της γραμμής θεωρούμε ότι έχει τοποθετηθεί μία μονάδα PMU, η οποία μετράει το φασιθέτη τάσης του ζυγού i και το φασιθέτη ρεύματος \tilde{I}_{ij} της γραμμής μεταξύ των ζυγών i και j , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Όλοι οι φασιθέτες μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης σε καρτεσιανή μορφή.

Το ρεύμα \tilde{I}_{ij} , αναλύεται σε δύο ρεύματα, τα \tilde{I}_{si} και \tilde{I}'_{ij} , αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff (KCL), θα ισχύει:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{I}_{si} + \tilde{I}'_{ij} \quad (4.27)$$

Τα δύο ρεύματα στο δεξί μέλος της εξίσωσης (4.27), μπορούν να αναλυθούν συναρτήσει των τάσεων των ζυγών και των χαρακτηριστικών της γραμμής, ως ακολούθως:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{V}_{ij} y_{sij} + (\tilde{V}_i - \tilde{V}_j) y_{ij} = \tilde{V}_i (y_{sij} + y_{ij}) - \tilde{V}_j y_{ij} \quad (4.28)$$

Η αναλυτική έκφραση του ρεύματος γραμμής i-j σε καρτσιανές συντεταγμένες θα είναι:

$$\tilde{I}_{ij} = I_{ij,r} + jI_{ij,i} \quad (4.29)$$

όπου:

$$I_{ij, \text{Re}} = \left\{ V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right] \right\} \quad (4.30)$$

$$I_{ij, \text{Im}} = \left\{ V_i \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \right] \right\} \quad (4.31)$$

Το διευρυμένο μοντέλο μετρήσεων του εκτιμητή κατάστασης θα δίνεται από τη σχέση $z = h(x) + e$ όπου z είναι το διάνυσμα των μετρήσεων διαστάσεων $(m \times 1)$, x το $(n \times 1)$ διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης, $n = 2N$, $h(x)$ και e τα διανύσματα των εξισώσεων μέτρησης και θορύβου μετρήσεων διαστάσεων $(m \times 1)$, το καθένα, και N ο αριθμός των ζυγών του συστήματος. Η επίλυση γίνεται και πάλι χρησιμοποιώντας το επαναληπτικό σχήμα $G(x^k) \Delta x^k = H^T(x^k) R^{-1} \Delta z^k$, όπου k ο δείκτης της επανάληψης, x^k η λύση κατά την επανάληψη k , $\Delta x^k = x^{k+1} - x^k$, $\Delta z^k = z - h(x^k)$, $H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$ και $G(x^k) = H^T(x^k) R^{-1} H(x^k)$ η Ιακωβιανή και η μήτρα κέρδους διαστάσεων $(m \times n)$ και $(n \times n)$, αντίστοιχα. Η δομή της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων είναι η ακόλουθη:

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_{P_{ij}}}{\partial \delta} & \frac{\partial h_{P_{ij}}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{Q_{ij}}}{\partial \delta} & \frac{\partial h_{Q_{ij}}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{P_i}}{\partial \delta} & \frac{\partial h_{P_i}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{Q_i}}{\partial \delta} & \frac{\partial h_{Q_i}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{\delta_i}}{\partial \delta} & \frac{\partial h_{\delta_i}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{V_i}}{\partial \delta} & \frac{\partial h_{V_i}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{I_{ij}, \text{Re}}}{\partial \delta} & \frac{\partial h_{I_{ij}, \text{Re}}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{I_{ij}, \text{Im}}}{\partial \delta} & \frac{\partial h_{I_{ij}, \text{Im}}}{\partial V} \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

Τα αντίστοιχα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας θα είναι:

- **Μετρήσεις πραγματικού μέρους ρευμάτων**

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{ij}, \text{Re}}{\partial \delta_i} &= -V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i + (b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i \right] \\ \frac{\partial I_{ij}, \text{Re}}{\partial \delta_j} &= V_j \left[g_{ij} \sin \delta_i + b_{ij} \cos \delta_i \right] \\ \frac{\partial I_{ij}, \text{Re}}{\partial V_i} &= \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] \\ \frac{\partial I_{ij}, \text{Re}}{\partial \delta_j} &= - \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right] \end{aligned} \quad (4.33)$$

- **Μετρήσεις φανταστικού μέρους ρευμάτων**

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{ij}, \text{Im}}{\partial \delta_i} &= V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] \\ \frac{\partial I_{ij}, \text{Im}}{\partial \delta_j} &= -V_j \left[(g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j) \right] \\ \frac{\partial I_{ij}, \text{Im}}{\partial V_i} &= \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right] \\ \frac{\partial I_{ij}, \text{Im}}{\partial \delta_j} &= - \left[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \right] \end{aligned} \quad (4.34)$$

Τέλος τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας που σχετίζονται με μετρήσεις τάσεων ζυγών των μονάδων PMU θα είναι:

$$\begin{aligned}\frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} &= 0, \text{ για κάθε ζυγό } i \\ \frac{\partial V_i}{\partial \delta_j} &= 0, \text{ για κάθε ζυγό } i \text{ και κάθε ζυγό } j\end{aligned}\quad (4.35)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial V_i}{\partial V_i} &= 1, \text{ για κάθε ζυγό } i \\ \frac{\partial V_i}{\partial V_j} &= 0, \text{ για κάθε ζυγό } i \text{ και κάθε ζυγό } j\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_i} &= 1, \text{ για κάθε ζυγό } i \\ \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_j} &= 0, \text{ για κάθε ζυγό } i \text{ και κάθε ζυγό } j\end{aligned}\quad (4.36)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \delta_i}{\partial V_i} &= 0, \text{ για κάθε ζυγό } i \\ \frac{\partial \delta_i}{\partial V_j} &= 0, \text{ για κάθε ζυγό } i \text{ και κάθε ζυγό } j\end{aligned}$$

