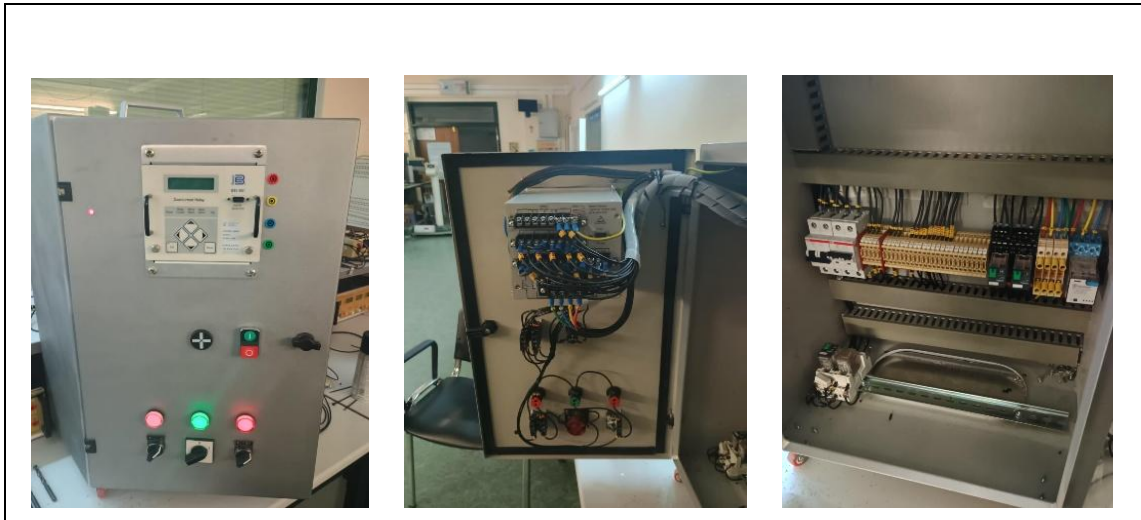


ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ  
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ



Των φοιτητών  
Αμπρικήδη Γεώργιου 2019006  
Γρηγορίου Γεώργιου 2020035

Επιβλέπων  
Ονοματεπώνυμο Ιορδάνη  
Κιοσκερίδη  
Βαθμίδα Καθηγητής

Ημερομηνία ...28/5/2025...

Σχεδίαση και Υλοποίηση Εργαστηριακής Διάταξης Προστασίας Μετασχηματιστή Ισχύος  
24246

Γεώργιος Αμπρικήδης, Γεώργιος Γρηγορίου  
Ιορδάνης Κιοσκερίδης

7/10/2024

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 30/5/2025

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών Αμπρικήδη Γεώργιο και του Γρηγορίου Γεώργιου που την εκπόνησαν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

*«Αφιέρωση»*

## Πρόλογος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε με απώτερο σκοπό την εξοικείωση των φοιτητών που συμμετείχαν σε ένα απαραίτητο σύστημα αυτοματισμού για την προστασία ενός μετασχηματιστή. Η συγκεκριμένη εφαρμογή που μπορεί να υλοποιηθεί σε ένα αυτόνομο ενεργειακό σύστημα η σε μία βιομηχανική εγκατάσταση και σε δίκτυα ενέργειας.

Οι μετασχηματιστές ισχύος είναι κρίσιμα στοιχεία στα ηλεκτρικά δίκτυα, καθώς είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή της τάσης και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικά σημεία του δικτύου. Η προστασία τους από βλάβες ή υπερφόρτωση είναι απαραίτητη για την αποφυγή διακοπών ρεύματος και για τη διατήρηση της αξιοπιστίας του δικτύου. Έτσι, η σχεδίαση μιας διάταξης προστασίας συμβάλλει στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της ασφάλειας των δικτύων.

Μέσα από αυτή τη διπλωματική εργασία, οι φοιτητές μπορούν να γεφυρώσουν το κενό ανάμεσα στη θεωρητική γνώση των ηλεκτρικών συστημάτων και την πρακτική εφαρμογή τους. Η υλοποίηση ενός εργαστηριακού μοντέλου προστασίας μετασχηματιστών προσφέρει την ευκαιρία να εμβαθύνει στις καταστάσεις που πρέπει να βρίσκεται ο μετασχηματιστής ώστε να αποτραπεί ένα σφάλμα που θα μπορούσε να καταλήξει σε ένα μη λειτουργικό μοντέλο.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την υλοποίηση μιας εργαστηριακής διάταξης προστασίας για μετασχηματιστή ισχύος, με σκοπό την εκπαίδευση και την πρακτική κατανόηση βασικών αρχών προστασίας ηλεκτρικών συστημάτων. Οι μετασχηματιστές ισχύος αποτελούν βασικά στοιχεία των ηλεκτρικών δικτύων, καθώς είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά και μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Η ορθή και ταχεία προστασία τους είναι κρίσιμη για την αποφυγή ζημιών, διακοπών ρεύματος και για τη διατήρηση της ασφάλειας και αξιοπιστίας του συστήματος.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε θεωρητική μελέτη του τρόπου λειτουργίας των μετασχηματιστών, των υποσταθμών και των βασικών μεθόδων προστασίας που χρησιμοποιούνται, όπως οι ηλεκτρονόμοι (ρελέ), οι ασφαλειοαποξεύκτες και τα συστήματα μέτρησης με μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης. Έμφαση δόθηκε στην ανάλυση του ηλεκτρονόμου **Basler BE1-851H**, ενός σύγχρονου ψηφιακού ρελέ που παρέχει προηγμένες λειτουργίες προστασίας, καταγραφής και ανάλυσης συμβάντων.

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον μια πλήρης διάταξη προστασίας μετασχηματιστή με χρήση EPLAN, η οποία περιλαμβάνει την πλήρη καλωδίωση, την τοποθέτηση μετρητικών μετασχηματιστών και την παραμετροποίηση του ηλεκτρονόμου. Το σύστημα δοκιμάστηκε υπό διαφορετικά σενάρια σφάλματος, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία του στην απομόνωση του μετασχηματιστή από τη γραμμή σε περίπτωση ανωμαλίας.

Η εργασία αυτή παρέχει σημαντική εκπαιδευτική αξία καθώς γεφυρώνει τη θεωρητική γνώση με την πρακτική εφαρμογή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο για μελλοντικά έργα προστασίας σε βιομηχανικά ή ενεργειακά συστήματα.

Σχεδίαση και Υλοποίηση Εργαστηριακής Διάταξης Προστασίας  
Μετασχηματιστή

Design and Implementation of a Laboratory Transformer Protect  
Device

Αμπρικήδης Γεώργιος Γρηγορίου Γεώργιος

Amprikidis George Grigoriou George

## Abstract

This thesis focuses on the design and implementation of a laboratory-based transformer protection setup, aiming to provide practical training and a deeper understanding of power system protection principles. Power transformers are vital components in electrical networks, responsible for the transmission and conversion of electrical energy across different voltage levels. Effective and rapid protection is essential to avoid equipment damage, power outages, and to ensure the safety and reliability of the overall system.

The study begins with a theoretical analysis of transformer operation, substation structure, and the main protection techniques employed in modern networks. Emphasis is placed on protective devices such as relays, disconnecting circuit breakers, and measurement systems using current and voltage transformers. Special attention is given to the **Basler BE1-851H** digital relay, which offers advanced protection, event recording, and fault analysis functionalities.

Following the theoretical groundwork, a complete laboratory protection setup was designed and implemented using the EPLAN software. This included full wiring schematics, installation of instrument transformers, and configuration of the protective relay. The system was tested under various fault conditions, validating its performance and reliability in detecting and isolating transformer faults from the grid.

This work offers significant educational value, as it bridges theoretical knowledge with practical application. It can also serve as a reference or prototype for future projects involving transformer protection in industrial or energy sector environments.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, νιώθουμε την ανάγκη να εκφράσουμε τις ειλικρινείς και βαθύτατες ευχαριστίες μας σε όλους όσους μας στήριξαν και συνέβαλαν καθοριστικά στην επίτευξη αυτού του σημαντικού στόχου.

Πρώτα απ' όλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε το Πανεπιστήμιό μας για την πολύτιμη εκπαίδευση και τις ευκαιρίες που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας. Η ακαδημαϊκή κοινότητα και οι άρτιες υποδομές του αποτέλεσαν θεμέλιο για την επιστημονική και προσωπική μας εξέλιξη.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλουμε στους καθηγητές μας, και ειδικότερα στον επιβλέποντα καθηγητή μας, Ιορδάνη Κιοσκερίδη, για την καθοδήγηση, τη στήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του σε όλη τη διάρκεια της ερευνητικής μας πορείας. Η υπομονή του και η επιστημονική του εμπειρία υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Ευχαριστούμε, επίσης, όλους τους διδάσκοντες για τις γνώσεις και τα εφόδια που μας παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνουμε στις οικογένειές μας, που στάθηκαν δίπλα μας με αμέριστη αγάπη, στήριξη και ενθάρρυνση. Η δύναμη και η αντοχή που αντλήσαμε από την παρουσία τους ήταν καθοριστικές σε κάθε μας βήμα.

Τέλος, ευχαριστούμε τους φίλους μας, που μας συνόδευσαν σε αυτή τη διαδρομή, προσφέροντάς μας στήριξη, χαμόγελα και θετική ενέργεια στις απαιτητικές στιγμές. Η συντροφιά και η φιλία τους υπήρξαν πολύτιμες και αναντικατάστατες.

Σε όλους εσάς, εκφράζουμε την βαθιά μας ευγνωμοσύνη.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract .....	vi
Ευχαριστίες .....	vii
Περιεχόμενα .....	viii
Κατάλογος Σχημάτων .....	xiii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiv
Συντομογραφίες.....	xv
Κεφάλαιο 1ο: Λειτουργία Υποσταθμού .....	1
1.1 Δομή υποσταθμού : .....	1
1.2 Κριτήρια κατασκευής υποσταθμού Υ/Σ.....	2
1.3 Επεξήγηση υποσταθμού Υ/Σ.....	2
1.4 Ανάλυση Μ.Τ.....	4
1.4.1 Μονωτήρες διελεύσεως.....	5
1.4.2 Θερμόμετρα.....	5
1.4.3 Πίνακας Μ/Σ .....	6
1.4.4 Μ/Σ εσωτερικής υπηρεσίας.....	6
1.4.5 Μετασχηματιστές μετρήσεων .....	7
1.4.6 Αποζεύκτες.....	7
1.4.7 Ζυγοί.....	8
1.4.8 Μονωτήρες.....	8
1.4.9 Υλικό αίθουσας χειρισμών.....	9
1.5 Υψηλή τάση 150kV.....	10
1.6 Μέση τάση διανομής.....	11
1.7 Βοηθητικά κυκλώματα του Υ/Σ 20kV/0,4kV .....	11
1.8 Βοηθητικά κυκλώματα του Υ/Σ 110V και 220V .....	12
1.9 Βοηθητικά κυκλώματα του Υ/Σ για της μετρήσεις και την λειτουργία των ηλεκτρονόμων	12
1.10 Προστασία.....	13
1.10.1 Διακόπτες ισχύος.....	13
1.10.2 Προδιαγραφές συσκευών προστασίας.....	14
1.11 Μετασχηματιστές μετρήσεων .....	15
1.11.1 ΡΕΛΕ .....	16



1.12	Σύστημα προστασίας.....	17
1.12.1	Προστασία με ασφάλειες μέσης τάσης .....	17
1.13	Προστασία με ηλεκτρονόμους .....	17
1.13.1	Τύποι ηλεκτρονόμων.....	18
	Κύριοι τύποι ηλεκτρονόμων για γραμμές διανομής :.....	18
1.13.2	Επιλογικός Συνδυασμός Ασφαλιστικών Μέσων.....	19
1.13.3	Βελτιωμένη Περιγραφή της Προστασίας Δικτύων με Αυτόματους Διακόπτες και Ασφάλειες.....	19
1.14	Διατάξεις προστασίας μονάδων .....	20
1.15	Διαφορική προστασία ρελε .....	21
1.16	Προστασία μετασχηματιστή.....	22
1.16.1	Διαφορική Προστασία Μετασχηματιστών και Ηλεκτρονόμος Buchholz.....	23
1.16.2	Προστασία Μετασχηματιστών με Ηλεκτρονόμο Buchholz.....	24
1.16.3	Διαφορική Προστασία Μετασχηματιστή .....	25
1.16.4	Προστασία Buchholz.....	25
1.17	Προστασία ζυγών .....	26
1.18	Προστασία με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών .....	27
1.19	Αλεξικέρανα.....	29
1.20	Γειώση Υ/Σ.....	30
1.21	Κυματοπαγίδες (συστήματα φερεσυχων).....	30
1.22	Ρύθμιση τάσης.....	32
1.22.1	Ρύθμιση της τάσης με μεταγωγή .....	32
1.23	Σύγχρονοι πυκνωτές.....	34
1.24	Πυκνωτές παράλληλα.....	35
1.25	Πυκνωτές σε σειρά.....	36
1.25.1	Συμπέρασμα .....	36
1.26	Ρυθμιστική ιδιότητα .....	37
1.27	Δομή του Ηλεκτρικού Δικτύου .....	38
1.28	Υπολογισμός ισχύος μίας πόλης .....	39
1.28.1	Υ/Σ μέσης τάσης .....	39
1.29	Ισχύς Μ/Σ διανομής .....	39
	Συμπέρασμα .....	40
1.30	Τάση Βραχυκυκλώματος .....	40
1.31	Παραλληλισμός Μ/Σ.....	41
1.32	Υπολογισμός βασικών μεθόδων μετασχηματιστών 150kV και 20kV .....	42

1.33	Γραμμές μέσης τάσης.....	43
Κεφάλαιο 2ο:	Σχεδίαση κυκλώματος προστασίας.....	44
2.1	Τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος προστασίας.....	45
2.2	Σύστημα Προστασίας Ηλεκτρικών Δικτύων.....	46
2.3	Κατηγορίες Ηλεκτρονόμων.....	46
Κεφάλαιο 3ο:	Μετασχηματιστές Οργάνων.....	48
3.1	Εισαγωγή.....	48
3.2	Διάκριση Μετασχηματιστών.....	49
3.3	Μετασχηματιστές Τάσεως.....	49
3.4	Μετασχηματιστές Τάσεως Επαγωγικού Τύπου.....	50
3.5	Ακρίβεια Μετασχηματιστών Τάσεως.....	50
3.6	Χωρητικοί Μετασχηματιστές Τάσεως.....	51
3.6.1	Χαρακτηριστικά και σχεδιασμός.....	51
3.6.2	Κλάσεις Ακριβείας.....	51
3.6.3	Εφαρμογές.....	52
3.6.4	Σύγχρονες μεθόδους.....	52
3.7	Οι μετασχηματιστές έντασης (Current Transformers - CTs).....	52
3.7.1	Εισαγωγή.....	53
3.7.2	Τύποι Μετασχηματιστών Έντασης.....	53
3.7.3	Κλάσεις Ακριβείας.....	54
3.7.4	Εφαρμογές.....	54
3.7.5	Σχεδιαστικές Απαιτήσεις.....	55
3.8	Προδιαγραφές Μετασχηματιστών Εντάσεως.....	55
3.8.1	Ratio C.T.....	57
3.8.2	Ονομαστική Ισχύς $P_n$ .....	57
3.8.3	Accuracy limit factor.....	57
3.8.4	Κλάση Ακριβείας (Accuracy class).....	58
3.9	Μεταβατικά Φαινόμενα.....	61
3.9.1	Συνηθισμένα Προβλήματα.....	61
3.9.2	Απαιτήσεις σε Μετασχηματιστές σε Μεταβατικά φαινόμενα.....	62
3.9.3	Παραμένοντος Μαγνητισμός στους Μετασχηματιστές.....	62
3.9.4	Συμπεριφορά στην DC συνιστώσα.....	63
3.10	Κατηγορίες Μετασχηματιστών Εντάσεως για Μεταβατικά Φαινόμενα.....	64
3.11	Απομαγνητισμός του Πυρήνα σε Μετασχηματιστές Εντάσεως.....	66
3.12	Διαστασιολόγηση Μετασχηματιστών Εντάσεως για Μεταβατικά Φαινόμενα.....	67

3.13	Μετασχηματιστές Εντάσεως σε διάφορες εφαρμογές προστασίας.....	69
3.13.1	Προστασία υπερέντασης καθορισμένου χρόνου.....	69
3.13.2	Προστασία υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου.....	70
3.13.3	Προστασία Αποστάσεως.....	71
3.13.4	Διαφορική Προστασία Υψηλής Εμπέδησης.....	71
3.13.5	Διαφορική Προστασία Χαμηλής Εμπέδησης.....	72
3.13.6	Ποσοστιαία Διαφορική προστασία.....	72
Κεφάλαιο 4ο:	Προστασία Μετασχηματιστών Ισχύος.....	74
4.1	Κύριοι Κίνδυνοι για Μετασχηματιστές.....	75
4.2	Χαρακτηριστικά.....	75
4.3	Σφάλματα και αντικανονικές συνθήκες λειτουργίας.....	77
4.4	Ρεύμα σφάλματος παράγοντες που σχετίζονται.....	81
4.5	Μετασχηματιστής με τρίγωνο.....	82
4.6	Συστήματα Προστασίας Μετασχηματιστή.....	82
4.7	Μηχανικά μέσα προστασίας.....	83
4.8	Προστασία υπερθέρμανσης.....	84
4.9	Ηλεκτρικά μέσα προστασίας.....	85
4.9.1	Διαφορική προστασία μετασχηματιστών.....	85
4.10	Παράγοντες που επηρεάζουν την ορθή λειτουργία της διαφορικής προστασίας.....	87
4.11	Ρεύμα μαγνήτισης.....	88
4.12	Υπερδιέγερση.....	89
4.13	Διόρθωση ολίσθησης φάσεων και εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας.....	90
4.14	Κορεσμός μετασχηματιστών εντάσεως.....	92
4.15	Διαφορική προστασία με χρήση ψηφιακών ηλεκτρονόμων.....	93
4.16	Εξάλειψη μηδενικής ακολουθίας.....	94
Κεφάλαιο 5ο:	Ηλεκτρονόμοι.....	96
5.1	εισαγωγή.....	96
5.2	Λειτουργία ψηφιακού H/N διαφορικής προστασίας.....	97
5.3	Ηλεκτρονόμοι προστασίας έναντι σφαλμάτων γης (REF protection).....	99
5.4	Αρχή λειτουργίας ηλεκτρονόμων γης (REF).....	100
5.4.1	Ηλεκτρονόμος υψηλής εμπέδησης.....	101
5.4.2	Ηλεκτρονόμος χαμηλής εμπέδησης.....	102
5.5	Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης.....	103
Κεφάλαιο 6ο:	Υλοποίηση Δυναμικού Μοντέλου Δ.Π. ....	105
6.1	Εισαγωγή.....	105

6.2	Προστασίες που περιλαμβάνονται .....	105
6.3	μετασχηματιστής .....	105
6.4	Σχέσεις Μετασχηματιστή .....	106
6.5	Βασικά στοιχεία υλοποίησης.....	106
6.5.1	Προστασίες BE1-851 .....	107
6.5.2	Υλικά Υλοποίησης .....	108
6.5.3	Επεξεργασία πίνακα .....	109
6.5.4	Παραδείγματα άμεσης επέμβασης .....	110
6.5.5	Παράδειγμα χρονικής υπερέντασης ουδετέρου.....	111
6.5.6	Διαγράμματα υλοποίησης .....	113
Κεφάλαιο 7ο: Εφαρμογή BASLER Ηλεκτρονόμου .....		116
7.1	Εισαγωγή.....	116
7.2	Κύριες δυνατότητες BE1-851H.....	116
7.3	Δυνατότητες της εφαρμογής BESTCOMS .....	117
7.4	Εγκατάσταση προγράμματος .....	117
7.5	Αρχική οθόνη προγράμματος.....	117
7.6	Ρυθμίσεις υπερέντασης χρόνου .....	118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		129

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Γραμμές εισόδου(Τάση εισόδου 150kV) .....	2
Σχήμα 1.2: Μετασχηματιστής Ισχύος .....	3
Σχήμα 1.3: Ηλεκτικό BY-PASS .....	4
Σχήμα 1.4: Μονωτήρες διελεύσεως .....	5
Σχήμα 1.5: Θερμόμετρα Μ/Σ Ισχύος .....	5
Σχήμα 1.6: Εσωτερικής υπηρεσίας .....	6
Σχήμα 1.7: Αποζεύκτης (Μαχαιρωτοί δικόπτες).....	7
Σχήμα 1.8: Ζυγοί υψηλής τάσης .....	8
Σχήμα 1.9: Μονωτήρες .....	9
Σχήμα 1.10:Αίθουσα χειρισμών .....	10
Σχήμα 1.11: Διακόπτης Ισχύος (σύστημα μέτρησης Cts) .....	14
Σχήμα 1.12: Ηλεκτρονόμος Γραμμής .....	18
Σχήμα 1.13:Διαφορικός Ηλεκτρονόμος .....	23
Σχήμα 1.14: Σύστημα Buchholz .....	24
Σχήμα 1.15: Buchholz με το ηλεκτρικό του διάγραμμα .....	25
Σχήμα 1.16: Προστασία ζυγών .....	26
Σχήμα 1.17: Διάγραμμα Ροής (εφαρμογή σε ζυγούς) .....	28
Σχήμα 1.18: Αλεξικέραυνα σε γραμμές υψηλής τάσης .....	29
Σχήμα 1.19: Φίλτρο φερέσυχνων .....	31
Σχήμα 1.20: Μ/Σ με διαφορετικές λήψεις δευτερεύοντος τυλίγματος μέσω μεταγωγέα .....	32
Σχήμα 1.21: Μ/Σ με δύο μεταγωγείς για ρύθμιση τάσης υπο φορτίο .....	32
Σχήμα 1.22: Μεσαία λήψη αυτομετασχηματιστή .....	33
Σχήμα 1.23: Αυτόματη μεταγωγή OLTC .....	34
Σχήμα 1.24: Συνδεσμολογία πυκνωτών με σύνδεση σε αστέρα και τρίγωνο αντίστοιχα .....	35
Σχήμα 1.25: Συνδεσμολογία πυκνωτών σε σειρά .....	36
Σχήμα 1.26: Μονοφασικός επαγωγικός ρυθμιστής τάσης .....	37
Σχήμα 1.27: Βασική δομή ηλεκτρικής ενέργειας .....	38
Σχήμα 1.28: Σχεδιάγραμμα παράλληλης σύνδεσης Μ/Σ .....	39
Σχήμα 2.1: Τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα Η/Ν προστασίας .....	45
Σχήμα 2.2: Ζώνες προστασίας .....	46
Σχήμα 3.1: Μ/Σ εντάσεως και λοιπά συστήματα .....	48
Σχήμα 3.2: Μ/Σ τάσεως .....	50
Σχήμα 3.3: Τρόποι σύνδεσης Μ/Σ τάσεως .....	50
Σχήμα 3.4: Ηλεκτρικό κύκλωμα Μ/Σ εντάσεως .....	52
Σχήμα 3.5: Μετασχηματιστές εντάσεως .....	54
Σχήμα 3.6: Απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά ενός Μ/Σ εντάσεως .....	55
Σχήμα 3.7: Διαφορική προστασία υψηλής εμπέδησης .....	71
Σχήμα 4.1: Μετασχηματιστής ισχύος .....	74
Σχήμα 4.2: Μετασχηματιστής ισχύος .....	75
Σχήμα 4.3: Μετασχηματιστής ισχύος .....	76
Σχήμα 4.4: Απομόνωση υγρασίας Silica gel .....	80
Σχήμα 4.5: Εισοδύναμο Thevenin του Μ/Σ .....	81
Σχήμα 4.6: Ρελέ Buchholz .....	83
Σχήμα 4.7: Καμπύλη διαφορικής προστασίας .....	86

Σχήμα 4.8: Εξάληψη μηδενικής ακολουθίας με χρήση ενδιάμεσων Μ/Σ εντάσεως.....	91
Σχήμα 4.9: Ψηφιακός Η/Ν διαφορικής προστασίας .....	94
Σχήμα 5.1: Ηλεκτρονόμος πεδίου .....	96
Σχήμα 5.2: Καμπύλη λειτουργίας ψηφιακού Η/Ν διαφορικής προστασίας .....	97
Σχήμα 5.3: Σύνδεση Η/Ν γής (REF) .....	100
Σχήμα 5.4: Η/Ν γης υψηλής εμπέδησης .....	101
Σχήμα 5.5: Κατάσταση εξωτερικού σφάλματος Η/Ν γης .....	103
Σχήμα 6.1: Basler BE1-851 Η/Λ .....	106
Σχήμα 6.2: Τοποθέτηση Η/Λ LED εντός/εκτός διακόπτη και τριών επιλογέων 0/1 .....	107
Σχήμα 6.3: Υλοποίηση εργαστηριακής διάταξης .....	108
Σχήμα 6.4: Κοπή πρόσοψης πίνακα εργαστηριακής διάταξης .....	108
Σχήμα 6.5: Τοποθέτηση υλικών ράγας RO, RC, RCT και Δικακοπτών Β6 S202 .....	109
Σχήμα 6.6: Καλωδίωση Η/Λ με RCT και καλωδίωση γεφυρών στις κλεμοσειρές I/O του Η/Λ .....	109
Σχήμα 6.7: Καλωδίωση Η/Λ με κλεμοσειρές X, Relay Open, Relay Close .....	110
Σχήμα 6.8: Μπροστινή όψη λαμπάκι ALARM, Δ.Χ, λυχνία 0/1 διακόπτη, τρεις διακόπτης 0/1 .....	112
Σχήμα 6.9: Διάγραμμα γενικής διάταξης .....	112
Σχήμα 6.10: Διάγραμμα παροχών τροφοδοσίας .....	113
Σχήμα 6.11: Διάγραμμα κλεμών Η/Λ και κλεμοσειμών ράγας X, XCT .....	113
Σχήμα 7.1: Απεικόνιση αρχικής εκκίνησης (εφαρμογής Basler) .....	109
Σχήμα 7.2: Ρύθμιση υπερέντασης χρόνου (εφαρμογής Basler) .....	110
Σχήμα 7.3: Γενική λειτουργία (εφαρμογής Basler) .....	111
Σχήμα 7.4: Ρύθμιση επιλογής ομάδας (εφαρμογής BASLER) .....	112
Σχήμα 7.5: Ρύθμιση επαναφοράς συστήματος (εφαρμογής BASLER) .....	113
Σχήμα 7.6: Αστοχία διακόπτη (εφαρμογής BASLER) .....	114
Σχήμα 7.7: Λογικοί χρονιστές (εφαρμογής BASLER) .....	115
Σχήμα 7.8: Ρύθμιση ρολογιού Η/Ν (εφαρμογής BASLER) .....	116
Σχήμα 7.9: Ρύθμιση απαίτησης συστήματος (εφαρμογής BASLER) .....	117
Σχήμα 7.10: Παρακολούθηση διακόπτη (εφαρμογή BASLER) .....	118
Σχήμα 7.11: Ρύθμιση συναγερμών (εφαρμογή BASLER) .....	119
Σχήμα 7.12: Εικονικοί διακόπτες (εφαρμογή BASLER) .....	120

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Αναπαριστά το σχήμα 3.6.....	56
Πίνακας 3.2: IEEE C57.13 Κλάσεις ακριβείας.....	60
Πίνακας 3.3: IEC61869-2 κλάσεις μετασχηματιστών εντάσεως .....	60
Πίνακας 3.4: Τυπικές τιμές χρονικής σταθεράς δευτερεύοντος ανά κατηγορία πυρήνα .....	68
Πίνακας 4.1: Επιτρεπόμενη αντοχή Μ/Σ σε εξωτερικό σφάλμα.....	78
Πίνακας 4.2: Μέσα προστασίας Μ/Σ ανάλογα με την ισχύ τους.....	83
Πίνακας 5.1: Ρύθμιση Η/Ν διαφορικής προστασίας .....	98

## Συντομογραφίες

Δ.Ε.	Διπλωματική Εργασία
ΔΠΙΑΕ	Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος
Π.Ε.	Πτυχιακή Εργασία
Η.Λ.	Ηλεκτρονόμος
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
Α.Δ.	Ανοίγματος Διακόπτη
Σ.Η.Ε	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
Η/Λ	Ηλεκτρονόμος
Υ/Σ	Υποσταθμός
VT	Voltage Transformer
CT	Current Transformer
Υ.Τ	Υψηλή Τάση
Μ.Τ	Μέση Τάση
Ε.Ρ	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
Σ.Ρ	Συνεχούς Ρεύματος
Γ.Μ	Γραμμή Μεταφοράς
Α.Ε	Αυτόματη Επαναφορά
RO	Relay Open
RC	Relay Close
RCT	Relay CT
Δ.Χ	Διακόπτης χειρισμών





## Κεφάλαιο 1ο: Λειτουργία Υποσταθμού

Υποσταθμός είναι η ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση που επιτρέπει τη μετατροπή, κατανομή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, εντός του διασυνδεδεμένου Εθνικού Συστήματος υψηλής τάσης (150 kV), ονομάζεται υποσταθμός.

Οι υποσταθμοί αποτελούν κρίσιμους κόμβους στα ηλεκτρικά δίκτυα, με κύριο ρόλο τη μετατροπή τάσεων, την κατανομή ισχύος και την προστασία του συστήματος. Χωρίζονται σε υποσταθμούς υψηλής τάσης (HV), μεσαίας τάσης (MV) και χαμηλής τάσης (LV), ανάλογα με την εφαρμογή τους.

### 1.1 Δομή υποσταθμού :

- Γραμμές εισόδου (Input Lines) :

Μεσαίας τάσης της τάξης 20kV

- Πεδίο/Διακόπτες (Switchyard/Field) :

Περιλαμβάνει διακόπτες (CBs) και διαχωριστές (Disconnectors) για ελέγχους και απομόνωση τμημάτων (κάθε γραμμής ξεχωριστά).

- Μετασχηματιστής ισχύος :

Τα θερμόμετρα με τα κυκλώματα τους.

Οι αυτόματοι διακόπτες E.P των κινητήρων των ανεμιστήρων.

Οι ακροδέκτες των κυκλωμάτων του ηλεκτρονόμου Buchholz.

Το κύκλωμα θερμάνσεως του πίνακα, για να εξασφαλίζεται σταθερή θερμοκρασία 15 βαθμών.

περίπου για την αποφυγή συμπυκνώσεως της υγρασίας στα όργανα και τα κυκλώματα του.

Σύστημα ψύξης: Λάδι-αέρας.

- Μετασχηματιστής εσωτερικής υπηρεσίας

Για τις ανάγκες του υποσταθμού 230V και 400V. Εξειδικευμένο μετασχηματιστή ισχύος, ο οποίος συνδέεται στους ζυγούς μέσης τάσης και υποβιβάζει την τάση σε χαμηλή (230/400V).

Διαθέτει προστασία με ασφάλειες στην πλευρά μέσης τάσης, για προστασία του μετασχηματιστή από υπερφορτώσεις ή βραχυκυκλώματα.

Η τάση 230/400V μεταφέρεται σε πίνακα διανομής, ο οποίος συνήθως βρίσκεται στην αίθουσα χειρισμών του υποσταθμού. Από εκεί, η ενέργεια κατανέμεται σε εσωτερικά κυκλώματα

- Διακόπτες CB :

Τύποι διακοπών SF6, Vacuum.

Ελέγχουν τη ροή ρεύματος και διακόπτουν το κύκλωμα σε περίπτωση βλάβης

Ανιχνεύει υπερρεύματα (μέσω CT) και διακόπτει το κύκλωμα σε < 100 ms.

- Αποζεύκτης :

Πρόκειται για μια συσκευή ελέγχου που επιτρέπει τη διακοπή ή την επανεκκίνηση της λειτουργίας ενός κυκλώματος, προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια ή η αποτελεσματικότητα του συστήματος.

- Συστήματα Προστασίας:

Ρελέ, CT, VT και λογικές συναρτήσεις για ανίχνευση βλαβών.

CT (Current Transformer): Μετατρέπει υψηλά ρεύματα σε χαμηλά για μέτρηση και προστασία.

VT (Voltage Transformer): Μετατρέπει υψηλή τάση σε χαμηλή για συστήματα ελέγχου. Συνδέεται παράλληλα.

## 1.2 Κριτήρια κατασκευής υποσταθμού Υ/Σ

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές από τα κέντρα κατανάλωσης. Για να μειωθούν οι απώλειες κατά τη μεταφορά της ισχύος, η τάση αυξάνεται στους σταθμούς παραγωγής και μειώνεται κοντά στους καταναλωτές.

Η κατασκευή ενός υποσταθμού υψηλής/μέσης τάσης (Υ/Σ Υ.Τ σε Μ.Τ) συνδέεται με υψηλό κόστος, γι' αυτό η απόφαση για την εγκατάστασή του και η επιλογή της βέλτιστης θέσης απαιτούν λεπτομερή τεχνοοικονομική μελέτη.

Ο υποσταθμός τοποθετείται συνήθως κοντά σε σημεία με έντονη ηλεκτρική ζήτηση, όπως μεγάλες πόλεις ή βιομηχανικές περιοχές. Η ακριβής θέση επιλέγεται έτσι ώστε οι γραμμές μέσης τάσης που τροφοδοτούνται από αυτόν να καλύπτουν τόσο την τρέχουσα κατανάλωση όσο και την αναμενόμενη μελλοντική αύξηση.

Η ανάγκη δημιουργίας νέου Υ/Σ προκύπτει σε δύο περιπτώσεις: α) όταν η νέα ζήτηση ισχύος υπερβαίνει τις δυνατότητες των υφιστάμενων γειτονικών υποσταθμών, ή β) όταν ο πλησιέστερος Υ/Σ βρίσκεται εκτός της εμβέλειας των γραμμών μέσης τάσης.

Για παράδειγμα, ένας Υ/Σ 150kV/20kV με ισχύ 1MW μπορεί να τροφοδοτήσει περιοχές έως 50 χιλιόμετρα. Για μικρότερες ισχύς, η εμβέλεια μπορεί να φτάσει τα 60-70 χιλιόμετρα, αρκεί ο υποσταθμός να μπορεί να αντέξει το επιπλέον φορτίο.

## 1.3 Επεξήγηση υποσταθμού Υ/Σ

Κάθε Υ/Σ μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από άποψη τάσεως από 3 μέρη.

Το πρώτο μέρος είναι αυτό της τάσεως 150KV, το δεύτερο της Μ.Τ, και το τρίτο της τάσεως των 230/400 Ε.Ρ και 110V Σ.Ρ.

α) Τμήμα τάσης 150KV.



Σχήμα 1.1 Γραμμές εισόδου (Τάση εισόδου 150kV)

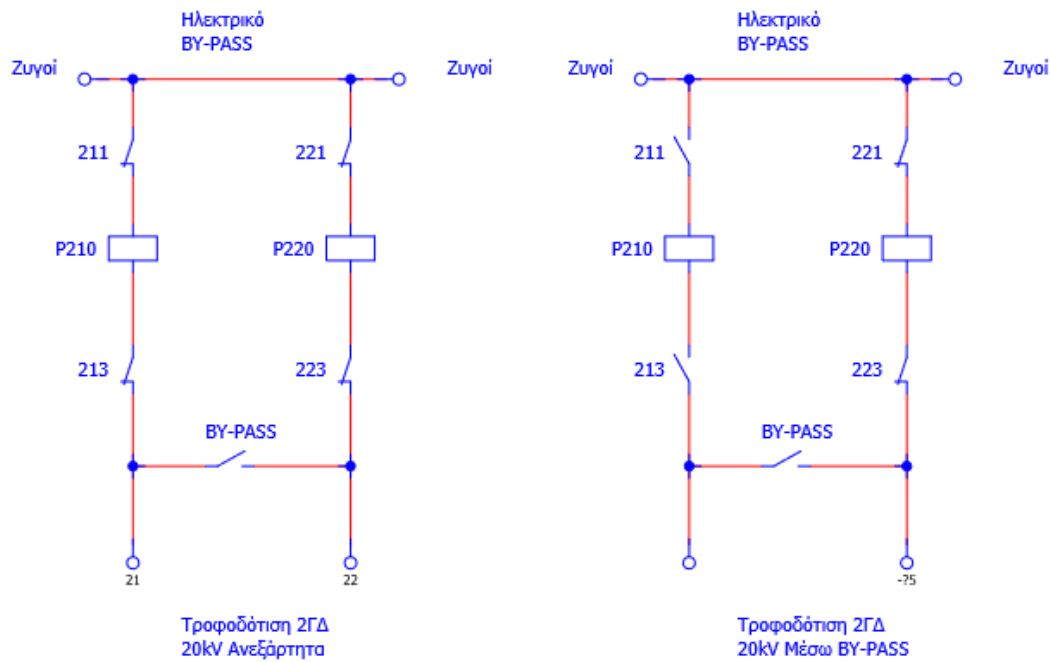
- Τις γραμμές μεταφοράς
- Τις κυματοπαγίδες και φίλτρα φερέσυχων
- Τον πυκνωτή ζεύξεως συνδεδεμένο παράλληλα στη γραμμή μεταφοράς.
- Τους Μ/Σ τάσεως 150KV
- Τους αποζεύκτες 150KV μετά γειωτών Νο 83,93,103
- Τους ελαιοδιακόπτες 150KV P80, P90, P100
- Τους ζυγούς 150KV
- Τους Μ/Σ εντάσεως (τάση 150KV) .
- Τον ηλεκτροκίνητο αποζεύκτη 150KV Νο78
- Τους αποζεύκτες 150KV Νο 81,91,101
- Τον Μ/Σ ισχύος 150KV/20KV, ισχύος 20-25MVA



Σχήμα 1.2 Μετασχηματιστής Ισχύος

β) Τμήμα μέσης τάσεως.

- Τα αλεξικέρανα 20KV
- Τον Μ/Σ εντάσεως (τάση 20KV)
- Τον κεντρικό αποζεύκτη 20KV
- Τους ζυγούς 20KV (κύριους και βοηθητικούς)
- Τον Μ/Σ εσωτερικής υπηρεσίας και τους Μ/Σ τάσεως 20KV με τους ασφαλειοαποζεύκτες τους
- Τους ελαιοδιακόπτες 20KV P210,P220,P230,P240.
- Τους αποζεύκτες 20KV



Σχήμα 1.3 Ηλεκτρικό BY-PASS

#### 1.4 Ανάλυση Μ.Τ.

Η κεντρική συνιστώσα ενός υποσταθμού υψηλής/μέσης τάσης είναι ο μετασχηματιστής ισχύος. Αυτός δέχεται ηλεκτρική ενέργεια σε εναλλασσόμενο ρεύμα και την διανέμει σε διάφορα φορτία, μεταβάλλοντας την τάση και την ένταση σε αντίστροφη αναλογία (δηλαδή, όταν αυξάνεται η τάση, μειώνεται η ένταση και αντίστροφως).

Ο μετασχηματιστής αποτελείται από τριφασικά τυλίγματα, τα οποία είναι τοποθετημένα σε ένα κλειστό μεταλλικό δοχείο γεμάτο με ψυκτικό λάδι. Το λάδι παίζει διπλό ρόλο:

- Ψύξη: Απορροφά τη θερμότητα που παράγεται στον πυρήνα και στους χαλκούς αγωγούς των τυλιγμάτων.
- Μόνωση: Επιπλέον, λειτουργεί ως μονωτικό μέσο, ενώ η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω των τοιχωμάτων του δοχείου.

Το ψυκτικό λάδι στον μετασχηματιστή παρέχει καλή ηλεκτρική μόνωση στα τυλίγματα και αποτρέπει την εμφάνιση βραχυκυκλωμάτων. Για την αποτελεσματική ψύξη του, τοποθετούνται εξωτερικά ψυγεία με ειδικά σχεδιασμένες μεγάλες επιφάνειες, ώστε να ενισχύουν τη μεταφορά θερμότητας στο περιβάλλον.

Η απομάκρυνση της θερμότητας γίνεται ακόμα πιο αποδοτική με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα μέσω ανεμιστήρων. Επιπλέον, ο μετασχηματιστής διαθέτει μια βοηθητική δεξαμενή (συνθά ονομαζόμενη "επεκτατικό δοχείο"), η οποία βρίσκεται πάνω από το κύριο δοχείο και συνδέεται με αυτό μέσω στενού σωλήνα. Αυτή η δεξαμενή διασφαλίζει ότι το κύριο δοχείο παραμένει πλήρως γεμάτο με λάδι σε όλες τις λειτουργικές καταστάσεις.

Για την προστασία του μετασχηματιστή από διαρροές λαδιού ή υπερθέρμανση, χρησιμοποιείται ένας διακόπτης Buchholz, ο οποίος εντοπίζει ασυνήθιστες καταστάσεις και ενεργοποιεί ασφαλιστικά μέτρα.

### 1.4.1 Μονωτήρες διελεύσεως

Οι μονωτήρες διέλευσης των μετασχηματιστών (Μ/Σ) έχουν διπλό ρόλο:

- Σύνδεση με το δίκτυο: Επιτρέπουν την ηλεκτρική σύνδεση των ακροδεκτών του μετασχηματιστή με τις εξωτερικές γραμμές μεταφοράς.
- Ηλεκτρική απομόνωση: Διασφαλίζουν ότι οι ακροδέκτες παραμένουν μονωμένοι από το μεταλλικό περίβλημα του Μ/Σ, αποτρέποντας τυχόν διαρροές ρεύματος ή βραχυκυκλώματα.



Σχήμα 1.4 Μονωτήρες διελεύσεως

### 1.4.2 Θερμόμετρα

Η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία στα τυλίγματα του μετασχηματιστή (Μ/Σ) ορίζει το ανώτατο όριο φόρτισης που μπορεί να αντέξει χωρίς κίνδυνο βλάβης. Για τον έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας, χρησιμοποιούνται ειδικά θερμόμετρα που μετρούν:

- τη θερμοκρασία του λαδιού (για την ψυκτική ικανότητα)
- τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων (για την άμεση παρακολούθηση της θέρμανσης των αγωγών).

Αυτά τα όργανα βοηθούν στη διασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας και αποτρέπουν την υπερθέρμανση, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε υποβάθμιση της μόνωσης ή ακόμα και σε βλάβη του εξοπλισμού.



Σχήμα 1.5 Θερμόμετρα Μ/Σ ισχύος

### 1.4.3 Πίνακας Μ/Σ

Μέσα στο κιβώτιο του ηλεκτρικού πίνακα του Μ/Σ στεγάζονται κρίσιμα όργανα και κυκλώματα, τα οποία απαιτούν ειδική προστασία για αξιόπιστη λειτουργία. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται:

- Τα θερμομέτρα και τα αντίστοιχα κυκλώματά τους – για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας λαδιού και τυλιγμάτων.
- Οι αυτόματοι διακόπτες (E.P.) – που ελέγχουν τους κινητήρες των ανεμιστήρων ψύξης.
- Οι ακροδέκτες των ηλεκτρικών κυκλωμάτων που συνδέονται με τον ηλεκτρονόμο Buchholz, για ανίχνευση ελαττωμάτων (π.χ. διαρροές λαδιού ή εσωτερικά βραχυκυκλώματα).
- Ένα θερμοαντικό κύκλωμα – που διατηρεί τη θερμοκρασία του πίνακα στους  $\sim 15^{\circ}\text{C}$ , προλαμβάνοντας τη συμπύκνωση υγρασίας που θα μπορούσε να προκαλέσει βλάβη στα ευαίσθητα ηλεκτρονικά μέρη.

Αυτά τα στοιχεία εξασφαλίζουν τη σταθερότητα και την ασφάλεια του μετασχηματιστή, αποτρέποντας βλάβες από υπερθέρμανση, υγρασία ή ηλεκτρικές ανωμαλίες.

### 1.4.4 Μ/Σ εσωτερικής υπηρεσίας

Για την κάλυψη των αναγκών του υποσταθμού (Υ/Σ) σε χαμηλή τάση (230/400V), υπάρχει εγκατεστημένος ένας ειδικός μετασχηματιστής μικρής ισχύος, ο οποίος τροφοδοτείται απευθείας από τους ζυγούς μέσης τάσης του Υ/Σ. Αυτός ο μετασχηματιστής υποβιβάζει την τάση σε επίπεδα κατάλληλα για τα βοηθητικά κυκλώματα



Σχήμα 1.6 Μ/Σ εσωτερικής υπηρεσίας

Σύστημα Προστασίας και Διανομής :

- Η τροφοδοσία του μετασχηματιστή από την πλευρά της μέσης τάσης γίνεται μέσω ασφαλειοποζευκτών, οι οποίοι εξασφαλίζουν την προστασία του από υπερφορτώσεις ή βραχυκυκλώματα.
- Η χαμηλή τάση (230/400V) μεταφέρεται στον πίνακα διανομής, ο οποίος συνήθως βρίσκεται στην αίθουσα χειρισμών του υποσταθμού.
- Από τον πίνακα αυτόν, το ρεύμα κατανέμεται στα διάφορα βοηθητικά κυκλώματα του Υ/Σ.

### 1.4.5 Μετασχηματιστές μετρήσεων

Για την ασφαλή και ακριβή μέτρηση υψηλών τάσεων και μεγάλων εντάσεων σε ηλεκτρικά κυκλώματα, χρησιμοποιούνται ειδικοί μετασχηματιστές μετρήσεων. Αυτοί υποβιβάζουν τις υψηλές τιμές σε επίπεδα συμβατά με τα μετρητικά όργανα, διασφαλίζοντας ακρίβεια και προστασία των συσκευών.

Χαρακτηριστικά των Μετασχηματιστών Μετρήσεων :

- Συνήθως είναι μονοφασικοί και μικρής ισχύος, καθώς δεν προορίζονται για μεταφορά ενέργειας αλλά για ακριβή μετρήσεις.
- Διακρίνονται σε δύο τύπους: μετασχηματιστές ρεύματος (Μ/Σ εντάσεως) , μετασχηματιστές τάσης (Μ/Σ τάσεως).

Σημασία και Εφαρμογές :

- Την παρακολούθηση της λειτουργίας δικτύων υψηλής τάσης.
- Την ενεργοποίηση προστατευτικών συστημάτων (π.χ. ρελέ).
- Την έμμεση μέτρηση ισχύος και ενέργειας σε υποσταθμούς.

Διακόπτες ισχύος :

Οι αυτόματοι διακόπτες αποτελούν βασικά στοιχεία στα ηλεκτρικά συστήματα, καθώς επιτρέπουν την ασφαλή ζεύξη και απόζευξη των κυκλωμάτων. Η κύρια λειτουργία τους είναι:

- Απομόνωση βλαβών: Σε περίπτωση ανωμαλιών (π.χ. βραχυκυκλώματος, υπερφόρτωσης), οι διακόπτες ενεργοποιούνται αυτόματα, απομονώνοντας το τμήμα του δικτύου όπου προέκυψε το πρόβλημα. Αυτό ελαχιστοποιεί τις ζημιές και διατηρεί τη σταθερότητα του συστήματος.
- Ελεγχόμενη λειτουργία: Εκτός από την αυτόματη απόκριση σε βλάβες, οι διακόπτες επιτρέπουν και χειροκίνητη ενεργοποίηση/απενεργοποίηση, διευκολύνοντας τις εργασίες συντήρησης ή επέμβασης.

### 1.4.6 Αποζεύκτες

Οι αποζεύκτες είναι τριπολικοί μαχαιρωτοί διακόπτες που χρησιμοποιούνται κυρίως για την απομόνωση τμημάτων ενός ηλεκτρικού συστήματος. Βασικά χαρακτηριστικά και περιορισμοί τους περιλαμβάνουν:

- Πρωταρχικός σκοπός: Να διαχωρίζουν με οπτική διαπίστωση (visible break) τμήματα του δικτύου για συντήρηση ή επισκευές.
- Δεν είναι σχεδιασμένοι να διακόπτουν ή να επαναφέρουν ρεύματα υπό φορτίο, εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις με πολύ χαμηλές εντάσεις.
- Αν ανοίξουν υπό φορτίο, δημιουργείται ισχυρό ηλεκτρικό τόξο.



Σχήμα 1.7 Αποζεύκτης (μαχαιρωτοί διακόπτες)

### 1.4.7 Ζυγοί

Οι ζυγοί αποτελούν το κεντρικό δομικό στοιχείο ενός υποσταθμού, κατασκευασμένοι από χαλκό ή αλουμίνιο. Διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το επίπεδο τάσης:



Σχήμα 1.8 Ζυγοί υψηλής τάσης

#### a. Ζυγοί υψηλής τάσης

Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών ισχύος. Τύποι ζυγών :

- Απλοί ζυγοί, βασική διάταξη με διακόπτες και μονάδες μεταγωγής.
- Διπλοί ζυγοί, επιτρέπουν εναλλακτικές διασυνδέσεις για ευελιξία λειτουργίας (δυνατότητα συντήρησης χωρίς διακοπή λειτουργίας).
- Τριπλοί ζυγοί, χρησιμοποιούνται σε κρίσιμους υποσταθμούς με υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας (Παράλληλη σύνδεση παραγωγικών μονάδων.)

#### b. Ζυγοί μέσης τάσης

Σε αυτούς συνδέονται τα δευτερεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών ισχύος, και από εκεί ξεκινούν οι γραμμές διανομής.

- Διπλή διάταξη ζυγών: Εξασφαλίζει συνέχεια παροχής ακόμα και κατά τη συντήρηση ή σε περίπτωση βλάβης.
- Χρήση μονοπολικών αποζευκτών: Για την απομόνωση των γραμμών Μ.Τ. κατά τις επεμβάσεις.

### 1.4.8 Μονωτήρες

Για την ηλεκτρική απομόνωση των μηχανημάτων από τα γειωμένα μέρη του υποσταθμού, χρησιμοποιούνται ειδικοί μονωτήρες. Αυτοί διασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία του εξοπλισμού, αποτρέποντας διαρροές ρεύματος ή βραχυκυκλώματα.





Σχήμα 1.9 Μονωτήρες

- Εξωτερικοί μονωτήρες  
Υλικό κατασκευής πορσελάνη ή γυαλί (ανθεκτικά στις ατμοσφαιρικές συνθήκες).
- Εσωτερικοί μονωτήρες  
Υλικό κατασκευής μονωτικά υλικά (π.χ. εποξειδικές ρητίνες, πολυμερή).
- Ηλεκτρική Απομόνωση  
Διαχωρίζουν τα ενεργά μέρη από τη γείωση, αποφεύγοντας επικίνδυνα ηλεκτρικά φαινόμενα.
- Μηχανική Στήριξη  
Αντέχουν το βάρος και τις δυνάμεις του εξοπλισμού (π.χ. ζυγών, καλωδίων).
- Προστασία από Περιβαλλοντικούς Παράγοντες  
Αντοχή σε UV, πάγο και ρύπους.

#### 1.4.9 Υλικό αίθουσας χειρισμών

Στην αίθουσα ελέγχου του υποσταθμού λειτουργούν συσκευές χαμηλής τάσης, με σημαντικότερες:

- a. Ηλεκτρονόμοι (Ρελέ προστασίας)
  - Τροφοδοτούνται από Μ/Σ τάσης και ρεύματος (Χ.Τ.).
  - Προστατεύουν εξωτερικό εξοπλισμό (π.χ. μετασχηματιστές, γραμμές) από υπερφορτώσεις, βραχυκυκλώματα κ.ά.
- b. Κρίσιμα συστήματα

Συστοιχία Συσσωρευτών :

- Τύποι: Αλκαλικοί ή μολύβδου.
- Σκοπός: Παρέχουν εφεδρική τροφοδοσία (DC) σε κρίσιμα κυκλώματα (π.χ. ρελέ, συστήματα ελέγχου).

Φορτιστής Συσσωρευτών :

- Διατηρεί τους συσσωρευτές σε κατάσταση πλήρους φόρτισης.

Πίνακες Χειρισμού :

- Επιτρέπουν τον έλεγχο και την παρακολούθηση όλων των λειτουργιών του υποσταθμού (π.χ. ενεργοποίηση/απενεργοποίηση διακοπών, έλεγχος τάσεων).



Σχήμα 1.10 Αίθουσα χειρισμών

## 1.5 Υψηλή τάση 150kV

Βασικά στοιχεία :

- Πύλη εισόδου Υ.Τ.
- Κύριους ζυγούς (κεντρικοί αγωγοί διασύνδεσης)
- Πύλη εξόδου Υ.Τ.

Πύλη εισόδου Υ.Τ. :

- Αποζεύκτης & Γειωτής:  
Ο αποζεύκτης χρησιμεύει για την απομόνωση του κυκλώματος (χωρίς δυνατότητα διακοπής ρεύματος υπό φορτίο).  
Ο γειωτής εξασφαλίζει την ασφάλεια κατά τις επεμβάσεις, συνδέοντας προσωρινά τις γραμμές με τη γείωση.
- Σύνδεση με τους κύριους ζυγούς:  
Γίνεται είτε απευθείας, είτε μέσω διακόπτη ισχύος (ανάλογα με το σχεδιασμό).

Κύριοι Ζυγοί :

- Συνδέονται οι Μ/Σ ισχύος (μέσω ηλεκτροκίνητων ή μηχανικών αποζευκτών).
- Διακλαδίζονται οι βοηθητικοί ζυγοί ή οι γραμμές εξόδου (μέσω απλών/ηλεκτροκίνητων αποζευκτών).

Πύλη εισόδου/εξόδου :

- Διαθέτει αποζεύκτη και γειωτή, παρόμοια με την πύλη εισόδου.

Βοηθητικοί Ζυγοί :

- Συντήρηση κύριων ζυγών (χωρίς διακοπή λειτουργίας ολόκληρου του Υ/Σ).
- Προσωρινή σύνδεση επιπλέον μηχανημάτων (π.χ. για δοκιμές).  
Συστήματα Προστασίας από Υπερτάσεις :

- Ακίδες απαγωγής υπερτάσεων:  
Τοποθετούνται στους ζυγούς και σε κρίσιμα μηχανήματα.

Το άνω μέρος βρίσκεται υπό τάση, ενώ το κάτω μέρος είναι γειωμένο.

Το διάκενο μεταξύ τους καθορίζεται από ηλεκτρική μελέτη, ώστε να εκτρέπουν τις υπερτάσεις προς τη γείωση.

- Θόρυβος  
Προκαλείται από ηλεκτρικές διαρροές στις ακίδες, ιδιαίτερα σε υγρές συνθήκες.  
Μέτρα ασφαλείας :
- Απαγορεύεται η χειρισμός Υ.Τ. με μονωτικό κοντάρι (λόγω κινδύνου).
- Ελάχιστη ασφαλής απόσταση 2,5 μέτρα μεταξύ ανθρώπου και ζυγών 150kV

## 1.6 Μέση τάση διανομής

Βασικά Στοιχεία :

- Ζυγούς εξόδου των μετασχηματιστών ισχύος (Μ/Σ).
- ύριους ζυγούς (για κύρια διανομή).
- Βοηθητικούς ζυγούς (για εφεδρικές ή εναλλακτικές συνδέσεις).

Ζυγοί Εξόδου Μ/Σ Ισχύος :

- Σύνδεση με Μ/Σ:  
Το ένα άκρο συνδέεται απευθείας στους μονωτήρες διέλευσης του Μ/Σ.  
Το άλλο άκρο συνδέεται με τους κύριους ζυγούς (15/20 kV) μέσω Α/Ζ και διακόπτη ισχύος.
- Συστήματα Προστασίας:  
Αλεξικέραυνα (μία ανά φάση), συνδεδεμένα με τη γείωση, για απορρόφηση υπερτάσεων.  
Μ/Σ τάσης και ρεύματος (για μετρήσεις και προστατευτικά κυκλώματα).  
Μ/Σ εσωτερικής υπηρεσίας (τροφοδοσία βοηθητικών συστημάτων), προστατευμένοι με ασφαλειοποζευκτές.

Κύριοι ζυγοί διανομής :

- Στόχος η κατανεμημένη παροχή ρεύματος σε τοπικά δίκτυα (π.χ. βιομηχανίες, αστικές περιοχές).

Βοηθητικοί Ζυγοί :

- Συντήρηση κύριων ζυγών (χωρίς διακοπή παροχής).
- Εναλλακτικές συνδέσεις (π.χ. σε περίπτωση βλάβης).
- Μπορούν να τροφοδοτηθούν από διαφορετικό Μ/Σ ή να λειτουργήσουν ως ανεξάρτητο τμήμα

Συνδεσμολογία με Γραμμές Διανομής :

- Οι γραμμές μπορούν να συνδεθούν απευθείας με τους κύριους ζυγούς
- Σε εναλλακτική περίπτωση μπορούν να συνδεθούν σε βοηθητικούς ζυγούς (15/22 kV), προσφέροντας ευελιξία

## 1.7 Βοηθητικά κυκλώματα του Υ/Σ 20kV/0,4kV

Κάθε υποσταθμός (Υ/Σ) διαθέτει έναν ειδικό μετασχηματιστή εσωτερικής υπηρεσίας (Μ/Σ) για την παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος (Ε.Ρ.) 230/400V. Ο μετασχηματιστής αυτός συνδέεται στο δίκτυο μέσης τάσης (15kV ή 20kV) μέσω ασφαλειοποζευκτών.

Η διανομή της χαμηλής τάσης 230/400V γίνεται μέσω ενός ειδικού πίνακα, γνωστού ως πίνακας Μ/Σ εσωτερικής υπηρεσίας 230/400V ή "Service Transformer 230/400V". Αυτός ο πίνακας περιλαμβάνει έναν γενικό αυτόματο διακόπτη καθώς και επιμέρους αυτόματους διακόπτες για τα διάφορα κυκλώματα.

## Κεφάλαιο 1

Σε μεγάλους υποσταθμούς, μπορεί να υπάρχουν δύο μετασχηματιστές εσωτερικής υπηρεσίας, καθένας με τον δικό του ανεξάρτητο πίνακα και γενικό αυτόματο διακόπτη. Έτσι, κάθε μετασχηματιστής μπορεί να τροφοδοτεί ξεχωριστά όλα τα κυκλώματα 230/400V του υποσταθμού.

Η τάση 230/400V χρησιμοποιείται σε κάθε Υ/Σ για την κάλυψη αναγκών όπως:

- Φωτισμός
- Θέρμανση της αίθουσας χειρισμών
- Λειτουργία του φορτιστή συσσωρευτών
- Λειτουργία των κινητήρων των ανεμιστήρων για την ψύξη του λαδιού των Μ/Σ

### 1.8 Βοηθητικά κυκλώματα του Υ/Σ 110V και 220V

Για τις ανάγκες συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) σε έναν Υ/Σ μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχει εγκατάσταση με συστοιχία συσσωρευτών 110V ή 230V. Η χωρητικότητα της συστοιχίας εξαρτάται από το μέγεθος του υποσταθμού.

Η φόρτιση των συσσωρευτών και η παροχή συνεχούς ρεύματος στα κυκλώματα κατά την κανονική λειτουργία πραγματοποιείται μέσω ειδικού φορτιστή που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα (Ε.Ρ.) σε συνεχές (Σ.Ρ.).

Το συνεχές ρεύμα χρησιμοποιείται σε κυκλώματα όπως:

- Τροφοδότηση των διακοπών ισχύος υψηλής και μέσης τάσης
- Τροφοδότηση των αποζευκτών υψηλής και μέσης τάσης
- Λειτουργία του φωτισμού ανάγκης

Όλα αυτά τα κυκλώματα προστατεύονται μέσω αυτόματων διακοπών που βρίσκονται στον πίνακα συνεχούς ρεύματος. Αυτοί οι διακόπτες απομονώνουν τόσο τον θετικό όσο και τον αρνητικό πόλο κάθε κυκλώματος.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, εφαρμόζεται διπλή τροφοδότηση, ώστε αν παρουσιαστεί πρόβλημα σε ένα σημείο, να είναι δυνατή η τροφοδότηση από εναλλακτική πηγή.

Όπως συμβαίνει και με τα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος (Ε.Ρ.), έτσι και τα κυκλώματα συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) μεταφέρονται προς τα μηχανήματα μέσω υπόγειων καλωδίων.

### 1.9 Βοηθητικά κυκλώματα του Υ/Σ για της μετρήσεις και την λειτουργία των ηλεκτρονόμων

Τα κυκλώματα μέτρησης και λειτουργίας των ηλεκτρονόμων αποτελούν ένα από τα πιο κρίσιμα και ευαίσθητα σημεία του υποσταθμού (Υ/Σ). Και τα δύο αυτά κυκλώματα έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι, εκτός ελάχιστων περιπτώσεων (όπως ο ηλεκτρονόμος Buchholz), ξεκινούν από τους μετασχηματιστές τάσης (Μ/Σ Τάσεως) και έντασης (Μ/Σ Εντάσεως). Οι μετασχηματιστές αυτοί μετατρέπουν τα διάφορα ηλεκτρικά μεγέθη του υποσταθμού σε τιμές κατάλληλες για μέτρηση από τα όργανα ελέγχου.

