Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Ενεργειακά Συστήματα»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ»

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Αράπογλου Νικολίνας

Επιβλέπων
Δρ. Σιδεράκης Κυριάκος, Επίκουρος καθηγητής τμήματος Ηλεκτρολόγων μηχανικών Τ.Ε

Ηράκλειο, Φεβρουάριος 2018

Στην μνήμη του παππού μου

Δημήτριου Κόλλια

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κυριάκο Σιδεράκη επίκουρο καθηγητής του τμήματος Ηλεκτρολόγων μηχανικών Τ.Ε και καθηγητή του μεταπτυχιακού ¨Ενεργειακά Συστήματα¨, για την καθοδήγηση και τις εύστοχες παρατηρήσεις του καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσικαλάκη Αντώνη, επίκουρο καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων μηχανικών Τ.Ε και καθηγητή του μεταπτυχιακού ¨Ενεργειακά Συστήματα¨, για την βοήθεια αλλά και συμπαράσταση που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου και ιδίως την μητέρα μου, για την συμπαράσταση αλλά και την στήριξη της όλον αυτό τον καιρό…

Περιεχόμενα

Σύνοψη 10

Abstract 12

Summary 12

Κεφάλαιο 1 14

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 14

1 Εισαγωγή 14

1.1 Σχεδιασμός του συστήματος προστασίας 14

1.2 Τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος προστασίας 15

1.3 Ζώνες προστασίας 16

1.4 Κατηγοριοποίηση των ηλεκτρονόμων. 17

Κεφάλαιο 2 19

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΟΡΓΑΝΩΝ- INSTRUMENT TRANFORMERS 19

2 Εισαγωγή: 19

2.1 Διάκριση μετασχηματιστών 19

2.2 Μετασχηματιστές τάσεως. 20

2.2.1 Μετασχηματιστές τάσεως επαγωγικού τύπου (VT) 20

2.2.2 Χωρητικοί μετασχηματιστές τάσεως (Capacitor voltage transformers) 22

2.3 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών εντάσεως 24

2.3.1 Κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος 26

2.4 Χρήση και εφαρμογή μετασχηματιστών εντάσεων. 28

2.5 Τύποι μετασχηματιστών έντασης. 29

2.6 Στοιχεία για την επιλογή μετασχηματιστών εντάσεως 31

2.6.1 Ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος. 31

2.6.2 Ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντος. 32

2.6.3 Σφάλμα μέτρησης 32

2.6.4 Οριακό θερμικό ρεύμα πρωτεύοντος ($\boldsymbol{Ith}$) και δυναμική οριακή ένταση ($\boldsymbol{Idyn}$) 33

2.6.5 Μέγιστο φορτίο στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως 34

2.6.6 Εξάρτηση των μετασχηματιστών εντάσεως από την συχνότητα. 35

2.6.7 Επίπεδο της μόνωσης 35

2.7 Προδιαγραφές και παράμετροι των μετασχηματιστών εντάσεως. 36
2.7.1 C.T ratio 36
2.7.2 Ονομαστική ισχύς (P_n) 36
2.7.3 Accuracy limit factor 36
2.7.4 Κλάση ακριβείας (Accuracy class) 38
2.8 Μετασχηματιστές εντάσεως και μεταβατικά φαινόμενα. 42
2.8.1 Παραμένοντας μαγνητισμός στους μετασχηματιστές εντάσεως. 43
2.8.2 Συμπεριφορά των μετασχηματιστών εντάσεως στην DC συνιστώσα. 45
2.8.3 Κατηγορίες μετασχηματιστών εντάσεως για μεταβατικά φαινόμενα. 48
2.8.4 Απομαγνητισμός του πυρήνα σε μετασχηματιστές εντάσεως. 50
2.8.5 Διαστασιολόγηση μετασχηματιστών εντάσεως για μεταβατικά φαινόμενα. 52
2.9 Μετασχηματιστές εντάσεως σε διάφορες εφαρμογές προστασίας. 54
2.9.1 Προστασία υπερέντασης καθορισμένου χρόνου (Definite overcurrent protection) 55
2.9.2 Προστασία αποστάσεως 56
2.9.3 Διαφορική προστασία υψηλής εμπέδησης (High impedance differential protection) 57
2.9.4 Διαφορική προστασία χαμηλής εμπέδησης (Low impedance differencial protection) 58
2.9.5 Ποσοστιαία διαφορική προστασία (Percentage differential protection) 58
Κεφάλαιο 3 59
ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 59
3 Εισαγωγή: 59
3.1 Σφάλματα και αντικανονικές συνθήκες λειτουργίας. 59
3.1.1 Αντικανονικές συνθήκες λειτουργίας (Abnormal conditions) 59
3.1.2 Εξωτερικά σφάλματα (External faults) 61
3.1.3 Εσωτερικά σφάλματα (Internal faults) 61
3.2 Ρεύμα σφάλματος-παράγοντες που το επηρεάζουν. 65
3.2.1 Μετασχηματιστές με άμεσο γειωμένο αστέρα (effectively earthed Y-winding) 65
3.2.2 Μετασχηματιστές με γειωμένο αστέρα μέσω μεγάλης αντίστασης (High-impedance earthed winding). 67
3.2.3 Μετασχηματιστές με τρίγωνο. 68
3.3 Συστήματα προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος. 69
3.4 Μη ηλεκτρικά μέσα προστασίας 70
3.4.1 Ηλεκτρονόμος Buchholz 71

3.4.2 Προστασία υπερθέρμανσης (Thermal overload protection , ANSI code:49). 73
3.4.3 Ηλεκτρονόμοι και Βαλβίδες εκτόνωσης πίεσης (Sudden pressure relay/valve) (ANSI code:63) 76
3.5 Ηλεκτρικά μέσα προστασίας. 77
3.5.1 Διαφορική προστασία μετασχηματιστών. (Differential protection ANSI code: 87T) 77
3.5.2 Ηλεκτρονόμοι προστασίας έναντι σφαλμάτων γης (Restricted earth fault, ANSI code: 87N ή TE ή 64REF) 107
3.5.3 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης (overcurrent protection ANSI code:50-51) 112
Κεφάλαιο 4 113
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ Μ/Σ ΙΣΧΥΟΣ .. 113
4 Εισαγωγή 113
4.1 Το εξεταζόμενο σύστημα 113
4.2 Σχεδιασμός της διαφορικής προστασίας 120
4.3 Απόκριση του μοντέλου της διαφορικής προστασίας σε διάφορες καταστάσεις. 125
4.3.1 Ηλέκτριση του μετασχηματιστή ισχύος 125
4.3.2 Ηλέκτριση μετασχηματιστή ισχύος και φόρτιση 127
4.3.3 Μονοφασικό σφάλμα με γη. 128
4.3.4 Διφασικό σφάλμα εντός της ζώνης προστασίας. 130
4.3.5 Τριφασικό σφάλμα με Γη εντός της ζώνης προστασίας. 131
4.3.6 Τριφασικό σφάλμα με Γη εκτός της ζώνης προστασίας. 133
5 Συμπεράσματα 135
Παράρτημα Α: Κατηγοριοποίηση Η/Ν με βάση τα στοιχεία εισόδου 136
Βιβλιογραφικές Αναφορές 138

Πίνακας Εικόνων

Σχήμα 1.1 Τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα Η/Ν προστασίας [3] 16
Σχήμα 1.2 Ζώνες προστασίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [] 17
Σχήμα 3.1 Τρόποι σύνδεσης των μετασχηματιστών τάσεως 20
Σχήμα 3.2 Τρόποι γείωσης του δευτερεύοντος μετασχηματιστή τάσης 21
Σχήμα 3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικού μετασχηματιστή τάσεως (CVT) [] 22
Σχήμα 3.4 Παράδειγμα ταλάντωσης σε χωρητικό μετασχηματιστή τάσης. 23
Σχήμα 3.5 Ηλεκτρικό κύκλωμα μετασχηματιστή εντάσεως. 24
Σχήμα 3.6 Διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων σε μετασχηματιστή εντάσεως. 25
Σχήμα 3.7 περίπτωση κορεσμού του πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως [] 26
Σχήμα 3.8 Καμπύλη υστέρησης ενός μετασχηματιστή εντάσεως 27
Σχήμα 3.9 Απλοποιημένο ηλεκτρικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή εντάσεως 28
Σχήμα 3.10 Μετασχηματιστές εντάσεως τύπου παραθύρου. 29
Σχήμα 3.11 Μετασχηματιστής εντάσεως τύπου μπάρας 29
Σχήμα 3.12 Μετασχηματιστής εντάσεως τύπου περιέλιξης 30
Σχήμα 3.13 Εφαρμογή των μετασχηματιστών εντάσεως τύπου διέλευσης και περιέλιξης. 30
Σχήμα 3.14 Σφάλμα γωνίας 33
Σχήμα 3.15 Πινακίδα μετασχηματιστή εντάσεως 36
Σχήμα 3.16 Καμπύλες μαγνήτισης για μετασχηματιστές προστασίας και μετασχηματιστές μετρήσεως 38
Σχήμα 3.17 Καμπύλη μαγνήτισης μετασχηματιστή εντάσεως κλάσης C200, Rb=2Ω 40
Σχήμα 3.18 Καθορισμός του U_{KN} σε μετασχηματιστές εντάσεως Class PX 42
Σχήμα 3.19 Καμπύλη υστέρησης με παραμένουσα μαγνήτιση σε μετασχηματιστή εντάσεως. 44
Σχήμα 3.20 DC συνιστώσα στο ρεύμα σφάλματος 45
Σχήμα 3.21 Συσχέτιση DC μαγνητικής ροής με την AC μαγνητική ροή. 46
Σχήμα 3.22 Καμπύλες μαγνήτισης ανάλογα με το είδος του πυρήνα (Class TP) 49
Σχήμα 3.23 Μετασχηματιστής εντάσεως Class TPZ 1200/1 A [] 50
Σχήμα 3.24 Μεταβολή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής (B) σε μή απομαγνητισμένο πυρήνα[] 51
Σχήμα 3.25 Μεταβολή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής (B) σε μετασχηματιστή Class TPX και TPY 52
Σχήμα 3.26 Διαφορική προστασία υψηλής εμπέδησης 57
Σχήμα 4.1 Παράδειγμα αφυγραντήρα (silica gel) 63
Σχήμα 4.2 Σφάλμα μεταξύ των σπειρών του Μ/Σ 65
Σχήμα 4.3 Εσωτερικό σφάλμα σε μετασχηματιστή Dy. 66
Σχήμα 4.4 Ισοδύναμο Thevenin του μετασχηματιστή 66
Σχήμα 4.5 Εσωτερικό σφάλμα με γη σε απευθείας γειωμένο Μ/Σ 67
Σχήμα 4.6 Εσωτερικό σφάλμα σε Μ/Σ με γειωμένο ουδέτερο μέσω αντίστασης. 68
Σχήμα 4.7 Εσωτερικό σφάλμα με γη σε γειωμένο Μ/Σ μέσω μεγάλης αντίστασης. 68
Σχήμα 4.8 Δημιουργία φυσαλίδων στο εσωτερικό ενός μετασχηματιστή 71
Σχήμα 4.9 Θέση εγκατάστασης Η/Ν Buchholz 71
Σχήμα 4.10 Τομή Η/Ν Buchholz 72
Σχήμα 4.11 Θερμόμετρο λαδιού 75
Σχήμα 4.12 Όργανο μέτρησης θερμοκρασίας τυλιγμάτων του Μ/Σ [] 75

Σχήμα 4.13 Συσκευή ανακούφισης τύπου μεμβράνης [] 76
Σχήμα 4.14 Ηλεκτρονόμος/βαλβίδα ξαφνικής μεταβολής της πίεσης 77
Σχήμα 4.15 Διαφορική προστασία σε Μ/Σ ισχύος και θέση εγκατάστασης των Μ/Σ εντάσεως. 78
Σχήμα 4.16 Συμπεριφορά της διαφορικής προστασίας σε σφάλματα a) εκτός ζώνης b) εντός ζώνης προστασίας 79
Σχήμα 4.17 Καμπύλη διαφορικής προστασίας διπλής κλίσης [] 80
Σχήμα 4.18 Διαφορική προστασία με στοιχείο συγκράτησης και γέφυρα διόδων 80
Σχήμα 4.19 Ρεύμα μαγνήτισης (inrush current) κατά την ενεργοποίηση μετασχηματιστή 83
Σχήμα 4.20 Ρεύμα μαγνήτισης σε τριφασικό μετασχηματιστή 84
Σχήμα 4.21 Παραλληλισμός Μ/Σ 85
Σχήμα 4.22 Κυματομορφή sympathetic inrush current μεταξύ παραλληλισμένων μετασχηματιστών 86
Σχήμα 4.23 Ρεύμα μαγνήτισης σε κατάσταση υπερδιέγερσης με υπέρταση σε ποσοστό 150%. 87
Σχήμα 4.24 Σύνδεση των μετασχηματιστών εντάσεως για διόρθωση της ολίσθησης φάσης 88
Σχήμα 4.25 Παράδειγμα ΑC κορεσμού 89
Σχήμα 4.26 DC-κορεσμός σε μετασχηματιστή εντάσεως 90
Σχήμα 4.27 Εξάλειψη μηδενικής ακολουθίας σε περίπτωση σφάλματος με Γή με χρήση ενδιάμεσων Μ/Σ εντάσεως 91
Σχήμα 4.28 Ψηφιακός Η/Ν διαφορικής προστασίας 92
Σχήμα 4.29 Καμπύλη λειτουργίας ψηφιακού Η/Ν διαφορικής προστασίας [] 94
Σχήμα 4.30 Αρμονικό περιεχόμενο Μ/Σ σε κατάσταση υπερδιέγερσης ως προς την εφαρμοζόμενη τάση 99
Σχήμα 4.31 ρεύμα στο δευτερεύον Μ/Σ εντάσεως εξαιτίας συμμετρικού σφάλματος 100
Σχήμα 4.32 Αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος στο δευτερεύον σε περίπτωση συμμετρικού σφάλματος 101
Σχήμα 4.33 Η/Ν Διαφορικής προστασίας με χρήση συγκράτησης αρμονικών 101
Σχήμα 4.34 Λογικό διάγραμμα Η/Ν διαφορικής προστασίας με παρεμπόδιση $2^{ης}$ & $5^{ης}$ αρμονικής 103
Σχήμα 4.35 Μέθοδος διάκρισης ρεύματος μαγνήτισης (gap detection criterion) [38] 104
Σχήμα 4.36 Μέθοδος διάκρισης ρεύματος μαγνήτισης & ρεύματος σφάλματος μέσω σύγκρισης ορίων (θετικών και αρνητικών) 104
Σχήμα 4.37 Μέθοδοι διάκρισης εσωτερικών σφαλμάτων και άλλων καταστάσεων σε ηλεκτρονόμους διαφορικής προστασίας 105
Σχήμα 4.38 Συμπληρωματικά μέσα προστασίας του μετασχηματιστή, εφαρμογή του Η/Ν γης 107
Σχήμα 4.39 Προστασία τυλίγματος του Μ/Σ μέσω Η/Ν διαφορικής προστασίας και Η/Ν γης (επί %) 108
Σχήμα 4.40 Σύνδεση του Η/Ν γής (REF) 109
Σχήμα 4.41 Η/Ν γης υψηλής εμπέδησης (High-impedance) [] 110
Σχήμα 4.42 κατάσταση εξωτερικού σφάλματος σε Η/Ν γης υψηλής εμπέδησης 111
Σχήμα 4.43 κατάσταση εσωτερικού σφάλματος σε Η/Ν γης υψηλής εμπέδησης. 111
Σχήμα 5.1 Μοντέλο του συστήματος στο Matlab-Simulink 113
Σχήμα 5.2 Παράθυρο διαλόγου της τριφασικής πηγής 114
Σχήμα 5.3 Παράθυρο διαλόγου του μετασχηματιστή ισχύος 119
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας 120
Σχήμα 5.5 Εισαγωγή των ρευμάτων στο σύστημα της διαφορικής προστασίας 121
Σχήμα 5.6 Διόρθωση της μετατόπισης φάσης (phase shift correction) 121
Σχήμα 5.7 Υπολογισμός διαφορικού ρεύματος και ρεύματος συγκράτησης [] 122

Σχήμα 5.8 Υπολογισμός της θεμελιώδους και 2ης αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος 124
Σχήμα 5.9 Σύγκριση της 2ης αρμονικής συνιστώσας προς την θεμελιώδη. 124
Σχήμα 5.10 Ρεύμα μαγνήτισης (inrush current) κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή ισχύος. 125
Σχήμα 5.11 Αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος μαγνήτισης (inrush current) 126
Σχήμα 5.12 Απόκριση του H/N σε κατάσταση ηλέκτρισης του Μ/Σ. 126
Σχήμα 5.13 Ρεύμα μαγνήτισης και ρεύμα φορτίου στο πρωτεύον του μετασχηματιστή 127
Σχήμα 5.14 Ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή ισχύος 128
Σχήμα 5.15 Περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με γη: Ρεύματα στο δευτερεύον. 128
Σχήμα 5.16 Περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με γη: Ρεύματα στο πρωτεύον 129
Σχήμα 5.17 Απόκριση του H/N στο μονοφασικό σφάλμα 129
Σχήμα 5.18 Διφασικό σφάλμα (φάση Α & φάση Β): Ρεύματα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. 130
Σχήμα 5.19 Διφασικό σφάλμα (φάση Α & φάση Β): Ρεύματα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή. 130
Σχήμα 5.20 Απόκριση του H/N σε διφασικό σφάλμα εντός της ζώνης προστασίας 131
Σχήμα 5.21 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη: Ρεύματα στο δευτερεύον. 131
Σχήμα 5.22 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη: Ρεύματα στο πρωτεύον. 132
Σχήμα 5.23 Απόκριση του H/N σε περίπτωση τριφασικού σφάλματος με γη 132
Σχήμα 5.24 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη εκτός ζώνης προστασίας: Ρεύματα στο δευτερεύον. 133
Σχήμα 5.25 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη εκτός ζώνης προστασίας: Ρεύματα στο πρωτεύον. 133
Σχήμα 4.26 Απόκριση του H/N σε σφάλμα εκτός ζώνης προστασίας 134

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Παράμετροι για την επιλογή μετασχηματιστή εντάσεως 31
Πίνακας 3-2 Τυπικές τιμές μέγιστου οριακού ρεύματος σε kA 34
Πίνακας 3-3 Υπολογισμός δυναμικού ρεύματος 34
Πίνακας 3-4 IEEE C57.13 Κλάσεις ακριβείας & τα αντίστοιχα φορτία για μετασχηματιστές προστασίας. 39
Πίνακας 3-5 Κλάσεις των μετασχηματιστών εντάσεως σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61869-2 40
Πίνακας 3-6 Χαρακτηριστικά της κλάσης Class TP σύμφωνα με το IEC 61869-2 50
Πίνακας 3-7 Τυπικές τιμές χρονικής σταθεράς δευτερεύοντος ανά κατηγορία πυρήνα 53
Πίνακας 4-1 Επιτρεπόμενη χρονική αντοχή μετασχηματιστή σε εξωτερικό σφάλμα 61
Πίνακας 4-2 Μέσα προστασίας μετασχηματιστών ανάλογα με την ισχύ τους 69
Πίνακας 4-3 Τύποι σφαλμάτων σε μετασχηματιστές και μέσα προστασίας 70
Πίνακας 4-4 Συνθήκες ενεργοποίησης H/N Buchholz ανάλογα με την ισχύ του Μ/Σ 73
Πίνακας 4-5 Διάρκεια ζωής του λαδιού του Μ/Σ ανάλογα με την εσωτερική θερμοκρασία 74
Πίνακας 4-6 Τυπικές ρυθμίσεις σημάνσεων των οργάνων μέτρησης θερμοκρασίας 75
Πίνακας 4-7 Ρυθμίσεις περιοχών λειτουργίας H/N διαφορικής προστασίας 95
Πίνακας 4-8 Αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος μαγνήτισης (inrush current) 98
Πίνακας 4-9 Αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος σε κατάσταση υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή 98
Πίνακας 5-1 Στοιχεία του μετασχηματιστή ισχύος 115

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	**« Διερεύνηση της συμπεριφοράς συστημάτων διαφορικής προστασίας μετασχηματιστών ισχύος και ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου»**
ΦΟΙΤΗΤΗΤΡΙΑ:	**Αράπογλου Νικολίνα**
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	**Δρ. Σιδεράκης Κυριάκος, Επίκουρος καθηγητής τμήματος Ηλεκτρολόγων μηχανικών Τ.Ε**
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	**2018**

Σύνοψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος σπουδών με τίτλο *Ενεργειακά Συστήματα* του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης και αφορά την διερεύνηση της συμπεριφοράς συστημάτων διαφορικής προστασίας μετασχηματιστών ισχύος και στην ανάπτυξη ενός υπολογιστικού μοντέλου. Η εργασία αυτή αναπτύσσεται σε πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στα βασικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού των συστημάτων προστασίας που διέπουν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Το δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας αναφέρεται στους μετασχηματιστές οργάνων (Μ/Σ εντάσεως και Μ/Σ τάσεως). Ποιο συγκεκριμένα πραγματοποιείται μία εκτενής ανάλυση της λειτουργίας τους, και της κατηγοριοποίησης τους σύμφωνα με διεθνή πρότυπα, αλλά και στον τρόπο επιλογής των κατάλληλων Μ/Σ οργάνων ανάλογα με την εφαρμογή. Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας αναλύονται όλα τα μέσα προστασίας των μετασχηματιστών ισχύος με έμφαση κυρίως στην διαφορική προστασία. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εκτενής ανάλυση της λειτουργίας της διαφορικής προστασίας αλλά και στα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου που την έχουν καταστήσει σήμερα ως την ποιο διαδεδομένη μέθοδο προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος. Παράλληλα, αναλύουμε όλη την μεθοδολογία του σχεδιασμού ενός σύγχρονου ψηφιακού ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας, αλλά και πώς υπολογίζουμε τις ρυθμίσεις της προστασίας αυτής κάτω από διάφορες εφαρμογές. Με βάση όλα τα παραπάνω, στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ο σχεδιασμός ενός ψηφιακού ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας. Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε με την βοήθεια του προγράμματος Matlab-Simulink, εξετάστηκε ως προς την αξιοπιστία του κάτω από διάφορες πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός μετασχηματιστή ισχύος. Τα συμπεράσματα αλλά και η μελλοντική χρήση του μοντέλου ως κατασκευαστικό πρότυπο αλλά και εκπαιδευτικό υλικό αναλύονται στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας.

Περίληψη

Ο μετασχηματιστής ισχύος είναι το ποιο σημαντικό και το ποιο ακριβό κομμάτι που απαρτίζει τον εξοπλισμό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Καθώς ο μετασχηματιστής ισχύος αποτελεί την καρδιά ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι φυσικό η κατάσταση της λειτουργίας του επηρεάζει άμεσα την συνεχή και ευσταθή λειτουργία του Σ.Η.Ε. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο ένας μετασχηματιστής ισχύος να είναι εξοπλισμένος με μία αξιόπιστη, ασφαλή και γρήγορη προστασία η οποία θα μπορεί να τον προστατεύει για σφάλματα εντός της ζώνης προστασίας. Επιπλέον, είναι σημαντικό η προστασία του μετασχηματιστή ισχύος να είναι σε θέση να διακρίνει μεταξύ σφαλμάτων που συμβαίνουν εντός αλλά και εκτός της ζώνης προστασίας.

Η διαφορική προστασία, αποτελεί την ποιο διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος. Και αυτό διότι αυτή η μέθοδος προστασίας παρέχει ταχύτητα καθώς και αξιοπιστία. Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί παράγοντες όπου επηρεάζουν αυτή την προστασία οδηγώντας την πολλές φορές στην λανθασμένη ενεργοποίηση της. Για παράδειγμα κατά την ενεργοποίηση ενός μετασχηματιστή ισχύος παράγεται ένα μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης. Αυτό το μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης το οποίο εμφανίζεται κατά την ενεργοποίηση του μετασχηματιστή ισχύος εν κενό, εμπεριέχει μία μεγάλη DC-συνιστώσα καθώς και ένα μεγάλο ποσοστό από αρμονικές συνιστώσες (κυρίως $2^{η}$ αρμονική). Κατά συνέπεια, αυτή η κατάσταση μπορεί να δημιουργήσει διαφορικό ρεύμα, ενεργοποιώντας λανθασμένα την διαφορική προστασία. Επιπρόσθετα, ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει πολύ την ευαισθησία την διαφορικής προστασίας αποτελεί και ο κορεσμός των μετασχηματιστών εντάσεως. Υπενθυμίζουμε ότι οι μετασχηματιστές εντάσεως χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα προστασίας με σκοπό να υποβιβάσουν το επίπεδο του ρεύματος έτσι ώστε να μπορούν να συνδεθούν με ασφάλεια μετρητικά όργανα, και διατάξεις προστασίας. Ακόμα, σε καταστάσεις υπέρτασης ή υποσυχνότητας, ο πυρήνας του μετασχηματιστή ισχύος οδηγείται σε κορεσμό. Αυτή η υπερδιέγερση του πυρήνα του μετασχηματιστή δημιουργεί την μη επιθυμητή ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας καθώς στο ρεύμα λειτουργίας εμφανίζονται αρμονικές συνιστώσες ($3^{ης}$ και $5^{ης}$ τάξης).

Κατά συνέπεια, αντιλαμβανόμαστε ότι ο σχεδιασμός ενός ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας αποτελεί ένα κρίσιμο κομμάτι των μηχανικών που ασχολούνται με θέματα προστασίας, καθώς θα πρέπει να επιλέξουν τις ποιο κατάλληλες ρυθμίσεις για τον ηλεκτρονόμο, πριν την εγκατάσταση του σε κάποια εφαρμογή. Γύρω στα τέλη της δεκαετίας του 80’ οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι κάνουν την εμφάνιση τους, παρέχοντας πολλά πλεονεκτήματα. Οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας πλέον μπορούν να παρέχουν μια ποιο φιλοσοφημένη διαδικασία ανάλυσης του σήματος που λαμβάνουν. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να δώσει την δυνατότητα στους σχεδιαστές των ηλεκτρονόμων προστασίας να ενισχύσουν τις κλασσικές μεθόδους που χρησιμοποιούν, καθιστώντας την διαφορική προστασία ως την ποιο γρήγορη, ασφαλή και ανεξάρτητη προστασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προστασία των μετασχηματιστών ισχύος. Από τα πρώτα κιόλας χρόνια που χρησιμοποιήθηκε η διαφορική προστασία έως και σήμερα, έχουν προταθεί διάφοροι μέθοδοι διάκρισης μεταξύ εσωτερικών σφαλμάτων, εξωτερικών σφαλμάτων, καταστάσεων ενεργοποίησης ή υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή. Μερικές από τις ποιο διαδεδομένες και εφαρμοζόμενες μεθόδους που χρησιμοποιούν σήμερα οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι είναι η μέθοδος που βασίζεται στη χρήση των αρμονικών που εμφανίζονται στο σύστημα καθώς και η μέθοδος των κυμματομορφών.

Όλα τα παραπάνω θέματα αποτελούν το βασικό κομμάτι αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και αναλύονται εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια.

Λέξεις Κλειδιά: Μετασχηματιστές Ισχύος, Διαφορική Προστασία, Ηλεκτρονόμοι

POST-GRADUATE THESIS:	**« Investigation of the behavior of differential power protection transformer systems and development of a model »**
STUDENT:	**Arapoglou Nikolina**
SUPERVISOR:	**Dr. Siderakis kyriakos, Associate Professor, department of Electrical engineering**
ACADEMIC YEAR:	**2018**

Abstract

This postgraduate thesis was conducted within the framework of the Interdepartmental Postgraduate Program entitled Energy Systems of the Technological Educational Institute of Crete and concerns the investigation of the behavior of systems of differential protection of power transformers and the development of a model. This work is developed in five chapters. The first chapter presents an introduction to the basic features of the design of protection systems that govern an electrical system. The second chapter of the paper deals with instrument transformers (current and voltage transformers). Specifically, a detailed analysis of their operation and their categorization according to international standards is carried out, as well as the way of selecting the appropriate instrument transformer, according to the application. In the third chapter of the paper we analyze all the means of protection of power transformers with emphasis mainly on differential protection. In this chapter a detailed analysis of the function of the differential protection is made, as well as the very important advantages of the method that have made it today as the most widespread protection method in power transformers. At the same time, we analyze all the methodology of designing a modern digital differential protection relay, but also how we calculate the settings of this protection under various applications. Based on all of the above, the fourth chapter implements the design of a digital differential protection relay. The model developed with the help of the Matlab-Simulink program was tested for its reliability under various actual operating conditions of a power transformer. The conclusions as well as the future use of the model as a construction model and the educational use are analyzed in the fifth chapter of the thesis.

Summary

A power transformer is an exceptionally vital and expensive component of an electric power system. As the heart of the whole power system, the performance of the transformer directly affects the continuous and stable operation of the whole power system. Consequently, it is essential that the power transformer is equipped with a reliable, secure and fast protection against possible internal faults (faults inside the protection zone). It is also quite important that the transformer protection system does not make false tripping. For that reason, the protection system should be able to distinguish internal faults from faults that take place outside of the protection zone.

Differential protection is the most widely used protection for power transformers because it provides speed and reliability. However, there are a lot of conditions that affect the protection scheme causes unwanted trip. For example, during energization of the power transformer large inrush current produce a differential current. Large inrush current will be created when the transformer operates on no-load energizing condition. This is because the inrush current involves a large and long lasting dc component, which is rich in harmonics (mostly 2^{nd} order). As a result that condition can cause mal-operation of the differential protection. What is more, the current transformer

saturation can affect the sensitivity of the differential protection. At this point we should refer that the purpose of the current transformer is to step down the current at save level In order to install protection units. Additionally, during over-voltage or over under-frequency the core of the transformer is over-excited and driven into saturation. As a result, the differential relay will operate because the operating current contains harmonic components (mostly 3^{rd} and 5^{th} order). This would be an undesirable operation, as no internal fault would exist, with the current imbalance being created from the over-excitation condition.

Consequently, we realize that the modeling of the differential relay of a power transformer is a vital task to the protection engineer in order to choose the suitable setting and to check its performance before installing it in the field. Towards the end of the 1980's, the numerical technology was introduced to protection applications providing a lot of advantages. Numerical differential relays capable of performing sophisticated signal processing enable the relay designer enhance the classical protection principles and making faster, more secure and dependable protection for power transformers

Since, the application of the numerical differential protection began up to present date, different methods have been proposed that can discriminate between normal and abnormal operating cases that can occur related to transformers such as external faults, internal faults, magnetizing inrush, over-excitation condition, etc. Some of the most widely used methods in numerical relays are the harmonic and the wavelet transformation methods. All of the above mentioned tasks are the main issue of this thesis and it will be analyzed in wide extend in the next chapters.

Keywords: Power Transfomers, Differential Protection, Relays

Κεφάλαιο 1

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1 Εισαγωγή

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας απαρτίζεται από μία σειρά στοιχείων όπως γεννήτριες μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς και διανομής κ.α Για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αυτά τα στοιχεία θα πρέπει να λειτουργούν ομαλά έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι οι παράμετροι του συστήματος (τάση, ρεύμα, συχνότητα) βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Ωστόσο, σφάλματα και διαταραχές που εμφανίζονται σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και που μπορούν να συμβούν σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος την οποιαδήποτε χρονική στιγμή, μπορούν να θέσουν εκτός ορίων αυτές τις παραμέτρους, επιφέροντας καταστρεπτικές συνέπειες για τα στοιχεία του δικτύου.

1.1 Σχεδιασμός του συστήματος προστασίας

Ένα σύστημα προστασίας θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αναγνωρίζει συγκεκριμένες μη κανονικές καταστάσεις που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περίπτωση όπου ένα τέτοιο σύστημα αποτύχει να εντοπίσει έγκαιρα ένα σφάλμα του συστήματος, αυτό μπορεί να επιφέρει δυσμενή αποτελέσματα τόσο στον εξοπλισμό του συστήματος όσο και στην ανθρώπινη ασφάλεια, καθώς μέρη του συστήματος που έχουν υποστεί κάποιο σφάλμα βρίσκονται εκτεθειμένα. Επιπρόσθετα, η καταστροφή σημαντικού και ακριβού εξοπλισμού του συστήματος μπορεί να επιφέρει πολύωρη απώλεια φορτίου, προκαλώντας έτσι μία δυσμενή κατάσταση. Συνεπώς, κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος προστασίας θα πρέπει να υπάρχει γνώση όλων των πιθανών σφαλμάτων που μπορούν να εμφανιστούν σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος έτσι ώστε να είναι έγκαιρη η ανίχνευση και εκκαθάριση ενός σφάλματος καθώς και η επαναφορά του συστήματος στην αρχική ομαλή κατάσταση λειτουργίας. Από τα παραπάνω μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι ένα σύστημα προστασίας για να είναι αξιόπιστο θα πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά: **[1]**

A. *Αξιοπιστία (Reliability)*

Η αξιοπιστία ενός συστήματος προστασίας αποτελεί το ποιο σημαντικό χαρακτηριστικό. Και αυτό διότι κατά την χρονική στιγμή εμφάνισης ενός σφάλματος το σύστημα προστασίας θα πρέπει να είναι σε θέση να δράση με ακρίβεια και ακαριαία. Δύο χαρακτηριστικά της αξιοπιστίας ενός συστήματος προστασίας αποτελούν η ανεξαρτησία (dependability) και η ασφάλεια (security). Με την ανεξαρτησία, εννοούμε ότι ένα σύστημα προστασίας θα πρέπει να ενεργήσει όταν οι συνθήκες το απαιτούν, ενώ με τον όρο ασφάλεια εννοούμε ότι το σύστημα προστασίας δεν θα ενεργοποιηθεί όταν οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος δεν το απαιτούν.

B. *Ταχύτητα (speed)*

Για να αποφευχθεί η οποιαδήποτε καταστροφή στον ακριβό εξοπλισμό που απαρτίζει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει το σύστημα προστασίας να ανταποκριθεί άμεσα σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος δίνοντας εντολή στον αντίστοιχο διακόπτη ισχύος να απομονώσει εγκαίρως το σφάλμα.

C. *Επιλεκτικότητα (selectivity)*

Όπως αναφέρθηκε και ποιο πάνω ένα σύστημα προστασίας θα πρέπει να ανταποκρίνεται και να ενεργεί άμεσα για σφάλματα που συμβαίνουν εντός της οριζόμενης ζώνης προστασίας, απομονώνοντας έτσι το σφάλμα από το υπόλοιπο υγειές σύστημα. Η επιλεκτικότητα μπορεί να είναι δύο ειδών: Απόλυτη και εξαρτώμενη επιλεκτικότητα. Με τον όρο απόλυτη επιλεκτικότητα εννοούμε ότι ένα σύστημα προστασίας είναι σε θέση να αναγνωρίσει σφάλματα εντός και εκτός της ζώνης προστασίας αλλά να δρα μόνο για σφάλματα που συμβαίνουν εντός της ζώνης προστασίας. Τέτοια συστήματα προστασίας εφαρμόζονται κυρίως στην προστασία γεννητριών η μετασχηματιστών. Από την άλλη μεριά, με τον όρο εξαρτώμενη αναφερόμαστε στο γεγονός ότι ένα σύστημα προστασίας είναι σε θέση να συνεργαστεί (μέσω κατάλληλων κλιμακωτών ρυθμίσεων) με άλλες συσκευές προστασίας οι οποίες ανιχνεύουν το ίδιο σφάλμα.

D. *Ευαισθησία (sensitivity)*

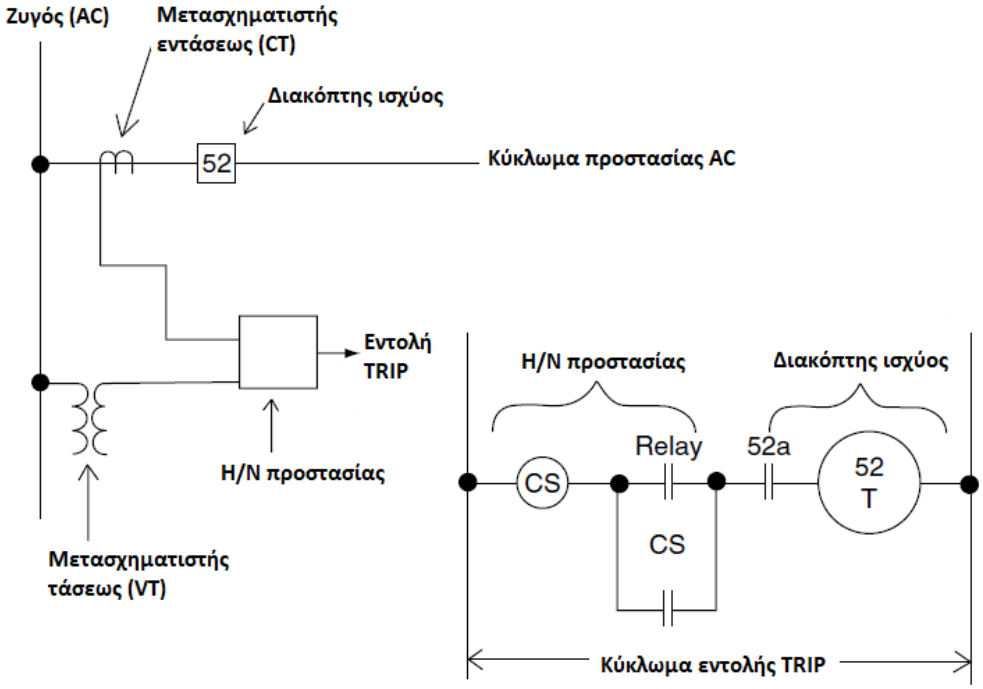
Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στην ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να αναγνωρίζει μία διαταραχή η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλει τις ονομαστικές συνθήκες διέργεσης του συστήματος θέτοντας έτσι το αντίστοιχο σύστημα προστασίας ενεργό. Συνήθως με τις ονομαστικές συνθήκες διέγερσης αναφερόμαστε στην ελάχιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος για την οποία λειτουργεί ένα σύστημα προστασίας.

1.2 Τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος προστασίας

Τα κύρια μέσα τα οποία συνθέτουν ένα σύστημα προστασίας είναι:

- **Μετασχηματιστές εντάσεως & τάσεως (CTs,VTs):** Συχνά στην βιβλιογραφία αναφέρονται και ως μετασχηματιστές οργάνων. Σκοπός αυτών των διατάξεων είναι να μειώνουν την ένταση ή την τάση λειτουργίας αντίστοιχα, σε κατάλληλα επίπεδα έτσι ώστε να συνδεθούν τα διάφορα όργανα μέτρησης καθώς και οι ηλεκτρονόμοι προστασίας. Τυπικές τιμές για τους μετασχηματιστές εντάσεως είναι 1 ή 5A ανάλογα την εφαρμογή ενώ για τους μετασχηματιστές τάσεως 110 ή 100V.
- **Ηλεκτρονόμοι προστασίας (protective relays):** Πρόκειται για έξυπνες ηλεκτρονικές διατάξεις όπου λαμβάνουν ως εισόδους μετρήσεις που προέρχονται από το δευτερεύον των μετασχηματιστών εντάσεως ή τάσεως και ανιχνεύουν καταστάσεις σφάλματος. Σε αυτή την περίπτωση, οι ηλεκτρονόμοι προστασίας δίνουν εντολή για TRIP στον αντίστοιχο διακόπτη ισχύος προστατεύοντας έξη τον εξοπλισμό του συστήματος.
- **Διακόπτες ισχύος (Circuit breaker):** Οι διακόπτες ισχύος δρουν κατά εντολή των ηλεκτρονόμων προστασίας όταν ανιχνευτεί μία διαταραχή. Σκοπός των διακοπτών ισχύος είναι να απομονώνουν το σφάλμα από μία περιοχή, και μετά την εκκαθάριση του σφάλματος να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση επαναφέροντας το σύστημα στην ομαλή λειτουργία του. Επιπρόσθετα, υπάρχει και η δυνατότητα χειροκίνητης λειτουργίας των διακοπτών ισχύος σε περιπτώσεις συντήρησης του συστήματος.