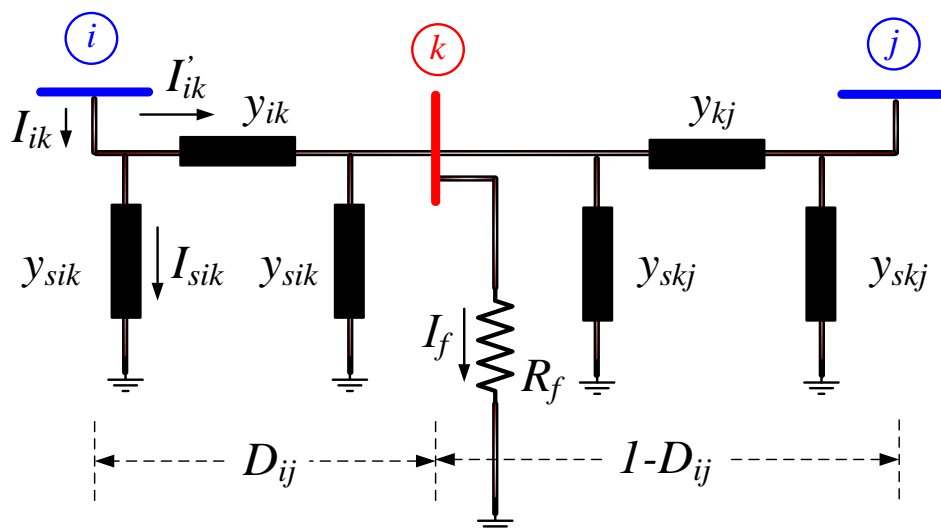
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο Προτεινόμενος αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης με ενσωμάτωση της θέσης και αντίστασης σφάλματος

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται ένας αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων, όπου το διάνυσμα κατάστασης το εκφράζουμε με πολικές συντεταγμένες, ενώ οι μετρήσεις ρεύματος γραμμών των PMUs εκφράζονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες και θεωρούμε ότι συμβαίνει ένα συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα. Ο εκτιμητής έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει τόσο τη θέση όσο και τη τιμή της αντίστασης σφάλματος.

5.2 Κατάστροση εξισώσεων σε περίπτωση σφάλματος σε μία γραμμή

Έστω ένα σύστημα N ζυγών. Με την μοντελοποίηση του σφάλματος μπορούμε να ενσωματώσουμε ως παραμέτρους του αλγόριθμου κατάστασης την θέση και την αντίσταση του σφάλματος. Το σφάλμα που συμβαίνει είναι θεωρούμε ότι είναι ένα συμμετρικό τριφασικό σφάλμα. Στο σημείο που εμφανίζεται το σφάλμα θεωρούμε ότι υπάρχει ένα εικονικός ζυγός σφάλματος k μεταξύ των άκρων μιας γραμμής από όπου το ρεύμα σφάλματος οδηγείται στη γη μέσω της αντίστασης σφάλματος R_f . Στην Εικόνα 5.1 θεωρούμε ότι το σφάλμα γίνεται σε απόσταση D_{ij} από το άκρο i της γραμμής $i-j$.



Εικόνα 5.1: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς κατά τη διάρκεια σφάλματος

Θεωρώντας ότι στο ζυγό i είναι εγκατεστημένη μία μονάδα μέτρησης φασιθετών PMU οι εγκάρσιες και αγωγιμότητες σειράς λαμβάνοντας υπόψη την θέση του σφάλματος θα είναι:

$$y_{ik} = g_{ik} + jb_{ik} = \frac{1}{D_{ij}} (g_{ij} + jb_{ij}) = \frac{g_{ij}}{D_{ij}} + j \frac{b_{ij}}{D_{ij}} \quad (5.1)$$

$$y_{sik} = g_{sik} + jb_{sik} = D_{ij} (g_{sij} + jb_{sij}) = D_{ij} g_{sij} + jD_{ij} b_{sij} \quad (5.2)$$

Στον ζυγό i , οι εξισώσεις ρεύματος θα είναι:

$$I_{ik,Re} = \left(\frac{g_{ij} + D_{ij}^2 g_{sij}}{D_{ij}} \right) V_i \cos(\delta_i) - \left(\frac{b_{ij} + D_{ij}^2 b_{sij}}{D_{ij}} \right) V_i \sin(\delta_i) - \frac{g_{ij}}{D_{ij}} V_k \cos(\delta_k) + \frac{b_{ij}}{D_{ij}} V_k \sin(\delta_k) \quad (5.3)$$

$$I_{ik,Im} = \left(\frac{b_{ij} + D_{ij}^2 b_{sij}}{D_{ij}} \right) V_i \cos(\delta_i) + \left(\frac{g_{ij} + D_{ij}^2 g_{sij}}{D_{ij}} \right) V_i \sin(\delta_i) - \frac{b_{ij}}{D_{ij}} V_k \cos(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{D_{ij}} V_k \sin(\delta_k) \quad (5.4)$$

Αντίστοιχα, στον ζυγό j , οι εξισώσεις ρεύματος θα είναι:

$$I_{jk,r} = \left(\frac{g_{ij} + (1-D_{ij})^2 g_{sij}}{1-D_{ij}} \right) V_j \cos(\delta_j) - \left(\frac{b_{ij} + (1-D_{ij})^2 b_{sij}}{1-D_{ij}} \right) V_j \sin(\delta_j) - \frac{g_{ij}}{1-D_{ij}} V_k \cos(\delta_k) + \frac{b_{ij}}{1-D_{ij}} V_k \sin(\delta_k) \quad (5.5)$$

$$I_{jk,i} = \left(\frac{b_{ij} + (1-D_{ij})^2 b_{sij}}{1-D_{ij}} \right) V_j \cos(\delta_j) + \left(\frac{g_{ij} + (1-D_{ij})^2 g_{sij}}{1-D_{ij}} \right) V_j \sin(\delta_j) - \frac{b_{ij}}{1-D_{ij}} V_k \cos(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{1-D_{ij}} V_k \sin(\delta_k) \quad (5.6)$$