Ο συνδυασμός των μετρήσεων αυτών επιτρέπει τον έλεγχο και την καταγραφή βασικών παραμέτρων του Υ/Σ. Οι μετασχηματιστές τάσης καταγράφουν συνεχώς την τάση του υποσταθμού σε ειδικά όργανα, ενώ, σε συνδυασμό με τη μέτρηση της έντασης του ρεύματος, παρέχουν δεδομένα για το φορτίο του συστήματος.

Επιπλέον, οι μετασχηματιστές έντασης που συνδέονται με τους διακόπτες ισχύος μέσης και υψηλής τάσης διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην προστασία του συστήματος από υπερεντάσεις. Μέσω των

ηλεκτρονόμων, ενεργοποιούνται οι απαραίτητες εντολές απομόνωσης για την προστασία κρίσιμων μηχανημάτων, διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του υποσταθμού τόσο για επιχειρησιακούς όσο και για εμπορικούς σκοπούς.

## 1.10 Προστασία

Η βασική χρήση της ανάλυσης σφαλμάτων είναι ο υπολογισμός των MVA σφάλματος για τον καθορισμό των κατάλληλων διακοπών ισχύος.

Οι διακόπτες πρέπει όχι μόνο να σβήνουν τα τόξα ρεύματος, αλλά και να αντέχουν τις μεγάλες δυνάμεις των βραχυκυκλωμάτων. Η σωστή γνώση των ρευμάτων σφάλματος είναι κρίσιμη για την αποδοτική προστασία του συστήματος. Όταν εντοπιστεί ένα σφάλμα, πρέπει να γίνει άμεση απομόνωση του προβληματικού τμήματος με τη χρήση διακοπών, κάτι που απαιτεί ταχύτητα και εμπειρία.

Για αυτό τον λόγο, χρησιμοποιούνται αυτόματοι ανιχνευτές και διακόπτες που λειτουργούν χωρίς καθυστέρηση. Η προστασία αυτή μπορεί να είναι από απλά ρελαί έως πολύπλοκα συστήματα υψηλής τεχνολογίας. Ένα μικρό ποσοστό του κόστους του συστήματος επενδύεται σε αυτήν την προστασία, που είναι απαραίτητη για την αδιάκοπη λειτουργία της παροχής ρεύματος.

Τελικός στόχος της προστασίας είναι να περιορίσει τις ζημιές και τις διακοπές λειτουργίας, απομονώνοντας γρήγορα το προβληματικό σημείο και διατηρώντας σε λειτουργία το υπόλοιπο δίκτυο.

### 1.10.1 Διακόπτες ισχύος

Για την αξιόπιστη λειτουργία ενός υποσταθμού (Υ/Σ) και τη βέλτιστη οικονομική εκμετάλλευση του συστήματος, είναι κρίσιμη η σωστή λειτουργία των διακοπών ισχύος. Αυτοί οι διακόπτες εξασφαλίζουν ότι σε περίπτωση βλάβης, το προβληματικό τμήμα του δικτύου απομονώνεται έγκαιρα, περιορίζοντας τις ζημιές. Επίσης, διευκολύνουν την εκτέλεση εργασιών συντήρησης, καθώς μπορούν να διακόψουν την παροχή ρεύματος σε συγκεκριμένα μέρη του συστήματος.

Όταν δεν απαιτείται διακοπή υπό φορτίο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας απλούστερος και οικονομικότερος διακόπτης, ο αποζεύκτης, που λειτουργεί μόνο για άνοιγμα ή κλείσιμο κυκλωμάτων χωρίς φορτίο.

Η επιλογή του κατάλληλου διακόπτη ισχύος δεν βασίζεται μόνο στα ονομαστικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος (τάση, ισχύς), αλλά και στην ικανότητά του να διακόπτει ρεύματα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, όπου οι απαιτήσεις είναι πολύ υψηλότερες. Κατά τη διακοπή μεγάλης έντασης ρεύματος, δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα στις επαφές του διακόπτη, το οποίο μπορεί να προκαλέσει φθορές. Επομένως, η βασική πρόκληση στον σχεδιασμό των διακοπών είναι η ταχεία και ασφαλής κατάσβεση του τόξου.

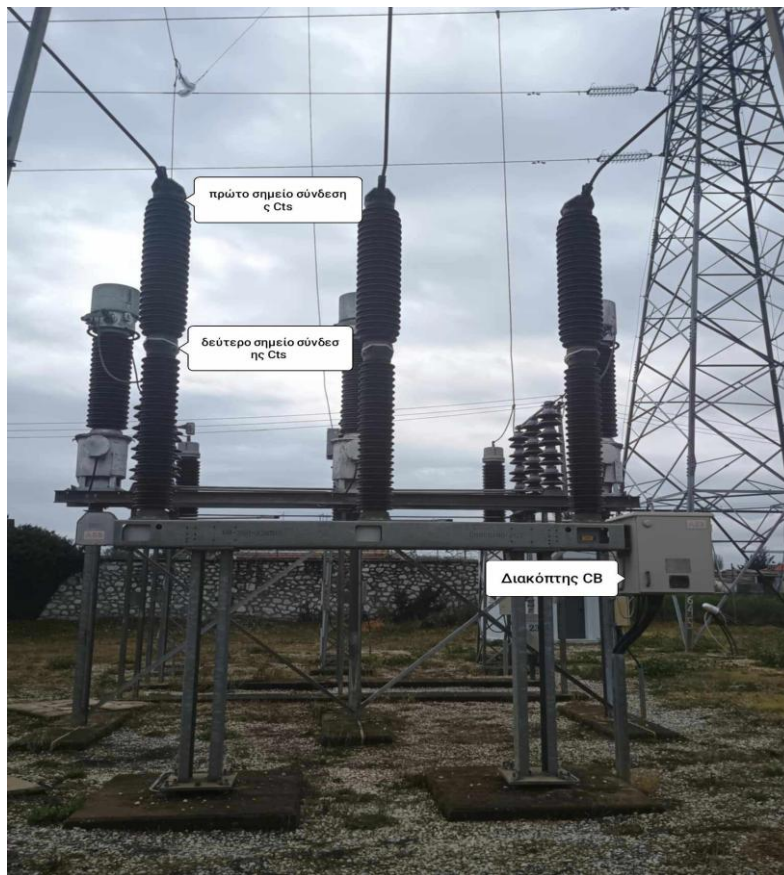
Υπάρχουν διάφοροι τύποι διακοπών ισχύος υψηλής τάσης:

- Βυθισμένοι σε έλαιο
- Μικρού όγκου ελαίου
- Με εμφύσηση (εκτόξευση) αέρα
- Διακόπτης  $SF_6$

Στους ελαιοδιακόπτες, η θερμότητα του τόξου προκαλεί τη δημιουργία φυσαλίδων αερίου (κυρίως υδρογόνου), το οποίο ωθεί το τόξο μακριά από τις επαφές και βοηθά στην κατάσβεσή του. Το αέριο αυτό επίσης απομακρύνει τα υπολείμματα του τόξου ώστε να μη δημιουργηθεί νέο.

Οι αεροδιακόπτες, από την άλλη, χρησιμοποιούν αέρα για την κατάσβεση του τόξου και είναι πιο απλοί στην κατασκευή τους σε σύγκριση με τους ελαιοδιακόπτες, γι' αυτό και προτιμώνται σε δίκτυα υψηλής τάσης.

Ένας σύγχρονος και ευρέως χρησιμοποιούμενος τύπος διακοπών ισχύος είναι ο διακόπτης SF<sub>6</sub> (θείου εξαφθορίου). Το αέριο SF<sub>6</sub> διαθέτει εξαιρετικές μονωτικές ιδιότητες και μεγάλη ικανότητα κατάσβεσης του ηλεκτρικού τόξου, καθιστώντας τους συγκεκριμένους διακόπτες ιδανικούς για χρήση σε δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης. Χάρη στη μεγάλη απόδοσή τους και το μικρό μέγεθος που προσφέρουν, οι διακόπτες SF<sub>6</sub> χρησιμοποιούνται εκτενώς σε υποσταθμούς, ειδικά σε περιοχές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, όπως η υψηλή αξιοπιστία και η χαμηλή ανάγκη συντήρησης, το SF<sub>6</sub> είναι ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου, γεγονός που απαιτεί προσεκτική διαχείριση για την αποφυγή διαρροών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.



Σχήμα 1.11 Διακόπτης Ισχύος (σύστημα μέτρησης Cts)

### 1.10.2 Προδιαγραφές συσκευών προστασίας

Για να αξιολογήσουμε την αποτελεσματικότητα μιας συσκευής προστασίας σε ένα ηλεκτρικό σύστημα, χρησιμοποιούμε ορισμένους βασικούς όρους:

- **Επιλεκτικότητα:** Είναι η ικανότητα της προστασίας να απομονώνει μόνο το τμήμα του δικτύου όπου παρουσιάστηκε το σφάλμα, χωρίς να επηρεάζονται τα υπόλοιπα τμήματα του συστήματος.
- **Ευστάθεια:** Αναφέρεται στην ιδιότητα της συσκευής να μην ενεργοποιείται σε σφάλματα που συμβαίνουν εκτός της περιοχής που προστατεύει (εξωτερικά σφάλματα).
- **Ταχύτητα λειτουργίας:** Όσο πιο γρήγορα απομονώνεται το σφάλμα, τόσο λιγότερες είναι οι ζημιές στον εξοπλισμό και μειώνεται η πιθανότητα αποσυγχρονισμού των γεννητριών.

- **Ευαισθησία:** Είναι το ελάχιστο ρεύμα σφάλματος που απαιτείται για να ενεργοποιηθεί η συσκευή. Εκφράζεται είτε ως πραγματικό πρωτεύον ρεύμα, είτε ως ποσοστό του δευτερεύοντος ρεύματος ενός μετασχηματιστή έντασης.
- **Οικονομικά κριτήρια:** Στα συστήματα διανομής, η επιλογή προστασίας βασίζεται κυρίως στο κόστος, καθώς υπάρχουν πολλοί τροφοδότες και μετασχηματιστές. Αντίθετα, στα δίκτυα μεταφοράς, μεγαλύτερη σημασία έχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά, λόγω της κρίσιμης σημασίας τους για την ασφάλεια της ηλεκτροδότησης.
- **Αξιοπιστία:** Μια αξιόπιστη συσκευή προστασίας είναι ζωτικής σημασίας, καθώς αποτρέπει λανθασμένες αποσυνδέσεις εξοπλισμού που δεν έχει πρόβλημα, εξαιτίας κακής λειτουργίας της ίδιας της προστασίας.
- **Πρωτεύουσα και δευτερεύουσα προστασία:** Η κύρια (πρωτεύουσα) προστασία καλύπτει συγκεκριμένες περιοχές του συστήματος. Η δευτερεύουσα (υποστηρικτική) προστασία ενεργοποιείται μόνο αν η κύρια αποτύχει. Είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί ανεξάρτητα, έχοντας συχνά δικούς της αισθητήρες και ρελέ.

Σε ορισμένα σημεία του δικτύου, όπως μεταξύ μετασχηματιστών ρεύματος και διακοπών, μπορεί να υπάρχουν "νεκρές ζώνες" χωρίς κάλυψη από την κύρια προστασία. Εκεί αναλαμβάνει η δευτερεύουσα, καλύπτοντας αυτές τις περιοχές με την "υποστήριξη εξ αποστάσεως". Αν και αυτή η υποστήριξη μπορεί να καθυστερήσει ή να αποσυνδέσει μεγαλύτερο τμήμα απ' όσο χρειάζεται, είναι σημαντική κυρίως στα συστήματα μεταφοράς. Στα συστήματα διανομής εφαρμόζεται μόνο σε επιλεγμένα, κρίσιμα σημεία.

## 1.11 Μετασχηματιστές μετρήσεων

### a. Μετασχηματιστές τάσεως

Για να μπορέσουμε να μετρήσουμε με ασφάλεια μια τάση, όπως τα 20kV, δεν είναι δυνατόν να συνδέσουμε απευθείας το βολτόμετρο στη γραμμή. Αντί γι' αυτό, χρησιμοποιούμε έναν μετασχηματιστή τάσης (Μ/Σ τάσης), ο οποίος μειώνει την υψηλή τάση σε μια χαμηλότερη και ασφαλή τιμή, συνήθως στα 110V, κατάλληλη για μέτρηση με κοινά όργανα. Επιπλέον, ο μετασχηματιστής απομονώνει ηλεκτρικά το βολτόμετρο από το επικίνδυνο δίκτυο υψηλής τάσης. Οι Μ/Σ τάσης είναι συνήθως μονοφασικοί και διαθέτουν δύο τυλίγματα – ένα για την πλευρά υψηλής τάσης (π.χ. 20kV) και ένα για τη χαμηλή. Για λόγους ασφαλείας, γειώνονται τόσο το μεταλλικό περίβλημα και ο πυρήνας, όσο και τουλάχιστον ένας ακροδέκτης του δευτερεύοντος τυλίγματος.

### b. Μετασχηματιστές εντάσεως

Τα αμπερόμετρα εναλλασσόμενου ρεύματος (Ε.Ρ.) είναι κατασκευασμένα ώστε να δίνουν πλήρη ένδειξη για ρεύμα έως 5A ή 10A. Όταν όμως χρειάζεται να μετρηθεί μεγαλύτερη ένταση, όπως για παράδειγμα 200A, παρεμβάλλεται στη γραμμή ένας μετασχηματιστής έντασης (Μ/Σ έντασης). Το πρωτεύον τυλίγμα του συνδέεται σε σειρά με τη γραμμή, ενώ το δευτερεύον συνδέεται με το αμπερόμετρο. Η πραγματική ένταση της γραμμής προκύπτει αν πολλαπλασιαστεί η ένδειξη του αμπερομέτρου με το λόγο μετασχηματισμού του Μ/Σ.

Για μετρήσεις σε γραμμές υψηλής τάσης, ο Μ/Σ έντασης πρέπει να έχει κατάλληλη μόνωση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος για λόγους ασφαλείας. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μετασχηματιστών έντασης:

- **Τύπου πυρήνα:** Περιλαμβάνει δύο τυλίγματα πάνω σε έναν σιδηροπυρήνα. Το πρωτεύον συνδέεται σε σειρά με τον αγωγό, και το δευτερεύον με το όργανο μέτρησης.
- **Τύπου διέλευσης:** Αποτελείται από δακτυλιοειδή πυρήνα γύρω από τον οποίο είναι τυλιγμένο το δευτερεύον τυλίγμα. Ο αγωγός της φάσης περνάει μέσα από το κέντρο του δακτυλίου.

Οι μετασχηματιστές έντασης τύπου διέλευσης χρησιμοποιούνται ευρέως, ιδιαίτερα για την τροφοδότηση ηλεκτρονόμων προστασίας (π.χ. σε ελαιοδιακόπτες), επειδή είναι απλοί, οικονομικοί και δεν καταλαμβάνουν πολύ χώρο.

Είναι κρίσιμο το δευτερεύον κύκλωμα ενός Μ/Σ έντασης να παραμένει πάντα συνδεδεμένο είτε με όργανο μέτρησης είτε με ηλεκτρονόμο. Αν χρειαστεί να αφαιρεθεί το όργανο, τα άκρα του δευτερεύοντος πρέπει πρώτα να βραχυκυκλωθούν. Αν αυτό παραλειφθεί, ο πυρήνας του μετασχηματιστή μπορεί να υπερθερμανθεί και να καταστραφεί, ενώ ενδέχεται να δημιουργηθεί υψηλή τάση (μέχρι και 500V), γεγονός που εγκυμονεί σοβαρούς ή και θανατηφόρους κινδύνους για το προσωπικό.

### 1.11.1 ΡΕΛΕ

Το ρελέ είναι μια συσκευή που ενεργοποιείται όταν ανιχνεύσει κάποια ανωμαλία στο ηλεκτρικό σύστημα. Όταν ενεργοποιηθεί, κλείνει τις επαφές του και στέλνει σήμα στο διακόπτη ισχύος, ο οποίος με τη σειρά του ανοίγει το κύκλωμα και απομονώνει το τμήμα όπου έχει προκύψει το σφάλμα.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ρελέ:

- Τα ηλεκτρομαγνητικά ρελέ
- Τα ρελέ ημιαγωγών

Σε κάποιες περιπτώσεις, όπως για την προστασία από υπερφόρτιση, χρησιμοποιείται και η θερμική μέθοδος, με τη χρήση διμεταλλικών διακοπών, που βασίζονται στη διαστολή δύο διαφορετικών μετάλλων.

#### a. Ρελέ με επαγωγικό δίσκο

Αυτά τα ρελέ λειτουργούν παρόμοια με τους επαγωγικούς μετρητές ενέργειας. Διαθέτουν έναν μεταλλικό δίσκο που περιστρέφεται όταν περάσει ρεύμα μέσα από δύο πηνία. Όταν η περιστροφή φτάσει σε συγκεκριμένο σημείο, κλείνουν ή ανοίγουν οι επαφές του ρελαί.

Η δύναμη που κινεί τον δίσκο εξαρτάται από:

- Το μέγεθος του ρεύματος στα πηνία
- Τη φασική διαφορά μεταξύ αυτών των ρευμάτων

Σε κανονικές συνθήκες, η ροπή που ασκείται στον δίσκο ισορροπεί με εκείνη του ελατηρίου. Αν όμως αυξηθεί το ρεύμα, η ροπή αυξάνεται και ο δίσκος περιστρέφεται ταχύτερα. Ο χρόνος που χρειάζεται για να λειτουργήσει το ρελέ είναι αντίστροφα ανάλογος της ροπής. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερο το ρεύμα, τόσο πιο γρήγορα λειτουργεί. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται συνήθως για βραδεία προστασία.

#### b. Ρελέ με επαγωγικό κύλινδρο

Αυτός ο τύπος είναι κατάλληλος για ταχύτερη λειτουργία σε σχέση με τον δίσκο. Αντί για δίσκο, έχει έναν μεταλλικό διάτρητο κύλινδρο που στρέφεται γύρω από τον άξονά του. Ο κύλινδρος περιβάλλεται από τέσσερις ή περισσότερους πόλους (μαγνητικά στοιχεία) που δημιουργούν το μαγνητικό πεδίο. Ο σχεδιασμός αυτός επιτρέπει χαμηλότερη ροπή αδράνειας και άρα ταχύτερη απόκριση.

#### c. Ρελέ με αιωρούμενο η οπλισμένο μοχλό

Αυτά τα ρελέ χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται πολύ γρήγορη απόκριση. Ο οπλισμός (ή ο μοχλός) κινείται από έναν ή περισσότερους ηλεκτρομαγνήτες. Η δύναμη έλξης που ασκείται είναι ανάλογη με το τετράγωνο του ρεύματος που περνά από τα πηνία. Αυτά τα ρελέ είναι ιδανικά για γρήγορη και αξιόπιστη προστασία.



## 1.12 Σύστημα προστασίας

Η εφαρμογή των ηλεκτρονόμων προστασίας και του υπολοίπου εξοπλισμού αποτελεί ένα περίπλοκο και πολυδιάστατο αντικείμενο στον τομέα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και συστημάτων ισχύος. Ο σχεδιασμός και η διαμόρφωση αξιόπιστων και αποτελεσματικών διατάξεων προστασίας δεν είναι μια απλή διαδικασία, καθώς απαιτεί συνδυασμό τεχνογνωσίας, εμπειρίας και κατανόησης της λειτουργίας του συστήματος στο οποίο θα εφαρμοστούν.

Οι τεχνικές λύσεις και οι επιμέρους διατάξεις προστασίας διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τη φιλοσοφία σχεδίασης των κατασκευαστών, τις ιδιαιτερότητες του δικτύου (π.χ. διανομή, μεταφορά, παραγωγή), το επίπεδο της τάσης και το είδος των πιθανών σφαλμάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Σκοπός αυτής της παρουσίασης δεν είναι να εξαντλήσει κάθε λεπτομέρεια του σχεδιασμού, αλλά να προσφέρει μια σφαιρική επισκόπηση της τεχνικής των συστημάτων προστασίας, αναδεικνύοντας τις βασικές αρχές και λειτουργικές αρχές στις οποίες στηρίζονται. Έτσι, επιδιώκεται η δημιουργία ενός θεωρητικού υπόβαθρου που θα διευκολύνει την κατανόηση των προστατευτικών συστημάτων και θα βοηθήσει στον σωστό σχεδιασμό, την ανάλυση και την αξιολόγηση των διατάξεων αυτών στο πεδίο εφαρμογής τους.

### 1.12.1 Προστασία με ασφάλειες μέσης τάσης

Οι ασφάλειες κατηγοριοποιούνται σε ταχείας και βραδείας τήξεως, ανάλογα με τη χαρακτηριστική καμπύλη έντασης-χρόνου τήξης. Πριν την εγκατάσταση μιας ασφάλειας σε κάποιο κύκλωμα, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί αν μπορεί να αντέξει το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα φορτίου της γραμμής χωρίς να λιώσει. Παράλληλα, πρέπει να διασφαλιστεί πως η ικανότητα διακοπής της είναι επαρκής, ώστε σε περίπτωση σφάλματος να προκληθεί η τήξη του συντηκτού, χωρίς όμως να προκληθεί ζημιά στον σωλήνα ή στον φορέα στήριξής του.

Οι κυριότεροι τύποι ασφαλειών που συναντώνται σε δίκτυα διανομής είναι οι εξής:

- Ασφάλειες εκβολής

Η ικανότητα διακοπής των ασφαλειών εκβολής βασίζεται στην πίεση των αερίων που αναπτύσσονται εντός του φυσίγγιου κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Αυτή η πίεση αυξάνεται με την ένταση του ρεύματος. Ωστόσο, η μηχανική αντοχή του σωλήνα του φυσίγγιου θέτει περιορισμούς στην ισχύ διακοπής της ασφάλειας.

- Ασφάλειες με γεμάτο φυσίγγιο

Αποτελούν λύση για περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγάλη ονομαστική ικανότητα διακοπής. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι δεν έχουν χαρακτηριστικά βραδείας τήξεως, κάτι που συχνά είναι απαραίτητο για σωστή συνεργασία με τους διακόπτες ισχύος.

- Ασφάλειες με υγρό

Χρησιμοποιούνται ως εναλλακτική στις ασφάλειες με φυσίγγιο, σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ικανότητα διακοπής. Παρόλο που το κόστος τους είναι μεγαλύτερο, μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν χαρακτηριστικά βραδείας τήξεως, προσφέροντας ευελιξία και αξιοπιστία σε πιο απαιτητικές εγκαταστάσεις.

## 1.13 Προστασία με ηλεκτρονόμους

Οι συσκευές και οι γραμμές των δικτύων χρειάζονται αποτελεσματική προστασία από ανώμαλες συνθήκες λειτουργίας, όπως βραχυκυκλώματα μεταξύ φάσεων ή προς γη, υπερτάσεις, ανισοροπίες

φορτίων κ.ά. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται **ηλεκτρονόμοι προστασίας** σε συνδυασμό με διακόπτες, οι οποίοι εντοπίζουν σφάλματα με βάση κριτήρια όπως:

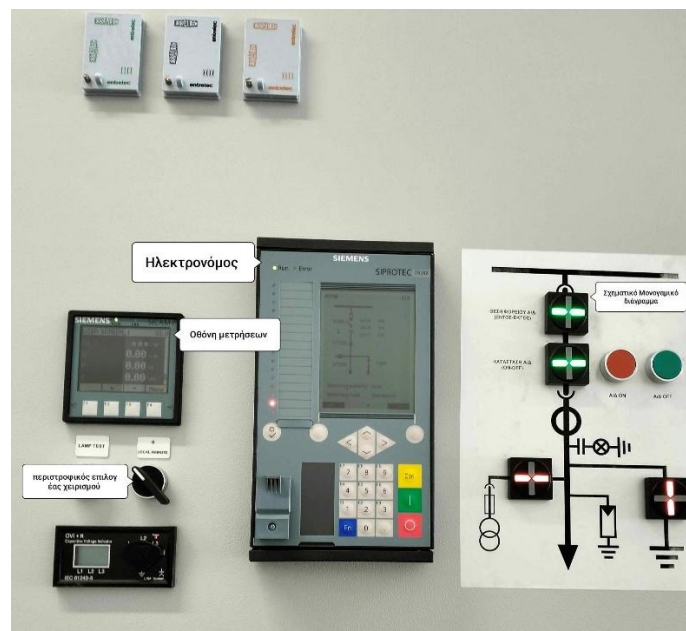
- Ένταση ρεύματος
- Χρόνος
- Απόσταση
- Διεύθυνση
- Ισορροπία φορτίων στις φάσεις
- Διαφορά ρευμάτων

### 1.13.1 Τύποι ηλεκτρονόμων

Οι ηλεκτρονόμοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον χρόνο απόκρισης:

- **Βραδέως τύπου** – Αργή λειτουργία
- **Ταχέως τύπου** – Γρήγορη λειτουργία (0,008 έως 0,05 δευτερόλεπτα)

Σκοπός τους είναι να εντοπίζουν σφάλματα και να απομονώνουν το κατεστραμμένο τμήμα πριν προκληθεί σοβαρή ζημιά σε εξοπλισμό.



Σχήμα 1.12 Ηλεκτρονόμος γραμμής

Κύριοι τύποι ηλεκτρονόμων για γραμμές διανομής :

- a. Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης
  - Λειτουργούν με ρυθμιζόμενη χρονική καθυστέρηση (αντίστροφου χρόνου).
  - Μπορούν να συνδυαστούν με στιγμιαία λειτουργία σε περίπτωση πολύ υψηλών ρευμάτων.
  - Προστασία μεταξύ φάσεων.
- b. Στιγμιαίου τύπου ηλεκτρονόμοι
  - Χωρίς χρονική καθυστέρηση.

- Ρυθμίζεται μόνο η ένταση ενεργοποίησης.
- c. Ηλεκτρονόμοι προστασίας βραχυκυκλώματος προς γη :
  - Επιπλέον προστασία πέραν των ηλεκτρονόμων φάσεων.
  - Ευαίσθητοι σε ανισοροπίες φορτίων.

### 1.13.2 Επιλογικός Συνδυασμός Ασφαλιστικών Μέσων

Για να διασφαλιστεί η συνέχεια της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, τα μέσα προστασίας πρέπει να συνδυάζονται έτσι ώστε:

- Ο χρόνος διακοπής να είναι **ο ελάχιστος δυνατός**.
- Το απομονωμένο τμήμα να είναι **το μικρότερο δυνατό**.

Οι ευαίσθητοι ηλεκτρονόμοι τροφοδοτούνται από **μετασχηματιστές εντάσεως** εγκατεστημένους στους μονωτήρες των διακοπών, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη λειτουργία.

### 1.13.3 Βελτιωμένη Περιγραφή της Προστασίας Δικτύων με Αυτόματους Διακόπτες και Ασφάλειες

Τα κύρια μέσα προστασίας των ηλεκτρικών δικτύων είναι:

- **Αυτόματοι διακόπτες** (εγκατεστημένοι στον υποσταθμό, στην αρχή της γραμμής).
- **Αυτόματες ασφάλειες** (τοποθετημένες κατά μήκος της γραμμής και σε σημεία διακλάδωσης).

Αυτά εξασφαλίζουν την απομόνωση σφαλμάτων, ελαχιστοποιώντας τη διακοπή ρεύματος σε μεγάλες ζώνες.

#### a. Αίτια Βραχυκυκλώματος Μικρής Διάρκειας

Βραχυπρόθεσμα βραχυκυκλώματα μπορούν να προκληθούν από:

- Κεραυνικές εκκενώσεις (υπερπήδηση σε μονωτήρες).
- Επαφή γραμμής με κλαδιά δέντρων (λόγω ανέμου).
- Προσωρινές ηλεκτρικές διαταραχές.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, η κανονική τάση διατηρεί το ηλεκτρικό τόξο μέχρι να διακοπεί το κύκλωμα, με το ρεύμα βραχυκυκλώματος να διαρρέει όλες τις ενδιάμεσες ασφάλειες.

#### b. Απαιτήσεις Συντονισμού Προστασίας

Για να αποφευχθεί η άσκοπη διακοπή ολόκληρης της γραμμής:

- Ο **χρόνος ανοίγματος του διακόπτη στον υποσταθμό** πρέπει να είναι **μικρότερος** από τον χρόνο τήξης των ασφαλειών στις διακλαδώσεις.
- Αν το σφάλμα είναι προσωρινό, ο διακόπτης **ανοίγει και επανακλείει αυτόματα**, αποκαθιστώντας την παροχή.
- Αν το σφάλμα είναι μόνιμο, **πρέπει να λιώσει η πλησιέστερη ασφάλεια** προς το σημείο βραχυκυκλώματος, ώστε να απομονωθεί μόνο το κατεστραμμένο τμήμα.

#### c. Κύκλος Λειτουργίας Προστασίας

##### α) Άμεση Ανίχνευση & Διακοπή

- Με την εμφάνιση βραχυκυκλώματος, ο αυτόματος διακόπτης (Υ/Σ) **ανοίγει αμέσως** με εντολή από **ηλεκτρονόμο υπερέντασης στιγμιαίας λειτουργίας**.

**β) Αυτόματη Επανένερξη**

- Ο διακόπτης **κλείνει γρήγορα ξανά**, ενώ οι ηλεκτρονόμοι ελέγχου μεταβαίνουν σε **λειτουργία με χρονική επιβράδυνση**.

**γ) Αν το σφάλμα είναι προσωρινό**

- Το βραχυκύκλωμα έχει ήδη εξαφανιστεί κατά το άνοιγμα.
- Η παροχή **αποκαθίσταται πλήρως** μετά το επανακλείσιμο.

**δ) Αν το σφάλμα παραμένει**

- Οι ηλεκτρονόμοι επιβράδυνσης δίνουν χρόνο στην **κατάλληλη ασφάλεια να λιώσει**, απομονώνοντας το ελαττωματικό τμήμα.
- Αν η ασφάλεια **δεν λειώσει**, ο διακόπτης ανοίγει ξανά και **παραμένει ανοικτός**.

**ε) Ειδική Περίπτωση: Βραχυκύκλωμα κοντά στον Υποσταθμό**

- Αν το σφάλμα βρίσκεται **μεταξύ του Υ/Σ και της πρώτης ασφάλειας**, ο διακόπτης **θα ανοίξει οριστικά** μέσω των ηλεκτρονόμων επιβράδυνσης.

### 1.14 Διατάξεις προστασίας μονάδων

Στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα, η αυξανόμενη πολυπλοκότητα και η ύπαρξη πολλαπλών διαδρομών ρεύματος δυσκολεύουν την αποτελεσματική προστασία με παραδοσιακές μεθόδους. Όταν το **ρεύμα σφάλματος** ρέει μέσω παράλληλων μονοπατιών, οι κλασικές τεχνικές (π.χ. χρονικές βαθμίδωση ασφαλειών) μπορεί να **χάσουν τη διακριτική τους ικανότητα**, οδηγώντας σε εσφαλμένες διακοπές ή αποτυχία απομόνωσης.

Αρχή προστασίας μονάδας :

Σε **διατάξεις προστασίας μονάδας (unit protection)**, η προστασία εστιάζεται **συγκεκριμένα σε ένα τμήμα του δικτύου** (π.χ. γραμμή, μετασχηματιστής, γεννήτρια). Βασικά χαρακτηριστικά:

- **Επιλεκτική απομόνωση**: Αποσυνδέει **μόνο το προστατευόμενο στοιχείο** σε περίπτωση **εσωτερικού σφάλματος** (π.χ. βραχυκύκλωμα εντός της γραμμής).
- **Αμετάβλητη λειτουργία σε εξωτερικά σφάλματα**: Παραμένει ενεργό αν το ρεύμα διέρχεται από το στοιχείο **χωρίς να προκαλείται από εσωτερική βλάβη** (π.χ. σφάλμα σε γειτονική γραμμή).

Πλεονεκτήματα έναντι παραδοσιακών Μεθόδων

- **Απόλυτη διακριτικότητα**: Διαχωρίζει με ακρίβεια εσωτερικά από εξωτερικά σφάλματα, ακόμη και σε πολύπλοκα δίκτυα με παράλληλες διαδρομές.
- **Γρήγορη απόκριση**: Λειτουργεί **χωρίς χρονικές καθυστερήσεις**, επειδή δεν εξαρτάται από βαθμίδωση ρευμάτων ή χρόνων.
- **Ελαχιστοποίηση διακοπών**: Απομονώνει μόνο το κατεστραμμένο τμήμα, διατηρώντας τη λειτουργία του υπόλοιπου συστήματος.

Τεχνικές εφαρμογές

Για να επιτευχθεί η προστασία μονάδας, χρησιμοποιούνται:

- **Διαφορική Προστασία (Differential Protection):**

Συγκρίνει ρεύματα εισόδου/εξόδου του προστατευόμενου στοιχείου.

Αν διαφορά υπερβεί καθορισμένο όριο, ενεργοποιείται η διακοπή (αυτό δείχνει εσωτερικό σφάλμα).

- **Συστήματα με Συγκριτή Φάσης/Εντάσεως:**

Αναλύουν τη φάση ή το μέγεθος του ρεύματος για να εντοπίσουν ασυνέπειες.

Παράδειγμα

Έστω μια γραμμή με παράλληλες διαδρομές. Αν συμβεί βραχυκύκλωμα εντός της γραμμής:

- Οι **διαφορικοί ηλεκτρονόμοι** ανιχνεύουν ανισορροπία ρευμάτων.
- Ο διακόπτης **απομονώνει αμέσως τη γραμμή**, ενώ οι γειτονικές παραμένουν σε λειτουργία.
- Αν το σφάλμα είναι **εκτός της γραμμής**, οι μετρήσεις παραμένουν ισορροπημένες και η προστασία **δεν ενεργοποιείται**.

## 1.15 Διαφορική προστασία ρελε

### a. Βασική Λειτουργία

Στην προστατευόμενη ζώνη (π.χ. γραμμή, μετασχηματιστής), **συγκρίνονται συνεχώς** τα ρεύματα στα δύο άκρα της. Η σύγκριση γίνεται μέσω ειδικών ρελέ διαφορικής προστασίας:

- **Κανονική λειτουργία (χωρίς σφάλμα):**  
Τα ρεύματα εισόδου/εξόδου είναι **ίσα σε μέγεθος και φάση** → **καμία ενέργεια** από τα ρελέ.
- **Εσωτερικό σφάλμα (βλάβη εντός ζώνης):**  
Η ισορροπία διαταράσσεται (π.χ. ρεύμα διαφυγής λόγω βραχυκυκλώματος) → τα ρελέ **ενεργοποιούνται** και απομονώνουν την ζώνη.

### b. Απαιτήσεις Ακριβείας

Για να λειτουργεί σωστά το σύστημα:

1. Ομοιογένεια Μ/Σ ρεύματος:

Οι μετασχηματιστές ρεύματος (Μ/Σ) και στα δύο άκρα πρέπει να έχουν **πανομοιότυπα χαρακτηριστικά**, ώστε να μην προκαλούν ψευδείς διαφορές.

2. Επίλυση προβλημάτων μη ιδανικών συνθηκών:

Στην πράξη, η τέλεια ισορροπία είναι αδύνατη λόγω:

- Ανομοιογένειας Μ/Σ.
- Ρεύματα μαγνητισμού (σε μετασχηματιστές).
- Παρασιτικά ρεύματα.  
→ Για αυτό, προστίθενται **πηνία πολώσεως** ή **περιοριστικά πηνία** που:
- Εξουδετερώνουν τις μικρές ανισορροπίες.
- Επιτρέπουν ενεργοποίηση **μόνο για μεγάλα ρεύματα σφάλματος**.

c. Εφαρμογές

Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε:

- **Γεννήτριες** (προστασία από εσωτερικά υπερρεύματα).
- **Μετασχηματιστές** (διαφορική προστασία περιελίξεων).
- **Ζυγούς γραμμών** (HV/MV γραμμές με πολλά άκρα).
- **Συστήματα διανομής** (προστασία δακτυλιωτών δικτύων).

d. Πλεονεκτήματα

- **Απόλυτη επιλεκτικότητα:** Απομονώνει **μόνο** το κατεστραμμένο τμήμα.
- **Γρήγορη απόκριση:** Χωρίς χρονικές καθυστερήσεις.
- **Ασφάλεια σε πολύπλοκα δίκτυα:** Αποφεύγει λανθασμένες διακοπές λόγω εξωτερικών σφαλμάτων.

e. Παράδειγμα σε Μετασχηματιστή

- **Φυσιολογική λειτουργία:**  
Ρεύμα εισόδου ( $I_1$ ) = Ρεύμα εξόδου ( $I_2$ ) → Διαφορά ( $I_1 - I_2$ ) = 0 → **Αδράνεια**.
- **Βραχυκύκλωμα σε περιέλιξη:**  
 $I_1 \neq I_2$  → Διαφορά > κατωφλίου → **Ενεργοποίηση ρελέ** → Άμεση διακοπή.

### 1.16 Προστασία μετασχηματιστή

Οι μετασχηματιστές (Μ/Σ) είναι κρίσιμα στοιχεία των δικτύων και απαιτούν **εξειδικευμένη προστασία** από:

- **Εσωτερικά σφάλματα** (βραχυκυκλώματα μεταξύ στροφών, γης, κ.ά.).
- **Θερμικές υπερφορτώσεις** (εξωτερικά σφάλματα ή υπερρεύματα).

Η **διαφορική προστασία** είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος, αλλά η εφαρμογή της σε Μ/Σ έχει **ιδιαίτερες δυσκολίες** λόγω της φύσης τους.

a. Πρόκληση: Ανισορροπία Ρευμάτων σε Υψηλή/Μέση Τάση

Σε αντίθεση με απλές γραμμές, όπου συγκρίνονται ρεύματα **του ίδιου τύπου κυκλώματος**, στους Μ/Σ:

- **Συγκρίνονται ρεύματα διαφορετικών τάσεων** (π.χ. υψηλή τάση [YT] vs μέση τάση [MT]).
- Τα ρεύματα **δεν είναι ίσα** λόγω:
  - **Σχέσης μετασχηματισμού** (π.χ. 150/20 kV →  $I_1 \neq I_2$ ).
  - **Διαφορετικής συνδεσμολογίας** (π.χ. πρωτεύον σε Y, δευτερεύον σε Δ).
  - **Ρευμάτων μαγνητισμού** (ειδικά κατά την έναρξη ή υπερτάσεις).

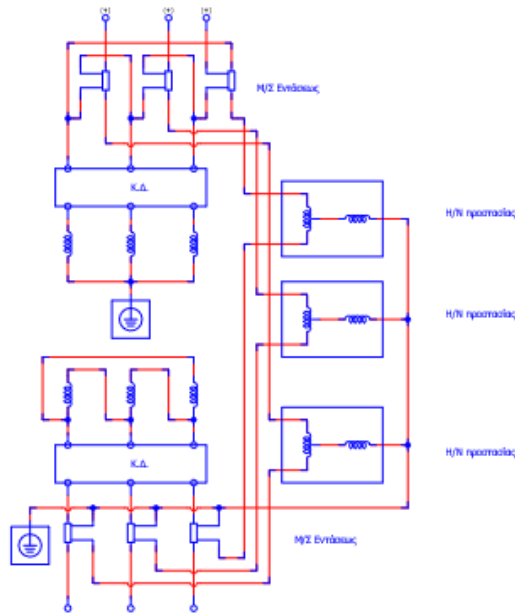
b. Συντονισμός Μ/Σ Ρεύματος

- Οι Μ/Σ στα πλευρά YT και MT πρέπει να έχουν **συμβατές αναλογίες μετασχηματισμού**, ώστε τα δευτερεύοντα ρεύματα να είναι ισορροπημένα υπό κανονικές συνθήκες.

c. Διόρθωση Φάσης

- Αν ο Μ/Σ έχει **συνδεσμολογία Y/Δ**, τα ρεύματα στη δευτερεύουσα πλευρά έχουν **μετατόπιση φάσης 30°**.

- Χρησιμοποιούνται **ειδικά ρελέ** ή ηλεκτρονικοί αλγόριθμοι που **διορθώνουν τη φάση** αυτόματα.
- d. Πηνία Πολώσεως (Bias Coils)
- Αντισταθμίζουν **μικρές ανισοροπίες** λόγω:
    - Ατελούς ταιριάσματος Μ/Σ ρεύματος.
    - Ρευμάτων μαγνητισμού.
  - Ενεργοποιούν το ρελέ **μόνο για σημαντικά ρεύματα σφάλματος** (π.χ. >20% ονομαστικού).
- e. Πλεονεκτήματα
- Αυτόματη προσαρμογή **σε αλλαγές φορτίου ή τάσης**.
  - Αποφυγή ψευδών διακοπών **λόγω ρευμάτων μαγνητισμού ή υπερφορτώσεων**.
  - Επιλεκτικότητα: **Διαχωρίζει σαφώς εσωτερικά από εξωτερικά σφάλματα**.



Σχήμα 1.13 Διαφορικός Ηλεκτρονόμος

### 1.16.1 Διαφορική Προστασία Μετασχηματιστών και Ηλεκτρονόμος Buchholz

Για τη λειτουργία των διαφορικών ηλεκτρονόμων, τα ρεύματα που συγκρίνονται λαμβάνονται από τα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών έντασης (Μ/Σ εντάσεως). Αυτά τα ρεύματα ρυθμίζονται ώστε να είναι ίσα, χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές με κατάλληλες αναλογίες μετατροπής. Η διαφορά στη συνδεσμολογία ανάμεσα στο πρωτεύον και το δευτερεύον του μετασχηματιστή ισχύος αντισταθμίζεται με την κατάλληλη επιλογή της συνδεσμολογίας στους Μ/Σ εντάσεως:

- Όταν το πρωτεύον του Μ/Σ ισχύος είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο, οι Μ/Σ έντασης στην πλευρά αυτή συνδέονται σε αστέρα.
- Αντίστροφα, όταν η πλευρά είναι συνδεδεμένη σε αστέρα, οι Μ/Σ έντασης συνδέονται σε τρίγωνο.

Στο σχήμα (1.13) υποδεικνύουν την πλήρη κυκλωματική απεικόνιση Μ/Σ εντάσεως. Με συγκεκριμένη κυκλωματική λογική ένα εξωτερικό σφάλμα, όπως για παράδειγμα βραχυκύκλωμα της φάσης Α προς τη γη από την πλευρά του αστέρα του Μ/Σ ισχύος. Η διαφορική προστασία καλύπτει πληθώρα σφαλμάτων, όπως:

- Σφάλματα μεταξύ των φάσεων
- Βραχυκυκλώματα προς τη γη
- Σφάλματα μεταξύ των τυλιγμάτων (μεταξύ σπειρών)
- Βλάβες στις συνδεδεμένες γραμμές και στους διακόπτες ισχύος

### 1.16.2 Προστασία Μετασχηματιστών με Ηλεκτρονόμο Buchholz

Ο ηλεκτρονόμος Buchholz αποτελεί βασικό στοιχείο προστασίας για μετασχηματιστές λαδιού. Τοποθετείται στον σωλήνα που συνδέει το κυρίως δοχείο του μετασχηματιστή με το δοχείο διαστολής, και είναι μόνιμα γεμάτος με λάδι. Ο ρόλος του είναι να ανιχνεύει εγκαίρως διαρροές λαδιού ή εσωτερικά σφάλματα πριν αυτά εξελιχθούν σε καταστροφικά.



Σχήμα 1.14 Σύστημα Buchholz

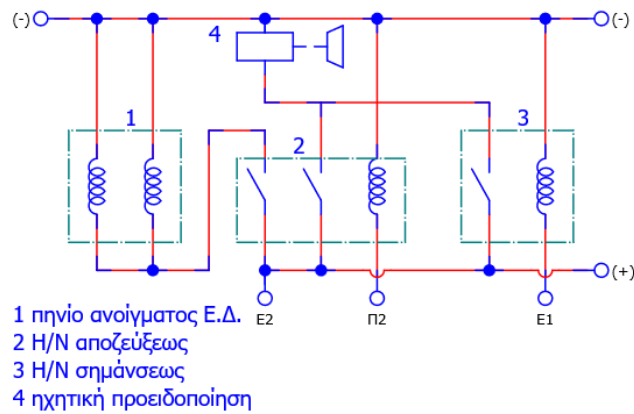
Μια σημαντική απώλεια λαδιού μπορεί να προκαλέσει:

- Άδειασμα του δοχείου διαστολής
- Πτώση της στάθμης στο κυρίως δοχείο
- Έκθεση των τυλιγμάτων στον αέρα, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση και καταστροφή τους

Ο Buchholz αποτρέπει τέτοιες καταστάσεις ενεργοποιώντας εγκαίρως προστατευτικά μέτρα. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.15, περιλαμβάνει δύο πλωτήρες (Π1 και Π2) που ελέγχουν την κατάσταση δύο υδραγωγικών επαφών (E1 και E2):

- **Στάδιο 1:** Όταν η στάθμη του λαδιού αρχίζει να πέφτει, εισέρχεται αέρας στο πάνω μέρος του διακόπτη. Ο πλωτήρας Π1 κατεβαίνει και ενεργοποιεί την επαφή E1, δίνοντας **σήμα προειδοποίησης** (π.χ. ηχητικό ή οπτικό).
- **Στάδιο 2:** Αν συνεχιστεί η απώλεια λαδιού, το δοχείο Buchholz αδειάζει. Ο πλωτήρας Π2 κατεβαίνει και ενεργοποιεί την επαφή E2, η οποία στέλνει **σήμα αποξέυξης**, προκαλώντας το άνοιγμα των διακοπών που τροφοδοτούν τον μετασχηματιστή, απομονώνοντάς τον από το δίκτυο για αποτροπή περαιτέρω ζημιάς.





Σχήμα 1.15 Buchholz με το ηλεκτρικό του διάγραμμα

### 1.16.3 Διαφορική Προστασία Μετασχηματιστή

Για την αποτελεσματική προστασία του μετασχηματιστή, οι διαφορικοί ηλεκτρονόμοι συγκρίνουν τα ρεύματα και στις δύο πλευρές του (ΥΨΗΛΗ/ΧΑΜΗΛΗ τάση). Η διαδικασία περιλαμβάνει:

- **Μετασχηματιστές Ρεύματος (Μ/Σ):**  
 Χρησιμοποιούνται ειδικοί Μ/Σ με διαφορετικές σχέσεις μετασχηματισμού ώστε τα δευτερεύοντα ρεύματα να είναι συγκρίσιμα.
  - Στην πλευρά με **συνδεσμολογία τριγώνου (Δ)** του μετασχηματιστή, οι Μ/Σ συνδέονται **σε αστέρα (Υ)**.
  - Στην πλευρά με **συνδεσμολογία αστέρα (Υ)**, οι Μ/Σ συνδέονται **σε τρίγωνο (Δ)**. Αυτό εξαλείφει τη φασική μετατόπιση 30° μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.
- **Ανίχνευση Σφαλμάτων:**
  - Σε **φυσιολογική λειτουργία**, τα ρεύματα ισορροπούν και το διαφορικό ρεύμα είναι μηδενικό.
  - Σε **βλάβη (π.χ. βραχυκύκλωμα)**, εμφανίζεται διαφορικό ρεύμα που ενεργοποιεί την προστασία.
- **Προστατευόμενες Καταστάσεις:**
  - Βραχυκυκλώματα μεταξύ στροφών ή προς γη
  - Σφάλματα μεταξύ φάσεων
  - Βλάβες στις γραμμές προς τους διακόπτες ισχύος

### 1.16.4 Προστασία Buchholz

Ο ηλεκτρονόμος Buchholz προσφέρει μηχανική προστασία για εσωτερικές βλάβες:

- **Τοποθεσία & Σχεδιασμός:**  
 Τοποθετείται στον σύνδεσμο μεταξύ κύριου περίβληματος και δοχείου διαστολής, πλήρως γεμάτος με μετασχηματιστικό λάδι.
- **Λειτουργία:**
  1. **Προειδοποιητικό Στάδιο (E1):**
    - Σε διαρροή λαδιού, ο πλωτήρας Π1 κατεβαίνει
    - Κλείνει την επαφή E1, ενεργοποιώντας συναγερμό
  2. **Αποσυνδετικό Στάδιο (E2):**
    - Αν η διαρροή συνεχιστεί, ο πλωτήρας Π2 ενεργοποιείται
    - Κλείνει την επαφή E2, αποσυνδέοντας τον μετασχηματιστή
- **Προστατευόμενες Καταστάσεις:**
  1. Σημαντικές απώλειες ψυκτικού λαδιού
  2. Θερμικές βλάβες (αέρια από διάσπαση λαδιού)
  3. Εσωτερικά τόξα μικρής ενέργειας

### 1.17 Προστασία ζυγών

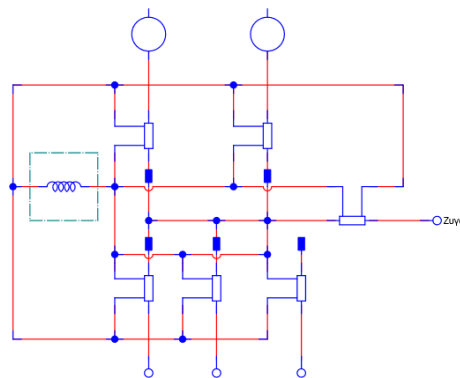
Η προστασία των ζυγών δεν περιορίζεται μόνο στους ίδιους τους αγωγούς, αλλά περιλαμβάνει και όλα τα συστήματα και μηχανήματα που είναι συνδεδεμένα πάνω τους, όπως διακόπτες, αποζεύκτες, μετασχηματιστές οργάνων κ.ά.

Τα σφάλματα που μπορεί να παρουσιαστούν στους ζυγούς προέρχονται από διάφορες αιτίες, όπως:

- Βραχυκυκλώματα
- Δυσλειτουργίες κατά τη λειτουργία των διακοπών
- Λανθασμένοι χειρισμοί από το προσωπικό

Σε κάθε περίπτωση, τα σφάλματα αυτά πρέπει να εντοπίζονται και να απομονώνονται άμεσα, ώστε να περιοριστεί όσο το δυνατόν περισσότερο η έκταση της ζημιάς.

Για την απομόνωση του σφάλματος απαιτείται η αποσύνδεση όλων των κυκλωμάτων που συνδέονται στους συγκεκριμένους ζυγούς. Ωστόσο, αυτή η ενέργεια συνεπάγεται είτε διακοπή της παραγωγής είτε διακοπή της μεταφοράς σημαντικής ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος, κάτι που μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για το σύστημα.



Σχήμα 1.16 Προστασία Ζυγών

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την προστασία των ζυγών είναι η χρήση διαφορικών ηλεκτρονόμων. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί λαμβάνουν σήματα ρεύματος από μετασχηματιστές εντάσεως (CTs) που τοποθετούνται σε όλα τα κυκλώματα τα οποία συνδέονται με τους ζυγούς, είτε εισερχόμενα είτε εξερχόμενα.

Κατά την κανονική λειτουργία, το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται από τους ζυγούς είναι ίσο με το μηδέν, καθώς δεν υπάρχει απώλεια ή προσθήκη ρεύματος εντός της προστατευόμενης περιοχής.

Ωστόσο, σε περίπτωση που παρουσιαστεί σφάλμα στους ζυγούς, η ισορροπία αυτή διαταράσσεται. Το ρεύμα σφάλματος θα κατευθυνθεί προς την περιοχή του σφάλματος μέσω ενός ή περισσότερων κυκλωμάτων, προκαλώντας διαφορά μεταξύ του συνόλου των εισερχόμενων και εξερχόμενων ρευμάτων. Αυτή η διαφορά ανιχνεύεται από τον διαφορικό ηλεκτρονόμο, ο οποίος ενεργοποιείται και απομονώνει την προσβεβλημένη περιοχή, προλαμβάνοντας έτσι την εξάπλωση της βλάβης στο υπόλοιπο σύστημα.

## 1.18 Προστασία με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών

Καθώς τα ηλεκτρικά συστήματα γίνονται ολοένα πιο σύνθετα, αυξάνεται και η ανάγκη για βελτίωση της ταχύτητας και της αξιοπιστίας των κλασικών συσκευών προστασίας. Ωστόσο, η εξέλιξη αυτών των παραδοσιακών μέσων παρουσιάζει δυσκολίες, δεδομένου ότι οι συσκευές προστασίας λειτουργούν μόνο για σύντομα χρονικά διαστήματα και σε σπάνιες περιπτώσεις. Αυτός ο περιορισμένος χρόνος ενεργοποίησης μπορεί να μειώσει την αξιοπιστία τους και να θέσει υπό αμφισβήτηση την εμπιστοσύνη που μπορεί να τους δοθεί.

Η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών σε τοπικούς υποσταθμούς αποτελεί μια αποτελεσματική λύση για την ενίσχυση της ταχύτητας και της αξιοπιστίας της προστασίας. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις σοβαρών βραχυκυκλωμάτων που ενδέχεται να εμφανιστούν κοντά στους ακροδέκτες της γεννήτριας, η ανάγκη για άμεση απομόνωση της γεννήτριας από το σύστημα είναι επιτακτική.

Πλέον, πολλές από τις λειτουργίες μετρήσεων και συγκρίσεων που παλαιότερα υλοποιούνταν μέσω ρελέ και παθητικών κυκλωμάτων, μπορούν να εκτελούνται με ακρίβεια από υπολογιστικά συστήματα. Οι απαραίτητες πληροφορίες συλλέγονται από μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης και μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή μέσω μετατροπών A/D (αναλογικού σε ψηφιακό σήμα).

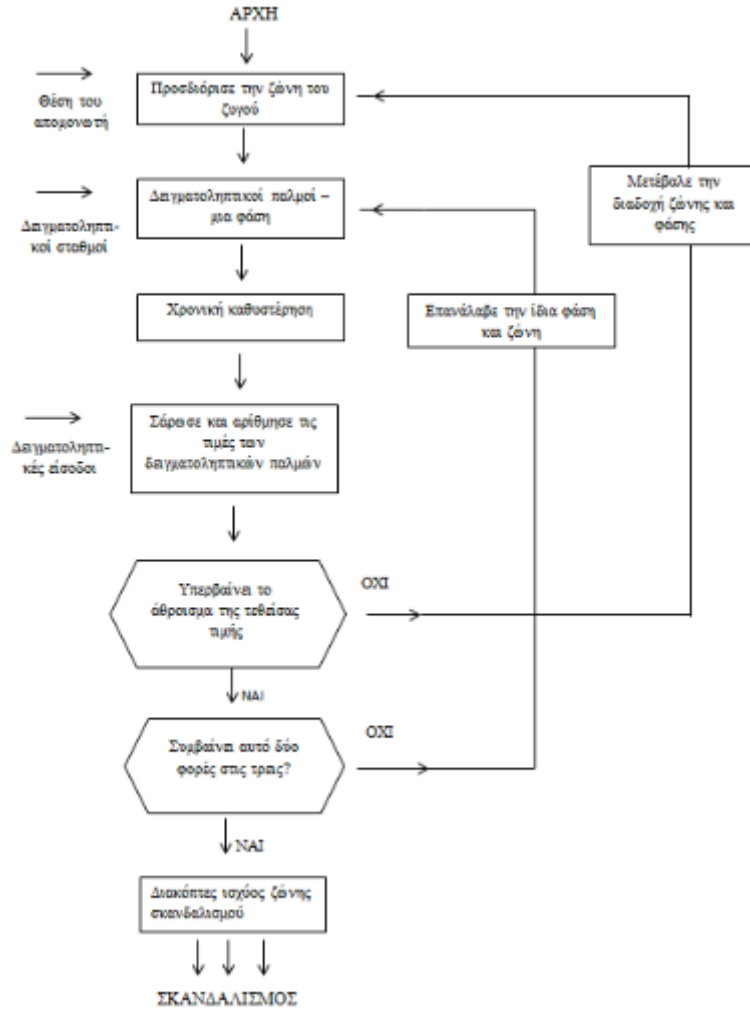
Οι παράμετροι του συστήματος καταγράφονται με περιοδική δειγματοληψία και επεξεργάζονται σύμφωνα με τη μέθοδο προστασίας που εφαρμόζεται. Για παράδειγμα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ταχεία απομόνωση ενός επικίνδυνου σφάλματος μέσα σε 4 χιλιοστά του δευτερολέπτου, απαιτείται ρυθμός δειγματοληψίας ρεύματος ανά 0,5 msec. Με βάση τουλάχιστον έξι δείγματα για λήψη απόφασης, ο συνολικός χρόνος απόκρισης μπορεί να περιοριστεί στα 3 msec.

Η προστασία μεγάλων και σύνθετων υποσταθμών προϋποθέτει την αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Συνήθως αποθηκεύονται τουλάχιστον δέκα δείγματα για όλα τα φασικά ρεύματα και τις τάσεις φάσης ως προς γη για κάθε γραμμή ή σύνδεση, μαζί με τις αιχμές αυτών των ποσοτήτων. Επιπλέον, καταγράφεται η χρονική στιγμή εμφάνισης των αιχμών, δηλαδή το δείγμα στο οποίο εντοπίστηκαν.

Για έναν υποσταθμό μέσης τάσης (π.χ. 20kV έως 150kV), έχει υπολογιστεί ότι η συνολική απαίτηση αποθήκευσης φτάνει τις 2.000 λέξεις μνήμης. Μέσα σε αυτήν περιλαμβάνονται και πολλές υπορουτίνες του υπολογιστή, οι οποίες εκτελούν λειτουργίες που παλαιότερα αναλάμβαναν τα ρελέ, όπως:

- Μετατροπή σημάτων από αναλογικά σε ψηφιακά
- Ανίχνευση αιχμών ρεύματος
- Σύγκριση ρευμάτων και διαφορών μεταξύ εισόδου-εξόδου
- Ανάλυση κυματομορφών
- Λειτουργίες διαφορικής προστασίας μετασχηματιστών
- Υλοποίηση αποστασιακών διατάξεων (distance relays)

Με την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών, επιτυγχάνεται ταχύτερη και πιο αξιόπιστη προστασία, μειώνοντας τις πιθανότητες εκτεταμένων βλαβών στο σύστημα.



Σχήμα 1.17 Διάγραμμα ροής (εφαρμόζεται σε ζυγούς)

Μια μέθοδος προστασίας ζυγού που βασίζεται στην ισορροπία των ρευμάτων έχει προταθεί για την επίβλεψη της ζώνης του ζυγού. Η τεχνική αυτή στηρίζεται στην ταυτόχρονη λήψη και ανάλυση δειγμάτων ρεύματος από όλους τους τροφοδοτές μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

$$M = | \sum_{n=1}^f i_n | \tag{1.1}$$

Σε κάθε κύκλο δειγματοληψίας, ο υπολογιστής συγκρίνει τα ρεύματα όλων των τροφοδοτών της προστατευόμενης ζώνης. Αν εντοπιστεί εσωτερικό σφάλμα (δηλαδή, το άθροισμα των ρευμάτων δεν ισούται με μηδέν), τότε αποστέλλεται σήμα εντολής για άνοιγμα όλων των διακοπών ισχύος που συνδέονται με τη συγκεκριμένη ζώνη. Η συνθήκη ελέγχει κατά πόσο το συνολικό μέτρο της ροής των ρευμάτων τύπος (1.1) υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο, όπου  $i_n$  είναι το ρεύμα του κάθε τροφοδότη και  $f$  ο συνολικός αριθμός τους. Αν η τιμή του  $M$  παραμένει εντός αποδεκτών ορίων, τότε δεν υπάρχει σφάλμα εντός της προστατευόμενης περιοχής.

Η ψηφιακή προστασία με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών βρίσκεται ακόμη στα αρχικά στάδια εξέλιξής της. Ωστόσο, έχει ήδη αναδειχθεί ότι προσφέρει σημαντικά τεχνικά πλεονεκτήματα, όπως εξαιρετικά μικρούς χρόνους απόκρισης και υψηλή ακρίβεια εντοπισμού σφαλμάτων.

Όπως συμβαίνει με κάθε νέα τεχνολογία, η εφαρμογή της απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση τόσο των τεχνικών όσο και των οικονομικών παραμέτρων, ώστε να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα και η αποδοτικότητα της επένδυσης.