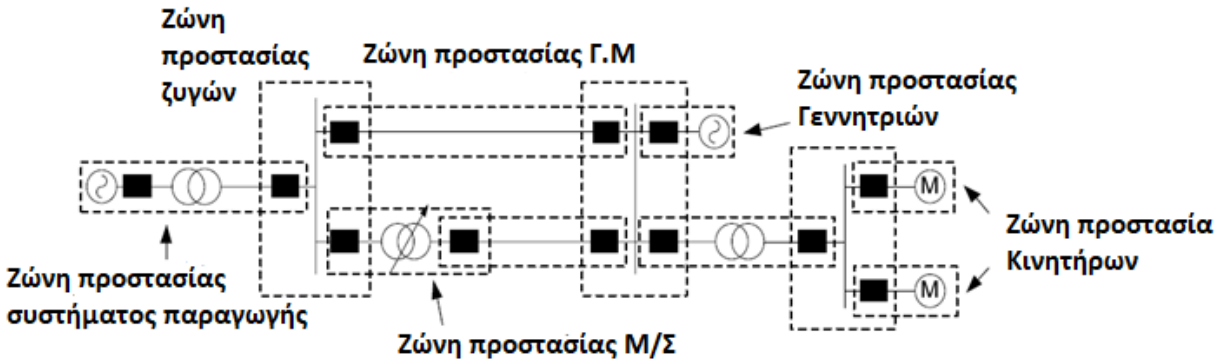
- **Δίαυλοι επικοινωνίας (Communication channels):** Αποτελούν το κανάλι μέσω του οποίου μεταφέρονται πληροφορίες του συστήματος που αφορούν την καταγραφή μετρήσεων ή διαταραχών και που αποστέλλονται προς έναν υποσταθμό.



Σχήμα 1.1 Τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα H/N προστασίας ***[3]***

1.3 Ζώνες προστασίας

Όπως αναφέρθηκε και ποιο πριν ένα σύστημα προστασίας είναι υπεύθυνο να απομονώσει μία διαταραχή από το υπόλοιπο υγειές σύστημα. Αυτό έχει ως σκοπό την διασφάλιση της ομαλής και αδιάλειπτης λειτουργίας του υπολοίπου συστήματος, καθώς και την αποφυγή της εκτεταμένης καταστροφής εξοπλισμού εξαιτίας των υψηλών ρευμάτων βραχυκύκλωσης που αναπτύσσονται. Για αυτό ακριβώς το σκοπό ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι χωρισμένο σε ζώνες προστασίας. Κάθε ζώνη προστασίας είναι εξοπλισμένη με τις αντίστοιχες διατάξεις προστασίας οι οποίες είναι υπεύθυνες να αναγνωρίζουν και να απομονώνουν σφάλματα εντός της συγκεκριμένης ζώνης. Όπως είναι φανερό και από το Σχήμα 1.2 κάθε ζώνη προστασίας καλείται να προστατέψει ένα η περισσότερα στοιχεία του συστήματος όπως γεννήτριες, μετασχηματιστές , γραμμές μεταφοράς και κινητήρες. Επιπρόσθετα κάθε ζώνη προστασίας είναι εξοπλισμένοι με διακόπτες ισχύος αλλά και μετασχηματιστές εντάσεως (current transformers) οι οποίο ορίζουν τα όρια προστασίας της κάθε ζώνης. Συνεπώς σε περίπτωση εμφάνισης μίας διαταραχής αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι διακόπτες ισχύος οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στα άκρα κάθε ζώνης προστασίας να ενεργοποιούνται απομονώνοντας έτσι το σφάλμα.



Σχήμα 1.2 Ζώνες προστασίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ***[2]***

Επιπρόσθετα, όπως παρατηρείται και από το παραπάνω σχήμα, κάθε ζώνη προστασίας επικαλύπτει ένα μικρό τμήμα γύρω από τους διακόπτες ισχύος. Αυτό έχει ως σκοπό σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος και αποτυχίας εκκαθάρισης του από την κύρια προστασία (primary protection), να επενεργήσει σε δευτερεύοντα χρόνο η προστασία δεύτερης βαθμίδας (back up protection). Η προστασία δεύτερης βαθμίδας αποτελεί μία πολύ σημαντική λειτουργία όπου χρίζει ιδιαίτερης σημασίας κατά τον σχεδιασμό των διατάξεων προστασίας σε ένα σύστημα. Μία τέτοιου είδους προστασία μπορεί να παρέχεται σε τοπικό επίπεδο ή απομακρυσμένο. Η τοπική δευτερεύουσα προστασία, τροφοδοτείται από τον ίδιο εξοπλισμό που τροφοδοτεί και την προστασία πρώτης βαθμίδας, αλλάζοντας τους χρόνους δράσης της κάθε βαθμίδας. Από την άλλη μεριά, η απομακρυσμένη δευτερεύουσα προστασία είναι εγκατεστημένη σε μεγάλη απόσταση από την κύρια προστασία και κυρίως εντός των υποσταθμών.

1.4 Κατηγοριοποίηση των ηλεκτρονόμων.

Οι ηλεκτρονόμοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την λειτουργία τους, τα χαρακτηριστικά εισόδου και με τις συναρτήσεις που επιτελούν. Ωστόσο, η ποιο συνηθισμένη κατηγοριοποίηση των ηλεκτρονόμων είναι ανάλογα με την λειτουργίας τους, διακρίνοντας πέντε τύπους:

1. **Ηλεκτρονόμοι προστασίας (protective relays):**

Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας καθώς και τα λοιπό μέσα προστασίας όπως οι ασφάλειες, λειτουργούν κάτω από συνθήκες εμφάνισης σφάλματος σε κάποιο σημείο του συστήματος. Ηλεκτρονόμοι προστασίας εγκαθίστανται σε όλα τα μέρη που απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας όπως γεννήτριες μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς κ.α όπως παρουσιάστηκε και στο Σχήμα 1.2. Συνήθως, σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης, η προστασία των μέσων προστασίας επιτελείται από ασφάλειες και όχι από ηλεκτρονόμους προστασίας.

2. **Ρυθμιστικοί ηλεκτρονόμοι (Regulating relays):**

Οι ρυθμιστικοί ηλεκτρονόμοι είναι άμεσα συνδεδεμένοι με τους μετασχηματιστές που διαθέτουν σύστημα αλλαγής τάσης (tap changers), καθώς και με ρυθμιστές τάσης στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (σε γεννήτριες). Εν αντιθέσει με τους ηλεκτρονόμους προστασίας οι ρυθμιστικοί

ηλεκτρονόμοι λειτουργούν κάτω από ομαλές συνθήκες λειτουργίας και δεν ανταποκρίνονται σε σφάλματα.

3. Ηλεκτρονόμοι ελέγχου και συγχρονισμού (Check, reclosing and synchronizing relays):

Αυτή η κατηγορία ηλεκτρονόμων χρησιμοποιείται κυρίως σε γραμμές μεταφοράς. Σκοπός αυτών των εξαιτίας κάποιου σφάλματος είτε λόγω συντήρησης. Επιπλέον μια ακόμα σημαντική εφαρμογή αυτών των ηλεκτρονόμων είναι κατά τον συγχρονισμό γεννητριών με το σύστημα.

4. Ηλεκτρονόμοι επίβλεψης (Monitoring relays):

Σκοπός αυτού του είδους των ηλεκτρονόμων είναι να πιστοποιούν τις συνθήκες λειτουργίας ενός συστήματος, καταγράφοντας την συνεχή λειτουργία ενός συστήματος προστασίας. Παραδείγματα τέτοιων ηλεκτρονόμων είναι οι ανιχνευτές σφάλματος (fault detectors), οι ηλεκτρονόμοι ελέγχου τάσης (voltage check) κ.α

5. Βοηθητικοί ηλεκτρονόμοι (Auxiliary relays):

Αυτή η κατηγορία ηλεκτρονόμων χρησιμοποιείται ευρύτατα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Οι βοηθητικοί ηλεκτρονόμοι προσφέρουν απομόνωση καθώς και πολλαπλές επαφές εξόδου σε ένα κύκλωμα. Οι πολλαπλές επαφές εξόδου συνήθως χρησιμοποιούνται για την λειτουργία λοιπού εξοπλισμού όπως σημάνσεων alarm, η εντολές για trip, καθώς και στην σύνδεση καταγραφικών συστημάτων. Από την άλλη μεριά, η ηλεκτρική και μαγνητική απομόνωση που προσφέρουν στα δευτερεύοντα κυκλώματα που συνδέονται σε αυτούς, τους καθιστά απαραίτητους σε ένα σύστημα προστασίας.

Φυσικά, εκτός από την παραπάνω κατηγοριοποίηση που έγινε, οι ηλεκτρονόμοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου, όπως ρεύμα, τάση, συχνότητα, θερμοκρασία κ.α. Στο

Κεφάλαιο 2

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΟΡΓΑΝΩΝ- INSTRUMENT TRANFORMERS

2 Εισαγωγή:

Οι μετασχηματιστές οργάνων αποτελούν ένα από τα ποιο κρίσιμα στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.). Όλα τα μέσα προστασίας και ελέγχου σε ένα Σ.Η.Ε χρησιμοποιούν στην είσοδο τους κατάλληλους μετασχηματιστές με σκοπό να μετασχηματίσουν τα στοιχεία εισόδου (τάση, ρεύμα) σε επιθυμητά επίπεδα έτσι ώστε να συνδεθούν τα όργανα μέτρησης και προστασίας που απαρτίζουν ένα Σ.Η.Ε. Ο τομέας της επίβλεψης και προστασίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο διότι με αυτό τον τρόπο μπορεί να αποφευχθούν καταστάσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφή δαπανηρού εξοπλισμού αλλά και ακόμα χειρότερα σε αστάθεια και απώλεια ενός μέρους του Σ.Η.Ε. Για αυτό το σκοπό όργανα μετρήσεως και προστασίας συνδέονται μέσω μετασχηματιστών οργάνων έτσι ώστε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να εποπτεύεται και να προστατεύεται αδιάλειπτα.

2.1 Διάκριση μετασχηματιστών

Ο μετασχηματιστής είναι μία στατική συσκευή η οποία αποτελείται από δύο η περισσότερα τυλίγματα τα οποία είναι μαγνητικά συζευγμένα μέσω ενός πυρήνα. Οι μετασχηματιστές κατά κόρον συναντώνται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα σύστημα σε ένα άλλο που έχουν την ίδια συχνότητα λειτουργίας αλλάζοντας απλά το επίπεδο της τάσης. Συχνά, τα διάφορα στοιχεία που απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (γεννήτριες γραμμές μεταφοράς και διανομής, φορτία) λειτουργούν κάτω από διαφορετικά επίπεδα τάσης, συνεπώς ο ρόλος του μετασχηματιστή ισχύος είναι να διασφαλίσει τον μετασχηματισμό της τάσης με σκοπό την σύνδεση και λειτουργία των συστημάτων που διέπουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.**[3]**

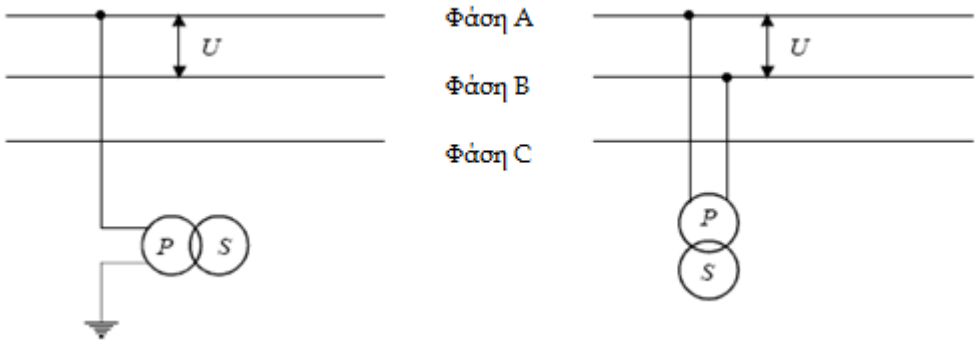
Όπως προαναφέρθηκε η λειτουργία του μετασχηματιστή ισχύος βασίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής. Η ενέργεια που λαμβάνεται από το πρωτεύων τύλιγμα επάγεται μαγνητικά στο δευτερεύον του, κατά συνέπεια το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή είναι μαγνητικά και όχι ηλεκτρικά συνδεμένα.**[4]** Γενικά, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας συναντάμε διαφόρων ειδών μετασχηματιστές όπου διακρίνονται σε μετασχηματιστές ισχύος (μετασχηματιστές ανύψωσης ή υποβιβασμού), αυτό-μετασχηματιστές, καθώς και μετασχηματιστές οργάνων που τροφοδοτούν μετρητικά όργανα και όργανα προστασίας. Η τελευταία κατηγορία μετασχηματιστών είναι και αυτή που θα μας απασχολήσει στο κεφάλαιο που ακολουθεί, καθώς αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για την διασφάλιση της ορθής λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2 Μετασχηματιστές τάσεως.

Η αρχή λειτουργίας των μ3ετασχηματιστών τάσεως είναι ίδια με την λειτουργία των μετασχηματιστών ισχύος, και για αυτό ακριβώς το λόγο σε αυτό το κεφάλαιο δεν θα αναλυθεί η αρχή λειτουργίας τους. Η βασική διάκριση που γίνεται στους μετασχηματιστές τάσεως είναι σε επαγωγικούς μετασχηματιστές τάσεως (inductive voltage transformers) και σε χωρητικούς μετασχηματιστές τάσεως (Capacitive voltage transformers CVT). Όσον αφορά την χρήση των δύο κατηγοριών μετασχηματιστών τάσεως, συνήθως σε συστήματα με ονομαστική τάση λειτουργίας έως τα 36 kV εγκαθίστανται συνήθως οι επαγωγικοί μετασχηματιστές εντάσεως ενώ για τάση άνω των 36 kV λόγω κόστους συνήθως εφαρμόζονται οι χωρητικοί μετασχηματιστές εντάσεως (C.V.T) **[5].**

2.2.1 Μετασχηματιστές τάσεως επαγωγικού τύπου (VT)

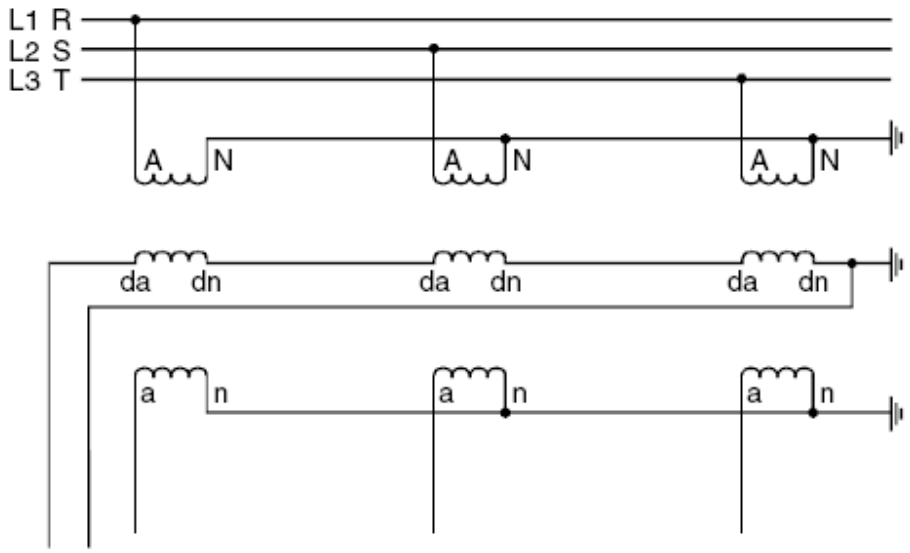
Οι μετασχηματιστές τάσεως επαγωγικού τύπου που χρησιμοποιούνται στη μέση τάση, αποτελούνται από: ένα πρωτεύον τύλιγμα, τον πυρήνα, και ένα ή περισσότερα δευτερεύοντα τυλίγματα. Η σύνδεση τους στο δίκτυο γίνεται σε παράλληλη σύνδεση μεταξύ δύο φάσεων ή μεταξύ φάσης και γης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1 : **[6]**



Σχήμα 2.1 Τρόποι σύνδεσης των μετασχηματιστών τάσεως

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 $\sqrt{3}$.

Όσον αφορά την εφαρμογή και τον τρόπο σύνδεσης των μετασχηματιστών τάσεως θα πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της παράλληλης σύνδεσης των μετασχηματιστών τάσεως με το φορτίο δεν θα πρέπει ποτέ να βραχυκυκλώσουμε το δευτερεύον του μετασχηματιστή, ενώ η περίπτωση του ανοιχτο-κυκλώματος δεν τον επηρεάζει καθόλου (αντίθετα με τους μετασχηματιστές εντάσεως που θα αναλύσουμε ποιο κάτω). Από την άλλη μεριά, κατά την σύνδεση των μετασχηματιστών τάσεως δεν θα πρέπει να παραλείπεται η γείωση. Η γείωση στους μετασχηματιστές τάσεως γίνεται μόνο από την μία πλευρά και σκοπός της είναι η αποφυγή ανάπτυξης επικίνδυνου δυναμικού στα άκρα του μετασχηματιστή. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται δύο διαφορετικοί τρόποι γείωσης του δευτερεύοντος ενός μετασχηματιστή τάσης σε ένα τριφασικό σύστημα. Η πρώτη αφορά συνδεσμολογία αστέρα, ενώ η δεύτερη είναι τη συνδεσμολογία ανοιγμένου τριγώνου (Broken Delta).



Σχήμα 2.2 Τρόποι γείωσης του δευτερεύοντος μετασχηματιστή τάσης

2.2.1.1 *Ακρίβεια μετασχηματιστών τάσεως*

Η ακρίβεια, αποτελεί μία παράμετρο που αφορά τα μεγέθη στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας τους. Η ακρίβεια στους μετασχηματιστές τάσεως είναι η ικανότητα να αναπαράγουν στο δευτερεύον τους μία τάση η οποία είναι ανάλογη της τάσης στο πρωτεύον τους, για όλο το εύρων των αναμενόμενων τάσεως που πρόκειται να εμφανιστούν στο σύστημα. Σύμφωνα με το σύστημα της IEEE, ορίζονται δύο κλάσεις ακριβείας ανάλογα με την εφαρμογή των μετασχηματιστών οργάνων:

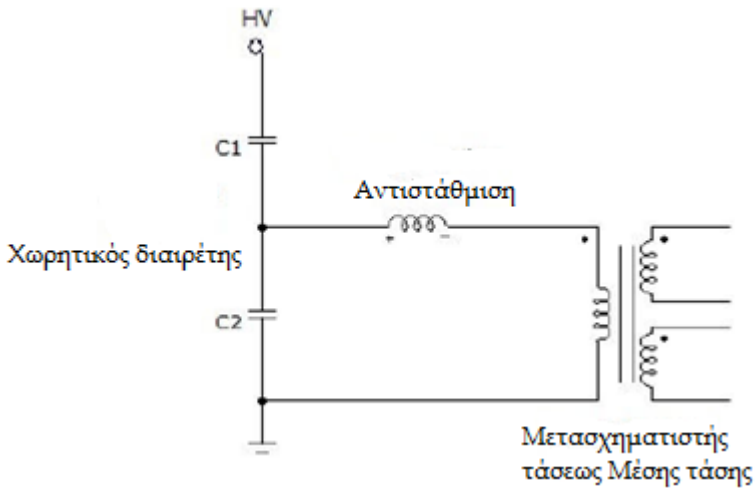
- Κλάσεις ακριβείας για μετασχηματιστές προστασίας (Protection accuracy class)
- Κλάσεις ακριβείας για μετασχηματιστές μετρήσεως (Metering accuracy class)

Μετασχηματιστές τάσεως οι οποίοι προορίζονται για εφαρμογές προστασίας απαιτείται να έχουν καλή ακρίβεια, για τάση όπου θα κυμαίνεται από 80-173% της ονομαστικής τάσης. Ωστόσο, σε μετασχηματιστές τάσεως που προορίζονται να συνδεθούν σε μετρητικές διατάξεις απαιτείται να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η ακρίβεια των μετασχηματιστών τάσεως εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από τον έλεγχο της ροής σκέδασης , καθώς και από την αντίσταση των τυλιγμάτων. Αυτές οι δύο παράμετροι είναι που θα καθορίσουν την μεταβολή του σφάλματος (τάσεως και γωνίας), με το φορτίο που θα συνδεθεί στον μετασχηματιστή τάσεως. Στην περίπτωση που στον μετασχηματιστή τάσεως έχουμε συνδέσει χαμηλό φορτίο (burden), ο παραμένων μαγνητισμός αλλά και οι απώλειες του πυρήνα επηρεάζουν το ρεύμα μαγνήτισης και κατά συνέπεια το συνολικό σφάλμα. Από τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι επαγωγικοί μετασχηματιστές τάσεως που προορίζονται για εφαρμογές μετρήσεως κανονικά λειτουργούν με μικρότερη πυκνότητα της μαγνητικής ροής (B), από ότι οι μετασχηματιστές ισχύος.

2.2.2 Χωρητικοί μετασχηματιστές τάσεως (Capacitor voltage transformers)

Οι χωρητικού τύπου μετασχηματιστές εντάσεως χρησιμοποιούν σειρές από πυκνωτές όπου με κατάλληλη σύνδεση λειτουργούν σαν ένα διαιρέτη τάσης για το δίκτυο όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.3 Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικού μετασχηματιστή τάσεως (CVT) ***[7]***

Μία συσκευή αντιστάθμισης συνδέεται στο διαιρέτη τάσης (στο δευτερεύον του μετασχηματιστή τάσεως) με σκοπό να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα τάσεως και γωνίας. Αυτή η κατηγορία μετασχηματιστών τάσεως χρησιμοποιείται ευρύτατα ιδίως σε επίπεδα τάσεως από 72kV και πάνω. Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή τάσεως είναι ανεξάρτητη από το φορτίο.

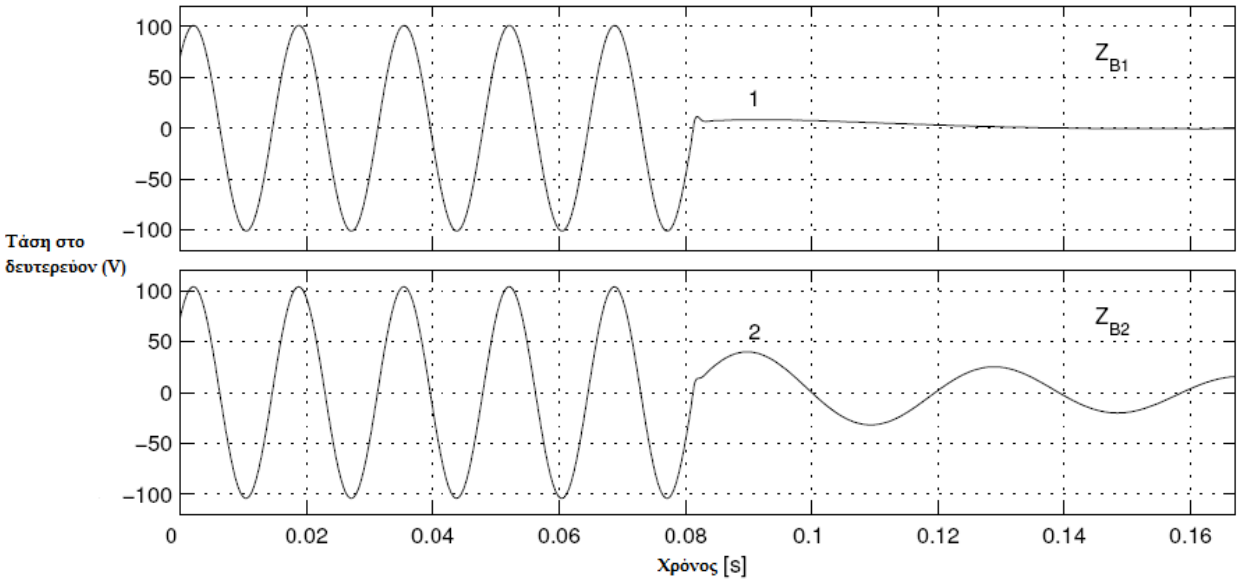
Εκτός από εφαρμογές προστασίας και μετρήσεως, οι μετασχηματιστές τάσεως χωρητικού τύπου έχουν την δυνατότητα έγχυσης σημάτων υψηλής συχνότητας στις γραμμές υψηλής τάσης με σκοπό την επικοινωνία μεταξύ των υποσταθμών.

Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι στο εμπόριο οι μετασχηματιστές τάσεως χωρητικού τύπου χωρίζονται σε υψηλής και χαμηλής χωρητικότητας, με βασικό πλεονέκτημα των μετασχηματιστών εντάσεως υψηλής χωρητικότητας η ακρίβεια κάτω από διαφορετικές καταστάσεις και συνθήκες λειτουργίας που σχετίζονται με τις διαταραχές, μεταβολές στην συχνότητα καθώς και την θερμοκρασία.

Αναφερόμενοι στις διαταραχές που επηρεάζουν την ορθή λειτουργία των μετασχηματιστών τάσεως και οι οποίες πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη κατά την εφαρμογή των μετασχηματιστών τάσεως αυτές είναι:**[8]**

1. *Απότομη πτώση τάσης:* στους ακροδέκτες ενός μετασχηματιστή τάσης εξαιτίας κάποιου σφάλματος κοντά στον μετασχηματιστή.
2. *Ξαφνική υπέρταση:* εξαιτίας κάποιου σφάλματος μεταξύ φάσης και γης, όπου μπορεί να επιφέρει υπέρταση στις υγιείς φάσεις του συστήματος όπου μπορεί να συνδέεται ο μετασχηματιστής τάσης.

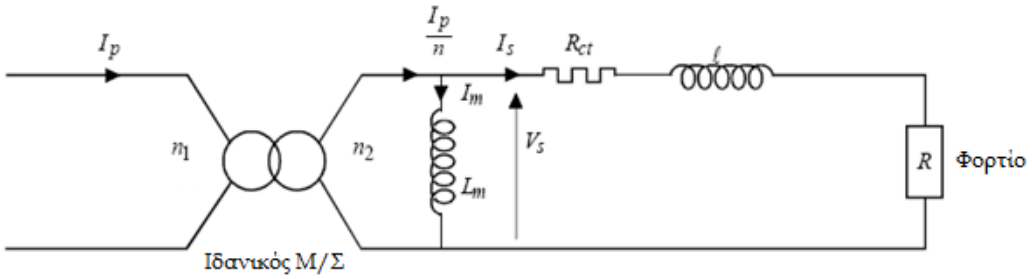
Ποιο αναλυτικά, η απότομη πτώση τάσης στα άκρα ενός μετασχηματιστή τάσης μπορεί να επιφέρει ταλαντώσεις (υπό-μεταβατικές) στο εσωτερικό του πυρήνα του. Αυτή η ταλάντωση μπορεί να απεικονιστεί στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή τάσεων σαν μία ταλάντωση υψηλής συχνότητας. Ο χρόνος που μπορεί να διαρκέσει αυτή η ταλάντωση είναι 15-20ms. Στους χωρητικούς πυκνωτές τάσεως, ταλαντώσεις μπορεί να προκληθούν εξαιτίας της αποθηκευμένης ενέργειας στους πυκνωτές της διάταξης και μπορεί να διαρκέσει έως 100ms. Από την άλλη πλευρά, η ξαφνική υπέρταση στα άκρα του μετασχηματιστή τάσεως μπορεί να οδηγήσει τον πυρήνα του σε κορεσμό. Αυτού του είδους υπό-μεταβατικών ταλαντώσεων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το σφάλμα τάσης. Παράδειγμα τέτοιας ταλάντωσης απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το *Σχήμα **2.4*** απεικονίζει την τάση στο δευτερεύον ενός χωρητικού μετασχηματιστή τάσεως, 345 Kv, κατόπιν κατάρρευσης τάσης στον ζυγό που ήταν τοποθετημένος ο μετασχηματιστής τάσεως για δύο περιπτώσεις φορτίων στο δευτερεύον τους. Η πρώτη περίπτωση Z_{B1} αφορά καθαρά ωμικό φορτίο ενώ η δεύτερη περίπτωση Z_{B2} καθαρά επαγωγικό. **[9]**



Σχήμα 2.4 Παράδειγμα ταλάντωσης σε χωρητικό μετασχηματιστή τάσης.

2.3 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών εντάσεως

Οι μετασχηματιστές έντασης έχουν ίδια σύνθεση με τους συμβατικούς μετασχηματιστές. Στο παρακάτω σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.5 Ηλεκτρικό κύκλωμα μετασχηματιστή εντάσεως.

Όπου:

R_{ct}: αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος

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

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

V_s: 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:

$$I_P \times n_1 = I_S \times n_2 \qquad \textbf{eq. 2-1}$$

Στην πραγματικότητα όμως ο μετασχηματιστής εντάσεως ο οποίος είναι κατασκευασμένος από κράμα σιδήρου (Alloy steel), εμφανίζει απώλειες χαλκού, αλλά και ροή σκέδασης.

Για την ανάλυση του πραγματικού ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή θα πρέπει να λάβουμε υπόψη όλα τα είδη των απωλειών που εμφανίζονται κατά την λειτουργία του:

1. *Απώλειες χαλκού:* Πρόκειται για τις θερμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος ($I^2 \times R$)
2. *Απώλειες εξαιτίας δινορρευμάτων:* Είναι οι θερμικές απώλειες που κατανέμονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετασχηματιστή
3. *Απώλειες υστέρησης:* Αυτές έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα η οποία συμβαίνει σε κάθε ημι-περίοδο της τάσης.

4. *Ροή διαρροής:* Είναι οι μαγνητικές ροές πρωτεύοντος και δευτερεύοντος όπου ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς το διάκενο, και εμφανίζονται μόνο στο ένα από τα δύο τυλίγματα. Αυτές οι ροές παράγουν τις αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του πυρήνα, που απεικονίζονται και στο πραγματικό ισοδύναμο του μετασχηματιστή.**[10]**

Από το ισοδύναμο κύκλωμα και από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι:

- Το ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή εντάσεως, καθορίζεται από το ρεύμα του δικτύου, αφού ο μετασχηματιστής εντάσεως συνδέεται σε σειρά με το δίκτυο.

- Όπως είναι φανερό από το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή εντάσεως, το ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή χωρίζεται σε ένα μικρό ρεύμα μαγνήτισης I_m που ρέει στον πυρήνα του μετασχηματιστή και που είναι η αιτία ανάπτυξης της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή και σε ένα ρεύμα I_s που ρέει προς το φορτίο.

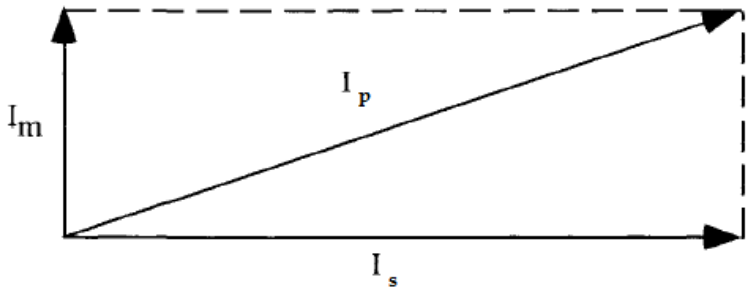
  Ορίζοντας σαν λόγο μετασχηματισμού n το κλάσμα:

$$n = \frac{n_2}{n_1} \qquad \textbf{eq. 2-2}$$

  Μπορούμε να πούμε ότι το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως περιγράφεται από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$I_S = \frac{I_P}{n} - I_m \qquad \textbf{eq. 2-3}$$

- Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι το ρεύμα μαγνήτισης (I_m) είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης στον πυρήνα του μετασχηματιστή (στην ακόρεστη περιοχή που θα εξεταστεί ποιο κάτω), ενώ η κυματομορφή του έπεται της κυματομορφής της τάσης κατά 90^0 . Έτσι, αυτό το ρεύμα αντιστοιχεί σε μία αντίδραση τοποθετημένη παράλληλα στον πυρήνα όπως φαίνεται και στο παραπάνω ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μετασχηματιστή. Στο *Σχήμα **2.6*** απεικονίζεται το διανυσματικό διάγραμμα που αναπαριστά τα ρεύματα σε έναν πραγματικό μετασχηματιστή εντάσεως. Το ρεύμα μαγνήτισης το οποίο συνδέεται με τις απώλειες του πυρήνα είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος καθώς επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια σε έναν μετασχηματιστή εντάσεως.



Σχήμα 2.6 Διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων σε μετασχηματιστή εντάσεως.

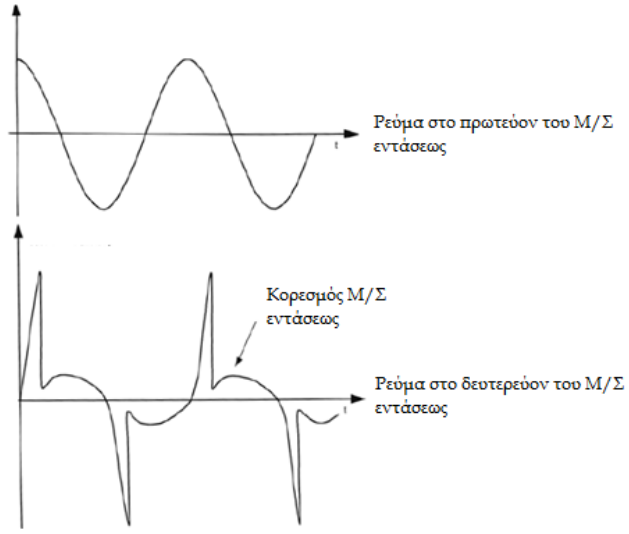
- Στον πραγματικό μετασχηματιστή εντάσεως, το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή δεν είναι ακριβώς ανάλογο του ρεύματος στο πρωτεύον. Κατά την κανονική λειτουργία ο μετασχηματιστής εντάσεως έχει την δυνατότητα να εμφανίζει στο δευτερεύον του μία πολύ καλή αναπαράσταση του ρεύματος πρωτεύοντος. Από την άλλη μεριά όμως και κάτω από ορισμένες

συνθήκες όπου ο πυρήνας του μετασχηματιστή φτάσει στον κόρο, τότε ο μετασχηματιστής εντάσεως αδυνατεί να αναπαραστήσει σωστά το ρεύμα του πρωτεύοντος και το αναπαριστά παραμορφωμένο όπως θα αναλυθεί και ποιο κάτω.

- Σε περίπτωση που το δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως μείνει χωρίς φορτίο, το ρεύμα του πρωτεύοντος (I_p/n) περνάει όλο από τον πυρήνα του μετασχηματιστή και γίνεται ρεύμα μαγνήτισης. Αυτή η μεγάλη αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης θα προκαλέσει αύξηση και της μαγνητικής ροής η οποία θα οδηγήσει σε κορεσμό του πυρήνα και ακόμα χειρότερα στην καταστροφή του λόγω αύξησης των απωλειών. Ακόμα, επειδή το ρεύμα μαγνήτισης συνδέεται άμεσα με την εφαρμοζόμενη τάση, στην περίπτωση όπου το δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως μείνει χωρίς φορτίο, η τάση στον πυρήνα θα αυξηθεί σημαντικά καταστρέφοντας την μόνωση του πυρήνα.

2.3.1 Κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή εντάσεως, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι στην περίπτωση που η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως είναι μικρή, αυτό συνεπάγεται και μικρό ρεύμα διέγερσης, τότε λέμε ότι ο μετασχηματιστής εντάσεως συμπεριφέρεται σχεδόν γραμμικά. Καθώς η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως αυξάνεται λόγω αύξησης του φορτίου που είναι συνδεδεμένο στο δευτερεύον του, αυτό συνεπάγεται αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης και αύξηση της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Όταν ο πυρήνας του μετασχηματιστή φτάσει στο μέγιστο σημείο κορεσμού, το ρεύμα διέγερσης αυξάνεται δυσανάλογα, με αποτέλεσμα το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως να μην αποτελεί μία ακριβή αναπαράσταση του ρεύματος στο πρωτεύον, και να εμφανίζεται παραμορφωμένο όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.

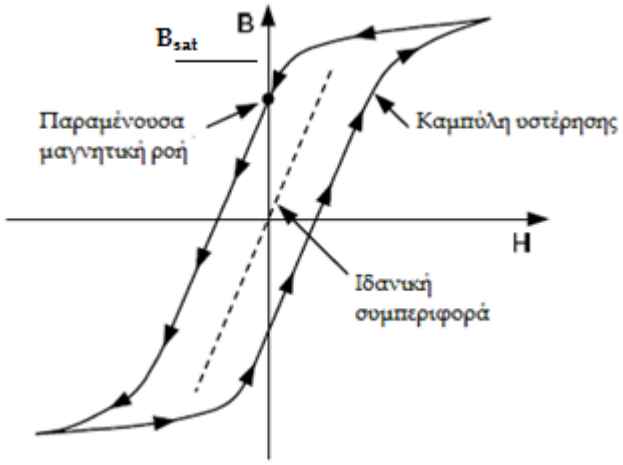


Σχήμα 2.7 περίπτωση κορεσμού του πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως ***[11]***

Το φαινόμενο του κορεσμού γίνεται ποιο ξεκάθαρο και από την ανάλυση της καμπύλης υστέρησης . Στο *Σχήμα* ***2.8*** που ακολουθεί απεικονίζει μία τυπική καμπύλη υστέρησης ενός μετασχηματιστή εντάσεως.

Όπως είναι φανερό η καμπύλη υστέρησης παρουσιάζει μία παραμένουσα μαγνητική ροή η οποία έχει δημιουργηθεί από κάποιο μεγάλο ρεύμα σφάλματος. Κατά την εκκαθάριση ενός σφάλματος , το ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή εντάσεως μηδενίζεται, όμως η μαγνητική ροή στον πυρήνα δεν μηδενίζεται και κατά συνέπεια ένα μέρος της μαγνητικής ροής παγιδεύεται στον πυρήνα δημιουργώντας έτσι την παραμένουσα μαγνητική ροή.