Παράλληλα, θεωρούμε ότι στον ζυγό σφάλματος k υπάρχουν ψευδομετρήσεις μηδενικής έγχυσης οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$0 = I_{k,Re} = -R_f (1-D_{ij}) g_{ij} V_i \cos(\delta_i) + \left[D_{ij} (1-D_{ij}) + R_f g_{ij} + R_f D_{ij} (1-D_{ij}) g_{sij} \right] V_k \cos(\delta_k) - R_f D_{ij} g_{ij} V_j \cos(\delta_j) + R_f (1-D_{ij}) b_{ij} V_i \sin(\delta_i) + \left[-R_f b_{ij} - R_f D_{ij} (1-D_{ij}) b_{sij} \right] V_k \sin(\delta_k) + R_f D_{ij} b_{ij} V_j \sin(\delta_j) \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned}
0 = I_{k,Im} = & -R_f (1 - D_{ij}) b_{ij} V_i \cos(\delta_i) + \left[R_f b_{ij} + R_f D_{ij} (1 - D_{ij}) b_{sij} \right] V_k \cos(\delta_k) - \\
& R_f D_{ij} b_{ij} V_j \cos(\delta_j) - R_f (1 - D_{ij}) g_{ij} V_i \sin(\delta_i) + \\
& \left[D_{ij} (1 - D_{ij}) + R_f g_{ij} + R_f D_{ij} (1 - D_{ij}) g_{sij} \right] V_k \sin(\delta_k) - R_f D_{ij} g_{ij} V_j \sin(\delta_j)
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Το νέο διευρυμένο διάνυσμα κατάστασης θα έχει την εξής μορφή:

$$x = \left[\delta_i \quad \delta_j \quad \delta_k \quad V_i \quad V_j \quad V_k \quad D_{ij} \quad R_f \right]^T \tag{5.9}$$

Η νέα διευρυμένη Ιακωβιανή θα είναι η ακόλουθη:

$$H = \begin{bmatrix}
\frac{\partial V_i}{\partial V_i} & \frac{\partial V_i}{\partial V_j} & \frac{\partial V_i}{\partial V_k} & \frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} & \frac{\partial V_i}{\partial \delta_j} & \frac{\partial V_i}{\partial \delta_k} & \frac{\partial V_i}{\partial D_{ij}} & \frac{\partial V_i}{\partial R_f} \\
\frac{\partial \delta_i}{\partial V_i} & \frac{\partial \delta_i}{\partial V_j} & \frac{\partial \delta_i}{\partial V_k} & \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_i} & \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_j} & \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_k} & \frac{\partial \delta_i}{\partial D_{ij}} & \frac{\partial \delta_i}{\partial R_f} \\
\frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial V_i} & \frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial V_j} & \frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial V_k} & \frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial \delta_i} & \frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial D_{ij}} & \frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial R_f} \\
\frac{\partial I_{ik,Im}}{\partial V_i} & \frac{\partial I_{ik,Im}}{\partial V_j} & \frac{\partial I_{ik,Im}}{\partial V_k} & \frac{\partial I_{ik,Im}}{\partial \delta_i} & \frac{\partial I_{ik,Im}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial I_{ik,Im}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial I_{ik,Im}}{\partial D_{ij}} & \frac{\partial I_{ik,Im}}{\partial R_f} \\
\frac{\partial I_{k,Re}}{\partial V_i} & \frac{\partial I_{k,Re}}{\partial V_j} & \frac{\partial I_{k,Re}}{\partial V_k} & \frac{\partial I_{k,Re}}{\partial \delta_i} & \frac{\partial I_{k,Re}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial I_{k,Re}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial I_{k,Re}}{\partial D_{ij}} & \frac{\partial I_{k,Re}}{\partial R_f} \\
\frac{\partial I_{k,Im}}{\partial V_i} & \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial V_j} & \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial V_k} & \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial \delta_i} & \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial D_{ij}} & \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial R_f}
\end{bmatrix} \tag{5.10}$$

Τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήρας δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_k} = 0, \forall i \neq k \tag{5.11}$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_k} = 0, \forall i \tag{5.12}$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial V_k} = 0, \forall i \neq k \tag{5.13}$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_k} = 0, \forall i \neq k \tag{5.14}$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1, i = j = k \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_i} = 1, i = j = k \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial I_{ij,Re}}{\partial V_k} = 0, \forall i \neq k, \forall j \neq k \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial I_{ij,Re}}{\partial \delta_k} = 0, \forall i \neq k, \forall j \neq k \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial I_{ij,Im}}{\partial V_k} = 0, \forall i \neq k, \forall j \neq k \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial I_{ij,Im}}{\partial \delta_k} = 0, \forall i \neq k, \forall j \neq k \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial D_{ij}} = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial R_f} = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial D_{ij}} = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial R_f} = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial V_i} = \left(\frac{g_{ij} + D_{ij}^2 g_{sij}}{D_{ij}} \right) \cos(\delta_i) - \left(\frac{b_{ij} + D_{ij}^2 b_{sij}}{D_{ij}} \right) \sin(\delta_i) \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial V_k} = -\frac{g_{ij}}{D_{ij}} \cos(\delta_k) + \frac{b_{ij}}{D_{ij}} \sin(\delta_k) \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial V_j} = 0 \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial \delta_i} = - \left(\frac{g_{ij} + D_{ij}^2 g_{sij}}{D_{ij}} \right) V_i \sin(\delta_i) - \left(\frac{b_{ij} + D_{ij}^2 b_{sij}}{D_{ij}} \right) V_i \cos(\delta_i) \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial \delta_k} = \frac{g_{ij}}{D_{ij}} V_k \sin(\delta_k) + \frac{b_{ij}}{D_{ij}} V_k \cos(\delta_k) \quad (5.29)$$

$$\frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial \delta_j} = 0 \quad (5.30)$$

$$\frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial R_f} = 0 \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{ik,Re}}{\partial D_{ij}} &= \left(g_{sij} - \frac{g_{ij}}{D_{ij}^2} \right) V_i \cos(\delta_i) - \left(b_{sij} - \frac{b_{ij}}{D_{ij}^2} \right) V_i \sin(\delta_i) \\ &+ \frac{g_{ij}}{D_{ij}^2} V_k \cos(\delta_k) - \frac{b_{ij}}{D_{ij}^2} V_k \sin(\delta_k) \end{aligned} \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial I_{jk,Im}}{\partial V_i} = 0 \quad (5.33)$$

$$\frac{\partial I_{jk,Im}}{\partial V_k} = - \frac{b_{ij}}{1 - D_{ij}} \cos(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{1 - D_{ij}} \sin(\delta_k) \quad (5.34)$$