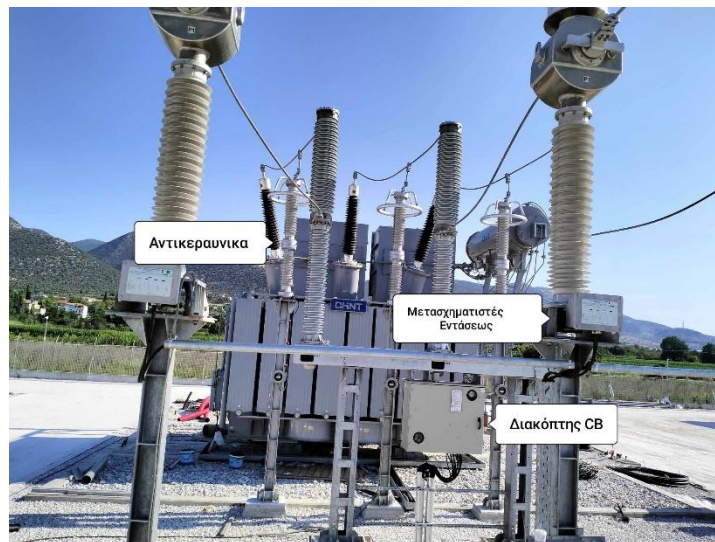
### 1.19 Αλεξικέρανα

Κατά τη διάρκεια πτώσεων κεραυνών πάνω σε εναέριες γραμμές ή στο έδαφος κοντά σε αυτές, δημιουργούνται ισχυρές υπερτάσεις στους αγωγούς. Οι υπερτάσεις αυτές ενέχουν σοβαρό κίνδυνο για τις μονώσεις των γραμμών και των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Η προστασία από τέτοια φαινόμενα επιτυγχάνεται με τη χρήση αλεξικεραυνών.

Για την καλύτερη απόδοση της προστασίας, τα αλεξικέρανα τοποθετούνται ιδανικά σε κάθε στύλο ή τουλάχιστον ανά τρεις στύλους. Ωστόσο, αυτή η πρακτική είναι ιδιαίτερα δαπανηρή και δεν θεωρείται απαραίτητη για τα περισσότερα δίκτυα στην Ελλάδα. Αντιθέτως, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην προστασία των μετασχηματιστών, οι οποίοι έχουν χαμηλότερη αντοχή σε κρουστικές υπερτάσεις συγκριτικά με τις γραμμές μεταφοράς. Έτσι, η τοποθέτηση αλεξικεραυνών σε κάθε μετασχηματιστή είναι απαραίτητη.

Η ονομαστική τάση ενός αλεξικερανού αντιστοιχεί στη μέγιστη συνεχή τάση που μπορεί να αντέξει χωρίς να προκληθεί εκκένωση. Τα κυκλώματα ηλεκτρικής προστασίας στους υποσταθμούς αποτελούνται από πολύκλινους χαλύβδινους αγωγούς που εγκαθίστανται στην κορυφή των πυλώνων ή των κριωμάτων και συνδέονται τόσο με τις γραμμές υψηλής τάσης όσο και με τη γείωση του υποσταθμού.

Τα αλεξικέρανα που χρησιμοποιούνται στους υποσταθμούς είναι κυρίως τύπου βαλβίδας. Εξωτερικά μοιάζουν με κοινά μονωτικά πορσελάνης, όμως εσωτερικά περιλαμβάνουν μια σειρά δίσκων από ειδικό υλικό. Αυτό το υλικό λειτουργεί ως μονωτικό υπό φυσιολογικές συνθήκες τάσης, αλλά γίνεται αγωγίμο όταν η τάση υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, όπως σε περίπτωση κεραυνού.



Σχήμα 1.18 Αλεξικέρανα σε γραμμές υψηλής τάσης

Σε κανονική λειτουργία, η αντίσταση του αλεξικερανού είναι πολύ υψηλή. Όταν όμως προκύψει υπέρταση:

- α) διασπάται ο αέρας στα διάκενα του αλεξικερανού,
- β) η αντίσταση των δίσκων μειώνεται σημαντικά και η υπέρταση εκτονώνεται προς τη γη μέσω εκκένωσης.

Το τόξο που σχηματίζεται από την εκκένωση διακόπτεται αυτόματα όταν η υπέρταση παύσει, και το αλεξικέραυνο επανέρχεται στην αρχική του μονωτική κατάσταση, διατηρώντας την κανονική λειτουργία του συστήματος.

### 1.20 Γείωση Υ/Σ

Η γείωση αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την προστασία ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους παρακάτω βασικούς τομείς:

1. **Γείωση των μη ρευματοφόρων μεταλλικών κατασκευών και εξαρτημάτων** για την αποτροπή επικίνδυνων δυναμικών σε περίπτωση βλάβης.
2. **Πολλαπλή γείωση του ουδέτερου αγωγού του δικτύου χαμηλής τάσης**, συμπεριλαμβανομένης της γείωσης στο σημείο εισόδου των παροχών στους καταναλωτές.
3. **Γείωση των αλεξικεραυνών**, ώστε να διασφαλίζεται ασφαλής και άμεση εκτόνωση των υπερτάσεων από κεραυνούς προς το έδαφος.
4. **Γείωση του ουδέτερου σημείου του δικτύου μέσης τάσης στους υποσταθμούς**, για τη διατήρηση της ασφάλειας και της λειτουργικότητας του συστήματος.

Η αποτελεσματική γείωση είναι απαραίτητη όχι μόνο για την τεχνική αξιοπιστία του συστήματος, αλλά και για την προστασία της ανθρώπινης ζωής.

Στους υποσταθμούς, το σύστημα γείωσης κατασκευάζεται με βάση εξειδικευμένα σχέδια της υπηρεσίας μελετών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των συνθηκών γείωσης του χώρου. Το δίκτυο αποτελείται από χάλκινες λάμες ή αγωγούς ορθογώνιας διατομής, τοποθετημένους υπόγεια και συγκολλημένους μεταξύ τους ώστε να σχηματίζουν πλέγμα από ορθογώνια πλαίσια.

Σε επιλεγμένα σημεία του πλέγματος τοποθετούνται κατακόρυφα γειωτήρες – γαλβανισμένοι σιδερένιοι σωλήνες μήκους 3 μέτρων – οι οποίοι ενώνονται σταθερά με το υπόγειο πλέγμα.

Όλα τα μεταλλικά μέρη του υποσταθμού, περιλαμβανομένων των μεταλλικών στοιχείων των μηχανημάτων, των μεταλλικών σκελετών κατασκευών, καθώς και του ουδέτερου των μετασχηματιστών, συνδέονται στο δίκτυο γείωσης μέσω χάλκινων αγωγών.

### 1.21 Κυματοπαγίδες (συστήματα φερεσυχνων)

Για την αποτελεσματική διαχείριση του δικτύου, κάθε υποσταθμός (Υ/Σ) διαθέτει **σύστημα φερεσύχνων (carrier system)**, το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία με το **Κέντρο Διαχείρισης (ΚΔΗΕ)**. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί τις **υψηλές συχνότητες (30–350 kHz)** για τη μετάδοση σημάτων μέσω των ίδιων των γραμμών μεταφοράς ισχύος.



Σχήμα 1.19 Φίλτρο φερέσυχων

#### a. Αρχή Λειτουργίας

Το σύστημα βασίζεται στην **επαγωγή σημάτων υψηλής συχνότητας** στις γραμμές μεταφοράς, χωρίς να επηρεάζει τη ροή του κύριου ρεύματος (50 Hz).

#### b. Δομή Συστήματος

##### 1. Μεταδότης (Transmitter)

- Τοποθετείται σε στρατηγικά σημεία της γραμμής.
- Εκπέμπει **σήματα υψηλής συχνότητας (π.χ. 100 kHz)** με χαμηλή τάση.

##### 2. Δέκτης (Receiver)

- Βρίσκεται στους Υ/Σ και στα κέντρα ελέγχου.
- Αποκωδικοποιεί τα σήματα σε πληροφορίες (π.χ. τηλεμετρία, εντολές).

##### 3. Κυματοπαγίδες (Line Traps / Filters)

- Εγκαθίστανται στις εισόδους των Υ/Σ **για να:**
  - Εμποδίζουν τη διείσδυση των σημάτων φερεσυχων στους μετασχηματιστές και διακόπτες.
  - Επιτρέπουν **μόνο το ρεύμα 50 Hz** να περάσει.
- **Απαιτήσεις απόδοσης:**
  - Μηδενική αντίσταση στα 50 Hz (για ελάχιστες απώλειες).
  - Υψηλή απορρόφηση στις συχνότητες φερεσυχων (30–350 kHz).

##### 4. Σύνδεση με το Δίκτυο

- Το σήμα φερεσυχων οδηγείται μέσω πυκνωτή ζεύξης ή χωρητικού καταμεριστή τάσης, ο οποίος:
  - Υποβαθμίζει την τάση του σήματος.

- Απομονώνει το υψηλής συχνότητας σήμα από το κύριο κύκλωμα.

### c. Λειτουργία σε Πράξη

- **Μετάδοση:** Το σήμα φερεσύχων εισάγεται στη γραμμή και διαδίδεται προς τον Υ/Σ.
- **Απομόνωση:** Οι **κυματοπαγίδες** εμποδίζουν την είσοδό του στους μετασχηματιστές.
- **Λήψη:** Το σήμα απομονώνεται μέσω πυκνωτή, μετατρέπεται σε χαμηλή τάση και κατευθύνεται στον δέκτη.
- **Μετατροπή:** Το ηλεκτρονικό σύστημα του Υ/Σ μεταφράζει το σήμα σε **δεδομένα ή φωνητική επικοινωνία**.

### d. Κρίσιμοι Παράγοντες Αξιοπιστίας

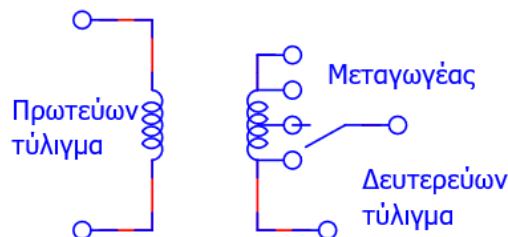
- **Συντονισμός κυματοπαγίδων:** Πρέπει να ταιριάζουν με τις συχνότητες φερεσύχων.
- **Θερμική αντοχή:** Να αντέχουν το ονομαστικό ρεύμα της γραμμής.
- **Απόσβεση παρεμβολών:** Να μην επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο.

## 1.22 Ρύθμιση τάσης

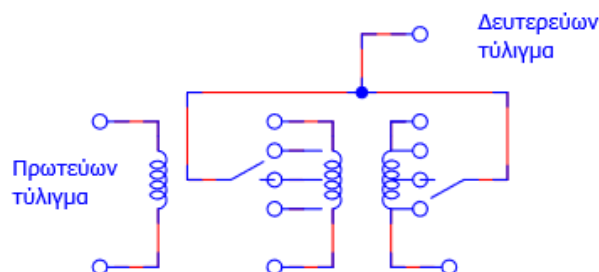
Η τάση που παρέχεται στους καταναλωτές πρέπει να παραμένει **όσο γίνεται πιο σταθερή**, ωστόσο η **φυσική μεταβλητότητα των φορτίων** καθιστά αδύνατη την απόλυτη σταθερότητα. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, επιτρέπεται **ανοχή  $\pm 5\%$**  από την ονομαστική τάση. Οι κύριες αιτίες διακυμάνσεων:

- **Εκτεταμένη χρήση ηλεκτρικών συσκευών** (αυξομειώσεις φορτίου).
- **Απότομες αλλαγές** (π.χ. εκκίνηση μεγάλων κινητήρων, διακοπή βιομηχανικών μονάδων).

### 1.22.1 Ρύθμιση της τάσης με μεταγωγή

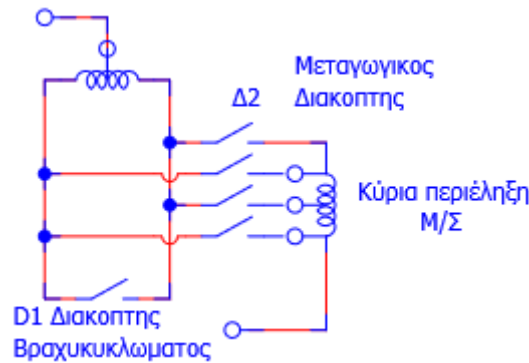


Σχήμα 1.20 Μ/Σ με διαφορετικές λήψεις δευτερεύον τυλίγματος μέσω μεταγωγέα



Σχήμα 1.21 Μ/Σ με δυο μεταγωγείς για ρύθμιση τάσης υπό φορτίο





Σχήμα 1.22 Μεσαία λήψη αυτομετασχηματιστή

### Αυτόματοι Μεταγωγείς Υπό Φορτίο (OLTC)

Οι μεταγωγείς υπό φορτίο επιτρέπουν την αλλαγή της σχέσης μετασχηματισμού χωρίς διακοπή λειτουργίας. Το σύστημα λειτουργεί ως εξής:

- **Μηχανισμός Εναλλαγής:**
  - Χρησιμοποιεί σερβοκινητήρες ή τηλεχειριστήρια
  - Τοποθετείται μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων για εξασφάλιση συνέχειας ρεύματος
- **Πρόβλημα Τόξου:**
  - Κατά τη μετάβαση δημιουργείται ηλεκτρικό τόξο
  - Εξειδικευμένοι μηχανισμοί (ελαιοψεκαστές, θάλαμοι κενού) ελαχιστοποιούν τη φθορά

### Σύστημα Διπλών Τυλιγμάτων

Προηγμένη τεχνική με παράλληλα τυλίγματα:

- **Λειτουργική Ακολουθία:**
  - Αρχικά και τα δύο τυλίγματα (α και β) ενεργά
  - Απενεργοποίηση του ενός τυλίγματος (π.χ. α)
  - Ρύθμιση στο μη ενεργό τύλιγμα
  - Επαναφορά και ρύθμιση του δεύτερου τυλίγματος
- **Πλεονεκτήματα:**
  - Μειωμένη φθορά επαφών (50% μικρότερη)
  - Δυνατότητα συντήρησης χωρίς διακοπή λειτουργίας

### Σύστημα με Αυτομετασχηματιστή

Εξειδικευμένη διάταξη για ευέλικτη ρύθμιση:

- **Στοιχεία:**
  - Κύριο τύλιγμα
  - Αυτομετασχηματιστής με μεσαίες λήψεις
  - Διακόπτες βραχυκυκλώματος (Δ1)
  - Διακόπτες αλλαγής λήψης (Δ2)

- **Ακολουθία Λειτουργίας:**
  - Άνοιγμα Δ1 (απενεργοποίηση κυκλώματος)
  - Εναλλαγή Δ2 (αλλαγή λήψης)
  - Κλείσιμο Δ1 (επανεργοποίηση)

### Συστήματα Προστασίας και Ελέγχου

Για αξιόπιστη λειτουργία:

- **Χρονικές καθυστερήσεις:**
  - Εμποδίζουν αθέλητες ενεργοποιήσεις ρυθμιστών
  - Τυπικές ρυθμίσεις: 0.5-5 δευτερόλεπτα
- **Συστήματα Παρακολούθησης:**
  - Θερμικές κάμερες για επαφές
  - Ανάλυση λαδιού για ένδειξη φθοράς



Σχήμα 1.23 Αυτόματη μεταγωγή (OLTC)

### 1.23 Σύγχρονοι πυκνωτές

Οι σύγχρονοι επαγωγικοί κινητήρες, όταν λειτουργούν με υπερδιέγερση, συμπεριφέρονται όπως οι πυκνωτές. Ορισμένοι εναλλακτικές μπορούν να λειτουργήσουν ως σύγχρονοι επαγωγικοί κινητήρες, γεγονός που καθιστά δυνατή τη χρήση τους ως σύγχρονους πυκνωτές. Αυτή η λειτουργία συμβάλλει στη βελτίωση του συντελεστή ισχύος και στη βελτιστοποίηση της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, οι σύγχρονοι πυκνωτές παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως:

- Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος κοντά στη μηχανή, αυξάνεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος, απαιτώντας ειδικά συστήματα προστασίας.
- Οι σύγχρονοι κινητήρες τείνουν να χάσουν τον συγχρονισμό τους όταν το φορτίο ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος.

- Ένα ακόμη μειονέκτημα είναι οι αναπόφευκτες απώλειες ισχύος λόγω τριβών στα κινούμενα μέρη της σύγχρονης μηχανής. Αυτές οι απώλειες μπορεί να είναι σημαντικές σε σύγκριση με την αντιστάθμιση που προσφέρουν οι στατικοί πυκνωτές.

Παρόλα αυτά, ένα σημαντικό πλεονέκτημα των σύγχρονων κινητήρων ως αντισταθμιστών είναι η εξαιρετική προσαρμοστικότητά τους σε διαφορετικές καταστάσεις φορτίου.

## 1.24 Πυκνωτές παράλληλα

Οι πυκνωτές διακλάδωσης τοποθετούνται σε σημεία του δικτύου όπου υπάρχει σημαντική κατανάλωση άεργης ισχύος. Μια τυπική εφαρμογή είναι στις **εναέριες γραμμές μεταφοράς** που λειτουργούν υπό πλήρες φορτίο. Με την παροχή της απαιτούμενης άεργης ισχύος, οι πυκνωτές διακλάδωσης βοηθούν στη διατήρηση της τάσης σε επιθυμητά επίπεδα.

### 1.24.1.1 Μειονεκτήματα των Πυκνωτών Διακλάδωσης

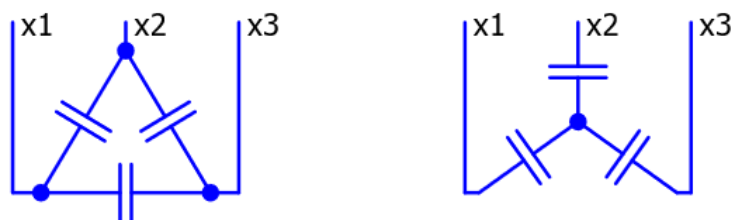
1. **Εξάρτηση από την Τάση**
  - Όταν η τάση του δικτύου πέφτει, μειώνεται και η άεργη ισχύς που παράγουν οι πυκνωτές. Αυτό περιορίζει την αποτελεσματικότητά τους ακριβώς όταν υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη για αντιστάθμιση.
2. **Υπερβολική Αύξηση Τάσης σε Χαμηλά Φορτία**
  - Σε συνθήκες ελαφρού φορτίου, όπου η τάση είναι ήδη υψηλή, η προσθήκη πυκνωτών μπορεί να οδηγήσει σε **υπερτάσεις**, θέτοντας σε κίνδυνο τον εξοπλισμό.
3. **Αυτοματοποιημένη Λειτουργία & Χρονικές Καθυστερήσεις**
  - Για να αποφευχθούν συχνές και μη απαραίτητες ενεργοποιήσεις/απενεργοποιήσεις, χρησιμοποιούνται **ηλεκτρονόμοι** με χρονικές καθυστερήσεις.

### 1.24.1.2 Συνδεσμολογίες Πυκνωτών Διακλάδωσης

Οι πυκνωτές μπορούν να συνδεθούν με δύο τρόπους:

- Σε Σύνδεση Τριγώνου ( $\Delta$ )
- Σε Σύνδεση Αστέρα ( $Y$ )

Η επιλογή της κατάλληλης σύνδεσης εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος και τη δομή του δικτύου.



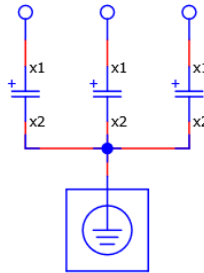
Σχήμα 1.24 Συνδεσμολογία πυκνωτών με σύνδεση τριγώνου και αστέρα αντίστοιχα

## 1.25 Πυκνωτές σε σειρά

### Πυκνωτές σε Σειρά

Οι πυκνωτές που συνδέονται **σε σειρά** με τους αγωγούς μιας γραμμής χρησιμοποιούνται για τη **μείωση της επαγωγικής αντίστασης** μεταξύ της πηγής και του φορτίου. Ωστόσο, παρουσιάζουν ένα σημαντικό μειονέκτημα:

- **Υψηλές υπερτάσεις** κατά τη διέλευση ρεύματος βραχυκυκλώσεως, γεγονός που απαιτεί ειδικές συσκευές προστασίας.



Σχήμα 1.25 Συνδεσμολογία πυκνωτών σε σειρά

### Σύγκριση με τους Παράλληλους Πυκνωτές

#### 1. Για μικρές απαιτήσεις άεργης ισχύος

- Δεν απαιτούνται πυκνωτές σε σειρά, καθώς η επίδρασή τους είναι αμελητέα.

#### 2. Μικρή μείωση του ρεύματος γραμμής

- Οι πυκνωτές σειράς **δεν μειώνουν σημαντικά το ρεύμα**, επομένως, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται θερμικός περιορισμός, προτιμάται η χρήση **συγχρονών κινητήρων**.

#### 3. Αποτελεσματικότητα σε περιπτώσεις πτώσης τάσης

- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν υπάρχει **μεγάλη πτώση τάσης** στη γραμμή, βοηθώντας στην εξομάλυνση διακυμάνσεων (π.χ. λόγω ηλεκτρικών τόξων).

#### 4. Βελτίωση ευστάθειας σε γραμμές με υψηλή αντίσταση

- Σε δίκτυα με **υψηλή συνολική αντίσταση**, οι πυκνωτές σειράς αυξάνουν την αποτελεσματικότητα και τη σταθερότητα της γραμμής.

### 1.25.1 Συμπέρασμα

- **Παράλληλοι πυκνωτές** (διακλάδωσης) χρησιμοποιούνται κυρίως για **αντιστάθμιση άεργης ισχύος** και διατήρηση της τάσης.
- **Πυκνωτές σε σειρά** είναι πιο κατάλληλοι για **εξομάλυνση τάσης** και **βελτίωση ευστάθειας** σε γραμμές με υψηλή αντίσταση, αλλά απαιτούν προστασία από υπερτάσεις.

Η επιλογή εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες του δικτύου και τις συνθήκες λειτουργίας.

## 1.26 Ρυθμιστική ιδιότητα

Εκτός από τους ρυθμιστές τάσης των εναλλακτῆρων, χρησιμοποιούνται και ἄλλοι τύποι ρυθμιστῶν, κυρίως για τον ἔλεγχο της τάσης στις γραμμές **Μέσης Τάσης (MT)**. Ας εξετάσουμε δύο βασικούς τύπους:

### a. Επαγωγικός Ρυθμιστής Τάσης

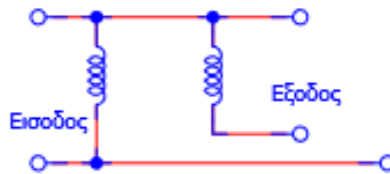
- **Λειτουργία:**
  - Χρησιμοποιεί δύο **τυλίγματα ανά φάση**, επιτρέποντας **συνεχή ρύθμιση** (όχι με βήματα).
  - Μπορεί να αυξήσει την τάση **έως +10%**.
- **Μειονεκτήματα:**
  - Προκαλεί **φασική απόκλιση**, η οποία μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της τάσης.
- **Εφαρμογές:**
  - Χρησιμοποιείται σε δίκτυα όπου απαιτείται ομαλή προσαρμογή της τάσης.

### b. Ρυθμιστές Ρηματικού Τύπου (Tap Changers)

- **Λειτουργία:**
  - Αποτελούνται από:
    - **Μετασχηματιστή 1:1** ἢ
    - **Μετασχηματιστή με μηχανισμό αλλαγῆς σχέσης υπό φορτίο** (με ενδιάμεσες λήψεις).
  - Έχουν **20 ἔως 40 ρύθμιση βημάτων**, προσφέροντας ακριβή ἔλεγχο.
  - Ρυθμίζουν την τάση **κατά  $\pm 10\%$** .
- **Πλεονεκτήματα:**
  - Μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα σε σύγκριση με επαγωγικούς ρυθμιστές.
  - Λιγότερες φασικές διαταραχές.
- **Εφαρμογές:**
  - Χρησιμοποιούνται **στους υποσταθμούς μεταφοράς** για ρύθμιση της τάσης στην πλευρά της **Μέσης Τάσης (MT)**.

### c. Επιλογή:

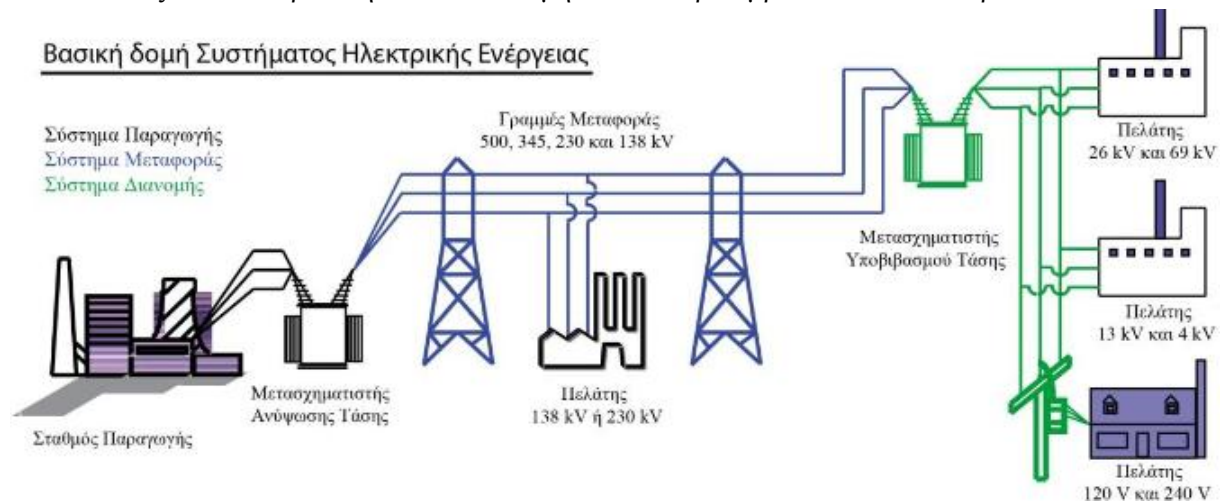
- Ο **επαγωγικός ρυθμιστής** είναι κατάλληλος για συνεχή ρύθμιση, αλλά με πιθανές φασικές διαταραχές.
- Ο **ρηματικός ρυθμιστής (Tap Changer)** προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια και χρησιμοποιείται σε κρίσιμα σημεία του δικτύου, ὅπως οι υποσταθμοί MT.



Σχήμα 1.26 Μονοφασικός επαγωγικός ρυθμιστής τάσης

## 1.27 Δομή του Ηλεκτρικού Δικτύου

Το ηλεκτρικό δίκτυο αποτελείται από μια σειρά διασυνδεδεμένων στοιχείων που εξασφαλίζουν τη δημιουργία, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς στους καταναλωτές. Η βασική του δομή περιλαμβάνει τα παρακάτω επίπεδα:



Σχήμα 1.27 Βασική δομή ηλεκτρικής ενέργειας

Βασικά Στάδια του Ηλεκτρικού Δικτύου :

- a. Παραγωγή
  - Συμβατικές μονάδες (θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, υδροηλεκτρικά φράγματα, πυρηνικά εργοστάσια).
  - Ανανεώσιμες πηγές (αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκά συστήματα, βιομάζα).
- b. Μεταφορά
  - Χρήση γραμμών μεταφοράς (π.χ. 400 kV, 150 kV) για μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες απώλειες.
  - Υποσταθμοί μετασχηματιστών (step-up για αύξηση τάσης από παραγωγή, step-down για μείωση προς διανομή).
- c. Διανομή
  - Τοπικά δίκτυα (π.χ. 20 kV, 0.4 kV) για τροφοδοσία νοικοκυριών, βιομηχανιών, εμπορικών κέντρων.
  - Διανομικοί σταθμοί και εναέριες/υπόγειες καλωδιώσεις.
- d. Κατανάλωση
  - Οικιακοί (σπίτια), εμπορικοί (γραφεία), βιομηχανικοί (εργοστάσια).
  - Ρυθμιστικές τεχνικές (π.χ. φορτίου ισορροπία, διαχείριση ζήτησης).

## 1.28 Υπολογισμός ισχύος μίας πόλης

### 1.28.1 Υ/Σ μέσης τάσης

#### Τοποθεσία και Εγκατάσταση

Μια γραμμή μέσης τάσης (20 kV) φτάνει σε έναν μετασχηματιστή διανομής, ο οποίος συνήθως τοποθετείται πάνω σε ξύλινο στύλο. Αυτός ο Μ/Σ μετατρέπει την τάση από 20 kV σε χαμηλή τάση 230/400 V για οικιακή και εμπορική χρήση.

#### Τύποι Ψύξης και Μόνωσης

- **Ελαιόψυκτοι Μ/Σ:**
  - Χρησιμοποιούνται **κατά κανόνα**, με ψύξη μέσω μετασχηματιστικού ελαίου.
  - Είναι πιο οικονομικοί και αποδοτικοί.
- **Μ/Σ Στερεάς Μόνωσης (Dry-Type):**
  - Εφαρμόζονται **μόνο σε ειδικές περιπτώσεις**, όπως:
    - Αποθήκες καυσίμων ή πυρομαχικών
    - Πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου
    - Χώροι με υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς (λόγω εύφλεκτων υλικών)

#### Κριτήρια Επιλογής Μεγέθους Μ/Σ

##### 1. Βασισμένο στη Μελλοντική Ζήτηση

- Ο μετασχηματιστής επιλέγεται με βάση την **προβλεπόμενη μέγιστη ζήτηση** μετά από **5-10 χρόνια**.

##### 2. Οικονομική Βελτιστοποίηση

- Μπορεί να συμφέρει η εγκατάσταση **μεγαλύτερου Μ/Σ** από την άμεση ανάγκη, επειδή:
  - **Μειώνονται οι απώλειες χαλκού** (λόγω υψηλότερης απόδοσης).
  - Εκτείνεται η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

#### Συμπέρασμα

- Οι ελαιόψυκτοι μετασχηματιστές είναι η **προτιμώμενη λύση** για γενική χρήση.
- Οι στεγνοί μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται **μόνο σε επικίνδυνες περιοχές**.
- Η επιλογή μεγέθους εξαρτάται **από την προβλεπόμενη ανάπτυξη και οικονομικούς παράγοντες** (μείωση απωλειών).

## 1.29 Ισχύς Μ/Σ διανομής

Οι μετασχηματιστές διανομής έχουν **τυπική ισχύ** από 25 kVA έως 1.600 kVA, η οποία ισχύει υπό συγκεκριμένες συνθήκες:

- **Θερμοκρασία περιβάλλοντος:** Μέχρι **40°C** (μέγιστη στιγμιαία).
- **Μέση ημερήσια θερμοκρασία:** Μέχρι **30°C**.
- **Μέση ετήσια θερμοκρασία:** Μέχρι **20°C**.
- **Υψόμετρο εγκατάστασης:** Μέχρι **1.000 m**.

Στην Ελλάδα, οι θερμοκρασίες συνήθως εμπίπτουν σε αυτά τα πλαίσια. Ωστόσο:

- **Αύξηση θερμοκρασίας** → **Μείωση ισχύος** (λόγω υπερθέρμανσης).
- **Αύξηση υψόμετρου** → **Μείωση ισχύος κατά 3% ανά 1.000 m** (λόγω αραιού αέρα και χειρότερης ψύξης).

### Υπερφόρτιση Μετασχηματιστών

Οι Μ/Σ μπορούν να **υπερφορτιστούν προσωρινά** πέραν της ονομαστικής τους ισχύος, αλλά με περιορισμούς:

- **Η διάρκεια της υπερφόρτισης εξαρτάται από:**
  1. Την προηγούμενη φόρτιση (π.χ. αν λειτουργούσε στο 50% της ισχύος του).
  2. Το επίπεδο υπερφόρτισης (π.χ. +30%).

### Παράδειγμα:

Αν ένας Μ/Σ λειτουργεί αρχικά στο **50% της ονομαστικής του ισχύος ( $0.5I_n$ )**, μπορεί να αντέξει:

- **+30% υπερφόρτιση ( $1.3I_n$ ) για 1 ώρα.**

### Συμπέρασμα

- Η **ισχύς των Μ/Σ** καθορίζεται βάσει θερμοκρασιακών συνθηκών και υψόμετρου.
- Σε **υψηλές θερμοκρασίες ή μεγάλα υψόμετρα**, η διαθέσιμη ισχύς μειώνεται.
- **Προσωρινή υπερφόρτιση** είναι δυνατή, αλλά με αυστηρά χρονικά όρια για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση.

Αυτά τα χαρακτηριστικά εξασφαλίζουν **αξιόπιστη λειτουργία** και **μακρά διάρκεια ζωής** των μετασχηματιστών.

### 1.30 Τάση Βραχυκυκλώματος

Η τάση βραχυκύκλωσης,  $U_k$ , ορίζεται ως η τάση που απαιτείται να εφαρμοστεί στο πρωτεύον του μετασχηματιστή τάσης (Μ/Σ), ενώ το δευτερεύον του μετασχηματιστή διασυνδέεται σε βραχυκύκλωμα. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει ότι και στα δύο τυλίγματα παράγεται το ονομαστικό ρεύμα, το οποίο χρησιμοποιείται ως βάση για τις δοκιμές και τις μετρήσεις απόδοσης του μετασχηματιστή.

Η εφαρμογή της τάσης  $U_k$  είναι κρίσιμη για τον καθορισμό των ονομαστικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, καθώς εξασφαλίζει ότι οι δοκιμαζόμενες παραμέτρους (όπως το ρεύμα βραχυκύκλωσης) ανταποκρίνονται στις προδιαγραφές σχεδιασμού. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται αξιοπιστία στην εκτίμηση της λειτουργικής ικανότητας του μετασχηματιστή υπό συνθήκες βραχυκύκλωσης, συμβάλλοντας στη διασφάλιση της σταθερότητας και της ασφάλειας του συνολικού συστήματος.

$$U_k = \frac{V_{SC}}{V_n} \times 100\% \quad (1.1)$$

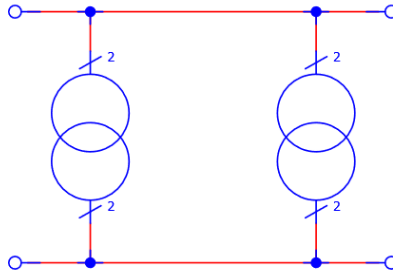
όπου:



$V_{sc}$  : είναι η τάση που απαιτείται για τη ροή του ονομαστικού ρεύματος στο βραχυκυκλωμένο δευτερεύον.

$V_n$  : είναι η ονομαστική τάση του μετασχηματιστή.

### 1.31 Παραλληλισμός Μ/Σ



Σχήμα 1.28 Σχεδιάγραμμα παράλληλης σύνδεσης Μ/Σ

(α) Για να παραλληλιστούν σωστά δύο Μ/Σ, είναι απαραίτητο να ισχύει:

$$U_{20} = 'U_{20} \quad (1.2)$$

δηλαδή οι δευτερεύουσες τάσεις να έχουν το ίδιο μέτρο και να βρίσκονται σε ίδια φάση. Αυτό επιτυγχάνεται όταν οι μετασχηματιστές έχουν ίδιο λόγο μετασχηματισμού, δηλαδή:

$$\frac{U_{1I}}{U_{2I}} = \frac{U_{1II}}{U_{2II}} = K \quad (1.3)$$

όπου:

$\frac{U_{1I}}{U_{2I}}$  : είναι ο λόγος τάσης του πρωτεύοντος προς το δευτερεύον του πρώτου μετασχηματιστή,

$\frac{U_{1II}}{U_{2II}}$  : είναι ο λόγος τάσης του πρωτεύοντος προς το δευτερεύον του δεύτερου μετασχηματιστή,

$K$  : ορίζεται ως ο κοινός λόγος μετασχηματισμού.

Επιπλέον, για τριφασικούς μετασχηματιστές, είναι κρίσιμο τα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος να ανήκουν στην ίδια ομάδα, δηλαδή να έχουν τον ίδιο λόγο τυλίγματος.

(β) Σε περιπτώσεις όπου οι δύο Μ/Σ διαφέρουν σε μέγεθος και κατά συνέπεια παρέχουν διαφορετική ισχύ, υπάρχει ζήτημα σωστής κατανομής της ισχύος ώστε να μην επιβαρύνεται υπερβολικά κανένας από αυτούς. Αν θεωρήσουμε ότι πληρείται η προϋπόθεση του τύπου 1.2, τότε:

$$I_1 \times Z_1 = I_2 \times Z_2 \quad (1.4)$$

η οποία διασφαλίζει την ομαλή κατανομή φορτίου μεταξύ των μετασχηματιστών.

Η ιδανική παράλληλη λειτουργία επιτυγχάνεται όταν οι τάσεις βραχυκύκλωσης των δύο Μ/Σ είναι ίδιες, δηλαδή  $U_{KI} = U_{KII}$ . Δεδομένου ότι στην πράξη είναι δύσκολο να επιτευχθεί απόλυτη ισότητα, συνίσταται να γίνεται παραλληλισμός μόνο όταν ο λόγος των ισχύων τους δεν υπερβαίνει το 1/3 και όταν υπάρχει διαφορά τάσης βραχυκύκλωσης περίπου 10%.

### Παρατηρήσεις:

- Ο Μ/Σ με την υψηλότερη τάση βραχυκύκλωσης παραλαμβάνει μικρότερο φορτίο, ενώ ο αντίστροφος. Συνεπώς, είναι προτιμότερο ο μετασχηματιστής με μικρότερη ισχύ να διαθέτει μεγαλύτερη τάση βραχυκύκλωσης.
- Το όριο του φορτίου καθορίζεται από τον Μ/Σ με τη χαμηλότερη τάση βραχυκύκλωσης.

Όταν δύο Μ/Σ θεωρούνται παράλληλοι, σημαίνει ότι και το πρωτεύον τους και το δευτερεύον τους λειτουργούν στην ίδια τάση. Αυτή η κατάσταση εμφανίζεται είτε όταν δύο ή περισσότεροι μετασχηματιστές τοποθετούνται κοντά μεταξύ τους και συνδέονται μέσω ζυγών, είτε όταν βρίσκονται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες αλλά συνδέονται μέσω ενός δικτύου.

### 1.32 Υπολογισμός βασικών μεθόδων μετασχηματιστών 150kV και 20kV

Ο υπολογισμός της ισχύος για την τροφοδότηση μιας πόλης αποτελεί μία πολύπλοκη διαδικασία. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη για την τροφοδοσία μιας πόλης με ζήτηση 30 MW μέσω ενός νέου υποσταθμού. Ο υποσταθμός θα διαθέτει δύο μετασχηματιστές, καθένας με ονομαστική ισχύ 40/50 MVA, ενώ ο διακόπτης σύνδεσης του 20 kV ζυγού θα διατηρείται ανοικτός. Αν ο διακόπτης διασύνδεσης ήταν κλειστός, οι δύο μετασχηματιστές θα παραλληλιζόνταν, οδηγώντας σε ισχύ βραχυκύκλωσης στον 20 kV ζυγό που θα ξεπερνούσε το όριο των 250 MVA.

Παρόλο που η μέγιστη ζήτηση της πόλης ανέρχεται σε 30 MW και η ονομαστική ισχύς κάθε μετασχηματιστή είναι 40/50 MVA, για λόγους εφεδρείας, αδιάλειπτης τροφοδοσίας (π.χ. κατά τη διάρκεια συντήρησης) και μελλοντικής αύξησης των φορτίων, ο υποσταθμός θα έχει δύο μετασχηματιστές. Κάθε 20 kV ζυγός θα τροφοδοτείται από τρεις εναέριες γραμμές 20 kV, κάθε μία με φορτίο 5 MW.

Υποθέτοντας ότι οι μετασχηματιστές λειτουργούν ως ξεχωριστές μονάδες (μη παραλληλισμένοι) και κάθε ένας τροφοδοτείται από τρεις γραμμές των 5 MW, η συνολική ισχύς σε κάθε μετασχηματιστή είναι 15 MVA με επαγωγικό  $\cos\varphi = 0,85$ .

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο μετασχηματιστών καθορίζονται ως εξής:

- **Μ/Σ1:**  $P_1 = 40/50$  MVA,  $U_{K1} = 7\%$
- **Μ/Σ2:**  $P_2 = 40/50$  MVA,  $U_{K2} = 7\%$

Ο λόγος μετασχηματισμού ορίζεται ως  $K = 150$  kV / 20 kV, με σύνδεση τύπου DYn, ενώ ο ουδέτερος κόμβος γειώνεται μέσω αντιστάσεων.

Για τον υπολογισμό του ρεύματος στην πλευρά των 20kV του κάθε Μ/Σ :

$$P = \sqrt{3} \times U_{\pi} \times I_{\pi} \times \cos\varphi$$

$$I_{20kV} = \frac{(15 \times 10^6)}{\sqrt{3} \times 20 \times 10^3 \times 0.85}$$

$$I_{20kV} = 0.51KA \quad (1.5)$$

Οπότε η ένταση στην μεριά των 20kV ανέρχεται στα 510A

Οι εντάσεις στην πλευρά των 150kV ανέρχονται στον τύπο 1.6

$$I_{150kV} = I_{20kV} \times \frac{20kV}{150kV} = 68A \quad (1.6)$$

Για την προστασία των ζυγών 20kV ο μετασχηματιστής συνδέεται μέσω ελαιοδιακόπτη με τις ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου του όπως περιγράφηκαν προηγουμένως. Ο Μ/Σ συνδέεται με τους ζυγούς 150kV μέσω διακόπτη ισχύος 150kV με τις ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου του όπως περιγράφηκαν προηγουμένως.

### 1.33 Γραμμές μέσης τάσης

Οι γραμμές μέσης τάσης (Μ.Τ.) διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες:

- **Εναέριες Γραμμές Μ.Τ.:**  
Χρησιμοποιούνται κυρίως για την τροφοδότηση εναέριων υποσταθμών διανομής, που εξυπηρετούν περιαστικές και αγροτικές περιοχές. Σε αυτές, οι ελαιοδιακόπτες αναχώρησης είναι εξοπλισμένοι με αυτόματες επαναφορές εντός του συστήματος.
- **Υπόγειες Γραμμές Μ.Τ.:**  
Αποτελούν το δίκτυο τροφοδοσίας για υποσταθμούς διανομής εντός του αστικού περιβάλλοντος, όπου οι ελαιοδιακόπτες αναχώρησης έχουν τις αυτόματες επαναφορές εξωτερικά.

Οι γραμμές μέσης τάσης διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην πρωτεύουσα διανομή. Ξεκινούν από τους ζυγούς μέσης τάσης στους υποσταθμούς μεταφοράς και καταλήγουν στους μετασχηματιστές που βρίσκονται στους σταθμούς διανομής χαμηλής τάσης, μεταφέροντας την πρώτη δόση ισχύος από το δίκτυο μεταφοράς στους τοπικούς υποσταθμούς.

Η μετάβαση από τη μέση στην χαμηλή τάση είναι αναγκαία, καθώς οι γραμμές χαμηλής τάσης έχουν περιορισμένη εμβέλεια (συνήθως μέχρι 800–1000 μέτρα). Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, η πτώση της τάσης γίνεται ανεκτή, γι' αυτό μετατρέπουμε τη μέση τάση σε χαμηλή χρησιμοποιώντας πολλούς μετασχηματιστές μικρότερης ισχύος, αντί για λίγους μεγάλης ισχύος, οι οποίοι δεν θα μπορούσαν να καλύψουν επαρκώς τις ανάγκες διανομής σε ευρύτερες περιοχές.

## Κεφάλαιο 2ο: Σχεδίαση κυκλώματος προστασίας

Ένα σύστημα προστασίας πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να εντοπίζει συγκεκριμένες ανωμαλίες που μπορεί να προκύψουν σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εάν αποτύχει να αναγνωρίσει και να αντιμετωπίσει έγκαιρα ένα σφάλμα, μπορεί να προκληθούν σοβαρές επιπτώσεις τόσο στον εξοπλισμό όσο και στην ασφάλεια των ανθρώπων, καθώς τμήματα του συστήματος που έχουν υποστεί βλάβη ενδέχεται να παραμείνουν εκτεθειμένα.

Επιπρόσθετα, η ζημιά σε κρίσιμο και δαπανηρό εξοπλισμό μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένες διακοπές λειτουργίας, προκαλώντας προβλήματα στην τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, ένα σύστημα προστασίας πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλα τα πιθανά σφάλματα που μπορεί να εμφανιστούν σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου, διασφαλίζοντας έτσι την έγκαιρη ανίχνευση, την αποτελεσματική απομόνωση της βλάβης και την ταχεία αποκατάσταση της κανονικής λειτουργίας.

Συνεπώς, για να είναι αξιόπιστο ένα σύστημα προστασίας, θα πρέπει να πληροί συγκεκριμένα κριτήρια και προδιαγραφές.

- Αξιοπιστία

Η αξιοπιστία ενός συστήματος προστασίας είναι το πιο κρίσιμο χαρακτηριστικό του, καθώς τη στιγμή που θα προκύψει ένα σφάλμα, το σύστημα πρέπει να αντιδράσει με απόλυτη ακρίβεια και αμεσότητα.

Δύο βασικές πτυχές της αξιοπιστίας ενός συστήματος προστασίας είναι η εξαρτησιμότητα (dependability) και η ασφάλεια (security). Η εξαρτησιμότητα διασφαλίζει ότι το σύστημα θα

ενεργοποιηθεί όταν προκύψουν συνθήκες που το απαιτούν, ενώ η ασφάλεια εγγυάται ότι το σύστημα δεν θα ενεργοποιηθεί αδικαιολόγητα όταν οι συνθήκες λειτουργίας είναι κανονικές.

- Επιλεκτικότητα

Όπως προαναφέρθηκε, ένα σύστημα προστασίας πρέπει να ανταποκρίνεται άμεσα και να επεμβαίνει σε σφάλματα που εμφανίζονται εντός της καθορισμένης ζώνης προστασίας, απομονώνοντάς τα από το υπόλοιπο υγιές δίκτυο. Η επιλεκτικότητα ενός συστήματος προστασίας μπορεί να διακριθεί σε δύο κατηγορίες: απόλυτη και εξαρτώμενη επιλεκτικότητα.

Η απόλυτη επιλεκτικότητα αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να αναγνωρίζει σφάλματα τόσο εντός όσο και εκτός της ζώνης προστασίας, αλλά να επεμβαίνει μόνο σε εκείνα που βρίσκονται εντός αυτής. Αυτού του τύπου η προστασία εφαρμόζεται κυρίως σε γεννήτριες και μετασχηματιστές.

Αντίθετα, η εξαρτώμενη επιλεκτικότητα σημαίνει ότι το σύστημα προστασίας λειτουργεί σε συνεργασία με άλλες προστατευτικές διατάξεις, μέσω κατάλληλων κλιμακωτών ρυθμίσεων, έτσι ώστε να συντονίζεται η αντίδρασή του με άλλα συστήματα που εντοπίζουν το ίδιο σφάλμα.

- Ταχύτητα

Για να προστατευθεί ο πολύτιμος εξοπλισμός που αποτελεί μέρος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, το σύστημα προστασίας πρέπει να αντιδρά άμεσα σε περίπτωση σφάλματος, διασφαλίζοντας ότι ο κατάλληλος διακόπτης ισχύος θα ενεργοποιηθεί εγκαίρως για την απομόνωση του προβλήματος.

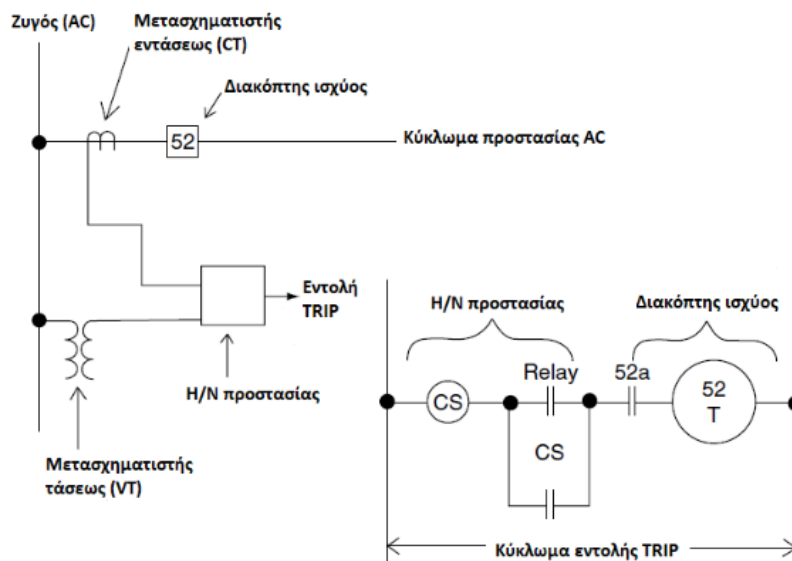
- Ικανότητα Ανίχνευσης (ευαισθησία)

Ο όρος αυτός περιγράφει την ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να ανιχνεύει μια διαταραχή που προκαλεί απόκλιση από τις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, ενεργοποιώντας έτσι τον αντίστοιχο μηχανισμό προστασίας. Συνήθως, οι ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας σχετίζονται με

τη χαμηλότερη τιμή του ρεύματος σφάλματος, πάνω από την οποία το σύστημα προστασίας τίθεται σε λειτουργία.

## 2.1 Τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος προστασίας

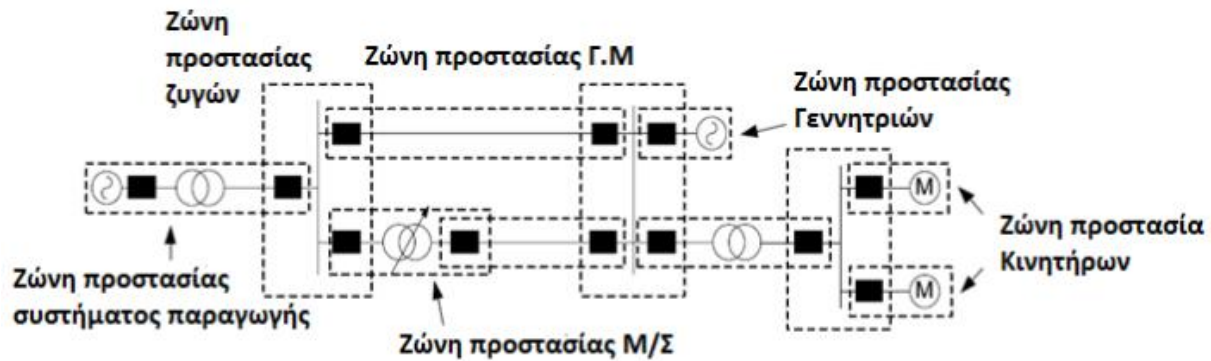
- Μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης (CTs, VTs):** Στη βιβλιογραφία συναντώνται επίσης ως μετασχηματιστές οργάνων. Ο ρόλος τους είναι να μειώνουν την ένταση ή την τάση του ηλεκτρικού συστήματος σε επίπεδα κατάλληλα για τη σύνδεση οργάνων μέτρησης και ηλεκτρονόμων προστασίας. Οι τυπικές ονομαστικές τιμές για τους μετασχηματιστές ρεύματος είναι συνήθως 1A ή 5A, ανάλογα με την εφαρμογή, ενώ για τους μετασχηματιστές τάσης κυμαίνονται στα 100V ή 110V.
- Ηλεκτρονόμοι προστασίας (protective relays):** Πρόκειται για προηγμένες ηλεκτρονικές διατάξεις που λαμβάνουν ως είσοδο μετρήσεις από το δευτερεύον των μετασχηματιστών έντασης ή τάσης, προκειμένου να ανιχνεύσουν συνθήκες σφάλματος. Όταν εντοπιστεί κάποιο σφάλμα, οι ηλεκτρονόμοι προστασίας ενεργοποιούν την εντολή TRIP προς τον αντίστοιχο διακόπτη ισχύος, διασφαλίζοντας έτσι την προστασία του ηλεκτρικού εξοπλισμού.
- Διακόπτες ισχύος (Circuit breakers):** Οι διακόπτες ισχύος ενεργοποιούνται αυτόματα από τα ρελέ προστασίας όταν ανιχνευτεί μια βλάβη (π.χ. βραχυκύκλωμα, υπερφόρτωση). Ο κύριος ρόλος τους είναι να απομονώνουν αμέσως το τμήμα του δικτύου όπου προέκυψε η βλάβη, αποτρέποντας την εξάπλωσή της και προστατεύοντας τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος. Μόλις η βλάβη εξαλειφθεί, οι διακόπτες ισχύος μπορούν να επαναρρυθμιστούν (αυτόματα ή χειροκίνητα), επιστρέφοντας το σύστημα σε κανονική λειτουργία. Επιπλέον, διαθέτουν χειροκίνητη λειτουργία, η οποία χρησιμοποιείται κατά τη συντήρηση του δικτύου ή σε έκτακτες καταστάσεις που απαιτείται πλήρης έλεγχος.
- Διάυλοι επικοινωνίας (Communication channels):** Είναι τα μέσα μεταφοράς δεδομένων που επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ στοιχείων του συστήματος. Μέσω αυτών, μεταδίδονται σε πραγματικό χρόνο δεδομένα όπως μετρήσεις (ρεύμα, τάση) και σήματα διαταραχών (π.χ., βραχυκυκλώματα) προς κεντρικούς υποσταθμούς ή συστήματα ελέγχου (SCADA).



Σχήμα 2.1 Τυπικό μονογαμικό διάγραμμα H/N προστασίας [23]

## 2.2 Σύστημα Προστασίας Ηλεκτρικών Δικτύων

Το σύστημα προστασίας έχει ως κύριο ρόλο να απομονώνει αυτόματα διαταραχές (π.χ., βραχυκυκλώματα) από το υπόλοιπο δίκτυο, διασφαλίζοντας τη συνέχεια λειτουργίας του υγιούς συστήματος και προλαμβάνοντας ζημιές εξοπλισμού από υπερβολικά ρεύματα. Για να επιτευχθεί αυτό, το δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες προστασίας, όπου κάθε ζώνη καλύπτει συγκεκριμένα στοιχεία (π.χ., γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς).



Σχήμα 2.2 Ζώνες προστασίας [23]

## 2.3 Κατηγορίες Ηλεκτρονόμων

- **Ηλεκτρονόμοι Προστασίας :** Τα προστατευτικά ρελέ και οι ασφάλειες ενεργοποιούνται όταν εντοπίζεται βλάβη (π.χ., βραχυκύκλωμα, υπερφόρτωση) σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου. Ο ρόλος τους είναι να απομονώνουν το προβληματικό τμήμα, προστατεύοντας τον υπόλοιπο εξοπλισμό και διατηρώντας τη σταθερότητα του συστήματος.
- **Ρυθμιστικοί Ηλεκτρονόμοι :** Οι ηλεκτρονικοί ελεγκτές ρύθμισης συνδέονται άμεσα με μετασχηματιστές που περιλαμβάνουν μηχανισμούς προσαρμογής τάσης (tap changers), καθώς και με ρυθμιστικές συσκευές τάσης στο πλαίσιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. σε γεννήτριες). Σε αντίθεση με τους προστατευτικούς ηλεκτρονόμους, οι ρυθμιστικοί ελεγκτές λειτουργούν αποκλειστικά υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος και δεν ενεργοποιούνται σε περίπτωση βλαβών ή διαταραχών.
- **Ηλεκτρονόμοι Ελέγχου και Συγχρονισμού :** Αυτός ο τύπος ηλεκτρονόμων βρίσκει κυρίως εφαρμογή σε δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Κύριος σκοπός τους είναι η απομόνωση τμημάτων του συστήματος, είτε λόγω αστοχίας είτε για συντήρηση. Παράλληλα, αποτελούν κρίσιμο εργαλείο κατά τη διαδικασία συγχρονισμού των γεννητριών με το ηλεκτρικό δίκτυο, διασφαλίζοντας σταθερή λειτουργία. Σε αντίθεση με άλλες εφαρμογές, η χρήση τους εστιάζει στην αποκατάσταση της συνέχειας της παροχής ή στην ασφαλή ενσωμάτωση νέων πηγών ενέργειας.
- **Ηλεκτρονόμοι Επίβλεψης :** Αυτοί οι ηλεκτρονόμοι σχεδιάζονται για να επαληθεύουν και να εγγυώνται τις λειτουργικές παραμέτρους ενός συστήματος, μέσω συνεχούς παρακολούθησης και καταγραφής της αποτελεσματικότητας των μηχανισμών προστασίας του. Βασικά παραδείγματα περιλαμβάνουν συσκευές ανίχνευσης αστοχιών (π.χ. fault detectors), μονάδες ελέγχου τάσης (voltage monitors) και άλλους μηχανισμούς που διασφαλίζουν τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του συστήματος. Η λειτουργία τους εστιάζει στην πρόληψη κρίσεων, χωρίς να απαιτούν άμεση ανταπόκριση σε έκτακτες καταστάσεις.
- **Βοηθητικοί Ηλεκτρονόμοι :** Αυτοί οι ηλεκτρονικοί μηχανισμοί έχουν ευρεία χρήση στα ηλεκτρικά δίκτυα λόγω των σημαντικών λειτουργικών πλεονεκτημάτων τους. Οι βοηθητικοί ηλεκτρονόμοι παρέχουν απομόνωση μεταξύ κυκλωμάτων, καθώς και την δυνατότητα πολλαπλών σημάτων εξόδου. Αυτές οι επαφές χρησιμοποιούνται συχνά για τον έλεγχο συναφών συστημάτων, όπως η ενεργοποίηση συναγερμικών ειδοποιήσεων (alarm), η εκτέλεση διακοπών λειτουργίας (trip) ή η σύνδεση με συστήματα καταγραφής δεδομένων. Παράλληλα,

την ηλεκτρική και την μαγνητική απομόνωση που εξασφαλίζουν στα δευτερεύοντα κυκλώματα ελαχιστοποιεί τους κινδύνους παρεμβολών και υπερτάσεων. Αυτές οι ιδιότητες τους καθιστούν απαραίτητο στοιχείο σε οποιοδήποτε σύστημα προστασίας, διατηρώντας την αξιοπιστία και την ασφάλεια ολόκληρης της εγκατάστασης.

## Κεφάλαιο 3ο: Μετασχηματιστές Οργάνων

### 3.1 Εισαγωγή

Οι μετασχηματιστές οργάνων (Instrument Transformers) αποτελούν βασικό στοιχείο λειτουργίας και ασφάλειας κάθε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.). Σκοπός τους είναι να προσαρμόζουν τα ηλεκτρικά μεγέθη εισόδου (τάση, ρεύμα) σε επίπεδα συμβατά με τα όργανα μέτρησης και προστασίας, τα οποία απαρτίζουν το επιβλεπτικό σύστημα ενός Σ.Η.Ε. Χωρίς αυτούς, η ακριβής παρακολούθηση της λειτουργίας του δικτύου ή η προστασία του από υπερφορτώσεις, βραχυκυκλώματα και άλλες ανωμαλίες θα ήταν αδύνατη.

Η σημασία τους εντονώνεται στον κρίσιμο ρόλο που διαδραματίζουν στην αποφυγή καταστροφικών συνεπειών. Μέσω της μετατροπής υψηλών τάσεων και ρευμάτων σε χαμηλότερες, ασφαλείς τιμές, επιτρέπουν τη σύνδεση βολτομέτρων, αμπερομέτρων, ρελέ προστασίας και άλλων συσκευών. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει ότι το Σ.Η.Ε. λειτουργεί εντός ορίων ασφαλείας, αποτρέποντας ζημιές σε δαπανηρό εξοπλισμό (π.χ. μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς) και κυρίως την απώλεια τροφοδοσίας σε μεγάλες κλίμακες, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε οικονομικές και λειτουργικές καταστροφές.

Επιπλέον, οι μετασχηματιστές οργάνων παρέχουν ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των υψηλής τάσης πρωτευόντων κυκλωμάτων και των ευαίσθητων δευτερευόντων συστημάτων ελέγχου. Αυτή η ιδιότητα δεν προστατεύει μόνο τους χειριστές και τον εξοπλισμό, αλλά και διατηρεί την ακεραιότητα των μετρήσεων, αποφεύγοντας ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Στην ουσία, λειτουργούν ως αισθητήρες που μεταφράζουν τα δυναμικά φαινόμενα του δικτύου σε πληροφορίες κατανοητές για τα συστήματα ελέγχου.

Συνοπτικά, η παρουσία τους είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη σταθερότητα και την αξιοπιστία ενός Σ.Η.Ε., καθώς ενσωματώνουν τόσο την προληπτική παρακολούθηση όσο και την άμεση αντιμετώπιση κινδύνων. Σε έναν κόσμο όπου η ενεργειακή υποδομή γίνεται ολοένα πιο πολύπλοκη, οι μετασχηματιστές οργάνων παραμένουν θεμελιώδες εργαλείο για την προστασία της τεχνολογίας και της κοινωνίας από τις επιπτώσεις των ηλεκτρικών αστοχιών.