Η παραμένουσα μαγνητική ροή αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο για τους μετασχηματιστές εντάσεως και θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ιδίως σε μετασχηματιστές εντάσεως που προορίζονται για μεταβατικά φαινόμενα καθώς αυτή η παράμετρος μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε εσφαλμένη λειτουργία των συστημάτων προστασίας. **[12]**



Σχήμα 2.8 Καμπύλη υστέρησης ενός μετασχηματιστή εντάσεως

Όσον αφορά την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως σύμφωνα με τον νόμο της επαγωγής η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι ανάλογη με την μεταβολή της μαγνητικής ροής όπως περιγράφεται και στην εξίσωση που ακολουθεί:

$$V_s = -\frac{d\varphi}{dt} \qquad \textbf{eq. 2-4}$$

Όπου $\varphi = n_2 \times B \times S$

n_2: ο αριθμός των σπειρών στο δευτερεύον τύλιγμα

B: πυκνότητα της μαγνητικής ροής

S: επιφάνεια των σπειρών

Συνεπώς:

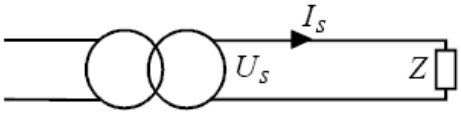
$$V_s = -\frac{d}{dt} \times (n_2 \times B \times S) \Leftrightarrow \qquad \textbf{eq. 2-5}$$

$$V_s = -n_2 \times S \times \frac{dB}{dt} \qquad \textbf{eq. 2-6}$$

2.4 Χρήση και εφαρμογή μετασχηματιστών εντάσεων.

Όπως είναι γνωστό οι μετασχηματιστές εντάσεως συνδέονται σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό να τροφοδοτήσουν συσκευές μετρήσεως και προστασίας. Για αυτό το σκοπό, οι μετασχηματιστές εντάσεως πρέπει να παρέχουν ένα ρεύμα στο δευτερεύον το οποίο να είναι ανάλογο του ρεύματος στο πρωτεύον, αλλά και να προσαρμόζονται εύκολα και στα χαρακτηριστικά του δικτύου (τάση, συχνότητα). Επίσης παρέχουν γαλβανική απομόνωση μεταξύ του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κυκλώματος του μετασχηματιστή. Τέλος μέσω τον μετασχηματιστών εντάσεως πραγματοποιείται γείωση των μετρητικών συσκευών παρέχοντας έτσι ασφάλεια και στο εξειδικευμένο προσωπικό που εργάζεται.

Οι μετασχηματιστές εντάσεως σχεδιάζονται έτσι ώστε στο δευτερεύον του μετασχηματιστή να παρέχεται ένα ρεύμα της τάξεως των 1 ή 5 Α. Ακόμα, είναι γνωστό ότι ο λόγος μεταξύ ρεύματος στο πρωτεύον και το δευτερεύον είναι σταθερός. Συνεπώς, σε ονομαστική φόρτιση, το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι ανεξάρτητο από το φορτίο, όσο ο πυρήνας του μετασχηματιστή δεν φτάνει στον κόρο. Το σχήμα που ακολουθεί, αναπαριστά ένα απλοποιημένο ηλεκτρικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή εντάσεως.



Σχήμα 2.9 Απλοποιημένο ηλεκτρικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή εντάσεως

Από το Σχήμα 2.9 βλέπουμε ότι το Z αναπαριστά την σύνθετη αντίσταση του φορτίου. Η ισχύς που ρέει στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P = Z \times I_s^2 \qquad \textbf{eq. 2-7}$$

Και η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι:

$$U_s = Z \times I_s \qquad \textbf{eq. 2-8}$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις βλέπουμε ότι η μείωση του Z επιφέρει μείωση στο P.

Εάν βραχυκυκλώσουμε το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή εντάσεως τότε θα ισχύουν ότι $Z = 0, P = 0, V_s = 0$.Από το παραπάνω συμπεραίνουμε ότι μπορούμε να βραχυκυκλώσουμε το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή εντάσεως χωρίς κανέναν κίνδυνο.

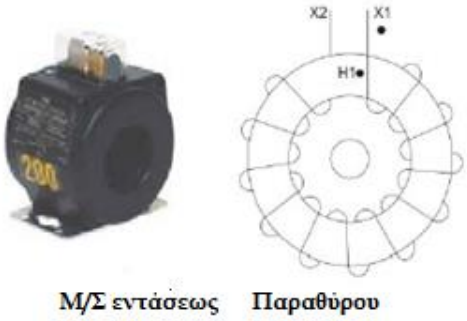
Από την άλλη πλευρά όμως αν το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή εντάσεως παραμείνει ανοιχτό-κυκλωμένο όλο το ρεύμα δευτερεύοντος περνά μέσα από τον πυρήνα του μετασχηματιστή με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του πυρήνα και έπειτα την καταστροφή του. Συνεπώς ποτέ δεν αφήνουμε ανοιχτό-κυκλωμένο το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή εντάσεως διότι αυτό θα έχει καταστροφικά αποτελέσματα.

2.5 Τύποι μετασχηματιστών έντασης.

Κατασκευαστικά οι μετασχηματιστές έντασης αποτελούνται από ένα η περισσότερα πρωτεύοντα η και δευτερεύοντα τυλίγματα όπου το καθένα έχει το δικό του μαγνητικό κύκλωμα. Συνεπώς, μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τους μετασχηματιστές έντασης στους παρακάτω τύπους:

- *Μετασχηματιστές παραθύρου:*

Αυτή η κατηγορία μετασχηματιστών διαθέτουν άνοιγμα(παράθυρο), ανάλογης διατομής, για την διέλευση χάλκινου αγωγού η καλωδίου μέσα από τον πυρήνα του μετασχηματιστή όπως απεικονίζεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Βασικό χαρακτηριστικό των μετασχηματιστών τύπου παραθύρου είναι ο μικρός όγκος κατασκευής τους . **[13] [14]**



Σχήμα 2.10 Μετασχηματιστές εντάσεως τύπου παραθύρου.

- *Μετασχηματιστές τύπου μπάρας:*

Οι μετασχηματιστές τύπου μπάρας είναι παρόμοιοι με την παραπάνω κατηγορία μετασχηματιστών. Βασικό χαρακτηριστικό όμως αυτής της κατηγορίας είναι ο μικρός όγκος του μετασχηματιστή και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται σε κυψέλες υποσταθμών μέσης τάσης (MV cubicle) αλλά και σε ηλεκτρονόμους προστασίας.



Σχήμα 2.11 Μετασχηματιστής εντάσεως τύπου μπάρας

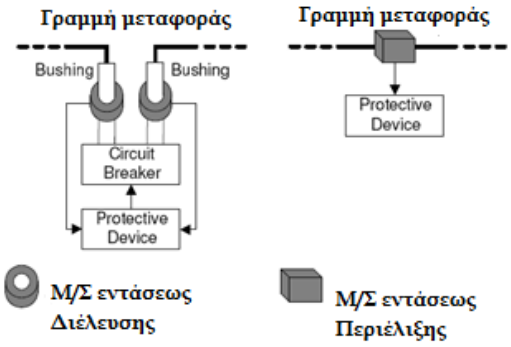
- *Περιελικτικοί μετασχηματιστές:*

Οι περιελικτικοί μετασχηματιστές εντάσεως αποτελούνται από ένα πρωτεύον και ένα δευτερεύον τύλιγμα το οποίο περιελίσσεται γύρω από τον κοινό πυρήνα. Χρήση αυτών των μετασχηματιστών εντάσεως γίνεται κατά κανόνα για μικρά ρεύματα και κυρίως για μικρά ρεύματα σφάλματος λόγω περιορισμών στο θερμικό όριο της μόνωσης τους.



Σχήμα 2.12 Μετασχηματιστής εντάσεως τύπου περιέλιξης

Οι ποιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι μετασχηματιστών εντάσεως είναι οι μετασχηματιστές τύπου παραθύρου αλλά και οι περιελικτικοί μετασχηματιστές. Στην διεθνή βιβλιογραφία γίνεται μια ακόμα διάκριση των μετασχηματιστών τύπου παραθύρου (εκτός από μετασχηματιστές τύπου μπάρας), σε μετασχηματιστές εντάσεως τύπου διέλευσης (bushing).



Σχήμα 2.13 Εφαρμογή των μετασχηματιστών εντάσεως τύπου διέλευσης και περιέλιξης.

Μεγάλο πλεονέκτημα των μετασχηματιστών εντάσεως τύπου διέλευσης είναι το γεγονός ότι είναι ποιο οικονομικοί έναντι των περιελικτικών μετασχηματιστών εντάσεως. Επιπλέον, εξαιτίας του γεγονότος ότι η ακρίβεια που παρουσιάζουν είναι περισσότερο κατάλληλη για εφαρμογές προστασίας παρά μετρήσεως η χρήση των μετασχηματιστών εντάσεως τύπου διέλευσης γίνεται συνήθως σε διατάξεις προστασίας κυρίως σε μετασχηματιστές ισχύος και σε διακόπτες. Η χαμηλή ακρίβεια των μετασχηματιστών εντάσεως τύπου διέλευσης είναι λόγω κατασκευής του πυρήνα τους όπου σε μικρά ρεύματα παρουσιάζουν μεγάλο ρεύμα διέγερσης και κατά συνέπεια μικρότερη ακρίβεια. **[15]**

2.6 Στοιχεία για την επιλογή μετασχηματιστών εντάσεως

Σε αυτή την ενότητα, αναλύονται οι ποιο σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή μετασχηματιστών εντάσεως. Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται τα ποιο σημαντικά στοιχεία τα οποία θα καθορίσουν την επιλογή ενός μετασχηματιστή εντάσεως.

Πίνακας 2-1 Παράμετροι για την επιλογή μετασχηματιστή εντάσεως

Περιγραφή	**Συμβολισμός**	**Μονάδα μέτρησης**
Ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος	I_p	A
Ρεύμα βραχυκυκλώματος	I_{sc}	kA
Αριθμός των τυλιγμάτων στο δευτερεύον (1-3 τυλίγματα). Για το κάθε ένα:		
✓ Τύπο του τυλίγματος		
✓ Ρυθμίσεις προστασίας ή μετρήσεως		
✓ Ισχύς εξόδου (H/N, καταναλώσεις καλωδίων)		VA
✓ Παράγοντας ακρίβειας (Accuracy factor)		
▪ Προστασίας	ALF	
▪ Μετρήσεως	SF	
✓ Ρεύμα στο δευτερεύον(1ή 5 A)	I_s	A
Επίπεδο μόνωσης	u_n	kV

Ποιο αναλυτικά:

2.6.1 Ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος.

Οι μετασχηματιστές εντάσεως εκτός από την ονομαστική τάση λειτουργίας θα πρέπει να αντέχουν και την συνεχόμενη λειτουργία τους κάτω από το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος. Ένας σημαντικός παράγοντας όπου επηρεάζει την αντοχή και λειτουργία του μετασχηματιστή εντάσεως κάτω από το ονομαστικό ρεύμα είναι η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές αλλά και το πρότυπο IEC 61869-2 αλλά και το C57.13, οι μετασχηματιστές εντάσεως σχεδιάζονται έτσι ώστε να λειτουργούν σε μέση θερμοκρασία των 35°C (μέση θερμοκρασία αέρα). Κατά συνέπεια, το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος θα πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να είναι 10-40% μεγαλύτερο από το εκτιμώμενο ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του μετασχηματιστή εντάσεως. Αυτό το εύρος ασφαλείας, προσφέρει στα όργανα μετρήσεων υψηλή ανάλυση. Τυπικές τιμές που μπορούν να επιλεγούν για ρεύμα πρωτεύοντος κάτω από αυτό το εύρος ασφαλείας είναι: 10,12.5,15,20,25,30,40,50,60,75 A.

Σε περίπτωση που η εφαρμογή των μετασχηματιστών εντάσεως επιβάλει ρεύμα πρωτεύοντος διαφορετικό από τις παραπάνω επιλεγόμενες τιμές, μπορούν να επιλεγούν μετασχηματιστές εντάσεως με παραπάνω του ενός πρωτεύοντα τυλίγματα όπου μπορούν να συνδεθούν είτε σε σειρά είτε παράλληλα δημιουργώντας το επιθυμητό ονομαστικό ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα. Βέβαια, στην περίπτωση όπου έχουμε μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης (>40 kA), προτείνονται μετασχηματιστές εντάσεως με πολλαπλές συνδέσεις στο δευτερεύον (taps). Με την χρήση των taps, επιτυγχάνεται μείωση των αμπερο-τυλιγμάτων ενώ η ισχύς βραχυκύκλωσης παραμένει ίδια. **[16]**

2.6.2 Ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντος.

Το ονομαστικό ρεύμα στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή εντάσεως μπορεί να είναι 1 ή 5 A .Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι η επιλογή του 1 A είναι ποιο συνήθης στις σημερινές εφαρμογές. Καθώς τα σημερινά συστήματα προστασίας τα οποία συνδέονται στο δευτερεύον των μετασχηματιστών εντάσεως εμφανίζουν μικρή εμπέδηση (ή φορτίο burden), εξετάζεται ο υπολογισμός της αντίστασης των καλωδίων. Η αντίσταση των καλωδίων μπορεί να υπολογιστεί από την απλή σχέση $I^2 \times R$. Έχει παρατηρηθεί ότι, η εμπέδηση των καλωδίων (σε VA) για ρεύμα λειτουργίας 1 A εμφανίζεται να είναι 25 φορές μικρότερη συγκριτικά με την περίπτωση όπου το ρεύμα λειτουργίας ήταν 5 A. Αυτή η παράμετρος, είναι πολύ σημαντική διότι με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση του μεγέθους του πυρήνα και κατά συνέπεια μείωση του συνολικού κόστους του μετασχηματιστή εντάσεως.

2.6.3 Σφάλμα μέτρησης

Σε προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ότι σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή όπου μπορεί να αγνοηθεί το ρεύμα μαγνήτισης, το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$I_p \times n_1 = I_s \times n_2 \qquad \textbf{eq. 2-9}$$

$$I_s = (n_1/n_2) \times I_p \qquad \textbf{eq. 2-10}$$

Στην πραγματικότητα όμως λαμβάνοντας υπόψη και το ρεύμα μαγνήτισης η παραπάνω σχέση μετασχηματίζεται σε:

$$I_s = \frac{I_p}{n} - I_m \qquad \textbf{eq. 2-11}$$

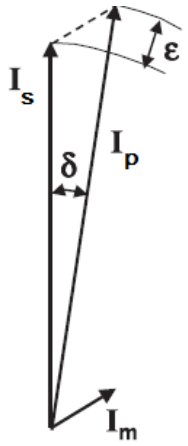
Συνεπώς από την παραπάνω ανάλυση διακρίνουμε ένα σφάλμα στον μετασχηματισμό του πρωτεύοντος ρεύματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.

Ως προς την διάκριση το σφάλμα διακρίνεται σε:

- ***Σφάλμα στο μέτρο του ρεύματος* ή σφάλμα ένταση:** ορίζεται η % απόκλιση του ρεύματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως πολλαπλασιαζόμενη με τον λόγο μετασχηματισμούK_n όπως ορίζεται και από το πρότυπο *IEC 61869-1* από την σχέση που ακολουθεί:

$$Σφάλμα\ έντασης\% = \frac{\left(k_n \times I_s - I_p\right) \times 100}{I_p} \qquad \textbf{eq. 2-12}$$

- ***Σφάλμα γωνίας:*** είναι η φασική απόκλιση του ρεύματος στο δευτερεύον από το ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή εντάσεως όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Το σφάλμα γωνίας (δ) μετριέται σε λεπτά, και είναι θετικό όταν το ρεύμα στο δευτερεύον προηγείται έναντι του ρεύματος στο πρωτεύον του μετασχηματιστή εντάσεως.



Σχήμα 2.14 Σφάλμα γωνίας

Στην επόμενη ενότητα θα δούμε ότι σύμφωνα με τους κανονισμούς έχουν καθοριστεί συγκεκριμένα όρια σφάλματος έντασης αλλά και γωνίας, τα οποία ο μετασχηματιστής δεν πρέπει να υπερβαίνει. Μετριούνται σε ποσοστό επί της ονομαστικής έντασης και για ονομαστική ισχύ για το σφάλμα έντασης και σε min για το σφάλμα γωνίας, και καθορίζουν την κλάση ακριβείας του μετασχηματιστή εντάσεως.

2.6.4 Οριακό θερμικό ρεύμα πρωτεύοντος (I_{th}) και δυναμική οριακή ένταση (I_{dyn})

Είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αντέξει το πρωτεύον ενός μετασχηματιστής εντάσεως με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον, για διάστημα 1 sec, χωρίς η θερμική επίδραση αυτού του ρεύματος να αλλοιώσει τα χαρακτηριστικά της μόνωσης του μετασχηματιστή. Η τιμή αυτή του θερμικού ρεύματος (σε kA) συνήθως αναγράφεται στην πινακίδα του μετασχηματιστή.

Σε περίπτωση όπου αυτή η τιμή του οριακού θερμικού ρεύματος δεν αναγράφεται στην πινακίδα του μετασχηματιστή, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_{th} = \frac{S_k}{U_n \times \sqrt{3}} \ [kA] \qquad \textbf{eq. 2-13}$$

Όπου:

S_k: είναι ισχύς βραχυκύκλωσης στο σημείο εγκατάστασης του μετασχηματιστή εντάσεως (σε MVA).

U_n: πολική τάση (σε kv)

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι ο μετασχηματιστής εντάσεως συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι ο μετασχηματιστής εντάσεως θα αντέξει ένα ρεύμα σφάλματος. Και αυτό είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος διότι το ρεύμα σφάλματος έχει μία θερμική επίδραση στο πρωτεύον τύλιγμα, όπου μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε καταστροφή του επιπέδου της στάθμης μόνωσης.

Από την άλλη πλευρά μία ακόμα σημαντική παράμετρος που σχετίζεται με το οριακό θερμικό ρεύμα είναι η δυναμική οριακή ένταση I_{dyn}. Μπορεί να οριστεί ότι η οριακή δυναμική ένταση είναι η τιμή του

πρώτου εύρους του ρεύματος του οποίου η δυναμική επίδραση είναι μέσα σε ασφαλείς προκαθορισμένες τιμές. Έχει αποδειχτεί ότι κατά την διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος, το μέγιστο ρεύμα που σημειώνεται κατά την πρώτη περίοδο φτάνει περίπου τις 2.5 φορές του θερμικού οριακού ρεύματος I_{th}. Αποτέλεσμα αυτού του ρεύματος είναι η αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης που ασκείται στα τυλίγματα αλλά και στις αντίστοιχες φάσεις του πρωτεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι η οριακή δυναμική ένταση εξαρτάται και από το είδος του μετασχηματιστή εντάσεως. Για παράδειγμα σε μετασχηματιστές εντάσεως τύπου παραθύρου, η οριακή δυναμική ένταση εξαρτάται από το πόσο ο αγωγός (από χαλκό ή αλουμίνιο) ή το καλώδιο που αποτελούν το πρωτεύον τύλιγμα, είναι στο κέντρο του ανοίγματος. Στο απόλυτο κέντρο η δυναμική οριακή ένταση είναι απεριόριστη.

Πίνακας 2-2 Τυπικές τιμές μέγιστου οριακού ρεύματος σε kA

Τυπικές τιμές μέγιστου οριακού θερμικού ρεύματος I_{th} R.M.S τιμές													
6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	kA

Πίνακας 2-3 Υπολογισμός δυναμικού ρεύματος

Δυναμικό οριακό ρεύμα I_{dyn}	
IEC 50 Hz	$2.5 \times I_{th}$
IEC 60 Hz	$2.6 \times I_{th}$
ANSI/IEEE 60 Hz	$2.7 \times I_{th}$

2.6.5 Μέγιστο φορτίο στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως

Για έναν μετασχηματιστή εντάσεως όπου τροφοδοτείται με το ονομαστικό ρεύμα στο πρωτεύον, υπάρχει ένα μέγιστο φορτίο που μπορεί να συνδεθεί το οποίο δεν θα οδηγήσει σε κορεσμό τον πυρήνα του μετασχηματιστή και κατά συνέπεια ο μετασχηματιστής θα μπορεί να παρέχει μία ακριβής μέτρηση του ρεύματος. Άρα, ο μετασχηματιστής εντάσεως έχει μία μέγιστη τάση στο δευτερεύον του πέραν της οποίας ο πυρήνας μεταβαίνει στον κορεσμό.

Αυτός είναι ένας λόγος στον οποίο οι κατασκευαστές μετασχηματιστών εντάσεως σε συνεργασία με το πρότυπο IEC 61869-2 καθορίζουν το ακριβές φορτίο η εμπέδηση (burden) σε VA, και που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$P = Z_{max} \times I_n^2 \qquad \textbf{eq. 2-14}$$

Όπου

Z_{max}: Μέγιστο φορτίο που μπορεί να συνδεθεί στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή εντάσεως. Και αυτό συμπεριλαμβάνει την εμπέδηση του καλωδίου που συνδέει τον μετασχηματιστή εντάσεως με τον ηλεκτρονόμο. Άρα, η απόσταση που συνδέεται ο ηλεκτρονόμος με τον μετασχηματιστή εντάσεως θα πρέπει να είναι μικρή έτσι ώστε να επιτύχουμε χαμηλή εμπέδηση.

Από την άλλη μεριά το βρετανικό πρότυπο BS 3938 καθορίζει την μέγιστη τάσηV_k (knee-point voltage), η οποία μπορεί να αναπτυχθεί στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως χωρίς να το φτάσει στον κόρο.

2.6.6 Εξάρτηση των μετασχηματιστών εντάσεως από την συχνότητα.

Γενικά οι μετασχηματιστές εντάσεως δεν έχουν πλήρως γραμμική συμπεριφορά. Ωστόσο, οι κατασκευαστές των μετασχηματιστών εντάσεως δίνουν τις προδιαγραφές των μετασχηματιστών για λειτουργία στην γραμμική περιοχή. Έχει αποδειχτεί ότι η αύξηση της συχνότητας (από 50 έως 500 Hz), επιφέρει μείωση στο σφάλμα γωνίας και έντασης του μετασχηματιστή, καθώς και μείωση στην απαιτούμενη ποσότητα του πυρήνα. Για συχνότητες λειτουργίας των μετασχηματιστών κάτω από τα 50 Hz, το συνολικό σφάλμα (γωνίας και έντασης), μεγαλώνει πολύ και εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από την επαγωγή του πυρήνα. Αξίζει να σημειωθεί ότι για συχνότητες f≥10 kHz χρησιμοποιούνται ειδικοί πυρήνες. Βέβαια όλα τα παραπάνω ισχύουν για λειτουργία των μετασχηματιστών εντάσεως στην γραμμική περιοχή. Όταν η μαγνητική ροή στον πυρήνα του μετασχηματιστή μεταβεί εκτός της γραμμικής περιοχής, τότε σε αυτή την περίπτωση δεν μπορεί να αξιολογηθεί με ακρίβεια η απόκριση του μετασχηματιστή στην αλλαγή της συχνότητας.

2.6.7 Επίπεδο της μόνωσης

Γενικά οι μετασχηματιστές εντάσεως θα πρέπει να λειτουργούν στην ονομαστική τάση του δικτύου αλλά και να αντέχουν ένα καθορισμένο επίπεδο υπερτάσεων του. Σύμφωνα λοιπόν με τα διεθνή πρότυπα, εφαρμόζονται διάφοροι έλεγχοι από όπου καθορίζεται η ικανότητα του μετασχηματιστή εντάσεως να αντέχει τις τυχόν υπερτάσεις που μπορεί να εμφανιστούν στο δίκτυο. Συνεπώς, ανάλογα με την τάση εφαρμογής του μετασχηματιστή εντάσεως πραγματοποιούνται διάφοροι έλεγχοι. Ένας από τους διάφορους ελέγχους που εφαρμόζονται είναι και ο έλεγχος υπέρτασης λόγω κεραυνού, όπου σε αυτή τη διαδικασία προσομοιώνεται με κατάλληλη κρουστική τάση που έχει ευρος ανάλογο με την τάση λειτουργίας και χαρακτηριστικά χρόνου 1.2/50μs (χρόνος μετώπου/χρόνος ουράς αντίστοιχα). Ακόμα, για μετασχηματιστές εντάσεως που προορίζονται να λειτουργήσουν σε τάσεις μεγαλύτερες των 300 KV, πραγματοποιείται προσομοίωση υπέρτασης λόγω χειρισμών με χαρακτηριστικά 250/2500 μs. **[17]**

2.6.7.1 Υψόμετρο πάνω από την θάλασσα (>1000 m)

Όπως είναι γνωστό η διηλεκτρική αντοχή του αέρα μειώνεται καθώς αυξάνεται το υψόμετρο. Συνεπώς, για εφαρμογές που απαιτούν την εγκατάσταση μετασχηματιστών εντάσεως σε υψόμετρο μεγαλύτερο από τα 1000 m από το επίπεδο της θάλασσας, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η εξωτερική μόνωση του μετασχηματιστή (arcing distance) θα πρέπει να προσαρμοστεί. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61869-1, αυτός η προσαρμοσμένη εξωτερική μόνωση μπορεί να υπολογιστεί κάτω από καθορισμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες, πολλαπλασιάζοντας την τάση αντοχής του μετασχηματιστή εντάσεως με τον παράγοντα k σύμφωνα με τν εξίσωση που ακολουθεί:

$$k = e^{m\times(H-1000)/8150} \qquad \textbf{eq. 2-15}$$

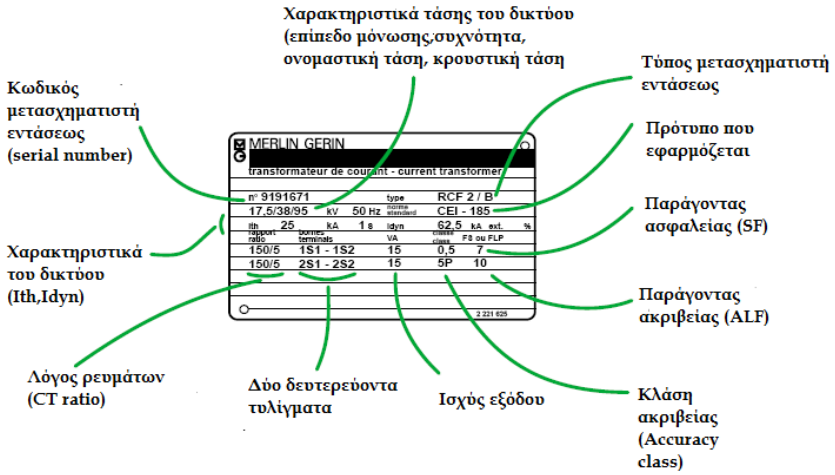
Όπου :

H: υψόμετρο πάνω από την θάλασσα (σε m)

m: για εφαρμογές κρουστικών τάσεων και υπερτάσεων βιομηχανικής συχνότητας παίρνει την τιμή 1, ενώ για υπερτάσεις χειρισμών παίρνει την τιμή 0.75

2.7 Προδιαγραφές και παράμετροι των μετασχηματιστών εντάσεως.

Γενικά οι μετασχηματιστές εντάσεως πρέπει να πληρούν κάποια ορισμένα χαρακτηριστικά ανάλογα με την εφαρμογή τους ως μετασχηματιστές μετρήσεως ή προστασίας. Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι βασικές προδιαγραφές των μετασχηματιστών εντάσεως σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEC, ANSI/IEEE. Η εικόνα που ακολουθεί αποτελεί ένα τυπικό παράδειγμα πινακίδας μετασχηματιστή έντασης με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα όπου αναγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχει ορίσει ο κατασκευαστής. **[18]**



Σχήμα 2.15 Πινακίδα μετασχηματιστή εντάσεως

Ποιό αναλυτικά:

2.7.1 C.T ratio

Είναι ο λόγος μεταξύ ρεύματος στο πρωτεύον και ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα $K_n = I_p/I_s$

2.7.2 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.

2.7.3 Accuracy limit factor

Γενικά ανάλογα με την εφαρμογή των μετασχηματιστών εντάσεως αλλά και τα φορτία τα οποία θα συνδεθούν στους μετασχηματιστές εντάσεως, επιλέγονται και τα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να διαθέτει ο πυρήνας τους.

Από τα παραπάνω έγινε κατανοητό ότι η διαστασιολόγηση ενός μετασχηματιστή εντάσεως γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να παρέχει συγκεκριμένη ακρίβεια για ρεύματα σφάλματος πάνω από ένα επιτρεπτό όριο (rated accuracy limit current), και με το ονομαστικό φορτίο (rated burden) συνδεδεμένο στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Κατά συνέπεια, το επιτρεπτό όριο του ρεύματος είναι πολλαπλάσιο του ονομαστικού σύμφωνα και με την εξίσωση που ακολουθεί.

$$I_{al} = ALF \times I_n \qquad \textbf{eq. 2-16}$$

Ο παράγοντας ALF ονομάζεται Accuracy limit factor (για μετασχηματιστές προστασίας και safety factor (SF) για μετασχηματιστές μετρήσεως) και εκφράζει το συνολικό σφάλμα (μέτρο και γωνίας)

στον μετασχηματιστή εντάσεως που εγγυάται ο κατασκευαστής ότι θα είναι κάτω του 5% ή 10% ανάλογα με την κλάση ακριβείας 5P ή 10P (το 5% και 10% είναι ένας ονομαστικός συντελεστής υπερέντασης). Με άλλα λόγια, το ALF, είναι ένα πολλαπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος (χωρίς DC συνιστώσα), και σχετίζεται με την ικανότητα μετασχηματισμού ενός μετασχηματιστή εντάσεως σύμφωνα με την προκαθορισμένη κλάση ακριβείας και προκαθορισμένο φορτίο (με $\cos\varphi = 0.8$ ή 1.0) που ορίζει ο κατασκευαστής. Σε περίπτωση που το ρεύμα υπερβεί αυτή την προκαθορισμένη τιμή, ο μετασχηματιστής εντάσεως φτάνει στον κόρο με αποτέλεσμα το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή να εμφανίζει παραμόρφωση. Τυπικές τιμές για το ALF είναι 5-10-15-20-30.

Συνεπώς από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το φορτίο το οποίο συνδέεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως επηρεάζει σημαντικά τον παράγοντα ALF. Οπότε, σε περίπτωση που στο δευτερεύον του μετασχηματιστή το φορτίο αλλάξει πέραν από αυτό που ορίζει ο κατασκευαστής ο παράγοντας ALF θα αλλάξει σύμφωνα με την σχέση:

$$ALF' = ALF \times \frac{R_{ct} + R_B}{R_{ct} + R_B} \qquad \textbf{eq. 2-17}$$

Όπου:

R_{ct}: αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος

R_B: ονομαστική αντίσταση φορτίου που συνδέεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.

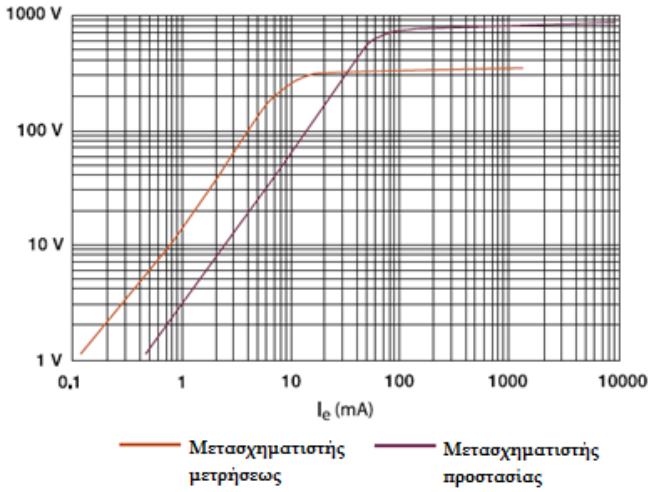
Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι σήμερα το φορτίο (Burden), που συνδέεται σε έναν μετασχηματιστή εντάσεως θεωρείται καθαρά ωμικό και με πολύ μικρότερη τιμή από ότι παλιά όπου γινόταν η χρήση ηλεκτρομαγνητικών ηλεκτρονόμων.

Ακόμα η εσωτερική ηλεκτρομαγνητική δύναμη (EMF, electromagnetic force), η οποία αναπτύσσεται όταν ο μετασχηματιστής εντάσεως όταν διαρρέεται από το I_{al} αντιστοιχεί στην τάση κορεσμού του μετασχηματιστή εντάσεως ή όπως θα δούμε πιο κάτω στην U_{KN}, και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$E_{al} = ALF \times I_S \times (R_{ct} + R_b) \qquad \textbf{eq. 2-18}$$

Όσο μεγαλύτερος είναι ο παράγοντας ALF, τόσο λιγότερη η πιθανότητα κορεσμού του μετασχηματιστή εντάσεως. Για παράδειγμα οι μετασχηματιστές προστασίας θα πρέπει να έχουν υψηλό σημείο κορεσμού έτσι ώστε να επιτρέπει στο σύστημα προστασίας μία σχετικά ακριβή μέτρηση του ρεύματος σφάλματος. Συνεπώς, αυτή η κατηγορία μετασχηματιστών διαθέτει υψηλό παράγοντα ALF.

Αντίθετα, οι μετασχηματιστές μετρήσεως, απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια για ρεύματα κοντά στο ονομαστικό. Και αυτό διότι τα όργανα μέτρησης στα οποία θα συνδεθεί ένας μετασχηματιστής εντάσεως δεν είναι απαραίτητο να αντέχουν τόσο υψηλά ρεύματα όπως αντέχουν οι ηλεκτρονόμοι προστασίας. Αυτός είναι ένας λόγος όπου οι μετασχηματιστές μετρήσεως εμφανίζουν μικρό παράγοντας ασφαλείας, (safety factor, SF) έτσι ώστε να εξασφαλίζουν ότι ο πυρήνας τους θα κορεστεί πολύ χαμηλά. Τα παραπάνω γίνονται κατανοητά και με το σχήμα που ακολουθεί, όπου απεικονίζει τυπικές καμπύλες μαγνήτισης για μετασχηματιστές προστασίας και μετασχηματιστές μετρήσεως.



Σχήμα 2.16 Καμπύλες μαγνήτισης για μετασχηματιστές προστασίας και μετασχηματιστές μετρήσεως

2.7.4 Κλάση ακριβείας (Accuracy class)

Η κλάση ακριβείας ορίζεται σαν το συνολικό σφάλμα (γωνίας και στον λόγο των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) κάτω από συγκεκριμένες τιμές ισχύος και ρεύματος. Ανάλογα με το πρότυπο που ακολουθεί ο κάθε κατασκευαστής αλλάζει ο τρόπος δήλωσης της κλάσης ακριβείας έτσι:

Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE C57.13 κατηγοριοποιεί τις κλάσεις ακριβείας ορίζοντας ένα γράμμα και την τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος.**[19]**

- **Class C:** Με το γράμμα C ορίζονται οι μετασχηματιστές εντάσεως οι οποίοι διαθέτουν πυρήνα με αμελητέα ροή σκέδασης. Κατά συνέπεια, η ακρίβεια αυτής της κατηγορίας μετασχηματιστών εντάσεως μπορεί να υπολογιστεί. Ειδικότερα αυτή η κατηγορία συναντάτε σε μετασχηματιστές εντάσεως με ένα πρωτεύον τύλιγμα ενώ το δευτερεύον τους τύλιγμα είναι κατανεμημένο γύρω από τον πυρήνα. Παράδειγμα τέτοιας κατηγορίας μετασχηματιστών εντάσεως είναι οι μετασχηματιστές εντάσεως τύπου παραθύρου ή μπάρας.
- **Class K:** Αποτελεί μία παρόμοια κατηγορία με την κλάση C, μόνο που σε αυτή την περίπτωση οι μετασχηματιστές εντάσεως διαθέτουν και μία τάση γόνατου (Knee-point voltage), αντιστοιχεί περίπου στο 70% της τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα.
- **Class T:** Με το γράμμα Τα, αναφέρονται όλοι οι μετασχηματιστές εντάσεως όπου η ροή σκέδασης επηρεάζει σημαντικά το συνολικό σφάλμα. Το συνολικό σφάλμα σε αυτή την περίπτωση ορίζεται μέσα από διάφορες δοκιμές. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά, οι κατασκευαστές δίνουν καμπύλες διέγερσης οι οποίες έχουν κατασκευαστεί μέσα από αυτές τις δοκιμές. Τυπικό παράδειγμα τέτοιων μετασχηματιστών εντάσεως είναι οι περιελικτικοί μετασχηματιστές.

Σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE C57.13, όπως προαναφέραμε η κλάση ακριβείας ορίζεται από ένα γράμμα, και έναν αριθμό. Αυτός ο αριθμός εκφράζει την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως που μπορεί να αναπτυχθεί για ρεύμα δευτερεύοντος 20 φορές του ονομαστικού ρεύματος στο

δευτερεύον χωρίς να ξεπεραστεί το όριο σφάλματος πάνω από 10%. Πράγμα το οποίο σημαίνει ότι αυτό το 10% στο σφάλμα δεν θα ξεπεραστεί για κανένα ρεύμα από 1 έως 20 φορές το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως και υπό ονομαστικό φορτίο (Burden), όπως περιγράφεται και από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$V_s = 20 \times I_s \times Z_B \qquad \textbf{eq. 2-19}$$

Για μετασχηματιστές εντάσεως που προορίζονται για προστασία, τα επίπεδα της τάσης είναι 100,200,400,800V και αντιστοιχούν στα καθορισμένα από το πρότυπο φορτία B-1,B-2,B-4,B-8 αντίστοιχα. Για παράδειγμα, η κατηγορία B-8 αντιστοιχεί σε μετασχηματιστή εντάσεως: $20 \times 5A \times 8\Omega = 800V$. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτά τα φορτία έχουν συντελεστή ισχύος 0,5 όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα:

Class C, σύμφωνα με το πρότυπο *C57.13*

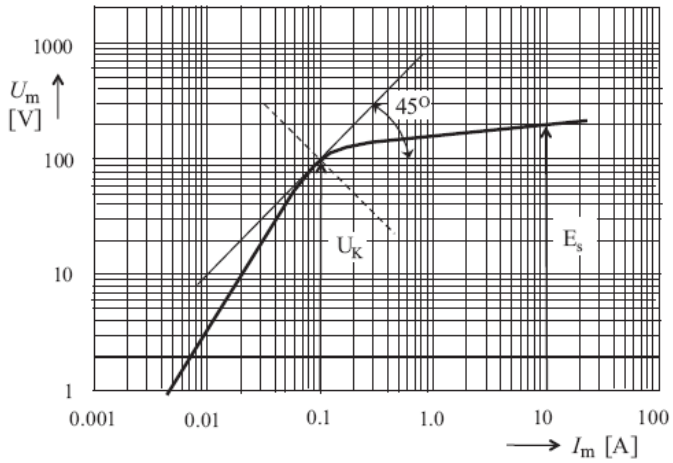
Όπως προαναφέρθηκε ,αυτή η κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως, διαστασιολογείται κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το συνολικό σφάλμα να μην ξεπερνά ένα ποσοστό του 10% σε μία περιοχή από το 1-20 φορές του ονομαστικού ρεύματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως. Επιπρόσθετα, πάντα μετά το γράμμα C της κλάσης ακολουθείται ένας αριθμός όπου δηλώνει την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως για ρεύμα 20 φορές του ονομαστικού ρεύματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή (για μετασχηματιστές εντάσεως με ονομαστικό ρεύμα στο δευτερεύον 5A)αλλά και κάτω από συγκεκριμένο φορτίο σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2-4 IEEE C57.13 Κλάσεις ακριβείας & τα αντίστοιχα φορτία για μετασχηματιστές προστασίας.