$$\frac{\partial I_{jk,Im}}{\partial V_j} = \left(\frac{b_{ij} + (1 - D_{ij})^2 b_{sij}}{1 - D_{ij}} \right) \cos(\delta_j) + \left(\frac{g_{ij} + (1 - D_{ij})^2 g_{sij}}{1 - D_{ij}} \right) \sin(\delta_j) \quad (5.35)$$

$$\frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial \delta_i} = 0 \quad (5.36)$$

$$\frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial \delta_k} = \frac{b_{ij}}{1-D_{ij}} V_k \sin(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{1-D_{ij}} V_k \cos(\delta_k) \quad (5.37)$$

$$\frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial \delta_j} = - \left(\frac{b_{ij} + (1-D_{ij})^2 b_{sij}}{1-D_{ij}} \right) V_j \sin(\delta_j) + \left(\frac{g_{ij} + (1-D_{ij})^2 g_{sij}}{1-D_{ij}} \right) V_j \cos(\delta_j) \quad (5.38)$$

$$\frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial R_f} = 0 \quad (5.39)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial D_{ij}} = & \left(-b_{sij} + \frac{b_{ij}}{(1-D_{ij})^2} \right) V_j \cos(\delta_j) + \left(-g_{sij} + \frac{g_{ij}}{(1-D_{ij})^2} \right) V_j \sin(\delta_j) - \\ & \frac{b_{ij}}{(1-D_{ij})^2} V_k \cos(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{(1-D_{ij})^2} V_k \sin(\delta_k) \end{aligned} \quad (5.40)$$

$$\frac{\partial I_{ik, \text{Im}}}{\partial V_i} = \left(\frac{b_{ij} + D_{ij}^2 b_{sij}}{D_{ij}} \right) \cos(\delta_i) + \left(\frac{g_{ij} + D_{ij}^2 g_{sij}}{D_{ij}} \right) \sin(\delta_i) \quad (5.41)$$

$$\frac{\partial I_{ik, \text{Im}}}{\partial V_k} = - \frac{b_{ij}}{D_{ij}} \cos(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{D_{ij}} \sin(\delta_k) \quad (5.42)$$

$$\frac{\partial I_{ik, \text{Im}}}{\partial V_j} = 0 \quad (5.43)$$

$$\frac{\partial I_{ik, \text{Im}}}{\partial \delta_i} = - \left(\frac{b_{ij} + D_{ij}^2 b_{sij}}{D_{ij}} \right) V_i \sin(\delta_i) + \left(\frac{g_{ij} + D_{ij}^2 g_{sij}}{D_{ij}} \right) V_i \cos(\delta_i) \quad (5.44)$$

$$\frac{\partial I_{ik, \text{Im}}}{\partial \delta_k} = \frac{b_{ij}}{D_{ij}} V_k \sin(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{D_{ij}} V_k \cos(\delta_k) \quad (5.45)$$

$$\frac{\partial I_{ik, \text{Im}}}{\partial F \delta_j} = 0 \quad (5.46)$$

$$\frac{\partial I_{ik, \text{Im}}}{\partial R_f} = 0 \quad (5.47)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{ik, i}}{\partial D_{ij}} = & \left(b_{sij} - \frac{b_{ij}}{D_{ij}^2} \right) V_i \cos(\delta_i) + \left(g_{sij} - \frac{g_{ij}}{D_{ij}^2} \right) V_i \sin(\delta_i) + \\ & \frac{b_{ij}}{D_{ij}^2} V_k \cos(\delta_k) + \frac{g_{ij}}{D_{ij}^2} V_k \sin(\delta_k) \end{aligned} \quad (5.48)$$

$$\frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial V_i} = 0 \quad (5.49)$$

$$\frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial V_k} = -\frac{b_{ij}}{1-D_{ij}} \cos(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{1-D_{ij}} \sin(\delta_k) \quad (5.50)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial V_j} = & \left(\frac{b_{ij} + (1-D_{ij})^2 b_{sij}}{1-D_{ij}} \right) \cos(\delta_j) + \left(\frac{g_{ij} + (1-D_{ij})^2 g_{sij}}{1-D_{ij}} \right) \sin(\delta_j) \end{aligned} \quad (5.51)$$

$$\frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial \delta_i} = 0 \quad (5.52)$$

$$\frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial \delta_k} = \frac{b_{ij}}{1-D_{ij}} V_k \sin(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{1-D_{ij}} V_k \cos(\delta_k) \quad (5.53)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial \delta_j} = & -\left(\frac{b_{ij} + (1-D_{ij})^2 b_{sij}}{1-D_{ij}} \right) V_j \sin(\delta_j) + \left(\frac{g_{ij} + (1-D_{ij})^2 g_{sij}}{1-D_{ij}} \right) V_j \cos(\delta_j) \end{aligned} \quad (5.54)$$

$$\frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial R_f} = 0 \quad (5.55)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{jk, \text{Im}}}{\partial D_{ij}} = & \left(-b_{sij} + \frac{b_{ij}}{(1-D_{ij})^2} \right) V_j \cos(\delta_j) + \left(-g_{sij} + \frac{g_{ij}}{(1-D_{ij})^2} \right) V_j \sin(\delta_j) \\ & - \frac{b_{ij}}{(1-D_{ij})^2} V_k \cos(\delta_k) - \frac{g_{ij}}{(1-D_{ij})^2} V_k \sin(\delta_k) \end{aligned} \quad (5.56)$$

$$\frac{\partial I_{k, \text{Re}}}{\partial V_p} = 0, \forall p \neq k \quad (5.57)$$

$$\frac{\partial I_{k, \text{Re}}}{\partial \delta_p} = 0, \forall p \neq k \quad (5.58)$$

$$\frac{\partial I_{k, \text{Re}}}{\partial V_i} = -R_f (1-D_{ij}) g_{ij} \cos(\delta_i) + R_f (1-D_{ij}) b_{ij} \sin(\delta_i) \quad (5.59)$$

$$\frac{\partial I_{k, \text{Re}}}{\partial V_j} = -R_f D_{ij} g_{ij} \cos(\delta_j) + R_f D_{ij} b_{ij} \sin(\delta_j) \quad (5.60)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{k, \text{Re}}}{\partial V_k} = & \{ D_{ij} (1-D_{ij}) + R_f g_{ij} + R_f D_{ij} (1-D_{ij}) g_{sij} \} \cos(\delta_k) \\ & - \{ R_f b_{ij} + R_f D_{ij} b_{sij} (1-D_{ij}) \} \sin(\delta_k) \end{aligned} \quad (5.61)$$