Σχήμα 3.1 Μ/Σ εντάσεως και λοιπά συστήματα



### 3.2 Διάκριση Μετασχηματιστών

Ο μετασχηματιστής είναι μια στατική συσκευή που αποτελείται από δύο ή περισσότερα τυλίγματα, τα οποία συνδέονται μαγνητικά μέσω ενός πυρήνα. Χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας για τη μεταφορά της ενέργειας από ένα σύστημα σε ένα άλλο με την ίδια συχνότητα, αλλάζοντας το επίπεδο της τάσης. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν διάφορα στοιχεία, όπως γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς και διανομής, καθώς και φορτία, τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Ο μετασχηματιστής ισχύος διασφαλίζει τη μετατροπή της τάσης, επιτρέποντας τη σύνδεση και τη λειτουργία αυτών των στοιχείων.[3]

Η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής. Η ενέργεια που μεταδίδεται από το πρωτεύον τύλιγμα επάγεται μαγνητικά στο δευτερεύον τύλιγμα, γεγονός που σημαίνει ότι τα δύο τυλίγματα συνδέονται μαγνητικά και όχι ηλεκτρικά.[4] Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν διάφοροι τύποι μετασχηματιστών, όπως οι μετασχηματιστές ισχύος (για ανύψωση ή υποβιβασμό τάσης), οι αυτο-μετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές οργάνων, οι οποίοι τροφοδοτούν μετρητικά όργανα και συστήματα προστασίας. Η τελευταία κατηγορία είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ορθή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και θα μας απασχολήσει στο επόμενο κεφάλαιο.

### 3.3 Μετασχηματιστές Τάσεως

Οι μετασχηματιστές τάσης είναι βασικά στοιχεία στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, με κύριο ρόλο τη μέτρηση και τον έλεγχο της τάσης σε υψηλές τάσεις. Σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές ισχύος, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ενέργειας, οι μετασχηματιστές τάσης σχεδιάζονται για να παρέχουν μια ακριβή αναπαράσταση της τάσης σε επίπεδα που είναι ασφαλή και κατάλληλα για τη σύνδεση με όργανα μέτρησης, συστήματα προστασίας και συσκευές ελέγχου. Αυτοί οι μετασχηματιστές είναι απαραίτητοι για την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επιτρέπουν την παρακολούθηση της τάσης σε πραγματικό χρόνο χωρίς να απαιτείται άμεση σύνδεση με τις υψηλές τάσεις του δικτύου.

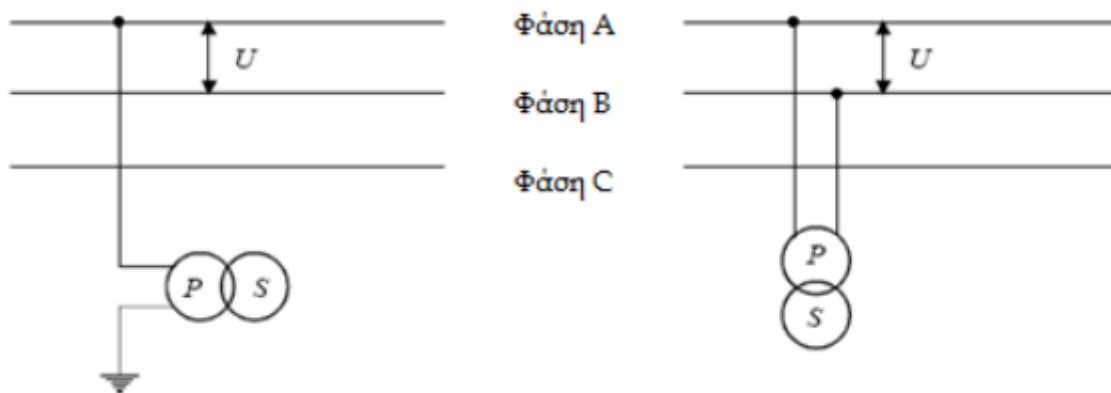
Η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή της μαγνητικής επαγωγής, όπου η τάση στο πρωτεύον τύλιγμα μετασχηματίζεται σε μια αναλογικά μειωμένη τάση στο δευτερεύον τύλιγμα, διατηρώντας την αναλογία μετασχηματισμού. Αυτή η δυνατότητα τους καθιστά απαραίτητους σε εφαρμογές όπως τα συστήματα προστασίας ρελέ, τα μετρητικά συστήματα και άλλες εφαρμογές όπου η ακρίβεια και η ασφάλεια είναι κρίσιμες. Σε αυτήν την εισαγωγή, θα εξετάσουμε τη λειτουργία, τους τύπους και τις εφαρμογές των μετασχηματιστών τάσης, καθώς και τη σημασία τους στη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της σταθερότητας των ηλεκτρικών δικτύων.



Σχήμα 3.2 Μ/Σ τάσεως

### 3.4 Μετασχηματιστές Τάσεως Επαγωγικού Τύπου

Οι μετασχηματιστές τάσεως επαγωγικού τύπου που χρησιμοποιούνται στη μέση τάση, αποτελούνται από: ένα πρωτεύον τύλιγμα, τον πυρήνα, και ένα ή περισσότερα δευτερεύοντα τυλίγματα. Η σύνδεση τους στο δίκτυο γίνεται σε παράλληλη σύνδεση μεταξύ δύο φάσεων ή μεταξύ φάσης και γης (Σχήμα 3.1). Στους μετασχηματιστές τάσεως η ονομαστική τάση στο δευτερεύον τους μπορεί να είναι 100 ή 110 kV, για σύνδεση μεταξύ δύο φάσεων. Για σύνδεση μεταξύ φάσης και γης, η τάση αυτή θα πρέπει να διαιρεθεί με το  $\sqrt{3}$ .



Σχήμα 3.3 Τρόποι σύνδεσης Μετασχηματιστών Τάσεως

Οι εφαρμογές που αφορούν τους Μετασχηματιστές Τάσεως η παράλληλη συνδεσμολογία τους δεν επηρεάζει εάν το φορτίο είναι ανοιχτό κυκλωμένο, ένας κανόνας που δεν πρέπει να παραβιαστεί είναι ότι στο δευτερεύον του μετασχηματιστή δεν πρέπει ποτέ να είναι βραχυκυκλωμένος. Οι Μετασχηματιστές Τάσεως γειώνονται από την μια πλευρά ο σκοπός της συγκεκριμένης γείωσης είναι για την αποφυγή ανάπτυξης επικίνδυνου δυναμικού στα άκρα του.

### 3.5 Ακρίβεια Μετασχηματιστών Τάσεως

Η ακρίβεια είναι μια κρίσιμη παράμετρος που αφορά τα μεγέθη στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας τους. Στους μετασχηματιστές τάσης, η ακρίβεια αναφέρεται στην ικανότητα τους να αναπαράγουν στο δευτερεύον τύλιγμα μια τάση που είναι ανάλογη της τάσης στο πρωτεύον τύλιγμα, για όλο το εύρος των αναμενόμενων τάσεων που μπορεί να εμφανιστούν στο σύστημα.

Σύμφωνα με το σύστημα της IEEE, οι μετασχηματιστές τάσης ταξινομούνται σε δύο κλάσεις ακρίβειας, ανάλογα με την εφαρμογή τους:

- Κλάσεις ακρίβειας για μετασχηματιστές προστασίας (Protection accuracy class)
- Κλάσεις ακρίβειας για μετασχηματιστές μέτρησης (Metering accuracy class)

Οι μετασχηματιστές τάσης που προορίζονται για εφαρμογές προστασίας απαιτείται να διατηρούν καλή ακρίβεια σε ένα εύρος τάσεων που κυμαίνεται από 80% έως 173% της ονομαστικής τάσης. Αυτό είναι απαραίτητο για να εξασφαλίσουν την αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων προστασίας σε συνθήκες υπερτάσεων ή βραχυκυκλωμάτων.

Από την άλλη πλευρά, οι μετασχηματιστές τάσης που προορίζονται για μέτρηση απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η ακριβής μέτρηση της τάσης είναι κρίσιμη, όπως σε συστήματα εμπορικής μέτρησης ενέργειας.

Η ακρίβεια των μετασχηματιστών τάσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον έλεγχο της ροής σκέδασης και από την αντίσταση των τυλιγμάτων. Αυτές οι παράμετροι καθορίζουν την μεταβολή του σφάλματος τάσης και της γωνίας φάσης, ανάλογα με το φορτίο (burden) που συνδέεται στο δευτερεύον τύλιγμα. Όταν το φορτίο είναι χαμηλό, ο παραμένον μαγνητισμός και οι απώλειες του πυρήνα επηρεάζουν το ρεύμα μαγνήτισης και, κατά συνέπεια, το συνολικό σφάλμα.

Συνεπώς, οι επαγωγικοί μετασχηματιστές τάσης που προορίζονται για εφαρμογές μέτρησης συνήθως λειτουργούν με μικρότερη πυκνότητα μαγνητικής ροής.

### 3.6 Χωρητικοί Μετασχηματιστές Τάσεως

Οι χωρητικού τύπου μετασχηματιστές εντάσεως χρησιμοποιούν σειρές από πυκνωτές όπου με κατάλληλη σύνδεση λειτουργούν σαν ένα διαιρέτη τάσης για το δίκτυο. Αυτοί οι μετασχηματιστές διακρίνονται για την ικανότητά τους να αντιμετωπίζουν τις ιδιαίτερες προκλήσεις όπως μεγάλες αποστάσεις, χαμηλή πυκνότητα φορτίου, και ασταθείς συνθήκες λειτουργίας.

#### 3.6.1 Χαρακτηριστικά και σχεδιασμός

- Αντοχή σε Διακυμάνσεις Τάσης :

Σύνδεση σε μικρο δίκτυα , λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταφοράς, συχνά εμφανίζονται απώλειες τάσης ή υπερτάσεις. Οι χωρητικοί μετασχηματιστές τάσης σχεδιάζονται να διαχειρίζονται αυτές τις διακυμάνσεις, διατηρώντας σταθερή τάση στο δευτερεύον τύλιγμα, είτε για μέτρηση είτε για προστασία του δικτύου.

- Ευελιξία σε Χαμηλά Φορτία :

Σε περιοχές, όπου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι ασταθής (π.χ. εποχικές αλλαγές, περιορισμένη χρήση μηχανημάτων). Οι μετασχηματιστές πρέπει να λειτουργούν αποτελεσματικά ακόμα και σε συνθήκες χαμηλού φορτίου, χωρίς να επηρεάζεται η ακρίβεια τους.

- Προστασία από Περιβαλλοντικές Συνθήκες :

Εκτίθενται σε σκληρές καιρικές συνθήκες (υγρασία, θερμοκρασιακές ακραίες τιμές, σκόνη). Για αυτό, οι πυρήνες και τα τυλίγματα κατασκευάζονται από ανθεκτικά υλικά, ενώ οι μονωτικές δομές (π.χ. ειδικά έλαια ή ρητίνη) ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο βλάβης.

#### 3.6.2 Κλάσεις Ακρίβειας

Σε εφαρμογές, οι μετασχηματιστές τάσης συχνά ανήκουν στις κλάσεις ακρίβειας 0.5 ή 1.0 (σύμφωνα με το IEC 61869-2), ανάλογα με τις ανάγκες:

- Για μέτρηση: Απαιτείται υψηλή ακρίβεια (π.χ. 0.5) για εμπορική καταμέτρηση ενέργειας.
- Για προστασία: Αρκεί μετρια ακρίβεια (π.χ. 1.0), αλλά με δυνατότητα λειτουργίας σε ευρύ φάσμα τάσεων (π.χ. 80%-120% της ονομαστικής)

### 3.6.3 Εφαρμογές

Αυτή η κατηγορία μετασχηματιστών τάσης χρησιμοποιείται ευρέως, ιδιαίτερα σε δίκτυα με τάσεις 72 kV και άνω. Η τάση στο δευτερεύον τυλίγμα του μετασχηματιστή τάσης παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη από το φορτίο, γεγονός που τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας.

Εκτός από τις κλασικές εφαρμογές σε συστήματα προστασίας και μέτρησης, οι μετασχηματιστές τάσης χωρητικού τύπου έχουν μια επιπλέον δυνατότητα: μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την έγχυση σημάτων υψηλής συχνότητας στις γραμμές υψηλής τάσης. Αυτή η λειτουργία διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ των υποσταθμών, προσφέροντας μια αξιόπιστη λύση για τη διαχείριση και τον έλεγχο του δικτύου.

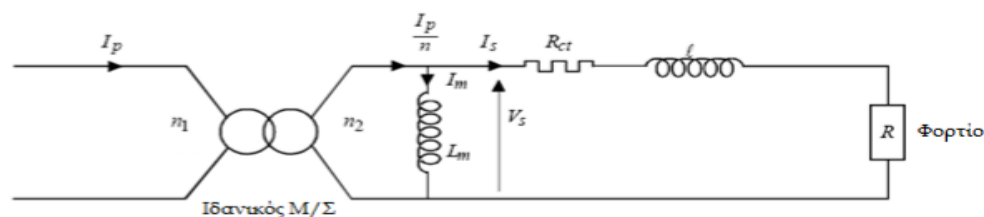
Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι στο εμπόριο, οι μετασχηματιστές τάσης χωρητικού τύπου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: υψηλής χωρητικότητας και χαμηλής χωρητικότητας. Ένα βασικό πλεονέκτημα των μετασχηματιστών υψηλής χωρητικότητας είναι η υψηλή ακρίβεια τους, ακόμα και υπό δύσκολες συνθήκες λειτουργίας, όπως διαταραχές στο δίκτυο, μεταβολές στη συχνότητα ή αλλαγές στη θερμοκρασία. Αυτή η ικανότητα τους καθιστά ιδανικούς για εφαρμογές όπου η σταθερότητα και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες.

### 3.6.4 Σύγχρονες μεθόδους

Σήμερα, οι χωρητικοί μετασχηματιστές τάσης τείνουν να είναι έξυπνοι (smart VTs), με ενσωματωμένους αισθητήρες για παρακολούθηση τάσης, θερμοκρασίας και φορτίου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει προληπτική συντήρηση και ενσωμάτωση σε συστήματα Smart Grid, βελτιώνοντας τη διαχείριση ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές.

## 3.7 Οι μετασχηματιστές έντασης (Current Transformers - CTs)

Οι μετασχηματιστές έντασης (Current Transformers - CTs) είναι κρίσιμα συστατικά στα ηλεκτρικά δίκτυα, με κύριο ρόλο τη μέτρηση ρευμάτων υψηλής έντασης και την παροχή ασφαλούς διασύνδεσης με συστήματα προστασίας, μέτρησης και ελέγχου.



Σχήμα 3.4 Ηλεκτρικό κύκλωμα Μ/Σ εντάσεως

Όπου :

$R_{ct}$  : αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος

$l$  : επαγωγική αντίδραση (leakage inductance) γενικότερα  $l \times \omega \ll R_{ct}$

$L_m$  : επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης η οποία είναι πολύ μεγάλη και που διαρρέεται από ρεύμα  $I_m$  όπου σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή είναι πολύ μικρό.

$R$  : αναπαριστά το φορτίο όπου για λόγους απλότητας θεωρείται καθαρά ωμικό τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.

Στον ιδανικό μετασχηματιστή, το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα είναι ακριβώς ανάλογο με το ρεύμα στο πρωτεύον. Εξαιτίας του γεγονότος ότι ο ιδανικός μετασχηματιστής δεν εμφανίζει απώλειες, η ροή διαρροής (όπως αναλύεται παρακάτω), το ρεύμα μαγνήτισης είναι αμελητέο. Κατά συνέπεια, η βασική σχέση που διέπει έναν ιδανικό μετασχηματιστή εντάσεως είναι:

$$I_p \times n_1 = I_s \times n_2 \quad (3.1)$$

Όπου :

$n_2$  : προκύπτει από τον λόγο μετασχηματισμού

$n_1$  : προκύπτει από τον λόγο μετασχηματισμού

$I_s$  : είναι μεταβαλλόμενο μεταεΐναι εξαρτώμενο από την τάση του πυρήνα

$I_p$  : είναι μεταβαλλόμενο είναι εξαρτώμενο από την τάση του πυρήνα

### 3.7.1 Εισαγωγή

Οι μετασχηματιστές έντασης είναι στατικές συσκευές που μετασχηματίζουν το πρωτεύον ρεύμα υψηλής έντασης (π.χ. χιλιάδες αμπερ) σε δευτερεύον ρεύμα χαμηλότερης έντασης (συνήθως 1 A ή 5 A), διατηρώντας μια αναλογική σχέση με το πρωτότυπο ρεύμα. Βασίζονται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και αποτελούνται από:

- Πρωτεύον τύλιγμα: Συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα όπου μετράται το ρεύμα.
- Δευτερεύον τύλιγμα: Συνδέεται με όργανα μέτρησης, ρελέ προστασίας ή άλλες συσκευές.
- Μαγνητικό πυρήνα: Εξασφαλίζει την αποτελεσματική μεταφορά της μαγνητικής ροής.

### 3.7.2 Τύποι Μετασχηματιστών Έντασης

- a. Μετασχηματιστές Μέτρησης (Metering CTs):
  - Σχεδιάζονται για ακριβή μέτρηση ρεύματος σε ονομαστικές συνθήκες (π.χ. 100-120% της ονομαστικής έντασης).
  - Χρησιμοποιούνται σε εμπορική μέτρηση ενέργειας (π.χ. λογιστική χρέωσης).
- b. Μετασχηματιστές Προστασίας (Protection CTs):
  - Αντέχουν σε υπερρεύματα (π.χ. 10-20 φορές το ονομαστικό ρεύμα) κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων.
  - Εξασφαλίζουν αξιόπιστη λειτουργία ρελέ προστασίας, ακόμα και σε μη γραμμικές συνθήκες.
- c. Κατασκευαστικοί Τύποι:
  - Window-Type CTs: Δεν έχουν ενσωματωμένο πρωτεύον τύλιγμα· η γραμμή περνάει από το κενό μέρος του πυρήνα.
  - Bar-Type CTs: Έχουν έναν αγωγίμο πυρήνα (ράβδο) ως πρωτεύον τύλιγμα.
  - Wound-Type CTs: Περιλαμβάνουν και τα δύο τυλίγματα (πρωτεύον και δευτερεύον).



Σχήμα 3.5 Μετασχηματιστές Εντάσεως

### 3.7.3 Κλάσεις Ακρίβειας

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα (π.χ. IEC 61869-2, IEEE C57.13), οι CTs ταξινομούνται σε κλάσεις ακρίβειας ανάλογα με την εφαρμογή:

- a. Για μετρήσεις
  - Κλάση 0.1, 0.2, 0.5: Για υψηλή ακρίβεια (π.χ. εμπορική μέτρηση).
  - Κλάση 1, 3: Για γενικές μετρήσεις.
- b. Για Προστασία
  - Κλάσεις 5P, 10P: Το "P" δηλώνει "Protection". Ο αριθμός (π.χ. 5) αντιστοιχεί στο μέγιστο σφάλμα (5%) υπό ονομαστικές συνθήκες.
  - Κλάσεις TPX, TPY, TPZ: Για προστασία σε συστήματα υψηλής τάσης (HV) με περίπλοκες διαταραχές.

### 3.7.4 Εφαρμογές

- a. Προστασία Δικτύων
  - Τροφοδοσία ρελέ προστασίας για ανίχνευση βραχυκυκλωμάτων, υπερφορτώσεων ή ασυμμετριών.
- b. Συστήματα Μετρήσεων Ενέργειας
  - Παροχή δεδομένων για λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας.
- c. Βιομηχανικούς Αυτοματισμούς
  - Παρακολούθηση ρευμάτων σε μηχανήματα ή γραμμές παραγωγής.

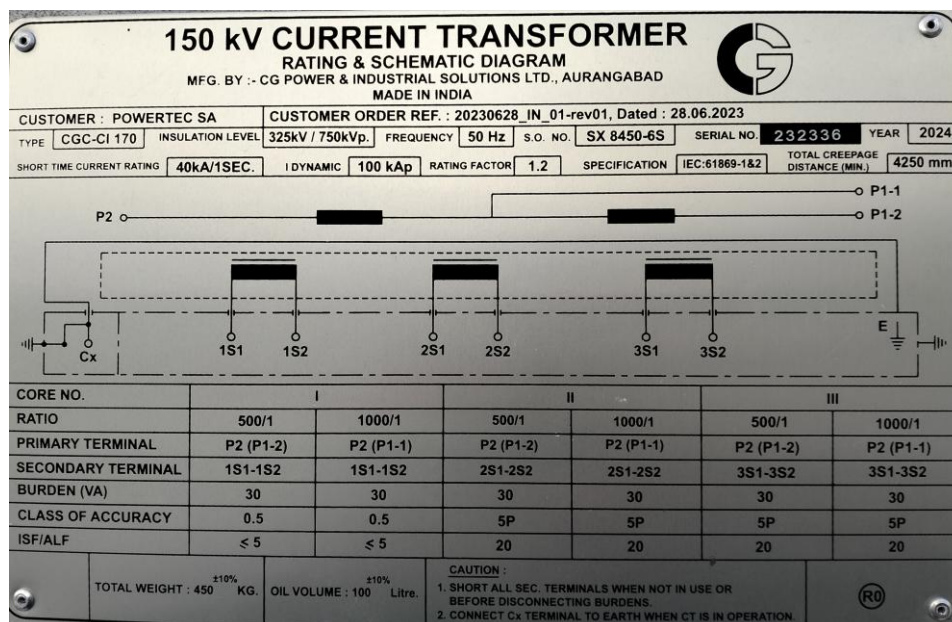
### 3.7.5 Σχεδιαστικές Απαιτήσεις

- a. Κορεσμός πυρήνα
  - Σε συνθήκες υπερρευμάτων, ο πυρήνας μπορεί να κορεστεί, οδηγώντας σε μη γραμμική συμπεριφορά. Οι CTs προστασίας σχεδιάζονται με πυρήνες υψηλής κορεσμούσης για να αποφεύγεται αυτό.
- b. Φορτίο
  - Η αντίσταση των συνδεδεμένων οργάνων (ρελέ, μετρητές) επηρεάζει την ακρίβεια. Το φορτίο πρέπει να είναι συμβατό με την ονομαστική ισχύ του CT.
- c. Θερμικές και Δυναμικές Αντοχές
  - Οι CTs πρέπει να αντέχουν θερμικές καταπονήσεις από υπερρεύματα και δυναμικές δυνάμεις λόγω βραχυκυκλωμάτων.

### 3.8 Προδιαγραφές Μετασχηματιστών Εντάσεως

Οι μετασχηματιστές έντασης (Current Transformers - CTs) πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές ανάλογα με τον σκοπό χρήσης τους, είτε ως μετασχηματιστές μέτρησης είτε ως μετασχηματιστές προστασίας. Σε αυτή την ενότητα, εξετάζονται οι βασικές προδιαγραφές των μετασχηματιστών έντασης σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEC και ANSI/IEEE. Η εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζει μια τυπική πινακίδα μετασχηματιστή έντασης με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα, στην οποία αναγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής.

Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν πληροφορίες όπως ο λόγος μετασχηματισμού, η κλάση ακρίβειας, το φορτίο (burden) και άλλες παράμετροι που καθορίζουν την απόδοση και την ασφάλεια του μετασχηματιστή σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη για τη σωστή επιλογή και εφαρμογή των μετασχηματιστών έντασης σε ηλεκτρικά συστήματα.



Σχήμα 3.6 Απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά ενός Μ/Σ εντάσεως

#### a. Βασικές πληροφορίες

- 150kV CURRENT TRANSFORMER : Είναι μετασχηματιστής έντασεως για δίκτυα 150kV υψηλής τάσης.
- MEG.BY: CG POWER & INDUSTRIAL SOLUTIONS LTD, AURANGABAD: Κατασκευαστής: Η εταιρεία CG Power & Industrial Solutions Ltd.

- CUSTOMER: :X Πελάτης: Η εταιρεία X που παρήγγειλε τον μετασχηματιστή.
- CUSTOMER ORDER REF.: Y, Dated: 28.06.2023: Αριθμός Παραγγελίας: Y, ημερομηνία παραγγελίας 28/06/2023.

**b. Τεχνικά Χαρακτηριστικά**

- TYPE: CGGC1 170: Τύπος Μετασχηματιστή: CGGC1 170
- INSULATION LEVEL: 325 kV / 750 kVp: Υποστηρίζει Μόνωση για την ονομαστική τάση 325kV και παλμικές έως 750kVp.
- FREQUENCY: 50 Hz: Συχνότητα λειτουργίας: 50 Hz (προσαρμοσμένο για ευρωπαϊκά δίκτυα).
- S.O. NO.: SX8450-6S: Αριθμός Παραγγελίας Παραγωγής (Shop Order Number).
- SERIAL NO.: 2522335: Σειριακός Αριθμός: 2522335 (μοναδικός κωδικός για το συγκεκριμένο CT).

**c. Ρυθμίσεις και Δυνατότητες**

- SHORT TIME CURRENT RATING: 40 kA / 1 sec: Μέγιστο ρεύμα βραχυπρόθεσμης αντίδρασης: 40 kA για 1 δευτερόλεπτο (αντοχή σε βραχυκύκλωμα).
- DYNAMIC: 100 kA: Δυναμική αντοχή: Αντέχει σε ρεύματα κρουστικής φύσης (π.χ. από βραχυκύκλωμα) έως 100 kA.
- RATING FACTOR: 1.2: Συντελεστής φόρτισης: Ο μετασχηματιστής μπορεί να λειτουργεί με 20% υπερφόρτωση συνεχώς.
- SPECIFICATION: IEC 61869-182: Πληρεί το διεθνές πρότυπο IEC 61869-182 για μετασχηματιστές μέτρησης και προστασίας.
- DISTANCE (MIN.): 4250 mm: Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης μεταξύ ακροδεκτών: 4.25 μέτρα (για ασφάλεια).

**d. Πίνακας Πυρήνων και Τυλιγμάτων**

Core No.	Ratio	Primary Terminal	Secondary Terminal	Burden (VA)	Class of Accuracy	ISF ALE
1	500/1	P2(1-2)	151-152	30	0.5	<5
1	1000/1	P2(1-1)	151-152	30	0.5	<5
2	500/1	P2(1-2)	251-252	30	5P	20
2	1000/1	P2(1-1)	251-252	30	5P	20
3	500/1	P2(1-2)	351-352	30	5P	20
3	1000/1	P2(1-1)	351-352	30	5P	20

Πίνακας 3.1 Αναπαριστά το σχήμα 3.6

- CORE NO.: Αριθμός πυρήνα (1, 2, 3).
- RATIO: Λόγος μετασχηματισμού ρεύματος ( $500/1 = 500$  A πρωτεύον  $\rightarrow$  1 A δευτερεύον).
- PRIMARY TERMINAL: Ακροδέκτες πρωτεύοντος τυλίγματος (P1-1, P1-2).
- SECONDARY TERMINAL: Ακροδέκτες δευτερεύοντος τυλίγματος (151-152, 251-252, κλπ).
- BURDEN (VA): Μέγιστο φορτίο που μπορεί να συνδεθεί στο δευτερεύον (σε Volt-Ampere).
- CLASS OF ACCURACY: Κλάση ακρίβειας (0.5 υψηλή ακρίβεια για μέτρηση, 5P για προστασία).
- ISFALE: Αναφέρεται σε Instrument Security Factor (ISF) και Accuracy Limit Error (ALE). Για πυρήνα 1: ISF <5 (ασφάλεια σε υπερρεύματα). Για πυρήνες 2,3: ALE 20 (μέγιστο σφάλμα 20% σε συνθήκες κορεσμού).

**e. Λοιπά στοιχεία**



- TOTAL WEIGHT: 450 kg: Συνολικό βάρος μετασχηματιστή.
  - OIL VOLUME: 100 L: Ποσότητα λαδιού μόνωσης.
- f. Σημειώσεις Λειτουργίας**
- SHORT ALL SEC. TERMINALS WHEN NOT IN USE: Βραχυκυκλώστε τους ακροδέκτες δευτερεύοντος όταν δεν χρησιμοποιούνται (για αποφυγή επικίνδυνων τάσεων).
  - CONNECT Cx TERMINAL TO EARTH: Γειώστε τον ακροδέκτη Cx κατά τη λειτουργία (για ασφάλεια).

### 3.8.1 Ratio C.T.

Είναι ο λόγος μεταξύ ρεύματος στο πρωτεύον και ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα :

$$K_n = \frac{I_p}{I_s} \quad (3.2)$$

### 3.8.2 Ονομαστική Ισχύς $P_n$

Είναι η ισχύς σε VA η οποία παρέχεται από έναν μετασχηματιστή εντάσεως στο δευτερεύον του κάτω από συνθήκες ονομαστικού ρεύματος και ονομαστικού φορτίου.

### 3.8.3 Accuracy limit factor

Οι μετασχηματιστές έντασης (CTs) σχεδιάζονται με βάση τις εφαρμογές τους και τα φορτία που θα συνδεθούν στο δευτερεύον τύλιγμα. Αυτά τα κριτήρια καθορίζουν τα χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτει ο πυρήνας του μετασχηματιστή.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η διαστασιολόγηση ενός μετασχηματιστή έντασης γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει συγκεκριμένη ακρίβεια για ρεύματα σφάλματος που υπερβαίνουν ένα επιτρεπτό όριο (rated accuracy limit current), όταν στο δευτερεύον τύλιγμα είναι συνδεδεμένο το ονομαστικό φορτίο (rated burden). Το επιτρεπτό όριο του ρεύματος είναι συνήθως πολλαπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος, σύμφωνα με την εξίσωση που ακολουθεί.

$$I_{al} = ALF \times I_n \quad (3.3)$$

Ο παράγοντας ALF (Accuracy Limit Factor) αναφέρεται στους μετασχηματιστές προστασίας, ενώ για τους μετασχηματιστές μέτρησης ονομάζεται Safety Factor (SF). Αυτός ο παράγοντας εκφράζει το συνολικό σφάλμα (τόσο σε μέτρο όσο και σε γωνία) που εμφανίζει ο μετασχηματιστής έντασης. Ο κατασκευαστής εγγυάται ότι το σφάλμα αυτό θα παραμείνει κάτω από 5% ή 10%, ανάλογα με την κλάση ακρίβειας (5P ή 10P), όπου το 5% και 10% αντιστοιχούν σε έναν ονομαστικό συντελεστή υπερέντασης.

Με άλλα λόγια, το ALF είναι ένα πολλαπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος (χωρίς την παρουσία DC συνιστώσας) και σχετίζεται με την ικανότητα του μετασχηματιστή να διατηρεί την προκαθορισμένη ακρίβεια, δεδομένου ενός προκαθορισμένου φορτίου (με  $\cos \varphi = 0.8$  ή  $1.0$ ) που ορίζει ο κατασκευαστής. Όταν το ρεύμα υπερβεί αυτή την προκαθορισμένη τιμή, ο μετασχηματιστής φτάνει σε κόρο, με αποτέλεσμα το ρεύμα στο δευτερεύον να παρουσιάζει παραμόρφωση. Τυπικές τιμές για το ALF είναι 5, 10, 15, 20, 30.

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι το φορτίο που συνδέεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή επηρεάζει σημαντικά τον παράγοντα ALF. Επομένως, αν το φορτίο αλλάξει και γίνει διαφορετικό από αυτό που ορίζει ο κατασκευαστής, ο παράγοντας ALF θα μεταβληθεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$ALF' = ALF \times R_{ct} + R_B / R_{ct} + R_B \quad (3.4)$$

Όπου :  $R_{ct}$  η αντίσταση δευτερεύοντος τυλίγματος,  $R_B$  η αντίσταση φορτίου

Σήμερα, το φορτίο (Burden) που συνδέεται σε έναν μετασχηματιστή έντασης θεωρείται καθαρά ωμικό και έχει πολύ μικρότερη τιμή σε σύγκριση με το παρελθόν, όταν χρησιμοποιούνταν ηλεκτρομαγνητικοί ηλεκτρονόμοι. Αυτή η εξέλιξη έχει βελτιώσει την ακρίβεια και την απόδοση των μετασχηματιστών έντασης.

Επιπλέον, η εσωτερική ηλεκτρομαγνητική δύναμη (EMF, electromagnetic force), που αναπτύσσεται όταν ο μετασχηματιστής έντασης διαρρέεται από το ρεύμα  $I_a$ , αντιστοιχεί στην τάση κορεσμού του μετασχηματιστή ή, όπως θα δούμε παρακάτω, στην UKN. Αυτή η τάση περιγράφεται από την εξίσωση:

$$E_{al} = ALF \times I_s \times (R_{ct} + R_B) \quad (3.5)$$

Όσο μεγαλύτερος είναι ο παράγοντας ALF (Accuracy Limit Factor), τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα κορεσμού του μετασχηματιστή έντασης. Για παράδειγμα, οι μετασχηματιστές προστασίας πρέπει να έχουν ένα υψηλό σημείο κορεσμού, ώστε να επιτρέπουν στο σύστημα προστασίας να πραγματοποιεί ακριβείς μετρήσεις του ρεύματος σφάλματος. Για αυτόν τον λόγο, αυτή η κατηγορία μετασχηματιστών χαρακτηρίζεται από υψηλό παράγοντα ALF.

Αντίθετα, οι μετασχηματιστές μέτρησης απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια για ρεύματα που βρίσκονται κοντά στο ονομαστικό ρεύμα. Αυτό συμβαίνει επειδή τα όργανα μέτρησης στα οποία συνδέονται αυτοί οι μετασχηματιστές δεν χρειάζεται να αντέχουν σε τόσο υψηλά ρεύματα όπως τα ρελέ προστασίας. Για αυτόν τον λόγο, οι μετασχηματιστές μέτρησης έχουν έναν μικρότερο παράγοντα ασφαλείας (Safety Factor, SF), ώστε να εξασφαλίζουν ότι ο πυρήνας τους θα κορεστεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα ρεύματος.

### 3.8.4 Κλάση Ακρίβειας (Accuracy class)

Η κλάση ακρίβειας ενός μετασχηματιστή έντασης ορίζεται ως το συνολικό σφάλμα (τόσο στη γωνία όσο και στον λόγο των ρευμάτων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος) που παραμένει κάτω από συγκεκριμένα όρια, υπό ορισμένες συνθήκες ισχύος και ρεύματος. Ο τρόπος δήλωσης της κλάσης ακρίβειας διαφέρει ανάλογα με το πρότυπο που ακολουθεί ο κατασκευαστής.

Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE C57.13, οι κλάσεις ακρίβειας κατηγοριοποιούνται με βάση ένα γράμμα και την τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος. Αυτή η ταξινόμηση βοηθά στον καθορισμό της απόδοσης του μετασχηματιστή σε διάφορες εφαρμογές, όπως μέτρηση ή προστασία, και εξασφαλίζει ότι οι μετασχηματιστές πληρούν τις απαιτήσεις ακρίβειας και αξιοπιστίας που απαιτούνται από τα ηλεκτρικά δίκτυα.

- **Class C** : Με το γράμμα C χαρακτηρίζονται οι μετασχηματιστές έντασης που διαθέτουν πυρήνα με αμελητέα ροή σκέδασης. Αυτό σημαίνει ότι η ακρίβεια αυτών των μετασχηματιστών μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια. Αυτή η κατηγορία μετασχηματιστών συναντάται κυρίως σε μετασχηματιστές με ένα πρωτεύον τύλιγμα, ενώ το δευτερεύον τύλιγμα είναι κατανομημένο γύρω από τον πυρήνα. Παραδείγματα τέτοιων μετασχηματιστών είναι οι μετασχηματιστές τύπου παραθύρου ή μπάρας, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της απλότητας και της ακριβειάς τους.
- **Class K** : Αυτή η κατηγορία είναι παρόμοια με την κλάση C, με τη διαφορά ότι οι μετασχηματιστές έντασης που ανήκουν σε αυτήν διαθέτουν μια τάση γόνατος (Knee-point voltage). Η τάση γόνατος αντιστοιχεί περίπου στο 70% της τάσης που αναπτύσσεται στο δευτερεύον τύλιγμα. Αυτή η χαρακτηριστική τάση είναι σημαντική για την απόδοση και την ακρίβεια των μετασχηματιστών, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή γραμμικότητα και σταθερότητα.
- **Class T** : Με το γράμμα T χαρακτηρίζονται οι μετασχηματιστές ρεύματος στους οποίους η ροή σκέδασης (magnetic leakage flux) επηρεάζει σημαντικά το συνολικό σφάλμα μέτρησης. Το

σφάλμα αυτό προσδιορίζεται μέσω δοκιμών, οι οποίες πραγματοποιούνται από τους κατασκευαστές για να εξακριβώσουν την ακρίβεια των CTs. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών παρουσιάζονται σε καμπύλες διέγερσης, οι οποίες αποτελούν βασικό εργαλείο για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των μετασχηματιστών.

Σύμφωνα με το ANSI/IEEE C57.13, η κλάση ακρίβειας ενός μετασχηματιστή ρεύματος ορίζεται από ένα γράμμα και έναν αριθμό. Ο αριθμός αυτός αντιπροσωπεύει την μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στο δευτερεύον του CT όταν το ρεύμα στο δευτερεύον είναι 20 φορές το ονομαστικό ρεύμα, χωρίς να υπερβεί το όριο σφάλματος του 10%. Αυτό σημαίνει ότι το σφάλμα θα παραμείνει εντός του 10% για όλα τα ρεύματα από 1 έως 20 φορές το ονομαστικό ρεύμα του δευτερεύοντος, υπό την προϋπόθεση ότι το φορτίο (burden) είναι ονομαστικό.

Αυτή η προϋπόθεση εξασφαλίζει ότι ο μετασχηματιστής θα λειτουργεί με υψηλή ακρίβεια σε ένα ευρύ φάσμα ρευμάτων, κάτι που είναι απαραίτητο για εφαρμογές προστασίας και μέτρησης σε ηλεκτρικά δίκτυα. Η σχέση αυτή περιγράφεται και από την αντίστοιχη εξίσωση, η οποία καθορίζει τις συνθήκες λειτουργίας και τα όρια σφάλματος.

$$V_s = 20 \times I_s \times Z_B \quad (3.6)$$

Για τους μετασχηματιστές εντάσεως (CTs) που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές προστασίας, τα επίπεδα τάσης ορίζονται σε 100V, 200V, 400V και 800V, ανάλογα με την κατηγορία φορτίου που καθορίζεται από τα πρότυπα. Αυτά τα φορτία συμβολίζονται ως B-1, B-2, B-4 και B-8, αντίστοιχα. Για παράδειγμα, ένας μετασχηματιστής ρεύματος της κατηγορίας B-1 υπολογίζεται ως εξής:

$$20 \times 5A \times 1\Omega = 100V \quad (3.7)$$

Εδώ, το 20 αντιπροσωπεύει τον λόγο μετασχηματισμού (π.χ., 1000:5), το 5A είναι η δευτερεύουσα ένταση και το 1Ωμ είναι η αντίσταση του φορτίου.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι όλα αυτά τα φορτία έχουν συντελεστή ισχύος ( $\cos\phi$ ) 0,5, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα. Αυτή η τιμή του συντελεστή ισχύος αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας σε συστήματα προστασίας, όπου η επαγωγική φύση των φορτίων είναι κύρια χαρακτηριστική.

- **Πρότυπο C57.13 (Class C)**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι μετασχηματιστές ρεύματος (CTs) αυτής της κατηγορίας σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το συνολικό σφάλμα να μην υπερβαίνει το 10% σε μια ευρεία περιοχή λειτουργίας, η οποία καλύπτει από 1 έως 20 φορές το ονομαστικό ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα. Αυτή η ακρίβεια είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των συστημάτων προστασίας και μέτρησης.

Επιπλέον, η κλάση ακρίβειας αυτών των μετασχηματιστών συμβολίζεται με το γράμμα C, το οποίο ακολουθείται από έναν αριθμό. Αυτός ο αριθμός δηλώνει την τάση στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή όταν το ρεύμα στο δευτερεύον φτάνει τις 20 φορές το ονομαστικό του ρεύμα (για μετασχηματιστές με ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντος 5A). Παράλληλα, αυτή η τάση μετράται υπό συγκεκριμένα φορτία, τα οποία καθορίζονται από τον πίνακα που ακολουθεί.

Accuracy IEEE	Κατηγορία	R( $\Omega$ )	L(mH)	Z( $\Omega$ )	S(VA) για M/Σ 5A	Power Factor
C100,T100	B-1	0.5	2.300	1.0	25	0.5
C200,T200	B-2	1.00	4.600	2.0	50	0.5
C300,T300	B-3	2.00	9.200	4.0	100	0.5
C400,T400	B-4	4.00	18.400	8.0	200	0.5

Πίνακας 3.2 IEEE C57.13 Κλάσεις ακριβείας [14]

Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι σύμφωνα με το πρότυπο της ANSI/IEEE C57.13 τα ονομαστικά φορτία καθορίζονται με γωνία  $60^\circ$ . Για λόγους όμως ευκολίας στους υπολογισμούς, και με βάση τους σημερινούς ψηφιακούς ηλεκτρονόμους το φορτίο μπορεί να θεωρηθεί καθαρά ωμικό.

Accuracy Class	according to the nominal current	angle error ( $\delta$ ) in the rated current	Total error in accuracy limit current
5P(5PR)	$\pm 1\%$	$\pm 60min$	$\pm 5\%$
10P(10PR)	$\pm 3\%$	—	$\pm 10\%$
PX	It refers to a voltage transformer with low leakage flux which is defined by the knee-point voltage, the magnetizing current and the load (Burden)		

Πίνακας 3.3 IEC61869-2 κλάσεις μετασχηματιστών εντάσεως [15]

Η κατηγορία 5PR,10PR αναφέρεται σε μετασχηματιστές με πυρήνα χαμηλού παραμένουτος μαγνητισμού( παράγοντας μαγνήτισης  $Kr \leq 10\%$

- Class 5P : Σε διαφορεική προστασία αλλά και προστασία αποστάσεως λόγω της μεγαλύτερης ακριβείας.
- Class 10P : Τυπικά χρησιμοποιείται σε προστασία υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου σε δίκτυα διανομής.
- Class PR : Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 61869-2:2012, η PR κλάση (Protection with Remanence) εισήχθη ως μια νέα κατηγορία μετασχηματιστών ρεύματος (CTs), η οποία έχει σχεδιαστεί ειδικά για την αντιμετώπιση του προβλήματος της παραμένουσας μαγνήτισης. Αυτό το φαινόμενο, που συχνά προκαλείται από υψηλά ρεύματα βραχυκυκλώματος, μπορεί να οδηγήσει σε κορεσμό του πυρήνα των παραδοσιακών μετασχηματιστών P-κλάσης, μειώνοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία τους. Η PR κλάση αναπτύχθηκε με στόχο την ελαχιστοποίηση του κορεσμού και την βελτίωση της απόκρισης σε περιπτώσεις υπερφορτώσεων ή βραχυκυκλωμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ειδικών υλικών και σχεδιαστικών τεχνικών που περιορίζουν την παραμένουσα μαγνήτιση, διασφαλίζοντας ότι ο μετασχηματιστής παραμένει γραμμικός και ακριβής ακόμα και σε ακραίες συνθήκες.
- Class PX : χρησιμοποιείται κυρίως σε υψηλής εμπέδησης διαφορικής προστασία.

#### a. Μετασχηματιστές Μέτρησης

Στην περίπτωση των μετασχηματιστών μέτρησης, το δευτερεύον τύλιγμα συνδέεται με όργανα μέτρησης, όπως μετρητές ενεργού και άεργου ισχύος ή μετρητές ενέργειας. Αυτά τα όργανα λειτουργούν υπό κανονικές ονομαστικές συνθήκες, γι' αυτό και οι μετασχηματιστές αυτής της κατηγορίας πρέπει να διαθέτουν:

- υψηλή ακρίβεια: Για να εξασφαλίζουν ακριβείς μετρήσεις.

- Χαμηλή εμπέδηση (burden): Για να ελαχιστοποιούν τις απώλειες και να διατηρούν την απόδοση.
- Χαμηλή τάση κορεσμού (saturation voltage): Για να αποφεύγεται ο κορεσμός του πυρήνα, ιδιαίτερα σε υψηλά ρεύματα.

Το εύρος λειτουργίας αυτών των μετασχηματιστών κυμαίνεται συνήθως από 5% έως 120% του ονομαστικού ρεύματος, ανάλογα με την κλάση ακρίβειας που ορίζουν τα πρότυπα (π.χ., IEC, IEEE).

#### b. Μετασχηματιστές Προστασίας

Οι μετασχηματιστές προστασίας χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση συσκευών και οργάνων προστασίας, όπως ρελέ, τα οποία πρέπει να ανταποκρίνονται γρήγορα και με ασφάλεια σε περιπτώσεις διαταραχών (π.χ., βραχυκυκλώματα). Σε αυτή την περίπτωση, είναι κρίσιμο η διαταραχή που συμβαίνει στο πρωτεύον τύλιγμα να μεταφέρεται με ακρίβεια στο δευτερεύον, ώστε οι διατάξεις προστασίας να μπορούν να επενεργήσουν άμεσα και να απομονώσουν το σφάλμα.

Για να επιτευχθεί αυτό, οι μετασχηματιστές προστασίας πρέπει να διαθέτουν πυρήνα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Χαμηλή ακρίβεια: Δεν απαιτείται η ίδια ακρίβεια όπως στους μετασχηματιστές μέτρησης, καθώς ο στόχος είναι η γρήγορη ανίχνευση σφαλμάτων.
- Μεγάλη ικανότητα μετασχηματισμού ρευμάτων σφάλματος: Ο πυρήνας πρέπει να μπορεί να μεταφέρει υψηλά ρεύματα σφάλματος στο δευτερεύον χωρίς κορεσμό, ώστε τα ρελέ προστασίας να ενεργοποιηθούν εγκαίρως.

### 3.9 Μεταβατικά Φαινόμενα

Μία από τις πιο κρίσιμες πτυχές των μετασχηματιστών ρεύματος (CTs) που συνεργάζονται με συστήματα προστασίας είναι η συμπεριφορά και η απόκρισή τους σε μεταβατικά φαινόμενα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι απαραίτητο οι διατάξεις προστασίας να λαμβάνουν ακριβείς μετρήσεις από τους μετασχηματιστές, ακόμα και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, ώστε να μπορούν να αποφασίσουν την ταχύτερη απόκριση των συστημάτων προστασίας (π.χ., ηλεκτρονόμοι σε συνεργασία με διακόπτες ισχύος). Ο στόχος είναι η απομόνωση και η εκκαθάριση του σφάλματος πριν αυτό προκαλέσει σοβαρές ζημιές.

Η μη έγκαιρη εκκαθάριση ενός σφάλματος μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικές συνέπειες για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ζημιές σε εξοπλισμό, απώλεια τροφοδοσίας ή ακόμα και αστάθεια του δικτύου. Για αυτόν τον λόγο, οι μετασχηματιστές που εκτίθενται σε μεταβατικά φαινόμενα πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ιδιαίτερα όσον αφορά τον πυρήνα τους

#### 3.9.1 Συνηθισμένα Προβλήματα

Ένας τυπικός μετασχηματιστής ρεύματος μπορεί να φτάσει γρήγορα σε κορεσμό κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων, κυρίως λόγω:

- Υψηλών ρευμάτων σφάλματος: Τα ρεύματα βραχυκυκλώματος μπορεί να είναι πολλαπλάσια του ονομαστικού ρεύματος, προκαλώντας κορεσμό.
- Παραμένουσας μαγνήτισης: Μετά από ένα σφάλμα, ο πυρήνας μπορεί να διατηρήσει μαγνητική ροή, μειώνοντας την ικανότητα του μετασχηματιστή να ανταποκριθεί σε επόμενα σφάλματα.

Αυτά τα προβλήματα μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένες μετρήσεις ή καθυστερημένη ανταπόκριση, θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια και την αξιοπιστία του συστήματος.

### 3.9.2 Απαιτήσεις σε Μετασχηματιστές σε Μεταβατικά φαινόμενα

Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα, οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές προστασίας πρέπει να διαθέτουν:

- **Ειδικούς πυρήνες:** Χρησιμοποιούνται υλικά με χαμηλή παραμένουσα μαγνήτιση και υψηλή θερμική αντοχή, όπως ειδικά κράματα σιδήρου ή ναοκρυσταλλικά υλικά.
- **Υψηλή τάση κορεσμού:** Ο πυρήνας πρέπει να μπορεί να αντέχει υψηλά ρεύματα χωρίς κορεσμό, διασφαλίζοντας ακριβείς μετρήσεις ακόμα και σε ακραίες συνθήκες.
- **Γρήγορη απόκριση:** Οι μετασχηματιστές πρέπει να μπορούν να μεταφέρουν τα ρεύματα σφάλματος στο δευτερεύον τύλιγμα χωρίς καθυστερήσεις, ώστε τα ρελέ προστασίας να ενεργοποιηθούν άμεσα.

### 3.9.3 Παραμένοντος Μαγνητισμός στους Μετασχηματιστές

Η παραμένουσα μαγνητική ροή στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή ρεύματος (CT) μπορεί να εμφανιστεί είτε κατά τη διάρκεια δοκιμών είτε μετά την εκκαθάριση ενός σφάλματος κατά τη λειτουργία του. Σε κανονικές συνθήκες, η παραμένουσα μαγνητική ροή προκύπτει όταν το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα διαταράσσεται σε στιγμές που η πυκνότητα της μαγνητικής ροής (B) στον πυρήνα είναι πολύ υψηλή. Αυτή η κατάσταση μπορεί να συμβεί αμέσως μετά την εκκαθάριση ενός σφάλματος ή ακόμα και κατά τη διάρκεια ελέγχων και δοκιμών.

Όταν ένας μετασχηματιστής ρεύματος ενεργοποιείται για πρώτη φορά, η καμπύλη υστέρησης του πυρήνα είναι συμμετρική, και η μαγνητική ροή ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδρομή ( $\tau'$ ). Ωστόσο, σε περίπτωση σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος προκαλεί αύξηση της μαγνητικής ροής. Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, το ρεύμα στο πρωτεύον μηδενίζεται, αλλά η μαγνητική ροή στον πυρήνα δεν επιστρέφει στο μηδέν, αφήνοντας μια παραμένουσα μαγνητική ροή.

**Το μέγεθος αυτής της παραμένουσας ροής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:**

- Το μέγεθος του ρεύματος στο πρωτεύον κατά τη στιγμή του σφάλματος.
- Η εμπέδηση του φορτίου που συνδέεται στο δευτερεύον.
- Η σταθερά χρόνου του ισοδύναμου δικτύματος RL, η οποία σχετίζεται με την κατασκευή του πυρήνα (π.χ., αν ο πυρήνας έχει διάκενο αέρα).

**Η παραμένουσα μαγνητική ροή μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα, όπως:**

- Κορεσμό του πυρήνα: Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερημένη απόκριση των συστημάτων προστασίας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ηλεκτρονόμων υπερέντασης ακαριαίου χρόνου που συνεργάζονται με συστήματα Breaker Failure Protection.
- Εμφάνιση συνεχούς ρεύματος στο δευτερεύον: Μετά την επανενεργοποίηση του μετασχηματιστή, η μαγνητική ροή ακολουθεί μια νέα διαδρομή ( $\tau''$ ), η οποία μπορεί να προκαλέσει τη ροή ενός μικρού συνεχούς ρεύματος στο δευτερεύον. Το μέγεθος αυτού του ρεύματος εξαρτάται από το φορτίο στο δευτερεύον και την σταθερά χρόνου του συστήματος.

**Ο παράγοντας του παραμένοντος μαγνητισμού ( $K_r$ ) :**

Ο παράγοντας του παραμένοντος μαγνητισμού ( $K_r$ ) είναι μια κρίσιμη παράμετρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μέγεθος της παραμένουσας μαγνητικής ροής στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή ρεύματος (CT) μετά την εκκαθάριση ενός σφάλματος ή κατά τη διάρκεια δοκιμών. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61869-2, ο παράγοντας  $K_r$  δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$K_r = \frac{B_r}{B_{sat}} \quad (3.8)$$

Όπου :

$B_r$ : Η παραμένουσα μαγνητική ροή (remanent flux) στον πυρήνα μετά την εκκαθάριση του σφάλματος ή τη διακοπή του ρεύματος.

$B_{sat}$ : Η ροή κορεσμού (saturation flux) του πυρήνα, δηλαδή η μέγιστη μαγνητική ροή που μπορεί να υποστεί ο πυρήνας πριν φτάσει σε κορεσμό.

Ο παράγοντας  $K_r$  είναι μια βασική παράμετρος που καθορίζει την απόδοση και την αξιοπιστία των μετασχηματιστών ρεύματος σε εφαρμογές προστασίας. Η κατανόηση και ο έλεγχός του είναι απαραίτητος για την αποφυγή προβλημάτων όπως ο κορεσμός του πυρήνα και η καθυστερημένη απόκριση των συστημάτων προστασίας.

- Σε μετασχηματιστές **P-κλάσης**, ο  $K_r$  μπορεί να είναι υψηλός, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο κορεσμού.
- Σε μετασχηματιστές **PR-κλάσης** (Protection with Remanence), ο  $K_r$  ελέγχεται και μειώνεται μέσω ειδικών σχεδιαστικών τεχνικών, όπως η χρήση πυρήνων με **διάκενο αέρα** ή ειδικά μαγνητικά υλικά.

### 3.9.4 Συμπεριφορά στην DC συνιστώσα

Όπως είναι γνωστό από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, οι μετασχηματιστές δεν λειτουργούν με συνεχές ρεύμα (DC), καθώς η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής. Ως εκ τούτου, η απόδοσή τους επηρεάζεται σημαντικά από την DC συνιστώσα που μπορεί να εμφανιστεί στο ρεύμα κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος. Αυτή η DC συνιστώσα δημιουργείται λόγω δύο κύριων παραγόντων:

- Συμπεριφορά του δικτύου: Τα ηλεκτρικά δίκτυα έχουν συνήθως επαγωγική συμπεριφορά, γεγονός που σημαίνει ότι το ρεύμα και η τάση δεν βρίσκονται σε φάση. Συγκεκριμένα, το μέγιστο ρεύμα εμφανίζεται όταν η τάση περνά από το μηδέν. Αυτή η διαφορά φάσης οδηγεί στη δημιουργία μιας DC συνιστώσας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων.
- Συνθήκες σφάλματος: Το ακριβές ρεύμα σφάλματος εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούσαν στο δίκτυο ακριβώς πριν από το σφάλμα. Για παράδειγμα, αν το σφάλμα συμβεί όταν η τάση είναι κοντά στο μηδέν, η DC συνιστώσα θα είναι σημαντική, επηρεάζοντας έτσι τη συνολική απόκριση του μετασχηματιστή.

#### a. Η παρουσία DC συνιστώσας στο ρεύμα μπορεί να προκαλέσει:

- Μαγνητικό κορεσμό: Η DC συνιστώσα μπορεί να αυξήσει τη μαγνητική ροή στον πυρήνα, οδηγώντας σε κορεσμό και μειώνοντας την ακρίβεια του μετασχηματιστή.
- Παραμένουσα μαγνήτιση: Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, η DC συνιστώσα μπορεί να αφήσει μια παραμένουσα μαγνητική ροή στον πυρήνα, η οποία επηρεάζει την απόδοση του μετασχηματιστή σε μελλοντικά σφάλματα.
- Καθυστερημένη απόκριση: Ο κορεσμός και η παραμένουσα μαγνήτιση μπορούν να καθυστερήσουν την απόκριση των συστημάτων προστασίας, θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια του δικτύου.

#### b. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC61869-2

Ο τύπος  $K_{TF}$  χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της μαγνητικής συμπεριφοράς του πυρήνα του CT.

$$K_{TF} = \frac{B_{MAX}}{B} \quad (3.9)$$

Όπου :

$B_{MAX}$ : Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής,  $\bar{B}$  Η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής.

Αυτός είναι ένας παράγοντας που χρησιμοποιείται για την ανάλυση μεταβατικών φαινομένων σε μετασχηματιστές ρεύματος (CTs), ειδικά όταν υπάρχει ρεύμα σφάλματος με μεγάλη DC συνιστώσα. Οι εξισώσεις που ακολουθούν σας περιγράφουν τον υπολογισμό του  $K_{TF}$ .

$$K_{TF} = \frac{T_S \times \omega \times T_N}{T_N - T_S} \times \left( e^{-\frac{t}{T_N}} - e^{-\frac{t}{T_S}} \right) - \sin(\omega \times t) \quad (3.10)$$

Θέτοντας  $\sin(\omega \times t) = -1$  :

$$K_{TF} = \frac{T_S \times \omega \times T_N}{T_N - T_S} \times \left( e^{-\frac{t}{T_N}} - e^{-\frac{t}{T_S}} \right) \quad (3.11)$$

- $\omega$ : Γωνιακή συχνότητα (σε rad/s),  $\omega = 2\pi f = 2\pi \text{ff}$ , όπου ff είναι η συχνότητα του δικτύου
- $T_N$ : Χρονική σταθερά του δικτύου
- $T_S$ : Χρονική σταθερά του δευτερεύοντος κυκλώματος του CT
- $t$ : Χρόνος
- $e$ : Η βάση του φυσικού λογαρίθμου (~2.718)

Από το ανώτεροότερον περιεχμένο του, φαίνεται ότι ο **KτF** (Transient Factor) εξαρτάται από τις χρονικές σταθερές του δικτύου  $T_N$  και του δευτερεύοντος κυκλώματος του μετασχηματιστή ρεύματος  $T_S$ . Επιπλέον, αναφέρεται ότι η μέγιστη τιμή του **KτF** επιτυγχάνεται μετά από έναν συγκεκριμένο χρόνο  $t_{BMAX}$ , ο οποίος περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$t_{BMAX} = \frac{T_N \times T_S}{T_S - T_N} \times \ln \frac{T_S}{T_N} \quad (3.12)$$

$$K_{TF} = 1 + \omega + T_S \left( \frac{T_N}{T_S} \right)^{\frac{T_S}{T_S - T_N}} \quad (3.13)$$

Ο τύπος που αναφέρεται για τη **χρονική σταθερά του δικτύου  $T_N$** :

$$T_N = \frac{1}{\omega} \times \frac{\sum X}{\sum R} \quad (3.14)$$

προέρχεται από το πρότυπο IEC 60909-0 ("Short-circuit currents in three-phase a.c. systems").

Το  $T_S$  (η χρονική σταθερά του δευτερεύοντος κυκλώματος του μετασχηματιστή ρεύματος) καθορίζεται από:

- Την **επαγωγή του κλάδου μαγνήτισης ( $L_m$ )**: Αυτή αντιστοιχεί στη μαγνητική επαγωγή του πυρήνα του μετασχηματιστή, η οποία επηρεάζει τη συσσώρευση μαγνητικής ροής.
- Το **άθροισμα των αντιστάσεων στο δευτερεύον κύκλωμα**: Εσωτερική αντίσταση της δευτερεύουσας περιέλιξης ( $R_{CT}$ ), εξωτερική αντίσταση φορτίου ( $R_B$ ).

$$T_S = \frac{L_m}{R_{CT} + R_B} \quad (3.15)$$

### c. Συμπέρασμα

Η DC συνιστώσα που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια σφαλμάτων είναι ένα κρίσιμο φαινόμενο που επηρεάζει τη λειτουργία των μετασχηματιστών. Η κατανόηση των παραγόντων που την προκαλούν (επαγωγική συμπεριφορά του δικτύου και συνθήκες σφάλματος) είναι απαραίτητη για τη σχεδίαση αποτελεσματικών συστημάτων προστασίας και τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του δικτύου.

## 3.10 Κατηγορίες Μετασχηματιστών Εντάσεως για Μεταβατικά Φαινόμενα

Σε προηγούμενη ενότητα, αναφέραμε τον ρόλο του παραμένοντα μαγνητισμού στους μετασχηματιστές εντάσεως (CTs) και πώς αυτός επηρεάζει την απόκριση των συστημάτων προστασίας. Με βάση την



τιμή του παραμένοντα μαγνητισμού στον πυρήνα, οι μετασχηματιστές εντάσεως μπορούν να διακριθούν στους εξής τύπους:

- Υψηλού Παραμένοντος Μαγνητισμού

Σε αυτή την κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως, δεν υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά την ποσότητα του παραμένοντα μαγνητισμού. Αυτοί οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται με πυρήνα χωρίς διάκενο αέρα, γεγονός που επιτρέπει στον παραμένοντα μαγνητισμό να φτάσει έως και το 80% της μέγιστης τιμής και να παραμείνει στον πυρήνα για απεριόριστο χρόνο.

Τυπικά παραδείγματα τέτοιων μετασχηματιστών εντάσεως είναι οι κατηγορίες class P, PX, TPX σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC, ή οι κατηγορίες class C, T, X σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο ANSI/IEEE. Αυτοί οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η ύπαρξη παραμένοντα μαγνητισμού δεν επηρεάζει αρνητικά την απόδοση του συστήματος.

- Χαμηλού παραμένοντος Μαγνητισμού

Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία, σε αυτή την κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί όσον αφορά την τιμή του παραμένοντα μαγνητισμού. Οι μετασχηματιστές αυτής της κατηγορίας διαθέτουν πυρήνα με μικρό διάκενο αέρα, το οποίο βοηθά στη μείωση του παραμένοντα μαγνητισμού σε επίπεδα που δεν ξεπερνούν το 10% της μαγνητικής ροής κορεσμού.