Ακρίβεια σύμφωνα με το IEEE	Κατηγορία	R(Ω)	L(mH)	Z (Ω)	S(VA) για Μ/Σ 5A	Power factor
C100,T100	B-1	0.5	2.300	1.0	25.0	0.5
C200,T200	B-2	1.00	4.600	2.0	50.0	0.5
C400,T400	B-4	2.00	9.200	4.0	100.0	0.5
C800,T800	B-8	4.00	18.400	8.0	200.0	0.5

Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι σύμφωνα με το πρότυπο της ANSI/IEEE C57.13 τα ονομαστικά φορτία καθορίζονται με γωνία 60^0. Για λόγους όμως ευκολίας στους υπολογισμούς, και με βάση τους σημερινούς ψηφιακούς ηλεκτρονόμους το φορτίο μπορεί να θεωρηθεί καθαρά ωμικό όπως έχει προαναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα. **[20]**

Ακόμα, το πρότυπο αυτό καθορίζει και την τάση στο γόνατο, knee-point voltage (U_K) σαν σημείο την καμπύλης διέγερσης, (σε λογαριθμική κλίμακα) όπου η εφαπτομένη της σχηματίζει γωνία 45^0 όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί. Αυτό το σημείο της τάσης Knee-point voltage (U_K) αντιστοιχεί περίπου στο 50% την τάσης κορεσμού του μετασχηματιστή (E_S).



Σχήμα 2.17 Καμπύλη μαγνήτισης μετασχηματιστή εντάσεως κλάσης C200, Rb=2Ω

Από την άλλη μεριά, σύμφωνα με το πρότυπο *IEC 61869-2-2012* (παλιό IEC 60044-1) ορίζονται δύο κλάσεις μετασχηματιστών εντάσεως σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί: **[21]**

Πίνακας 2-5 Κλάσεις των μετασχηματιστών εντάσεως σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61869-2

Accuracy Class	Σφάλμα ρεύματος κατά το ονομαστικό ρεύμα	Σφάλμα γωνίας (δ) στο ονομαστικό ρεύμα	Συνολικό σφάλμα στο accuracy limit current
5P (5PR)[1]	± 1 %	$\pm 60\ min$	± 5 %
10P(10PR)	± 3 %	-	± 10 %
PX	Αναφέρεται σε μετασχηματιστή εντάσεως με χαμηλή ροή σκέδασης η οποία ορίζεται από το knee-point voltage, το ρεύμα μαγνήτισης και το φορτίο (Burden)		

Στην πράξη οι διάφορες κλάσεις ακριβείας χρησιμοποιούνται ανάλογα με την εφαρμογή όπως:

- ***Class 5P:*** Σε διαφορική προστασία αλλά και προστασία αποστάσεως λόγω της μεγαλύτερης ακρίβειας.
- ***Class 10P:*** Τυπικά χρησιμοποιείται σε προστασία υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου σε δίκτυα διανομής.
- ***Class PR:*** Σύμφωνα με το πρότυπο *IEC 61869-2-2012*), η PR κλάση αποτελεί μία καινούργια κατηγορία η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα με σκοπό να αποφύγει τον κορεσμό των μετασχηματιστών εντάσεως εξαιτίας παραμένουσας μαγνήτισης όπως συμβαίνει στην κατηγορία των μετασχηματιστών της κατηγορίας P-class.
- ***Class PX:*** χρησιμοποιείται κυρίως σε υψηλής εμπέδησης διαφορική προστασία (high impedance differential protection).

Παρακάτω γίνεται μία σύγκριση όσον αφορά τις απαιτήσεις για ακρίβεια ανάλογα με την χρήση των μετασχηματιστών εντάσεως.

[1] Η κατηγορία 5PR,10PR αναφέρεται σε μετασχηματιστές με πυρήνα χαμηλού παραμένοντος μαγνητισμού(παράγοντας μαγνήτισης $K_r \leq 10\%$

1) **Για μετασχηματιστές μετρήσεως:** Σε αυτή την περίπτωση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως συνδέονται όργανα μέτρησης ενεργού και άεργου ισχύος ή ακόμα και μετρητές ενέργειας, που θα λειτουργήσουν κάτω από τις κανονικές ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση ο πυρήνας των μετασχηματιστών εντάσεως απαιτείται να έχει υψηλή ακρίβεια, χαμηλή εμπεδηση (burden), και χαμηλή τάση κορεσμού(saturation voltage). Τυπικές εύρος λειτουργίας αυτών των μετασχηματιστών εντάσεως είναι 5-120% του ονομαστικού ρεύματος ανάλογα με την κλάση ακριβείας που ορίζουν τα πρότυπα IEC, IEEE.

2) **Για μετασχηματιστές προστασίας:** όπου σε αυτή την περίπτωση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως συνδέονται διατάξεις και όργανα προστασίας, όπου θα πρέπει να ενεργήσουν γρήγορα και με ασφάλεια σε τυχόν διαταραχές. Συνεπώς είναι πολύ σημαντικό στο πώς μία διαταραχή που συμβαίνει στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, να απεικονιστεί σωστά στο δευτερεύον του. Κατά συνέπεια, αυτοί οι μετασχηματιστές εντάσεως θα πρέπει να διαθέτουν πυρήνα με τα εξής χαρακτηριστικά: χαμηλή ακρίβεια, αλλά μεγάλη ικανότητα μετασχηματισμού ενός ρεύματος σφάλματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, με σκοπό οι διατάξεις προστασίας που είναι συνδεδεμένες σε αυτή την πλευρά να επενεργήσουν και να κα γίνει εκκαθάριση του σφάλματος.

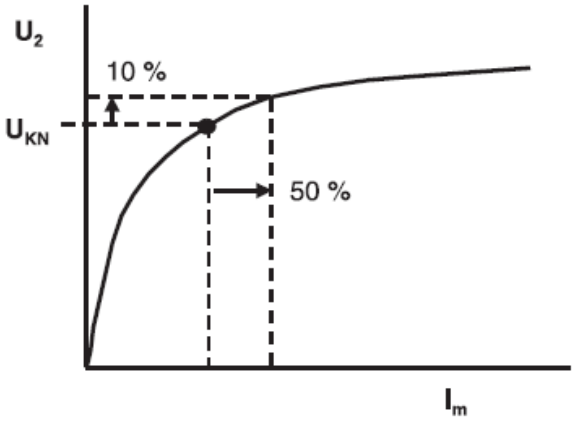
Class PX, σύμφωνα με το πρότυπο *IEC 61869-2-2012*

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60044-1 η κατηγορία Class PX χρησιμοποιείται στην Ευρώπη κυρίως σε εφαρμογές διαφορικής προστασίας. Η κατηγορία αυτή είχε καθοριστεί νωρίτερα σύμφωνα με το British standard BS3938 σαν κατηγορία Class X, αλλά αργότερα γύρω στο 2000 υιοθετήθηκε και μετονομάστηκε από το πρότυπο της IEC 60044-1 (και αργότερα από το αντίστοιχο *IEC 61869-2-2012*) σαν κατηγορία Class PX.

Για την διαστασιολόγηση αυτής της κατηγορίας μετασχηματιστών εντάσεως θα πρέπει να γνωρίζουμε τα ακόλουθα στοιχεία:

<u>*C.T ratio*</u>: Ο λόγος μεταξύ ρεύματος στο πρωτεύον και στο δευτερεύον του μετασχηματιστή $K_n = I_p/I_s$ π.χ 300/5 A.

<u>*Rated knee-point voltage (U_{KN}):*</u> Ορίζεται το σημείο εκείνο της καμπύλης μαγνήτισης όπου η αύξηση σε ποσοστό 10% στην τάση αντιστοιχεί σε αύξηση 50% στο ρεύμα μαγνήτισης.



Σχήμα 2.18 Καθορισμός του U_{KN} σε μετασχηματιστές εντάσεως Class PX

Ποιο απλά, η τάση αυτή καθορίζει την ικανότητα μετασχηματισμού (transformation capacity) χωρίς να ληφθεί υπόψη το ονομαστικό φορτίο στο δευτερεύον (Burden) ή η τιμή του I_{al}. Κατά συνέπεια η ακρίβεια θα μπορούσε να οριστεί λαμβάνοντας υπόψη την ηλεκτρομαγνητική δύναμη που αναπτύσσεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση:

$$\mathrm{U_{KN}} \approx 0.8 \times E_{al} \qquad \textbf{eq. 2-20}$$

Μέγιστο Ρεύμα μαγνήτισης (I_m max): Αποτελεί την μέγιστη τιμή του ρεύματος μαγνήτισης στο σημείο $\mathrm{U_{KN}}$

Τιμή της αντίστασης (R_{ct}): Ορίζεται σαν η μέγιστη τιμή της αντίστασης στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή εντάσεως προσδιορισμένη στους 75°C.

2.8 Μετασχηματιστές εντάσεως και μεταβατικά φαινόμενα.

Πολύ σημαντική ενότητα των μετασχηματιστών εντάσεως που συνεργάζονται με διατάξεις προστασίας αποτελεί η συμπεριφορά και η απόκριση τους σε μεταβατικά φαινόμενα. Σε αυτή την περίπτωση οι διατάξεις προστασίας θα πρέπει να λαμβάνουν ακριβής μετρήσεις από τους μετασχηματιστές εντάσεως, ακόμα και κατά την διάρκεια σφαλμάτων έτσι ώστε να αποφασίζεται η ταχύτατη απόκριση των συστημάτων προστασίας (ηλεκτρονόμοι σε συνεργασία με διακόπτες ισχύος), με σκοπό την απομόνωση και εκκαθάριση του σφάλματος. Σε αντίθετη περίπτωση η μη έγκαιρη εκκαθάριση ενός σφάλματος μπορεί να επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

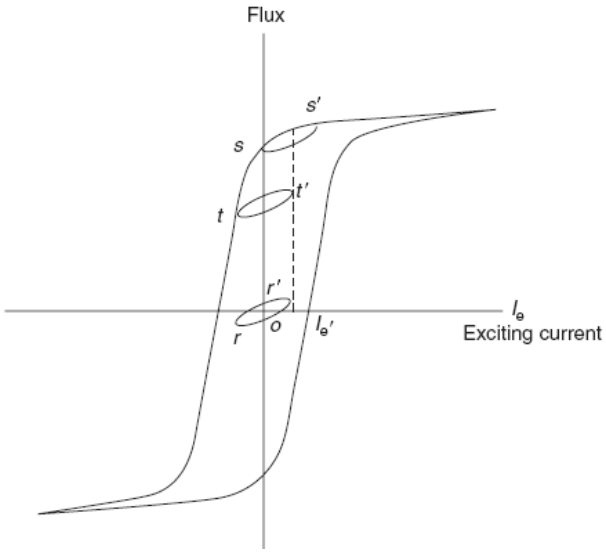
Με βάση τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι οι μετασχηματιστές εντάσεως οι οποίοι θα εκτίθενται σε μεταβατικά φαινόμενα θα πρέπει να πληρούν κάποια χαρακτηριστικά όσον αφορά το είδος του πυρήνα. Και αυτό διότι ο πυρήνας ενός τυπικού μετασχηματιστή εντάσεως, θα έφτανε γρήγορα σε κορεσμό κατά την διάρκεια τέτοιων φαινομένων εξαιτίας των υψηλών ρευμάτων σφάλματος αλλά και εξαιτίας του παραμένοντα μαγνητισμού.

2.8.1 Παραμένοντας μαγνητισμός στους μετασχηματιστές εντάσεως.

Παραμένουσα μαγνητική ροή στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή εντάσεως μπορεί να εμφανιστεί κατά την διάρκεια δοκιμών ή κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή μετά το πέρας ενός σφάλματος. Κατά την κανονική λειτουργία ενός μετασχηματιστή εντάσεως μπορεί να εμφανιστεί παραμένουσα μαγνητική ροή όταν το ρεύμα στο πρωτεύων του μετασχηματιστή διαταράσσεται την στιγμή πού η πυκνότητα της μαγνητικής ροής (B) στον πυρήνα είναι πολύ μεγάλη. Αυτή η κατάσταση μπορεί να συμβεί μετά και την εκκαθάριση ενός σφάλματος. Ακόμα μία άλλη περίπτωση που μπορεί να δημιουργήσει παραμένων μαγνητισμό στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή εντάσεως είναι κατά την διάρκεια ελέγχων και δοκιμών.**[22]**

Ποιο αναλυτικά, όταν ο μετασχηματιστής εντάσεως ενεργοποιείται για πρώτη φορά, η καμπύλη υστέρησης είναι συμμετρική, και η μεταβολή της μαγνητικής ροής στον πυρήνα ακολουθεί την διαδρομή rr᾽ όπως φαίνεται και στο *Σχήμα **2.19*** που ακολουθεί. Σε περίπτωση σφάλματος, το ρεύμα σφάλματος θα προκαλέσει αύξηση της μαγνητικής ροής. Κατά την εκκαθάριση του σφάλματος, το ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή μηδενίζεται ενώ η μαγνητική ροή στον πυρήνα δεν μηδενίζεται. Το μέγεθος αυτής της παραμένουσας μαγνητικής ροής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες με ποιο σημαντικούς το μέτρο του ρεύματος στο πρωτεύων του μετασχηματιστή, την εμπέδηση του φορτίου που συνδέεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, καθώς και τη σταθερά χρόνου του ισοδύναμου δικτυώματος RL, η οποία σχετίζεται και με την κατασκευή του πυρήνα (άν είναι πυρήνας με διάκενο αέρα όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα), και μπορεί να προκαλέσει αρκετά προβλήματα. Ένα από τα οποία είναι ο κορεσμός του μετασχηματιστή εντάσεως, και κατά συνέπεια η καθυστέρηση στην ενεργοποίηση συστημάτων προστασίας ιδίως σε περιπτώσεις ηλεκτρονόμων υπερεντάσεως ακαριαίου χρόνου, που συνεργάζονται με Breaker failure protection.**[23]**

Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι, η εκκαθάριση του σφάλματος αλλά και η καθυστέρηση του μηδενισμού του ρεύματος μαγνήτισης, αποτελούν καταστάσεις όπου δημιουργούν παραμένου στον πυρήνα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί ο παραμένων μαγνητισμός πλέον δεν ακολουθεί την πορεία rr᾽ αλλά μεταβαίνει στην ss᾽. Σε περίπτωση που ο μετασχηματιστής εντάσεως ενεργοποιηθεί εκ νέου μετά και την εκκαθάριση του σφάλματος, η μαγνητική ροή πλέον θα ακολουθήσει την πορεία tt᾽, και ως εκ τούτου κατά την διάρκεια αυτής της μεταβολής στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως θα εμφανιστεί ένα μικρό συνεχές ρεύμα, το μέγεθος του οποίου θα εξαρτηθεί από το φορτίο στο δευτερεύον καθώς και την σταθερά χρόνου.



Σχήμα 2.19 Καμπύλη υστέρησης με παραμένουσα μαγνήτιση σε μετασχηματιστή εντάσεως.

Συνεπώς πολύ σημαντική πληροφορία αποτελεί ο παράγοντας του παραμένοντος μαγνητισμού (K_r) όπου σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61868-2 δίνεται από τον τύπο:

$$K_r = 100\% \times \frac{\Psi_r}{\Psi_s} \qquad \textbf{eq. 2-21}$$

Όπου:

Ψ_r: παραμένουσα μαγνητική ροή

Ψ_s: Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής, όπου εμφανίζεται στον πυρήνα όταν επικρατούν συνθήκες μετάβασης από μη κορεσμένη περιοχή στην πλήρως κορεσμένη περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η παραμένουσα μαγνητική ροή αποτελεί σοβαρό κριτήριο για την αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων προστασίας διότι συνδέεται άμεσα με τον κορεσμό του πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως. Συνεπώς, κατά την διάρκεια σφαλμάτων αν η κατεύθυνση της παραμένουσας μαγνητικής ροής είναι αντίθετη με την DC-συνιστώσα του ρεύματος τότε στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως θα αναπαράγεται η κυματομορφή του ρεύματος χωρίς παραμορφώσεις. Αντιθέτως, αν η παραμένουσα μαγνητική ροή και η DC-συνιστώσα του ρεύματος έχουν την ίδια κατεύθυνση τότε το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως θα αναπαριστάτε παραμορφωμένο. Για την εξάλειψη αυτού του φαινομένου έχουν προταθεί διάφορες μεθόδους:

- Χρήση διαφορετικών επιπέδων σιδήρου για την κατασκευή του πυρήνα του μετασχηματιστή,
- Χρήση διάκενων στον πυρήνα του μετασχηματιστή,
- Biased core CTs **[24]**

2.8.2 Συμπεριφορά των μετασχηματιστών εντάσεως στην DC συνιστώσα.

Όπως είναι γνωστό από την θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυκλωμάτων οι μετασχηματιστές δεν λειτουργούν στο συνεχές ρεύμα. Έτσι, και η απόδοση τους επηρεάζεται σημαντικά από την DC συνιστώσα του ρεύματος. Κατά την διάρκεια ενός σφάλματος έχουμε μία μεταβολή στο ρεύμα του κυκλώματος η οποία εμπεριέχει και μία DC συνιστώσα η οποία δημιουργείται από δύο παραμέτρους:

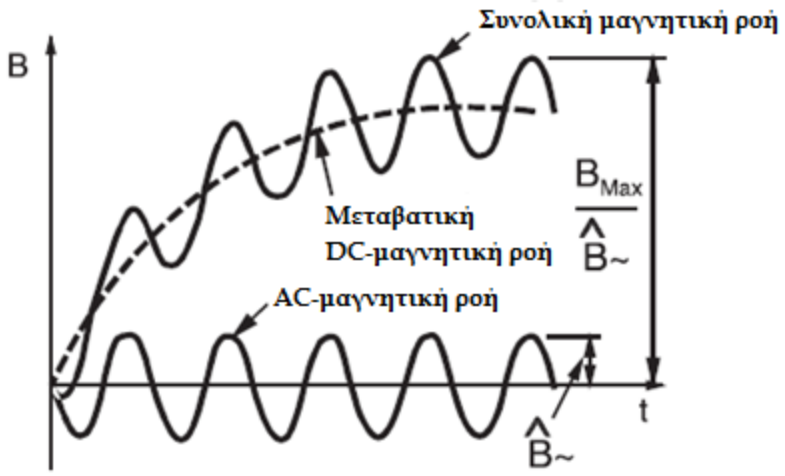
1) *Συμπεριφορά του δικτύου:* Κατά κανόνα το δίκτυο παρουσιάζει αρκετά μεγάλη επαγωγική συμπεριφορά, πράγμα που σημαίνει ότι το μέγιστο σημείο στην κυματομορφή του ρεύματος αντιστοιχεί στο σημείο που η κυματομορφή της τάσης περνά από το μηδέν.
2) *Συνθήκες σφάλματος :* Αυτό σημαίνει ότι το ακριβές ρεύμα σφάλματος θα επηρεαστεί από τις συνθήκες που επικράτησαν στο σημείο πριν το σφάλμα.

Συνεπώς κατά την διάρκεια ενός σφάλματος δημιουργείται μία DC συνιστώσα στο ρεύμα η οποία φθίνει σύμφωνα με την χρονική σταθερά του δικτύου T_N όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2.20 DC συνιστώσα στο ρεύμα σφάλματος

Αυτή η φθίνουσα μεταβατική DC συνιστώσα εμφανίζεται στον μετασχηματιστή εντάσεως ως ένα ρεύμα χαμηλής συχνότητας, και η παρουσία της μπορεί να οδηγήσει τον πυρήνα σε κορεσμό αλλοιώνοντας έτσι το ρεύμα που θα αναπαράγει ο μετασχηματιστής στο δευτερεύον του. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει ξεκάθαρα το μέγεθος αυτής της μεταβατικής DC συνιστώσας όπου όπως φαίνεται είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την AC μαγνητική ροή.



Σχήμα 2.21 Συσχέτιση DC μαγνητικής ροής με την AC μαγνητική ροή.

Σύμφωνα με το πρότυπο *IEC 61869-2* ο λόγος της συνολικής μαγνητικής ροής προς την μέγιστη τιμή της AC μαγνητικής ροής ορίζεται σαν παράγοντας μετάβασης ή κορεσμού (transient factor) K_{TF} σύμφωνα με την σχέση:

$$K_{TF} = \frac{B_{MAX}}{\hat{B}\sim} \qquad \textbf{eq. 2-22}$$

Αυτός ο παράγοντας αφορά μετασχηματιστές εντάσεως που υπόκεινται σε μεταβατικά φαινόμενα και που θα πρέπει να υπερ-διαστασιολογηθούν κατάλληλα (γίνεται ανάλυση σε επόμενη ενότητα).

Για ρεύμα σφάλματος με την μέγιστη DC συνιστώσα ισχύει ότι:

$$K_{TF} = \frac{\omega \times T_N \times T_S}{T_N - T_S} \times \left(e^{-\frac{t}{T_N}} - e^{-\frac{t}{T_S}} \right) - \sin(\omega \times t) \qquad \textbf{eq. 2-23}$$

Θέτοντας ως $\sin(\omega \times t) = -1$ η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$K_{TF} = \frac{\omega \times T_N \times T_S}{T_N - T_S} \times \left(e^{-\frac{t}{T_N}} - e^{-\frac{t}{T_S}} \right) \qquad \textbf{eq. 2-24}$$

Από την παραπάνω εξίσωση μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι ο παράγοντας μετάβασης (transient factor) επηρεάζετε από την χρονική σταθερά του δικτύου T_N αλλά και από την χρονική σταθερά του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εντάσεως.

Ωστόσο, μετά από χρόνο $t_{B\,MAX}$ επιτυγχάνεται η μέγιστη τιμή του K_{TF} περιγράφεται από την εξίσωση:

$$t_{B\,MAX} = \frac{T_N \times T_S}{T_S - T_N} \times \ln \frac{T_S}{T_N} \qquad \textbf{eq. 2-25}$$

$$K_{TF} = 1 + \omega \times T_S \left(\frac{T_N}{T_S}\right)^{\frac{T_S}{T_S - T_N}}$$ **eq. 2-26**

Ακόμα, η χρονική σταθερά του δικτύουT_N, εξαρτάται άμεσα από το λόγο X/R άρα:

$$T_N = \frac{1}{\omega} \times \frac{\sum X}{\sum R}$$ **eq. 2-27**

Και το T_S καθορίζεται από την επαγωγή του κλάδου μαγνήτισης καθώς και από το άθροισμα των αντιστάσεων στο δευτερεύον του μετασχηματιστή σύμφωνα με την εξίσωση:

$$T_S = \frac{L_m}{R_{ct} + R_b} = \frac{1}{\omega \times \tan \delta}$$ **eq. 2-28**

Από την παραπάνω εξίσωση μπορούμε να συμπεράνουμε ότι καθώς το σφάλμα γωνίας αυξάνεται, η χρονική σταθερά T_S μειώνεται.

Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι το σφάλμα γωνίας αντιστοιχεί σε μετασχηματιστές εντάσεως όπου στο δευτερεύον συνδέεται το ονομαστικό φορτίο σύμφωνα με αυτό που ορίζει ο κατασκευαστής ανάλογα με την κλάση ακριβείας. Στην περίπτωση όπου συνδέσουμε μικρότερο φορτίο, τότε το σφάλμα της γωνίας θα μειωθεί αντίστοιχα ενώ η χρονική σταθερά T_S θα αυξηθεί.

Επίσης, κατά την ανάλυση μεταβατικών καταστάσεων πρέπει να έχουμε υπόψη ότι η σταθερά χρόνου δεν είναι ίδια σε όλο το δίκτυο, και αυτό αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρος διότι ανάλογα με την θέση και τις συνθήκες του σφάλματος αλλάξει το ποσοστό της DC-συνιστώσας, και κατά συνέπεια και η σταθερά χρόνου. Αυτό αποτελεί ένα κρίσιμο στοιχείο για την επιλογή του πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως, διότι όπως θα δούμε και σε επόμενη ενότητα το ποσοστό της DC-συνιστώσας επηρεάζει το μέγεθος του παραμένοντος μαγνητισμού.**[25]**

Ενδεικτικά, αξίζει να σημειωθούν μερικές από τις περιπτώσεις όπου μπορεί να αναπτυχθεί DC-συνιστώσα σε ποσοστό έως και 100%.

- Όταν την στιγμή που συμβαίνει το σφάλμα, η κυματομορφή της τάσης περνάει από το μηδέν,
- Στην περίπτωση σφαλμάτων που γίνονται σε γειωμένα συστήματα τα οποία βρίσκονται κοντά σε σταθμούς παραγωγής,
- Σφάλματα που προκλήθηκαν λόγω άμεσης πτώσης κεραυνού μπορούν να δημιουργήσουν συνθήκες για εμφάνιση πλήρης DC-συνιστώσας.

Συνεπώς, από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε, ότι ο πυρήνας των μετασχηματιστών εντάσεως που μετρούν ρεύματα σφάλματος που εμπεριέχουν 100% DC-συνιστώσα, θα πρέπει να είναι κατάλληλα υπέρ-διαστασιολογημένος.

2.8.3 Κατηγορίες μετασχηματιστών εντάσεως για μεταβατικά φαινόμενα.

Σε προηγούμενη ενότητα, έγινε αναφορά στον ρόλο του παραμένοντα μαγνητισμού στους μετασχηματιστές εντάσεως και πώς αυτή η παράμετρος επηρεάζει σημαντικά την ορθή απόκριση των συστημάτων προστασίας. Με βάση λοιπόν την τιμή του παραμένοντα μαγνητισμού στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή εντάσεως, μπορούμε να διακρίνουμε τους εξής τύπους μετασχηματιστών εντάσεως:

- **Υψηλού παραμένοντα μαγνητισμού:**

  Σε αυτή την κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως δεν επιβάλλεται κάποιος περιορισμός όσον αφορά την ποσότητα του παραμένοντα μαγνητισμού. Κατασκευαστικά, αυτή η κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως διαθέτει πυρήνα χωρίς διάκενο αέρα, και κατά συνέπεια ο παραμένων μαγνητισμός όπου μπορεί να αγγίξει το 80% μπορεί να παραμείνει στον πυρήνα του μετασχηματιστή για απεριόριστο χρόνο. Τυπικό παράδειγμα τέτοιου είδους μετασχηματιστών εντάσεως αποτελούν οι κατηγορίες class P, PX,TPX σύμφωνα με το πρότυπο IEC ή διαφορετικά class C,T,X σύμφωνα με το πρότυπο ANSI/IEEE.

- **Χαμηλού παραμένοντα μαγνητισμού:**

  Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως, εδώ η τιμή του παραμένοντα μαγνητισμού επιβάλλεται να είναι μέσα σε προκαθορισμένα όρια. Σε αυτή την κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως, ο πυρήνας κατασκευάζεται έτσι ώστε να διαθέτει ένα μικρό διάκενο αέρα, έτσι ώστε να μειώνει το επίπεδο του παραμένοντα μαγνητισμού σε ποσοστό που δεν ξεπερνά το 10% της μαγνητικής ροής κορεσμού. Σε αυτή την κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως ανήκουν οι Class PR,TPY.

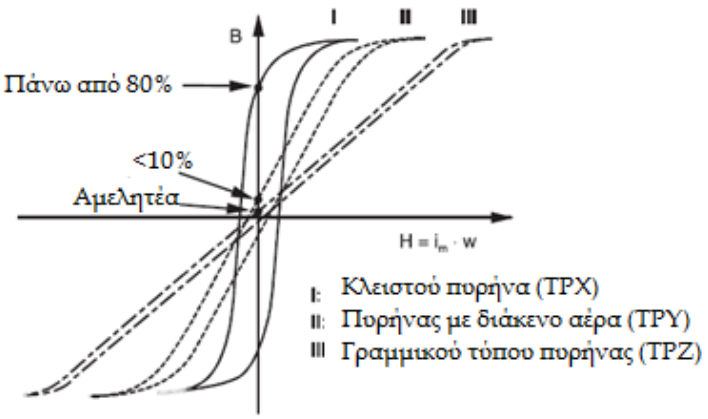
- **Μηδενικού παραμένοντα μαγνητισμού:**

  Ο παραμένων μαγνητισμός σε αυτή την κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως θεωρείται σχεδόν αμελητέος. Κατασκευαστικά ο πυρήνας αυτής της κατηγορίας μετασχηματιστών εντάσεως διαθέτει μεγάλα διάκενα αέρα, με σκοπό να μειώσουν το ποσοστό του παραμένοντα μανγητισμού κοντά στο μηδέν. Την ίδια στιγμή, το διάκενο αέρα μειώνει την επιρροή της DC-συνιστώσας στον μετασχηματιστή. Τυπικό παράδειγμα τέτοιου είδους μετασχηματιστών είναι η κατηγορία Class TPZ.

Class TP, σύμφωνα με το πρότυπο *IEC 61869-2-2012*

Παλιότερα όπως αναφέρθηκε η κατηγοριοποίηση των μετασχηματιστών εντάσεως γινόταν ανάλογα με τις αποκλίσεις των διαφόρων κλάσεως μετασχηματιστών εντάσεως στο σφάλμα γωνίας και στην ένταση του ρεύματος. Σήμερα, ο σχεδιασμός και η κατηγοριοποίηση των μετασχηματιστών εντάσεως γίνεται ποιο ακριβής βασιζόμενος σε μεταβατικά φαινόμενα και τις παραμέτρους τους, οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά την συμπεριφορά του πυρήνα τους. Για αυτό το σκοπό θα αναλυθούν δύο βασικά είδη πυρήνα που αναφέρθηκαν ποιο πάνω:

a) *Μετασχηματιστές εντάσεως κλειστού πυρήνα :* όπου μετασχηματίζει τις AC και DC συνιστώσες του ρεύματος μέσα στα προκαθορισμένα όρια με μεγάλη ακρίβεια. Όμως, από την άλλη μεριά ο παραμένων μαγνητισμός του πυρήνα είναι πολύ μεγάλος σε ποσοστό που φτάνει το 80% όπως φαίνεται και στο *Σχήμα **2.22*** που ακολουθεί.



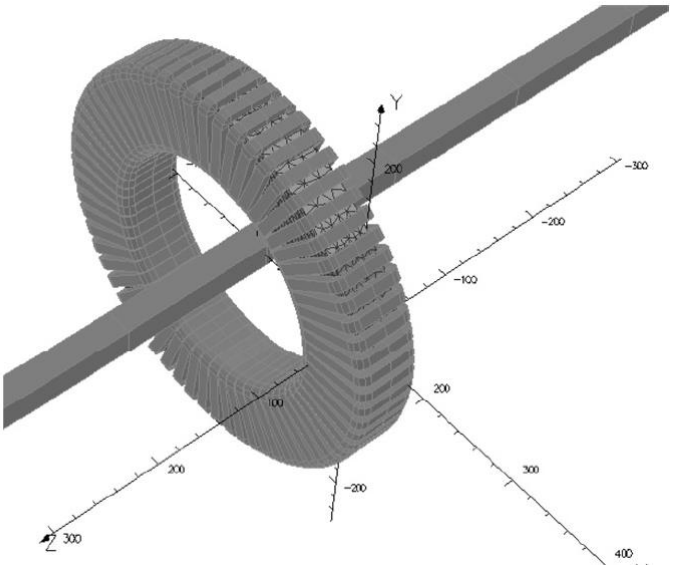
Σχήμα 2.22 Καμπύλες μαγνήτισης ανάλογα με το είδος του πυρήνα (Class TP)

Κατά συνέπεια μόνο με απομαγνήτιση του πυρήνα μπορεί να αφαιρεθεί αυτός ο παραμένων μαγνητισμός. Ειδικότερα σε εφαρμογές μετασχηματιστών εντάσεως που συνεργάζονται με διακόπτες αυτόματης επαναφοράς ένα κλείσιμο του διακόπτη σε μη κατάλληλη χρονική στιγμή μπορεί να διπλασιάσει την μαγνητική ροή στον πυρήνα επιφέροντας αρνητικά αποτελέσματα. Για αυτό ακριβώς το λόγο στα συστήματα προστασίας κυριαρχούν οι μετασχηματιστές εντάσεως της κατηγορίας Class P.

b) *Μετασχηματιστές εντάσεως με διάκενο στον πυρήνα :* Το διάκενο στον πυρήνα ενός μετασχηματισμού εντάσεως μπορεί να μειώσει σημαντικά την παραμένουσα μαγνητική ροή. Ενδεικτικά, αξίζει να σημειωθεί ότι μετασχηματιστές εντάσεως με διάκενο πυρήνα 0.0001-0.0003 p.u του μέσου μήκους μαγνητικού πυρήνα, μειώνουν πολύ σημαντικά την παραμένουσα μαγνητική ροή. Την ίδια στιγμή, ο χρόνος απομαγνητισμού του πυρήνα μειώνεται στο 1 sec ή και λιγότερο. Από την άλλη πλευρά μειονέκτημα των μετασχηματιστών εντάσεως με διάκενο στον πυρήνα είναι η αύξηση του σφάλματος στο μέτρο του ρεύματος **[26]**

Έτσι με βάση τα παραπάνω το πρότυπο *IEC 61869-2*, κατηγοριοποιεί τέσσερεις κλάσεις μετασχηματιστών σύμφωνα με την κατασκευή του πυρήνα σε:

- *Class TPS*: Μετασχηματιστής κλειστού πυρήνα με χαμηλή ροή σκέδασης (leakage reactance). Αυτός ο τύπος μετασχηματιστή εντάσεως καθορίζεται σύμφωνα με τα στοιχεία που μπορούμε να εξάγουμε από την καμπύλη μαγνήτισης και αφορούν την τάση κορεσμού (knee-point voltage), και το ρεύμα μαγνήτισης καθώς και την αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πράξη αυτή η κατηγορία μετασχηματιστή εντάσεως δεν χρησιμοποιείται συχνά. Αντίθετα, σύμφωνα με το πρότυπο *IEC 61869-2* η κατηγορία αυτή μετασχηματιστών εντάσεως έχει αντικατασταθεί από την κατηγορία Class PX.
- *Class TPX*: Μετασχηματιστής εντάσεως κατηγορίας κλειστού πυρήνα χωρίς περιορισμό στην παραμένουσα μαγνήτιση. Η κατασκευή αυτού του τύπου μετασχηματιστή εντάσεως είναι παρόμοια με την κατηγορία Class P.
- *Class TPY:* Μετασχηματιστής με διάκενο στον πυρήνα (air gap), όπου εξασφαλίζει ότι ο παραμένων μαγνητισμός θα είναι λιγότερος από 10%.
- *Class TPZ:* Σε αυτή την κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως ο πυρήνας εμφανίζει γραμμικά χαρακτηριστικά, και κατά συνέπεια η παραμένουσα μαγνητική ροή αμελείται. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται κατά τον σχεδιασμό του πυρήνα καθώς το μήκος και ο αριθμός των διάκενων παίζει σημαντικό ρόλο. Παράδειγμα τέτοιου είδους μετασχηματιστή εντάσεως με παραπάνω από ένα διάκενα απεικονίζεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.23 Μετασχηματιστής εντάσεως Class TPZ 1200/1 A [27]

Ο περιορισμός του σφάλματος σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περιγράφεται σύμφωνα με το πρότυπο *IEC 61869-2* από τον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2-6 Χαρακτηριστικά της κλάσης Class TP σύμφωνα με το IEC 61869-2

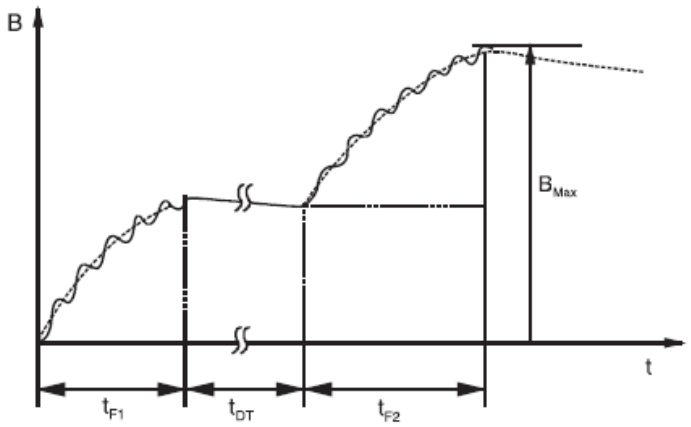
Class	Σφάλμα		Μέγιστο σφάλμα στο ALF
	Ποσοστό	Γωνία	
TPX	±0.5%	±30 min	$\hat{\varepsilon} \leq 10\%$
TPY	±1.0%	±60 min	$\hat{\varepsilon} \leq 10\%$
TPZ	±1.0%	±180 ή ±18min	$\hat{\varepsilon} \leq 10\%$ Όχι με DC συνιστώσα

2.8.4 Απομαγνητισμός του πυρήνα σε μετασχηματιστές εντάσεως.

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα ο παραμένων μαγνητισμός αποτελεί σημαντική παράμετρο για την ορθή λειτουργία των διατάξεων προστασίας. Έτσι κατά την διάρκεια ενός σφάλματος αναμένουμε την γρήγορη απόκριση των διακοπτικών μέσων έτσι ώστε να γίνει η έγκαιρη εκκαθάριση του σφάλματος προτού το σφάλμα επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα στον εξοπλισμό. Ακόμα πολύ σημαντική παράμετρος είναι ο χρόνος που θα μεσολαβήσει από την στιγμή όπου ένας διακόπτης ισχύος θα έρθει στην αρχική του κατάσταση. Αυτός ο χρόνος ο οποίος στην ξένη βιβλιογραφία αναφέρεται ως Dead Time(t_{DT}),αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που θα μεσολαβήσει έτσι ώστε να απομαγνητιστεί ο πυρήνας του μετασχηματιστή εντάσεως. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν ο διακόπτης ισχύος επανέλθει σε χρονική στιγμή όπου ο πυρήνας του μετασχηματιστή έχει παραμένοντα μαγνητισμό, η μαγνητική ροή στο κύκλωμα θα διπλασιαστεί και πιθανότατα ο μετασχηματιστής να φτάσει σε κόρο. Συνεπώς το μέγεθος της μαγνητικής ροής που θα αναπτυχθεί στον πυρήνα θα εξαρτηθεί από το χρονικό

διάστημα ηρεμίας του κυκλώματος (Dead Time), αλλά και από την σταθερά χρόνου του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εντάσεως. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει μία τέτοια περίπτωση.

Ποίο αναλυτικά όπως φαίνεται και στο σχήμα t_{F1} είναι το χρονικό διάστημα που συμβαίνει το σφάλμα σε ένα σύστημα. Το χρονικό διάστημα t_{DT} λαμβάνει χώρα από την στιγμή που ανοίγει ο διακόπτης ισχύος μέχρι να απομαγνητιστεί ο πυρήνας του μετασχηματιστή εντάσεως. Ενώ το χρονικό διάστημα t_{F2} αποτελεί το χρονικό διάστημα όπου ο διακόπτης ισχύος επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση και συμβαίνει ένα δεύτερο σφάλμα στο κύκλωμα (ή η μη σωστή εκκαθάριση του πρώτου σφάλματος). Όπως είναι φανερό και από το *Σχήμα **2.24*** παρατηρούμε ότι κατά την διάρκεια του δεύτερου σφάλματος η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως έχει φτάσει στην μέγιστη τιμή, εξαιτίας του παραμένοντα μαγνητισμού στον πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως.