$$\frac{\partial I_{k, \text{Re}}}{\partial \delta_i} = R_f (1-D_{ij}) g_{ij} V_i \sin(\delta_i) + R_f (1-D_{ij}) b_{ij} V_i \cos(\delta_i) \quad (5.62)$$

$$\frac{\partial I_{k,\text{Re}}}{\partial \delta_j} = R_f D_{ij} g_{ij} V_j \sin(\delta_j) + R_f D_{ij} b_{ij} V_j \cos(\delta_j) \quad (5.63)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{k,\text{Re}}}{\partial \delta_k} = & -\{D_{ij}(1-D_{ij}) + R_f g_{ij} + R_f D_{ij}(1-D_{ij})g_{sij}\}V_k \sin(\delta_k) \\ & -\{R_f b_{ij} + R_f D_{ij}b_{sij}(1-D_{ij})\}V_k \cos(\delta_k) \end{aligned} \quad (5.64)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{k,\text{Re}}}{\partial D_{ij}} = & R_f g_{ij} V_i \cos(\delta_i) + (1-2D_{ij})(1+R_f g_{sij})V_k \cos(\delta_k) \\ & -R_f g_{ij} V_j \cos(\delta_j) - R_f b_{ij} V_i \sin(\delta_i) \\ & -R_f (1-2D_{ij})b_{sij} V_k \sin(\delta_k) + R_f b_{ij} V_j \sin(\delta_j) \end{aligned} \quad (5.65)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{k,\text{Re}}}{\partial R_f} = & -(1-D_{ij})g_{ij}V_i \cos(\delta_i) + [g_{ij} + D_{ij}(1-D_{ij})g_{sij}]V_k \cos(\delta_k) \\ & -D_{ij}g_{ij}V_j \cos(\delta_j) + (1-D_{ij})b_{ij}V_i \sin(\delta_i) \\ & -[b_{ij} + D_{ij}(1-D_{ij})b_{sij}]V_k \sin(\delta_k) + D_{ij}b_{ij}V_j \sin(\delta_j) \end{aligned} \quad (5.66)$$

$$\frac{\partial I_{k,\text{Im}}}{\partial V_p} = 0, \forall p \neq k \quad (5.67)$$

$$\frac{\partial I_{k,\text{Im}}}{\partial F_p} = 0, \forall p \neq k \quad (5.68)$$

$$\frac{\partial I_{k,\text{Im}}}{\partial V_i} = -R_f (1-D_{ij})b_{ij} \cos(\delta_i) - R_f (1-D_{ij})g_{ij} \sin(\delta_i) \quad (5.69)$$

$$\frac{\partial I_{k,\text{Im}}}{\partial V_j} = -R_f D_{ij}b_{ij} \cos(\delta_j) - R_f D_{ij}g_{ij} \sin(\delta_j) \quad (5.70)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial V_k} &= \{R_f b_{ij} + R_f D_{ij} (1 - D_{ij}) b_{sij}\} \cos(\delta_k) \\ &+ \{D_{ij} (1 - D_{ij}) + R_f g_{ij} + R_f D_{ij} (1 - D_{ij}) g_{sij}\} \sin(\delta_k) \end{aligned} \quad (5.71)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial \delta_i} &= R_f (1 - D_{ij}) b_{ij} V_i \sin(\delta_i) - R_f (1 - D_{ij}) g_{ij} V_i \cos(\delta_i) \end{aligned} \quad (5.72)$$

$$\frac{\partial I_{k,Im}}{\partial \delta_j} = R_f D_{ij} b_{ij} V_j \sin(\delta_j) - R_f D_{ij} g_{ij} V_j \cos(\delta_j) \quad (5.73)$$

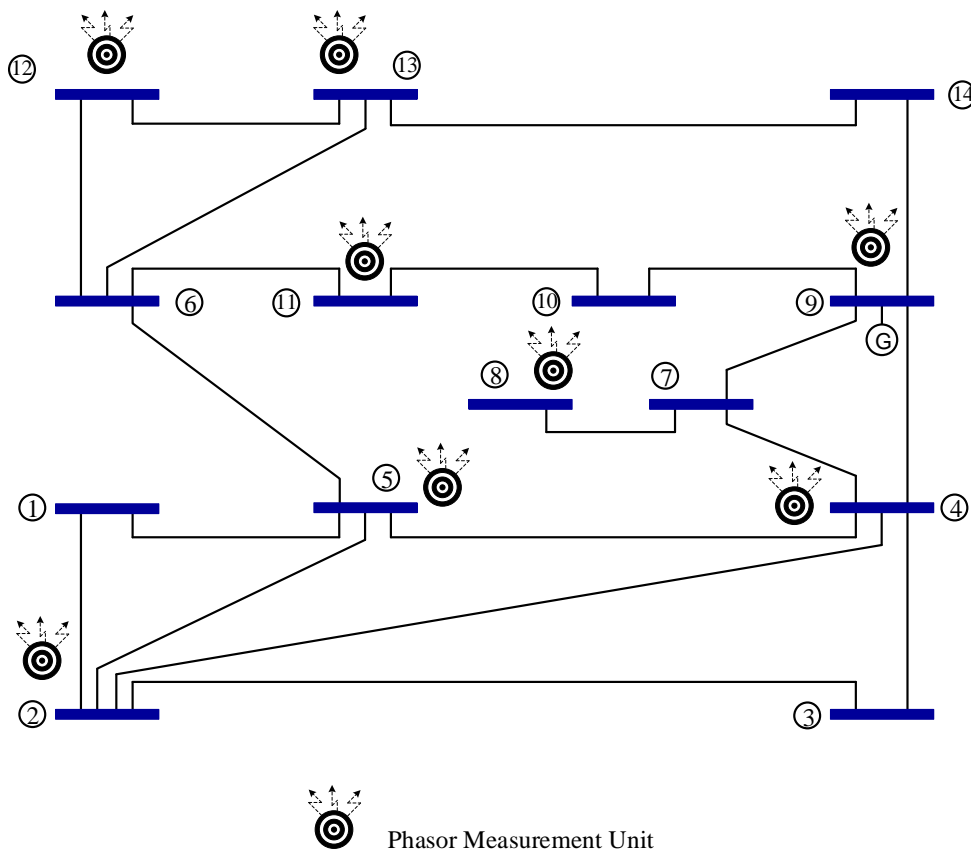
$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial \delta_k} &= -\{R_f b_{ij} + R_f D_{ij} (1 - D_{ij}) b_{sij}\} V_k \sin(\delta_k) \\ &+ \{D_{ij} (1 - D_{ij}) + R_f g_{ij} + R_f D_{ij} (1 - D_{ij}) g_{sij}\} V_k \cos(\delta_k) \end{aligned} \quad (5.74)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial D_{ij}} &= R_f b_{ij} V_i \cos(\delta_i) + (1 - 2D_{ij}) (R_f b_{sij}) V_k \cos(\delta_k) - R_f b_{ij} V_j \cos(\delta_j) + \\ &R_f g_{ij} V_i \sin(\delta_i) + (1 - 2D_{ij}) (1 + R_f g_{sij}) V_k \sin(\delta_k) \\ &- R_f g_{ij} V_j \sin(\delta_j) \end{aligned} \quad (5.75)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{k,Im}}{\partial R_f} &= -(1 - D_{ij}) b_{ij} V_i \cos(\delta_i) + [b_{ij} + D_{ij} (1 - D_{ij}) b_{sij}] V_k \cos(\delta_k) - D_{ij} b_{ij} V_j \cos(\delta_j) \\ &- (1 - D_{ij}) g_{ij} V_i \sin(\delta_i) \\ &+ [g_{ij} + D_{ij} (1 - D_{ij}) g_{sij}] V_k \sin(\delta_k) - D_{ij} g_{ij} V_j \sin(\delta_j) \end{aligned} \quad (5.76)$$