Αυτή η κατασκευαστική τεχνική εξασφαλίζει ότι ο μετασχηματιστής μπορεί να λειτουργεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου ο παραμένον μαγνητισμός μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι Class PR και TPY σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα.

- Μηδενικού Παραμένοντος Μαγνητισμού

Σε αυτή την κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως, ο παραμένον μαγνητισμός είναι πρακτικά αμελητέος. Οι μετασχηματιστές αυτής της κατηγορίας χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη μεγάλων διακένων αέρα στον πυρήνα, τα οποία εξασφαλίζουν ότι ο παραμένον μαγνητισμός διατηρείται σε επίπεδα πολύ κοντά στο μηδέν. Παράλληλα, τα μεγάλα αυτά διάκενα αέρα μειώνουν σημαντικά την επίδραση της DC-συνιστώσας στον μετασχηματιστή, βελτιώνοντας την απόδοσή του σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια και η σταθερότητα είναι κρίσιμες.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων μετασχηματιστών είναι η κατηγορία Class TPZ, η οποία χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλής αξιοπιστίας, όπου η ελάχιστη παρουσία παραμένοντα μαγνητισμού και η αντοχή σε DC-συνιστώσες είναι απαραίτητες.

- Class TP , IEC61869-2-2012

Παλαιότερα, η κατηγοριοποίηση των μετασχηματιστών εντάσεως γινόταν με βάση τις αποκλίσεις στις διάφορες κλάσεις όσον αφορά το σφάλμα γωνίας και την ένταση του ρεύματος. Ωστόσο, σήμερα ο σχεδιασμός και η κατηγοριοποίηση των μετασχηματιστών εντάσεως έχει γίνει πολύ πιο ακριβής, καθώς βασίζεται σε μεταβατικά φαινόμενα και τις παραμέτρους που επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του πυρήνα.

- a. Πυρήνες χωρίς διάκενο αέρα:

Αυτοί οι πυρήνες χαρακτηρίζονται από την απουσία διακένων αέρα, γεγονός που επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλού παραμένοντα μαγνητισμού. Ο παραμένον μαγνητισμός μπορεί να φτάσει έως και το 80% της μαγνητικής ροής κορεσμού και να παραμείνει στον πυρήνα για απεριόριστο χρόνο. Αυτός ο τύπος πυρήνα χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές κατηγοριών όπως Class P, PX, TPX (IEC) ή Class

C, T, X (ANSI/IEEE), όπου η ύπαρξη παραμένοντα μαγνητισμού δεν αποτελεί πρόβλημα για τη λειτουργία του συστήματος.

b. Πυρήνες με διάκενο αέρα:

Αυτοί οι πυρήνες διαθέτουν διάκενο αέρα, το οποίο μειώνει σημαντικά τον παραμένοντα μαγνητισμό, περιορίζοντάς τον σε ποσοστό που δεν ξεπερνά το 10% της μαγνητικής ροής κορεσμού. Το διάκενο αέρα επίσης μειώνει την επιρροή της DC συνιστώσας, βελτιώνοντας την απόκριση του μετασχηματιστή σε μεταβατικές καταστάσεις. Μετασχηματιστές με τέτοιους πυρήνες ανήκουν σε κατηγορίες όπως Class PR, TPY (IEC) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η ακρίβεια και η ελάχιστη παρουσία παραμένοντα μαγνητισμού είναι κρίσιμες.

c. Πυρήνες με μεγάλα διάκενα αέρα:

Σε αυτή την κατηγορία, τα μεγάλα διάκενα αέρα εξασφαλίζουν ότι ο παραμένον μαγνητισμός είναι σχεδόν μηδενικός. Αυτός ο τύπος πυρήνα χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές κατηγορίας Class TPZ, οι οποίοι είναι ιδανικοί για εφαρμογές όπου η DC συνιστώσα και ο παραμένον μαγνητισμός πρέπει να ελαχιστοποιηθούν.

d. Μετασχηματιστές Εντάσεως κλειστού Πυρήνα:

Οι μετασχηματιστές εντάσεως κλειστού πυρήνα είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της υψηλής ακρίβειας και της απλής κατασκευής τους. Ο πυρήνας τους, χωρίς διάκενο αέρα, εξασφαλίζει αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας και ιδανική απόκριση σε AC ρεύματα. Ωστόσο, η έλλειψη διακένου αέρα τους καθιστά ευαίσθητους σε DC συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν κορεσμό και να αυξήσουν τον παραμένοντα μαγνητισμό. Αυτός ο τύπος μετασχηματιστών χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές όπου η DC συνιστώσα είναι ελάχιστη και η ακρίβεια υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι κρίσιμη.

### 3.11 Απομαγνητισμός του Πυρήνα σε Μετασχηματιστές Εντάσεως

Ο απομαγνητισμός του πυρήνα σε μετασχηματιστές εντάσεως (CTs) είναι μια σημαντική διαδικασία που σχετίζεται με την απομάκρυνση του παραμένοντα μαγνητισμού από τον πυρήνα. Ο παραμένον μαγνητισμός μπορεί να προκληθεί από ρεύματα σφάλματος με ισχυρή DC συνιστώσα, τα οποία αφήνουν τον πυρήνα σε κατάσταση μαγνήτισης ακόμη και μετά την απομάκρυνση του ρεύματος. Αυτή η κατάσταση μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση του μετασχηματιστή, ιδιαίτερα σε μεταβατικές καταστάσεις, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε κορεσμό και απώλεια ακρίβειας.

- a. Αιτήσεις Παραμένοντος Μαγνητισμού
- b. Επιπτώσεις Παραμένοντα Μαγνητισμού
- c. Μέθοδοι Απομαγνητισμού

Για την απομάκρυνση του παραμένοντα μαγνητισμού, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες μέθοδοι:

- Απομαγνητισμός με εναλλασσόμενο ρεύμα

Εφαρμόζεται ένα εναλλασσόμενο ρεύμα στο δευτερεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή. Το εναλλασσόμενο ρεύμα μειώνεται σταδιακά σε πλάτος, με αποτέλεσμα να "επαναφέρει" τον πυρήνα στη μαγνητικά ουδέτερη κατάσταση. Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει την απομάκρυνση του παραμένοντα μαγνητισμού και τη βελτίωση της απόδοσης του μετασχηματιστή.

- Απομαγνητισμός με DC ρεύμα

Εφαρμόζεται ένα DC ρεύμα στο δευτερεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή, το οποίο αντιστρέφει την κατεύθυνση της μαγνήτισης στον πυρήνα. Στη συνέχεια, το DC ρεύμα μειώνεται σταδιακά, με αποτέλεσμα να απομαγνητίζεται ο πυρήνας και να επιστρέφει σε μια ουδέτερη μαγνητική κατάσταση.

Αυτή η διαδικασία εξασφαλίζει την απομάκρυνση του παραμένοντα μαγνητισμού και τη βελτίωση της απόδοσης του μετασχηματιστή.

- Αυτόματος απομαγνητισμός

Ορισμένοι μετασχηματιστές εντάσεως διαθέτουν ενσωματωμένους μηχανισμούς για αυτόματο απομαγνητισμό, οι οποίοι ενεργοποιούνται όταν ανιχνευθεί παραμένων μαγνητισμός.

#### d. Σημασία Απομαγνητισμού

Ο απομαγνητισμός είναι απαραίτητος:

- Διατήρηση της Ακρίβειας του Μετασχηματιστή.
- Αποφυγή κορεσμού και διασφάλιση της σωστής λειτουργίας σε μεταβατικές καταστάσεις.
- Εξασφάλιση της Αξιοπιστίας των Συστημάτων Προστασίας και Ελέγχου.

### 3.12 Διαστασιολόγηση Μετασχηματιστών Εντάσεως για Μεταβατικά Φαινόμενα

Η διαστασιολόγηση των μετασχηματιστών εντάσεως (CTs) για μεταβατικά φαινόμενα είναι μια κρίσιμη διαδικασία που εξασφαλίζει ότι οι μετασχηματιστές θα λειτουργούν αξιόπιστα και με ακρίβεια σε συνθήκες βραχυκυκλώματος ή άλλων μεταβατικών καταστάσεων. Τα μεταβατικά φαινόμενα, όπως τα ρεύματα σφάλματος με υψηλή DC συνιστώσα, μπορούν να προκαλέσουν κορεσμό του πυρήνα και να επηρεάσουν την απόδοση του μετασχηματιστή.

- Τάση Κορεσμού  $U_{KN}$

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, κατά τη διαστασιολόγηση ενός μετασχηματιστή εντάσεως, είναι εξαιρετικά σημαντικό να καθοριστεί η βέλτιστη τιμή της ονομαστικής τάσης στο γόνατο της καμπύλης μαγνήτισης  $U_{KN}$ . Όπως έχει γίνει κατανοητό, η λειτουργία του μετασχηματιστή εντάσεως πέραν αυτού του σημείου μπορεί να οδηγήσει σε κορεσμό του πυρήνα, με αποτέλεσμα να επηρεαστεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία του συστήματος. Για τη σωστή επιλογή του σημείου  $U_{KN}$ , είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθοι τρεις σημαντικοί παράγοντες:

#### a. Παράγοντας Βραχυκύκλωση $K_{SSC}$

Ορίζεται ως το πηλίκο της ενεργού τιμής του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης στο πρωτεύον  $I_{SC}$  προς το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος  $I_n$ , όπως περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$K_{SSC} = \frac{I_{SC}}{I_n} \quad (3.16)$$

Όπου:

$I_{SC}$  Η ενεργός τιμή του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης στο πρωτεύον.  $I_n$  Το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος.

#### b. Παράγοντας της Παραμένουσας Μαγνητικής Ροής Ροή Μαγνητικού Παραμένουσας Παραμάγον $K_r$

Αυτή η παράμετρος είναι εξαιρετικά σημαντική για τη διαστασιολόγηση των μετασχηματιστών εντάσεως και αποτελεί αντικείμενο πολλών επιστημονικών μελετών. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ο αριθμός και το μέγεθος των διακένων αέρα σε έναν μετασχηματιστή εντάσεως επηρεάζουν άμεσα τον παράγοντα της παραμένουσας μαγνητικής ροής, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει σημαντικά την υπερ-διαστασιολόγηση του μετασχηματιστή. Για το λόγο αυτό, ορίζεται ένας παράγοντας υπερ-διαστασιολόγησης, ο οποίος βασίζεται στο ποσοστό του παραμένοντα μαγνητισμού στον πυρήνα του μετασχηματιστή, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$K_{REM} = \frac{1}{1-K_T} \quad (3.17)$$

Παράγοντας Κορεσμού  $K_{TF}$  : Για τον υπολογισμό του παράγοντα κορεσμού ή μετάβασης  $K_{TF}$ , είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες τέσσερις παράμετροι:

α. Παράγοντας Κορεσμού ΚορεσμοΚορεσάγον  $K_{TF}$  :

Για τον υπολογισμό του παράγοντα κορεσμού η μετάβασης  $K_{TF}$ , είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες τέσσερις παράμετροι:

Χρονική σταθερά πρωτεύοντος  $T_N$  :

Αυτή είναι η χρονική σταθερά του δικτύου και εξαρτάται από τον λόγο  $X_R$  (αντίδρασης-αντίστασης). Η τιμή της  $T_N$  δεν είναι σταθερή σε όλο το δίκτυο, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες και τη θέση του σφάλματος.

Χρονική σταθερά δευτερεύοντος  $T_S$  :

Η χρονική σταθερά του δευτερεύοντος κυκλώματος καθορίζεται από την μαγνητική επαγωγή του μετασχηματιστή εντάσεως, καθώς και από το άθροισμα των αντιστάσεων που συνδέονται στο δευτερεύον κύκλωμα. Η  $T_S$  επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά του μετασχηματιστή σε μεταβατικές καταστάσεις.

$$T_S = \frac{L_m}{\Sigma R_{secondary}} \quad (3.18)$$

Τυπικές τιμές της χρονικής σταθεράς του δευτερεύοντος ανάλογα με την κατηγορία του πυρήνα του μετασχηματιστή είναι:

Κατηγορία Πυρήνα	$T_S$
TPX	5-20sec
TPY	0.5-2sec
TPZ	~60ms

Πίνακας 3.4 Τυπικές τιμές χρονικής σταθεράς δευτερεύοντος ανά κατηγορία πυρήνα

- Θέση Σφάλματος

Η χρονική σταθερά του δευτερεύοντος (TSTS) κατά τη διάρκεια ενός μεταβατικού φαινομένου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θέση του σφάλματος, καθώς αυτή καθορίζει την εμπέδηση του συστήματος. Για παράδειγμα, σε θέσεις κοντά σε μετασχηματιστές ή γεννήτριες και σε δίκτυα υψηλής τάσης (EHV = 230 kV), η χρονική σταθερά του σφάλματος είναι πολύ μεγάλη. Αυτό οδηγεί στον υπολογισμό της τιμής του  $K_{TF} = 30$ , η οποία αυξάνει σημαντικά την υπερ-διαστασιολόγηση και, κατά συνέπεια, το κόστος του πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως.

Αυτή η υπερ-διαστασιολόγηση μπορεί να αποτρέψει τη χρήση τέτοιων μετασχηματιστών εντάσεως σε εφαρμογές όπου απαιτείται να είναι έγκλειστοι, όπως σε συστήματα GIS (Gas Insulated Switchgear), λόγω των μεγάλων διαστάσεων και του υψηλού κόστους.

- Ονομαστικό φορτίο στο δευτερεύον  $R_B$

Γενικά, οι μετασχηματιστές εντάσεως που πρόκειται να αντιμετωπίσουν μεταβατικά φαινόμενα πρέπει να διαθέτουν χαμηλή αντίσταση στο δευτερεύον κύκλωμά τους. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς του φορτίου (burden) που συνδέεται στο δευτερεύον πρέπει να είναι σχετικά μικρή, συνήθως στην περιοχή 5-10 VA, υποθέτοντας ότι το φορτίο είναι καθαρά ωμικό (δηλαδή,  $\cos[\overset{f_0}{\phi}] = 1 \cos\phi = 1$ ).

Για τους μετασχηματιστές εντάσεως της κατηγορίας Class TP, οι τυπικές τιμές του ονομαστικού φορτίου στο δευτερεύον κυμαίνονται σε 2.5, 5, 7.5, 10 και 15 ohms. Αυτές οι τιμές εξασφαλίζουν ότι ο μετασχηματιστής θα λειτουργεί με ακρίβεια και χωρίς κορεσμό, ακόμη και σε συνθήκες μεταβατικών φαινομένων.

### 3.13 Μετασχηματιστές Εντάσεως σε διάφορες εφαρμογές προστασίας

Όπως είναι γνωστό, οι ηλεκτρονόμοι που εγκαθίστανται στο δίκτυο έχουν ως κύριο σκοπό την προστασία διαφόρων στοιχείων του συστήματος, όπως γεννητριών, μετασχηματιστών, γραμμών μεταφοράς κ.ά. Κάθε τμήμα του δικτύου έχει διαφορετικές ανάγκες προστασίας, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την προσεκτική επιλογή των κατάλληλων μετασχηματιστών εντάσεως ανάλογα με το είδος της προστασίας που απαιτείται.

Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους κατά τον σχεδιασμό της προστασίας ενός δικτύου είναι η επιλογή των κατάλληλων μετασχηματιστών εντάσεως. Η επιλογή αυτή καθορίζεται με βάση το είδος της προστασίας που απαιτείται, όπως:

- Η θέση των μετασχηματιστών εντάσεως
- Ο λόγος των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος (C.T. ratio)
- Παράγοντας ακρίβειας (ALF)

Σε προηγούμενη ενότητα, αναλύθηκε ο παράγοντας ακρίβειας σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, τα οποία ορίζουν την ακρίβεια ενός μετασχηματιστή εντάσεως κάτω από ένα συγκεκριμένο φορτίο (burden) στο δευτερεύον κύκλωμα. Ωστόσο, αν το φορτίο αλλάξει, είναι απαραίτητο να προσαρμόσουμε τον παράγοντα ακρίβειας στο νέο, πραγματικό φορτίο. Αυτή η προσαρμογή γίνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$ALF' = ALF \times \frac{R_{CT}+R_B}{R_{CT}+R_B} \quad (3.19)$$

Όπου :

$R_{CT}$  : Αντίσταση Δευτερεύοντος τυλίγματος

$R_B$  : Ονομαστική αντίσταση φορτίου που συνδέεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου αλλάζει το φορτίο σε έναν μετασχηματιστή εντάσεως είναι η θέση εγκατάστασής του. Αυτό συμβαίνει επειδή η εμπέδηση του αγωγού σύνδεσης μεταξύ του μετασχηματιστή εντάσεως και του φορτίου μπορεί να αλλάξει σημαντικά, ανάλογα με την απόσταση και τις συνθήκες εγκατάστασης.

Από τα παραπάνω, είναι εύκολο να συμπεράνουμε ότι οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν οι μετασχηματιστές εντάσεως εξαρτώνται άμεσα από το είδος της προστασίας που απαιτείται. Κάθε εφαρμογή έχει διαφορετικές ανάγκες, και κατά συνέπεια, οι μετασχηματιστές εντάσεως πρέπει να επιλέγονται με βάση αυτές τις ανάγκες, ώστε να εξασφαλίζεται η ακρίβεια και η αξιοπιστία του συστήματος.

#### 3.13.1 Προστασία υπερέντασης καθορισμένου χρόνου

Αυτός ο τύπος προστασίας χαρακτηρίζεται από άμεση δράση χωρίς χρονική καθυστέρηση. Το όριο του ρεύματος που μπορεί να οριστεί στον ηλεκτρονόμο σε αυτή την περίπτωση κυμαίνεται από 2 έως 10 φορές το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή εντάσεως.

Για να εξασφαλιστεί ότι ο μετασχηματιστής εντάσεως δεν θα επηρεάσει την ακρίβεια της απόκρισης της προστασίας, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι η μέγιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος δεν υπερβαίνει το σημείο κορεσμού που έχει οριστεί για τον μετασχηματιστή.

Για τον σκοπό αυτό, ο παράγοντας ALF'ALF' ορίζεται από τον παρακάτω τύπο, λαμβάνοντας υπόψη και έναν συντελεστή ασφαλείας 2:

$$ALF' \geq 2 \times \frac{L_{setting}}{L_p} \quad (3.20)$$

Όπου :

$L_p$  : Ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή εντάσεως.

$L_{setting}$  : Ρύθμιση προστασίας του ηλεκτρονόμου.

### 3.13.2 Προστασία υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου

Σε αυτή την περίπτωση, δεν μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε την επιρροή του DC-κορεσμού, καθώς η προστασία θα ενεργοποιηθεί αρκετούς κύκλους μετά την έναρξη του σφάλματος, όταν ο μετασχηματιστής εντάσεως θα έχει ήδη φτάσει σε κορεσμό. Ωστόσο, ο AC-κορεσμός είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τη σωστή λειτουργία της προστασίας υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου. Για να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία της προστασίας, η τάση που αναπτύσσεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη συνθήκη:

$$V_K > I_{SC} \times (R_{CT} + R_B + R_L) \quad (3.21)$$

Όπου :

$V_K$  : Τάση γονάτισης του CT. Είναι η τάση πάνω από την οποία ο πυρήνας του CT μπαίνει σε βαθύ κορεσμό.

$I_{SC}$  : Ρεύμα σφάλματος στον μετασχηματιστή εντάσεως.

$R_{CT}$  : Η ωμική αντίσταση του ίδιου του δευτερεύοντος τυλίγματος του CT.

$R_B$  : Η ωμική αντίσταση του φορτίου ή της βάσης μέτρησης/προστασίας (burden) που συνδέεται στο δευτερεύον.

$R_L$  : Συμπληρωματική ωμική αντίσταση στο δευτερεύον.

Αν μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε την ακρίβεια του ηλεκτρονόμου σε όλη την περιοχή λειτουργίας του, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε σε ποιο σημείο η καμπύλη λειτουργίας του γίνεται από αντιστρόφου χρόνου σε ακαριαία. Για τους περισσότερους ηλεκτρονόμους, αυτό το σημείο αντιστοιχεί περίπου στις 24 φορές του ονομαστικού ρεύματος στο πρωτεύον του μετασχηματιστή εντάσεως ή στις 20 φορές του ορίου  $I_{setting}$  του ηλεκτρονόμου.

Λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να αναπτυχθεί, ορίζουμε έναν ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας, ο οποίος μπορεί να πάρει τιμές ανάμεσα σε:

$$ALF'_{min} = 30 \times \frac{I_{sc}}{I_{p(ST)}} \quad (3.22)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας εξαρτάται από την αναλογία του ρεύματος βραχυκυκλώματος ( $I_{sc}I_{sc}$ ) προς το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος  $I_p$  του μετασχηματιστή εντάσεως (CT). Ο συντελεστής 30

χρησιμοποιείται για να εξασφαλιστεί ότι ο μετασχηματιστής δεν θα κορεστεί ακόμη και σε ακραίες συνθήκες.

$$ALF'_{min} = 36 \quad (3.23)$$

Εδώ ορίζεται μια σταθερή τιμή για τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια γενική προδιαγραφή για μετασχηματιστές εντάσεως υψηλής ακρίβειας.

$$ALF'_{min} = 1.5 \times \frac{I_{SCMAX}}{I_{p(CT)}} \quad (3.24)$$

Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται με βάση την αναλογία του μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώματος  $I_{SCMAX}$  προς το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος  $I_p$  του CT. Ο συντελεστής 1.5 χρησιμοποιείται για να εξασφαλιστεί ένα περιθώριο ασφαλείας.

### 3.13.3 Προστασία Αποστάσεως

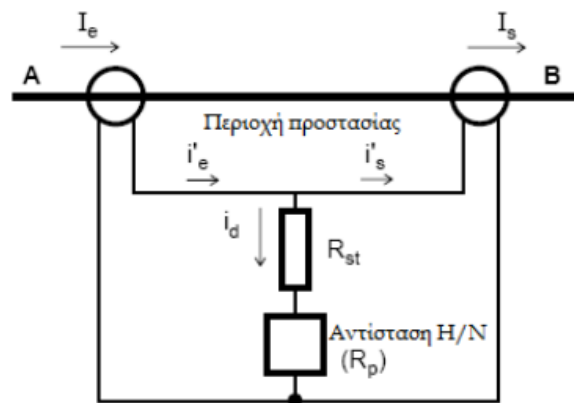
Αυτός ο τύπος προστασίας χρησιμοποιείται κυρίως σε γραμμές μεταφοράς, όπου ο κορεσμός λόγω μεταβατικών φαινομένων (DC-κορεσμός) αποτελεί μια σημαντική παράμετρο. Σε ένα σύστημα προστασίας που είναι χωρισμένο σε ζώνες με διαφορετικούς χρόνους απόκρισης, ο κορεσμός επιτρέπεται μόνο μετά τη λειτουργία της πρώτης ζώνης προστασίας (Zone-1).

Στις επόμενες ζώνες προστασίας, οι ηλεκτρονόμοι ρυθμίζονται με χρονική καθυστέρηση, ώστε η επαναλειτουργία του τμήματος που έχει αποσυνδεθεί λόγω σφάλματος να γίνει μετά την απόσβεση της DC συνιστώσας. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι η προστασία θα λειτουργεί με ακρίβεια και θα αποφεύγεται ο κορεσμός του μετασχηματιστή εντάσεως.

### 3.13.4 Διαφορική Προστασία Υψηλής Εμπέδησης

Αυτός ο τύπος προστασίας χρησιμοποιείται συνήθως για την προστασία κινητήρων, γεννητριών, ζυγών και για σφάλματα γης σε μετασχηματιστές ισχύος (restricted earth fault). Γενικά, αυτή η κατηγορία διαφορικής προστασίας εφαρμόζεται σε περιοχές με ίδιο επίπεδο τάσης.

Σε κανονικές συνθήκες, τα ρεύματα που εισέρχονται στην προστατευόμενη ζώνη είναι περίπου ίδια με τα ρεύματα που εξέρχονται από αυτήν. Ωστόσο, αν συμβεί ένα σφάλμα εκτός της προστατευόμενης ζώνης, μπορεί να προκληθεί κορεσμός σε έναν από τους δύο μετασχηματιστές εντάσεως, ο οποίος θα δώσει λανθασμένες εντολές στον ηλεκτρονόμο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη λειτουργία της προστασίας, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για προσεκτικό σχεδιασμό και ρύθμιση του συστήματος.



Σχήμα 3.7 Διαφορική προστασία υψηλής εμπέδησης

Η σταθεροποίηση αυτή της προστασίας γίνεται με την προσθήκη της αντίστασης  $R_{ST}$ . Η αντίσταση  $R_{ST}$  προσθέτει στην υπάρχουσα διάταξη για να αποτρέψει λανθασμένες εκκινήσεις (trips) της προστασίας σε περίπτωση κορεσμού ή σε περίπτωση υπερέντασης εκτός ζώνης. Αυτή η πρακτική ονομάζεται συνήθως αντίσταση σταθεροποίησης. Η τάση που δημιουργείται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, δηλαδή η τάση που αντιστοιχεί στο ισοδύναμο του πυρήνα (τάση κορεσμού).

$$V_K = 2 \times I_{SCMAX} \times (R_{CT} + R_P) \quad (3.25)$$

Με την παραπάνω ανισότητα εξασφαλίζουμε ότι η τάση κορεσμού  $V_k$  του μετασχηματιστή ρεύματος είναι αρκετά υψηλή ώστε, ακόμη και στο μέγιστο εξωτερικό σφάλμα  $I_{SCMAX}$  και λαμβάνοντας υπόψη τις ωμικές αντιστάσεις  $R_{CT} + R_P$ , ο πυρήνας του CT να μην κορεστεί. Με αυτόν τον τρόπο, η προστασία δεν θα δώσει λανθασμένες εντολές σε συνθήκες όπου δεν πρέπει να επέμβει.

### 3.13.5 Διαφορική Προστασία Χαμηλής Εμπέδησης

Η διαφορική προστασία χαμηλής εμπέδησης είναι μια τεχνική προστασίας που χρησιμοποιείται κυρίως για την προστασία μετασχηματιστών, γεννητριών, κινητήρων και άλλων κρίσιμων στοιχείων του συστήματος. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη σύγκριση των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται από την προστατευόμενη ζώνη. Αν υπάρξει διαφορά μεταξύ των ρευμάτων, ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται για να απομονώσει το σφάλμα.

Η προστασία χαρακτηρίζεται χαμηλής εμπέδησης, γεγονός που σηματοδοτεί την ευαισθησία του (μπορεί να εντοπίσει μικρές διαφορές). Ο τρόπος έλεγχου σε κανονική κατάσταση όπως και στην προηγούμενη ενότητα της ορθότητας του συστήματος είναι ισοδύναμα ρεύματα στην είσοδο της προστασίας και κατά την έξοδο. Σε περίπτωση διαφοράς των ρευμάτων ενεργοποιείται η προστασία. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του είναι ότι η γρήγορη απόκριση όπου περιλαμβάνει το σύστημα ασφαλείας που εξομαλύνει την κατάσταση, απομονώνοντας χωρίς να προκληθούν σοβαρές ζημιές.

### 3.13.6 Ποσοστιαία Διαφορική προστασία

Η ποσοστιαία διαφορική προστασία (Percentage Differential Protection) είναι μια τεχνική προστασίας που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και απομόνωση εσωτερικών σφαλμάτων (π.χ., βραχυκυκλώματα) σε κρίσιμα στοιχεία όπως μετασχηματιστές, γεννήτριες, ή κινητήρες. Βασίζεται στη σύγκριση των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται από την προστατευόμενη ζώνη, αλλά με την προσθήκη ενός ποσοστιαίου συντελεστή (slope) για να αποφευχθούν εσφαλμένες ενεργοποιήσεις λόγω μη ιδανικών συνθηκών (π.χ., ανομοιόμορφη απόδοση των μετασχηματιστών εντάσεως).

Η ελάχιστη τάση γονάτου ορίζεται ορίζεται η αρχή του κορεσμού του πυρήνα :

$$V_{kmin} = A \times I_{TRF} \times (R_{CT} + 2 \times R_L) \quad (3.26)$$

Όπου :

$A$  σταθερά εξαρτάται από τον μετασχηματιστή ισχύος.

$I_{TRF}$  Ονομαστικό ρεύμα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ισχύος.

$2 \times R_L$  Συνολική αντίσταση δευτερεύοντος τυλίγματος.

$R_{CT}$  Η  $R_{ct}$  είναι η ωμική αντίσταση των σύρματων της δευτερεύουσας περιέλιξης του CT.

Οι κατασκευαστές ορίζουν την τάση γονάτου, με το ρεύμα σφάλματος εκτός ζώνης και την τάση απο την μεριά του μετασχηματιστή που έχει συμβεί το σφάλμα.



Σφάλμα στην μεριά του μετασχηματιστή σύνδεση αστέρα :

$$V_K \geq (R_{CT} + 3 \times (R_p + R_L)) \times \frac{4 \times I_{SC}}{\sqrt{3}} \quad (3.27)$$

Σφάλμα στην μεριά του μετασχηματιστή σύνδεση τριγώνου :

$$V_K \geq (R_{CT} + 2 \times (R_p + R_L)) \times 4 \times I_{SC} \quad (3.28)$$

## Κεφάλαιο 4ο: Προστασία Μετασχηματιστών Ισχύος

Οι μετασχηματιστές ισχύος αποτελούν έναν από τους πλέον κρίσιμους και πολύτιμους εξοπλισμούς σε ένα ηλεκτρικό σύστημα μεταφοράς και διανομής ενέργειας. Είναι υπεύθυνοι για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα τάσης, επιτρέποντας τη βέλτιστη και αποδοτική μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις. Λόγω της στρατηγικής τους θέσης και του υψηλού κόστους αντικατάστασης ή επισκευής τους, η αξιόπιστη προστασία των μετασχηματιστών αποτελεί βασική προτεραιότητα σε κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση.

Οι βλάβες που μπορούν να παρουσιαστούν σε έναν μετασχηματιστή, όπως βραχυκυκλώματα, υπερφορτώσεις, αστοχίες μονώσεων ή θερμικές καταπονήσεις, όχι μόνο μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές στον ίδιο τον εξοπλισμό, αλλά και να οδηγήσουν σε εκτεταμένες διακοπές ηλεκτροδότησης, απώλεια ισχύος και ενδεχομένως επικίνδυνες καταστάσεις για τον εξοπλισμό και το προσωπικό. Γι' αυτό, η επιλογή, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή κατάλληλων συστημάτων προστασίας είναι απολύτως απαραίτητα.

Η προστασία μετασχηματιστών ισχύος περιλαμβάνει τη χρήση εξειδικευμένων διατάξεων και συστημάτων, όπως διαφορικά ρελέ, θερμικές προστασίες, συστήματα γείωσης, μετασχηματιστές μέτρησης και ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι. Στόχος αυτών των μέτρων είναι η έγκαιρη ανίχνευση και απομόνωση των σφαλμάτων, ώστε να αποτραπούν μεγαλύτερες καταστροφές και να διατηρηθεί η σταθερότητα και η ασφάλεια του δικτύου.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι βασικές αρχές, τα είδη σφαλμάτων, οι τεχνικές προστασίας και η πρακτική εφαρμογή τους σε πραγματικά ή εργαστηριακά περιβάλλοντα, με σκοπό την εμβάθυνση στη σύγχρονη τεχνολογία προστασίας μετασχηματιστών.

Οι **μετασχηματιστές ισχύος** αποτελούν κρίσιμα στοιχεία των ηλεκτρικών δικτύων, καθώς είναι υπεύθυνοι για τη **μετατροπή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας** σε διαφορετικά επίπεδα τάσης. Λόγω της σημασίας τους, η **προστασία τους** από βλάβες (π.χ. βραχυκυκλώματα, υπερφορτώσεις, θερμικές καταπονήσεις) είναι **απαραίτητη** για να:

- **Εξασφαλιστεί η αδιάλειπτη λειτουργία** του δικτύου.
- **Ελαχιστοποιηθούν οι ζημιές** και το κόστος επισκευής.
- **Προληφθούν επικίνδυνες καταστάσεις**, όπως πυρκαγιές ή εκρήξεις.



Σχήμα 4.1 Μετασχηματιστής Ισχύος

#### 4.1 Κύριοι Κίνδυνοι για Μετασχηματιστές

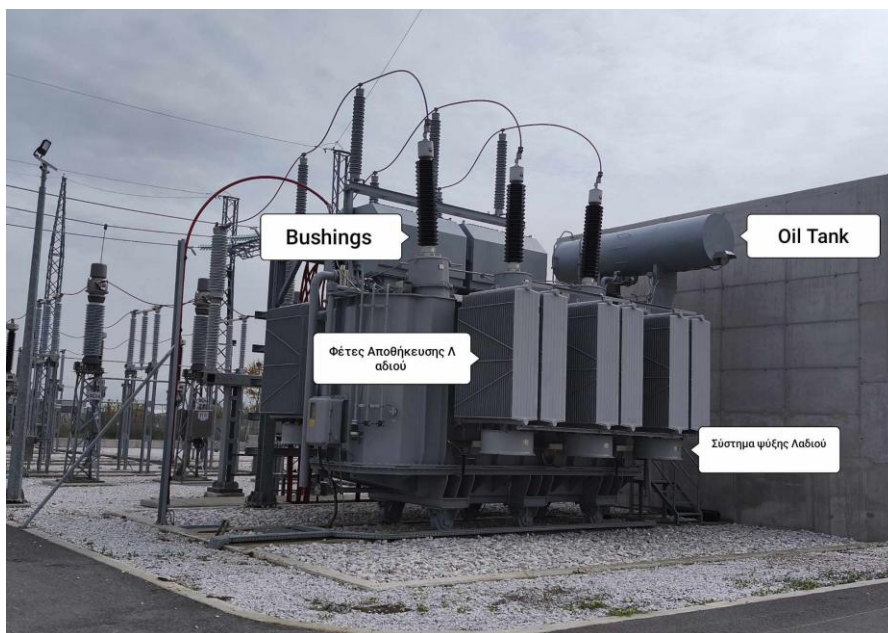
- **Ηλεκτρικές Βλάβες**
  - Βραχυκυκλώματα (ειδικά μεταξύ πηνίων ή γείωσης).
  - Υπερτάσεις (λόγω αστραπών ή διακοπών φορτίου).
- **Θερμικές Καταπονήσεις**
  - Υπερθέρμανση λόγω υπερφόρτισης ή κακής ψύξης.
- **Μηχανικές Φθορές**
  - Κραδασμοί, διάβρωση, ρύπανση του ελαίου μόνωσης.

#### Μέθοδοι Προστασίας :

Για την αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων, χρησιμοποιούνται:

- **Ρελε προστασίας** (π.χ. διαφορικά, υπερρευμάτων, θερμοστατικά).
- **Συστήματα ψύξης** (ελαιόψυκτοι, αερόψυκτοι).
- **Προστατευτικές συσκευές** (π.χ. απεργοί, παρεμβολείς υπερτάσεων).

Η σωστή επιλογή και συνδυασμός αυτών των μεθόδων εξαρτάται από τον τύπο, το μέγεθος και τη θέση του μετασχηματιστή στο δίκτυο. Σε επόμενα κεφάλαια, θα αναλυθούν λεπτομερώς οι τεχνικές και οι τεχνολογίες που εφαρμόζονται στη σύγχρονη πράξη.



Σχήμα 4.2 Μετασχηματιστής ισχύος

#### 4.2 Χαρακτηριστικά

Βασικά στοιχεία :

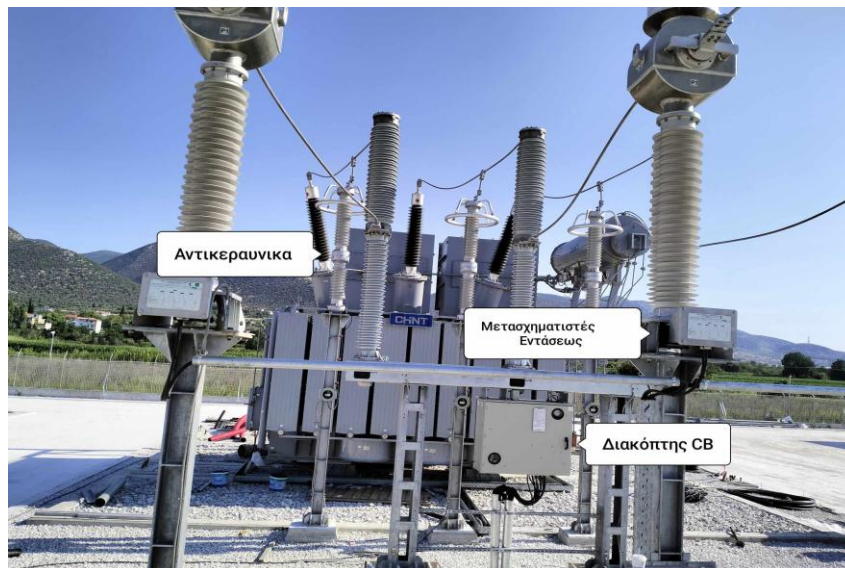
- Πυρήνας : ο πυρήνας του μετασχηματιστή υλοποιείται από χάλυβα.
- Πηνία(Πρωτεύων/δευτερεύων) : Πλέγματα από χαλκό ή αλουμίνιο με μονωτική επίστρωση.
- Σύστημα ψύξης : λάδι-αέρας ONAN (φυσική κυκλοφορία), αναγκαστική ψύξη OFAF.

Προστατευτικά στοιχεία :

- Ρελέ Buchholz : ανίχνευση αερίων
- Βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης : απελευθερώνει πίεση
- Θερμομετρικές συσκευές : θερμίστορ RTD για παρακολούθηση θερμοκρασίας πηνίων, θερμόμετρο λαδιού.

Εξωτερικά στοιχεία :

- Μονωτικά Στελέχη (Bushings) : υλικό πορσελάνη ή εποξειδική ρητίνη.
- Διακόπτης Φορτίου (Tap Changer) : OLTC ρυθμίζει την τάση εξόδου χωρίς διακοπή.
- Σωληνώσεις για Λάδι : δεξαμενή διαστολής Conservator, φίλτρα απομόνωσης υγρασίας (Silica Gel).



Σχήμα 4.3 Μετασχηματιστής ισχύος

### • Ασφάλεια και πλεονασμός

Στους υποσταθμούς μέσης τάσης, η εγκατάσταση δύο μετασχηματιστών ισχύος είναι σύνηθες για λόγους ασφάλειας και πλεονασμού. Αν ο ένας μετασχηματιστής αστοχήσει ή αποσυνδεθεί, ο δεύτερος αναλαμβάνει να τροφοδοτήσει ολόκληρο το φορτίο. Ωστόσο, αυτή η κατάσταση προκαλεί υπερφόρτιση στον εναπομείναντα μετασχηματιστή, η οποία μπορεί να επιταχύνει τη γήρανση της μόνωσής του ή ακόμη να οδηγήσει σε θερμική καταστροφή.

### • Ισορροπία Φόρτισης και προστασίας

Σε υποσταθμούς με παράλληλους μετασχηματιστές, είναι κρίσιμο διατηρείται ισορροπία στο φορτίο μεταξύ τους. Θέλουμε να επιτύχουμε ομοιόμορφη γήρανση των υλικών, της μόνωσης των υλικών και αποφυγή υπερφόρτισης ώστε να μην υπάρξει ανομοιομορφία μεταξύ των μετασχηματιστών.

### • Σύστημα Προστασίας

Για την αποφυγή καταστροφής του μετασχηματιστή χρησιμοποιούμε Διαφορική προστασία, προστασία υπερφόρτισης, θερμική προστασία για την αποφυγή κάποιας καταστροφής. Επίσης το κόστος ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι υψηλό, δεν υπάρχουν σίγουροι χρόνοι παράδοσης από ένα έως δυο χρόνια και θα είναι ζημιογόνο για την παραγωγή.

### 4.3 Σφάλματα και αντικανονικές συνθήκες λειτουργίας

Είναι κρίσιμο ένα σύστημα προστασίας να μπορεί να ανιχνεύει και να αναγνωρίζει τόσο τις καταστάσεις σφάλματος όσο και τις αντικανονικές συνθήκες που μπορεί να προκύψουν. Αυτή η ικανότητα εξασφαλίζει ότι το σύστημα θα ενεργεί σωστά και έγκαιρα, σύμφωνα με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις, προστατεύοντας τον εξοπλισμό και διατηρώντας τη σταθερότητα του δικτύου. Η αποτελεσματική ανίχνευση και αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων αποτελεί βασικό πυλώνα της αξιοπιστίας και της ασφάλειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

- Υπέρταση

Οι υπερτάσεις αποτελούν μια σημαντική απειλή για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες στον εξοπλισμό. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες υπερτάσεων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των συστημάτων προστασίας: μεταβατικές, διακοπτικές και προσωρινές υπερτάσεις.

Οι μεταβατικές υπερτάσεις προκαλούνται συχνά από πτώσεις κεραυνού σε κάποιο σημείο του δικτύου. Αυτές οι υπερτάσεις μπορούν να δημιουργήσουν σφάλματα μεταξύ των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή (turn-to-turn faults), τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφή του εξοπλισμού. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, εγκαθίστανται απαγωγί υπερτάσεων (surge arresters) κοντά στους μονωτήρες διέλευσης του μετασχηματιστή, ώστε να απορροφούν τις υπερτάσεις και να προστατεύουν τον εξοπλισμό.

Οι διακοπτικές υπερτάσεις προκύπτουν κατά τη λειτουργία διακοπών, όπως κατά το άνοιγμα ή το κλείσιμο κυκλωμάτων. Αυτές οι υπερτάσεις μπορούν να προκαλέσουν υψηλές τάσεις που επηρεάζουν αρνητικά τον εξοπλισμό.

Οι προσωρινές υπερτάσεις συνδέονται με μεταβολές του φορτίου (power frequency overvoltage) και μπορούν να αυξήσουν τη διηλεκτρική καταπόνηση στην μόνωση, καθώς και την πυκνότητα της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να επιταχύνουν τη φθορά της μόνωσης και να μειώσουν τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού.

Για την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση αποτελεσματικών συστημάτων προστασίας, όπως απαγωγών υπερτάσεων και ρελέ υπερτάσεων, τα οποία θα ανιχνεύουν και θα απορροφούν τις υπερτάσεις πριν προκληθούν ανεπανόρθωτες ζημιές.

- Υπερφόρτιση

Η υπερφόρτιση ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι μια κρίσιμη κατάσταση που μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές συνέπειες. Όταν ένας μετασχηματιστής λειτουργεί πέραν της ονομαστικής του ισχύος, οι απώλειες χαλκού αυξάνονται σημαντικά, γεγονός που προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας στον πυρήνα και στις περιελίξεις. Αυτή η υπερθέρμανση μπορεί να επιταχύνει τη γήρανση της μόνωσης και να μειώσει τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Για να αποφευχθούν καταστροφικές βλάβες, υπάρχει ένα χρονικό όριο κατά το οποίο επιτρέπεται η υπερφόρτιση, ανάλογα με την αρχική θερμοκρασία του μετασχηματιστή και την αποτελεσματικότητα του συστήματος ψύξης. Αν η υπερφόρτιση συμβεί σε συνθήκες όπου ο μετασχηματιστής έχει ήδη υπερθερμανθεί λόγω προηγούμενης υπερφόρτισης, το σύστημα ψύξης μπορεί να μην έχει αρκετό χρόνο να επαναφέρει τη θερμοκρασία σε ασφαλή επίπεδα. Αυτό αυξάνει τον κίνδυνο θερμικής καταστροφής και αποδόμησης της μόνωσης των τυλιγμάτων.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση συστημάτων προστασίας υπερφόρτισης, τα οποία θα παρακολουθούν τη θερμοκρασία και θα ενεργοποιούνται όταν

αυτή υπερβεί τα επιτρεπτά όρια. Επίσης, η προληπτική συντήρηση και η εξισορρόπηση του φορτίου μεταξύ παράλληλων μετασχηματιστών μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση του κινδύνου υπερφόρτισης.

- Υπερδιέγερση

Η υπερδιέγερση ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι μια κατάσταση που προκύπτει όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι υπερβολικά υψηλή ή όταν η συχνότητα λειτουργίας είναι πολύ χαμηλή. Αυτές οι συνθήκες οδηγούν σε υπερβολική μαγνητική ροή στον πυρήνα, η οποία υπερβαίνει τα φυσιολογικά όρια λειτουργίας του μετασχηματιστή.

Η υπερδιέγερση προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις όπως αύξηση απωλειών στον πυρήνα, αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης και αύξησης της ροής σκέδασης.

Σε φυσιολογικές συνθήκες, τα μεταλλικά μέρη ενός μετασχηματιστή δέχονται μόνο μια μικρή ποσότητα μαγνητικής ροής. Ωστόσο, κατά την υπερδιέγερση, η ροή αυτή αυξάνεται σημαντικά, προκαλώντας τοπική υπερθέρμανση στα μεταλλικά εξαρτήματα. Αυτή η υπερθέρμανση μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή της μόνωσης των τυλιγμάτων, θέτοντας σε κίνδυνο την ασφάλεια και τη λειτουργία του μετασχηματιστή.

- Εξωτερικά σφάλματα

Σε πολλές περιπτώσεις, τα συστήματα προστασίας των μετασχηματιστών ισχύος καλύπτουν όχι μόνο τις ανάγκες προστασίας του ίδιου του μετασχηματιστή, αλλά και των ζυγών (φορτίων) ή των γραμμών μεταφοράς που τροφοδοτεί. Αυτό σημαίνει ότι η προστασία του μετασχηματιστή μπορεί να λειτουργεί είτε ως κύρια προστασία είτε ως δευτερεύουσα (back-up) προστασία για τον ζυγό ή τη γραμμή. Ωστόσο, είναι σημαντικό το σύστημα προστασίας να μπορεί να διακρίνει αν ένα σφάλμα αφορά τον μετασχηματιστή ή τον ζυγό, ώστε να αποφευχθούν λανθασμένες αποφάσεις και να διασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου.

Οι μετασχηματιστές ισχύος έχουν την ικανότητα να αντέχουν σε βραχυκυκλώματα για έναν περιορισμένο χρόνο, χωρίς να καταστραφούν. Αυτός ο χρόνος εξαρτάται από το μέγεθος του ρεύματος βραχυκυκλώματος και την αντίσταση/αντίδραση του μετασχηματιστή. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει ενδεικτικούς χρόνους αντοχής για μετασχηματιστές ισχύος σε περίπτωση εξωτερικού βραχυκυκλώματος, όταν το ρεύμα περιορίζεται μόνο από την αντίδραση του μετασχηματιστή:

Αντίδραση Μ/Σ (%)	$I_{Bραχ}$	Επιτρεπόμενη αντοχή στο σφάλμα (sec)
4	25	2
5	20	3
6	16.6	4
7	14.2	5

Πίνακας 4.1 Επιτρεπόμενη αντοχή Μ/Σ σε εξωτερικό σφάλμα

- Εσωτερικά σφάλματα

Η καταστροφή της μόνωσης στα τυλίγματα ή στα ελάσματα του πυρήνα ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι ένα από τα πιο σοβαρά εσωτερικά σφάλματα που μπορούν να συμβούν. Αυτή η βλάβη μπορεί να οδηγήσει σε βραχυκυκλώματα μεταξύ των τυλιγμάτων ή μεταξύ τυλιγμάτων και γης. Επιπλέον, ένα εσωτερικό βραχυκύκλωμα μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη αερίων υψηλής πίεσης μέσα στον

μετασχηματιστή. Αν η πίεση αυτή γίνει υπερβολική, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του κελύφους του μετασχηματιστή, με πιθανές εκρήξεις ή διαρροές λαδιού.

Η γήρανση της μόνωσης είναι μια διαδικασία που εξαρτάται από τον χρόνο και την θερμοκρασία. Στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, η υψηλότερη θερμοκρασία εμφανίζεται συνήθως σε ένα συγκεκριμένο σημείο, γνωστό ως "hot spot". Αυτή η θερμή κηλίδα προκαλεί ταχύτερη φθορά της μόνωσης, μειώνοντας δραματικά τον χρόνο ζωής του τυλίγματος.

Ο ακριβής χρόνος ζωής της μόνωσης είναι δύσκολο να προβλεφθεί, καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια συντήρησης, μπορούν να πραγματοποιηθούν δοκιμές και έλεγχοι για την αξιολόγηση της κατάστασης της μόνωσης.

- Υπερθέρμανση Μ.Τ.

Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 76-1, οι μετασχηματιστές έχουν την ικανότητα να λειτουργούν ακόμα και όταν η εφαρμοζόμενη τάση φτάνει το 105% της ονομαστικής τάσης. Επιπλέον, από πλευράς κατασκευής, οι μετασχηματιστές μπορούν να αντέξουν τάσεις πάνω από το 110% της ονομαστικής. Ωστόσο, όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πολύ υψηλή ή η συχνότητα λειτουργίας είναι πολύ χαμηλή, ο πυρήνας του μετασχηματιστή υφίσταται υπερδιέγερση.

Η υπερδιέγερση προκαλεί αύξηση της μαγνητικής ροής, η οποία "διαρρέει" από τον πυρήνα προς τα μεταλλικά τοιχώματα και το κέλυφος του μετασχηματιστή. Αυτή η διαρροή οδηγεί σε ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας των μεταλλικών μερών, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές όπως η αύξηση της θερμοκρασίας έχει κατά συνέπεια την καταστροφή της μόνωσης των τυλιγμάτων.

Μία μέθοδος προστασίας του μετασχηματιστή ισχύος από υπερθέρμανση και υπερδιέγερσης υλοποιείται μέσω Ηλεκτρονόμων υπερδιέγερσης ενεργοποιούνται όταν ο λόγος τάσης προς συχνότητα (V/Hz) υπερβαίνει τα προκαθορισμένα όρια. Με αυτόν τον τρόπο, αποτρέπεται η υπερδιέγερση και διασφαλίζεται η ασφάλεια του μετασχηματιστή.

- Ποιότητα λαδιού

Το λάδι στο εσωτερικό του μετασχηματιστή παίζει διπλό ρόλο απομονώνει τα τυλίγματα μεταξύ τους και από το κέλυφος. Επίσης χρησιμοποιείται ως αγωγός θερμότητας για να ψύχει τον μετασχηματιστή, δηλαδή απομονώνει την θερμοκρασία από τα τυλίγματα και τον πυρήνα.

Όταν η ποιότητα του λαδιού υποβαθμίζεται υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να δημιουργηθούν προβλήματα υπερθέρμανσης, δημιουργία αερίων και δημιουργώντας επιπτώσεις στην μόνωση η παρουσία υγρασίας στο λάδι μειώνει την διηλεκτρική αντοχή.

Έλεγχος και συντήρηση πραγματοποιείται μια φορά τον χρόνο και έχει ως στόχο την πραγματοποίηση μετρήσεων για την κατάσταση του μετασχηματιστή, την ανάλυση του λαδιού για την διαπίστωση των επιπέδων υγρασίας κ.α.

Για την αποφυγή της υγρασίας οι μετασχηματιστές ισχύος πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με silica gel breathers, τα οποία απορροφούν την υγρασία και διατηρούν τον μετασχηματιστή στο εσωτερικό του ξηρό.



Σχήμα 4.4 Απομόνωση υγρασίας Silica gel

- Σφάλματα σε σχέση με γη

Σε περίπτωση που ένα τυλίγμα του μετασχηματιστή έρθει σε επαφή με το κέλυφος του μετασχηματιστή αυτό μπορεί να συμβεί με έναν σπινθήρα, δημιουργείται άμεσα ή έμμεσα σφάλμα σε σχέση με την γη. Για να πραγματοποιηθεί σπινθηρισμός θα πρέπει να υπάρξει καταστροφή της μόνωσης είτε από κακή ή ελάχιστη συντήρηση, είτε κατά την μεταφορά λόγω των κραδασμών να υπάρξει τριβή.

Η χρήση προηγμένων συστημάτων ανίχνευσης DGA, διαφορικά ρελέ και ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος γείωσης είναι βασικοί παράγοντες για την πρόληψη τέτοιων σφαλμάτων. Η άμεση αντιμετώπιση τους αποτρέπει ζημιές με υψηλό κόστος και διασφαλίζει τη μακροχρόνια λειτουργία του εξοπλισμού.

- Δυσλειτουργία στο σύστημα ψύξης

Το σύστημα ψύξης είναι ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία ενός μετασχηματιστή ισχύος, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές ζημιές, όπως υποβάθμιση της μόνωσης, δημιουργία αερίων υψηλής πίεσης και ακόμα καταστροφή του εξοπλισμού. Για αυτόν τον λόγο, η αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος ψύξης είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της μακροζωίας του μετασχηματιστή.

Οι μετασχηματιστές που μπορούν να αποκτήσουν πρόβλημα στο σύστημα ψύξης είναι οι ONAF (Oil Natural Air Forced) σε αυτόν τον τύπο ψύξης υπάρχει μια εξαναγκασμένη ροή αέρα, η οποία επιτυγχάνεται με την χρήση ψυκτικού εξοπλισμού. Αυτοί οι μετασχηματιστές απαιτούν τακτική επιτήρηση και συντήρηση του συστήματος ψύξης, καθώς η δυσλειτουργία του εξοπλισμού μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση.

- Σφάλματα μεταξύ σπειρών

Όταν σπείρες του ίδιου τυλίγματος σε έναν μετασχηματιστή ισχύος έρχονται σε άμεση ή έμμεση επαφή (μέσω σπινθήρα), δημιουργείται ένα σφάλμα μεταξύ των σπειρών (interturn fault). Αυτή η κατάσταση προκαλεί τη ροή ενός ρεύματος σφάλματος στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, το οποίο μπορεί να καταστρέψει την μόνωση και να οδηγήσει σε σοβαρές βλάβες.

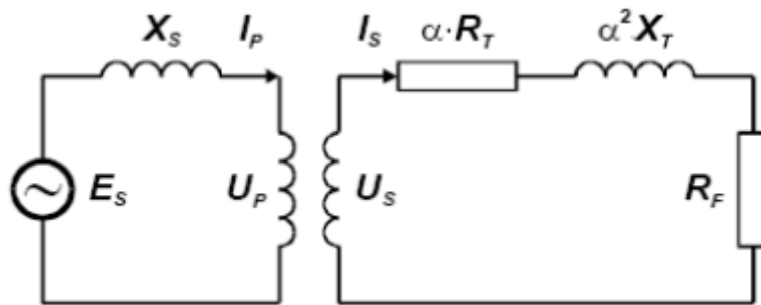
Τα σφάλματα μεταξύ σπειρών είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ανιχνευθούν, ειδικά όταν εμπλέκονται λίγες σπείρες. Αυτό συμβαίνει επειδή οι παραδοσιακές μεθόδους προστασίας, που βασίζονται στη μέτρηση του ρεύματος στα τερματικά του μετασχηματιστή, δύσκολα ανιχνεύουν μικρές αυξήσεις του ρεύματος. Ωστόσο, καθώς το σφάλμα εξαπλώνεται και περισσότερες σπείρες εμπλέκονται στο βραχυκύκλωμα, το



ρεύμα σφάλματος μπορεί να φτάσει 50 έως 100 φορές το ονομαστικό ρεύμα του τυλίγματος. Αυτή η έντονη ροή ρεύματος προκαλεί τοπική υπερθέρμανση, η οποία μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία σπινθήρων και στην αλλαγή της σύστασης του ελαίου μόνωσης.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, η παραγωγή αερίων στο εσωτερικό του μετασχηματιστή είναι ένα σημαντικό σημάδι βλάβης. Επειδή τα ηλεκτρικά συστήματα προστασίας (που βασίζονται σε μετρήσεις ρεύματος) μπορεί να μην ανιχνεύουν το σφάλμα έγκαιρα, προτιμούνται πνευματικά μέσα προστασίας, όπως ανιχνευτές αερίων (Buchholz relay). Αυτά τα συστήματα ανιχνεύουν την παρουσία και την πίεση των αερίων και ενεργοποιούνται ανάλογα, προσφέροντας μια αποτελεσματική λύση για την ανίχνευση τέτοιων σφαλμάτων.

Η ανίχνευση και η αντιμετώπιση των σφαλμάτων μεταξύ σπειρών είναι κρίσιμη για την αποφυγή καταστροφικών βλαβών και τη διατήρηση της αξιοπιστίας του μετασχηματιστή.



Σχήμα 4.5 ισοδύναμο Thevenin του μετασχηματιστή

Όπως είναι φανερό η τάση ανοιχτού κυκλώματος εξαρτάται άμεσα από την θέση του σφάλματος σύμφωνα με την σχέση που ακολουθεί:

$$V_{OC} = \alpha \times U_{SN}$$

Όπου :

$\alpha$  : απόσταση του σφάλματος από τον ουδέτερο.

$U_{SN}$  : πολική τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή.

$R_F$  : αντίσταση σφάλματος.

$R_T$  : ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή.

$X_T$  : εσωτερική αντίδραση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή.

#### 4.4 Ρεύμα σφάλματος παράγοντες που σχετίζονται

την προηγούμενη ενότητα αναλύθηκαν οι καταστροφικές επιπτώσεις του ρεύματος σφάλματος στους μετασχηματιστές ισχύος. Σε αυτή την ενότητα, θα εστιάσουμε στους παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος και πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά τη μελέτη της προστασίας ενός μετασχηματιστή.

- Η ισχύς βραχυκυκλώματος του δικτύου καθορίζει το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να ρέει σε περίπτωση σφάλματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς βραχυκυκλώματος, τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα σφάλματος.
- Τρόπος γείωσης του μετασχηματιστή χρησιμοποιώντας άμεση γείωση, το ρεύμα σφάλματος είναι υψηλό, καθώς δεν υπάρχει τίποτα να περιορίσει τη ροή του ή έμμεσα με την χρήση

αντίστασης ή εμπέδησης για τη γείωση μειώνει το ρεύμα σφάλματος, προσφέροντας μια μορφή προστασίας.

- Η ροή σκέδασης (leakage flux) επηρεάζει την εμπέδηση του μετασχηματιστή και, κατά συνέπεια, το ρεύμα σφάλματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η ροή σκέδασης, τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα σφάλματος.
- Η θέση του σφάλματος στο τύλιγμα επηρεάζει το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος. Για παράδειγμα, αν το σφάλμα συμβεί κοντά στο τερματικό υψηλής τάσης, το ρεύμα σφάλματος θα είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με ένα σφάλμα κοντά στο τερματικό χαμηλής τάσης.

#### 4.5 Μετασχηματιστής με τρίγωνο

Εξετάζουμε την περίπτωση σφάλματος στην πλευρά του τριγώνου σε έναν μετασχηματιστή ισχύος. Το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος επηρεάζεται σημαντικά από τον τρόπο γείωσης του συστήματος. Σε μετασχηματιστές με συνδεσμολογία τριγώνου, η εμπέδηση του σφάλματος (fault impedance) είναι 25-50% υψηλότερη (ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή) όταν το σφάλμα συμβαίνει κοντά στην ένωση δύο τυλιγμάτων.

Αυτή η υψηλότερη εμπέδηση έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα σφάλματος να κατανέμεται ισόποσα μεταξύ των δύο τυλιγμάτων που εμπλέκονται στο σφάλμα. Αυτή η πληροφορία είναι βασικής σημασίας για τον σχεδιασμό του συστήματος προστασίας, καθώς επηρεάζει τις ρυθμίσεις και την αποτελεσματικότητά του.

Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια και η αξιοπιστία του μετασχηματιστή, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη αυτές οι παράμετροι κατά τη μελέτη και την υλοποίηση του συστήματος προστασίας, ιδιαίτερα σε μετασχηματιστές με συνδεσμολογία τριγώνου.

#### 4.6 Συστήματα Προστασίας Μετασχηματιστή

Οι μετασχηματιστές ισχύος είναι από τα πιο σημαντικά και δαπανηρά στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο, όταν προκύπτει ένα σφάλμα, τα συστήματα προστασίας πρέπει να είναι σε θέση να το αξιολογήσουν και να ενεργήσουν εντός των προκαθορισμένων χρόνων, ώστε να διασφαλιστεί η ακεραιότητα και η αξιοπιστία του μετασχηματιστή.

Οι ηλεκτρονόμοι που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές πρέπει να είναι αξιόπιστοι και γρήγοροι, ώστε να αντιδρούν άμεσα σε οποιαδήποτε ανωμαλία. Για την επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρονόμου, λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράμετροι, όπως την ισχύ του μετασχηματιστή και το επίπεδο τάσης.