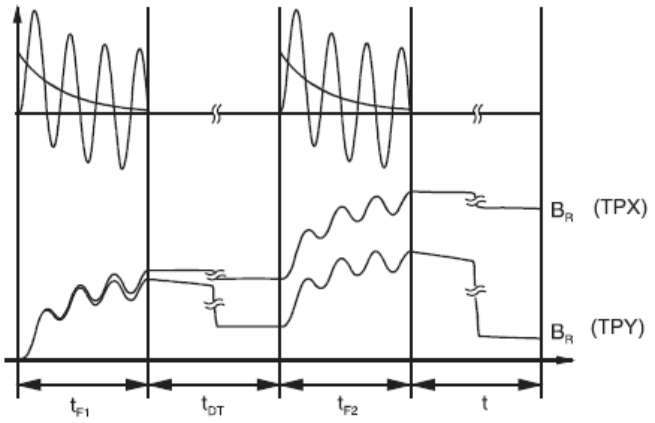


Σχήμα 2.24 Μεταβολή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής (B) σε μή απομαγνητισμένο πυρήνα[28]

Κατά συνέπεια για τη σωστή επιλογή πυρήνα μετασχηματιστή εντάσεως που προορίζεται για συνεργασία με όργανα προστασίας, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ένας παράγοντας διαστασιολόγησης K_{DT} όπου υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$K_{TD} = \frac{B_{max}}{\hat{B}\sim} \qquad \textbf{eq. 2-29}$$

Από την άλλη μεριά οι μετασχηματιστές εντάσεως όπου διαθέτουν πυρήνα με διάκενο, ο απομαγνητισμός του πυρήνα γίνεται σε πολύ μικρότερο χρόνο (περίπου σε 1sec ή και λιγότερο). Ωστόσο σημαντική παράμετρο στο χρόνο απομαγνήτισης του πυρήνα είναι το αν ο πυρήνας του μετασχηματιστή είναι υψηλού η μηδενικού παραμένοντα μαγνητισμού όπως φαίνεται και στο *Σχήμα **2.25***. Βέβαια όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, το διάκενο στον μετασχηματιστή εντάσεως δεν μείωσε σημαντικά την χρονική σταθερά του δευτερεύοντος (200-300ms), και από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι μετασχηματιστές εντάσεως της κατηγορίας Class TPY, κατά την διάρκεια του χρόνου ηρεμίας απομαγνητίζονται μερικώς.



Σχήμα 2.25 Μεταβολή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής (B) σε μετασχηματιστή Class TPX και TPY

Ωστόσο, η κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως κλάσης TPZ, όπου κατασκευαστικά διαθέτουν μεγάλα διάκενα στον πυρήνα εμφανίζουν τον μικρότερο χρόνο απομαγνητισμού του πυρήνα, περίπου 200 ms όταν η χρονική σταθερά του δευτερεύοντος είναι 60 ms. Δηλαδή, πριν εξαντληθεί το χρονικό περιθώριο του χρόνου ηρεμίας του πυρήνα η παραμένουσα μαγνητική ροή μηδενίζεται.

Συμπερασματικά σε αυτή την ενότητα εξετάσαμε σε βάθος την επίδραση της DC-συνιστώσας, καθώς και την σημασία της διαδικασίας απομαγνήτισης των μετασχηματιστών εντάσεως. Αυτή η διαδικασία αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο για την ορθή λειτουργία των συστημάτων προστασίας. Ακόμα μια άλλη εξίσου σημαντική παράμετρος που αφορά κυρίως την εγκατάσταση μετασχηματιστών εντάσεως σε συστήματα διαφορικής προστασίας είναι η ομοιότητα στα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών. Ποιο αναλυτικά, εάν σε μία εγκατάσταση διαφορικής προστασίας τοποθετηθούν μετασχηματιστές εντάσεως που δεν έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά (διαφορετικής κλάσης), κατά την διάρκεια ενός σφάλματος υπάρχει μεγάλη πιθανότητα λόγω διαφορετικής απόκρισης του πυρήνα στο μεταβατικό φαινόμενο, να ενεργοποιηθεί εσφαλμένα η διαφορική προστασία.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι με τους σημερινούς ψηφιακούς ηλεκτρονόμους, όπου χρησιμοποιούν ειδικούς αλγόριθμους και φίλτρα με σκοπό την απομάκρυνση της DC-συνιστώσας, η διαδικασία απομαγνητισμού δεν παίζει πολύ σημαντική παράμετρο.

2.8.5 Διαστασιολόγηση μετασχηματιστών εντάσεως για μεταβατικά φαινόμενα.

2.8.5.1 *Τάση κορεσμού U_{KN}*

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, κατά την διαστασιολόγηση ενός μετασχηματιστή εντάσεως είναι πολύ σημαντικό να καθορίσουμε την βέλτιστη τιμή της ονομαστικής τάσης στο γόνατο της καμπύλης μαγνήτισης, U_{KN}. Όπως έγινε κατανοητό, η λειτουργία του μετασχηματιστή εντάσεως πέραν αυτού του σημείου μπορεί να οδηγήσει τον μετασχηματιστή εντάσεως σε κορεσμό. Για την σωστή επιλογή του σημείου U_{KN}, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τρείς σημαντικούς παράγοντες **[29]**:

A. **Παράγοντας βραχυκύκλωσης (K_{SSC}) :** όπου ορίζεται ως το πηλίκο της ενεργού τιμής του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης στο πρωτεύον προς το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος όπως περιγράφεται και από την σχέση που ακολουθεί:

$$K_{SSC} = \frac{I_{psc}}{I_p} \quad \textbf{eq. 2-30}$$

B. Παράγοντας της παραμένουσας μαγνητικής ροής (K_r): Αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο κατά την διαστασιολόγηση των μετασχηματιστών εντάσεως, και για αυτό το λόγο αποτελεί μεγάλο κομμάτι επιστημονικών μελετών. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, ο αριθμός αλλά και το διάστημα των διάκενων σε ένα μετασχηματιστή εντάσεως επηρεάζουν άμεσα τον παράγοντα της παραμένουσας μαγνητικής ροής, η οποία βέβαια θα επηρεάσει σημαντικά και την υπερ-διαστασιολόγηση του μετασχηματιστή εντάσεως. Για αυτό το λόγο ορίζεται ένας παράγοντας υπερ-διαστασιολόγησης όπου βασίζεται στο ποσοστό του παραμένοντα μαγνητισμού στον πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως σύμφωνα με την σχέση:

$$K_{Rem} = \frac{1}{1 - K_r} \quad \textbf{eq. 2-31}$$

C. Παράγοντας κορεσμού (K_{TF}): Από την άλλη μεριά για τον υπολογισμό του παράγοντα κορεσμού η μετάβασης K_{TF} απαιτείται να λάβουμε υπόψη τέσσερεις παραμέτρους:

- *Χρονική σταθερά πρωτεύοντος(T_N):* Αποτελεί την χρονική σταθερά του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή αυτής της χρονικής σταθεράς δεν είναι ίδια σε όλο το δίκτυο αλλά μεταβάλλεται.

- *Χρονική σταθερά του δευτερεύοντος(T_S):* Η χρονική σταθερά του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εντάσεως καθορίζεται με βάση την μαγνητική επαγωγή του μετασχηματιστή εντάσεως καθώς και το άθροισμα των αντιστάσεων που συνδέονται στο δευτερεύον του.

$$T_S = \frac{L_m}{\sum R_{secondary}} \quad \textbf{eq. 2-32}$$

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

Πίνακας 2-7 Τυπικές τιμές χρονικής σταθεράς δευτερεύοντος ανά κατηγορία πυρήνα

Κατηγορία πυρήνα	T_S
TPX	5-20 (sec)
TPY	0.5-2(sec)
TPZ	~60 (msec)

- *Χρόνο κορεσμού (t)*
- *Συχνότητα του συστήματος*

Αυτές οι τέσσερεις παράμετροι που αναφέρθηκαν ποίο πάνω επηρεάζουν σημαντικά τον υπολογισμό την τάσης κορεσμού U_{KN} ιδίως σε περιπτώσεις διαστασιολόγησης μετασχηματιστών εντάσεως που προορίζονται για συνεργασία με συστήματα προστασίας. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι για την κατάλληλη και ασφαλή διαστασιολόγηση μετασχηματιστών εντάσεως, οι κατασκευαστές δίνουν ειδικές προδιαγραφές ανάλογα με την εφαρμογή. Κατά συνέπεια οι κατασκευαστικές εταιρείες μετασχηματιστών εντάσεως δίδουν στα τεχνικά φυλλάδια είτε τον ελάχιστο παράγοντα μετάβασης K_{TD} είτε την τάση

κορεσμού U_{KN} (knee point voltage), με βάσει ένα μέγιστο εξωτερικό σφάλμα και έναν ελάχιστο χρόνο κορεσμού από την έναρξη του σφάλματος.

2.8.5.2 *Θέση του σφάλματος*

Γενικά η τιμή της χρονικής σταθεράς του δευτερεύοντος κατά την διάρκεια ενός μεταβατικού φαινομένου εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από την θέση του σφάλματος, διότι αλλάζει η εμπέδηση. Ενδεικτικά αξίζει να αναφέρουμε ότι η χρονική σταθερά του σφάλματος σε θέση όπου είναι κοντά μετασχηματιστές ή γεννήτριες και σε επίπεδα υψηλής τάσης (EHV=230 kV), είναι πολύ μεγάλη πράγμα το οποίο οδηγεί στον υπολογισμό της τιμής του $K_{TF} = 30$. Αυτό κατά συνέπεια θα αυξήσει την διαστασιολόγηση αλλά και το κόστος του πυρήνα του μετασχηματιστή εντάσεως. Η υπερ-διαστασιολόγηση αυτή θα αποτρέψει την χρήση τέτοιων μετασχηματιστών εντάσεως σε εφαρμογές όπου απαιτείται να βρίσκονται έγκλειστοι (π.χ GIS)

2.8.5.3 *Ονομαστικό φορτίο στο δευτερεύον(R_b)*

Γενικά, οι μετασχηματιστές εντάσεως όπου πρόκειται να αντιμετωπίσουν μεταβατικά φαινόμενα, θα πρέπει να διαθέτουν μία χαμηλή αντίσταση στο δευτερεύον τους. Κατά συνέπεια η ισχύς του φορτίου (burden) που πρόκειται να συνδεθεί στο δευτερεύον του μετασχηματιστή τυπικά πρέπει να κυμαίνεται από 5-10VA, θεωρώντας το φορτίο καθαρά ωμικό ($\cos\varphi = 1$).

Τυπικές τιμές του ονομαστικού φορτίου στο δευτερεύον του μετασχηματιστή για την κατηγορία μετασχηματιστών εντάσεως Class TP, είναι 2.5,5,7.5,10,15 ohm.

2.9 Μετασχηματιστές εντάσεως σε διάφορες εφαρμογές προστασίας.

Όπως είναι γνωστό οι διάφοροι ηλεκτρονόμοι που εγκαθίστανται στο δίκτυο έχουν σαν σκοπό την προστασία διαφόρων συστημάτων του δικτύου όπως γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς κ.α. Κατά συνέπεια, κάθε μέρος του δικτύου εμφανίζει διαφορετικές ανάγκες για προστασία.

Μία από τις ποιο σημαντικές παραμέτρους που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό της προστασίας ενός δικτύου, είναι η επιλογή των κατάλληλων μετασχηματιστών εντάσεως ανάλογα με ο είδος της προστασίας. Έτσι ανάλογα με το είδος της προστασίας καθορίζεται:

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

Σε προηγούμενη ενότητα, έγινε ανάλυση του παράγοντα ακριβείας σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα τα οποία καθορίζουν την ακρίβεια κάτω από συγκεκριμένο φορτίο (burden), στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως. Σε περίπτωση που το φορτίο αλλάξει τότε θα πρέπει να προσαρμόσουμε τον παράγοντα ακριβείας στο νέο, πραγματικό φορτίο σύμφωνα με την σχέση:

$$ALF' = ALF \times \frac{R_{ct} + R_B}{R_{ct} + R_B} \qquad \textbf{eq. 2-33}$$

Όπου:

R_{ct}: αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος

R_B: ονομαστική αντίσταση φορτίου που συνδέεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.

Για παράδειγμα μία περίπτωση που αλλάζει το φορτίο σε έναν μετασχηματιστή εντάσεως αποτελεί και η θέση εγκατάστασης του μετασχηματιστή εντάσεως. Και αυτό διότι η εμπέδηση του αγωγού σύνδεσης μεταξύ μετασχηματιστή εντάσεως αλλάζει σημαντικά.

Από τα παραπάνω μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι ανάλογα με το είδος της προστασίας αλλάξουν και οι προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν οι μετασχηματιστές εντάσεως.

2.9.1 Προστασία υπερέντασης καθορισμένου χρόνου (Definite overcurrent protection)

Αποτελεί ένα είδος προστασίας που δρα ακαριαία χωρίς κάποια 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 εξασφαλίσουμε ότι ο μετασχηματιστής εντάσεως δεν θα επηρεάσει την ακρίβεια απόκρισης της προστασίας, θα πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι η μέγιστη τιμή του ρεύματος σφάλματος δεν υπερβαίνει το σημείο κορεσμού που εμείς έχουμε ορίσει για τον μετασχηματιστή εντάσεως.

Κατά συνέπεια ο παράγοντας ALF' ορίζεται από τον παρακάτω τύπο λαμβάνοντας υπόψη και ένα συντελεστή ασφαλείας 2 :

$$ALF' \geq 2 \times \frac{I_{setting}}{I_p} \quad \textbf{eq. 2-34}$$

Όπου:

$I_{setting}$: Ρύθμιση προστασίας του ηλεκτρονόμου (threshold)

I_p: Ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή εντάσεως.

Σε περίπτωση όπου έχουμε ορίσει το όριο του ηλεκτρονόμου ως:

$$I_{setting} = 10 \times I_{p(CT)} \Rightarrow \quad \textbf{eq. 2-35}$$

$$ALF' \geq 20 \quad \textbf{eq. 2-36}$$

2.9.1.1 Προστασία υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου (inverse time overcurrent protection).

Σε αυτή την περίπτωση δεν μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε την επιρροή του DC- κορεσμού καθώς η προστασία θα ενεργοποιηθεί αρκετούς κύκλους μετά και αφού ο μετασχηματιστής εντάσεως φτάσει σε κορεσμό. Όμως ο AC-κορεσμός είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την ορθή λειτουργία της προστασίας υπερεντάσεως αντιστρόφου χρόνου και για αυτό το λόγο η τάση που θα αναπτυχθεί στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:**[30]**

$$V_k > I_{sc} \times (R_{ct} + R_B + R_L)$$ **eq. 2-37**

Όπου:

I_{sc}: Ρεύμα σφάλματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως

R_L: Ωμική αντίσταση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως

Ακόμα, αν μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε την ακρίβεια του ηλεκτρονόμου σε όλη την περιοχή λειτουργίας του θα πρέπει να γνωρίζουμε σε ποιο σημείο η καμπύλη λειτουργίας του γίνεται από αντιστρόφου χρόνου ακαριαίου. Για τους περισσότερους ηλεκτρονόμους αυτό το σημείο αντιστοιχεί περίπου μεταξύ 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 ένα ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας που μπορεί να πάρει τιμή ανάμεσα:

$$ALF'_{min} = 30 \times \frac{I_{sc}}{I_{p(CT)}},$$ **eq. 2-38**

$$ALF'_{min} = 36,$$ **eq. 2-39**

$$ALF'_{min} = 1.5 \times \frac{I_{sc\,max}}{I_{p\,(CT)}}$$ **eq. 2-40**

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι ο ελάχιστος παράγοντας ακριβείας εξαρτάται από:

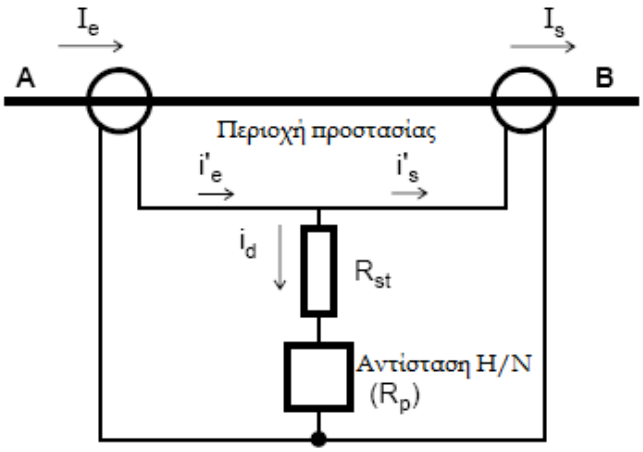
- Το ρεύμα ρύθμισης της προστασίας
- Τον τύπο του ηλεκτρονόμου (ακαριαίου, αντιστρόφου χρόνου)
- Μέγιστο ρεύμα σφάλματος

2.9.2 Προστασία αποστάσεως

Χρήση αυτού του είδους προστασίας κυρίως σε γραμμές μεταφοράς. Σε αυτή την περίπτωση, σημαντική παράμετρος είναι ο κορεσμός λόγω μεταβατικών φαινομένων (DC-κορεσμός). Καθώς ένα σύστημα προστασίας είναι χωρισμένο σε ζώνες προστασίας οι οποίες διαφέρουν ως προς τον χρόνο απόκρισης τους, ο κορεσμός επιτρέπεται μετά και την λειτουργία της πρώτης ζώνης προστασίας(Zone-1). Στις επόμενες ζώνες προστασίας, οι ηλεκτρονόμοι ρυθμίζονται με χρονική καθυστέρηση, έτσι ώστε η επαναλειτουργία του τμήματος που έχει τεθεί εκτός λειτουργίας εξαιτίας κάποιου σφάλματος να γίνει μετά την απόσβεση της DC συνιστώσας.

2.9.3 Διαφορική προστασία υψηλής εμπέδησης (High impedance differential protection)

Αυτού του είδους προστασίας χρησιμοποιείται συνήθως για προστασία κινητήρων, γεννητριών, ζυγών καθώς και για σφάλματα γής σε μετασχηματιστές ισχύος (restricted earth fault). Γενικά αυτή η κατηγορία διαφορικής προστασίας εφαρμόζεται σε περιοχές με ίδιο επίπεδο τάσεως. Σε κανονικές συνθήκες τα ρεύματα που εισέρχονται μεταξύ της ζώνης προστασίας είναι περίπου ίδια με τα ρεύματα που εξέρχονται από αυτή. Στην περίπτωση όμως που συμβεί ένα σφάλμα εκτός της προστατευόμενης ζώνης, μπορεί να κορεστεί ο ένας από τους δύο μετασχηματιστές εντάσεως δίνοντας λανθασμένες εντολές στον ηλεκτρονόμο. Η σταθερότητα αυτής της προστασίας επιτυγχάνεται με την προσθήκη μίας αντίστασης R_{ST} όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.26 Διαφορική προστασία υψηλής εμπέδησης

Η αντίσταση R_{ST} παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ευσταθή λειτουργία αυτής της προστασίας καθώς σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το ρεύμα το οποίο τροφοδοτεί τον ηλεκτρονόμο να μην φτάνει το όριο ρύθμισης του, ακόμα και μετά τον κορεσμό του ενός από τους δύο μετασχηματιστές εντάσεως εξαιτίας DC-συνιστώσας. Κατά συνέπεια εδώ εξετάζεται με προσοχή το μέγιστο εξωτερικό σφάλμα (εκτός περιοχής προστασίας) που μπορεί να αναπτυχθεί.

Συνεπώς λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω θα πρέπει η τάση που θα αναπτυχθεί στο δευτερεύον του μετασχηματιστή που είναι ουσιαστικά η τάση επί του ισοδυνάμου του πυρήνα (τάση κορεσμού), να είναι

$$V_k \geq 2 \times I_{sc\,MAX} \times (R_{ct} + R_P) \qquad \textbf{eq. 2-41}$$

Από την παραπάνω εξίσωση αλλά και από την διάταξη της διαφορικής προστασίας υψηλής εμπέδησης, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μεγάλη τιμή της αντίστασης R_{ST} μπορεί να δημιουργήσει σημαντική υπέρταση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως.

Κατά συνέπεια σε εφαρμογές διαφορικής προστασίας υψηλής εμπέδησης επιδιώκουμε οι μετασχηματιστές εντάσεως:

- Να είναι ίδιου τύπου και με ίδιο λόγο ρευμάτων (CTratio),
- Να διαθέτουν μικρή τάση κορεσμού
- Ίδια μέγιστη αντίσταση R_{ST}

2.9.4 Διαφορική προστασία χαμηλής εμπέδησης (Low impedance differencial protection)

Χρήση αυτής της κατηγορίας διαφορικής προστασίας σε διαφορική προστασία ζυγών. Οικονομικά αποτελεί μία πολύ ακριβή προστασία η οποία απαιτεί και μεγάλη περιοχή εγκατάστασης καθώς απαιτεί μεγάλο αριθμό μετασχηματιστών εντάσεως.

Σε αυτή την περίπτωση οι μετασχηματιστές εντάσεως:

- Μπορούν να διαφέρουν ως προς τον λόγο των ρευμάτων (CT ratio).
- Συνήθως επιλέγονται μετασχηματιστές εντάσεως Class X
- Οι απαιτήσεις της τάσης γονάτου είναι λιγότερο αυστηρές από ότι στην διαφορική προστασία υψηλής εμπέδησης.

2.9.5 Ποσοστιαία διαφορική προστασία (Percentage differential protection)

Η ονομασία ποσοστιαία προκύπτει εξαιτίας του γεγονότος ότι το όριο λειτουργίας της προστασίας δεν είναι σταθερό αλλά αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος εκτός περιοχής προστασίας. Σε αυτή της περίπτωση:

- Χρήση μετασχηματιστών εντάσεως Class X.
- Επιβάλλεται η ελάχιστη τάση γονάτου η οποία εξαρτάται από την αντίσταση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εντάσεωςR_{ct} και από την πραγματική ωμική αντίσταση του φορτίου R_L

Η ελάχιστη τάση γονάτου εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V_{k\,min} = A \times I_{TRF} \times (R_{ct} + 2 \times R_L) \qquad \textbf{eq. 2-42}$$

Όπου :

Α: σταθερά εξαρτάται από την ισχύ του μετασχηματιστή ισχύος

I_{TRF}: Το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή ισχύος από την πλευρά του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εντάσεως

$2 \times R_L$: Συνολική αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος.

Σε αυτή την περίπτωση, αξίζει να σημειωθεί ότι πολύ κατασκευαστές λαμβάνουν υπόψη το ρεύμα σφάλματος που μπορεί να συμβεί εκτός ζώνης προστασίας και για αυτό το λόγο ορίζουν την τάση γονάτου σύμφωνα με την πλευρά του μετασχηματιστή που έχει συμβεί ένα σφάλμα εκτός ζώνης:

Σφάλμα στην πλευρά του αστέρα του μετασχηματιστή ισχύος:

$$V_k \geq \frac{4 \times I_{sc}}{\sqrt{3}} \times (R_{ct} + 3 \times (R_L + R_P)) \qquad \textbf{eq. 2-43}$$

Σφάλμα στην πλευρά του τριγώνου του μετασχηματιστή ισχύος:

$$V_k \geq 4 \times I_{sc} \times (R_{ct} + 2 \times R_L + R_P) \qquad \textbf{eq. 2-44}$$

Κεφάλαιο 3

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

3 Εισαγωγή:

Ο μετασχηματιστής ισχύος αποτελεί ένα από τα ποιο σημαντικά και ποιο ακριβά εξαρτήματα που απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε). Μέσω των μετασχηματιστών ισχύος μπορούμε και επιτυγχάνουμε ανύψωση της τάσης στους σταθμούς παραγωγής έτσι ώστε να επιτύχουμε μία οικονομικότερη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, αφού μέσω της αύξησης της τάσης επιτυγχάνουμε μείωση του ρεύματος και κατά συνέπεια μείωση της διατομής των αγωγών που χρησιμοποιούνται για αυτή την περίπτωση. Ακόμα, όπως είναι γνωστό στους υποσταθμούς μέσης τάσης συνηθίζεται η εγκατάσταση δύο μετασχηματιστών ισχύος κυρίως για λόγους ασφαλείας. Η περίπτωση σφάλματος η ακόμα και απώλεια του ενός εκ των δύο μετασχηματιστών ισχύος μπορεί να επιφέρει δυσμενείς συνέπειες. Και αυτό διότι ο δεύτερος μετασχηματιστής υποχρεούται να αναλάβει εξ' ολοκλήρου να εξυπηρετήσει το φορτίο, ενέργεια η οποία οδηγεί στην υπερφόρτιση του. Γενικότερα αυτό αποτελεί πολύ σημαντικό πρόβλημα διότι σε έναν υποσταθμό μέσης τάσης με δύο παράλληλους μετασχηματιστές, επιθυμούμε η φόρτιση των μετασχηματιστών να είναι σχεδόν όμοια, κυρίως για λόγους γήρανσης της μόνωσης. Συνεπώς, από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι παρατεταμένη φόρτιση του δεύτερου μετασχηματιστή μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην απώλεια του. Από την άλλη πλευρά, ο μεγάλος χρόνος αντικατάστασης αλλά και το τεράστιο κόστος μεταφοράς ενός μετασχηματιστή ισχύος αποτελούν δύο σημαντικές παραμέτρους που πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη. Συνεπώς, από τα παραπάνω μπορούμε να κατανοήσουμε ότι η μελέτη της προστασία του μετασχηματιστή ισχύος αποτελεί ένα κρίσιμο κομμάτι για την ορθή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1 Σφάλματα και αντικανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Είναι σημαντικό για ένα σύστημα προστασίας να ανιχνεύει και να αναγνωρίζει τις καταστάσεις σφάλματος αλλά και τις αντικανονικές συνθήκες που μπορούν να εμφανιστούν έτσι ώστε να ενεργεί κατάλληλα σύμφωνα με τις προκαθορισμένες ρυθμίσεις.

3.1.1 Αντικανονικές συνθήκες λειτουργίας (Abnormal conditions)

Καταστάσεις οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν ως αντικανονικές αποτελούν οι υπερτάσεις οι υπερφορτίσεις και η υπερδιέγερση.

Ποίο αναλυτικά:

3.1.1.1 Υπέρταση (overvoltage)

Μεταβατικές υπερτάσεις, διακοπτικές υπερτάσεις αλλά και οι προσωρινές υπερτάσεις αποτελούν τρείς από τις ποιο σημαντικές καταστάσεις υπέρτασης οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό των συστημάτων προστασίας, καθώς μπορούν να επιφέρουν καταστροφή του εξοπλισμού σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ποιο αναλυτικά, μεταβατικές υπερτάσεις μπορεί να προκληθούν εξαιτίας πτώσης κεραυνού σε κάποιο σημείο του συστήματος. Τέτοιου είδους υπερτάσεις μπορεί να δημιουργήσουν σφάλματα μεταξύ των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή (turn-to-turn faults). Για την εξάλειψη αυτού του φαινομένου, εγκαθίστανται απαγωγοί υπερτάσεως (surge arresters), κοντά στους μονωτήρες διέλευσης του μετασχηματιστή. Διακοπτικές υπερτάσεις μπορούν να προκληθούν εξαιτίας κάποιων χειρισμών στα διακοπτικά συστήματα. Ενώ προσωρινές υπερτάσεις μπορεί να προκληθούν εξαιτίας μεταβολής του φορτίου (power frequency overvoltage). Αυτές οι αλλαγές έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της διηλεκτρικής καταπόνησης στην μόνωση και κατά συνέπεια αύξηση της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή.

3.1.1.2 Υπερφόρτιση (overload)

Η υπερφόρτιση ενός μετασχηματιστή ισχύος αποτελεί μία πολύ σημαντική κατάσταση καθώς προκαλεί αύξηση των απωλειών χαλκού, και κατά συνέπεια αύξηση της θερμοκρασίας στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Γενικά υπάρχει ένα χρονικό όριο στο οποίο επιτρέπεται να υπερφορτιστεί ένας μετασχηματιστής ισχύος χωρίς καταστροφή της μόνωσης τους. Το χρονικό όριο αυτό εξαρτάται από την αρχική θερμοκρασία αλλά και από το σύστημα ψύξης του μετασχηματιστή. Αναφερόμενοι στην αρχική θερμοκρασία, θα πρέπει να εξεταστεί η περίπτωση να έχει προηγηθεί μία υπερφόρτιση η οποία οδήγησε σε αύξηση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή και μετά από σύντομο χρονικό διάστημα να ακολούθησε και επόμενη υπερφόρτιση. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα ψύξης δεν θα έχει προλάβει να επαναφέρει στα επιθυμητά όρια την εσωτερική θερμοκρασία του μετασχηματιστή επιφέροντας προβλήματα στην μόνωση των τυλιγμάτων.

3.1.1.3 Υπερδιέγερση (overexcitation)

Ο πυρήνας ενός μετασχηματιστή φτάνει σε υπερδιέγερση στην περίπτωση που η εφαρμοζόμενη σε αυτόν τάση είναι πολύ μεγάλη ή στην περίπτωση που η συχνότητα λειτουργίας είναι πολύ μικρή. Η υπερδιέγερση σε έναν μετασχηματιστή προκαλεί αύξηση των απωλειών σιδήρου, και κατά συνέπεια, σε αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης. Ακόμα, κατά την υπερδιέγερση εμφανίζεται αυξημένη ροή σκέδασης από τον πυρήνα προς τα μεταλλικά μέρη και τοιχώματα του μετασχηματιστή. Γενικά, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, τα μεταλλικά μέρη ενός μετασχηματιστή λαμβάνουν μικρή ποσότητα μαγνητικής ροής. Κατά συνέπεια, αυτή η σημαντικά αυξημένη ποσότητα της μαγνητικής ροής από τον πυρήνα προς τα μεταλλικά μέρη του μετασχηματιστή θα επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή η οποία θα προκαλέσει καταστροφή της μόνωσης στις σπείρες των τυλιγμάτων του.

3.1.2 Εξωτερικά σφάλματα (External faults)

Σε πολλές περιπτώσεις η προστασία των μετασχηματιστών ισχύος καλύπτει και τις ανάγκες προστασίας των ζυγών που τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής. Έτσι υπάρχουν περιπτώσεις ότι η προστασία του μετασχηματιστή αποτελεί κύρια ή δευτερεύουσα προστασία (back-up) του ζυγού ή κάποιας γραμμής μεταφοράς. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα προστασίας θα πρέπει να διακρίνει ποια σφάλματα αφορούν τον μετασχηματιστή και ποια σφάλματα αφορούν τον ζυγό.

Περίπτωση εξωτερικών σφαλμάτων είναι τα βραχυκυκλώματα. Τα βραχυκυκλώματα αποτελούν μία από τις ποιο κρίσιμες καταστάσεις που μπορούν να συμβούν σε έναν μετασχηματιστή, διότι μπορούν να προκαλέσουν αύξηση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή και των απωλειών χαλκού. Υπενθυμίζουμε ότι οι απώλειες χαλκού αυξάνονται ανάλογα με το τετράγωνο του ρεύματος σφάλματος. Ο πίνακας που ακολουθεί αναφέρει ενδεικτικούς χρόνους αντοχής του μετασχηματιστή ισχύος σε εξωτερικό βραχυκύκλωμα χωρίς να τον καταστρέψει, στην περίπτωση που το ρεύμα βραχυκυκλώματος περιορίζεται μόνο από την αντίδραση του μετασχηματιστή.

Πίνακας 3-1 Επιτρεπόμενη χρονική αντοχή μετασχηματιστή σε εξωτερικό σφάλμα

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

Αξίζει να σημειωθεί ότι μεγάλα εξωτερικά σφάλματα μπορούν να προκαλέσουν και εκτεταμένη μηχανική καταπόνηση στους μετασχηματιστές, με την μέγιστη μηχανική καταπόνηση να διακρίνεται κατά την διάρκεια του πρώτου κύκλου ενός ασύμμετρου σφάλματος. Δυστυχώς, σε αυτή την περίπτωση η άμεση εντολή για άνοιγμα των διακοπτών ισχύος δεν μπορεί να μειώσει το μέγεθος της μηχανικής καταπόνησης. Κατά συνέπεια ο έλεγχος της μηχανικής καταπόνησης αποτελεί πλέον θέμα σχεδιασμού του μετασχηματιστή.

3.1.3 Εσωτερικά σφάλματα (Internal faults)

Η καταστροφή της μόνωσης στα τυλίγματα ή ακόμα και στα ελάσματα του πυρήνα ενός μετασχηματιστή ισχύος μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία σφαλμάτων μεταξύ των τυλιγμάτων ή μεταξύ τυλιγμάτων και γης. Επιπρόσθετα, ένα βραχυκύκλωμα στο εσωτερικό του μετασχηματιστή έχει ως συνέπεια την ανάπτυξη αερίων σε υψηλή πίεση. Σε περίπτωση που η πίεση των αερίων γίνει πολύ μεγάλη, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του κελύφους του μετασχηματιστή.

Παράγοντες οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφή της μόνωσης είναι:

- Γήρανση της μόνωσης εξαιτίας μακροχρόνιας υπερθέρμανσης
- Η κακή ποιότητα του λαδιού του μετασχηματιστή
- Σπινθηρισμός μεταξύ των σπειρών (Corona discharges)
- Μεταβατικές υπερτάσεις

- Μεγάλα ρεύματα βραχυκυκλώματος

Η γήρανση της μόνωσης αποτελεί μία συνάρτηση του χρόνου και της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του μετασχηματιστή. Ακόμα, το σημείο του τυλίγματος στο οποίο καταγράφεται η υψηλότερη θερμοκρασία δημιουργείται μία θερμή κηλίδα (hot spot), η οποία προκαλεί μία τεράστια αλλοίωση της μόνωσης επιφέροντας έτσι τον μικρότερο χρόνο ζωής του τυλίγματος. Βέβαια, δεν είναι καθόλου εύκολο να προβλέψουμε με ακρίβεια τον χρόνο ζωής του τυλίγματος παρά μόνο κατά την συντήρηση του μετασχηματιστή ισχύος όπου εφαρμόζονται κάποιο έλεγχοι και δοκιμές και εξετάζεται το επίπεδο της μόνωσης των τυλιγμάτων.

Το φαινόμενο το οποίο περιγράφηκε ποιο πάνω είναι πάρα πολύ σημαντικό καθώς μπορεί να οδηγήσει και σε βραχυκύκλωμα μεταξύ του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος.

3.1.3.1 Υπερθέρμανση του μετασχηματιστή

Σύμφωνα με τις οδηγίες του διεθνές πρότυπου IEC 76-1, ένας μετασχηματιστής έχει την ικανότητα μετασχηματισμού ακόμα και όταν η εφαρμοζόμενη τάση αντιστοιχεί στο 105% της ονομαστικής τάσης. Κατά συνέπεια, κατασκευαστικά οι μετασχηματιστές είναι ικανοί να λειτουργούν για τάσεις ακόμα και πάνω από το 110% της ονομαστικής. Από την άλλη μεριά όταν η εφαρμοζόμενη τάση στον μετασχηματιστή είναι πολύ υψηλή ή η συχνότητα λειτουργίας του είναι πολύ μικρή, τότε ο πυρήνας του μετασχηματιστή υπερδιεγείρεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ροή της μαγνητικής ροής από τον πυρήνα προς τα μεταλλικά τοιχώματα και το κέλυφος του μετασχηματιστή, αυξάνοντας έτσι την θερμοκρασία τους. Αυτή η ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας των μεταλλικών μερών αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα καθώς μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε καταστροφή του μετασχηματιστή. Ποιο πάνω έγινε αναφορά στον επιτρεπόμενο χρόνο αντοχής του μετασχηματιστή σε μία τέτοια κατάσταση όπως ορίζεται σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα της IEEE. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό το φαινόμενο συναντάται κυρίως σε μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης που χρησιμοποιούνται στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (turbo-generator transformers). Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου συνίσταται η εγκατάσταση ειδικών μέσων προστασίας και ποιο συγκεκριμένα ηλεκτρονόμοι υπερδιέγερσης όπου ενεργούν όταν ο λόγος μεταξύ τάσης και συχνότητας (V/Hz) υπερβεί τα προκαθορισμένα όρια.

3.1.3.2 Ποιότητα του λαδιού

Το λάδι στους μετασχηματιστές παρέχει ηλεκτρική μόνωση μεταξύ των τυλιγμάτων και μεταξύ των τυλιγμάτων και του κελύφους. Όπως είναι γνωστό τα δυναμοελάσματα του πυρήνα του μετασχηματιστή είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους. Σε περίπτωση όπου τα μεταλλικά ελάσματα του πυρήνα έρθουν σε επαφή αυτό μπορεί να επιφέρει την δημιουργία δινορρευμάτων (eddy current). Κατά συνέπεια η θερμοκρασία στο εσωτερικό του μετασχηματιστή θα αυξηθεί, δημιουργώντας έτσι προβλήματα στην μόνωση των τυλιγμάτων. Αυτή η υπερθέρμανση στο εσωτερικό του μετασχηματιστή έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία αερίων στο εσωτερικό του. Συνεπώς, τα σφάλματα στον πυρήνα του μετασχηματιστή είναι ανιχνεύσιμά μόνο από ανιχνευτές πίεσης των αερίων και όχι από ηλεκτρικές διατάξεις προστασίας.

Εκτός όμως από τον ρόλο της μόνωσης το λάδι παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και στην ψύξη του μετασχηματιστή καθώς μπορεί να λειτουργήσει ως απαγωγός θερμότητας. Από τα παραπάνω μπούμε

εύκολα να συμπεράνουμε ότι η κατάσταση και η ποιότητα του λαδιού αποτελούν πολύ σημαντικές παράμετροι για την εύρυθμη λειτουργία του μετασχηματιστή. Και για αυτό ακριβώς το σκοπό έχει καθιερωθεί το πρότυπο IEC 296 όπου περιγράφει αναλυτικά τις προδιαγραφές που πρέπει να πλήρη το λάδι του μετασχηματιστή. Κατά συνέπεια ανά τακτά χρονικά διαστήματα θα πρέπει μέσω δοκιμών να ελέγχεται η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού, για την αποφυγή δυσάρεστων φαινομένων. Ακόμα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη υγρασίας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την διηλεκτρική αντοχή του λαδιού, και για αυτό το λόγο το κέλυφος του μετασχηματιστή θα πρέπει να είναι καλά μονωμένο. Εκτός όμως από την ποιότητα του λαδιού κατά την διεξαγωγή ελέγχων θα πρέπει να εξετάζεται και η ποσότητα του, καθώς σε περίπτωση που έχουμε διαρροή λαδιού αυτή θα επιφέρει αύξηση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή και πιθανώς την δημιουργία σφαλμάτων που αφορούν και το κέλυφος του μετασχηματιστή (tank faults). Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι μετασχηματιστές ισχύος λαδιού (oil immersed transformers) θα πρέπει να είναι εξοπλισμένοι με silica gel breather, έτσι ώστε να απορροφάται αλλά και να ανιχνεύεται το επίπεδο της υγρασίας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή αλλά και με ανιχνευτές στάθμης όπου θα εξετάζουν τη στάθμη του λαδιού.