5.3 Δοκιμές προσομοίωσης του εκτιμητή κατάστασης

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις του προτεινόμενου εκτιμητή κατάστασης με σκοπό την εύρεση της θέσης και της αντίστασης σφάλματος. Συγκεκριμένα υλοποιήθηκε παραπάνω προτεινόμενος σταθμισμένος ελαχίστων τετραγώνων εκτιμητής κατάστασης ο οποίος χρησιμοποιεί μόνο μετρήσεις από μονάδες μέτρησης φασιθετών PMU. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα 14ων ζυγών της IEEE. Οι ζυγοί στους οποίους έχουν εγκατασταθεί οι συσκευές PMU έχουν βέλτιστα επιλεγεί βάσει αποτελεσμάτων που έχουν δημοσιευθεί στη βιβλιογραφία και είναι οι ζυγοί 2, 4, 5, 8, 9, 11, 12 και 13. Στην εικόνα 5.2 δίνεται μια σχηματική απεικόνιση του συγκεκριμένου δικτύου και των θέσεων εγκατάστασης των συσκευών PMU.



Εικόνα 5.2: Το πρότυπο δίκτυο IEEE-14 με βέλτιστα τοποθετημένα PMUs

Για να διαπιστωθούν οι δυνατότητες του εκτιμητή κατάστασης, πραγματοποιήσαμε τρεις δοκιμές προσομοίωσης θεωρώντας συμμετρικά τριφασικά σφάλματα σε διαφορετικές γραμμές του δικτύου. Οι δοκιμές αυτές φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.1: Στοιχεία δοκιμών

Δοκιμή	Σφάλμα στην γραμμή	Απόσταση από τον ζυγό αναχώρησης της γραμμής	Αντίσταση σφάλματος (p.u.)
1	3-4	30%	0,04

2	5-6	60%	0,04
3	9-10	80%	0,04

Ως αρχικό διάνυσμα, στον επαναληπτικό αλγόριθμο της εκτίμησης κατάστασης σε κάθε δοκιμή, θα χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου, υπό συνθήκες βραχυκυκλώματος σε συγκεκριμένο σημείο και με συγκεκριμένη αντίσταση σφάλματος.

Σε κάθε δοκιμή, στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας, υπολογίζονται τα σφάλματα εκτίμησης από τα οποία φαίνεται πόσο αποκλίνει το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης από το πραγματικό.

Επιπλέον υπολογίζεται και ένα πρόσθετο μέτρο ακρίβειας, το κανονικοποιημένο σφάλμα, το οποίο είναι ουσιαστικά το σχετικό σφάλμα του διανύσματος κατάστασης ως προς το πραγματικό διάνυσμα υπολογισμένο με την ευκλείδια νόρμα. Το σφάλμα αυτό δίνεται ξεχωριστά για τα μέτρα και τις φασικές γωνίες από τις σχέσεις:

$$V_V = \sum_1^{15} (V_{i,est} - V_{i,pf})^2 \quad (5.77)$$

$$\delta_\delta = \sum_1^{15} (\delta_{i,est} - \delta_{i,pf})^2 \quad (5.78)$$

$$NV_V = \left(\frac{\sqrt{\sum_1^{15} (V_{i,est} - V_{i,pf})^2}}{\sqrt{\sum_1^{15} V_{i,pf}^2}} \right) \cdot 100\% \quad (5.79)$$

$$N\delta_\delta = \left(\frac{\sqrt{\sum_1^{15} (\delta_{i,est} - \delta_{i,pf})^2}}{\sqrt{\sum_1^{15} \delta_{i,pf}^2}} \right) \cdot 100\% \quad (5.80)$$

➤ 1^η Δοκιμή:

Ο αλγόριθμος συγκλίνει στη 2^η επανάληψη και το διάνυσμα κατάστασης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.2: Εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης 1^{ης} δοκιμής

Μεταβλητή	Τιμή (p.u)	Μεταβλητή	Τιμή (rad)
V_1	0,77276216722438	δ_1	-0,19440288585584
V_2	0,72483272906399	δ_2	-0,23062645303102
V_3	0,48921767719627	δ_3	-0,55113495953371
V_4	0,61761124357056	δ_4	-0,33916823584786
V_5	0,67550670077601	δ_5	-0,28223415853460
V_6	0,82164385588473	δ_6	-0,12062966253706
V_7	0,73788514255340	δ_7	-0,17019762463452
V_8	0,85567373211418	δ_8	-0,07377949849966
V_9	0,73473870424214	δ_9	-0,16582441190864
V_{10}	0,74936289516938	δ_{10}	-0,15614429023971
V_{11}	0,78413376562985	δ_{11}	-0,13707082027899
V_{12}	0,81574823963751	δ_{12}	-0,12469274909752
V_{13}	0,80870289645235	δ_{13}	-0,12581763275737
V_{14}	0,76664251944169	δ_{14}	-0,14704182517597
V_f	0,32847022944151	δ_f	-1,05256693284946
D_f	0,29975554248456	R_f	0,04125173621726

Έχοντας ως δεδομένα τα στοιχεία του διάνυσματος κατάστασης, υπολογίζονται τα σφάλματα εκτίμησης όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα αυτά.