Επιπλέον, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση συστημάτων επιτήρησης και συσκευών σήμανσης (π.χ., συναγερμοί, διακόπτες), τα οποία θα παρακολουθούν τις συνθήκες λειτουργίας και θα δίνουν ακριβείς εντολές στα συστήματα προστασίας. Αυτά τα συστήματα εξασφαλίζουν ότι οποιαδήποτε ανωμαλία εντοπίζεται και αντιμετωπίζεται έγκαιρα, αποτρέποντας σοβαρές βλάβες.

Όπως αναφέρθηκε, η ισχύς του μετασχηματιστή είναι μια κρίσιμη παράμετρος που καθορίζει τον τύπο και την πολυπλοκότητα των συστημάτων προστασίας. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές ισχύος, ανάλογα με την ισχύ τους.

Προστασία μετασχηματιστή ανάλογα την ισχύ :

Προστασία	Μ.Σ. > 5MVA	Μ.Σ. < 5MVA
Ανίχνευση Αερίων	Διαθέτει	Διαθέτει
Ηλεκτρονόμοι υπερφόρτισης	Διαθέτει	Διαθέτει

Ηλεκτρονόμος υπερέντασης	Διαθέτει	Διαθέτει
Προστασία σε σφάλματα γης	Διαθέτει	Διαθέτει
Επιτηρητής στάθμης λαδιού	Διαθέτει	Δεν διαθέτει
Διαφορική προστασία	Διαθέτει	Δεν διαθέτει
Ηλεκτρονόμος πίεσης (Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο)	Διαθέτει	Δεν διαθέτει

Πίνακας 4.2 Μέσα προστασίας Μ/Σ ανάλογα με την ισχύ τους

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, εκτός από τα κύρια μέσα προστασίας, οι μετασχηματιστές ισχύος που μπορεί να αντιμετωπίσουν υπερτάσεις πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με ένα επιπρόσθετο σύστημα προστασίας, γνωστό ως σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης (Overexcitation protection). Αυτό το σύστημα έχει ως στόχο να προστατεύσει τον μετασχηματιστή από καταστάσεις όπου η τάση ή η συχνότητα υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια, προκαλώντας υπερθέρμανση και ζημιές στον πυρήνα ή τις περιελίξεις.

Όπως φαίνεται από τα προαναφερθέντα, οι μετασχηματιστές πρέπει να προστατεύονται από κάθε είδους σφάλμα, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου τα κύρια μέσα προστασίας δεν λειτουργούν σωστά. Για να εξασφαλιστεί αυτό, εγκαθίστανται δευτερεύοντα μέσα προστασίας (back-up protection), τα οποία ενεργοποιούνται όταν τα κύρια συστήματα αποτύχουν να αντιδράσουν. Αυτά τα δευτερεύοντα συστήματα αποτελούν μια επιπλέον γραμμή άμυνας, εξασφαλίζοντας ότι ο μετασχηματιστής θα προστατευτεί ακόμα και σε ακραίες συνθήκες.

Η χρήση δευτερευόντων μέσων προστασίας είναι απαραίτητη για την αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος, καθώς παρέχει μια διπλή ασφάλεια σε περίπτωση αστοχίας των κύριων συστημάτων. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι ο μετασχηματιστής θα παραμείνει προστατευμένος, ακόμα και αν τα κύρια μέσα προστασίας δεν λειτουργήσουν όπως αναμένεται.

#### 4.7 Μηχανικά μέσα προστασίας

Τα μη ηλεκτρονικά μέσα προστασίας για μετασχηματιστές ισχύος αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για την ασφάλεια και την αξιοπιστία του συστήματος. Αυτά τα μέσα βασίζονται σε μηχανικές ή φυσικές αρχές και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την αντιμετώπιση σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Παρακάτω αναφέρονται τα πιο συνηθισμένα μη ηλεκτρονικά μέσα προστασίας:

- **Ρελε Buchholz**



Σχήμα 4.6 Ρελε Buchholz

Το ρελέ Buchholz είναι μια μηχανική συσκευή που εγκαθίσταται στον αγωγό που συνδέει τον μετασχηματιστή με την δεξαμενή ελαίου. Ανιχνεύει την παραγωγή αερίων ή την ταχεία ροή ελαίου λόγω εσωτερικών σφαλμάτων.

- **Θερμομετρικές συσκευές**

Μετρούν τη θερμοκρασία του ελαίου ή των περιελίξεων. Αν η θερμοκρασία υπερβεί τα επιτρεπτά όρια, ενεργοποιούν συναγερμούς ή διακόπτες.

- **Σύστημα ψύξης**

Ανεμιστήρες και Αντλίες χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή εντός ασφαλών ορίων. Αν το σύστημα ψύξης αποτύχει, μπορεί να ενεργοποιηθεί ένας μηχανικός διακόπτης για να αποφευχθεί υπερθέρμανση.

- **Διακόπτες πίεσης**

Ανιχνεύουν υπερπίεση στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, η οποία μπορεί να προκληθεί από υπερθέρμανση ή παραγωγή αερίων. Απελευθερώνουν την πίεση μέσω μιας βαλβίδας για να αποφευχθεί βλάβη.

- **Επίπεδο ελαίου**

Ανιχνεύουν διαρροές ελαίου ή μείωση του επιπέδου του ελαίου, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μη επαρκή ψύξη και υπερθέρμανση.

- **Αισθητήρες κραδασμών**

Ανιχνεύουν κραδασμούς ή ηχητικούς θορύβους που μπορεί να προκύψουν από εσωτερικά σφάλματα, όπως βραχυκυκλώματα ή μηχανικές βλάβες.

### 4.8 Προστασία υπερθέρμανσης

Η προστασία υπερθέρμανσης είναι ένα βασικό στοιχείο του εξοπλισμού ενός μετασχηματιστή, καθώς η υπερθέρμανση μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες και να μειώσει τη διάρκεια ζωής του. Η υπερθέρμανση μπορεί να προκληθεί από υπερφόρτιση του μετασχηματιστή για μεγάλο χρονικό διάστημα ή από βλάβη στο σύστημα ψύξης.

Σε μετασχηματιστές ελαίου (oil-immersed transformers), το λάδι εκτός από μονωτικό, λειτουργεί και ως απαγωγός θερμότητας. Ωστόσο, ο ρυθμός απόκρισης του ελαίου στις μεταβολές της θερμοκρασίας είναι αργός, καθώς χρειάζονται αρκετές ώρες για να προσαρμοστεί στις νέες συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι μια προσωρινή υπερφόρτιση κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να μην προκαλέσει άμεση υπερθέρμανση, αλλά η συσσωρευμένη θερμότητα μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα με την πάροδο του χρόνου.

Κάθε μετασχηματιστής φέρει στην πινακίδα του μια μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία εξαρτάται από την ισχύ του μετασχηματιστή και τις εξωτερικές συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος). Όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλή, επιτρέπεται μια προσωρινή υπερφόρτιση χωρίς κίνδυνο υπερθέρμανσης. Ωστόσο, σε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, η υπερφόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα:

- Καταστροφή της μόνωσης των τυλιγμάτων.
- Διάσπαση του ελαίου και δημιουργία μικρών εκκενώσεων (ARC).
- Μείωση της διάρκειας ζωής του ελαίου και του μετασχηματιστή.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση συστημάτων προστασίας υπερθέρμανσης, όπως:

- Θερμικοί αισθητήρες παρακολουθούν τη θερμοκρασία των περιελίξεων και του ελαίου.
- Συναγερμοί και διακόπτες ενεργοποιούνται όταν η θερμοκρασία υπερβεί τα επιτρεπτά όρια.
- Συστήματα ψύξης εξασφαλίζουν την αποτελεσματική απομάκρυνση της θερμότητας.

## 4.9 Ηλεκτρικά μέσα προστασίας

Στην προηγούμενη ενότητα, εξετάσαμε τα μη ηλεκτρικά μέσα προστασίας, τα οποία λειτουργούν ανεξάρτητα από τις τιμές της τάσης ή του ρεύματος. Σε αυτή την ενότητα, θα εστιάσουμε στα ηλεκτρικά μέσα προστασίας, τα οποία βασίζονται στις τιμές του ρεύματος και της τάσης για την ανίχνευση και την αντιμετώπιση σφαλμάτων. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται ευρέως στους μετασχηματιστές ισχύος και αποτελούν βασικό κομμάτι της προστασίας τους.

### 4.9.1 Διαφορική προστασία μετασχηματιστών

Η διαφορική προστασία είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους προστασίας για μετασχηματιστές ισχύος, ειδικά για μετασχηματιστές με ισχύ άνω των 5 MVA. Στον 1ο νόμο του Kirchhoff, ο οποίος ορίζει ότι το άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται σε έναν κόμβο ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων που εξέρχονται από αυτόν. Αυτή η αρχή εφαρμόζεται για την ανίχνευση και την απομόνωση σφαλμάτων εντός μιας καθορισμένης ζώνης προστασίας.

Η διαφορική προστασία λειτουργεί συγκρίνοντας τα ρεύματα που εισέρχονται και εξέρχονται από τον μετασχηματιστή.

Μέτρηση (η μέτρηση πραγματοποιείται με την υποστήριξη μετασχηματιστών εντάσεως CTs) και σύγκριση ρευμάτων εισόδου και εξόδου. Υπό κανονικές συνθήκες το άθροισμα τους πρέπει να είναι μηδέν σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του Νεύτωνα. Αν υπάρξει διαφορά μεταξύ των μετρήσεων υποδηλώνεται η ύπαρξη σφάλματος. Με την ενεργοποίηση του διαφορικού ρελέ απομονώνουμε το σφάλμα (δεν επιτρέπει να συνεχίσει στο δίκτυο αποτρέποντας περαιτέρω ζημιές).

Η διαφορική προστασία είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους προστασίας για μετασχηματιστές ισχύος, ιδιαίτερα για μετασχηματιστές με ισχύ άνω των 5 MVA. Τα κύρια πλεονεκτήματά της είναι:

- Επιλεκτικότητα έως 100%

Η διαφορική προστασία ανταποκρίνεται αποκλειστικά σε σφάλματα που συμβαίνουν εντός της ζώνης προστασίας (π.χ., εντός του μετασχηματιστή). Αυτή η επιλεκτικότητα είναι το κύριο πλεονέκτημά της και την καθιστά ιδανική ως κύριο μέσο προστασίας για μετασχηματιστές ισχύος.

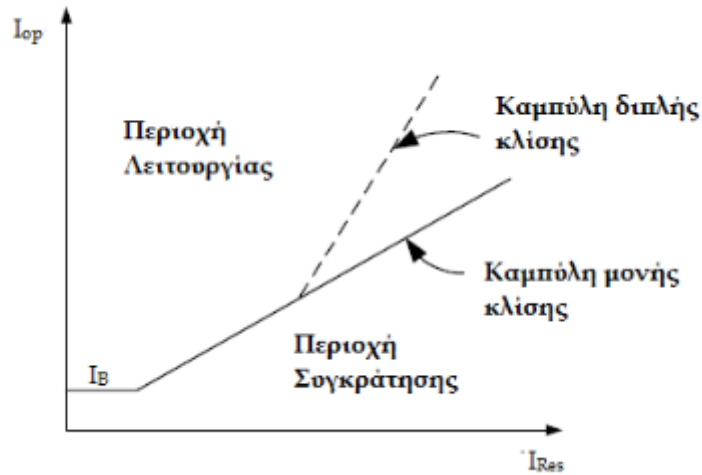
- Γρήγορη Απόκριση

Σε περίπτωση σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας, η διαφορική προστασία ενεργοποιείται ακαριαία, απομονώνοντας τον μετασχηματιστή από το δίκτυο. Αυτό εξασφαλίζει ότι ο μετασχηματιστής προστατεύεται από σοβαρά σφάλματα, όπως βραχυκυκλώματα ή φάση-γης βλάβες.

Η διαφορική προστασία βασίζεται στη σύγκριση των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται από τον μετασχηματιστή. Συγκρίνονται τα διανύσματα των ρευμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το μέγεθος όσο και τη φάση. Για να θεωρείται ορθή η μέτρηση ότι τα ρεύματα που εισέρχονται στην ζώνη είναι θετικά και τα ρεύματα που εξέρχονται έχουν αρνητικό πρόσημο. Σε κανονικές συνθήκες, το άθροισμα των ρευμάτων εισόδου και εξόδου είναι μηδέν. Αν υπάρξει διαφορά, αυτό υποδηλώνει την ύπαρξη σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας, και το διαφορικό ρελέ ενεργοποιείται για απομόνωση του σφάλματος.

$$\Delta I = I_{OP} = I_1 + I_2 \neq 0 \quad (4.1)$$

Η διαφορική προστασία περιλαμβάνει ένα ελάχιστο όριο ενεργοποίησης  $I_B$ , το οποίο ρυθμίζεται με βάση το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να προκύψει λόγω των μετασχηματιστών ρεύματος (Μ/Σ εντάσεως) κατά τη διέλευση του μέγιστου ρεύματος εκτός της ζώνης προστασίας. Αυτό το κατώφλι εξασφαλίζει ότι ο ηλεκτρονόμος δεν ενεργοποιείται λόγω μικρών ανισοροπιών ή ψευδών σημάτων.



Σχήμα 4.7 Καμπύλη διαφορικής προστασίας [24]

Καμπύλη διαφορικής προστασίας χωρίζει την περιοχή λειτουργίας σε δύο μέρη :

- Περιοχή συγκράτησης, όταν το διαφορικό ρεύμα και το ρεύμα συγκράτησης βρίσκονται κάτω από την καμπύλη, ο ηλεκτρονόμος δεν ενεργοποιείται. Αυτή η περιοχή αντιστοιχεί σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας ή σε μικρές ανισοροπίες που δεν αποτελούν σφάλματα.
- Περιοχή λειτουργίας, όταν το διαφορικό ρεύμα και το ρεύμα συγκράτησης βρίσκονται πάνω από την καμπύλη, ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται. Αυτή η περιοχή αντιστοιχεί σε πραγματικά σφάλματα εντός της ζώνης προστασίας.

Ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας συγκρίνει συνεχώς το διαφορικό ρεύμα (η διαφορά μεταξύ των ρευμάτων εισόδου και εξόδου). Το ρεύμα συγκράτησης (που προκύπτει από το πηνίο συγκράτησης και λειτουργεί ως ρυθμιστικός παράγοντας).

Στην περίπτωση που η σύγκριση δείξει ότι τα ρεύματα βρίσκονται κάτω από την καμπύλη, ο ηλεκτρονόμος παραμένει αδρανής. Αν τα ρεύματα βρίσκονται πάνω από την καμπύλη, ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται και απομονώνει τον μετασχηματιστή.

Η εξίσωση που περιγράφει το ρεύμα συγκράτησης είναι:

$$I_{RES} = K_1 \times (I_1 - I_2) \quad , \quad K_1 = \frac{W_1}{W_2} \quad (4.2)$$

Όπου :

$I_{RES}$  Απαρτίζει το ρεύμα συγκράτησης.

$K_1$  Είναι μια σταθερά που προκύπτει από τον λόγο τυλιγμάτων των πηνίων.

$I_1$  και  $I_2$  είναι τα ρεύματα εισόδου και εξόδου, αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται από την εξίσωση, το ρεύμα συγκράτησης  $I_{RES}$  αντιστοιχεί στο αλγεβρικό άθροισμα ανά φάση των ρευμάτων που προέρχονται από τους μετασχηματιστές εντάσεως (CTs). Αυτό το ρεύμα

χρησιμοποιείται για την ανίχνευση σφαλμάτων εκτός της ζώνης προστασίας, όπου η διαφορά μεταξύ των ρευμάτων εισόδου και εξόδου είναι μικρή και δεν αποτελεί πραγματικό σφάλμα.

Από την άλλη πλευρά, σε περίπτωση σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας, το ρεύμα λειτουργίας  $I_{OP}$  περιγράφεται από μια διαφορετική εξίσωση. Αυτό το ρεύμα αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ των ρευμάτων εισόδου και εξόδου, η οποία είναι σημαντική και υποδηλώνει την ύπαρξη σφάλματος.

$$I_{OP} = K_2 \times (I_1 + I_2) \quad (4.3)$$

Κατά συνέπεια, το βασικό κριτήριο ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου είναι:

$$I_{OP} > I_{RES}$$

$$K_2 \times (I_1 + I_2) > K_1 \times (I_1 - I_2) \quad (4.4)$$

Στις ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου λαμβάνεται υπόψη το ρεύμα κατωφλίου  $I_B$

$$|I_1 + I_2| > K \times |I_1 - I_2| - I_B \quad , \quad K = K \frac{K_1}{K_2} \quad (4.5)$$

Όπου  $K$  ο παράγοντας συγκράτησης και αναφέρεται στην κλίση συγκυ παράτης καμπύλης. Τυπικές τιμές από 0.3 έως 0.8. Στις νεότερες εκδόσεις ηλεκτρονόμων η ρύθμιση  $I_B$  είναι μια ξεχωριστή ρύθμιση οπότε δεν λαμβάνεται υπόψη στην παραπάνω εξίσωση.

Για να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας είναι :

$$I_{OP} = K \times I_{RES} \quad , \quad I_{OP} > I_B \quad (4.6)$$

#### 4.10 Παράγοντες που επηρεάζουν την ορθή λειτουργία της διαφορικής προστασίας

Η ορθή λειτουργία της διαφορικής προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τεχνικούς, λειτουργικούς και περιβαλλοντικούς. Ακολουθεί μια ανάλυση των κύριων παραγόντων:

- Τεχνικοί παράγοντες

Ακρίβεια των MET (Μετασχηματιστών Έντασης): Η διαφορική προστασία βασίζεται στην σύγκριση των ρευμάτων στην είσοδο και έξοδο του μετασχηματιστή. Εάν τα MET δεν είναι ακριβή ή δεν είναι σωστά βαθμονομημένα, μπορεί να προκληθούν ψευδή διαφορικά ρεύματα, οδηγώντας σε εσφαλμένη λειτουργία της προστασίας.

Συμμετρία των MET: Τα MET πρέπει να έχουν την ίδια αναλογία μετασχηματισμού και να είναι σωστά συνδεδεμένα. Η ασυμμετρία μπορεί να προκαλέσει ανισορροπία στα ρεύματα, επιδεινώνοντας την ακρίβεια της προστασίας.

Χαρακτηριστικά του Μετασχηματιστή: Η μαγνητική ροή, οι απώλειες και οι μεταβατικές καταστάσεις (π.χ. εναλλαγές φορτίου, εσωτερικά βραχυκυκλώματα) μπορούν να επηρεάσουν την απόκριση της διαφορικής προστασίας.

Ρυθμίσεις της Προστασίας: Η σωστή ρύθμιση των παραμέτρων (π.χ. ρεύμα λειτουργίας, χρόνος απόκρισης) είναι κρίσιμη για την αποφυγή εσφαλμένων ενεργοποιήσεων ή αποτυχίας λειτουργίας.

- Λειτουργικοί παράγοντες

Φορτίο και Λειτουργικές Συνθήκες: Η διαφορική προστασία πρέπει να λειτουργεί σωστά υπό όλες τις συνθήκες φορτίου, συμπεριλαμβανομένων των υπερφορτίων και των χαμηλών φορτίων. Οι μεταβολές στο φορτίο μπορούν να επηρεάσουν τα ρεύματα και να προκαλέσουν ψευδείς ενεργοποιήσεις.

**Μεταβατικές Καταστάσεις:** Οι μεταβατικές καταστάσεις, όπως η ενεργοποίηση του μετασχηματιστή (inrush currents) ή τα εξωτερικά βραχυκυκλώματα, μπορούν να προκαλέσουν υψηλά ρεύματα που μπορεί να ερμηνευθούν λανθασμένα ως εσωτερικά βραχυκυκλώματα.

**Ανισορροπία Φάσεων:** Η ανισορροπία στις φάσεις μπορεί να οδηγήσει σε ανισορροπία στα ρεύματα, επηρεάζοντας την απόκριση της διαφορικής προστασίας.

- Περιβαλλοντολογικοί παράγοντες

**Θερμοκρασία:** Οι αλλαγές στη θερμοκρασία μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των MET και του μετασχηματιστή, επηρεάζοντας έμμεσα τη διαφορική προστασία.

**Επαγωγικές Επιδράσεις:** Η παρουσία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών ή κεραυνών μπορεί να προκαλέσει μεταβατικές τάσεις που επηρεάζουν τη λειτουργία της προστασίας.

**Φυσική Κατάσταση του Εξοπλισμού:** Η φθορά, η ηλικία ή η κακή συντήρηση των MET, των καλωδίων και του μετασχηματιστή μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία της διαφορικής προστασίας.

- Σχεδιαστικό μοντέλο

**Σχεδιασμός του Συστήματος Προστασίας:** Η σωστή επιλογή και σχεδίαση του συστήματος διαφορικής προστασίας, συμπεριλαμβανομένων των αλγορίθμων και της λογικής λειτουργίας, είναι κρίσιμη για την αποφυγή εσφαλμένων ενεργοποιήσεων.

**Συντήρηση και Δοκιμές:** Η τακτική συντήρηση και οι περιοδικές δοκιμές εξασφαλίζουν ότι η διαφορική προστασία λειτουργεί σωστά και ανιχνεύει τυχόν προβλήματα πριν αυτά οδηγήσουν σε σοβαρές βλάβες.

- Εξωτερικός παράγοντας

**Επιδράσεις από Άλλα Συστήματα Προστασίας:** Η αλληλεπίδραση με άλλα συστήματα προστασίας ή ρελέ στο δίκτυο μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία της διαφορικής προστασίας.

**Αλλαγές στο Δίκτυο:** Οι αλλαγές στη διαμόρφωση του δικτύου (π.χ. νέοι μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς) μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά της διαφορικής προστασίας.

### 4.11 Ρεύμα μαγνήτισης

Το ρεύμα μαγνήτισης (inrush current) που εμφανίζεται κατά την ενεργοποίηση ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι ένα σημαντικό φαινόμενο που μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία του συστήματος και ιδιαίτερα τη διαφορική προστασία. Ας αναλύσουμε αναλυτικά αυτή τη διαδικασία και τις επιπτώσεις της:

- Φυσικό φαινόμενο

Όταν ένας μετασχηματιστής ισχύος ενεργοποιείται για πρώτη φορά ή επαναενεργοποιείται μετά από μια περίοδο αδράνειας, η μαγνητική ροή στον πυρήνα του μετασχηματιστή δεν ξεκινά από το μηδέν. Αυτό συμβαίνει λόγω του παραμένουτος μαγνητισμού (residual magnetism,  $\Phi_{Rem}$ ), που μπορεί να φτάσει έως και το 80% της ονομαστικής μαγνητικής ροής. Η μαγνητική ροή στον πυρήνα προσπαθεί να φτάσει σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κορεσμό του πυρήνα εάν η συνολική ροή υπερβεί την τιμή κορεσμού.

- Ρεύμα μαγνήτισης

Κατά την ενεργοποίηση, η μαγνητική ροή στον πυρήνα αυξάνεται από το  $\Phi_{REM}$  προς την τιμή ισορροπίας. Αυτή η απότομη αλλαγή προκαλεί την εμφάνιση ενός μεγάλου ρεύματος μαγνήτισης, το



οποίο μπορεί να είναι 5 έως 10 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή. Το ρεύμα αυτό είναι μη ημιτονοειδές και περιέχει άρτιες αρμονικές, κυρίως την 2η αρμονική.

- Αρμονικές συνιστώσες

Το ρεύμα μαγνήτισης χαρακτηρίζεται από την παρουσία άρτιων αρμονικών, με κυρίαρχη την 2η αρμονική. Αυτή η χαρακτηριστική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση του ρεύματος μαγνήτισης από ένα πραγματικό εσωτερικό βραχυκύκλωμα, το οποίο συνήθως περιέχει περιττές αρμονικές (3η, 5η, κ.λπ.).

- Επιπτώσεις

Η διαφορική προστασία βασίζεται στη σύγκριση των ρευμάτων στην είσοδο και έξοδο του μετασχηματιστή. Όταν εμφανίζεται ρεύμα μαγνήτισης, η διαφορά μεταξύ των ρευμάτων μπορεί να είναι τόσο μεγάλη που να προκαλεί ψευδή ενεργοποίηση της προστασίας. Για να αποφευχθεί αυτό, τα σύγχρονα συστήματα διαφορικής προστασίας χρησιμοποιούν αλγόριθμους που βασίζονται στην ανίχνευση της 2ης αρμονικής για να διακρίνουν το ρεύμα μαγνήτισης από ένα πραγματικό βραχυκύκλωμα.

- Παράγοντες που επηρεάζουν το ρεύμα μαγνήτισης

Όσο μεγαλύτερος είναι ο παραμένον μαγνητισμός ( $\Phi_{REM}$ ), τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα μαγνήτισης.

Η χρονική στιγμή θα μπορούσε να ήταν καθοριστική όταν η φάση της τάσης κατά την ενεργοποίηση καθορίζει το μέγεθος του ρεύματος μαγνήτισης. Η χειρότερη περίπτωση είναι όταν η τάση εφαρμόζεται στη στιγμή που περνά από το μηδέν.

Οι ιδιότητες του πυρήνα (π.χ. υλικό, σχήμα) επηρεάζουν την απόκριση στη μαγνήτιση.

- Αντιμετώπιση

Για να αποφευχθούν οι ψευδείς ενεργοποιήσεις της διαφορικής προστασίας λόγω ρεύματος μαγνήτισης, μπορούν να ληφθούν κάποια μέτρα.

Τα ρελέ διαφορικής προστασίας μπορούν να ρυθμιστούν να αγνοούν τα ρεύματα που περιέχουν υψηλά ποσοστά 2ης αρμονικής.

Η ενεργοποίηση της προστασίας μπορεί να καθυστερήσει ελαφρά για να αποφευχθεί η επίδραση του ρεύματος μαγνήτισης.

Η ενεργοποίηση του μετασχηματιστή σε μια συγκεκριμένη φάση της τάσης μπορεί να μειώσει το ρεύμα μαγνήτισης.

- Εν κατακλείδα

Το ρεύμα μαγνήτισης είναι ένα φυσικό φαινόμενο που συμβαίνει κατά την ενεργοποίηση ή επανενεργοποίηση ενός μετασχηματιστή ισχύος. Ενώ μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη διαφορική προστασία, η χρήση κατάλληλων αλγορίθμων και ρυθμίσεων μπορεί να εξασφαλίσει την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Η κατανόηση αυτού του φαινομένου είναι απαραίτητη για τη σωστή σχεδίαση και λειτουργία των συστημάτων προστασίας.

## 4.12 Υπερδιέγερση

Η υπερδιέγερση είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί υπό συνθήκες υπέρτασης ή υποσυχνότητας. Αυτές οι συνθήκες οδηγούν σε αύξηση της μαγνητικής ροής στον πυρήνα, η οποία μπορεί να προκαλέσει κορεσμό του πυρήνα και σημαντική αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης. Ας εξετάσουμε αναλυτικά αυτό το φαινόμενο και τις επιπτώσεις του:

Όταν η τάση αυξηθεί (υπέρταση) ή η συχνότητα μειωθεί (υποσυχνότητα), η μαγνητική ροή στον πυρήνα αυξάνεται. Αν αυτή η αύξηση ξεπεράσει την τιμή κορεσμού του πυρήνα, ο πυρήνας κορεύεται, με αποτέλεσμα να αυξηθεί δραματικά το ρεύμα μαγνήτισης.

Η μαγνητική ροή ( $\Phi$ ) στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{V}{4.44 \times f \times N \times A} \quad (4.7)$$

V η εφαρμοζόμενη τάση

F συχνότητα

N ο αριθμός στροφών

A επιφάνεια διατομής του πυρήνα

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η μαγνητική ροή είναι ανάλογη της τάσης και δυσανάλογη της συχνότητας.

Συνέπειες υπερδιέγερσης :

- Αύξηση του Ρεύματος Μαγνήτισης: Όταν ο πυρήνας κορεστεί, το ρεύμα μαγνήτισης αυξάνεται δραματικά. Για παράδειγμα, σε περίπτωση υπέρτασης κατά 20%, το ρεύμα μαγνήτισης μπορεί να φτάσει έως και 10 φορές την ονομαστική του τιμή.
- Εμφάνιση Περιττών Αρμονικών: Η μη γραμμική συμπεριφορά του πυρήνα λόγω κορεσμού οδηγεί στην εμφάνιση περιττών αρμονικών, κυρίως της 3ης και 5ης τάξης. Αυτές οι αρμονικές μπορούν να προκαλέσουν πρόβλημα στην ποιότητα της τάσης και να επηρεάσουν άλλα συστήματα στο δίκτυο.
- Θερμική Υπερφόρτωση: Η αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης οδηγεί σε αύξηση των απωλειών στον πυρήνα και στα πηνία, με αποτέλεσμα τη θερμική υπερφόρτωση του μετασχηματιστή.
- Κίνδυνος Βλάβης: Η παρατεταμένη υπερδιέγερση μπορεί να προκαλέσει ζημιά στον πυρήνα, στα πηνία ή στα μονωτικά υλικά του μετασχηματιστή.

Για να μπορέσουμε να αντιμετωπίσουμε την υπερδιέγερση μπορούμε να εφαρμόσουμε προστασία τα ρελέ προστασίας μπορούν να παρακολουθούν την αναλογία  $V/f$  Αν αυτή η αναλογία ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή, το ρελέ μπορεί να αποσυνδέσει τον μετασχηματιστή.

#### 4.13 Διόρθωση ολίσθησης φάσεων και εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας

Ο ρόλος των μετασχηματιστών εντάσεως στη διαφορική προστασία είναι κρίσιμος, καθώς αυτοί εξασφαλίζουν τη σωστή μέτρηση και σύγκριση των ρευμάτων στην είσοδο και έξοδο του μετασχηματιστή ισχύος. Για να λειτουργήσει η διαφορική προστασία αποτελεσματικά και να αποφευχθούν λανθασμένες ενεργοποιήσεις, οι μετασχηματιστές εντάσεως πρέπει να πληρούν ορισμένες απαιτήσεις και να συνδέονται με συγκεκριμένο τρόπο.

- Τύπος των μετασχηματιστών εντάσεως

Ίδιος Τύπος και Λόγος Μετασχηματισμού: Οι μετασχηματιστές εντάσεως πρέπει να είναι ίδιου τύπου και να έχουν ίδιο λόγο μετασχηματισμού. Αν οι MET έχουν διαφορετικές κλάσεις ή διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες, μπορεί να φτάσουν σε διαφορετικά σημεία κορεσμού, γεγονός που θα οδηγήσει σε ανισοροπία στα ρεύματα και πιθανή λανθασμένη ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας.

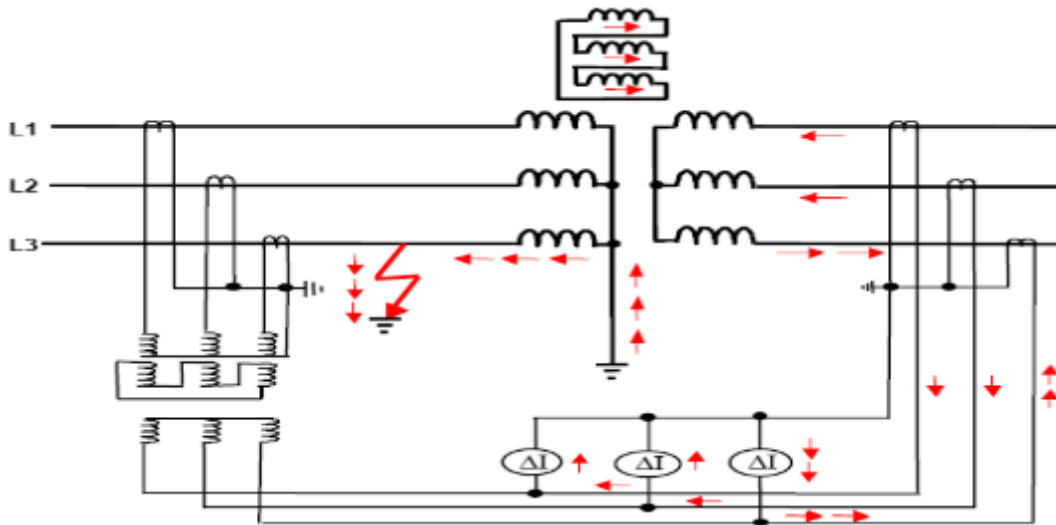
Ενδιάμεσοι Μετασχηματιστές Εντάσεως: Σε παλαιότερα συστήματα με στατικά ή ηλεκτρομηχανικά ρελέ, χρησιμοποιούνταν ενδιάμεσοι μετασχηματιστές εντάσεως για να ταιριάξουν τα χαρακτηριστικά των MT και να αποφευχθούν προβλήματα κορεσμού ή ολίσθησης φάσης. Στα σύγχρονα ψηφιακά

συστήματα, οι ενδιάμεσοι μετασχηματιστές δεν χρειάζονται, καθώς οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτά τα ζητήματα μέσω λογισμικού.

- Εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας

Σύνδεση σε Τρίγωνο: Σε συστήματα όπου χρησιμοποιούνταν ενδιάμεσοι μετασχηματιστές εντάσεως, η σύνδεσή τους σε τρίγωνο εξασφάλιζε την εγκλωβισμό της μηδενικής ακολουθίας σε περίπτωση εξωτερικού σφάλματος με γη. Αυτό αποτρέπει τη διέλευση της μηδενικής ακολουθίας μέσω του κυκλώματος της διαφορικής προστασίας, αποφεύγοντας έτσι λανθασμένες ενεργοποιήσεις.

Ψηφιακή Εξάλειψη: Στα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα, η εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας γίνεται μέσω αλγορίθμων λογισμικού, χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων μετασχηματιστών.



Σχήμα 4.8 Εξάλειψη μηδενικής ακολουθίας (σε σφάλμα με γη) με χρήση ενδιάμεσων Μ/Σ εντάσεως

- Κατάλληλη σύνδεση των μετασχηματιστών εντάσεως

Αντιστάθμιση Ολίσθησης Φάσης: Όταν ο μετασχηματιστής ισχύος έχει συνδεσμολογία αστέρα-τρίγωνο (Y-Δ), εμφανίζεται ολίσθηση φάσης  $30^\circ$  μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Για να αντισταθμιστεί αυτή η ολίσθηση, οι μετασχηματιστές εντάσεως πρέπει να συνδέονται με αντίστροφο τρόπο από τη συνδεσμολογία του μετασχηματιστή ισχύος.

Αν ο μετασχηματιστής ισχύος είναι συνδεδεμένος σε αστέρα (Y) στην πλευρά υψηλής τάσης και σε τρίγωνο (Δ) στην πλευρά χαμηλής τάσης, οι μετασχηματιστές εντάσεως στην πλευρά υψηλής τάσης πρέπει να συνδέονται σε τρίγωνο (Δ), ενώ στην πλευρά χαμηλής τάσης σε αστέρα (Y).

- Απαιτήσεις επιτυχημένης λειτουργίας διαφορικής προστασίας

Η σωστή επιλογή και σύνδεση των μετασχηματιστών εντάσεως αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιόπιστη λειτουργία της διαφορικής προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος. Οι μετασχηματιστών εντάσεως πρέπει να είναι ίδιου τύπου και λόγου μετασχηματισμού, ενώ η σύνδεσή τους πρέπει να γίνεται με τρόπο που αντισταθμίζει την ολίσθηση φάσης, ειδικά σε περιπτώσεις συνδεσμολογίας αστέρα-τρίγωνο (Y-Δ). Επιπλέον, η εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας, είτε μέσω σύνδεσης σε τρίγωνο είτε με ψηφιακούς αλγορίθμους, αποτρέπει λανθασμένες ενεργοποιήσεις της προστασίας. Με αυτές τις προφυλάξεις, η διαφορική προστασία μπορεί να αντιδρά ακριβώς και να προστατεύει αποτελεσματικά τον μετασχηματιστή ισχύος από εσωτερικές βλάβες, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του συστήματος.

#### 4.14 Κορεσμός μετασχηματιστών εντάσεως

Ο κορεσμός σε μετασχηματιστές ισχύος είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν η μαγνητική ροή στον πυρήνα του μετασχηματιστή φτάσει σε ένα σημείο όπου δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, ανεξάρτητα από την αύξηση του μαγνητικού πεδίου. Αυτό οφείλεται στις φυσικές ιδιότητες του υλικού του πυρήνα, το οποίο έχει ένα όριο κορεσμού. Ο κορεσμός μπορεί να προκληθεί τόσο από συνεχές ρεύμα (DC) όσο και από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), αν και οι μηχανισμοί και οι συνέπειες διαφέρουν. Ας αναλύσουμε τα δύο είδη κορεσμού:

- Κορεσμός από συνεχές ρεύμα

Ο κορεσμός από συνεχές ρεύμα (DC κορεσμός) σε μετασχηματιστές ισχύος είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν μια συνεχής συνιστώσα ρεύματος (DC offset) εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Αυτή η συνεχής συνιστώσα μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως ασύμμετρα ρεύματα κατά τη διάρκεια ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων, επαγωγή DC από συστήματα HVDC (High Voltage Direct Current) ή ακόμα και από γεωμαγνητικές καταιγίδες που επηρεάζουν τα ηλεκτρικά δίκτυα. Η παρουσία της DC συνιστώσας μετατοπίζει το σημείο λειτουργίας του πυρήνα προς την περιοχή κορεσμού, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα του μετασχηματιστή και αυξάνοντας δραματικά το ρεύμα μαγνήτισης. Αυτό οδηγεί σε θερμική υπερφόρτωση, αύξηση των απωλειών και την εμφάνιση περιττών αρμονικών (3η, 5η, κ.λπ.), οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα της τάσης και να προκαλέσουν ζημιές σε άλλα στοιχεία του δικτύου. Για την αντιμετώπιση του DC κορεσμού, χρησιμοποιούνται μέτρα όπως η απομάκρυνση της DC συνιστώσας με πυκνωτές ή εξειδικευμένα φίλτρα, καθώς και η χρήση ψηφιακών συστημάτων προστασίας που μπορούν να ανιχνεύσουν και να αντισταθμίσουν τη συνεχή συνιστώσα. Η σωστή σχεδίαση του πυρήνα και η χρήση υλικών υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας αποτελούν επίσης βασικά στοιχεία για τη μείωση του κινδύνου κορεσμού.

- Κορεσμός από εναλλασσόμενο ρεύμα

Ο κορεσμός από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC κορεσμός) σε μετασχηματιστές ισχύος είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει όταν η μαγνητική ροή στον πυρήνα ξεπεράσει την τιμή κορεσμού λόγω υπέρτασης ή υποσυχνότητας. Αυτό οφείλεται στη σχέση  $\Phi \propto V/f$ , όπου η ροή  $\Phi$  αυξάνεται αν η τάση  $V$  αυξηθεί ή η συχνότητα  $f$  μειωθεί. Ο κορεσμός προκαλεί δραματική αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης, θερμική υπερφόρτωση και εμφάνιση περιττών αρμονικών (3η, 5η, κ.λπ.), οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα της τάσης και να προκαλέσουν ζημιές σε άλλα στοιχεία του δικτύου. Για την αντιμετώπιση του AC κορεσμού, χρησιμοποιούνται μέτρα όπως η παρακολούθηση της αναλογίας τάσης-συχνότητας  $V/f$ , η ελεγχόμενη ενεργοποίηση του μετασχηματιστή και η χρήση ψηφιακών συστημάτων προστασίας που ανιχνεύουν και αντιμετωπίζουν τον κορεσμό μέσω αλγορίθμων. Επίσης, η σωστή σχεδίαση του πυρήνα με υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας αποτελεί βασικό στοιχείο για τη μείωση του κινδύνου. Με αυτά τα μέτρα, εξασφαλίζεται η αξιόπιστη και αποτελεσματική λειτουργία του μετασχηματιστή.

- Συνέπιες κορεσμού

Ο κορεσμός σε μετασχηματιστές ισχύος είναι ένα κρίσιμο φαινόμενο που επηρεάζει τη σταθερότητα και την απόδοση του συστήματος. Όταν ο πυρήνας του μετασχηματιστή φτάσει στο σημείο κορεσμού, η μαγνητική του διαπερατότητα μειώνεται δραματικά, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης και την εμφάνιση περιττών αρμονικών. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε σε συνεχή συνιστώσα ρεύματος (DC κορεσμός), όπως σε περιπτώσεις ασύμμετρων βραχυκυκλωμάτων ή επαγωγής DC, είτε σε υπέρταση ή υποσυχνότητα (AC κορεσμός), όπου η μαγνητική ροή ξεπερνά την ονομαστική της τιμή. Ο κορεσμός προκαλεί θερμική υπερφόρτωση, μηχανικές καταπονήσεις και μπορεί

να οδηγήσει σε λανθασμένες ενεργοποιήσεις προστασιών. Για την αντιμετώπιση του κορεσμού, απαιτείται η χρήση κατάλληλων μέτρων, όπως η παρακολούθηση της αναλογίας τάσης-συχνότητας  $V/f$ , η απομάκρυνση της συνεχούς συνιστώσας και η σωστή σχεδίαση του πυρήνα, ώστε να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία του μετασχηματιστή και του συστήματος γενικότερα.

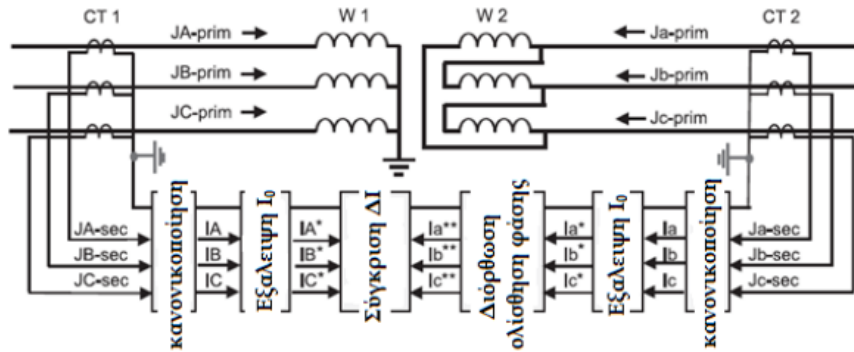
- Αντιμετώπιση κορεσμού

Για την αντιμετώπιση του κορεσμού σε μετασχηματιστές ισχύος, είναι απαραίτητη η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων που εξασφαλίζουν τη σταθερή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Ένα από τα βασικά μέτρα είναι η παρακολούθηση της αναλογίας τάσης-συχνότητας  $V/f$ , η οποία αποτρέπει τον κορεσμό λόγω υπέρτασης ή υποσυχνότητας. Επίσης, σε περιπτώσεις όπου υπάρχει κίνδυνος DC κορεσμού λόγω συνεχούς συνιστώσας ρεύματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συσκευές απομάκρυνσης της DC συνιστώσας, όπως πυκνωτές ή εξειδικευμένα φίλτρα. Η σωστή σχεδίαση του πυρήνα με υλικά υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας και υψηλού σημείου κορεσμού είναι επίσης καθοριστική για τη μείωση του κινδύνου. Επιπλέον, η χρήση ψηφιακών συστημάτων προστασίας που ενσωματώνουν αλγόριθμους ανίχνευσης και αντιμετώπισης του κορεσμού αποτελεί μια σύγχρονη και αποτελεσματική λύση. Τέλος, η ελεγχόμενη ενεργοποίηση του μετασχηματιστή, όπου η τάση εφαρμόζεται σε μια συγκεκριμένη φάση, μπορεί να μειώσει σημαντικά το ρεύμα μαγνήτισης κατά την εκκίνηση, αποτρέποντας έτσι τον κορεσμό. Με αυτά τα μέτρα, εξασφαλίζεται η μακροχρόνια αξιοπιστία και η αποτελεσματική λειτουργία του μετασχηματιστή.

#### 4.15 Διαφορική προστασία με χρήση ψηφιακών ηλεκτρονόμων

Η διαφορική προστασία με χρήση ψηφιακών ηλεκτρονόμων (Numerical Differential Protection) αποτελεί μια σύγχρονη και εξελιγμένη τεχνολογία προστασίας μετασχηματιστών ισχύος. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ηλεκτρομηχανικά ή στατικά ρελέ, οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι βασίζονται σε ψηφιακή επεξεργασία σημάτων και αλγόριθμους λογισμικού για την ανίχνευση και αντιμετώπιση βλαβών. Η διαφορική προστασία με ψηφιακούς ηλεκτρονόμους συγκρίνει τα ρεύματα στην είσοδο και έξοδο του μετασχηματιστή, αναζητώντας διαφορές που υποδεικνύουν την ύπαρξη εσωτερικής βλάβης, όπως βραχυκύκλωμα μεταξύ των τυλιγμάτων ή στον πυρήνα.

- Ακριβής Ανίχνευση: Οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούν υψηλή δειγματοληψία και αλγόριθμους για την ακριβή μέτρηση και σύγκριση των ρευμάτων, μειώνοντας τις πιθανότητες λανθασμένων ενεργοποιήσεων.
- Ανίχνευση Αρμονικών: Μπορούν να αναγνωρίσουν και να διακρίνουν το ρεύμα μαγνήτισης (inrush current) από ένα πραγματικό βραχυκύκλωμα, χρησιμοποιώντας την ανάλυση αρμονικών (π.χ. 2η αρμονική για inrush current).
- Εξάλειψη Μηδενικής Ακολουθίας: Μέσω λογισμικού, οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι μπορούν να εξαλείψουν τη μηδενική ακολουθία, χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων μετασχηματιστών.
- Αντιστάθμιση Ολίσθησης Φάσης: Οι αλγόριθμοι μπορούν να αντισταθμίσουν την ολίσθηση φάσης που προκύπτει από συνδεσμολογίες αστέρα-τρίγωνο (Y-Δ) στον μετασχηματιστή.
- Αυτοδιαγνωστική και Παρακολούθηση: Οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι προσφέρουν δυνατότητες αυτοδιαγνωστικού ελέγχου και συνεχούς παρακολούθησης της κατάστασης του συστήματος.



Σχήμα 4.9 Ψηφιακός H/N διαφορικής προστασίας

Τα πλεονεκτήματα της διαφορικής προστασίας με χρήση ψηφιακών ηλεκτρονόμων (Numerical Differential Protection) είναι πολυάριθμα και σημαντικά για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και αποτελεσματικότητας των συστημάτων προστασίας. Πρώτον, οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι προσφέρουν υψηλή ακρίβεια στην ανίχνευση βλαβών, χάρη στην προηγμένη ψηφιακή επεξεργασία σημάτων και τους εύελκτους αλγορίθμους. Δεύτερον, μπορούν να διακρίνουν το ρεύμα μαγνήτισης (inrush current) από πραγματικά βραχυκυκλώματα, χρησιμοποιώντας ανάλυση αρμονικών, όπως την 2η αρμονική, μειώνοντας έτσι τις λανθασμένες ενεργοποιήσεις. Τρίτον, εξαλείφουν την ανάγκη χρήσης ενδιάμεσων μετασχηματιστών εντάσεως, καθώς η εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας και η αντιστάθμιση της ολισθήσεως φάσης γίνονται μέσω λογισμικού, μειώνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης. Τέλος, οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι προσφέρουν δυνατότητες αυτοδιαγνωστικού ελέγχου και συνεχούς παρακολούθησης, ενισχύοντας τη διαχείριση και τη συντήρηση του συστήματος. Με αυτά τα πλεονεκτήματα, η διαφορική προστασία με ψηφιακούς ηλεκτρονόμους εξασφαλίζει αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία, ιδιαίτερα σε κρίσιμες εφαρμογές όπως μετασχηματιστές ισχύος και γεννήτριες.

Ο ηλεκτρονόμος λαμβάνει ως είσοδο τα ρεύματα από το δευτερεύον των μετασχηματιστών εντάσεως και από τις δύο πλευρές του μετασχηματιστή. Η πρώτη διαδικασία είναι η μετατροπή αυτών των ρευμάτων σε μια κοινή βάση, ώστε να είναι συγκρίσιμα ως προς την ισχύ του υπό προστασία μετασχηματιστή (SN). Σημαντικό να σημειωθεί ότι το λογισμικό του ηλεκτρονόμου χρησιμοποιεί ως αναφορά την πλευρά της υψηλής τάσης. Έτσι, σε αυτό το στάδιο, ο ηλεκτρονόμος εκτελεί τους απαραίτητους υπολογισμούς για να μετασχηματίσει τα ρεύματα και να τα φέρει σε μια κοινή κλίμακα, ώστε να μπορούν να συγκριθούν με ακρίβεια και να εντοπιστούν τυχόν διαφορές που υποδεικνύουν την ύπαρξη βλάβης.

$$I_{prim} = \frac{S_N}{V_{prim} \times \sqrt{3}} \quad (4.8)$$

Δευτερεύοντος :

$$I_{SEC} = \frac{S_N}{V_{SEC} \times \sqrt{3}} \quad (4.9)$$

#### 4.16 Εξάλειψη μηδενικής ακολουθίας

Η εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας σε μετασχηματιστές ισχύος είναι μια κρίσιμη διαδικασία για την αποφυγή λανθασμένων ενεργοποιήσεων της διαφορικής προστασίας και τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας του συστήματος. Η μηδενική ακολουθία εμφανίζεται όταν υπάρχει ανισορροπία στις φάσεις ή βραχυκύκλωμα γης, και αν δεν αντιμετωπιστεί σωστά, μπορεί να προκαλέσει ψευδείς ενεργοποιήσεις της προστασίας.

Το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας υπολογίζεται :

$$I_O = (I_A + I_B + I_C) \times \frac{1}{3} \quad (4.10)$$

Εφαρμόζοντας τους παρακάτω τύπους :

$$\begin{aligned} I_{A'} &= I_A - I_O \\ I_{B'} &= I_B - I_O \\ I_{C'} &= I_C - I_O \end{aligned} \quad (4.11)$$

- Σύνδεση σε τρίγωνο  $\Delta$  :

Σε συστήματα όπου χρησιμοποιούνται ενδιάμεσοι μετασχηματιστές εντάσεως, η σύνδεσή τους σε τρίγωνο εγκλωβίζει τη μηδενική ακολουθία, αποτρέποντας τη διέλευσή της μέσω του κυκλώματος της διαφορικής προστασίας.

- Ψηφιακή εξάλειψη

Στα σύγχρονα ψηφιακά συστήματα προστασίας, η εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας γίνεται μέσω αλγορίθμων λογισμικού, χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων μετασχηματιστών. Οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι αναλύουν τα ρεύματα και απομονώνουν τη συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας, εξαλείφοντάς την από τη σύγκριση των ρευμάτων.

- Φίλτρα μηδενικής ακολουθίας

Σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξειδικευμένα φίλτρα για την απομάκρυνση της μηδενικής ακολουθίας από το κύκλωμα.

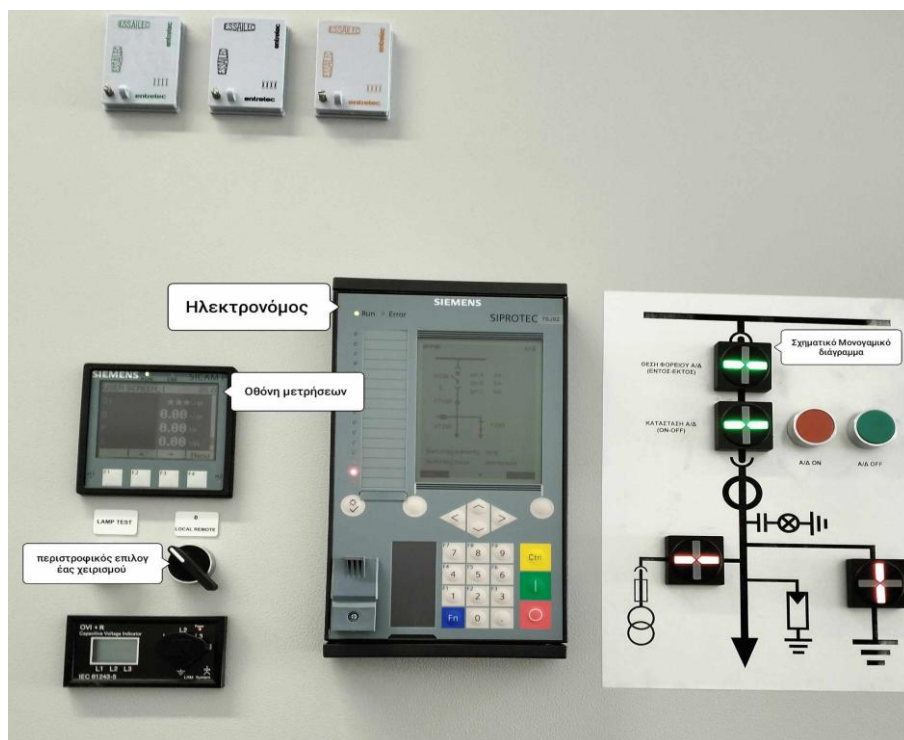
Η εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μετασχηματιστές με συνδεσμολογία αστέρα-τρίγωνο, όπου η μηδενική ακολουθία μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ανισορροπίες. Με τη σωστή εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων, εξασφαλίζεται η ακριβής λειτουργία της διαφορικής προστασίας και η αποφυγή λανθασμένων ενεργοποιήσεων, διατηρώντας παράλληλα την αξιοπιστία του συστήματος.

## Κεφάλαιο 5ο: Ηλεκτρονόμοι

### 5.1 εισαγωγή

Οι ηλεκτρονόμοι αποτελούν βασικά στοιχεία στα συστήματα ηλεκτρικής προστασίας, με κύριο ρόλο την ανίχνευση και την απομόνωση σφαλμάτων σε ηλεκτρικά δίκτυα και εξοπλισμό. Λειτουργούν ως «φύλακες» που παρακολουθούν συνεχώς τις ηλεκτρικές παραμέτρους, όπως ρεύματα και τάσεις, και ενεργοποιούνται όταν εντοπίζουν ανωμαλίες που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια ή τη λειτουργία του συστήματος. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι παραδοσιακοί ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι έχουν αντικατασταθεί από τους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους, οι οποίοι προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια, ευελιξία και δυνατότητες ανάλυσης δεδομένων.

Οι ηλεκτρονόμοι χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, όπως η προστασία μετασχηματιστών, γραμμών μεταφοράς και γεννητριών, και διακρίνονται σε διάφορους τύπους ανάλογα με τη λειτουργία τους, όπως διαφορικοί ηλεκτρονόμοι, ηλεκτρονόμοι γης και ηλεκτρονόμοι υπερφόρτωσης. Η σωστή επιλογή και ρύθμιση των ηλεκτρονόμων είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων και την πρόληψη ζημιών. Σε αυτό το πλαίσιο, η κατανόηση των αρχών λειτουργίας και των χαρακτηριστικών των ηλεκτρονόμων αποτελεί απαραίτητη γνώση για τους μηχανικούς και τους τεχνικούς που ασχολούνται με την προστασία και τη διαχείριση των ηλεκτρικών δικτύων.



Σχήμα 5.1 Ηλεκτρονόμος πεδίου

Στην εικόνα 5.1 παρουσιάζεται ο ηλεκτρονόμος μοντέλου SIEMENS SIPROTEC 7SJ82.

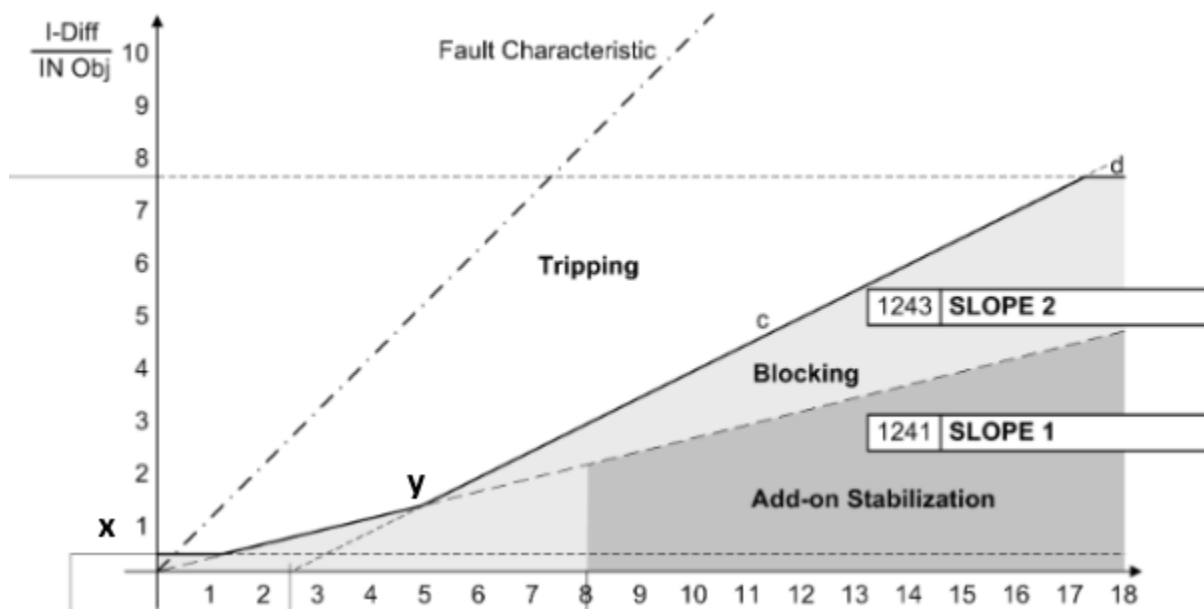
- Ο αριστερός διακόπτης μας προσφέρει στην κατάσταση 0 τοπικό χειρισμό και στην κατάσταση 1 εξ' αποστάσεως
- Η οθόνη μετρήσεων SIEMENS SICAM P μας προσφέρει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο.



- Ο ηλεκτρονόμος χρησιμοποιείται για την προστασία και την αυτοματοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος.
- Στο μονογαμμικό σχέδιο απεικονίζονται οι χειρισμοί που μπορούν να πραγματοποιηθούν. Οι δυο πράσινες λυχνίες απεικονίζουν την κατάσταση του διακόπτη και οι υπόλοιπες δυο τον αποζεύκτη, τον γειωτή.

## 5.2 Λειτουργία ψηφιακού H/N διαφορικής προστασίας

Όπως φαίνεται στο σχήμα, παρουσιάζονται οι περιοχές λειτουργίας ενός ψηφιακού ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας. Η βασική αρχή λειτουργίας του ψηφιακού ηλεκτρονόμου βασίζεται στον συνεχή υπολογισμό του διαφορικού ρεύματος  $I_{Diff}$  και του ρεύματος συγκράτησης  $I_{Rest}$ . Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο λόγος μεταξύ αυτών των δύο ρευμάτων, δηλαδή  $I_{Diff}/I_{Rest}$ . Το αποτέλεσμα αυτού του υπολογισμού καθορίζει ένα σημείο στην χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του ηλεκτρονόμου. Ανάλογα με την περιοχή στην οποία βρίσκεται αυτό το σημείο, ο ηλεκτρονόμος εκτελεί συγκεκριμένες ενέργειες, όπως αποσύνδεση ή συγκράτηση, διασφαλίζοντας έτσι την ακριβή και αξιόπιστη προστασία του συστήματος.



Σχήμα 5.2 Καμπύλη λειτουργίας ψηφιακού H/N διαφορικής προστασίας [5]

Στο σχήμα, το πρώτο σημείο που διακρίνουμε είναι το (x), το οποίο αντιπροσωπεύει την ευαισθησία και το όριο λειτουργίας της διαφορικής προστασίας (sensitivity threshold). Αυτό το όριο καθορίζεται με βάση το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα που μπορεί να προκύψει εκτός της ζώνης προστασίας. Για τον υπολογισμό του ορίου, πραγματοποιείται μια μελέτη σφαλμάτων, με σκοπό να προσδιοριστεί το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να εμφανιστεί εκτός της ζώνης προστασίας. Επιπλέον, σε αυτό το σημείο λαμβάνονται υπόψη και ρεύματα μαγνήτισης (inrush current), ώστε να αποφευχθεί η λανθασμένη ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας σε τέτοιες περιπτώσεις.

Στη συνέχεια, η περιοχή λειτουργίας (y) αντιπροσωπεύει σφάλματα που προκύπτουν από:

- Λανθασμένο συνδυασμό μετασχηματιστών εντάσεως (mismatch errors), δηλαδή διαφορές στις ιδιότητες ή τις ρυθμίσεις των MET.
- Σφάλματα λόγω του συστήματος αλλαγής τάσης υπό φορτίο (OLTC - On-Load Tap Changer) σε μετασχηματιστές ισχύος, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν την ισορροπία των ρευμάτων.

Αυτές οι περιοχές λειτουργίας είναι κρίσιμες για τη σωστή ρύθμιση της διαφορικής προστασίας, ώστε να αποφεύγονται οι λανθασμένες ενεργοποιήσεις και να διασφαλίζεται η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, ένας σημαντικός παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας είναι ο κορεσμός των μετασχηματιστών εντάσεως (MET). Για τον λόγο αυτό, η περιοχή (c) λαμβάνει υπόψη τέτοιες καταστάσεις, όπου ο κορεσμός των MET μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία της προστασίας.