Σχήμα 3.1 Παράδειγμα αφυγραντήρα (silica gel)

Το Σχήμα 3.1 αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της λειτουργίας του αφυγραντήρα (silica gel breather). Ποιο συγκεκριμένα, το ροζ χρώμα στο δοχείο υποδηλώνει την ύπαρξη υγρασίας, και κατά συνέπεια θα πρέπει να γίνει αντικατάσταση του δοχείου. Από την άλλη μεριά το μπλε χρώμα δείχνει την υγιή κατάσταση του δοχείου.

3.1.3.3 Δυσλειτουργία στο σύστημα ψύξης

Το σύστημα ψύξης αποτελεί ένα από τα ποιο σημαντικά κομμάτια του εξοπλισμού του μετασχηματιστή καθώς όπως έχει γίνει κατανοητό και από τις προηγούμενες ενότητες η αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή αποτελεί μία ανεπιθύμητη κατάσταση που εγκυμονεί πολλούς κινδύνους. Όπως είναι γνωστό, οι μετασχηματιστές ισχύος ταξινομούνται κυρίως σε δύο κατηγορίες. Η μία κατηγορία είναι οι μετασχηματιστές με φυσική ροή αέρα (ONAN, oil natural air natural), ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι μετασχηματιστές όπου η ροή του αέρα γίνεται εξαναγκασμένα μέσω

ψυκτικού εξοπλισμού (ONAF, oil natural air forced). Όπως είναι αναμενόμενο η πρώτη κατηγορία μετασχηματιστών με φυσική ροή αέρα, δεν παρουσιάζει ιδιαιτερότητες. Η δεύτερη όμως κατηγορία όπου χρησιμοποιεί ειδικό ψυκτικό εξοπλισμό θα πρέπει να επιβλέπεται ανά τακτικά χρονικά διαστήματα. Επίσης σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να είναι εγκατεστημένο κάποιο σύστημα ανίχνευσης βλάβης έτσι ώστε να παρέχεται η κατάλληλη σήμανση σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή και σταματημού του συστήματος ψύξης του μετασχηματιστή.

3.1.3.4 Σφάλματα με συμμετοχή γης.

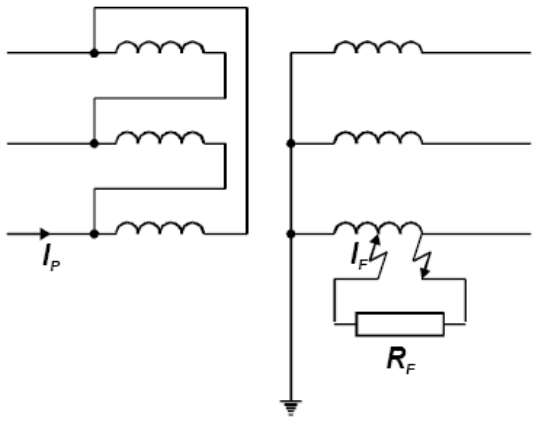
Σε περίπτωση όπου τα τυλίγματα ενός μετασχηματιστή έρχονται σε άμεση επαφή ή και έμμεση(μέσω σπινθήρα) με τα γειωμένα μεταλλικά μέρη του πυρήνα και του κελύφους, δημιουργούνται σφάλματα με συμμετοχή γης.

3.1.3.5 Βραχυκυκλώματα

Βραχυκυκλώματα μεταξύ των φάσεων ενός μετασχηματιστή έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλων ρευμάτων βραχυκύκλωσης, όπου το μέτρο του ρεύματος βραχυκύκλωσης περιορίζεται κυρίως από την από την εμπέδηση του μετασχηματιστή και δευτερευόντως από την εμπέδηση της ισοδύναμης πηγής.

3.1.3.6 Σφάλματα μεταξύ των σπειρών (turn-to-turn faults)

Σε περίπτωση όπου ένας αριθμός σπειρών που βρίσκονται στο ίδιο τύλιγμα έρθει σε άμεση επαφή ή έμμεση μέσω σπινθήρα, δημιουργείται σφάλμα μεταξύ των σπειρών (interturn fault). Σε αυτή την κατάσταση ένα ρεύμα σφάλματος θα ρέει στο εσωτερικό του μετασχηματιστή καταστρέφοντας έτσι το επίπεδο της μόνωσης του. Γενικότερα, τα σφάλματα μεταξύ των σπειρών δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμα, ιδίως όταν αφορούν λίγες σπείρες. Και αυτό διότι μία προστασία που λαμβάνει ως είσοδο την μέτρηση του ρεύματος στα τερματικά του μετασχηματιστή δύσκολα ανιχνεύει μία μικρή αύξηση του ρεύματος. Το ρεύμα σφάλματος στην έξοδο του μετασχηματιστή αυξάνεται σημαντικά κατά την εξάπλωση του βραχυκυκλώματος και την συμμετοχή όλο και περισσότερων σπειρών. Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα βραχυκυκλώματος που ρέει στις βραχυκυκλωμένες σπείρες μπορεί να κυμανθεί από 50-100 φορές το ονομαστικό ρεύμα του τυλίγματος. Αυτό έχει ως συνέπεια την τοπική υπερθέρμανση του τυλίγματος και κατά πιθανότατα την δημιουργία σπινθήρα. Επιπρόσθετα, αλλάξει η σύσταση του λαδιού και εμφανίζονται αέρια στο εσωτερικό του μετασχηματιστή. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σφάλμα μεταξύ των σπειρών δεν είναι ανιχνεύσιμο από ηλεκτρικά μέσα προστασίας όπου χρησιμοποιούν μετρήσεις του ρεύματος για να ενεργοποιηθούν , αλλά αντιθέτως προτιμάται η χρήση πνευματικών μέσων προστασίας όπως ανιχνευτές αερίων όπου ανιχνεύουν την παρουσία των αερίων στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, και ανάλογα με το επίπεδο της πίεσης τους ενεργούν. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει μία κατάσταση σφάλματος μεταξύ των σπειρών του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.2 Σφάλμα μεταξύ των σπειρών του Μ/Σ

3.2 Ρεύμα σφάλματος-παράγοντες που το επηρεάζουν.

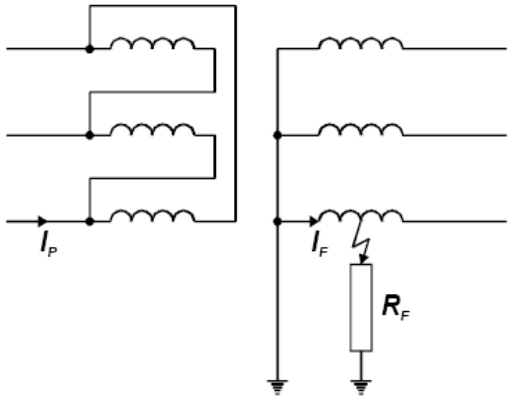
Στην προηγούμενη ενότητα έγινε ανάλυση των καταστροφικών επιπτώσεων του ρεύματος σφάλματος στους μετασχηματιστές. Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθούν οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά το μέτρο του σφάλματος και που θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά την μελέτη της προστασίας ενός μετασχηματιστή. Ποιο αναλυτικά, το μέτρο του ρεύματος σφάλματος εξαρτάται από:

- Την ισχύ βραχυκυκλώματος του δικτύου
- Τον τρόπο γείωσης του μετασχηματιστή (άμεση γείωση, ή έμμεση μέσω αντίστασης ή εμπέδησης)
- Την ροή σκέδασης του μετασχηματιστή
- Την θέση του σφάλματος κατά μήκος του τυλίγματος.

3.2.1 Μετασχηματιστές με άμεσο γειωμένο αστέρα (effectively earthed Y-winding)

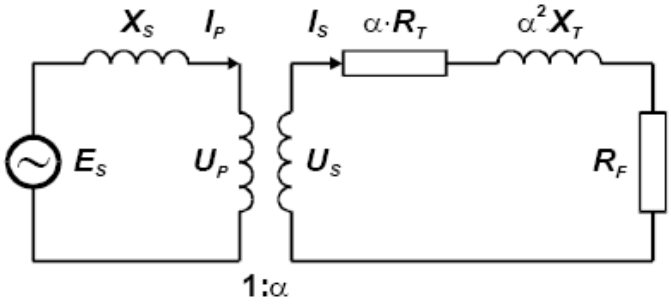
Σε αυτή την περίπτωση η ροή σκέδασης αποτελεί την ποιο σημαντική παράμετρο καθώς επηρεάζει σημαντικά το ρεύμα διαρροής ως προς γη. Ωστόσο, ανάλογα με την θέση του σφάλματος, η ροή διαρροής μεταβάλλεται. Ακόμα σημαντικός παράγοντας αποτελεί και το επίπεδο της τάσης στο σημείο που συμβαίνει το σφάλμα.

Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει ένα εσωτερικό σφάλμα σε έναν μετασχηματιστή ο οποίος είναι συνδεδεμένος κατά τρίγωνο-αστέρα (DYg). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα υποθέτουμε ότι ο μετασχηματιστής τροφοδοτείται από την πλευρά του τριγώνου μέσω μίας γεννήτριας, ενώ η πλευρά του αστέρα του μετασχηματιστή είναι ανοιχτοκυκλωμένη (χωρίς φορτίο).



Σχήμα 3.3 Εσωτερικό σφάλμα σε μετασχηματιστή Dy.

Το σφάλμα όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα είναι ένα μονοφασικό σφάλμα με γη. Πολύ σημαντική πληροφορία σε αυτή την περίπτωση αποτελεί η απόσταση του σφάλματος από τον ουδέτερο, όπου σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να την ορίσουμε ως α. Από την άλλη μεριά, η αντίσταση σφάλματος R_F, είναι ανεξάρτητη από την θέση του σφάλματος, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αντίσταση τόξου και την συνολική αντίσταση γειωσης του υποσταθμού που είναι εγκατεστημένος ο μετασχηματιστής. Το σχήμα που ακολουθεί αποτελεί το ισοδύναμο Thevenin του υπό μελέτη μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.4 Ισοδύναμο Thevenin του μετασχηματιστή

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

$$V_{oc} = a \times U_{SN} \quad \textbf{eq. 3-1}$$

Όπου:

α: απόσταση του σφάλματος από τον ουδέτερο

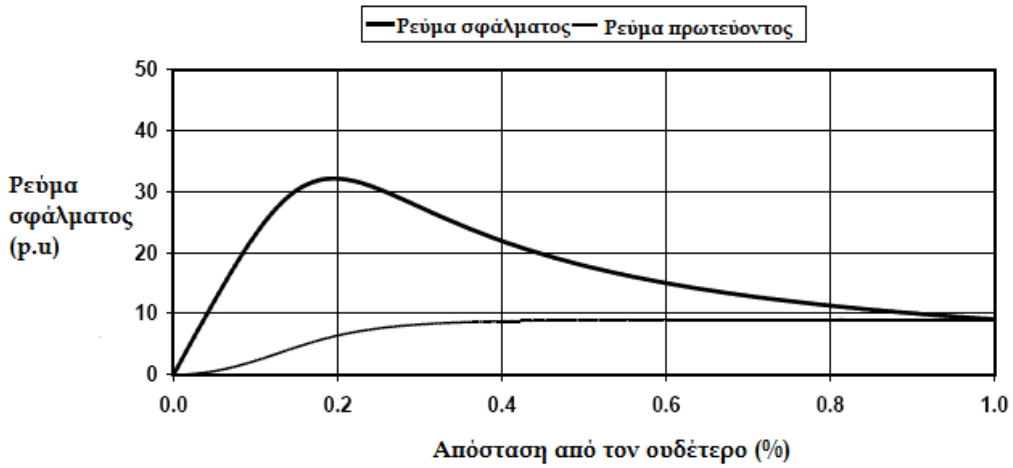
U_{SN}: πολική τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή

R_F: αντίσταση σφάλματος

R_T: ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή.

X_T: εσωτερική αντίδραση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή

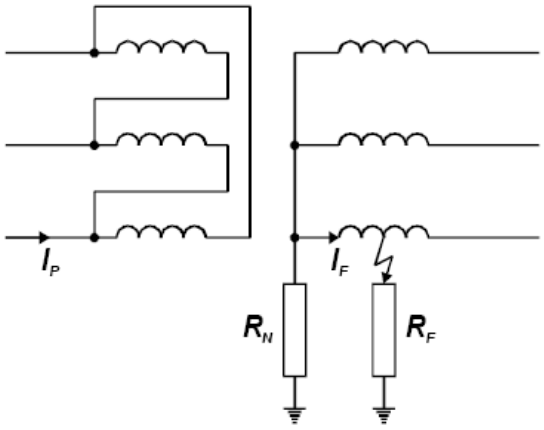
Στην περίπτωση αυτή όπως φαίνεται και από το σχήμα η αντίδραση βραχυκύκλωσης μεταβάλλεται με το τετράγωνο του αριθμού των σπειρών από τον ουδέτερο έως το σημείο του σφάλματος. Από την άλλη μεριά η ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή μεταβάλλεται γραμμικά με τον αριθμό των σπειρών ($\alpha \times R_T$). Συνεπώς από τα παραπάνω μπορούμε να εκτιμήσουμε το αναμενόμενο ρεύμα σφάλματος συναρτήσει της απόστασης του από τον ουδέτερο του μετασχηματιστή. Το σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνει μία τέτοια εκτίμηση.



Σχήμα 3.5 Εσωτερικό σφάλμα με γη σε απευθείας γειωμένο Μ/Σ

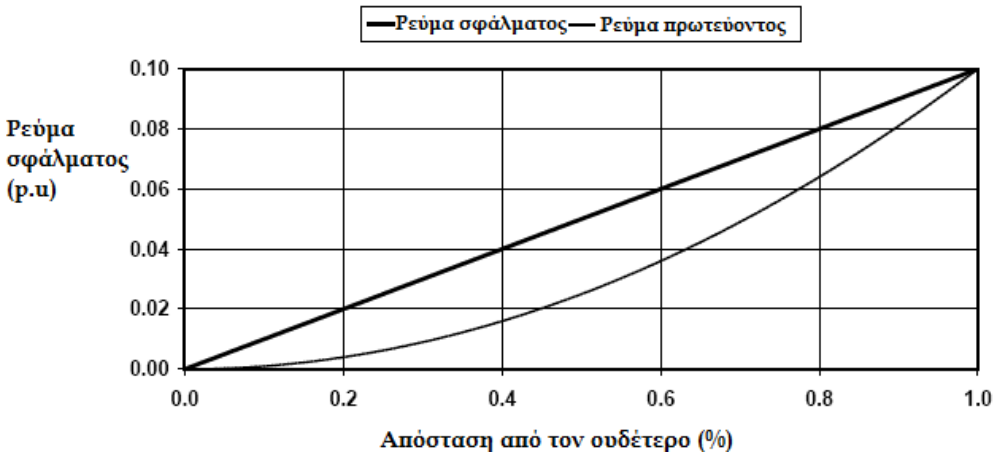
3.2.2 Μετασχηματιστές με γειωμένο αστέρα μέσω μεγάλης αντίστασης (High-impedance earthed winding).

Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα σφάλματος εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από την τιμή της αντίστασης που γειώνει τον ουδέτερο του μετασχηματιστή. Και σε αυτήν την περίπτωση όπως και στην προηγούμενη, το ρεύμα σφάλματος θα εξαρτηθεί και από την θέση του σφάλματος ως προς τον ουδέτερο. Το σχήμα που ακολουθεί αναπαριστά ένα εσωτερικό μονοφασικό σφάλμα με γη σε μετασχηματιστή όπου ο ουδέτερος του είναι γειωμένος μέσω μίας μεγάλης αντίστασης.



Σχήμα 3.6 Εσωτερικό σφάλμα σε Μ/Σ με γειωμένο ουδέτερο μέσω αντίστασης.

Βέβαια σε αυτή την περίπτωση η μεταβολή του ρεύματος σφάλματος με την θέση του σφάλματος ως προς τον ουδέτερο δεν είναι ίδια όπως και στην προηγούμενη περίπτωση αλλά εμφανίζει την ακόλουθη συμπεριφορά:



Σχήμα 3.7 Εσωτερικό σφάλμα με γη σε γειωμένο Μ/Σ μέσω μεγάλης αντίστασης.

3.2.3 Μετασχηματιστές με τρίγωνο.

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η περίπτωση εμφάνισης σφάλματος από την πλευρά του τριγώνου. Όπως είναι γνωστό, το μέτρο του ρεύματος σφάλματος εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από την μέθοδο γείωσης του συστήματος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει αποδειχθεί ότι εμπέδηση του σφάλματος (fault impedance) σε μετασχηματιστή με τα τυλίγματα συνδεδεμένα κατά τρίγωνο, είναι 25-50% μεγαλύτερη (ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή), για σφάλματα που συμβαίνουν κοντά στην ένωση των δύο τυλιγμάτων. Κατά συνέπεια, το ρεύμα σφάλματος σε μία τέτοια περίπτωση μοιράζεται ίσα ανάμεσα στα δύο τυλίγματα που εμπλέκονται στο σφάλμα. Αυτή η πληροφορία θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος προστασίας σε μετασχηματιστές με τρίγωνο.

3.3 Συστήματα προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος.

Όπως προαναφέρθηκε, ο μετασχηματιστής αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αλλά και ποιο ακριβά στοιχεία που απαρτίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, κατά την περίπτωση που εκδηλώνεται ένα σφάλμα, τα μέσα προστασίας θα πρέπει να είναι σε θέσει να αξιολογούν το σφάλμα και να ενεργούν σύμφωνα με τους προκαθορισμένους χρόνους έτσι ώστε να διασφαλιστεί η ακεραιότητα του μετασχηματιστή. Όπως είναι αναμενόμενο οι ηλεκτρονόμοι που εγκαθίστανται σε τέτοιου είδους εφαρμογές πρέπει να είναι αξιόπιστοι και γρήγοροι. Για αυτό ακριβώς το σκοπό θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφοροι παράμετροι για την επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρονόμου. Η ισχύς του μετασχηματιστή ισχύος καθώς και το επίπεδο της τάσης αποτελούν δύο από τις ποιο σημαντικές παράμετροι που θα πρέπει να εξετάζονται κατά την διαστασιολόγηση των μέσων προστασίας του μετασχηματιστή.

Ακόμα, συστήματα επιτήρησης, και συσκευές σήμανσης (alarm,trip), θα πρέπει να εγκαθίστανται παράλληλα με τα συστήματα προστασίας έτσι ώστε ανά-πάσα στιγμή να επιτηρούν τις συνθήκες λειτουργίας και να δίνουν ακριβείς εντολές στα μέσα προστασίας.

Όπως επισημάνθηκε και ποιο πριν η ισχύς του μετασχηματιστή ισχύος αποτελεί μία παράμετρο όπου θα καθορίσει τα συστήματα προστασίας του μετασχηματιστή. Ο πίνακας που ακολουθεί αναφέρεται στα μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές ισχύος ανάλογα με την ισχύ τους.

Πίνακας 3-2 Μέσα προστασίας μετασχηματιστών ανάλογα με την ισχύ τους

Μέσο προστασίας	**Ισχύς Μ/Σ >5MVA**	**Ισχύς Μ/Σ <5MVA**
Ανιχνευτής αερίων (Η/Ν Buchholz)	✓	✓
Ηλεκτρονόμοι υπερφόρτισης (Θερμικοί Η/Ν)	✓	✓
Η/Ν υπερέντασης (Overcurrent protection)	✓	✓
Σύστημα προστασίας έναντι σφαλμάτων γης (Ground fault protection)	✓	✓
Διαφορική προστασία (Differential protection)	✓	
Η/Ν πίεσης για το Σ.Α.Τ.Υ.Φ των Μ/Σ (pressure relay for tap-changer)	✓	
Επιτηρητές στάθμης λαδιού (Oil level monitor)	✓	

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τα παραπάνω μέσα προστασίας, οι μετασχηματιστές ισχύος οι οποίοι πρόκειται να αντιμετωπίσουν υπερτάσεις θα πρέπει να είναι εφοδιασμένοι με ένα επιπρόσθετο σύστημα προστασίας που ονομάζεται σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης (Overexcitation protection).

Συνεπώς, όπως μπορούμε να συμπεράνουμε από τα προαναφερθέντα στοιχεία, οι μετασχηματιστές θα πρέπει να προστατεύονται από κάθε είδους σφάλματος, ακόμα και στην περίπτωση όπου το κύριο μέσο προστασίας δεν ενεργήσει σωστά. Για αυτό το σκοπό, εγκαθίστανται και μέσα προστασίας τα οποία θα

δράσουν στην περίπτωση όπου τα κύρια μέσα προστασίας αδυνατούν να ενεργοποιηθούν. Αυτά τα μέσα προστασίας ονομάζονται δευτερεύοντα μέσα προστασίας (back-up protection).

Στον *Πίνακας **3-3** Τύποι σφαλμάτων σε μετασχηματιστές και μέσα προστασίας*Πίνακας 3-3 που ακολουθεί αναφέρονται τα διάφορα είδη σφάλματος που είναι πιθανό να εμφανιστούν σε έναν μετασχηματιστή, αλλά και τα μέσα προστασίας (κύρια και δευτερεύοντα) που θα πρέπει να εγκατασταθούν έτσι ώστε να διασφαλιστεί η αδιάλειπτη λειτουργία του.

Πίνακας 3-3 Τύποι σφαλμάτων σε μετασχηματιστές και μέσα προστασίας

Τύπος σφάλματος	**Προστασία**		**Επιπτώσεις**
	Κύρια (Main)	**Δευτερεύουσα (Back-up)**	
Βραχυκύκλωμα μέσα στην ζώνη προστασίας του μετασχηματιστή	Διαφορική προστασία Η/Ν σφαλμάτων γης (REF) Η/Ν Buchholz Η/Ν Πίεσης αερίων	Η/Ν υπερέντασης (OCR) Η/Ν σφαλμάτων γης (GFR)	Καταστροφή της μόνωσης στα τυλίγματα ή στον πυρήνα του Μ/Σ
Βραχυκύκλωμα εκτός της ζώνης προστασίας του μετασχηματιστή	Η/Ν υπερέντασης (OCR) Η/Ν σφαλμάτων γης (GFR) SBEF	Η/Ν υπερέντασης (OCR) Η/Ν σφαλμάτων γης (GFR)	Καταστροφή της μόνωσης στα τυλίγματα
Υπερφόρτιση	Θερμικοί Η/Ν	Η/Ν υπερέντασης (OCR)	Καταστροφή της μόνωσης
Σφάλμα στο σύστημα ψύξης	Θερμικοί Η/Ν	-	Καταστροφή της μόνωσης στα τυλίγματα

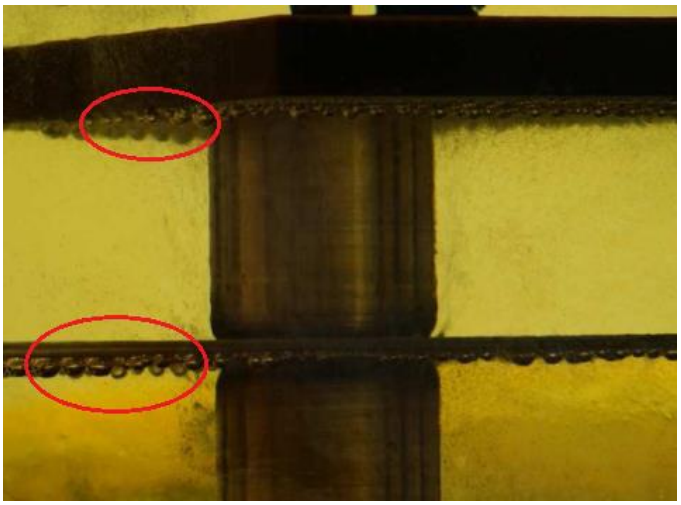
Συνεπώς, όπως είναι φανερό και από τον Πίνακας 3-3, τα μέσα προστασίας των μετασχηματιστών κατατάσσονται σε ηλεκτρικά και μη ηλεκτρικά. Τα ηλεκτρικά μέσα προστασίας χρησιμοποιούν ως είσοδο μεγέθη όπως ρεύμα, τάση ή συχνότητα που λαμβάνονται από την ζώνη προστασίας. Αντίθετα στην κατηγορία των μη ηλεκτρικών μέσων προστασίας τα μεγέθη που λαμβάνονται ως είσοδοι είναι η πίεση, η θερμοκρασία κ.α. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι Η/Ν πίεσης αερίων (sudden pressure relay), οι θερμικοί Η/Ν, καθώς επίσης και ο Η/Ν Buchholz.

3.4 Μη ηλεκτρικά μέσα προστασίας

Η λειτουργία των μη ηλεκτρικών μέσων προστασίας βασίζεται στις χημικές και φυσικές διαδικασίες που συμβαίνουν στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, και έχουν ως συνέπεια την μεταβολή της πίεσης ή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του. Κατά συνέπεια, η λειτουργία αυτών των μέσων προστασίας δρα ανεξαρτήτως από το ρεύμα η την τάση εξόδου του μετασχηματιστή.

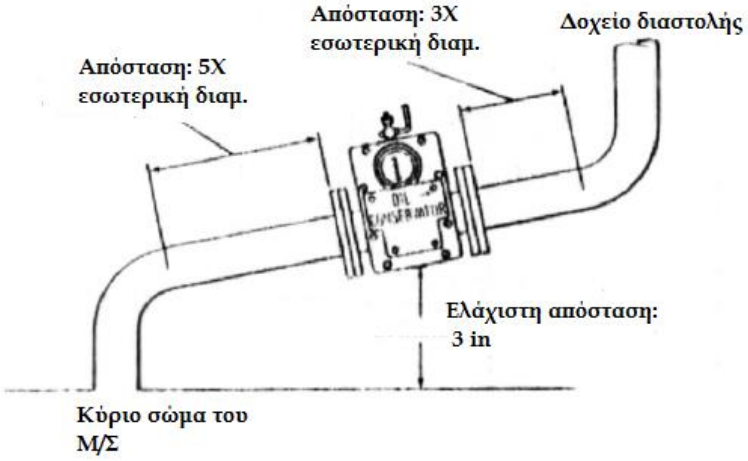
3.4.1 Ηλεκτρονόμος Buchholz

Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, κάθε σφάλμα στο εσωτερικό του μετασχηματιστή έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία αερίων. Παράδειγμα ενός τέτοιου φαινομένου αποτελεί και το Σχήμα 3.8 που ακολουθεί.**[31]**



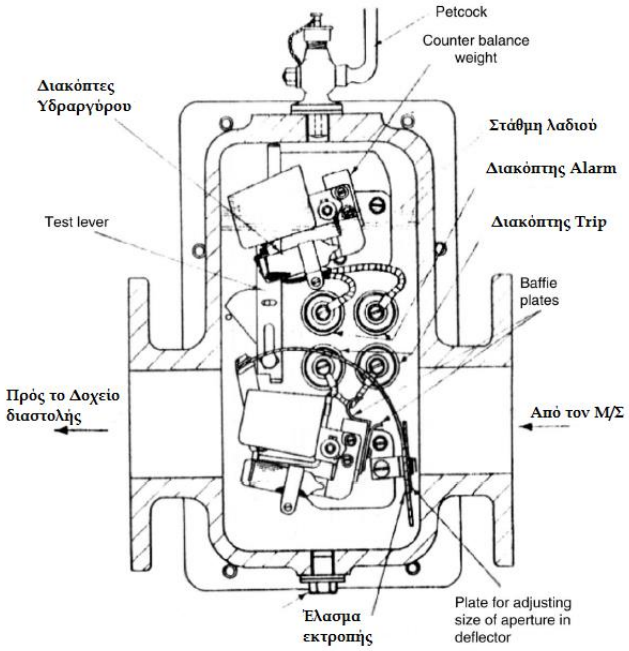
Σχήμα 3.8 Δημιουργία φυσαλίδων στο εσωτερικό ενός μετασχηματιστή

Ανάλογα με το είδος του σφάλματος η ροή αυτών των αερίων διαφοροποιείται. Κατά συνέπεια, για μικρά σφάλματα που συμβαίνουν μεταξύ των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή η ροή ή ταχύτητα αυτών των αερίων είναι μικρή. Αντίθετα, στην περίπτωση εκδήλωσης μεγάλου σφάλματος η ταχύτητα των αερίων είναι μεγάλη. Πάνω σε αυτό το φαινόμενο βασίζεται και η λειτουργία του H/N Buchholz, ο οποίος εγκαθίστανται στον αγωγό που συνδέει το δοχείο διαστολής με το κύριο σώμα του μετασχηματιστή. Το Σχήμα 3.9 που ακολουθεί δείχνει ακριβώς την θέση εγκατάστασης ενός τέτοιου H/N καθώς και τις αποστάσεις που πρέπει να τηρούνται από το δοχείο διαστολής και το κύριο σώμα του μετασχηματιστή. **[32]**



Σχήμα 3.9 Θέση εγκατάστασης H/N Buchholz

Ακόμα το Σχήμα 3.10 απεικονίζει την τομή ενός H/N Buchholz όπου διακρίνονται εύκολα τα στοιχεία του.



Σχήμα 3.10 Τομή H/N Buchholz

Όπως είναι φανερό και από το παραπάνω σχήμα ο H/N Buchholz, περιέχει δύο βασικά στοιχεία. Έναν πλωτήρα ό οποίος βρίσκεται στο επάνω μέρος του H/N και που ανιχνεύει την πτώση στην στάθμη του λαδιού, και έναν δεύτερο πλωτήρα ο οποίος ανιχνεύει την απότομη και βεβιασμένη ροή λαδιού από το κύριο σώμα του μετασχηματιστή προς το δοχείο διαστολής. Και οι δύο πλωτήρες συνδέονται με βοηθητικούς H/N έτσι ώστε να δοθεί η κατάλληλη σήμανση για σφάλμα ή εντολή απομόνωσης του μετασχηματιστή.

Στην περίπτωση που εκδηλωθεί ένα μικρό σφάλμα στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μερικών φυσαλίδων στο επάνω μέρος της επιφάνειας του λαδιού. Αυτές οι φυσαλίδες κινούνται με αργό ρυθμό, κατευθύνονται προς το δοχείο διαστολής περνώντας μέσα από τον H/N Buchholz. Μέσα στον H/N οι φυσαλίδες παγιδεύονται σε έναν ειδικό χώρο συγκέντρωσης (Buchholz chamber), δημιουργώντας μία αργή πτώση του άνω πλωτήρα. Η πτώση του πλωτήρα, συνδέεται με τις επαφές ενός βοηθητικού H/N Buchholz alarm, όπου θα δώσει και την εντολή ειδοποίησης σφάλματος. Παράλληλα, κατά την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων συλλέγεται δείγμα των αερίων που αναπτύχθηκαν κατά την εκδήλωση του σφάλματος. Το δείγμα αυτό στην συνέχεια θα αναλυθεί έτσι ώστε ανάλογα με το ποσοστό συγκέντρωσης των αερίων να συμπεράνουμε την αιτία ανάπτυξης του σφάλματος και μέχρι ποία εσωτερικά στοιχεία του μετασχηματιστή έχει επηρεάσει. Από την άλλη πλευρά, κατά την εκδήλωση ενός μεγάλου σφάλματος στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, αυτό θα οδηγήσει στην ταχύτατη κίνηση των αερίων στο εσωτερικό του H/N Buchholz, και μετακίνηση του κάτω πλωτήρα. Και κατά συνέπεια ενεργοποίηση του βοηθητικού H/N Buchholz Trip.

Γενικότερα, ενεργοποίηση του H/N Buchholz, έχουμε λόγω:

- Δημιουργία αερίων εξαιτίας διάσπασης του λαδιού
- Δημιουργία αερίων εξαιτίας διάσπασης της μόνωσης των τυλιγμάτων
- Εμφάνιση θερμής κηλίδας στις σπείρες των τυλιγμάτων, (φαινόμενο Hot-spot)

- Εκ παραδρομής εισαγωγή αέρα, κατά την διαδικασία εισαγωγής του λαδιού στον Μ/Σ
- Διαρροή λαδιού

Τα αέρια τα οποία πρόκειται να παραχθούν κατά την εμφάνιση τέτοιων σφαλμάτων είναι το υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, ακετυλένιο κ.α. ενώ τονίζεται η σημασία της ανάλυσης των αερίων μέσω ειδικού εξοπλισμού όπου έχει την ικανότητα ανίχνευσης υδρογόνου και μονοξείδιου του άνθρακα σε ποσοστό πάνω από 1%. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι εκτός από τα παραπάνω αέρια μπορεί να εμφανιστούν σε μικρότερη αναλογία: μεθάνιο, βενζόλιο, άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, οξυγόνο.

Όπως προαναφέρθηκε από την ανάλυση των αερίων μπορούμε να πάρουμε σημαντικές πληροφορίες που αφορούν την φύση του σφάλματος. Ποιο συγκεκριμένα:

- Στην περίπτωση που το αέριο το οποίο συλλέχτηκε είναι υδρογόνο, με περιεκτικότητα κάτω από 2% σε μονοξείδιο του άνθρακα, τότε το σφάλμα αφορά μόνο διάσπαση στο μονωτικό λάδι,

- Στην περίπτωση όπου το αέριο είναι υδρογόνο με περιεκτικότητα 20% σε μονοξείδιο του άνθρακα, τότε στο σφάλμα εμπλέκεται και η διάσπαση του λαδιού αλλά και η διάσπασης της μόνωσης των τυλιγμάτων.

Στην πρώτη περίπτωση, ο μετασχηματιστής μπορεί να εξακολουθήσει να λειτουργεί ενώ παρακολουθείται η δημιουργία και η πίεση των αερίων στο εσωτερικό του για το επόμενο χρονικό διάστημα. Αντίθετα στην δεύτερη περίπτωση, το σφάλμα είναι ποιο σημαντικό καθώς έχει επηρεάσει τμήμα της μόνωσης των τυλιγμάτων και κατά συνέπεια ο μετασχηματιστής θα πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας για επισκευή.

Ακόμα, στην περίπτωση που υπάρχει διαρροή λαδιού από το κύριο σώμα του μετασχηματιστή, αυτό θα προκαλέσει πτώση της στάθμης λαδιού στον H/N Buchholz, και ανάλογα με την ποσότητα απώλειας του λαδιού θα δοθούν και οι κατάλληλες σημάνσεις (Alarm,Trip) από τους βοηθητικούς H/N.

Στον που ακολουθεί δίνονται συγκεντρωτικά στοιχεία για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες ενεργοποιείται ο H/N Buchholz, ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή.**[33]**

Πίνακας 3-4 Συνθήκες ενεργοποίησης H/N Buchholz ανάλογα με την ισχύ του Μ/Σ

Ισχύς Μ/Σ(MVA)	**Διάμετρος αγωγού σύνδεσης (in)**	**Συγκέντρωση αερίων για σήμανση Alarm (cm^3)**	**Ταχύτητα κίνησης του λαδιού για εντολή Trip (cm/s)**
>1	1	110	70-130
1-10	2	200	25-140
>10	3	250	90-160

3.4.2 Προστασία υπερθέρμανσης (Thermal overload protection , ANSI code:49).

Η προστασία υπερθέρμανσης ενός μετασχηματιστή, αποτελεί ένα βασικό κομμάτι του εξοπλισμού του μετασχηματιστή. Υπερθέρμανση σε έναν μετασχηματιστή, μπορεί να προκληθεί λόγω υπερφόρτισης του μετασχηματιστή για μεγάλο χρονικό διάστημα, ή λόγω βλάβης στο σύστημα ψύξης του μετασχηματιστή. Όπως είναι γνωστό το λάδι στους μετασχηματιστές ελαίου (oil immersed transformers) εκτός από

μονωτικό, λειτουργεί και ως απαγωγός θερμότητας. Βέβαια, ο ρυθμός απόκρισης του λαδιού στις μεταβολές φόρτισης του μετασχηματιστή και κατ' επέκταση στις μεταβολές της θερμοκρασίας είναι αρκετές ώρες. Αυτό σημαίνει ότι κατά την διάρκεια της ημέρας η προσωρινή υπερφόρτιση του μετασχηματιστή μπορεί να μην επιφέρει την ανάπτυξη της μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή.

Γενικότερα, όλοι οι κατασκευαστές αναγράφουν σε κάθε πινακίδα του μετασχηματιστή μία μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Αυτή η μέγιστη τιμή διαφοροποιείται ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή, και την θέση εγκατάστασης του, καθώς από την θέση εγκατάστασης του μετασχηματιστή αλλάζει και η εξωτερική θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Γενικότερα, κατά το διάστημα όπου η εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή αυτό μας επιτρέπει μία ασφαλή και για μικρό χρονικό διάστημα υπερφόρτιση του μετασχηματιστή. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι υψηλή και ο μετασχηματιστής υπερφορτίζεται αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή. Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας, μπορεί να επιφέρει καταστροφή της μόνωσης στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, διάσπαση του λαδιού και δημιουργία μικρών εκκενώσεων (ARC), στο εσωτερικό του, προκαλώντας πολλαπλά προβλήματα. Παράλληλα, η υπερθέρμανση του μετασχηματιστή επηρεάζει κατά πολύ την διάρκεια ζωής του λαδιού. Ενδεικτικά στον *Πίνακας **3-5*** που ακολουθεί αναγράφεται η αναμενόμενη διάρκεια ζωής του λαδιού ανάλογα με την θερμοκρασία λειτουργίας του μετασχηματιστή.

Πίνακας 3-5 Διάρκεια ζωής του λαδιού του Μ/Σ ανάλογα με την εσωτερική θερμοκρασία

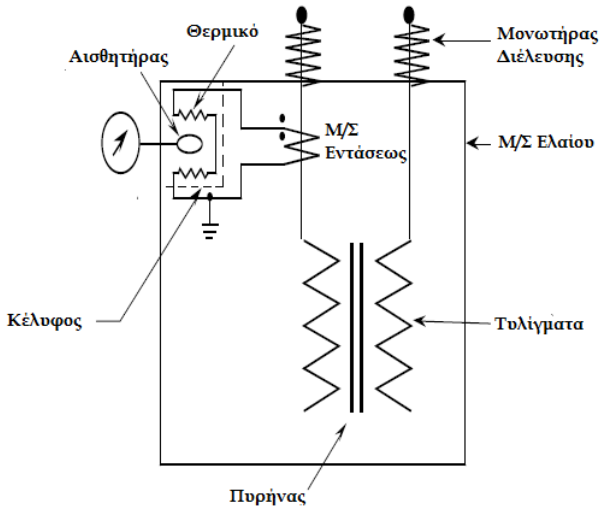
Θερμοκρασία στο εσωτερικό του Μ/Σ	**Διάρκεια ζωής λαδιού**
60°C	20 Έτη
70°C	10 >>
80°C	5 >>
90°C	2.5 >>
100°C	13 Μήνες
110°C	7 >>

Για αυτό ακριβώς τον λόγο, στον μετασχηματιστή εγκαθίστανται ειδικά θερμόμετρα όπου μετρούν την θερμοκρασία του λαδιού καθώς και την θερμοκρασία των τυλιγμάτων. Στο Σχήμα 3.11 που ακολουθεί απεικονίζεται ένα όργανο μέτρησης θερμοκρασίας λαδιού. Ο βολβός του θερμομέτρου τοποθετείται σε εσοχή του δοχείου του μετασχηματιστή και στην θερμότερη περιοχή του λαδιού. Η σύνδεση μεταξύ του βολβού και του ενδεικτικού του οργάνου γίνεται μέσω χαλύβδινου σωλήνα. Σε αυτό το όργανο, η μέτρηση πραγματοποιείται μέσω μηχανικής μετάδοσης κίνησης η οποία ενεργοποιείται από την διαστολή του όγκου του υγρού στο εσωτερικό του βολβού, και μετά μέσω του χαλύβδινου σωλήνα μεταφέρεται στον δείκτη του οργάνου όπου απεικονίζει την θερμοκρασία του λαδιού.