Πίνακας 5.3: Σφάλματα εκτίμησης μετά το πέρας της 1^{ης} δοκιμής

Δείκτης	Τιμή
V_V	0,000000050822739645
δ_δ	0,000000038284871933
NV_V	0,008228502328%
$N\delta_\delta$	0,031868474310%

Παρατηρούμε ότι οι δείκτες V_V και δ_δ είναι της τάξης του 10^{-8} και τα κανονικοποιημένα σφάλματα NV_V και $N\delta_\delta$ 0.008% και 0.03% αντίστοιχα, συνεπώς έχουμε καλή εκτίμηση του αποτελέσματος που θέλουμε.

➤ 2^η Δοκιμή:

Ο αλγόριθμος συγκλίνει επίσης στη 2^η επανάληψη και το διάνυσμα κατάστασης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.4: Εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης 2^{ης} δοκιμής

Μεταβλητή	Τιμή (p.u)	Μεταβλητή	Τιμή (rad)
V_1	0,78786990141567	δ_1	-0,09434756708864
V_2	0,77311240125248	δ_2	-0,10147196523376
V_3	0,81159029060455	δ_3	-0,09390864769751
V_4	0,66211725206776	δ_4	-0,13526686670808

V_5	0,59295846321440	δ_5	-0,15536964808125
V_6	0,46070843939586	δ_6	-0,32646415476845
V_7	0,71058934721761	δ_7	-0,13069204715705
V_8	0,84290560072495	δ_8	-0,05410054953969
V_9	0,65617749108635	δ_9	-0,18969732928859
V_{10}	0,62219986017575	δ_{10}	-0,21021337254032
V_{11}	0,54341871148750	δ_{11}	-0,26118781056904
V_{12}	0,47333043397515	δ_{12}	-0,30864188635569
V_{13}	0,48893903763409	δ_{13}	-0,30262045013151
V_{14}	0,58278505152902	δ_{14}	-0,23202268518565
V_f	0,2888099298455	δ_f	-1,21851315955293
D_f	0,60000046111337	R_f	0,04134502335322

Ομοίως με προηγουμένως υπολογίζονται τα σφάλματα εκτίμησης, τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Σφάλματα εκτίμησης μετά το πέρας της 2^{ης} δοκιμής

Δείκτης	Τιμή
V_V	0,000000030226442377
δ_δ	0,000000018070614213
NV_V	0,0071927240125549%
$N\delta_\delta$	0,0268023453683606%

Από τον Πίνακα 5.5 βλέπουμε ότι οι δείκτες V_V και δ_δ είναι της τάξης του 10^{-8} ενώ τα κανονικοποιημένα σφάλματα NV_V και $N\delta_\delta$ είναι 0.007% και 0.02% αντίστοιχα, άρα ο αλγόριθμος πραγματοποιεί ακριβή εκτίμηση του τελικού αποτελέσματος.

➤ 3^η Δοκιμή:

Ο αλγόριθμος συγκλίνει στη 2^η επανάληψη και το διάνυσμα κατάστασης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.6: Εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης 3^{ης} δοκιμής

Μεταβλητή	Τιμή (p.u)	Μεταβλητή	Τιμή (rad)
V_1	0,87198329842636	δ_1	-0,05450029817623
V_2	0,85711705419842	δ_2	-0,05823892419669
V_3	0,86832477463322	δ_3	-0,05723629737472
V_4	0,75029143202604	δ_4	-0,07383230455223
V_5	0,77499468320055	δ_5	-0,07729493505842
V_6	0,72388037271470	δ_6	-0,17778144037834
V_7	0,56850414017763	δ_7	-0,20932339586498
V_8	0,76453155676038	δ_8	-0,07504094767925

V_9	0,37708570662045	δ_9	-0,52552250118217
V_{10}	0,20854294866221	δ_{10}	-1,05730205884207
V_{11}	0,42579758987919	δ_{11}	-0,35777203203882
V_{12}	0,69901090750832	δ_{12}	-0,19660486640359
V_{13}	0,66957652375610	δ_{13}	-0,20173123678508
V_{14}	0,49724057543485	δ_{14}	-0,33564035220590
V_f	0,20093746838967	δ_f	-1,17665634792517
D_f	0,79990411375251	R_f	0,04141184222527

Τα σφάλματα εκτίμησης βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.7: Σφάλματα εκτίμησης μετά το πέρας της 3^{ης} δοκιμής

Δείκτης	Τιμή
V_V	0,00000004942969
δ_δ	0,00000002095442
NV_V	0,008928993620%
$N\delta_\delta$	0,029770262419%

Ομοίως με τις προηγούμενες δύο δοκιμές τα σφάλματα εκτίμησης είναι της τάξης του 10^{-4} και τα κανονικοποιημένα NV_V και $N\delta_\delta$ είναι 0.008% και 0.029%, συνεπώς έχουμε καλή εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχοληθήκαμε με την μελέτη εύρεση θέσης σφάλματος καθώς και τον υπολογισμό της αντίστασης του σε εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μηχανικοί συντήρησης υποσταθμού για να καταφέρουν να διορθώσουν έγκαιρα την βλάβη, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουν πιο αποτελεσματικοί και έξυπνοι μέθοδοι εκτίμησης κατάστασης ώστε να λύσουμε τα προβλήματα που προκαλούνται από την πολυπλοκότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Για την ακέραια επίλυση τους θα πρέπει να αναλύσουμε εις βάθος τα επιμερούς συστήματα διακρίνουν ένα ηλεκτρικό σύστημα. Γι αυτό το λόγο στην εργασία αυτή αναλύσαμε λεπτομερώς όλους τους πιθανούς τρόπους που μπορεί να συμβεί ένα βραχυκύκλωμα καθώς και τα συστήματα προστασίας έναντι αυτών. Στην συνέχεια έγινε αναφορά στα έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα τα οποία αντικαθιστούν τα κλασικά αφή δίκτυα και επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ελεγχιμότητα και αξιοπιστία στο σύστημα μας. Στην συνέχεια αναφερθήκαμε στην έννοια του φασιθέτη καθώς και του γενικευμένου ζυγού ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και όλο το θεωρητικό υπόβαθρο που το διακρίνει.

Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται ως επι το πλείστον οι μονάδες PMU ώστε να επιτευχθεί με των ακριβέστερων μετρήσεων τους καλύτερη εποπτεία και έλεγχος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα είναι πολλά καθώς μπορούν να μας παρέχουν συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών σε πραγματικό χρόνο σε αντίθεση με τα κλασικά συστήματα SCADA. Λόγω του υπέρμετρου κόστους των συσκευών αυτών και των τηλεπικοινωνιακών υποδομών που απαιτούνται, η εύρεση του ελάχιστου αριθμού PMUs είναι απαραίτητη.

Όσο τα ΣΗΕ διογκώνονται ολοένα και περισσότερο έχει προκύψει η ανάγκη για πιο σύγχρονους και ταχύτερους αλγόριθμους εκτίμησης κατάστασης με σκοπό την βελτίωση της εποπτείας και του ελέγχου των συστημάτων. Στο πειραματικό μέρος της εργασίας χρησιμοποιήθηκε μία μέθοδος σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (WLS) η οποία αποτελεί τμήμα της συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Διατυπώθηκε ένας διευρυμένος εκτιμητής κατάστασης ο οποίος περιλαμβάνει μετρήσεις μονάδεων PMU με τα ρεύματα γραμμών να εκφράζονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες και το εκτιμώμενο διάνυσμα να περιλαμβάνει επίσης την απόσταση σφάλματος από το ένα άκρο της γραμμής όπως και την αντίστοιχη αντίσταση σφάλματος.

6.2 Επεκτάσεις της εργασίας

Για την εξέλιξη και τον εμπλουτισμό αυτής της διπλωματικής εργασίας προτείνεται:

- η τροποποίηση του αλγορίθμου, με σκοπό την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, σε ακόμα μικρότερο χρονικό διάστημα,
- η επέκταση της προτεινόμενης μοντελοποίησης σε μεγαλύτερα και πολυπλοκότερα δίκτυα και
- η προσπάθεια ανάπτυξης ενός αντίστοιχου αλγορίθμου με τις μετρήσεις φασιθετών ρεύματων να εκφράζονται σε πολικές συντεταγμένες.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] Ι. Α. Σταθόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα.
- [2] J. S. T. Looms, «Insulators for High Voltages», Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1990.
- [3] Μαλατέστας Π., Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, 2016
- [4] N. H. Abbasy and H. M. Ismail, “A Unified Approach for the Optimal PMU Location for Power System State Estimation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 806-813, May 2009.
- [5] B. Gou, “Optimal placement of PMUs by integer linear programming,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1525–1526, Sep. 2008.
- [6] G. Venugopal, R. Veilumuthu, C. Arumugam, “Optimal Location of PMUs for Complete Observability of Power System Sub Network,” *ACEEE International Journal on Control System and Instrumentation*, vol. 1, no. 1, pp. 26-30, Jul. 2010.
- [7] Distributed Generation and Its Impact on Power Grids and Microgrids Protection [Online]:
https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/7033cd282e2d665d28de7c0ea24d451a_ant_pap.pdf
- [8] Power System Modeling and Fault Analysis using Symmetrical Components [Online]:
http://www.ieeeepsboston.org/files/2017/09/2017_09_19_Power-System-Modeling-and-Fault-Analysis-using-Symmetrical-Components_Dean-Sorenson_Technical-Meeting.pdf
- [9] Σημειώσεις. Ειδικά Κεφάλαια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Γ. Παπαγιάννης, Γ. Ανδρέου, Δ. Λαμπρίδης, Θεσσαλονίκη, ακαδημαϊκό έτος 2018-2019.
- [10] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακίνα: Ε.Μ.Ρ., 2001.
- [11] Κ. Βουρνάς και Β. Παππαδιάς, Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας - Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος. Αθήνα: Σ. Αθανασόπουλος & ΣΙΑ Ο.Ε., 2010.
- [12] Β. Κ. Παππαδιάς, Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι. Αθήνα: Ε.Μ.Π., 1985.
- [13] ΑΔΜΗΕ. Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. [Online]:
www.admie.gr

- [14] ΑΔΜΗΕ, Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2014-2023
- [15] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Observability Analysis for Power Systems including Conventional and Phasor Measurements," *Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, 2010
- [16] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, "Optimal placement of phasor measurement units: A literature review," *International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 2011.
- [17] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "Combining conventional and synchronized phasor measurements in a hybrid state estimator," *International MARINELIVE Conference on "All Electric Ship"*, 2012.
- [18] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, "Taxonomy of PMU placement methodologies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 1070–1077, May 2012.
- [19] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "Observability analysis and restoration for systems with conventional and phasor measurements," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 1548-1566, Nov. 2013.
- [20] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal Allocation of Phasor Measurement Units Considering Various Contingencies and Measurement Redundancy," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.69, no. 6, pp. 3403-3411, Jun. 2020.
- [21] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems", *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 6, no. 2, pp. 10-15, Apr. 1993.
- [22] Γ. Κονταξής, Ν. Χατζηαργυρίου, "Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας", ΕΜΠ, Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003.
- [23] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. pp. 1514-1524, Jul. 2011.
- [24] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "State estimation and observability analysis for phasor measurement unit measured systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 9, pp. 902-913, Sep. 2012.
- [25] T. A. Alexopoulos, N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Fault location observability using phasor measurements units via semidefinite programming," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5187-5195, 2016.
- [26] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal PMU arrangement considering limited channel capacity and transformer tap settings," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1951.