Επιπλέον, υπάρχουν καταστάσεις στις οποίες ο ηλεκτρονόμος πρέπει να δράσει ακαριαία, ανεξάρτητα από το αρμονικό περιεχόμενο ή το ρεύμα συγκράτησης  $I_{Rest}$ . Αυτή η περίπτωση αντιπροσωπεύεται από την περιοχή (d), όπου η ταχεία απόκριση είναι απαραίτητη σε περίπτωση εμφάνισης πολύ μεγάλων ρευμάτων.

Όταν το διαφορικό ρεύμα  $I_{Diff}$  είναι ίσο με το ρεύμα συγκράτησης  $I_{Rest}$ , δηλαδή  $I_{Diff}=I_{Rest}$ , τότε αναφερόμαστε σε μια κατάσταση όπου το σφάλμα εμφανίζεται εντός της ζώνης προστασίας. Αυτή η κατάσταση περιγράφεται από την χαρακτηριστική καμπύλη σφάλματος (διακεκομμένη γραμμή), η οποία έχει κλίση 45 μοίρες. Αυτή η κλίση υποδεικνύει ότι το διαφορικό ρεύμα είναι ανάλογο του ρεύματος συγκράτησης, γεγονός που επιβεβαιώνει την ύπαρξη σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας και απαιτεί άμεση ενέργεια από τον ηλεκτρονόμο.

OLTC	Σημείο X	Σημείο Y	Σημείο C
Δεν διαθέτει	$0,2 \times I_{N-transf}$	$0,25 \times (I_{Diff}/I_{Rest})$	$0,5 \times (I_{Diff}/I_{Rest})$
Διαθέτει	$0,3 \times I_{N-transf}$	$0,25 \times (I_{Diff}/I_{Rest})$	$0,5 \times (I_{Diff}/I_{Rest})$

Πίνακας 5.1 Ρύθμιση H/N διαφορικής προστασίας

### Λειτουργίας άμεσης ενεργοποίησης ηλεκτρονόμου

Σε περιπτώσεις όπου εμφανίζεται ένα μεγάλο ρεύμα σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας, ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας πρέπει να είναι σε θέση να εκδώσει άμεση εντολή TRIP, χωρίς να λαμβάνει υπόψη το ρεύμα συγκράτησης  $I_{Rest}$ . Βασική προϋπόθεση για αυτή τη λειτουργία είναι το ρεύμα σφάλματος που ανιχνεύει ο ηλεκτρονόμος να ξεπερνά ένα προκαθορισμένο όριο.

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η εμπέδηση του μετασχηματιστή ισχύος παίζει κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό αυτού του ορίου. Η εμπέδηση του μετασχηματιστή περιορίζει σε έναν βαθμό το ρεύμα σφάλματος, γεγονός που επηρεάζει τη ρύθμιση του ορίου. Ειδικά σε μετασχηματιστές με μεγάλη εμπέδηση, το όριο αυτό δεν πρέπει να ξεπερνά ποτέ το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος που μπορεί να εμφανιστεί εκτός της ζώνης προστασίας.

Για μετασχηματιστές ισχύος, το όριο αυτό υπολογίζεται από την εξίσωση eq. 3-23, η οποία λαμβάνει υπόψη τις παραμέτρους του μετασχηματιστή και τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζεται ότι ο ηλεκτρονόμος θα ενεργοποιηθεί μόνο όταν πραγματικά απαιτείται, αποφεύγοντας λανθασμένες ενεργοποιήσεις και διασφαλίζοντας την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος.

$$\frac{1}{U_{transf}} \times I_{N-transf} \quad (5.1)$$

Όπως σημειώθηκε και προηγουμένως, ο κορεσμός των μετασχηματιστών εντάσεως (MET) αποτελεί μια πολύ κρίσιμη κατάσταση για τη σωστή λειτουργία της διαφορικής προστασίας. Μια τέτοια κατάσταση μπορεί να προκύψει όταν εμφανιστεί ένα σημαντικό σφάλμα εκτός της ζώνης προστασίας,

το οποίο προκαλεί την ανάπτυξη ενός μεγάλου ρεύματος σφάλματος. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει στον κορεσμό των MET. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο να κορεστούν και οι δύο μετασχηματιστές εντάσεως· μπορεί να κορεστεί μόνο ο ένας ή και οι δύο, αλλά σε διαφορετικό βαθμό. Αυτή η ανισορροπία οδηγεί στην εμφάνιση άνισων ρευμάτων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, με αποτέλεσμα την πιθανή λανθασμένη ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας.

Για να αποφευχθούν τέτοιες καταστάσεις, οι σύγχρονοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας είναι εξοπλισμένοι με ένα σύστημα ανίχνευσης κορεσμού (saturation detector). Ο σκοπός αυτού του συστήματος είναι να ανιχνεύει άμεσα πότε ένας από τους μετασχηματιστές εντάσεως πλησιάζει τον κορεσμό. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση ενός εξωτερικού σφάλματος, όπως αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.29. Η διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα αντιπροσωπεύει το ακαριαίο ρεύμα που αναπτύσσεται όταν ένας από τους μετασχηματιστές εντάσεως κορεστεί κατά τη διάρκεια ενός εξωτερικού σφάλματος (εκτός της ζώνης προστασίας).

Όπως φαίνεται στο σχήμα, αμέσως μετά την εμφάνιση του σφάλματος (σημείο A), παρατηρείται μια ραγδαία αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος, η οποία προκαλεί ένα μεγάλο ρεύμα συγκράτησης. Στο σημείο B, ο μετασχηματιστής εντάσεως φτάνει σε κατάσταση κορεσμού, όπου το διαφορικό ρεύμα ( $IDiff$ ) αυξάνεται, ενώ το ρεύμα συγκράτησης  $I_{Rest}$  μειώνεται. Το αποτέλεσμα του λόγου  $IDiff/I_{Rest}$  είναι το σημείο C, το οποίο βρίσκεται στην περιοχή ενεργοποίησης (tripping area). Εάν την ίδια χρονική στιγμή εμφανιστεί ένα ρεύμα εντός της ζώνης προστασίας, το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται στο σημείο D, καθώς το ρεύμα συγκράτησης είναι ελάχιστο μεγαλύτερο από το διαφορικό ρεύμα.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο ανιχνευτής κορεσμού του ψηφιακού ηλεκτρονόμου ανιχνεύει άμεσα (μέσα σε 1441 του κύκλου) την κατάσταση κορεσμού και μετατοπίζει το σημείο λειτουργίας στην περιοχή επιπρόσθετης συγκράτησης (Add-on restraint). Αυτή η ενέργεια αποτρέπει την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου, διασφαλίζοντας έτσι την αξιόπιστη λειτουργία της διαφορικής προστασίας.

### 5.3 Ηλεκτρονόμοι προστασίας έναντι σφαλμάτων γης (REF protection)

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκε η διαφορική προστασία, η οποία αποτελεί το κύριο σύστημα προστασίας για μετασχηματιστές ισχύος λόγω της ταχείας απόκρισης και υψηλής επιλεκτικότητάς της. Ωστόσο, στα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται και συμπληρωματικές μέθοδοι προστασίας (back-up protection), όπως οι ηλεκτρονόμοι προστασίας έναντι σφαλμάτων γης (REF), για να καλύψουν ευάλωτες περιοχές που η διαφορική προστασία δεν μπορεί να ανιχνεύσει αποτελεσματικά.

- Ρόλος και Τοποθέτηση Ηλεκτρονόμων REF

Σκοπός: Η REF προστασία αναπτύχθηκε για να ανιχνεύει σφάλματα γης κοντά στον ουδέτερο κόμβο του μετασχηματιστή, όπου η διαφορική προστασία εμφανίζει περιορισμένη ευαισθησία.

Εγκατάσταση: Οι ηλεκτρονόμοι REF τοποθετούνται ανάμεσα στον ουδέτερο κόμβο του μετασχηματιστή και το δευτερεύον τύλιγμα.

- Περιορισμοί Διαφορικής Προστασίας σε Σφάλματα Γης

Αδυναμία Ανίχνευσης: Σε σφάλματα γης κοντά στον ουδέτερο, η αύξηση του ρεύματος στη φάση είναι τόσο μικρή που η διαφορική προστασία δεν μπορεί να την ανιχνεύσει.

Εξάρτηση από Γείωση: Η ευαισθησία εξαρτάται από τον τρόπο γείωσης του μετασχηματιστή (π.χ., άμεση γείωση, αντίσταση γείωσης) και τη θέση του σφάλματος.

- Σύγκριση Διαφορικής Προστασίας και REF

Διαφορική Προστασία: Καλύπτει το 80-90% του τύλιγματος, αλλά αποτυγχάνει σε σφάλματα κοντά στον ουδέτερο.

Προστασία REF: Καλύπτει το 10-20% του τύλιγματος κοντά στον ουδέτερο, όπου η διαφορική προστασία είναι αναποτελεσματική.

- Λειτουργία REF σε χαμηλά ρεύματα

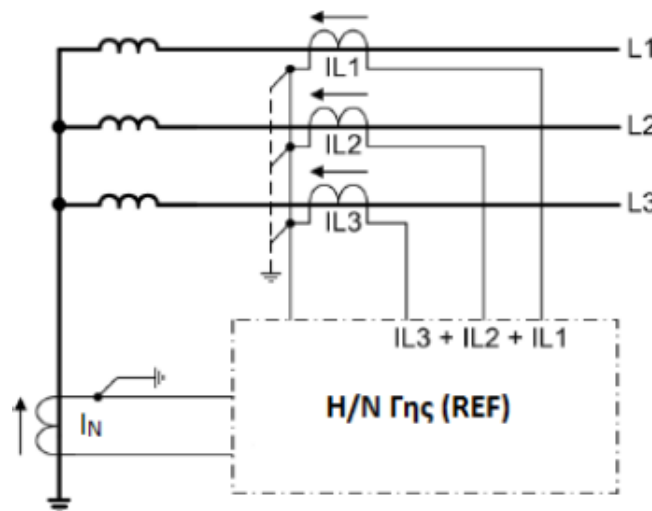
Όταν το ρεύμα πρωτεύοντος είναι 20% του ονομαστικού, ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας παρέχει προστασία στο 45% του τυλίγματος, ενώ ο ηλεκτρονόμος γης (REF) προστατεύει προστατεύει το 78%. Η διαφορική προστασία μπορεί να μην ανιχνεύσει σφάλματα λόγω της χαμηλής ροής ρεύματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η REF προστασία αναλαμβάνει να εντοπίσει και να απομονώσει το σφάλμα, εξασφαλίζοντας πλήρη κάλυψη.

- Εν κατακλείδι

Η συνδυασμένη χρήση διαφορικής προστασίας και ηλεκτρονόμων REF εξασφαλίζει ολοκληρωμένη προστασία των μετασχηματιστών ισχύος. Ενώ η διαφορική προστασία είναι ιδανική για γρήγορη ανίχνευση σφαλμάτων στο μεγαλύτερο μέρος του τύλιγματος, οι ηλεκτρονόμοι REF αναλαμβάνουν την προστασία της ευάλωτης περιοχής κοντά στον ουδέτερο, όπου τα σφάλματα γης συχνά παραμένουν αθέατα. Αυτή η συμπληρωματικότητα είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του συστήματος.

#### 5.4 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρονόμων γης (REF)

Για την εφαρμογή της προστασίας έναντι σφαλμάτων γης (REF), απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γείωση του ουδέτερου σημείου του μετασχηματιστή. Σε μετασχηματιστές με συνδεσμολογία αστέρα (Y), αυτό επιτυγχάνεται με άμεση γείωση του ουδέτερου, ενώ σε μετασχηματιστές τριγώνου (Δ) χρησιμοποιείται συχνά ένας εξωτερικός μετασχηματιστής γείωσης (π.χ., διάταξη broken delta) για τη δημιουργία τεχνητού ουδέτερου. Η λειτουργία των ηλεκτρονόμων REF βασίζεται στη σύγκριση ρευμάτων ανάμεσα στον μετασχηματιστή εντάσεως στον ουδέτερο (NCT) και τους μετασχηματιστές εντάσεως στις φάσεις (CTs), δημιουργώντας μια στενή ζώνη προστασίας γύρω από τον ουδέτερο. Όταν ένα σφάλμα γης προκαλεί ανισορροπία στα ρεύματα, ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται, απομονώνοντας το πρόβλημα. Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε για να καλύψει τις ευάλωτες περιοχές κοντά στον ουδέτερο, όπου η διαφορική προστασία αδυνατεί να ανιχνεύσει μικρά ρεύματα σφάλματος, διασφαλίζοντας έτσι την πλήρη προστασία του συστήματος.



Σχήμα 5.3 Σύνδεση H/N γης (REF)

Η REF προστασία επικεντρώνεται στην ανίχνευση σφαλμάτων κοντά στον ουδέτερο, όπου η διαφορική προστασία είναι λιγότερο αποτελεσματική λόγω χαμηλών ρευμάτων. Ένα τυπικό παράδειγμα εφαρμογής φαίνεται στο Σχήμα, όπου απεικονίζεται η τοποθέτηση των NCT και CTs, καθώς και η λογική σύγκρισης ρευμάτων.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, η προστασία γης (REF) λειτουργεί ως ένας τύπος διαφορικής προστασίας, καθώς ο ηλεκτρονόμος γης παρακολουθεί και συγκρίνει (κατά μέτρο και φορά) το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας ( $3 \times I_0$ ) που διαρρέει τον ουδέτερο με το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας που προέρχεται από τις φάσεις. Ο κύριος στόχος του ηλεκτρονόμου γης είναι να διακρίνει γρήγορα και με ακρίβεια αν ένα σφάλμα βρίσκεται εντός ή εκτός της ζώνης προστασίας. Σε περίπτωση σφάλματος εντός της ζώνης, ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται ακαριαία, ενώ σε σφάλματα εκτός της ζώνης, η λειτουργία του αποκλείεται μέσω της κατάλληλης σύνδεσης των μετασχηματιστών εντάσεως. Σε αυτή την περίπτωση, η μηδενική συνιστώσα του ρεύματος σφάλματος ακολουθεί μια παράπλευρη διαδρομή (bypass), χωρίς να διέρχεται από τον ηλεκτρονόμο γης.

Η προστασία γης βασίζεται στην ανίχνευση ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας, τα οποία εμφανίζονται μόνο όταν υπάρχει σφάλμα με συμμετοχή γης. Αυτό καθιστά την προστασία γης πολύ ευαίσθητη και ανεξάρτητη από το ρεύμα φορτίου. Ωστόσο, η υψηλή ευαισθησία αυτή μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει σε λανθασμένες ενεργοποιήσεις, εάν οι μετασχηματιστές εντάσεως δεν είναι κατάλληλα ρυθμισμένοι ή εάν οι μετρήσεις δεν είναι ακριβείς. Για τον λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί η σωστή σύνδεση και η ακριβής ρύθμιση του συστήματος.

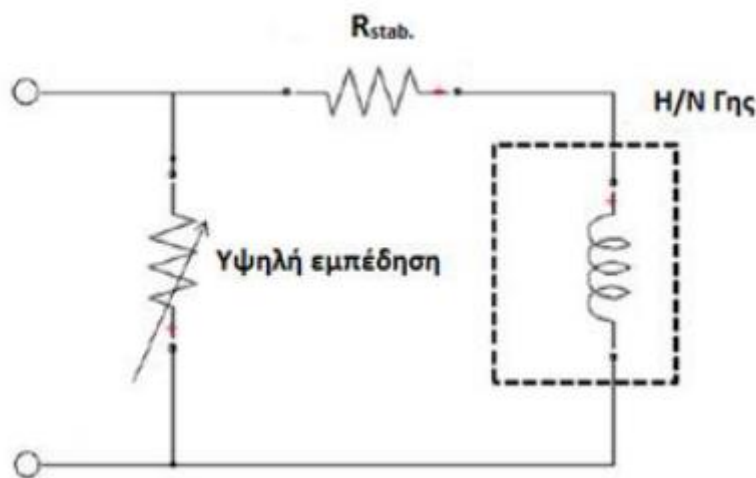
Οι μετασχηματιστές εντάσεως μπορούν να συνδεθούν στον ηλεκτρονόμο γης με δύο βασικούς τρόπους:

Υψηλής εμπέδησης (High-impedance REF): Χρησιμοποιείται όταν απαιτείται υψηλή ευαισθησία και αποφυγή λανθασμένων ενεργοποιήσεων.

Χαμηλής εμπέδησης (Low-impedance REF): Εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η ευαισθησία δεν είναι τόσο κρίσιμη, αλλά η απλότητα και η αξιοπιστία είναι προτεραιότητα.

### 5.4.1 Ηλεκτρονόμος υψηλής εμπέδησης

Στην μέθοδο αυτή ο ηλεκτρονόμος γης συνδέεται παράλληλα με μία υψηλή εμπέδηση.



Σχήμα 5.4 H/N γης υψηλής εμπέδησης

Σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος, η υψηλή τάση που θα αναπτυχθεί στα άκρα των μετασχηματιστών εντάσεως (CTs) μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές συνέπειες, τόσο στους ίδιους τους μετασχηματιστές όσο και στον ηλεκτρονόμο. Για να αποφευχθεί αυτό, η σύνδεση του ηλεκτρονόμου γης και των μετασχηματιστών εντάσεως γίνεται μέσω μιας υψηλής εμπέδησης (μη γραμμικής αντίστασης), η οποία μειώνει την τάση σε ασφαλή επίπεδα κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Θεωρητικά, κατά τη διάρκεια του σφάλματος, η αντίσταση του ηλεκτρονόμου είναι μικρότερη από την εσωτερική αντίσταση της υψηλής εμπέδησης. Ωστόσο, για να διασφαλιστεί ακόμα μεγαλύτερη αντίσταση μεταξύ του ηλεκτρονόμου και της υψηλής εμπέδησης, εισάγεται στο κύκλωμα μια σταθεροποιητική αντίσταση (*Rstab*).

### Σχεδιαστικά Χαρακτηριστικά

Ομοιότητα Μετασχηματιστών Εντάσεως:

- Οι μετασχηματιστές εντάσεως στις φάσεις και στον ουδέτερο πρέπει να έχουν ίδιο λόγο μετασχηματισμού.
- Πρέπει να έχουν ίδια χαρακτηριστικά κορεσμού για να αποφευχθούν ανισορροπίες.

### Τάση Κορεσμού (Knee-Point Voltage):

- Για σφάλματα εκτός ζώνης, η τάση κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τάση που αναπτύσσεται στην αντίσταση *Rstab*.

### Ασφάλεια Τάσης:

- Η τάση μεταξύ του ηλεκτρονόμου και των μετασχηματιστών εντάσεως πρέπει να διατηρείται πάντα σε ασφαλή επίπεδα.
- Η ρεύμα μαγνήτισης των μετασχηματιστών εντάσεως εξαρτάται άμεσα από την εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα τους. Μεγάλη τάση μπορεί να οδηγήσει σε υψηλά ρεύματα μαγνήτισης και, κατά συνέπεια, σε κορεσμό των μετασχηματιστών.

### Πλεονέκτημα Ηλεκτρονόμων Υψηλής Εμπέδησης

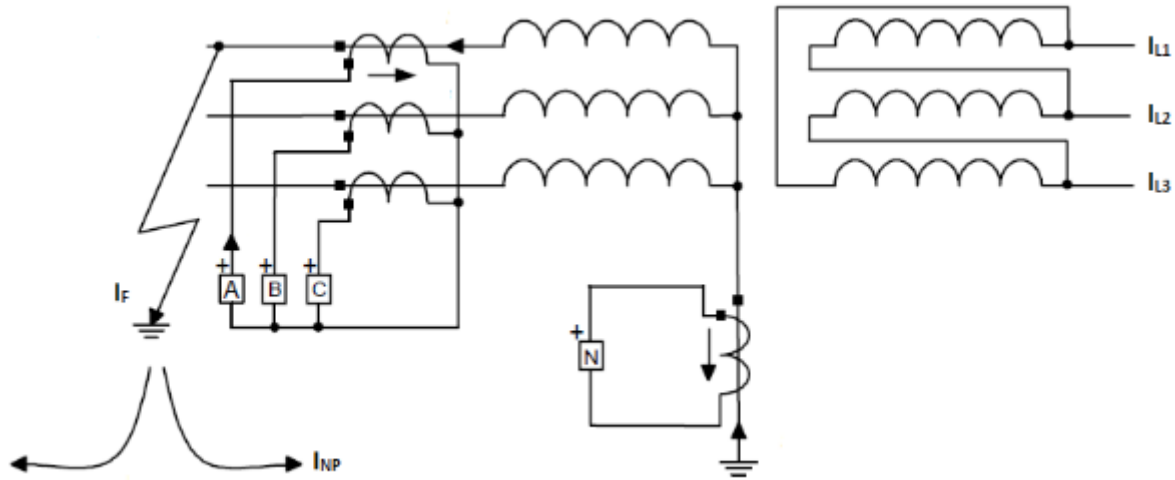
Οι ηλεκτρονόμοι γης υψηλής εμπέδησης έχουν μεγάλη ανοχή σε καταστάσεις κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως, ιδιαίτερα όταν αυτός ο κορεσμός προκαλείται από εξωτερικά σφάλματα. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σύγκριση με τους ηλεκτρονόμους γης χαμηλής εμπέδησης, καθώς εξασφαλίζουν μεγαλύτερη σταθερότητα και αξιοπιστία στη λειτουργία της προστασίας.

#### 5.4.2 Ηλεκτρονόμος χαμηλής εμπέδησης

Από την άλλη πλευρά, στους ηλεκτρονόμους γης χαμηλής εμπέδησης, η σύνδεση των μετασχηματιστών εντάσεως (CTs) με τον ηλεκτρονόμο γης γίνεται απευθείας, χωρίς την ανάγκη πρόσθετης εμπέδησης. Σε αυτή τη μέθοδο, τα ρεύματα από τις φάσεις προστίθενται και συγκρίνονται εσωτερικά στον ηλεκτρονόμο, γεγονός που απλοποιεί τη σχεδίαση και την εγκατάσταση του συστήματος. Αυτή η προσέγγιση είναι ευρέως διαδεδομένη στους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους, οι οποίοι, εξ ορισμού, έχουν χαμηλή εμπέδηση. Η ονομασία "χαμηλής εμπέδησης" προέρχεται από το γεγονός ότι οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι λειτουργούν με εσωτερικές αντιστάσεις χαμηλής τιμής, σε αντίθεση με τους ηλεκτρονόμους υψηλής εμπέδησης, όπου απαιτείται η χρήση εξωτερικών στοιχείων.

Στο Σχήμα 3.42, που ακολουθεί, απεικονίζεται η περίπτωση ενός σφάλματος εκτός της ζώνης προστασίας. Σε τέτοιες καταστάσεις, ο ηλεκτρονόμος γης χαμηλής εμπέδησης μπορεί να ανιχνεύσει και να απομονώσει το σφάλμα χωρίς να απαιτείται η χρήση πρόσθετων στοιχείων, όπως η σταθεροποιητική αντίσταση (*Rstab*) που χρησιμοποιείται στους ηλεκτρονόμους υψηλής εμπέδησης. Αυτή η απλότητα

και η ευελιξία κάνουν τους ηλεκτρονόμους χαμηλής εμπέδησης ιδανικούς για πολλές εφαρμογές, ιδιαίτερα σε σύγχρονα ψηφιακά συστήματα προστασίας.



Σχήμα 5.5 Κατάσταση εξωτερικού σφάλματος H/N γης (υψηλής εμπέδησης)

Στις περισσότερες εφαρμογές, οι ηλεκτρονόμοι γης χαμηλής εμπέδησης βασίζονται στην μέτρηση της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος, αφού πρώτα έχουν αφαιρεθεί όλες οι αρμονικές συνιστώσες. Παρόμοια με τους ηλεκτρονόμους διαφορικής προστασίας, αυτοί οι ηλεκτρονόμοι υπολογίζουν ένα διαφορικό ρεύμα (differential current) και ένα ρεύμα παρεμπόδισης (restraint current), τα οποία χρησιμοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων και την εκτέλεση των απαραίτητων ενεργειών.

Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα των ηλεκτρονόμων χαμηλής εμπέδησης είναι ότι δεν αντιδρούν αποτελεσματικά σε περιπτώσεις κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως που προκαλείται από εξωτερικά σφάλματα. Αυτή η αδυναμία τους διαφοροποιεί από τους ηλεκτρονόμους υψηλής εμπέδησης, οι οποίοι είναι ικανοί να διαχειριστούν τέτοιες καταστάσεις με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Από την άλλη πλευρά, ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ηλεκτρονόμων χαμηλής εμπέδησης είναι ότι δεν απαιτείται οι μετασχηματιστές εντάσεως στις φάσεις και στον ουδέτερο να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, όπως ο ίδιος λόγος μετασχηματισμού ή παρόμοια χαρακτηριστικά κορεσμού. Αυτή η ευελιξία κάνει τους ηλεκτρονόμους χαμηλής εμπέδησης ιδανικούς για εφαρμογές όπου οι μετασχηματιστές εντάσεως δεν είναι ομοιόμορφοι ή όταν δεν υπάρχει δυνατότητα επιλογής μετασχηματιστών με τα ίδια χαρακτηριστικά.

Η επιλογή μεταξύ των δύο μεθόδων (υψηλής ή χαμηλής εμπέδησης) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιοτική κατάσταση και τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων μετασχηματιστών εντάσεως. Σε περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατή η χρήση μετασχηματιστών με ίδιο λόγο μετασχηματισμού ή παρόμοια χαρακτηριστικά, η επιλογή των ηλεκτρονόμων χαμηλής εμπέδησης είναι συχνά η μοναδική λύση. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει την ευελιξία και την αποτελεσματικότητα της προστασίας, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές.

## 5.5 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης

Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης αποτελούν ένα συμπληρωματικό σύστημα προστασίας που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη διαφορική προστασία για την προστασία των μετασχηματιστών ισχύος. Ωστόσο, σε μετασχηματιστές μικρής ισχύος, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης μπορούν να

λειτουργήσουν ως το κύριο μέσο προστασίας, καθώς η διαφορική προστασία μπορεί να μην είναι οικονομικά ή τεχνικά εφικτή.

Ο κύριος σκοπός των ηλεκτρονόμων υπερέντασης είναι η προστασία του μετασχηματιστή από βραχυκυκλώματα που συμβαίνουν εκτός της ζώνης προστασίας της διαφορικής προστασίας. Για να επιτευχθεί αυτό, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης συνήθως περιλαμβάνουν ένα στοιχείο στιγμιαίου χρόνου (instantaneous element), το οποίο ενεργοποιείται γρήγορα για να αντιδράσει σε μεγάλα ρεύματα σφάλματος. Συνήθως, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης ρυθμίζονται να ενεργοποιούνται όταν το ρεύμα ξεπεράσει το 150% του ονομαστικού ρεύματος του μετασχηματιστή.

Μια σημαντική παράμετρος στη ρύθμιση των ηλεκτρονόμων υπερέντασης είναι η χρονική καθυστέρηση. Αυτή η καθυστέρηση πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να αποφευχθεί η λανθασμένη ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου κατά τη διάρκεια της εκκίνησης του μετασχηματιστή, όταν το ρεύμα μαγνήτισης (inrush current) μπορεί να φτάσει σε υψηλά επίπεδα. Από την άλλη πλευρά, το ακαριαίο στοιχείο του ηλεκτρονόμου πρέπει να ρυθμιστεί σε μια τιμή που είναι 25% υψηλότερη από το μέγιστο εξωτερικό σφάλμα και το μέγιστο ρεύμα μαγνήτισης. Αυτή η ρύθμιση εξασφαλίζει ότι ο ηλεκτρονόμος θα ενεργοποιηθεί μόνο όταν πραγματικά απαιτείται, χωρίς να επηρεάζεται από παροδικά φαινόμενα όπως το ρεύμα μαγνήτισης.

Η σωστή ρύθμιση και επιλογή των ηλεκτρονόμων υπερέντασης είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της αξιόπιστης λειτουργίας του μετασχηματιστή και την αποφυγή λανθασμένων ενεργοποιήσεων. Με την κατάλληλη ρύθμιση, οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης μπορούν να προσφέρουν αποτελεσματική προστασία, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η διαφορική προστασία δεν μπορεί να καλύψει όλες τις πιθανές απειλές.



## Κεφάλαιο 6ο: Υλοποίηση Δυναμικού Μοντέλου Δ.Π.

### 6.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια, πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερής ανάλυση της λειτουργίας της διαφορικής προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος. Επιπλέον, εξετάστηκαν οι τεχνικές διάκρισης που χρησιμοποιούν οι σύγχρονοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι για να διαχωρίσουν τα σφάλματα εντός της ζώνης προστασίας από εκείνα που εμφανίζονται εκτός ζώνης. Αυτές οι τεχνικές βασίζονται σε αλγορίθμους που αναλύουν τα ρεύματα και τις τάσεις, χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως η ανάλυση αρμονικών, η ανίχνευση DC συνιστώσας και η χρήση πολλαπλών κριτηρίων για την ακριβή ανίχνευση και αντιμετώπιση σφαλμάτων.

Σε αυτή την ενότητα, θα εστιάσουμε στον σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος διαφορικής προστασίας που υλοποιήθηκε για την προστασία ενός μετασχηματιστή ισχύος. Θα περιγραφούν οι βασικές αρχές λειτουργίας, οι ρυθμίσεις και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για να εξασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον, θα εξεταστεί η απόκριση του συστήματος σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας, όπως κανονικές συνθήκες, σφάλματα εντός ζώνης, σφάλματα εκτός ζώνης και μεταβατικές καταστάσεις (π.χ., εκκίνηση του μετασχηματιστή).

Μέσω αυτής της ανάλυσης, θα γίνει σαφές πώς το σύστημα διαφορικής προστασίας αντιδρά σε κάθε περίπτωση, εξασφαλίζοντας την προστασία του μετασχηματιστή από βλάβες και ταυτόχρονα αποφεύγοντας λανθασμένες ενεργοποιήσεις. Η κατανόηση αυτών των διαδικασιών είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της προστασίας και τη διασφάλιση της μακροχρόνιας αξιοπιστίας του συστήματος.

### 6.2 Προστασίες που περιλαμβάνονται

- Ρελέ υπερέντασης (overcurrent relay): Προστατεύει τον μετασχηματιστή από υπερβολικό ρεύμα, το οποίο μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση ή βλάβη του εξοπλισμού.
- Ρελέ προστασίας διαφορικού ρεύματος (differential protection relay): Συγκρίνει το ρεύμα εισόδου και εξόδου του μετασχηματιστή. Αν υπάρχει διαφορά (που υποδεικνύει βλάβη ή διαρροή), ενεργοποιείται για να αποσυνδέσει τον μετασχηματιστή.
- Ρελέ γείωσης (ground fault relay): Προστατεύει από σφάλματα γείωσης, όπου το ρεύμα διαρρέει στη γείωση λόγω βλάβης της μόνωσης.
- Ρελέ θερμοκρασίας (thermal relay): Παρακολουθεί τη θερμοκρασία του μετασχηματιστή και τον αποσυνδέει αν υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, προστατεύοντάς τον από υπερθέρμανση.

### 6.3 μετασχηματιστής

Ένας μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μεταβολή των επιπέδων τάσης και ρεύματος σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, χωρίς να αλλάζει η συχνότητα.

- Πυρήνας
- Πηνία
- Μονωτικά υλικά
- Δεξαμενή
- Σύστημα ψύξης
- Βαλβίδες
- Σύστημα γείωσης

## 6.4 Σχέσεις Μετασχηματιστή

- Σχέση Τάσης :  $\frac{V1}{V2} = \frac{N1}{N2}$
- Σχέση Ρεύματος :  $\frac{I1}{I2} = \frac{N2}{N1}$
- Σχέση Ισχύος :  $P1=P2$  ιδανικός μετασχηματιστής  $V1 \cdot I1 = V2 \cdot I2$
- Λόγος μετασχηματιστή  $k = \frac{N1}{N2}$
- 

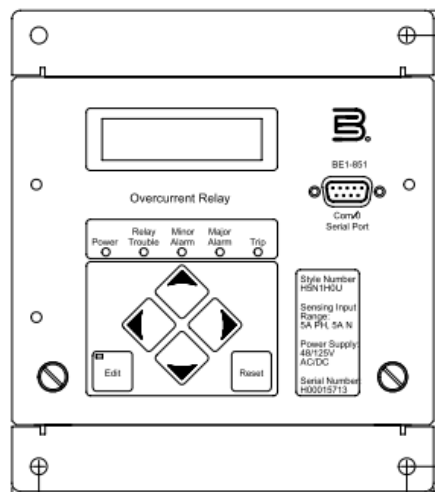
## 6.5 Βασικά στοιχεία υλοποίησης

Για την αξιόπιστη προστασία ενός μετασχηματιστή, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη όλοι οι πιθανοί κίνδυνοι που μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφή ή μείωση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η προσέγγιση που ακολουθείται για την υλοποίηση αυτής της προστασίας.

Ένα από τα βασικά στοιχεία της διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση ηλεκτρονόμου προστασίας. Στην προτεινόμενη υλοποίηση επιλέχθηκε ο Basler BE1-851, ένας ρελέ που θεωρείται ιδιαίτερα αξιόπιστος και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε εφαρμογές προστασίας, διατηρώντας την παρουσία του στην αγορά μέχρι και σήμερα.

Αν και δεν αποτελεί την πιο σύγχρονη επιλογή διαθέσιμη στην αγορά, θεωρήθηκε κατάλληλος για τις ανάγκες του παρόντος έργου λόγω της σταθερότητας, της δοκιμασμένης απόδοσης και της επαρκούς κάλυψης των απαραίτητων λειτουργιών προστασίας.

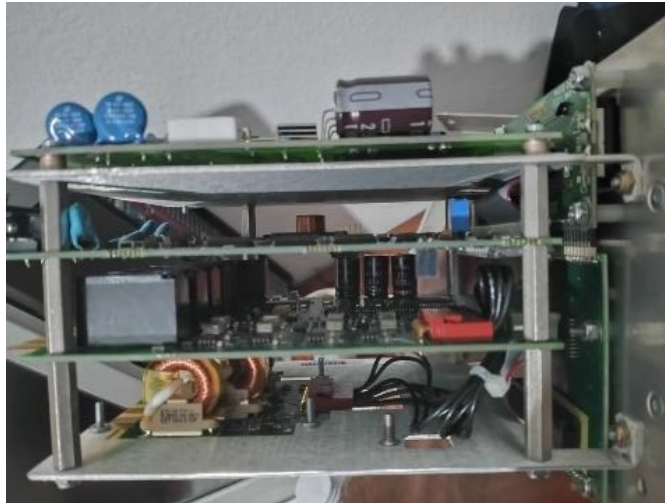
Σε σχέση με νεότερα μοντέλα, δεν παρατηρούνται ουσιαστικές διαφορές ως προς τις βασικές προστασίες που παρέχει. Οι κύριες διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στο περιβάλλον παραμετροποίησης, το οποίο στα πιο σύγχρονα ρελέ είναι πιο εξελιγμένο και προσφέρει αυξημένη ευελιξία και ευχρηστία.



Σχήμα 6.1 Basler BE1-851 H/Λ

Ο ηλεκτρονόμος προστασίας (relay) είναι μια ηλεκτρονική ή ηλεκτρομηχανική συσκευή που παρακολουθεί ηλεκτρικά μεγέθη (όπως ρεύμα, τάση, συχνότητα) σε ένα κύκλωμα και ενεργοποιεί εντολή απόζευξης (trip) όταν ανιχνεύσει συνθήκες που ξεφεύγουν από τα επιτρεπτά όρια, όπως υπερένταση, διαρροή προς γη ή βραχυκύκλωμα. Σκοπός του είναι να προστατεύει τον εξοπλισμό και την ανθρώπινη ασφάλεια, απομονώνοντας γρήγορα τη βλάβη πριν επεκταθεί. Οι σύγχρονοι

ηλεκτρονόμοι όπως ο Basler BE1-851 περιλαμβάνουν επιπλέον δυνατότητες όπως καταγραφή συμβάντων, προγραμματιζόμενη λογική, και δυνατότητες επικοινωνίας με SCADA ή PLC.



Σχήμα 6.2 Basler BE1-851 εσωτερική διάταξη Η/Λ

Η εσωτερική διάταξη του ηλεκτρονόμου χαρακτηρίζεται από πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική, όπου κάθε επίπεδο τυπωμένου κυκλώματος (PCB) επιτελεί ξεχωριστό ρόλο, όπως η διαχείριση ισχύος, η επεξεργασία σημάτων και ο έλεγχος εξόδων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη θωράκιση, τη φίλτραση και την οργάνωση των κυκλωμάτων ώστε να διασφαλίζεται αξιόπιστη και γρήγορη λειτουργία ακόμα και σε δύσκολες ηλεκτρομαγνητικές συνθήκες. Τα εξαρτήματα ισχύος, οι ηλεκτρονόμοι εξόδου και οι επεξεργαστικές μονάδες είναι διατεταγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται θερμική σταθερότητα και εύκολη συντήρηση, στοιχείο κρίσιμο για εφαρμογές προστασίας σε υποσταθμούς μέσης και υψηλής τάσης.

### 6.5.1 Προστασίες BE1-851

Προστασία υπερεντάσεων :

- 50P / 50N / 50Q: Άμεση υπερένταση φάσης, ουδετέρου και αρνητικής ακολουθίας
- 51P / 51N / 51Q: Χρονική υπερένταση (με χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου)
- 49: Θερμική προστασία με υπολογισμό θερμικής κατάστασης
- 46: Ασυμμετρία ρεύματος (αρνητική ακολουθία)

Αποτυχία διακοπών

- BF (Breaker Failure): Ανίχνευση αποτυχίας διακοπής

Έλεγχος και Αυτόματη Επανείσοδος

- 52 (Breaker Control): Άμεσο άνοιγμα/κλείσιμο διακόπτη
- 79 (Recloser): Αυτόματη επανείσοδος με καθυστερήσεις και αριθμό προσπαθειών
- Virtual Switches 43, 143, 243: Λογικοί επιλογείς για εναλλαγή ρυθμίσεων ή ομάδων

Προγραμματιζόμενη Λογική

- Δυνατότητα πλήρους προγραμματισμού λειτουργιών
- Σύνδεση εισόδων/εξόδων και λειτουργιών μέσα από διάγραμμα
- Επιλογή μεταξύ έτοιμων λογικών σχημάτων ή custom σχεδίαση

Είσοδοι

- 4 προγραμματιζόμενες ψηφιακές είσοδοι

## Κεφάλαιο 6

- Τρέχοντα σήματα (4 αναλογικές εισόδους) για τις 3 φάσεις + ουδέτερος Έξοδοι

- 5 ψηφιακές έξοδοι για χρήση σε trip, alarm, close κ.ά.
- 1 έξοδος συναγερμού (alarm output)

Μετρήσεις και επικοινωνία

- Μέτρηση ρευμάτων φάσεων και ουδέτερου
- Υποστήριξη Modbus RTU, DNP3, ASCII μέσω RS-485 ή RS-232
- Εμφάνιση μετώπου με HMI (οθόνη) ή σύνδεση με PC μέσω BESTCOMS

Τύποι μετρήσεων ρεύματος

- Fundamental – Φιλτράρισμα αρμονικών
- Average
- RMS – Πλήρες εύρος συχνοτήτων



Σχήμα 6.3 Τοποθέτηση Η/Λ λαμπτήρα εντός/εκτός διακόπτη και τριών επιλογών 0/1

### 6.5.2 Υλικά Υλοποίησης

Τα υλικά που επιλέχθηκαν στοχεύουν στην εξασφάλιση της απαραίτητης αντοχής και φορτικότητας, με ταυτόχρονη έμφαση στην αισθητική και την επαγγελματική εμφάνιση. Η υλοποίηση προσεγγίζει πρότυπα κατασκευής αντίστοιχα με αυτά των εμπορικά διαθέσιμων λύσεων, χωρίς να υστερεί σε ποιότητα ή λειτουργικότητα.

- Πίνακας εξωτερικού τύπου
- Γέφυρα ανόρθωσης KBPC3510
- ABB S202 B6 (τεμάχια 2)
- Κλεμοσειρά ράγας

- Διακόπτης με βύσμα IEC C14
- Λυχνίες LED (τεμάχια 3)
- Η/Λ Basler BE1-851
- Βύσματα δοκιμών (τεμάχια 4)
- Επιλογίας κατάστασης 0,1 (τεμάχια 3)
- Ρελέ μινιατούρα 220V DC (τεμάχια 4)



Σχήμα 6.4 Κοπή πρόσοψης πίνακα εργαστηριακής διάταξης

### 6.5.3 Επεξεργασία πίνακα

Κατά την αγορά του πίνακα, το εσωτερικό του ήταν **εντελώς άδειο**, χωρίς καμία προεγκατεστημένη υποδομή για εξαρτήματα ή καλωδιώσεις. Με σκοπό τη λειτουργική και ασφαλή εγκατάσταση του εξοπλισμού, πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω εργασίες:



Σχήμα 6.5 Τοποθέτηση υλικών ράγας RO, RC, RCT και Δικακοπτών B6 S202

- Εγκαταστάθηκε κατάλληλη μεταλλική ράγα DIN στο πίσω μέρος του πίνακα για τη στήριξη ασφαλειών, ρελέ, κλέμμων και άλλων διακοπτικών.
- Τοποθετήθηκαν πλαστικά κανάλια (trunking) για την ευταξία και ασφάλεια των καλωδιώσεων. Αυτά επιτρέπουν την ευκολότερη συντήρηση και πιθανή μελλοντική αναβάθμιση του πίνακα.
- Πραγματοποιήθηκε οργανωμένη όδευση καλωδίων προς και από τις κλέμμες, με σωστή σήμανση για την αναγνώριση κάθε κυκλώματος. Χρησιμοποιήθηκαν χρωματιστά καλώδια σύμφωνα με τα πρότυπα για ευκολότερη διάγνωση και έλεγχο.
- Τοποθετήθηκαν αυτόματοι διακόπτες, ρελέ, και βοηθητικά εξαρτήματα. Η εγκατάσταση έγινε με βάση τους κανονισμούς και τις τεχνικές απαιτήσεις του κυκλώματος.



Σχήμα 6.6 Καλωδίωση Η/Λ με RCT και καλωδίωση γεφυρών στις κλεμοσειρές I/O του Η/Λ

#### 6.5.4 Παραδείγματα άμεσης επέμβασης

Εξερχόμενη γραμμή από μετασχηματιστή ισχύος, στην οποία είναι συνδεδεμένοι σε σειρά ένας διακόπτης ισχύος και δύο μετασχηματιστές έντασης (CTs). Ο ηλεκτρονόμος είναι ρυθμισμένος με λειτουργία αυτόματης επανείσοδου (Recloser – ANSI 79), με μέγιστο αριθμό προσπαθειών 3. Οι καθυστερήσεις επανείσοδου είναι: 0,5 s για την πρώτη, 1 s για τη δεύτερη και 2 s για την τρίτη προσπάθεια.

a. Πρώτο βήμα Φυσιολογική λειτουργία

Η γραμμή τροφοδοτεί το φορτίο. Οι CTs μετρούν  $L1 = 200 \text{ A}$  και  $L2 = 200 \text{ A}$ , διαφορά ρεύματος 10 A, η οποία βρίσκεται **εντός των ορίων**. Καμία προστασία δεν ενεργοποιείται.

b. Δεύτερο βήμα αναπάντεχο Βραχυκύκλωμα

Ο CT στη φάση L1 μετρά ρεύμα 150 A. Η προστασία 50P (άμεση υπερένταση) ενεργοποιείται και στέλνει σήμα TRIP μέσω της εξόδου OUT1. Ο διακόπτης ανοίγει και ο ηλεκτρονόμος ξεκινά να χρονομετρά για επανείσοδο.

c. Τρίτο βήμα επανείσοδος

Ο ηλεκτρονόμος μετρά 0,5 s και δίνει εντολή για επανακλείσιμο του διακόπτη. Η βλάβη παραμένει·  $L1 = 140 \text{ A}$ . Ο ηλεκτρονόμος καταγράφει “Reclose 1 Failed” και δίνει νέο TRIP.

d. Τέταρτο βήμα δεύτερη επανείσοδος

Μετά από 1 s, ο ηλεκτρονόμος επιχειρεί δεύτερη επανείσοδο. Η βλάβη συνεχίζεται,  $L1 = 140 \text{ A}$ . Καταγράφεται “Reclose 2 Failed” και ο διακόπτης ανοίγει ξανά.

e. Πέμπτο βήμα Τρίτη επανείσοδος

Ο χρόνος αναμονής είναι 2 s. Ο ηλεκτρονόμος δίνει εντολή επανείσοδου. Η υπερένταση παραμένει ( $L1 = 1400 \text{ A}$ ), και καταγράφεται “Reclose 3 Failed”. Ο διακόπτης ανοίγει για τρίτη φορά.

f. Έκτο βήμα κατάσταση Lockout

Καθώς έχουν αποτύχει όλες οι επανεισοδοί και η υπερένταση συνεχίζεται, ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιεί την έξοδο  $OUT4 = TRUE$ , και εισέρχεται σε κατάσταση LOCKOUT. Στην οθόνη HMI εμφανίζεται το μήνυμα:

“Reclose Failed – Lockout Active”.

Για να επανέλθει η λειτουργία της προστασίας, απαιτείται χειροκίνητο reset από τον χειριστή. Η διαδικασία επαναφοράς απαιτεί παρατεταμένο πάτημα του πλήκτρου RESET. Ο χρόνος μέχρι την πλήρη αποκατάσταση είναι περίπου 15 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 6.7 Καλωδίωση Η/Λ με κλεμοσειρές X, Relay Open, Relay Close

### 6.5.5 Παράδειγμα χρονικής υπερέντασης ουδέτερου

Εξερχόμενη γραμμή από Μ/Σ ισχύος, σε σειρά είναι συνδεδεμένοι ένας διακόπτης ισχύος και δύο CTs, καθώς και ουδέτερος CT. Ο ηλεκτρονόμος μας είναι ρυθμισμένος με recloser (79), μέγιστες

## Κεφάλαιο 6

προσπάθειες 3. Οι χρόνοι επανείσοδου είναι: 0,5 s ο πρώτος κύκλος, 1,5 s ο δεύτερος κύκλος, 3 s ο τρίτος κύκλος

### a. Πρώτο βήμα Φυσιολογική λειτουργία

Η γραμμή τροφοδοτεί το φορτίο. Οι CTs μετρούν  $L1 = 200 \text{ A}$  και  $L2 = 200\text{A}$ , διαφορά ρεύματος  $0 \text{ A}$ , η οποία βρίσκεται **εντός των ορίων**. Καμία προστασία δεν ενεργοποιείται.

### b. Δεύτερο βήμα αναπάντεχο Βραχυκύκλωμα

Παρουσιάζεται διαρροή σε φάση (π.χ. L2) και το ουδέτερο CT αναγνωρίζει ρεύμα προς γη  $I_n = 20\text{A}$ . Η προστασία 51N (χρονική υπερένταση γείωσης) ενεργοποιείται, καθώς ξεπερνιέται το όριο των 15A. Ξεκινά καθυστέρηση 2 δευτερολέπτων.

### c. Τρίτο βήμα επανείσοδος

Μετά την καθυστέρηση των 2s, ο ηλεκτρονόμος δίνει σήμα TRIP μέσω OUT1 και ο διακόπτης ανοίγει. Ξεκινά ο πρώτος κύκλος επανείσοδου (χρονόμετρο 0,5 s).

### d. Τέταρτο βήμα δεύτερη επανείσοδος

Μετά από 0,5 s, ο ηλεκτρονόμος δίνει εντολή να ξανακλείσει ο διακόπτης. Η διαρροή παραμένει σταθερή ( $I_n = 20\text{A}$ ). Ξεκινά πάλι καθυστέρηση 2s και στη συνέχεια ο ηλεκτρονόμος δίνει νέο TRIP. Ο διακόπτης ανοίγει.

### e. Πέμπτο βήμα Τρίτη επανείσοδος

Ο ηλεκτρονόμος χρονίζει 1,5 s και ξαναδίνει εντολή στον διακόπτη να κλείσει. Η διαρροή συνεχίζει να υπάρχει, το ρεύμα γης παραμένει 20A. Μετά από νέα καθυστέρηση 2s, δίνεται νέο TRIP. Ο διακόπτης ανοίγει.

### f. Έκτο βήμα κατάσταση Lockout

Μετά από 3 s, ο ηλεκτρονόμος επιχειρεί τρίτη επανείσοδο. Η διαρροή συνεχίζεται στα 20A και μετά από καθυστέρηση 2s ξαναδίνεται TRIP. Ο διακόπτης ανοίγει για τρίτη φορά.

### g. Έβδομο βήμα κατάσταση εκτός (Lockout)

Καθώς όλες οι προσπάθειες επανείσοδου έχουν αποτύχει και η υπερένταση γης παραμένει, το ρελέ δίνει σήμα  $\text{OUT4} = \text{TRUE}$ . Ο ηλεκτρονόμος εισέρχεται σε κατάσταση lockout. Στην οθόνη HMI εμφανίζεται το μήνυμα:  
“51N Earth Fault – Reclose Failed – Lockout Active”

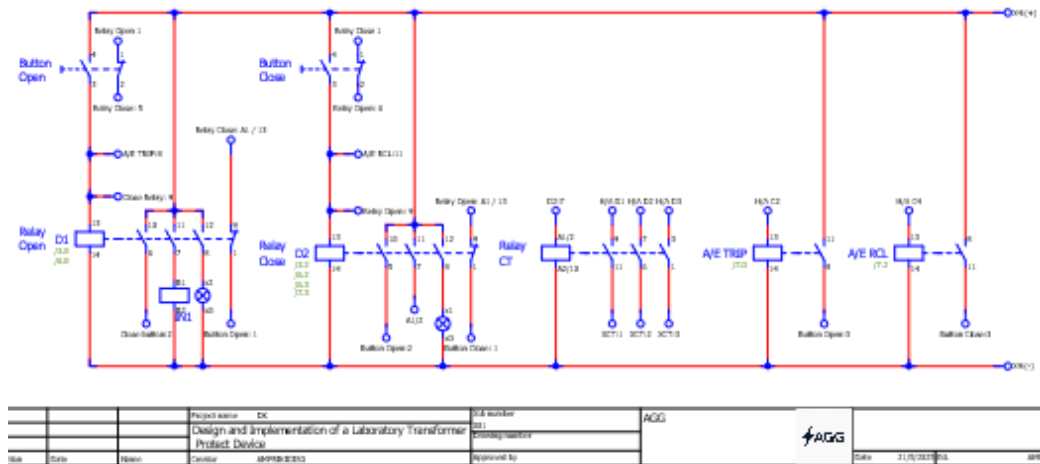
Για να επανέλθει σε λειτουργία η προστασία, απαιτείται χειροκίνητο reset από τον χειριστή μέσω πλήκτρου RESET ή ψηφιακής εισόδου. Ο συνολικός χρόνος επαναφοράς διαρκεί περίπου 15 δευτερόλεπτα, έως ότου ο ηλεκτρονόμος είναι ξανά έτοιμος.





Σχήμα 6.8 Μπροστινή όψη λαμπάκι ALARM, Δ.X, λυχνία 0/1 διακόπτη, τρεις διακόπτες 0/1

### 6.5.6 Διαγράμματα υλοποίησης



Σχήμα 6.9 Διάγραμμα γενικής διάταξης

Υπόμνημα :

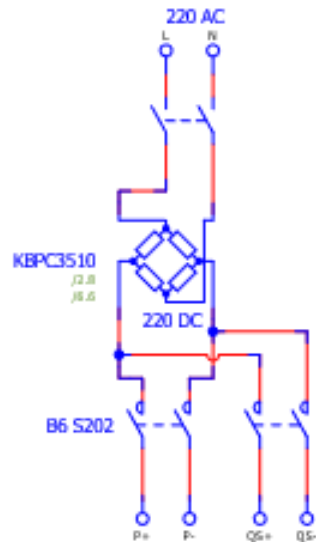
Relay Open D1 αποτελείται από τρεις ανοιχτές και μια κλειστή επαφή

Relay Close D2 αποτελείται από τρεις ανοιχτές και μια κλειστή επαφή

Relay CT

Relay A/E TRIP

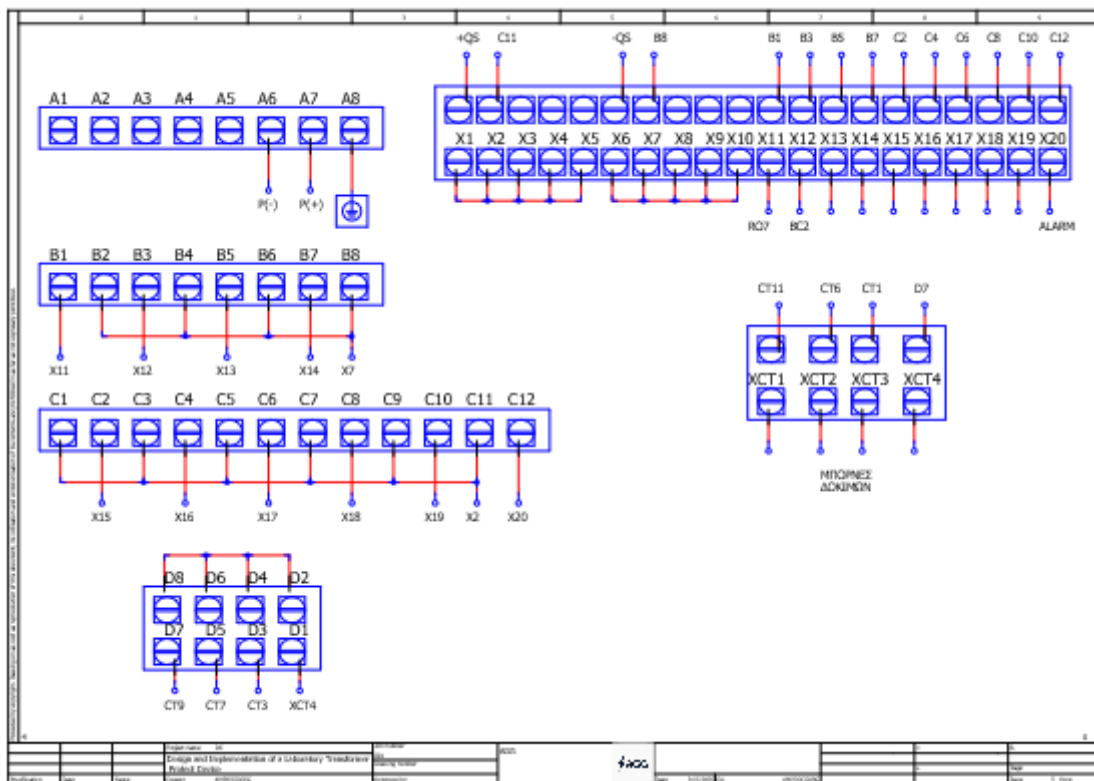
Relay A/E RCL



Σχήμα 6.10 Διάγραμμα παροχών τροφοδοσίας

Υπόμνημα :

- Εισαγωγή τάσης 220V με βύσμα IEC C14 (μονοφασικό)
- Διακόπτης εξωτερικά του πίνακα χωνευτός διακόπτει φάση και ουδέτερο
- Γέφυρα ανόρθωσης KBPC3510
- Δύο σετ διπλών διακοπών ράγας ABB B6 S202



Σχήμα 6.11 Διάγραμμα κλεμών Η/Λ και κλεμοσειμών ράγας X, XCT

Υπόμνημα :

- Κλεμοσειρά Α ανήκει στον ηλεκτρονόμο (Τροφοδοσία)

- Κλεμοσειρά Β ανήκει στον ηλεκτρονόμο (INPUT)
- Κλεμοσειρά C ανήκει στον ηλεκτρονόμο (OUTPUT)
- Κλεμοσειρά D ανήκει στον ηλεκτρονόμο (εντάσεις)
- Κλεμοσειρά X ράγας είναι εσωτερικά του πίνακα
- Κλεμοσειρά XCT εσωτερικά του και διασυνδέει τον Η/Λ με τις μπόρνες δοκιμών

## Κεφάλαιο 7ο: Εφαρμογή BASLER Ηλεκτρονόμου

### 7.1 Εισαγωγή

Το BE1-851H της Basler Electric είναι ένα ψηφιακό σύστημα προστασίας υπερέντασης που προσφέρει πολυάριθμες λειτουργίες για την προστασία και τον έλεγχο ηλεκτρικών συστημάτων. Η εφαρμογή BESTCOMS™ είναι το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση, την παρακολούθηση και τη διαχείριση του BE1-851H.

Το BE1-851H αποτελεί μια καινοτόμο λύση στον χώρο της ηλεκτρονικής προστασίας, σχεδιασμένη για να εξασφαλίζει υψηλή αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα στα ηλεκτρικά συστήματα. Με τη σύγχρονη τεχνολογία που ενσωματώνει, το BE1-851H παρέχει ακριβείς μετρήσεις και γρήγορη απόκριση σε περιπτώσεις που απαιτούν άμεση ενέργεια, συμβάλλοντας καθοριστικά στην προστασία των κρίσιμων υποδομών.

Βασικά Χαρακτηριστικά:

- **Αξιοπιστία:** Η ανθεκτική κατασκευή του επιτρέπει σταθερή λειτουργία ακόμη και σε απαιτητικές συνθήκες, μειώνοντας τον κίνδυνο βλαβών και διακοπών.
- **Ακρίβειες:** Ενσωματωμένες τεχνολογίες για ακριβή μέτρηση και έγκαιρη ανίχνευση καταστάσεων που ενδεχομένως απαιτούν παρέμβαση.
- **Ευκολία Ενσωμάτωσης:** Σχεδιασμένο για εύκολη ενσωμάτωση στα υπάρχοντα δίκτυα, επιτρέποντας την απρόσκοπτη συνεργασία με άλλες μονάδες και συστήματα.
- **Ευελιξία Εφαρμογής:** Ιδανικό για εφαρμογές σε μετασχηματιστές, υποσταθμούς και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπου η προστασία και η σταθερότητα του συστήματος είναι κρίσιμες.
- **Αυτοδιάγνωση και Διαχείριση:** Με ενσωματωμένες λειτουργίες αυτοδιάγνωσης, το BE1-851H διευκολύνει τη συντήρηση και την παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Με αυτές τις καινοτομικές ιδιότητες, το BE1-851H αντιπροσωπεύει μια εξέλιξη στα ηλεκτρονικά συστήματα προστασίας, συμβάλλοντας σημαντικά στη βελτίωση της ασφάλειας, της απόδοσης και της μακροχρόνιας αξιοπιστίας των ηλεκτρικών υποδομών. Είναι μια επιλογή που απευθύνεται σε επαγγελματίες και μηχανικούς που επιδιώκουν την τεχνολογική υπεροχή και την καινοτομία στην προστασία και διαχείριση των ηλεκτρολογικών συστημάτων.

### 7.2 Κύριες δυνατότητες BE1-851H

- **Προστασία Υπερέντασης:** Παρέχει προστασία από υπερένταση για τρεις φάσεις, γείωση και αρνητική ακολουθία.
- **Επαναφορά (Reclosing):** Διαθέτει λειτουργία επαναφοράς με έως και τέσσερις προσπάθειες επαναφοράς.
- **Αποτυχία Διακόπτη (Breaker Failure):** Παρακολουθεί την απόδοση του διακόπτη και ενεργοποιεί την προστασία σε περίπτωση αποτυχίας.
- **Παρακολούθηση Διακόπτη:** Παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση και τη φθορά των επαφών του διακόπτη.
- **Έλεγχος και Μετρήσεις:** Ενσωματώνει λειτουργίες ελέγχου και μετρήσεων για την παρακολούθηση του συστήματος.