Σχήμα 3.11 Θερμόμετρο λαδιού

Αντίστοιχα το όργανο μέτρησης της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων λειτουργικά είναι όμοιο με το όργανο μέτρησης της θερμοκρασίας του λαδιού. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι εδώ η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται έμμεσα μέσω ενός θερμικού στοιχείου το οποίο τροφοδοτείται μέσω ενός μετασχηματιστή εντάσεως, μετρώντας έτσι το ρεύμα που διέρχεται από το κάθε τύλιγμα του μετασχηματιστή. Στο Σχήμα 3.12 που ακολουθεί, απεικονίζονται τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα τέτοιο όργανο



Σχήμα 3.12 Όργανο μέτρησης θερμοκρασίας τυλιγμάτων του Μ/Σ [34]

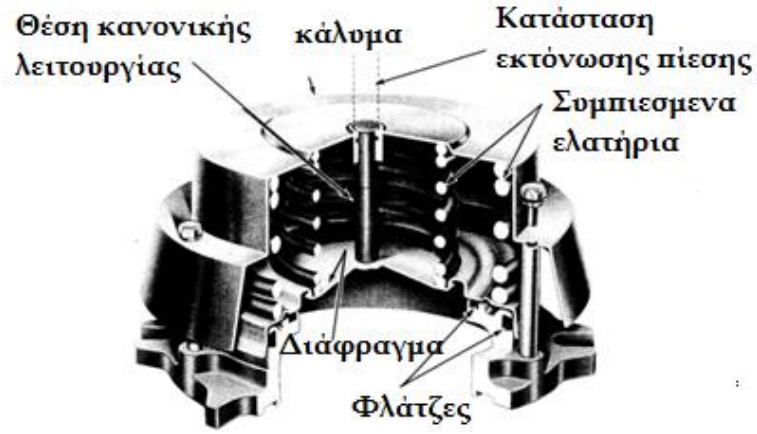
Σε περίπτωση όπου για κάποιο λόγο η θερμοκρασία στα τυλίγματα του μετασχηματιστή η στο λάδι αυξηθεί πέραν ενός προκαθορισμένου ορίου, ενεργοποιούνται αμέσως οι αντίστοιχες σημάνσεις (Alarm, Trip). Ενδεικτικά, τυπικές ρυθμίσεις που ακολουθούνται από διάφορες εταιρίες σχετικά με τις ρυθμίσεις των σημάνσεων είναι οι εξής:

Πίνακας 3-6 Τυπικές ρυθμίσεις σημάνσεων των οργάνων μέτρησης θερμοκρασίας

	ALARM	**TRIP**
Θερμοκρασία τυλίγματος	100°C	120°C
Θερμοκρασίας λαδιού	95°C	105°C

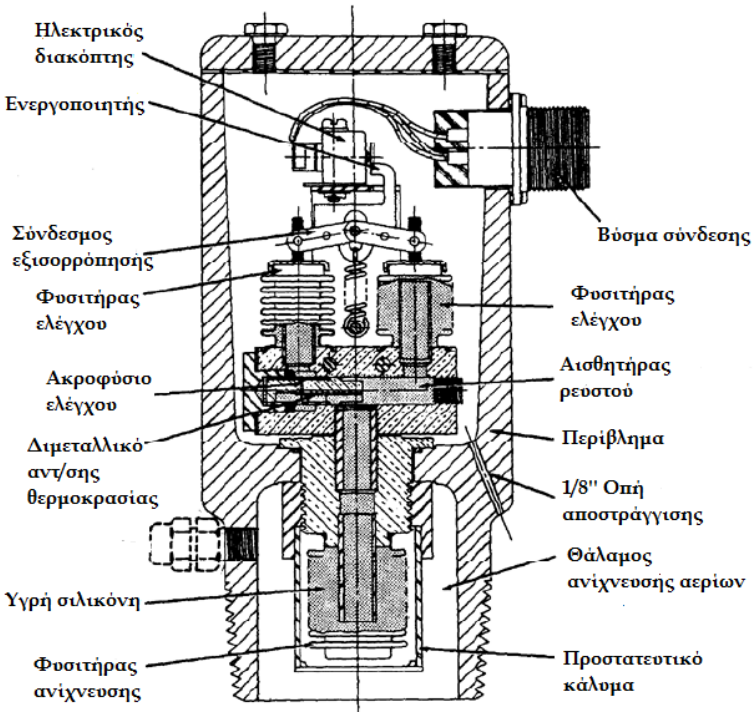
3.4.3 Ηλεκτρονόμοι και Βαλβίδες εκτόνωσης πίεσης (Sudden pressure relay/valve) (ANSI code:63)

Όπως προαναφέρθηκε, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για να εξασφαλίσουμε την ομαλή λειτουργία ενός μετασχηματιστή αλλά και την διάρκεια ζωής του, είναι η λειτουργία του κάτω από συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας και πίεσης στο εσωτερικό του. Σε περίπτωση εμφάνισης βραχυκυκλώματος ή ηλεκτρικού τόξου στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία αερίων υπό υψηλή πίεση δημιουργώντας έτσι συνθήκες υπερπίεσης στο εσωτερικό του. Συνεπώς, για την εξάλειψη αυτής της κατάστασης, οι μετασχηματιστές θα πρέπει να διαθέτουν κατάλληλα μέσα έτσι ώστε όταν η πίεση στο εσωτερικό του μετασχηματιστή αυξηθεί πέραν ενός προδιαγεγραμμένου σημείου, να ενεργοποιούνται. Τέτοια μέσα είναι οι συσκευές και οι βαλβίδες εκτόνωσης πίεσης. Στο Σχήμα 3.13 που ακολουθεί απεικονίζεται μία συσκευή ανακούφισης τύπου μεμβράνης. Όπως είναι φανερό και από το σχήμα, η συσκευή αυτή αποτελείται από έναν αριθμό συμπιεσμένων ελατηρίων όπου εφαρμόζονται πάνω από το διάφραγμα της συσκευής. Όταν η πίεση στο εσωτερικό του διαφράγματος είναι πέραν ενός ορίου, η μεμβράνη συμπιέζεται μετακινώντας τα ελατήρια και κατ'επέκταση την θέση του πύρου μεταβαίνοντας τον από την θέση κανονικής λειτουργίας στην κατάσταση εκτόνωσης.



Σχήμα 3.13 Συσκευή ανακούφισης τύπου μεμβράνης [35]

Ακόμα, εκτός από τη συσκευή εκτόνωσης πίεσης τύπου μεμβράνης, οι μετασχηματιστές είναι εξοπλισμένοι με ηλεκτρονόμους εκτόνωσης απότομης μεταβολής της πίεσης(sudden pressure relay). Οι συσκευές αυτές έχουν ταχύτατο χρόνο απόκρισης (2ms για πίεση 120±12 kPa) και λειτουργούν σε περίπτωση εμφάνισης ακραίων βραχυκυκλωμάτων στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, όπου έχουν ως αποτέλεσμα την απότομη μεταβολής της πίεσης. Κατά συνέπεια, οι ηλεκτρονόμοι ανακούφισης πίεσης ενεργοποιούνται σε μικρότερο χρόνο από ότι οι συσκευές ανακούφισης πίεσης, θέτοντας τον μετασχηματιστή εκτός λειτουργίας. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι για φυσιολογικές μεταβολές την πίεσης στο εσωτερικό του μετασχηματιστή τα παραπάνω μέσα δεν ενεργοποιούνται. Παράδειγμα ενός τέτοιου ηλεκτρονόμου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.14 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.14 Ηλεκτρονόμος/βαλβίδα ξαφνικής μεταβολής της πίεσης

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι στους μετασχηματιστές ισχύος με μεταγωγέα τάσης υπό φορτίο (On load tap changer), διαθέτουν ξεχωριστό ηλεκτρονόμο ανακούφισης της πίεσης. Συνήθως η λειτουργία ενός τέτοιου ηλεκτρονόμου ρυθμίζεται για πίεση από 30-150 kPa και για χρόνο ενεργοποίησης 10-15 ms.

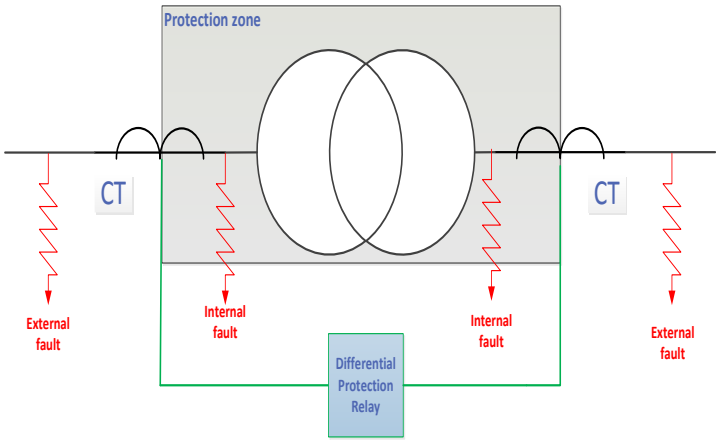
3.5 Ηλεκτρικά μέσα προστασίας.

Στην προηγούμενη ενότητα, έγινε μία ανάλυση των μη ηλεκτρικών μέσων προστασίας. Όπως έγινε κατανοητό η λειτουργία αυτών των μέσων γινόταν ανεξάρτητα με τα μεγέθη της τάσης ή του ρεύματος. Αντίθετα, σε αυτή την ενότητα θα ακολουθήσει μία εκτενή ανάλυση των ηλεκτρικών μέσων προστασίας που χρησιμοποιούνται ευρέως στους μετασχηματιστές ισχύος και θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή της διαφορικής προστασίας. Όπως θα δούμε και από την ανάλυση που ακολουθεί στις ακόλουθες ενότητες η λειτουργία αυτών των μέσων προστασίας εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος σφάλματος.

3.5.1 Διαφορική προστασία μετασχηματιστών. (Differential protection ANSI code: 87T)

Η διαφορική προστασία αποτελεί μία από τις ποιο σημαντικές μεθόδους προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος άνω των 5MVA. Η αρχή λειτουργίας αυτής της προστασίας στηρίζεται στην εφαρμογή του 1^{ο} νόμου του Kirchhoff, όπου ορίζει ότι το άθροισμα των ρευμάτων που εισέρχονται σε έναν κόμβο ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων που εξέρχονται από αυτόν.**[36]** Κατά συνέπεια, η αρχή λειτουργίας της

διαφορικής προστασίας στηρίζεται στον έλεγχο των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται μεταξύ μίας ζώνης προστασίας. Αυτή η ζώνη προστασίας ορίζεται από την ακριβή θέση εγκατάστασης των μετασχηματιστών εντάσεως όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.15 που ακολουθεί. Συνεπώς η λειτουργία της διαφορικής προστασίας ισχύει μόνο για σφάλματα που συμβαίνουν εντός της ζώνης προστασίας. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση εμφάνισης εξωτερικών σφαλμάτων, εφεδρικά μέσα προστασίας (Back-up protection) που έχουν εγκατασταθεί αναλαμβάνουν να ανιχνεύουν και να εκκαθαρίσουν σε σύντομο χρονικό διάστημα το σφάλμα προτού προκληθούν σοβαρές ζημιές στο σύστημα.



Σχήμα 3.15 Διαφορική προστασία σε Μ/Σ ισχύος και θέση εγκατάστασης των Μ/Σ εντάσεως.

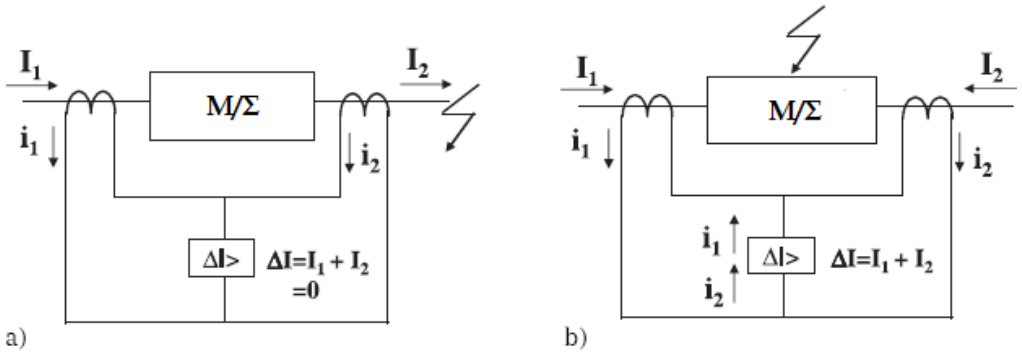
Βασικά πλεονεκτήματα της διαφορικής προστασίας:

- ✓ **Επιλεκτικότητα σε ποσοστό έως 100%:** Σημαίνει ότι αυτή η μέθοδος προστασίας ανταποκρίνεται αποκλειστικά και μόνο για σφάλματα που συμβαίνουν εντός της ζώνης προστασίας. Αυτό αποτελεί και το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδους προστασίας και για αυτό τον λόγο εφαρμόζεται ως κύριο μέσο προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος.

- ✓ **Γρήγορη απόκριση:** που σημαίνει ότι σε περίπτωση σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας, η διαφορική προστασία θα δράσει ακαριαία, θέτοντας εκτός λειτουργίας τον μετασχηματιστή. Με αυτό τον τρόπο ο μετασχηματιστής προστατεύεται πλήρως ακόμα και από τα μεγαλύτερα σφάλματα.

Όπως προαναφέρθηκε, η λειτουργία της διαφορικής προστασίας στηρίζεται στην σύγκριση των ρευμάτων που εισέρχονται στον μετασχηματιστή, με τα ρεύματα που εξέρχονται από αυτόν. Αυτό είναι εφικτό μέσω της άμεσης σύγκρισης των στιγμιαίων τιμών ή μέσω σύγκριση των διανυσμάτων (phasor comparison). Για να επιτευχθεί αυτή η σύγκριση έχει οριστεί ότι τα ρεύματα που εισέρχονται στην ζώνη προστασίας θα έχουν θετικό πρόσημο, ενώ τα ρεύματα που εξέρχονται από αυτήν θα έχουν αρνητικό πρόσημο. Στο Σχήμα 3.16 που ακολουθεί, απεικονίζεται η συμπεριφορά της διαφορικής προστασίας για περιπτώσεις σφάλματος εκτός και εντός ζώνης προστασίας. Όπως είναι φανερό και από το σχήμα, οι μετασχηματιστές έντασης συνδέονται σε σειρά με την ζώνη προστασίας έτσι ώστε σε περίπτωση εξωτερικού σφάλματος το ρεύμα να ακολουθεί μία κυκλική πορεία εντός των μετασχηματιστών εντάσεως χωρίς να περάσει μέσα από τον κλάδο του ηλεκτρονόμου της διαφορικής προστασίας. Από την άλλη μεριά σε περίπτωσης σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας, το ρεύμα σφάλματος που επάγεται μέσω των μετασχηματιστών εντάσεως περνάει μέσα από τον κλάδο της διαφορικής προστασίας. Σε

περίπτωση, όπου το ρεύμα αυτό είναι μεγαλύτερο από ένα όριο, τότε ενεργοποιείται άμεσα ο ηλεκτρονόμος της διαφορικής προστασίας θέτοντας εκτός λειτουργία τον μετασχηματιστή.



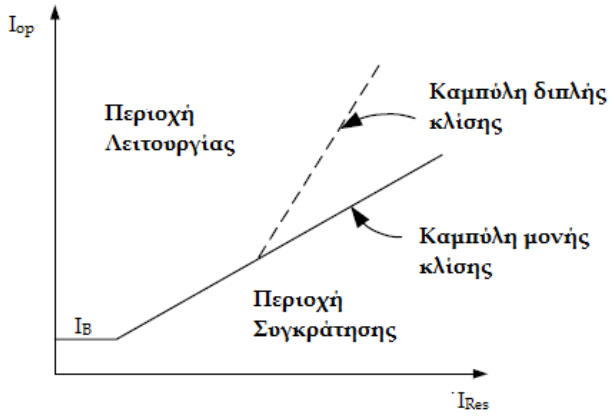
Σχήμα 3.16 Συμπεριφορά της διαφορικής προστασίας σε σφάλματα a) εκτός ζώνης b) εντός ζώνης προστασίας

Κατά συνέπεια, σε περίπτωση σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας το διαφορικό ρεύμα που περνά μέσα από τον ηλεκτρονόμο είναι:

$$\Delta I = I_{OP} = I_1 + I_2 \neq 0 \qquad \textbf{eq. 3-2}$$

Άρα ο διαφορικός ηλεκτρονόμος θα ενεργοποιηθεί όταν το διαφορικό ρεύμα ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο. Αυτή η περίπτωση αποτελεί και την ποιο απλή εφαρμογή της διαφορικής προστασίας, όπου στηρίζεται μόνο στη σύγκριση του διαφορικού ρεύματος μεταξύ του μετασχηματιστή, και σε περίπτωση που το διαφορικό ρεύμα ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο τότε ενεργοποιείται η διαφορική προστασία. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν πολλοί παράγοντες όπου επηρεάζουν την ορθή λειτουργία της διαφορικής προστασίας και που μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένη ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου. Αυτό είναι κάτι που θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό της διαφορικής προστασίας. Κατά συνέπεια, για την σωστή ρύθμιση της διαφορικής προστασίας ο ηλεκτρονόμος θα πρέπει να διαθέτει και ένα ποσοστό ανοχής σε εσφαλμένα ρεύματα που μπορεί να προκληθούν από διάφορους παράγοντες (αναλύονται σε επόμενη ενότητα).

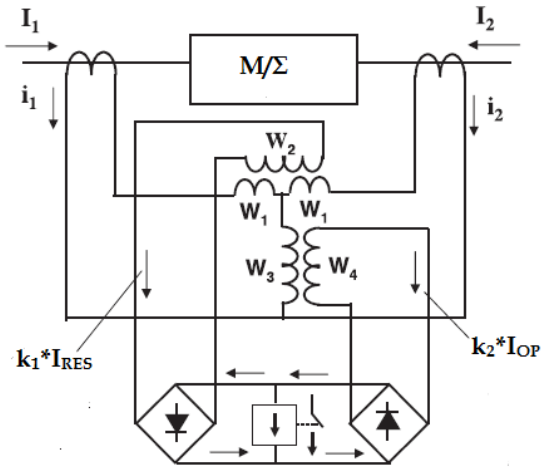
Στους ηλεκτρομηχανικούς ηλεκτρονόμους αυτή η διαδικασία υλοποιείται μέσω ενός επιπρόσθετου πηνίου που ονομάζεται πηνίο συγκράτησης (restrain coil). Σε αυτή την περίπτωση ο διαφορικός ηλεκτρονόμος συγκρίνει και το διαφορικό ρεύμα αλλά και το ρεύμα που προκύπτει από το πηνίο συγκράτησης του ηλεκτρονόμου. Στο Σχήμα 3.17 που ακολουθεί απεικονίζεται η καμπύλη λειτουργίας ενός ηλεκτρονόμου με στοιχείο συγκράτησης.



Σχήμα 3.17 Καμπύλη διαφορικής προστασίας διπλής κλίσης [37]

Όπως είναι φανερό και από το Σχήμα 3.17 υπάρχει ένα ελάχιστο όριο (κατώφλι) ενεργοποίησης της διαφορικής προστασίας I_B που ρυθμίζεται με βάση το μέγιστο σφάλμα που μπορεί να αναπτυχθεί κατά την διέλευση του μέγιστου ρεύματος εκτός της ζώνης προστασίας εξαιτίας των Μ/Σ εντάσεως. Παράλληλα, η καμπύλη της διαφορικής προστασίας χωρίζει την περιοχή λειτουργίας και την περιοχή συγκράτησης. Κάθε φορά ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας συγκρίνει το διαφορικό ρεύμα και το ρεύμα συγκράτησης. Όταν από αυτή την σύγκριση προκύψουν ρεύματα που είναι κάτω από την καμπύλη της διαφορικής προστασίας, τότε βρισκόμαστε στην περιοχή συγκράτησης και κατά συνέπεια ο ηλεκτρονόμος δεν ενεργοποιείται. Από την άλλη πλευρά, αν τα ρεύματα που προκύπτουν από την σύγκριση είναι πάνω από την καμπύλη τότε ο ηλεκτρονόμος βρίσκεται στην περιοχή λειτουργίας και ενεργοποιείται.

Στο Σχήμα 3.18 περιγράφεται η διάταξη της διαφορικής προστασίας με στοιχείο συγκράτησης



Σχήμα 3.18 Διαφορική προστασία με στοιχείο συγκράτησης και γέφυρα διόδων

Από το παραπάνω σχήμα συμπεραίνουμε ότι το ρεύμα συγκράτησης περιγράφεται από την εξίσωση:

$$I_{RES} = k_1 \times (I_1 - I_2) \qquad \textbf{eq. 3-3}$$

Όπου k_1 είναι ο λόγος των τυλιγμάτων των δύο πηνίων:

$$k_1 = \frac{w_1}{w_2} \quad \textbf{eq. 3-4}$$

Όπως είναι προφανές από την παραπάνω εξίσωση, το ρεύμα συγκράτησης αντιστοιχεί στο αλγεβρικό άθροισμα ανά φάση των ρευμάτων που προέρχονται από τους μετασχηματιστές εντάσεως σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος εκτός ζώνης προστασίας. Από την άλλη μεριά, σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος εντός ζώνης προστασίας το ρεύμα λειτουργίας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$I_{OP} = k_2 \times (I_1 + I_2) \quad \textbf{eq. 3-5}$$

Κατά συνέπεια, το βασικό κριτήριο ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου είναι:

$$I_{OP} > I_{RES} \quad \textbf{eq. 3-6}$$

ή

$$k_2 \times (I_1 + I_2) > k_1 \times (I_1 - I_2) \quad \textbf{eq. 3-7}$$

Βέβαια, όπως σημειώθηκε και ποιο πριν, στις ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου λαμβάνεται υπόψη και ένα ρεύμα κατωφλίου I_B. Συνεπώς συμπεριλαμβάνοντας το I_B στην εξίσωση eq. 3-7 έχουμε:

$$|I_1 + I_2| > k \times |I_1 - I_2| + I_B \quad \textbf{eq. 3-8}$$

Όπου

$$k = k_1/k_2 \quad \textbf{eq. 3-9}$$

Όπου k, είναι ο παράγοντας συγκράτησης και αναφέρεται στην κλίση της καμπύλης (SLP) και εκφράζεται σε ποσοστό. Τυπικό εύρος τιμών: 0,3-0,8 ανάλογα με την εφαρμογή αλλά και την διαστασιολόγηση των μετασχηματιστών εντάσεως.

Βέβαια στις νεώτερες εκδόσεις ηλεκτρονόμων διαφορικής προστασίας το ελάχιστο όριο ενεργοποίησης I_B αποτελεί μία ξεχωριστή ρύθμιση και δεν λαμβάνεται υπόψη στην εξίσωση eq. 3-8. Κατά συνέπεια, το κριτήριο ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου ποσοστιαίας διαφορικής προστασίας περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I_{OP} = k \times I_{RES} \quad \textbf{eq. 3-10}$$

&

$$I_{OP} > I_B \quad \textbf{eq. 3-11}$$

3.5.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την ορθή λειτουργία της διαφορικής προστασίας

Ωστόσο, η ορθή λειτουργία της διαφορικής προστασίας δεν εξαρτάται μόνο από την εφαρμογή των παραπάνω κριτηρίων. Υπάρχουν καταστάσεις αλλά και παράμετροι που μπορούν να οδηγήσουν στην εσφαλμένη λειτουργία της διαφορικής προστασίας και που θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη κατά την εφαρμογή αυτού του είδους προστασίας.

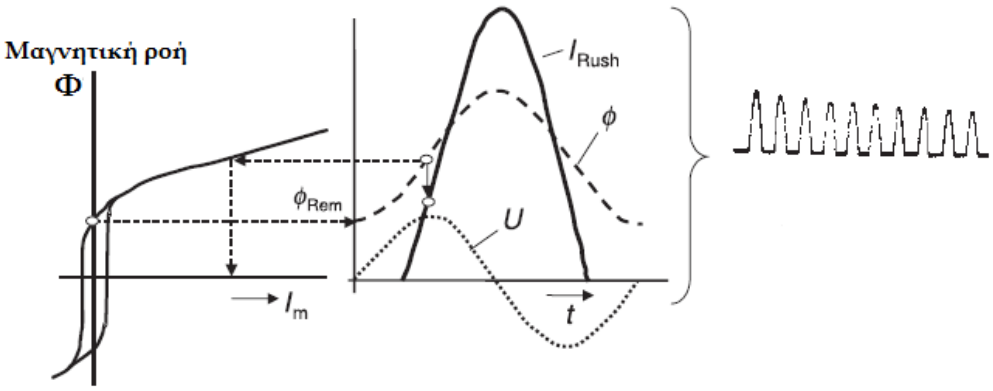
Τέτοιοι παράμετροι μπορεί να είναι:

- Το ρεύμα μαγνήτισης που προκαλείται κατά την ενεργοποίησης του μετασχηματιστή ή από παραλληλισμό μετασχηματιστών.
- Μεγάλα ρεύματα διέγερσης που προκαλούνται σε καταστάσεις υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή.
- Λανθασμένη επιλογή των μετασχηματιστών εντάσεως σε σχέση με τον λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή ισχύος
- Κορεσμός των μετασχηματιστών εντάσεως,
- Ολίσθηση φάσης σε μετασχηματιστές με σύνδεση τυλιγμάτων αστέρα-τρίγωνο
- Μετασχηματιστές με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (on load tap changer)
- Επίδραση της μηδενικής συνιστώσας του ρεύματος (Zero sequence component)

3.5.1.2 Ρεύμα μαγνήτισης (Inrush current)

Όταν ο μετασχηματιστής ισχύος ενεργοποιείται για πρώτη φορά, στον πυρήνα του εμφανίζεται ένα μεγάλο ποσοστό μαγνητικής ροής Φ. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή στο πρωτεύον του εφαρμόζεται τάση ενώ στο δευτερεύον του δεν υπάρχει φορτίο. **[38]**.Αυτή η διαδικασία αναγκάζει τον μετασχηματιστή να τραβήξει μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης (ή όπως αναφέρεται και στην διεθνή βιβλιογραφία inrush current). Παράλληλα, κατά την δημιουργία ρεύματος μαγνήτισης εμφανίζονται στο κύκλωμα άρτιες αρμονικές συνιστώσες κυρίως η $2^{η}$ αρμονική. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να δημιουργήσει τεράστια διαφορικά ρεύματα ενεργοποιώντας λανθασμένα την διαφορική προστασία.

Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό το φαινόμενο δεν εμφανίζεται μόνο κατά την πρώτη ηλέκτριση του μετασχηματιστή, αλλά ακόμα και στην περίπτωση όπου ο μετασχηματιστής ισχύος τεθεί εκτός για κάποιο χρονικό διάστημα και έπειτα επαναηλεκτριζεται. Και αυτό διότι, όταν ο μετασχηματιστής τεθεί εκτός λειτουργίας η μαγνητική ροή στον πυρήνα δεν μηδενίζεται, αλλά υπάρχει ένα ποσοστό παραμένοντος μαγνητισμού Φ_{Rem} που μπορεί να φτάσει μέχρι και το 80%. Κατά συνέπεια όταν ο μετασχηματιστής τεθεί ξανά εντός λειτουργίας, η μαγνητική ροή στον πυρήνα του μετασχηματιστή αυξάνει από το σημείο Φ_{Rem} πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε κορεσμό του πυρήνα. Το Σχήμα 3.19 που ακολουθεί περιγράφει την δημιουργία αυτού του φαινομένου.



Σχήμα 3.19 Ρεύμα μαγνήτισης (inrush current) κατά την ενεργοποίηση μετασχηματιστή

Βέβαια θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη ότι το μέγεθος του ρεύματος μαγνήτισης εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από:**[39]**

A. Μέγεθος του μετασχηματιστή:

Έχει αποδειχθεί ότι οι μετασχηματιστές μικρής ισχύος εμφανίζουν μεγάλες μέγιστες τιμές του ρεύματος μαγνήτισης. Από την άλλη μεριά στους μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος η διάρκεια του φαινομένου του μεγάλου ρεύματος μαγνήτισης (inrush current) διαρκεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Ποιο συγκεκριμένα: για μετασχηματιστές 100 KVA και κάτω, η χρονική σταθερά του φαινομένου αντιστοιχεί στα 0.1sec, ενώ για μεγαλύτερους μετασχηματιστές η χρονική σταθερά αγγίζει το 1 sec.

B. Παραμένουσα μαγνητική ροή στον πυρήνα:

Όπως είδαμε και από το παράδειγμα στο Σχήμα 3.19, ο παραμένων μαγνητισμός επηρεάζει πολύ σημαντικά το μέγεθος του ρεύματος μαγνήτισης, και κατά συνέπεια, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του παραμένοντα μαγνητισμού, τόσο μεγαλύτερο είναι και το ρεύμα μαγνήτισης. Χαρακτηριστικό εύρος τιμών του παραμένοντα μαγνητισμού είναι από 1.3-1.7 tesla.

C. Στιγμή ενεργοποίησης του μετασχηματιστή:

Όπως φαίνεται ξεκάθαρα και από το η μέγιστη τιμή του ρεύματος μαγνήτισης σημειώνεται όταν η κυματομορφή της τάσης περνάει από το μηδέν.

D. Εμπέδηση του συστήματος που τροφοδοτεί τον μετασχηματιστή:

Γενικότερα, σε περίπτωση όπου ο μετασχηματιστής τροφοδοτείται από ένα πολύ ισχυρό δίκτυο (δηλαδή το δίκτυο παρουσιάζει μικρή εμπέδηση), το μέγεθος του ρεύματος μαγνήτισης που εμφανίζεται είναι πολύ μεγάλο. Επομένως, μετασχηματιστές που είναι εγκατεστημένοι κοντά σε μονάδες παραγωγής εμφανίζουν ρεύματα μαγνήτισης όπου διαρκούν περισσότερο από ότι μετασχηματιστές όπου είναι εγκατεστημένοι μακριά από γεννήτριες. Βέβαια θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβολή της μαγνητικής ροής περιγράφεται από την εξίσωση που ακολουθεί

$$\Delta\Phi = \int_{t}^{t+T} (R \times i)dt \qquad \textbf{eq. 3-12}$$

Όπου:

Δφ: Μεταβολή της μαγνητικής ροής ανά κύκλο

R: συνολική αντίσταση σειράς συμπεριλαμβανομένης και της αντίστασης του τυλίγματος του μετασχηματιστή.

T: Περίοδος ενός κύκλου

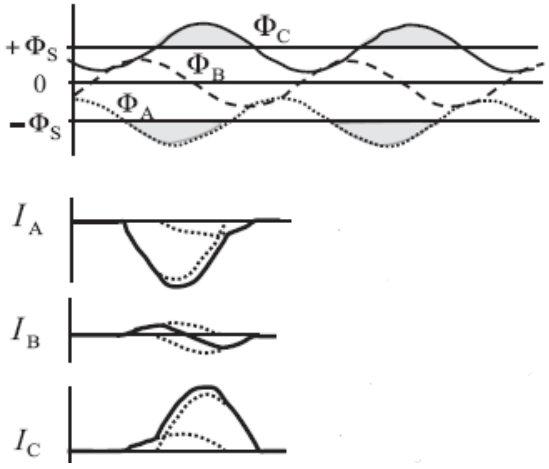
E. Μαγνητικές ιδιότητες του πυρήνα του μετασχηματιστή:

Η κυματομορφή του ρεύματος μαγνήτισης (inrush current), εμφανίζει μεγαλύτερες και ποιο απότομες αιχμές όταν η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στον πυρήνα είναι μικρή. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές η πυκνότητα της μαγνητικής ροής που κατασκευάζουν κυμαίνεται από 1.5-1.75 tesla, ενώ στην πράξη η τιμή του 1.75 tesla φαίνεται να συναντάται ποιο συχνά, δημιουργώντας έτσι και μικρότερα ρεύματα μαγνήτισης.

F. Ο τρόπος ενεργοποίησης του μετασχηματιστή

Μία ακόμα παράμετρος που επηρεάζει την μέγιστη τιμή του ρεύματος μαγνήτισης είναι το εμβαδόν της περιοχής (cross-section area) μεταξύ του πυρήνα και του τυλίγματος στο οποίο εφαρμόζεται η τάση του δικτύου. Μέγιστες τιμές ρεύματος μαγνήτισης έχουν παρατηρηθεί όταν το εσωτερικό τύλιγμα όπου έχει μικρότερη διάμετρο, ενεργοποιείται πρώτο. Κατά συνέπεια όταν το εσωτερικό τύλιγμα του μετασχηματιστή τροφοδοτηθεί πρώτο η τιμή του ρεύματος μαγνήτισης μπορεί να κυμαίνεται από 10-20 φορές του ονομαστικού ρεύματος. Αντίθετα, σε περίπτωση όπου ο μετασχηματιστής ενεργοποιηθεί από το εξωτερικό τύλιγμα το ρεύμα μαγνήτισης κυμαίνεται από 5-10 φορές του ονομαστικού ρεύματος. Βέβαια, για λόγους μόνωσης το τύλιγμα της χαμηλής τάσης είναι ποίο κοντά στον πυρήνα του μετασχηματιστή και κατά συνέπεια η ενεργοποίηση του μετασχηματιστή από το τύλιγμα της χαμηλής πλευράς έχει σαν συνέπεια την ανάπτυξη μεγάλων ρευμάτων μαγνήτισης.

Αξίζει να σημειωθεί βέβαια ότι σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του μετασχηματιστή υπάρχει ένα πολύ μικρό ρεύμα μαγνήτισης λιγότερο από 2% του ονομαστικού ρεύματος, ενώ το ρεύμα μαγνήτισης κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή μπορεί να είναι έως και 10 φορές το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή. **[40]** Ακόμα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον δείχνει το γεγονός ότι στους τριφασικούς μετασχηματιστές ισχύος, το ρεύμα μαγνήτισης μπορεί να μην είναι το ίδιο και στις τρείς φάσεις. Σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα μαγνήτισης που θα εμφανιστεί σε κάθε φάση του μετασχηματιστή εξαρτάται από την σύνδεση των τυλιγμάτων. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.20 συνήθως οι δύο από τις τρείς φάσεις εμφανίζουν μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης.

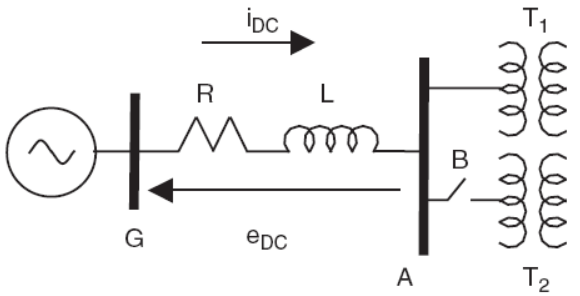


Σχήμα 3.20 Ρεύμα μαγνήτισης σε τριφασικό μετασχηματιστή

3.5.1.2.1 Άλλες περιπτώσεις εμφάνισης ρεύματος μαγνήτισης

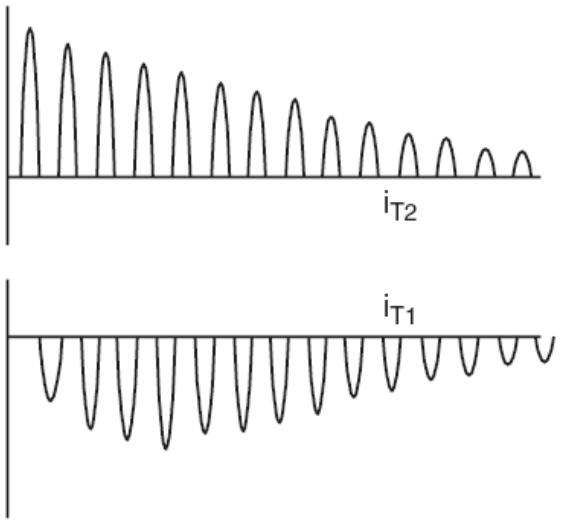
Γενικότερα, το φαινόμενο του ρεύματος μαγνήτισης δεν εμφανίζεται μόνο κατά την ηλέκτριση ενός μετασχηματιστή ισχύος. Υπάρχουν και άλλες περιπτώσεις πού μπορεί να οδηγήσουν στην δημιουργία ενός τέτοιου φαινομένου, όπως:

Ενεργοποίηση παράλληλου μετασχηματιστή: Έχει παρατηρηθεί ότι κατά την ενεργοποίηση ενός μετασχηματιστή όπου είναι συνδεδεμένος παράλληλα (στον ίδιο ζυγό), με έναν άλλο μετασχηματιστή ό οποίος βρίσκεται σε λειτουργία εμφανίζεται μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης (Sympathetic inrush current). Το Σχήμα 3.21 που ακολουθεί, απεικονίζει δύο μετασχηματιστές (T_1,T_2) οι οποίοι συνδέονται στον ίδιο ζυγό και που τροφοδοτούνται από τη γεννήτρια (G).



Σχήμα 3.21 Παραλληλισμός Μ/Σ

Όπως είναι φανερό μόνο ο μετασχηματιστής T_1 βρίσκεται σε λειτουργία, ενώ ο μετασχηματιστής T_2 θα τεθεί σε λειτουργία αφού κλείσει ο διακόπτης Β. Την στιγμή που κλείνει ο διακόπτης Β ο μετασχηματιστής T_2, εμφανίζει στο πρωτεύον του ένα πολύ μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης όπου τροφοδοτείται από την γεννήτρια μέσω της επαγωγής της γραμμής μεταφοράς. Αυτή η απότομη μεταβολή του ρεύματος έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μίας DC-συνιστώσας, η οποία φθίνει αλλά με πολύ μεγάλη χρονική σταθερά. Αυτή η DC-συνιστώσα προκαλεί μία πτώση τάσης ανάμεσα στην ωμική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς. Αυτό το μεταβατικό φαινόμενο γίνεται αντιληπτό από τον μετασχηματιστή T_1 και έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ρεύματος μαγνήτισης sympathetic inrush current. Το Σχήμα 3.22 απεικονίζονται τα ρεύματα στους δύο μετασχηματιστές



Σχήμα 3.22 Κυματομορφή sympathetic inrush current μεταξύ παραλληλισμένων μετασχηματιστών

Βέβαια αξίζει να σημειωθεί παρά το γεγονός ότι το ρεύμα μαγνήτισης σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μικρότερο από ότι κατά την φάση ενεργοποίησης του μετασχηματιστή, ωστόσο το φαινόμενο αυτό έχει σημασία διότι καταπονεί πολύ τον εξοπλισμό της προστασίας.