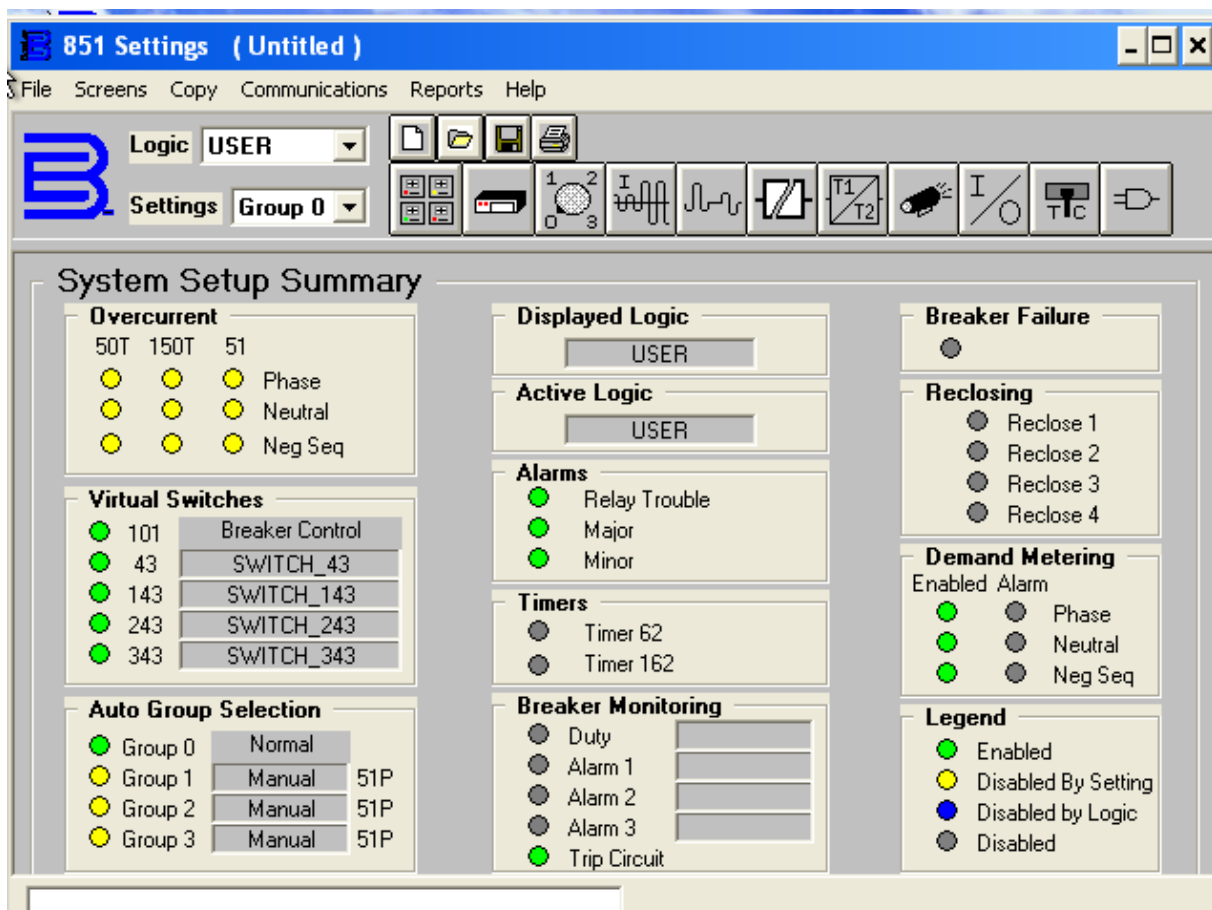
### 7.3 Δυνατότητες της εφαρμογής BESTCOMS

- Διαμόρφωση Ρυθμίσεων: Επιτρέπει τη ρύθμιση των παραμέτρων προστασίας και ελέγχου του BE1-851H.
- Παρακολούθηση σε Πραγματικό Χρόνο: Παρέχει δυνατότητα παρακολούθησης των μετρήσεων και της κατάστασης του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.
- Ανάλυση Συμβάντων: Διαθέτει εργαλεία για την καταγραφή και ανάλυση συμβάντων, όπως καταγραφές κυματομορφών.
- Ενημέρωση Λογισμικού: Υποστηρίζει την ενημέρωση του λογισμικού του BE1-851H για τη βελτίωση της λειτουργικότητας και της ασφάλειας.

### 7.4 Εγκατάσταση προγράμματος

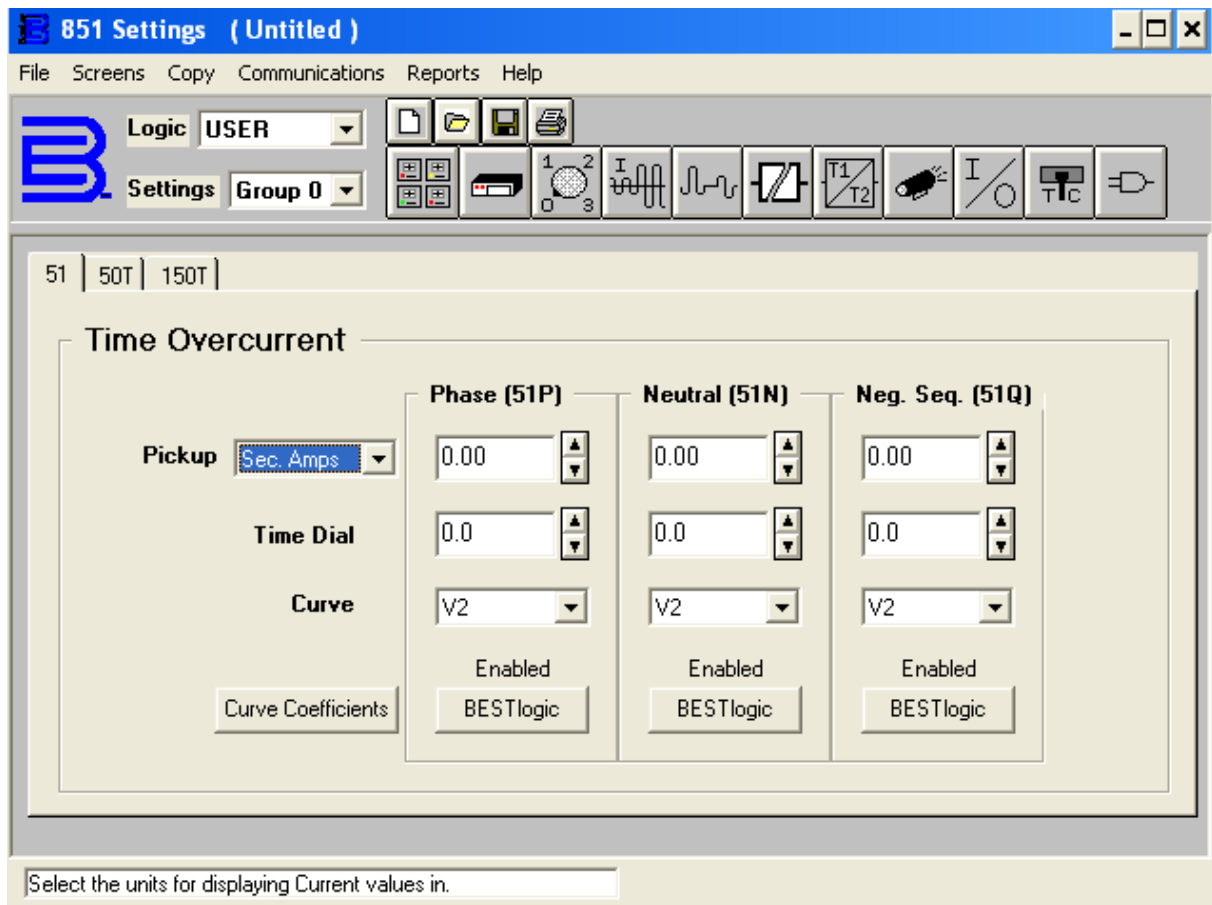
Η εφαρμογή εγκαθίσταται σε συστήματα που διαθέτουν το λειτουργικό Windows Xp , με αρχιτεκτονική X86. Οι απαιτήσεις της εφαρμογής σε διαθέσιμο hardware

### 7.5 Αρχική οθόνη προγράμματος



Σχήμα 7.1 Απεικόνιση αρχικής εκκίνησης (εφαρμογής BASLER)

## 7.6 Ρυθμίσεις υπερέντασης χρόνου



Σχήμα 7.2 Ρύθμιση υπερέντασης χρόνου (εφαρμογής BASLER)

### Pickup

- Base amp: Ορίστε την ονομαστική τιμή ρεύματος (π.χ., 1A ή 5A) ανάλογα με το CT.
- Time Dial: Ρυθμίστε ανάλογα με τον επιθυμητό χρόνο απόκρισης (π.χ., 0.1–15).
- Curve: Επιλέξτε καμπύλη IEC/IEEE (π.χ., IEC Normal Inverse, V2).
- Curve Coefficients: Αφήστε τις προεπιλεγμένες τιμές της BASLER για την επιλεγμένη καμπύλη.

### Phase (51P)

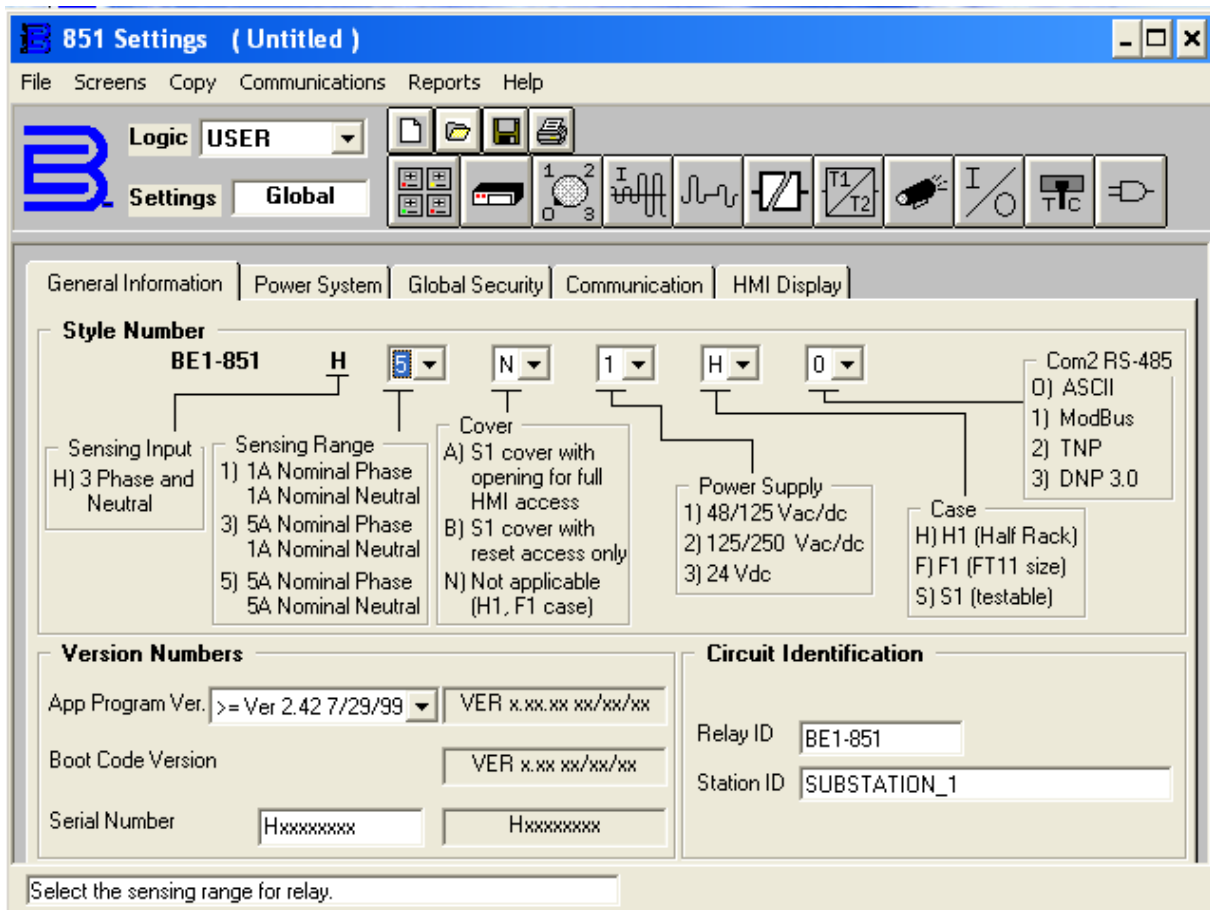
- Pickup Current: Ορίστε τιμή μεγαλύτερη από το φορτίο (π.χ.,  $1.2 \times I_{\text{φορτίο}}$ ).
- Time Dial: Ρυθμίστε για επιθυμητό χρόνο διακοπής (π.χ., 0.5–1.0).
- Curve: Επιλέξτε "V2" (τυπική καμπύλη BASLER)..
- BEST Logic: Χρησιμοποιήστε για βελτιστοποίηση απόκρισης σε βλάβες.

### Neutral (51N)

- Pickup Current: Ρυθμίστε ~20-40% του ονομαστικού ρεύματος για ευαισθησία σε ασύμμετρες βλάβες.
- Time Dial: Χρόνος πιο γρήγορος από τον 51P (π.χ., 0.3–0.7).
- BEST Logic: Χρησιμοποιήστε για βελτιστοποίηση απόκρισης σε βλάβες.

### Negative Sequence (510)

- Pickup Current: Ρυθμίστε ~10-20% για ανίχνευση ασυμμετρίας.
- Time Dial: Χρόνος ανάλογα με την ευαισθησία (π.χ., 0.2–0.5).



Σχήμα 7.3 Γενική λειτουργία (εφαρμογής BASLER)

- Επιλογή Sensing Range

Από την ενότητα "Style Number", οι διαθέσιμες επιλογές είναι:

- 3 Phase and Neutral
- 5A Nominal Phase
- 4A Nominal Neutral
- 5A Nominal Phase
- 5A Nominal Phase
- 5A Nominal Neutral

Η κατάλληλη επιλογή γίνεται ανάλογα την εφαρμογή.

- Συνιστώμενες Ρυθμίσεις

Αν το σύστημα σας είναι 3-φασικό με ουδέτερο και χρησιμοποιεί CTs 5A:

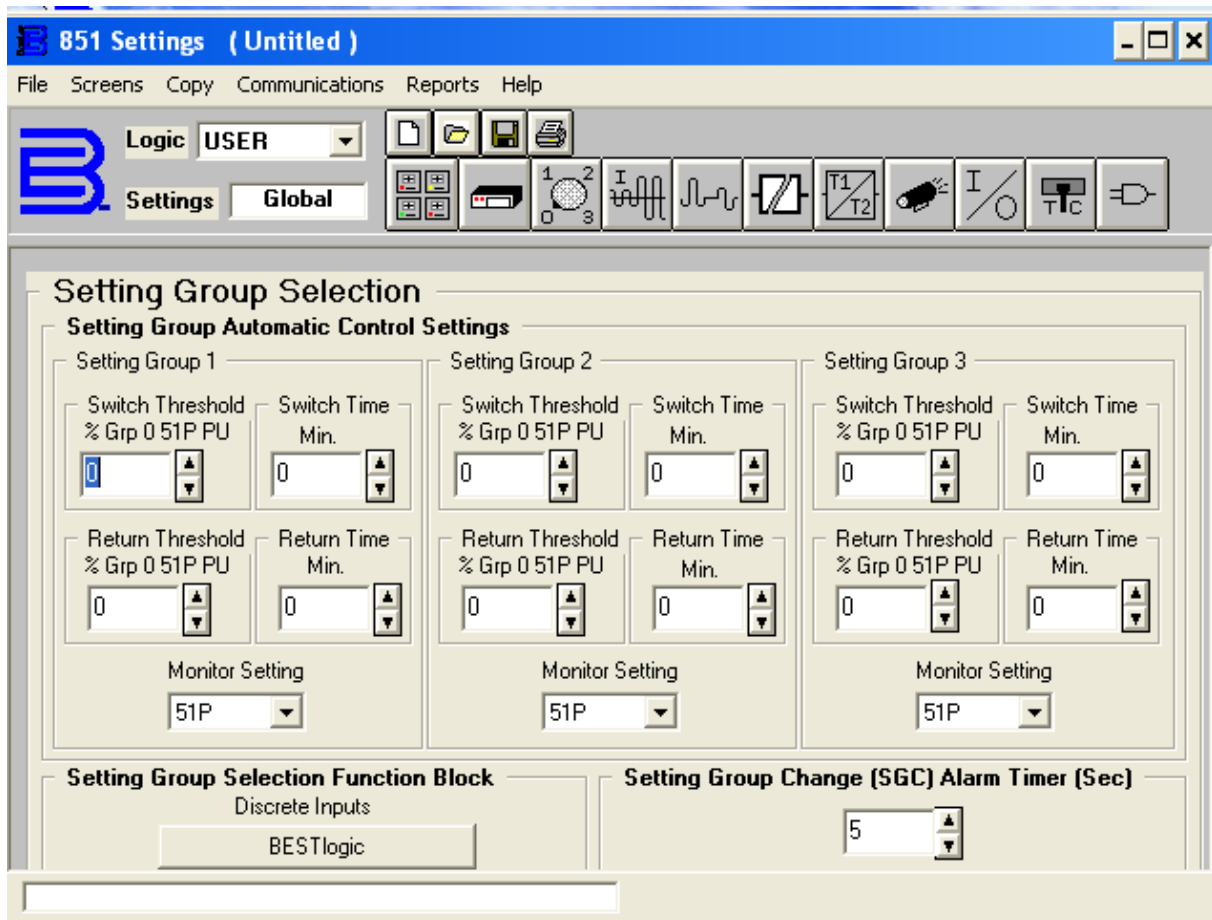
- Sensing Input: Επιλέξτε "3 Phase and Neutral".
- Sensor Range:  
Για φάσεις: "5A Nominal Phase".  
Για ουδέτερο: "5A Nominal Neutral".

- Σημειώσεις

Οι επαναλαμβανόμενες επιλογές (π.χ., "5A Nominal Phase" στις θέσεις 2, 4, 5) πιθανόν αντιστοιχούν σε διαφορετικές εφαρμογές ή διασυνδέσεις. Επιλέξτε μία από αυτές ανάλογα με τις προδιαγραφές του CT.

Η επιλογή "4A Nominal Neutral" (Επιλογή 3) χρησιμοποιείται σε συστήματα με χαμηλότερο ονομαστικό ρεύμα ουδέτερου.

Επαληθεύστε τις ρυθμίσεις με βάση το εγχειρίδιο του BE1-851 ή τα δεδομένα των CTs του συστήματος.



Σχήμα 7.4 Ρύθμιση επιλογής ομάδας (εφαρμογής BASLER)

Ρυθμίσεις Αυτόματου Ελέγχου Ομάδας Ρυθμίσεων :

**Switch Threshold:**

- Ορίστε το ποσοστό  $0.51 \times \text{Pickup Current (PU)}$  για την ενεργοποίηση εναλλαγής σε άλλη ομάδα ρυθμίσεων.
- Για παράδειγμα, αν το Pickup Current είναι 100A, η εναλλαγή θα γίνει όταν το ρεύμα φτάσει 51A ( $0.51 \times 100A$ ).
- Η παράμετρος Min καθορίζει την ελάχιστη τιμή για να θεωρηθεί έγκυρη η εναλλαγή.

**Return Threshold:**

- Ορίστε το ποσοστό  $0.51 \times \text{Pickup Current (PU)}$  για την επιστροφή στην προεπιλεγμένη ομάδα.
- Για σταθερή λειτουργία, συνιστάται να είναι χαμηλότερο από το Switch Threshold (π.χ.,  $0.45 \times \text{PU}$ ).

**Monitor Setting:**

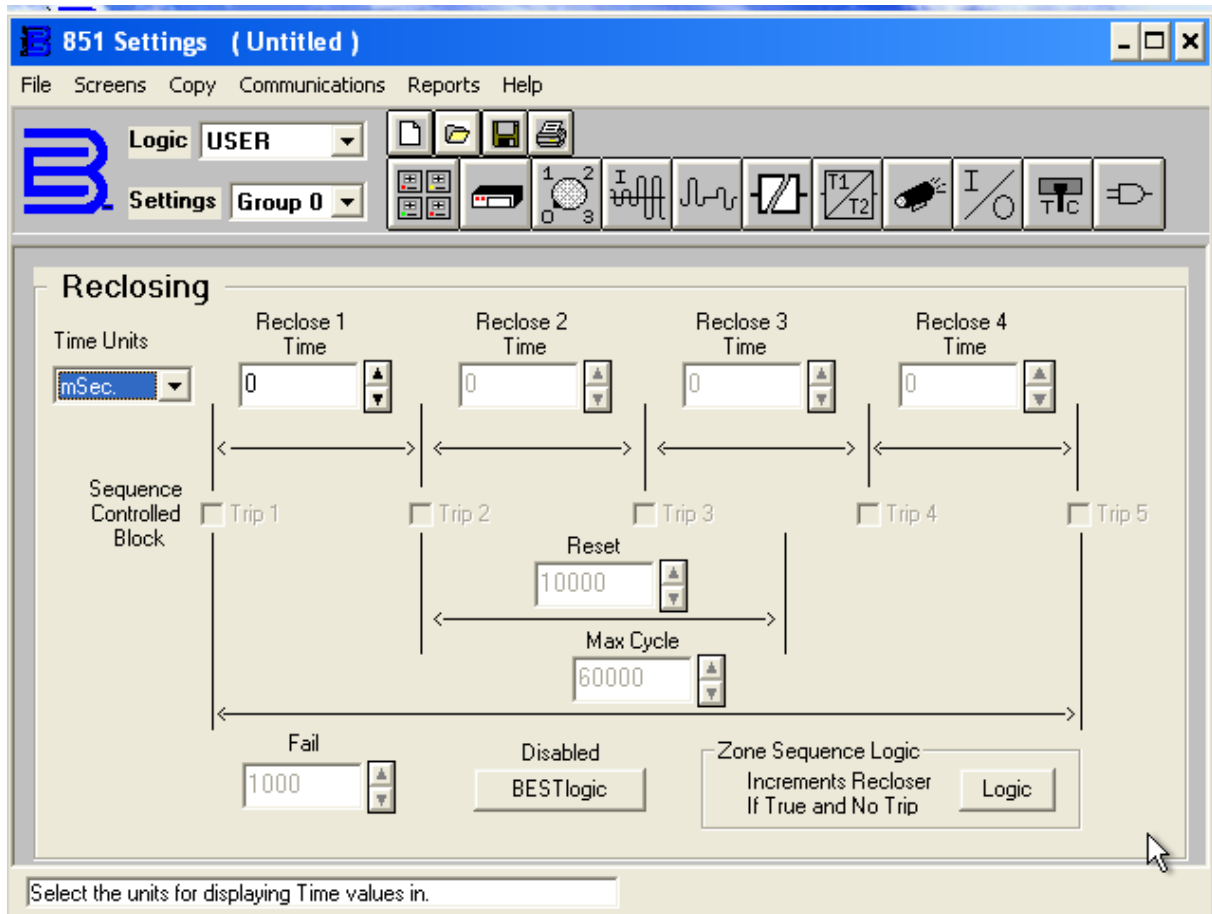
- Το SIP (Setting Influence Parameter) αναφέρεται σε παράμετρο που επηρεάζει την απόκριση του ρελέ. Αφήστε την προεπιλογή ή ρυθμίστε σύμφωνα με το σύστημα.

Λειτουργικό Μπλοκ Επιλογής Ομάδας :

**Discrete Inputs:**



- Ενεργοποιήστε τη BEST Logic για βέλτιστη διαχείριση αλλαγών ομάδων ρυθμίσεων σε συνθήκες βλάβης.
- Η BEST Logic προσαρμόζει αυτόματα τη στρατηγική προστασίας με βάση το είδος της βλάβης.



Σχήμα 7.5 Ρύθμιση επαναφοράς συστήματος (εφαρμογή BASLER)

### Επιλογή Μονάδων Χρόνου :

Η επιλογή εξαρτάται από τις τιμές στις ρυθμίσεις :

- Reclose 1 Time": Η τιμή 1000 (στο "Fail") και "Reclose 2 Time" → "Max Cycle: 60000" υποδηλώνουν χρήση milliseconds (ms).
- Αν οι τιμές ήταν σε δευτερόλεπτα, το "Max Cycle: 60000" θα αντιστοιχούσε σε 16.7 ώρες, πράγμα απίθανο για ρυθμίσεις επανασύνδεσης.
- Συνηθισμένη επιλογή μονάδος χρόνου ms.

Ρυθμίσεις Αναλυτικά :

Reclose 1 Time:

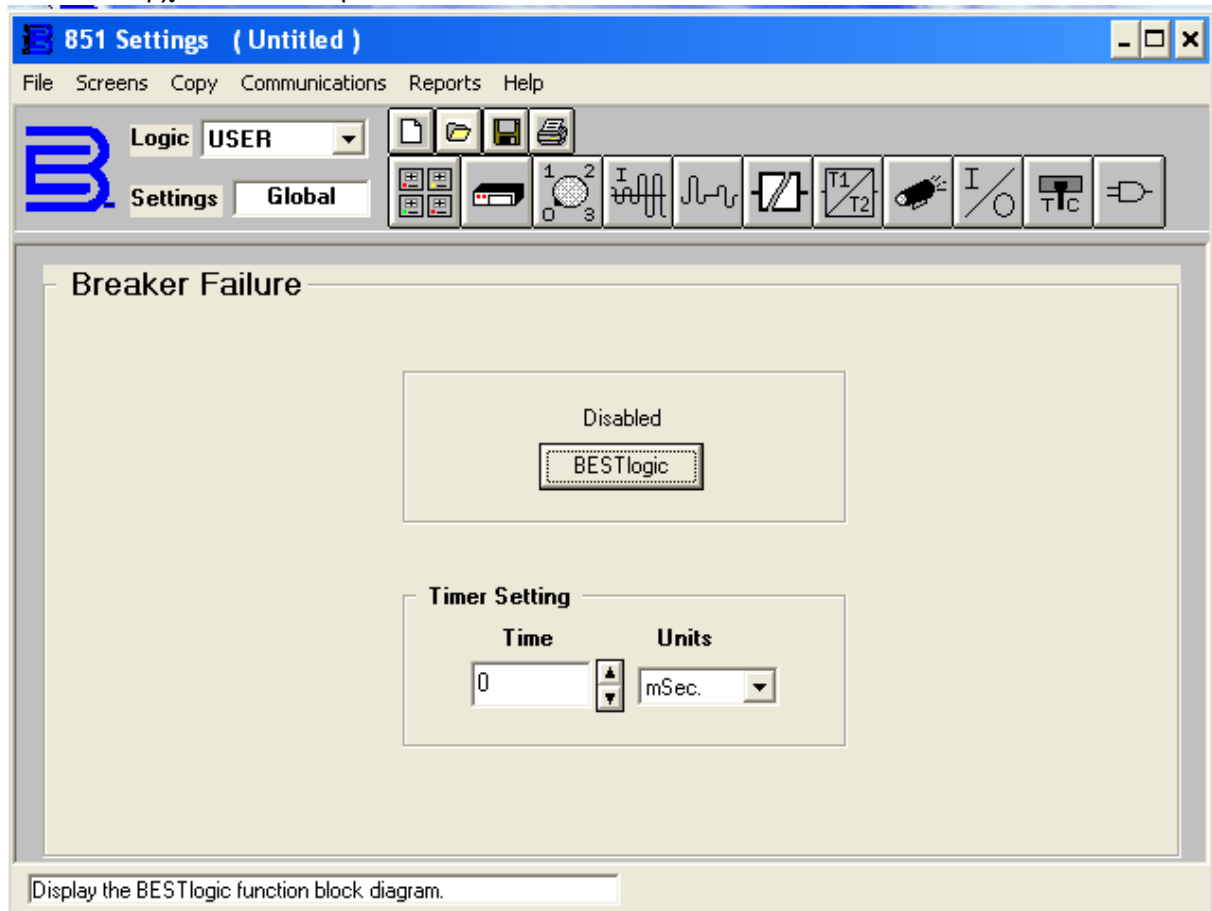
- Fail: 1000 ms (1 δευτερόλεπτο) → Χρόνος πριν ανακοινωθεί αποτυχία επανασύνδεσης.
- A → Y: Λογική κατάσταση (π.χ., "Ναι" για ενεργοποίηση).

Reclose 2 Time:

- Max Cycle: 60000 ms (1 λεπτό) → Μέγιστος χρόνος επανάληψης πριν την επαναφορά.
- Disabled BEST Logic: Η αυτόματη βελτιστοποίηση απενεργοποιήθηκε για αυτό το στάδιο.

Reclose 3 Time:

- Zone Sequence Logic: Επανασύνδεση αυξάνεται μόνο αν ικανοποιείται η συνθήκη και δεν υπάρχει νέα διακοπή.



Σχήμα 7.6 Αστοχία διακόπτη (εφαρμογή BASLER)

Για να ρυθμίσετε τη λειτουργία Breaker Failure στο ρελέ B51, ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα:

Ρυθμίσεις Breaker Failure :

- Κατάσταση: Η λειτουργία είναι Disabled, επομένως το ρελέ δεν θα ανιχνεύει αστοχία διακόπτη.
- BEST Logic: Παραμένει ενεργή για άλλες λειτουργίες προστασίας, αλλά δεν εφαρμόζεται στη Breaker Failure.

Timer Setting :

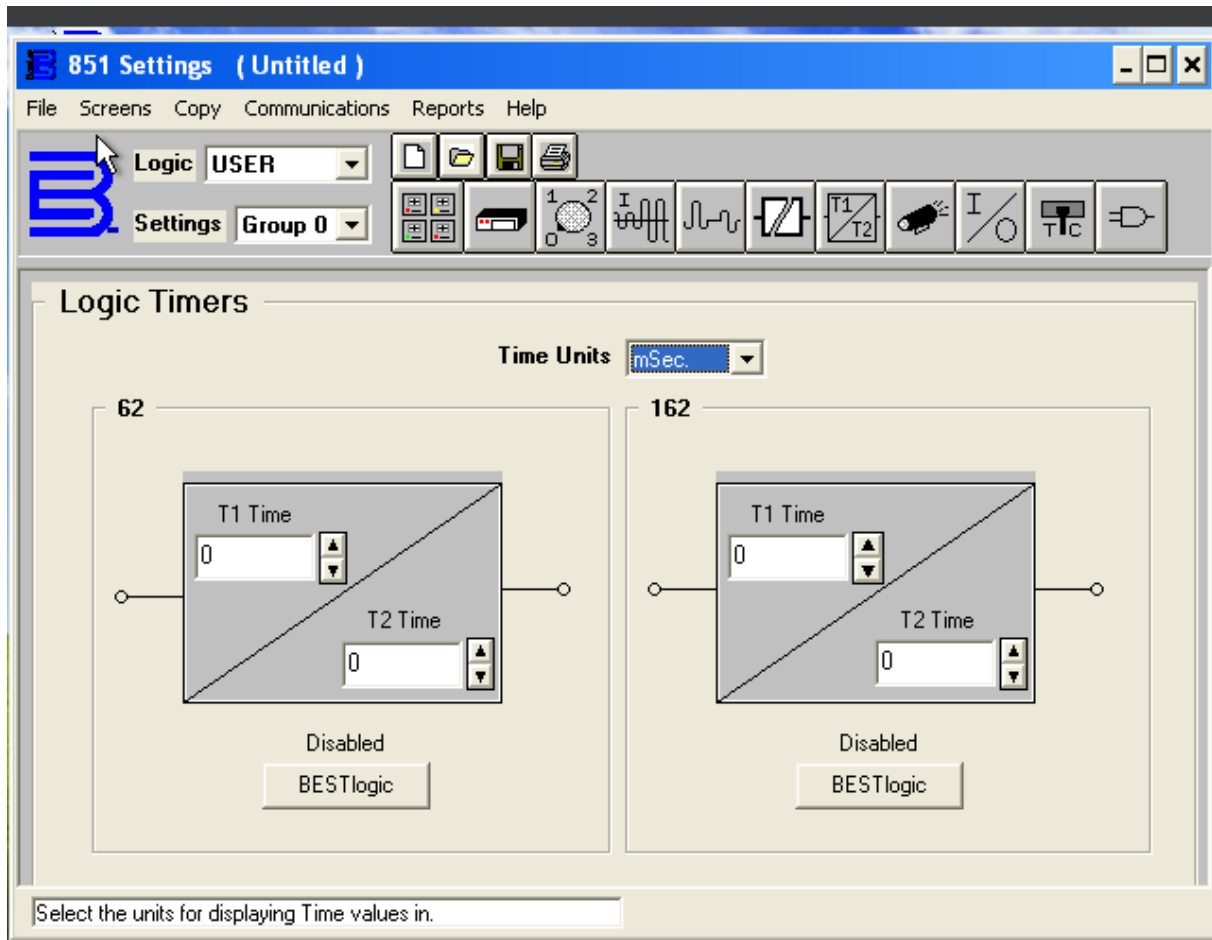
- Χρόνος 0 δευτερόλεπτα αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει χρονική καθυστέρηση σε οποιαδήποτε υποθετική ενεργοποίηση της Breaker Failure.

Best Logic Function Block Diagram :

- Είσοδοι: Σήματα από ρεύματα, τάσεις, ή διακριτές εισόδους.
- Λογικές Συναρτήσεις: Συνδυασμοί AND/OR για ανίχνευση τύπου βλάβης.
- Έξοδοι: Αυτόματη προσαρμογή ρυθμίσεων (π.χ., Time Dial, Pickup) βάσει συνθηκών.

Επαλήθευση :

- Βεβαιωθείτε ότι οι υπόλοιπες λειτουργίες προστασίας (π.χ., Overcurrent, Recloser) παρέχουν επαρκή κάλυψη χωρίς τη Breaker Failure.
- Η απενεργοποίηση της Breaker Failure σημαίνει ότι το ρελέ δεν θα εκτελέσει αυτόματη επανασύνδεση ή ειδοποίηση σε περίπτωση αστοχίας διακόπτη.



Σχήμα 7.7 Λογικοί χρονιστές (εφαρμογή BASLER)

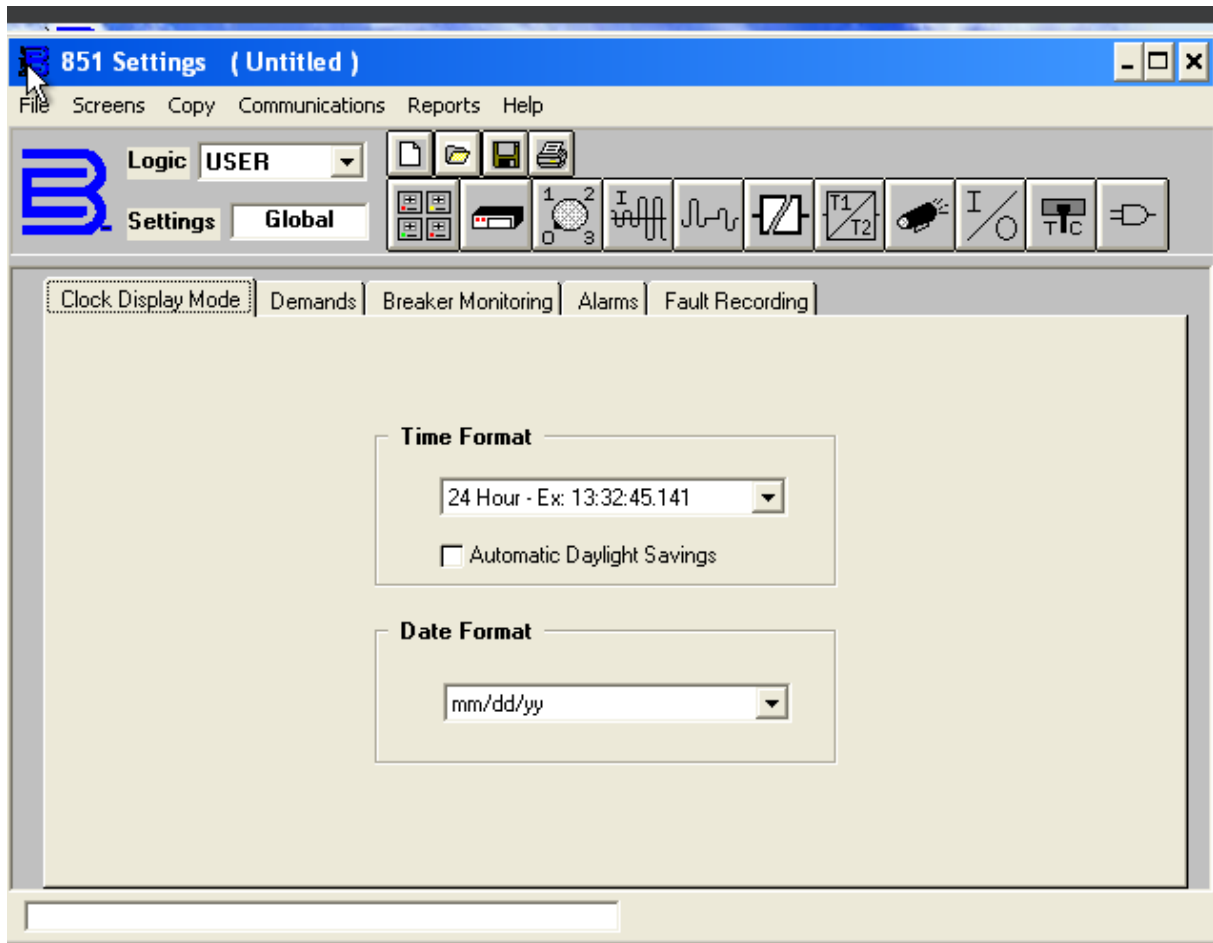
### Επιλογή μονάδων χρόνου

Οι επιλογές 62, 162, T1 Time, T2 Time, Disabled, και BESTlogic δεν αντιστοιχούν άμεσα σε μονάδες χρόνου (π.χ., δευτερόλεπτα, ms). Πιθανές ερμηνείες:

- 62 και 162: Κωδικοί για προκαθορισμένες χρονικές ρυθμίσεις ή αναφορές σε συγκεκριμένες λογικές συναρτήσεις.
- T1 Time / T2 Time: Χρονικές παράμετροι για συγκεκριμένες λειτουργίες (π.χ., χρόνος καθυστέρησης).
- Disabled: Απενεργοποιεί τη χρονική λειτουργία.
- BESTlogic: Σχετίζεται με την αυτόματη βελτιστοποίηση της προστασίας.

### Συνιστώμενες Ενέργειες

- Ανατρέξτε στο Εγχειρίδιο: Επιβεβαιώστε την ερμηνεία των παραμέτρων 62, 162, T1 Time, κ.λπ.
- Χρήση Λογισμικού: Χρησιμοποιήστε το εργαλείο ρύθμισης της Basler (π.χ., BESTCOMS) για να δείτε τις διαθέσιμες μονάδες χρόνου (Seconds, ms, κ.λπ.).
- Επαλήθευση: Αν οι τιμές 62/162 αντιστοιχούν σε κωδικούς και όχι σε χρόνο, αλλάξτε τις μονάδες μέσω του λογισμικού.



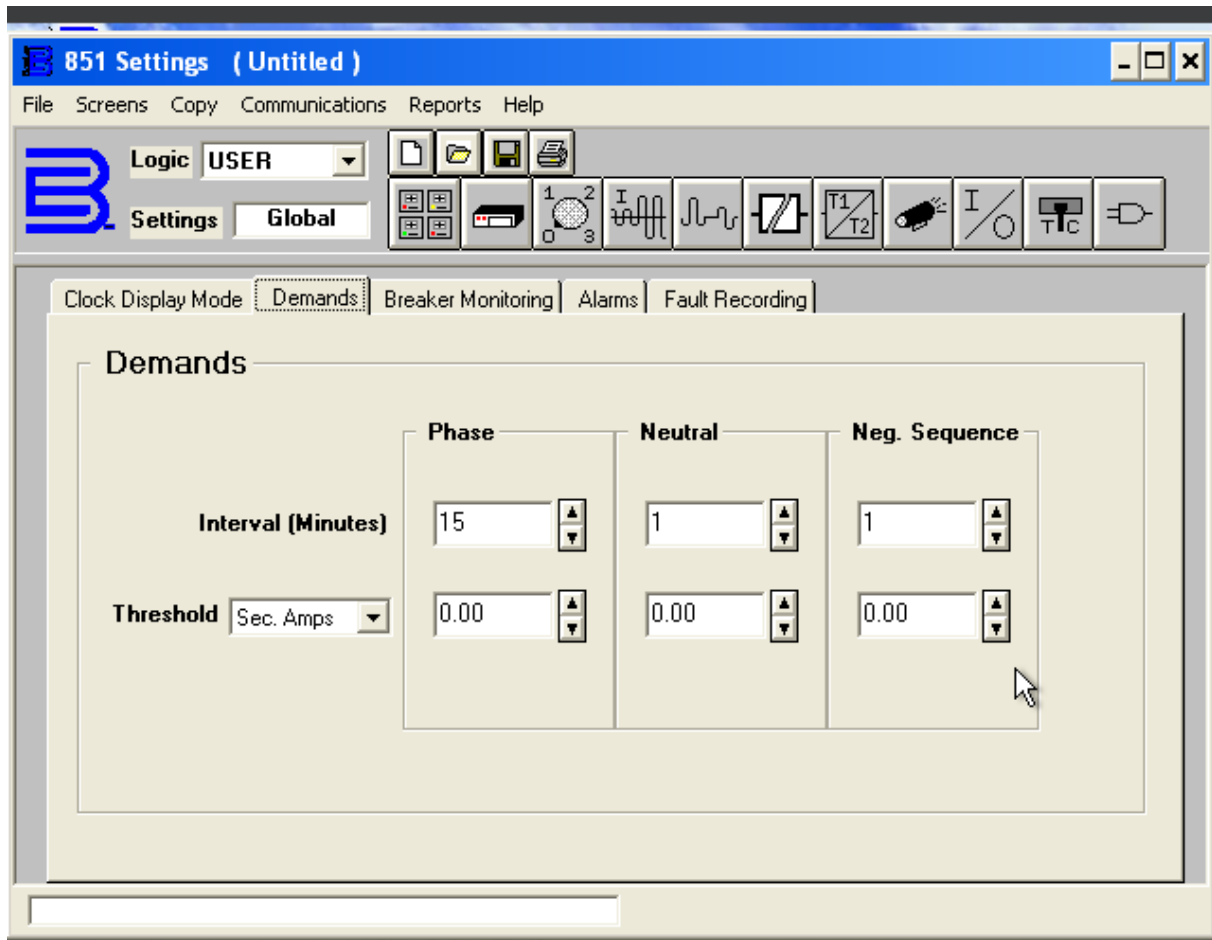
Σχήμα 7.8 Ρύθμιση ρολογιού οθόνης Ηλεκτρονόμου (εφαρμογή BASLER)

#### Λειτουργία εμφάνισης ρολογιού

- Demands: Εμφανίζει μετρήσεις φορτίου/ζήτησης.
- Breaker Monitoring: Εμφανίζει κατάσταση διακόπτη.
- Alarms: Εμφανίζει ενεργούς συναγερμούς.
- Fault Recording: Εμφανίζει καταγεγραμμένες βλάβες.

#### Συνιστώμενες Ρυθμίσεις

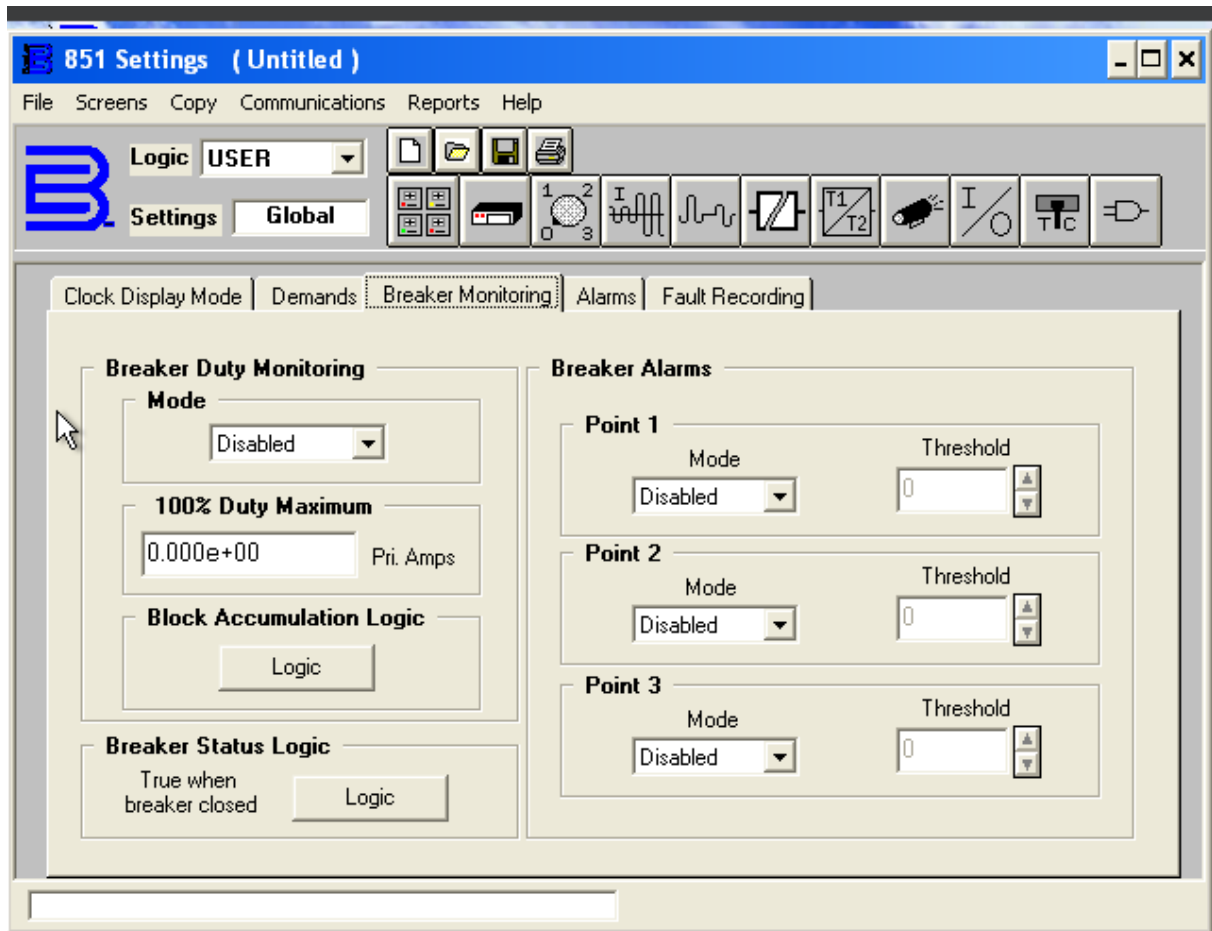
- Clock Display Mode: Fault Recording + Alarms
- Time Format: 24 Hour
- Date Format: mm/dd/yy



Σχήμα 7.9 Ρύθμιση απαίτησης συστήματος (εφαρμογή BASLER)

### Ρύθμιση Διαστήματος

- Phase (Φάση): Ορίστε 15 λεπτά για περιοδική καταγραφή φάσεων.
- Neutral (Ουδέτερο): Ορίστε 1 λεπτό για συχνή παρακολούθηση ασυμετριών στο ουδέτερο.
- Neg. Sequence (Αρνητική Ακολουθία): Ορίστε 1 λεπτό για έγκαιρη αντίχενυση ασυμετριών.
- Οι τιμές 0.00 αφορούν μη χρησιμοποιούμενες παραμέτρους ή προεπιλογές.



Σχήμα 7.10 Παρακολούθηση διακόπτη (εφαρμογή BASLER)

### Breaker Duty Monitoring Mode

- Κατάσταση: Η λειτουργία είναι Disabled, επομένως δεν παρακολουθείται η θερμική φθορά του διακόπτη.
- 100% Duty Maximum: Η τιμή 0.000e+00 δείχνει ότι δεν έχει οριστεί μέγιστο όριο φθοράς.
- Pit, Amps: Πιθανόν αναφέρεται σε θερμική αντίσταση ( $I^2t$ ). Ρυθμίστε το ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του διακόπτη (π.χ., 5000 A<sup>2</sup>s).

Συνιστώμενη Ρύθμιση (αν ενεργοποιηθεί):

- 100% Duty Maximum: Ορίστε τιμή βάσει καταλόγου διακόπτη (π.χ., 10,000 A<sup>2</sup>s).
- Pit, Amps: Ρυθμίστε το ρεύμα βραχυκυκλώματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντίσταση.

### Block Accumulation Logic

- Η επιλογή "Logic" σημαίνει ότι η συσσώρευση δεδομένων (π.χ., θερμικής φθοράς) ελέγχεται από λογικές συναρτήσεις.
- Συνίσταται: Αφήστε την προεπιλογή, εκτός αν απαιτείται προσαρμογή για συγκεκριμένες εφαρμογές.

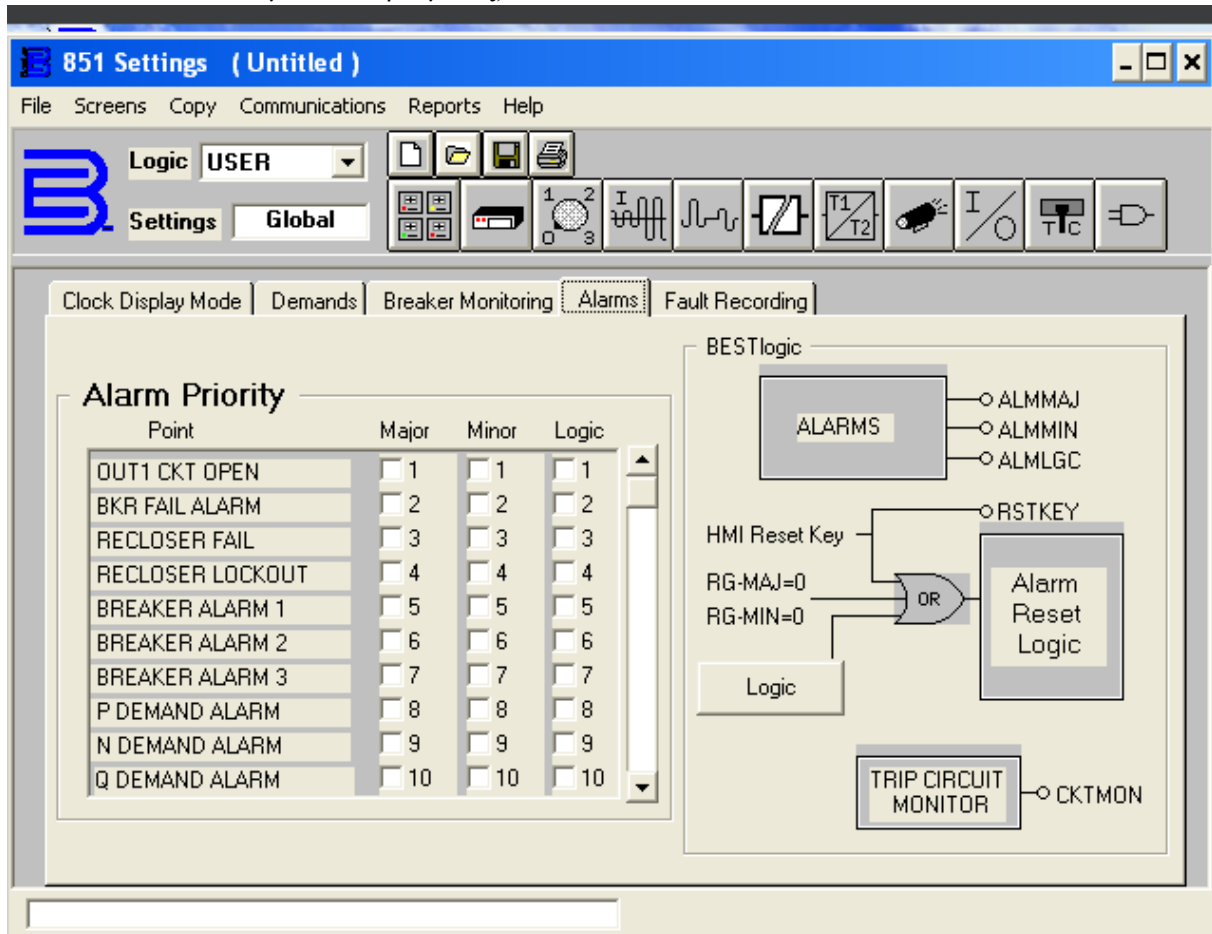
### Breaker Status Logic

- True when breaker closed: Το ρελέ θεωρεί τον διακόπτη κλειστό όταν λαμβάνει το αντίστοιχο σήμα.
- Logic: Χρησιμοποιείται για πρόσθετους ελέγχους (π.χ., συνδυασμούς με άλλα σήματα).

### Breaker Alarms

- Point 1/2/3: Κάθε σημείο μπορεί να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη προειδοποίηση.

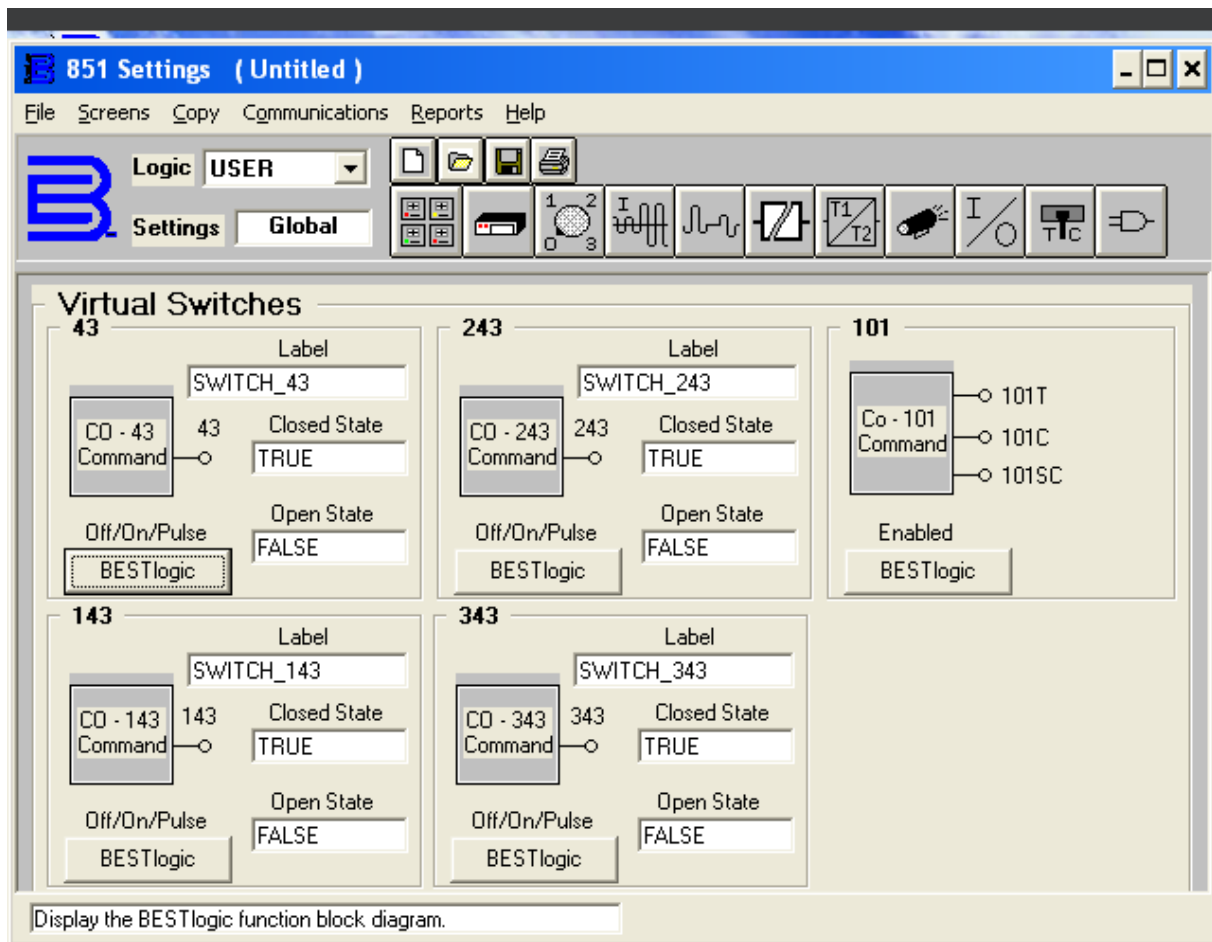
- Mode: Ορίστε Enabled και επιλέξτε τύπο συναγερμού (π.χ., High Current, Duty Exceeded).
- Threshold: Ορίστε όρια ρεύματος ή θερμικής φθοράς για ενεργοποίηση συναγερμών (π.χ., 120% του ονομαστικού ρεύματος).



Σχήμα 7.11 Ρύθμιση συναγερμών (εφαρμογή BASLER)

#### Best Logic setting

- Ο ALMMAJ: Έξοδος για Major συναγερμούς.
- Ο ALMMIN: Έξοδος για Minor συναγερμούς.
- Ο ALMLGC: Έξοδος για Logic συναγερμούς.
- HMI Reset Key (O RSTKEY): Χρησιμοποιείται για επαναφορά συναγερμών μέσω του πίνακα ελέγχου.
- Επαναφορά Major/Minor συναγερμών όταν η συνθήκη RG-MAJ=0 ή RG-MIN=0 μετά από κάποια επέμβαση.
- T-RIP CIRCUIT MONITOR (O CKTMON): Παρακολούθηση του κυκλώματος διακοπής για ασυνέπειες ή βλάβες.



Σχήμα 7.12 Εικονικοί διακόπτες (εφαρμογή BASLER)

Γενική λογική για όλους τους διακόπτες :

- Όλοι οι διακόπτες (43, 143, 243, 343) ακολουθούν την ίδια δομή λογικής:  
Closed State: Οδηγεί σε TRUE και ενεργοποιεί συγκεκριμένες ενέργειες.

Open State: Οδηγεί σε FALSE και απενεργοποιεί τις ενέργειες.

- Η BESTlogic μπορεί να συνδυάζει πολλαπλούς διακόπτες με λογικές πύλες (AND/OR) για πολύπλοκη διαχείριση.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Βιβλία**

- [1] Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: Θεωρία και Εφαρμογές ISBN: 978-618-221-034-5
- [2] Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Β' Έκδοση ISBN: 978-960-633-044-5
- [3] Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος ISBN: 978-960-418-852-9
- [4] Ηλεκτρονικά ισχύος, Ημιαγωγή διακόπτες, μετατροπείς ισχύος, διατάξεις ελέγχου, εφαρμογές ISBN: 978-960-418-522-1

### **Application Note**

- [5] ABB, Application guide: Instrument transformers, ed.4 2015-02

### **Πατέντες**

- [6] Xu Yan, Wang Zengping, Liu Qing and Shang Guocai “A Novel Transformer Protection Method Based on The Ratio of Voltage and Fluxional Differential Current”, IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003, p. 342 – 347.
- [7] P.M Anderson, Power system protection ,IEEE press,1999

### **Data Sheet**

- [8] SIEMENS, SIPROTEC 4 Differential Protection 7UT6x ,V4.67, C53000-G1176-C230-5, Edition 09.2016.
- [9] OMICRON, Current transformer theory and testing, OMICRON Academy,2016
- [10] OMICRON, CT Analyzer Revolution in Current Transformer Testing and Calibration.
- [11] IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers, IEEE Std C37.91-2008, 2008.

### **Internet Site**

- [12] Basler Electric, "Application of BESTlogic in Protective Relays," *Basler Technical Note TN-105*, 2019. [Online]. Available: <https://www.basler.com/technical-notes/>. Accessed: Oct. 10, 2023.
- [13] Basler Electric, *BE1-851 Instruction Manual*, Rev. H, Basler Electric, 2017. [Online]. Available: <https://www.basler.com/download/be1-851-instruction-manual/>. Accessed: Oct. 10, 2023.

### **Paper in Conference Proceedings**

- [14] IEEE Standard C57.13-1993, Requirements for instrument transformers, New York, June 1993,pp.1-73
- [15] IEC 61869 1-2007,Instrument transformers Part 1: General requirements.

- [16] K. N.Dinesh Babu, R.Ramaprabha, V.Rajini, V.Nagarajan, " A Novel Solution to Restricted Earth Fault Low Impedance Relay Maloperation", International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, Vol:9, No:8, 2015
- [17] Mladen Kezunovic, Jinfeng Ren , Saeed Lotfifard, Design, Modeling and Evaluation of Protective Relays for Power Systems, New York: Springer, 2016.
- [18] E. Lesniewska, W. Jalmuzny "Influence of the number of cores air gaps on transient state parameters of TPZ class protective current transformer", IET sci.Meas.Techn.,vol.3,iss.2, pp. 105-112,2009.
- [19] EPRI, Power Transformer Maintenance and Application Guide, Palo Alto CA: 2002. 1002913.
- [20] W.D.A.S.Wijayapala, J.Karunanayake, R.R.T.W.M.R.A.I. Madawala, "Current transformer performance during transient conditions and development of a current transformer selection criterion for protection applications", ENGINEER, vol.XLIX, No. 03,pp.4961,2016.
- [21] IEC 61869 2-2012, Specific requirements for current transformer
- [22] John Winders, Power transformers principles and applications, New York: Marcel Dekker,2002
- [23] Mason C. Russell, "The Art and Science of Protective Relaying," New York Wiley, 1956
- [24] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal, and H. J. Altuve, "Performance Analysis of Traditional and Improved Transformer Differential Protective Relays", SEL Technical Papers **Journal Articles**