Ανάκτηση τάσης μετά την εκκαθάριση σφάλματος: Μία ακόμα περίπτωση εμφάνισης ρεύματος μαγνήτισης (recovery inrush current) αποτελεί και η περίπτωση όπου ο μετασχηματιστής τίθεται ξανά σε λειτουργία μετά και από την εκκαθάριση κάποιου εξωτερικού σφάλματος.**[41]** Σε αυτή την περίπτωση η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται από κάποιο άλλο μέσο προστασίας όπου δίνει εντολή στον διακόπτη ισχύος για απομόνωση του σφάλματος. Μετά από αυτή την διαδικασία η τάση στα άκρα του μετασχηματιστή επανέρχεται σε φυσιολογικό επίπεδο όμως εξαιτίας αυτού του μεταβατικού φαινομένου, δημιουργούνται συνθήκες εμφάνισης ρεύματος μαγνήτισης. Όμως σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να σημειωθούν δύο πράγματα:

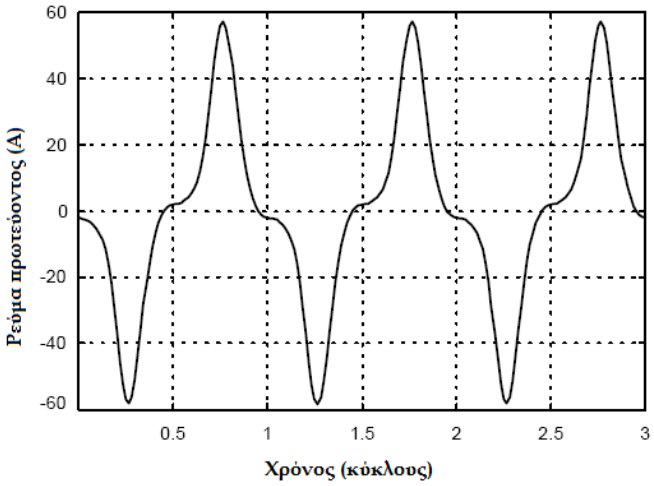
- Ο ρυθμός αλλαγής της τάσης σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ μικρός από ότι στην περίπτωση ενεργοποίησης του μετασχηματιστή για πρώτη φορά. Αντίθετα, σε κατάσταση όπου έχουμε ένα τριφασικό συμμετρικό σφάλμα κοντά στον ζυγό που συνδέεται ο μετασχηματιστής, τότε, ο ρυθμός μεταβολής της τάσης μοιάζει με την περίπτωση ενεργοποίησης του μετασχηματιστή.

- Ακόμα, στην περίπτωση ανάκτησης τάσης μετά από εκκαθάριση εξωτερικού σφάλματος, το μέγεθος της DC-Συνιστώσας που εμφανίζεται δεν είναι τόσο σημαντικό, έτσι ώστε επηρεάσει τον πυρήνα του μετασχηματιστή και να τον οδηγήσει στον κόρο.

3.5.1.3 Υπερδιέγερση (overexcitation)

Όπως είναι γνωστό η μαγνητική ροή στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή είναι ανάλογη της επιβαλλόμενης τάσης και αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας. Όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί σε καταστάσεις υπέρτασης η υποσυχνότητας, η μαγνητική ροή στον πυρήνα αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό και μπορεί να οδηγήσει τον πυρήνα σε κορεσμό.

Παράλληλα, το ρεύμα μαγνήτισης αυξάνεται δραματικά ενώ εμφανίζονται περιττές αρμονικές συνιστώσες κυρίως 3ης και η 5ης τάξης. Για παράδειγμα, σε περίπτωση λειτουργίας του μετασχηματιστή με υπέρταση σε ποσοστό 20% αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ρεύματος μαγνήτισης έως και 10 φορές του ονομαστικού ρεύματος μαγνήτισης. Μία τέτοια περίπτωση αποτυπώνεται και στο Σχήμα 3.23, όπου απεικονίζεται το ρεύμα διέγερσης σε έναν μονοφασικό μετασχηματιστή ισχύος 5 Kva, σε κατάσταση υπέρτασης σε ποσοστό 150% στην ονομαστικής συχνότητας.



Σχήμα 3.23 Ρεύμα μαγνήτισης σε κατάσταση υπερδιέγερσης με υπέρταση σε ποσοστό 150%.

Επιπρόσθετα, εκτός από την αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης, καταστάσεις υπερδιέγερσης μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή καθώς και την δημιουργία θορύβου και δονήσεων.

Όπως έγινε κατανοητό η υπέρταση σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μία πολύ σοβαρή κατάσταση και για αυτό το λόγω θα πρέπει να γνωρίζουμε τις αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν υπέρταση όπως:

- Μεταβολής της άεργου ισχύος στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας,
- Καταστάσεις απόρριψης φορτίου,
- Μεταβολής στον λόγο των σπειρών σε μετασχηματιστές με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο(On-load tap changer),
- Προβλήματα στον αυτόματο σύστημα ελέγχου της παραγωγής (AGC).
- Κατάρρευσης του συστήματος παραγωγής κάτω από συνθήκες πλήρους φορτίου, κατάσταση η οποία μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένη υπέρταση στους μετασχηματιστές ανύψωσης εξαιτίας της μαγνήτισης της γεννήτριας.

Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι η υπερδιέγερση δεν αποτελεί κάποιου είδους σφάλματος αλλά μία μη κανονική κατάσταση λειτουργίας (abnormal condition) όπου ο μετασχηματιστής θα πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας για την αποφυγή δυσάρεστων καταστάσεων που μπορεί να οδηγήσουν ακόμα και στην καταστροφή του. Την απομόνωση του μετασχηματιστή σε καταστάσεις σοβαρής υπερδιέγερσης δεν την αναλαμβάνει η διαφορική προστασία αλλά ειδικοί ηλεκτρονόμοι υπερδιέγερσης (ANSI code:24), όπου εξετάζουν κάθε στιγμή τον λόγο V/f έτσι ώστε το κλάσμα να βρίσκεται εντός επιτρεπτών ορίων.

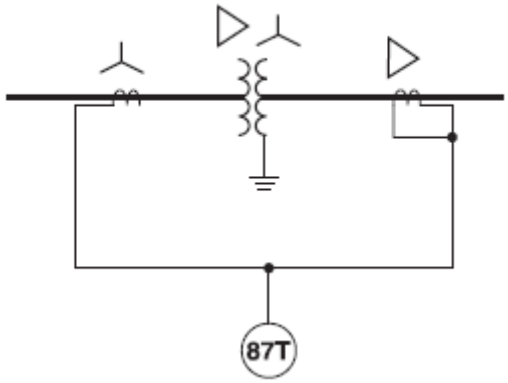
3.5.1.4 Διόρθωση της ολίσθησης φάσης και εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας .

Όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα ο ρόλος των μετασχηματιστών εντάσεως είναι πολύ σημαντικός για την διαφορική προστασία. Συνεπώς κατά τον σχεδιασμό της διαφορικής προστασίας οι μετασχηματιστές εντάσεως θα πρέπει να πληρούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά με σκοπό την αποφυγή προβλημάτων που σχετίζονται με τον κορεσμό των μετασχηματιστών εντάσεως αλλά και με την ολίσθηση φάσης σε μετασχηματιστές ισχύος όπου τα τυλίγματα τους είναι συνδεδεμένα κατά αστέρα - τρίγωνο.

Τύπος των μετασχηματιστών εντάσεως: Οι μετασχηματιστές εντάσεως θα πρέπει να είναι ίδιου τύπου και ίδιου λόγου μετασχηματισμού. Αυτό αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο διότι όπως θα αναλυθεί και ποιο κάτω σε περίπτωση ανόμοιων μετασχηματιστών εντάσεως(διαφορετική κλάση, διαφορετικές μαγνητικές ιδιότητες πυρήνα), οι μετασχηματιστές θα έχουν διαφορετικό σημείο κορεσμού πράγμα το οποίο μπορεί να επιφέρει την λανθασμένη ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας. Κατά την χρήση της διαφορικής προστασίας με στατικά ρελέ (ή και ηλεκτρομηχανικά),αυτά τα προβλήματα επιλύονταν με την χρήση ενδιάμεσων μετασχηματιστών εντάσεως. Σκοπός των ενδιάμεσων μετασχηματιστών εντάσεως ήταν να ταίριαζαν κατά το δυνατόν, τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών εντάσεως μεταξύ της ζώνης προστασίας.

Εξάλειψη μηδενικής ακολουθίας: Ένα ακόμα πλεονέκτημα των ενδιάμεσων μετασχηματιστών εντάσεως συνδεσμολογίας τριγώνου, ήταν και η εξάλειψη της μηδενικής συνιστώσας του ρεύματος. Σε περίπτωση εμφάνισης εξωτερικού σφάλματος με γη, το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας που θα εμφανιζόταν εγκλωβιζόταν στο τρίγωνο του ενδιάμεσου μετασχηματιστή εντάσεως, χωρίς να περάσει μέσα από το κύκλωμα της διαφορικής προστασίας και να ενεργοποιήσει τον διαφορικό ηλεκτρονόμο. Σήμερα, με την χρήση ψηφιακών ηλεκτρονόμων οι ενδιάμεσοι μετασχηματιστές δεν χρησιμοποιούνται και κατά συνέπεια η εξάλειψη της μηδικής ακολουθίας γίνεται με ψηφιακό τρόπο.

Κατάλληλη σύνδεση των μετασχηματιστών: έτσι ώστε να αντισταθμίζεται η μετατόπιση φάσης μεταξύ του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή ισχύος. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε ότι στον ηλεκτρονόμο εισέρχονται τα σωστά ρεύματα χωρίς φασική μετατόπιση. Συνεπώς η σύνδεση των μετασχηματιστών εντάσεως θα πρέπει να γίνει αντίστροφα από ότι η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή ισχύος. Για παράδειγμα σε περίπτωση όπου τα τυλίγματα του μετασχηματιστή ισχύος είναι συνδεδεμένα σε Δ-Y, τότε οι μετασχηματιστές έντασης όπως είναι φανερό και από το Σχήμα 3.24 θα πρέπει να συνδεθούν σε Y-Δ έτσι ώστε να διορθώσουν την ολίσθηση φάσης.**[42]**



Σχήμα 3.24 Σύνδεση των μετασχηματιστών εντάσεως για διόρθωση της ολίσθησης φάσης

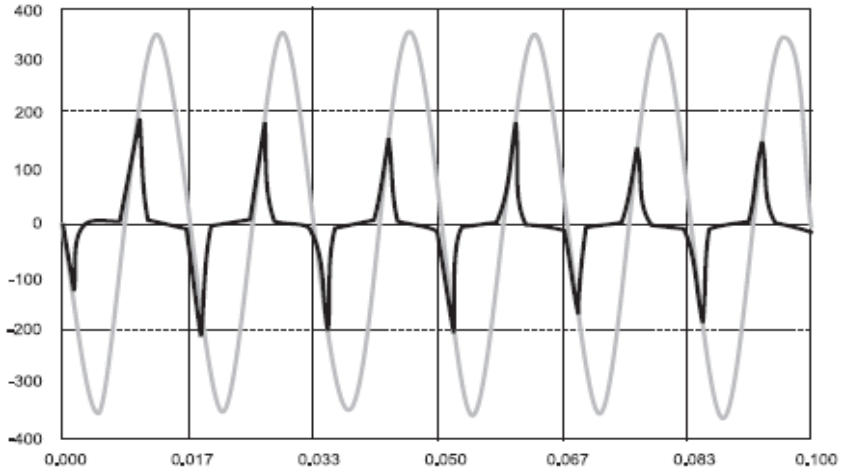
Σήμερα βέβαια με την χρήση των ψηφιακών μέσων προστασίας η αντιστάθμιση της ολίσθησης φάσης όπως και η εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας γίνεται ψηφιακά, αρκεί κατά την ρύθμιση της διαφορικής προστασίας να ορίσουμε την συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του υπό προστασία μετασχηματιστή.

3.5.1.5 Κορεσμός μετασχηματιστών εντάσεως.

Όπως έγινε κατανοητό και από προηγούμενες ενότητες η κατάσταση λειτουργίας των μετασχηματιστών εντάσεως αποτελεί έναν πολύ κρίσιμο παράγοντα για την ορθή λειτουργία της διαφορικής προστασίας. Ως εκ τούτου, όταν οι μετασχηματιστές εντάσεως λειτουργούν στην γραμμική περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης η λειτουργία της διαφορικής προστασίας δεν επηρεάζεται. Όμως όταν η λειτουργία των μετασχηματιστών εντάσεως διαταράζεται από διάφορες αναμενόμενες καταστάσεις τότε, οι μετασχηματιστές εντάσεως παύουν να λειτουργούν στην γραμμική περιοχή και μεταβαίνουν στον κόρο. Τέτοιες καταστάσεις μπορεί να είναι:

A. **AC-Κορεσμός:**

Σε περίπτωση όπου το ονομαστικό ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον του μετασχηματιστή εντάσεως είναι πολύ μεγαλύτερο από το ανώτερο επιτρεπτό οριακό ρεύμα ακριβείας του μετασχηματιστή (accuracy limit current), τότε ο μετασχηματιστής εντάσεως μεταβαίνει στον κόρο. Το Σχήμα 3.25 αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα όπου απεικονίζει το παραμορφωμένο ρεύμα του μετασχηματιστή εντάσεως.

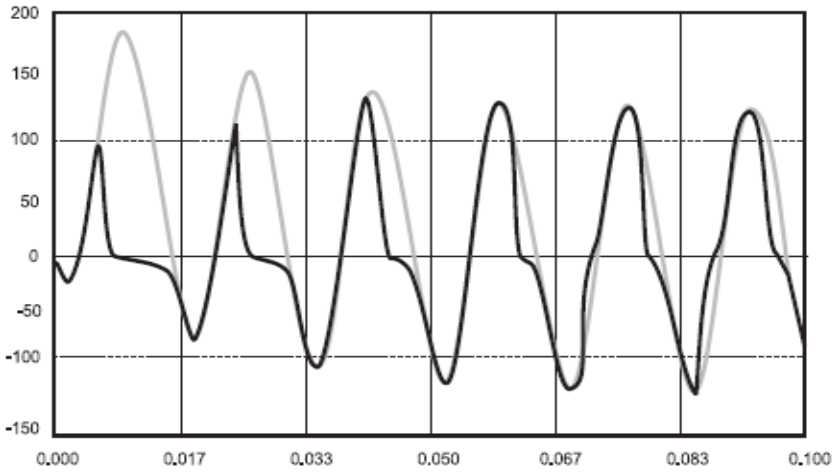


Σχήμα 3.25 Παράδειγμα AC κορεσμού

B. **DC-Κορεσμός**

Στην προηγούμενη παράγραφο εξετάστηκε ο κορεσμός του μετασχηματιστή εντάσεως εξαιτίας μεγάλου ρεύματος στο πρωτεύον του μετασχηματιστή. Ποιο σοβαρή κατάσταση κορεσμού όμως αποτελεί η περίπτωση εκδήλωσης κάποιου εξωτερικού σφάλματος. Τότε σε αυτή την περίπτωση, ο μετασχηματιστής έντασης φτάνει στον κόρο εξαιτίας της DC-συνιστώσας που παρουσιάζεται στο κύκλωμα. Παράλληλα, το ρεύμα του δευτερεύοντος εμφανίζει πλούσιο αρμονικό περιεχόμενο (κυρίως άρτιες αρμονικές). Ακόμα, Όλα τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα την λανθασμένη ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, συνηθίζεται η χρήση ποσοστιαίας διαφορικής προστασίας διπλής κλίσης όπως παρουσιάστηκε και στο Σχήμα 3.17.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα περίπτωσης κορεσμού εξαιτίας DC-συνιστώσας απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 3.26 DC-κορεσμός σε μετασχηματιστή εντάσεως

Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι κορεσμός του μετασχηματιστή εντάσεως μπορεί να συμβεί και κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση το μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης που θα δημιουργηθεί εμπεριέχει ένα αξιοσημείωτο ποσοστό DC- συνιστώσας, όπου μπορεί να οδηγήσει τον μετασχηματιστή έντασης στον κόρο.

Όπως αναφέρθηκε και ποιο πριν, η διαφορική προστασία αποκρίνεται σωστά για σφάλματα εκτός ζώνης προστασίας αρκεί οι μετασχηματιστές εντάσεως να μην είναι κορεσμένοι. Όταν οι μετασχηματιστές εντάσεως κορεστούν εξαιτίας κάποιου μεγάλου εξωτερικού σφάλματος τότε το δευτερεύον των μετασχηματιστών δεν αναπαράγει πιστά το ρεύμα στο πρωτεύον τους οδηγώντας πολλές φορές σε λανθασμένη ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας. Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεως πολλές φορές χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας διπλής ή μεταβλητής κλίσης(όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.17) , όπου αυξάνεται έτσι η ασφάλεια και η σωστή απόκριση του ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας ιδίως σε καταστάσεις εκτεταμένου κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως. Επιπρόσθετα, πολλοί ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας χρησιμοποιούν τις αρμονικές που παράγονται κατά τον κορεσμό των μετασχηματιστών εντάσεως για να δώσουν μία επιπλέον συγκράτηση και παρεμπόδιση της λανθασμένης λειτουργίας της διαφορικής προστασίας. **[43]**

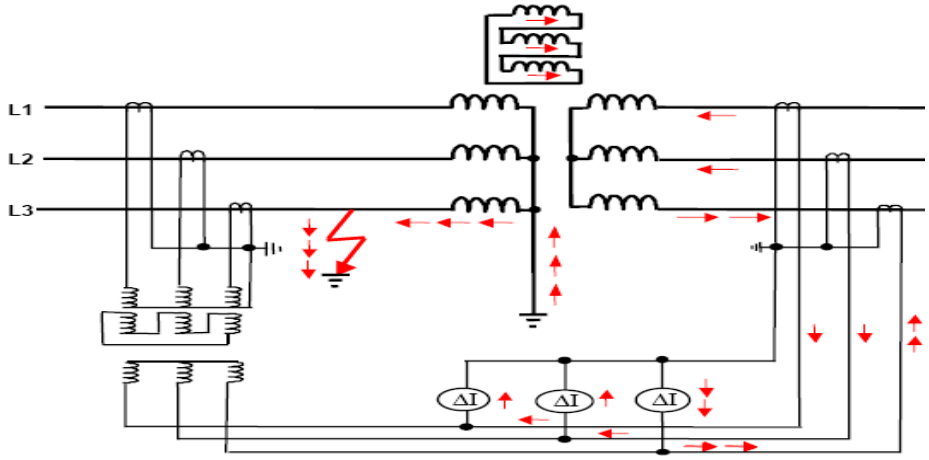
3.5.1.6 Διαφορική προστασία με χρήση ψηφιακών ηλεκτρονόμων (Numerical Differential protection)

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκαν εκτενώς οι παράμετροι όπου επηρεάζουν την εύρυθμη λειτουργία της διαφορικής προστασίας. Όπως διαπιστώσαμε θα πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί με την χρήση των ηλεκτρομηχανικών ή στατικών ηλεκτρονόμων διαφορικής προστασίας και ιδιαίτερα στην επιλογή των μετασχηματιστών εντάσεως καθώς με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουμε την εξάλειψη προβλημάτων που σχετίζονται με:

- Προσαρμογή των ρευμάτων πρωτεύοντος-δευτερεύοντος σε κοινή βάση,

- Ολίσθηση φάσης σε μετασχηματιστές αστέρα-τριγώνου
- Εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας σε μετασχηματιστές συνδεσμολογίας γειωμένου αστέρα.

Κατά συνέπεια, την λύση στα παραπάνω προβλήματα προσέφερε η χρήση των ενδιάμεσων μετασχηματιστών εντάσεως όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.27.



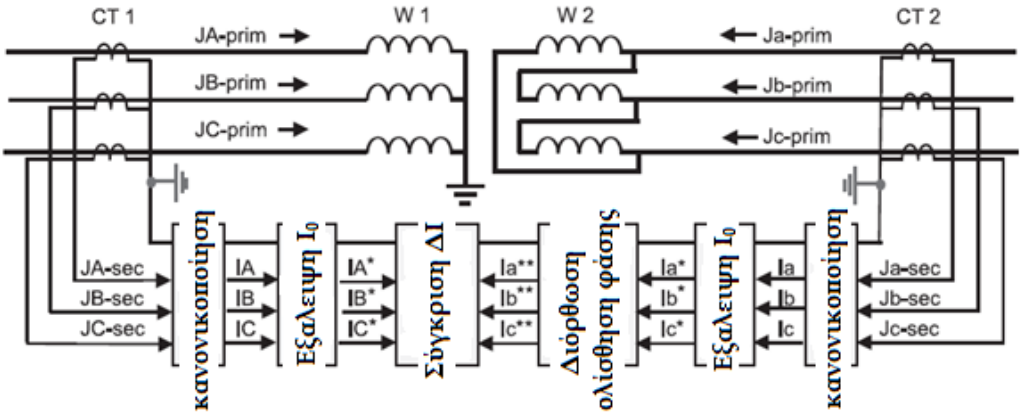
Σχήμα 3.27 Εξάλειψη μηδενικής ακολουθίας σε περίπτωση σφάλματος με Γή με χρήση ενδιάμεσων Μ/Σ εντάσεως

Ωστόσο η χρήση των ενδιάμεσων μετασχηματιστών εντάσεων οδηγούσε σε αύξηση της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης άλλα και αύξηση του κόστους.

Σήμερα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και με την χρήση των ψηφιακών ηλεκτρονόμων, δεν απαιτείται η χρήση ενδιάμεσων μετασχηματιστών εντάσεως και αυτό διότι μέσα από την σωστή ρύθμιση των παραμέτρων του λογισμικού μας δίνεται η δυνατότητα :

- ✓ Αντισταθμίσουμε τα ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, που αναφέρονται σε διαφορετικό επίπεδο τάσης,
- ✓ Διόρθωση της ολίσθησης φάσης δηλώνοντας στο λογισμικό την συνδεσμολογία και την μετατόπιση φάσης (π.χ yd5)
- ✓ Εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας σε κάθε φάση ξεχωριστά σε μετασχηματιστές που διαθέτουν τύλιγμα συνδεδεμένο σε αστέρα

Στο Σχήμα 3.28 που ακολουθεί αναπαριστάνεται η λειτουργία ενός σύγχρονου ψηφιακού ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας όπου επιτελεί τις παραπάνω διεργασίες με χρήση αλγορίθμων.



Σχήμα 3.28 Ψηφιακός Η/Ν διαφορικής προστασίας

Ποίο αναλυτικά:

Κανονικοποίηση των ρευμάτων:

Αρχικά, όπως είναι φανερό και από το σχήμα ο ηλεκτρονόμος δέχεται σαν είσοδο (και από τις δύο πλευρές) τα ρεύματα από το δευτερεύων των μετασχηματιστών εντάσεως. Πρώτη διεργασία είναι αυτά τα ρεύματα να έρθουν σε μία κοινή βάση ως προς την ισχύ του υπό προστασία μετασχηματιστή (S_N). Ωστόσο, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το λογισμικό λαμβάνει ως αναφορά την πλευρά της υψηλής τάσης. Συνεπώς σε αυτή την φάση ο ηλεκτρονόμος υπολογίζει:

$$I_{prim} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \times V_{prim}} \qquad \textbf{eq. 3-13}$$

Και για την πλευρά του δευτερεύοντος:

$$I_{sec} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \times V_{sec}} \qquad \textbf{eq. 3-14}$$

Συνεπώς τα ρεύματα που εξάγονται και από τις δύο πλευρές μετά και την κανονικοποίηση είναι με την μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{I_{prim\ CT1}}{I_{prim}} \times \begin{bmatrix} J_{A-sec} \\ J_{B-sec} \\ J_{C-sec} \end{bmatrix} = k_{CT1} \times \begin{bmatrix} J_{A-sec} \\ J_{B-sec} \\ J_{C-sec} \end{bmatrix} \qquad \textbf{eq. 3-15}$$

Και

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{I_{prim\ CT2}}{I_{sec}} \times \begin{bmatrix} J_{a-sec} \\ J_{b-sec} \\ J_{c-sec} \end{bmatrix} = k_{CT2} \times \begin{bmatrix} J_{a-sec} \\ J_{b-sec} \\ J_{c-sec} \end{bmatrix} \qquad \textbf{eq. 3-16}$$

Όπου k_{CT}: είναι ο λόγος μεταξύ των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εντάσεως.

Εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας I_0

Το δεύτερο βήμα που ακολουθείται είναι η εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη σε μετασχηματιστές με γειωμένο αστέρα καθώς ένα πιθανό σφάλμα με συμμετοχή της γης θα επιφέρει αλλαγή στο μέτρο του ρεύματος στην μη υγιή φάση οδηγώντας έτσι σε ανισορροπία των ρευμάτων και κατ' επέκταση στην ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας. Σε περίπτωση που ο μετασχηματιστής δεν είναι γειωμένος ή είναι συνδεδεμένος σε τρίγωνο αυτή η διαδικασία δεν εφαρμόζεται.

Το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_0 = \frac{1}{3} \times (I_A + I_B + I_C) \quad \textbf{eq. 3-17}$$

Συνεπώς η εξάλειψη της μηδενικής ακολουθία από κάθε φάση γίνεται εφαρμόζοντας τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I_A^* = I_A - I_0 \quad \textbf{eq. 3-18}$$

$$I_B^* = I_B - I_0 \quad \textbf{eq. 3-19}$$

$$I_C^* = I_C - I_0 \quad \textbf{eq. 3-20}$$

Διόρθωση της ολίσθησης φάσης:

Μετά και την εξάλειψη της μηδενικής ακολουθίας μπορεί να γίνει και η διόρθωση της ολίσθησης φάσης . Η εξίσωση που ακολουθεί διορθώνει την ολίσθηση φάσης λαμβάνοντας υπόψη τον αριθμό της ομάδας (π.χ για yd5 το k=5)

$$\begin{bmatrix} I_A^{**} \\ I_B^{**} \\ I_C^{**} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \times \begin{bmatrix} \cos(k \times 30^o) & \cos((k+4) \times 30^o) & \cos((k-4) \times 30^o) \\ \cos((k-4) \times 30^o) & \cos(k \times 30^o) & \cos((k+4) \times 30^o) \\ \cos((k+4) \times 30^o) & \cos((k-4) \times 30^o) & \cos(k \times 30^o) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a^{**} \\ I_b^{**} \\ I_c^{**} \end{bmatrix} \quad \textbf{eq. 3-21}$$

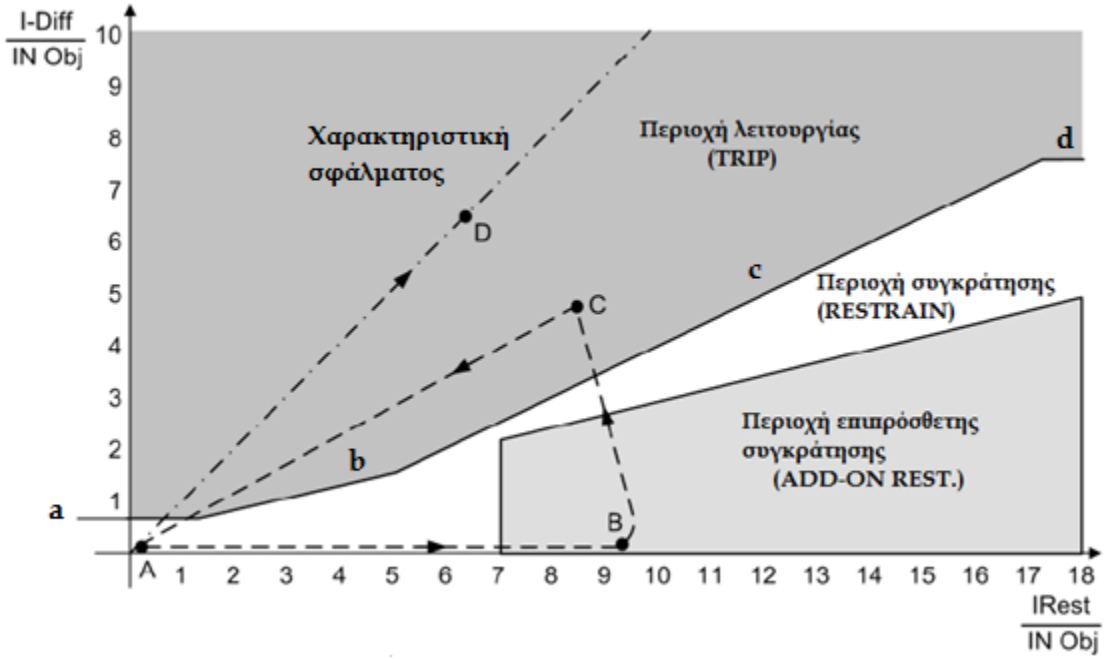
Υπολογισμός διαφορικού ρεύματος:

Το τελευταίο στάδιο που υλοποιείται είναι η σύγκριση των δύο ρευμάτων και η εξαγωγή του διαφορικού ρεύματος. Η σύγκριση γίνεται όπως περιγράφεται από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$\begin{bmatrix} I_{\Delta-A} \\ I_{\Delta-B} \\ I_{\Delta-C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A^* \\ I_B^* \\ I_C^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_a^{**} \\ I_b^{**} \\ I_c^{**} \end{bmatrix} \quad \textbf{eq. 3-22}$$

3.5.1.6.1 Χαρακτηριστική λειτουργίας ψηφιακού Η/Ν διαφορικής προστασίας.

Στο Σχήμα 3.29 που ακολουθεί, διακρίνουμε τις περιοχές λειτουργίας ενός ψηφιακού ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας. Βασική αρχή λειτουργίας του ψηφιακού ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας είναι κάθε στιγμή να υπολογίζει το διαφορικό ρεύμα I_{Diff}, καθώς και το ρεύμα συγκράτησης $I_{Rest.}$ και να υπολογίζει κάθε φορά το λόγο $I_{Diff}/I_{Rest.}$. Το αποτέλεσμα αυτής της πράξη ς αποτελεί ένα σημείο στην χαρακτηριστική λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, όπου ανάλογα με την περιοχή στην οποία βρίσκεται εκτελούνται και συγκεκριμένες ενέργειες.



Σχήμα 3.29 Καμπύλη λειτουργίας ψηφιακού Η/Ν διαφορικής προστασίας [44]

Ποιο αναλυτικά:

Περιοχή λειτουργίας (TRIP area):

Όπως είναι φανερό και από το σχήμα, το πρώτο πράγμα που διακρίνουμε είναι το σημείο (a), όπου εκφράζει την ευαισθησία και το όριο λειτουργίας της διαφορικής προστασίας (sensitivity threshold). Το όριο αυτό υπολογίζεται σύμφωνα με το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα που μπορεί να εμφανιστεί εκτός της ζώνης προστασίας. Για αυτό το σκοπό κατά την μελέτη της διαφορικής προστασίας πρώτα γίνεται μία μελέτη σφαλμάτων έτσι ώστε να εντοπίσουμε το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να ανεπτύχθη εκτός της ζώνης προστασίας. Επιπρόσθετα, σε αυτό το σημείο λαμβάνονται υπόψη ρεύματα μαγνήτισης (inrush current), έτσι ώστε να αποφεύγεται η ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας κάτω από μία τέτοια περίπτωση

Εν συνεχεία, η περιοχή λειτουργίας (b), εκφράζει σφάλματα τα οποία έχουν προκύψει από λανθασμένο συνδυασμό μετασχηματιστών εντάσεως (mismatch errors), ή σφάλματα τα οποία προέκυψαν εξαιτίας του συστήματος αλλαγής τάσης υπό φορτίο σε μετασχηματιστές ισχύος (OLTC).

Όπως έχουμε είδη αναφέρει και σε προηγούμενη ενότητα, ένας σημαντικός παράγοντας λανθασμένης ενεργοποίησης της διαφορικής προστασίας είναι ο κορεσμός των μετασχηματιστών εντάσεως. Έτσι, περιοχή όπου λαμβάνει υπόψη τέτοια κατάσταση είναι η (c).

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν καταστάσεις όπου ο ηλεκτρονόμος θα πρέπει να δράσει ακαριαία, σε εμφάνιση πολύ μεγάλων ρευμάτων ανεξάρτητα από το αρμονικό περιεχόμενο η το ρεύμα συγκράτησης. Αυτή είναι η περίπτωση εκφράζεται στην περιοχή (d) .

Σε περίπτωση όπου το $I_{Diff} = I_{Rest.}$, τότε αναφερόμαστε στην περίπτωση εμφάνισης σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας, και περιγράφεται από την χαρακτηριστική σφάλματος (διακεκομμένη γραμμή), όπου εμφανίζει κλίση 45^{o}.

Ρυθμίσεις:

Πίνακας 3-7 Ρυθμίσεις περιοχών λειτουργίας H/N διαφορικής προστασίας

	Σημείο (a)	**Σημείο (b)**	**Σημείο (c)**
Μ/Σ χωρίς OLTC	$20\% \times I_{N-transf}$	$25\% \times (I_{Diff}/I_{Rest.})$	$50\% \times (I_{Diff}/I_{Rest.})$
Μ/Σ με OLTC	$30\% \times I_{N-transf}$		

Περιοχή επιπρόσθετης συγκράτησης (Add-on restraint):

Όπως σημειώθηκε και ποιο πάνω ο κορεσμός των μετασχηματιστών εντάσεως αποτελεί μία πολύ κρίσιμη κατάσταση για την εύρυθμη λειτουργία της διαφορικής προστασίας. Υπενθυμίζουμε ότι μία περίπτωση εμφάνισης κορεσμού στους μετασχηματιστές εντάσεως αποτελεί η κατάσταση εμφάνισης ενός σημαντικού σφάλματος (επιφέρει την ανάπτυξη μεγάλου ρεύματος σφάλματος), εκτός της ζώνης προστασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον κορεσμό των μετασχηματισμό εντάσεως. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι ενδέχεται να μην κορεστούν και οι δύο μετασχηματιστές εντάσεως αλλά μόνο ο ένας ή ακόμα να κορεστούν και οι δύο αλλά σε άλλο βαθμό. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση άνισων ρευμάτων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος και κατά συνέπεια την ενεργοποίηση της διαφορικής προστασίας.

Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων οι σημερινοί ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι είναι εφοδιασμένοι με ένα επιπρόσθετο σύστημα ανίχνευσης κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως (saturation detector), όπου σκοπός του συστήματος είναι να ανιχνεύσει το πότε κάποιος από τους μετασχηματιστές εντάσεως πάει να οδηγηθεί σε κορεσμό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση εξωτερικού σφάλματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.29. Η διακεκομμένη γραμμή του σχήματος εκφράζει το ακαριαίο ρεύμα που αναπτύσσεται στην περίπτωση κορεσμού ενός από τους μετασχηματιστές εντάσεως στην περίπτωση ενός εξωτερικού σφάλματος(εκτός της ζώνης προστασίας).

Όπως είναι φανερό, ακαριαία μετά το σφάλμα (σημείο Α), παρατηρείται μία ραγδαία αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος, προκαλώντας έτσι ένα μεγάλο ρεύμα συγκράτησης ($2*I_{σφαλμ.}$). Το σημείο (Β) εκφράζει την κατάσταση κορεσμού του μετασχηματιστή εντάσεως όπου όπως βλέπουμε αυξάνεται το διαφορικό ρεύμα ενώ μειώνεται το ρεύμα συγκράτησης. Τελικώς το αποτέλεσμα του κλάσματος $I_{Diff}/I_{Rest.}$ είναι το σημείο (C) στην περιοχή ενεργοποίησης (tripping area). Σε περίπτωση που την ίδια χρονική στιγμή εμφανιστεί ένα ρεύμα εντός της ζώνης προστασίας, το σημείο λειτουργίας θα μετατεθεί στο σημείο (D), καθώς το ρεύμα συγκράτησης θα είναι μετά βίας μεγαλύτερο από το διαφορικό ρεύμα.

Ως εκ τούτου, σε μία τέτοια κατάσταση, ο κορεσμός του μετασχηματιστή εντάσεως ανιχνεύεται άμεσα (σε διάστημα $1/4$ του κύκλου) από τον ανιχνευτή κορεσμού που διαθέτει ο ψηφιακός ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας, και μεταθέτει το σημείο λειτουργίας στην περιοχή επιπρόσθετης συγκράτησης (Add-on restraint) αποτρέποντας έτσι την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου.

Λειτουργία άμεσης ενεργοποίησης Η/Ν χωρίς συγκράτηση (High unrestraint trip):

Σε περιπτώσεις εμφάνισης ενός μεγάλου ρεύματος σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας, ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασία θα πρέπει να είναι σε θέση να δώσει ακαριαία εντολή για TRIP, χωρίς να λάβει υπόψη του το ρεύμα συγκράτησης. Βασική προϋπόθεση αυτής της λειτουργίας είναι το ρεύμα σφάλματος που ανιχνεύει ο ηλεκτρονόμος να είναι μεγαλύτερο από ένα προκαθορισμένο όριο. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι πολύ σημαντικό ρόλο στην ρύθμιση αυτού του ορίου παίζει η εμπέδηση που εμφανίζει ο μετασχηματιστής ισχύος, καθώς η εμπέδηση του μετασχηματιστή θα περιορίσει ως ένα βαθμό το ρεύμα του σφάλματος. Έτσι σε περίπτωση όπου ο υπό προστασία μετασχηματιστής ισχύος εμφανίζει μεγάλη εμπέδηση, το όριο αυτό δεν θα πρέπει να ξεπερνά ποτέ το μέγιστο αναμενόμενο σφάλμα εκτός της ζώνης προστασίας. Σε μετασχηματιστές ισχύος το όριο αυτό υπολογίζεται από την εξίσωση eq. 3-23:

$$\frac{1}{u_{transf}} \times I_{N-transf} \qquad \textbf{eq. 3-23}$$

Συμπερασματικά, η χρήση των ψηφιακών ηλεκτρονόμων διαφορικής προστασίας παρουσιάζει πλεονεκτήματα που σχετίζονται με:

- ✓ Υψηλή αντοχή του συστήματος σε περιπτώσεις κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως, καθώς πλέον οι ποιο εξελιγμένοι ηλεκτρονόμοι είναι εφοδιασμένοι με σύστημα ανίχνευσης κορεσμού όπου αυτόματα μετατοπίζει την χαρακτηριστική λειτουργίας τοη ηλεκτρονόμου αποτρέποντας έτσι την εντολή για TRIP.
- ✓ Άμεση αναγνώριση ρευμάτων μαγνήτισης (inrush current) καθώς όλοι οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι εφαρμόζουν αλγορίθμους αναγνώρισης και διάκρισης ρεύματος σφάλματος από ρεύμα μαγνήτισης
- ✓ Άμεση αναγνώριση καταστάσεων υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή
- ✓ Εντολή για TRIP του ηλεκτρονόμου μέσα σε διάστημα 1.5 κύκλων
- ✓ Δυνατότητα ταχύτατης εντολής για TRIP σε διάστημα <1 κύκλου σε καταστάσεις ακραίων σφαλμάτων όπου επιβάλλεται η ακαριαία ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας
- ✓ Απαλοιφή προβλημάτων που σχετίζονται με την δημιουργία λανθασμένων διαφορικών ρευμάτων εξαιτίας μετασχηματιστών με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (OLTC). Αυτή η παράμετρος αποτελεί ένα μεγάλο πλεονέκτημα, διότι με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ορθή λειτουργία της διαφορικής προστασίας ανεξάρτητα από την θέση της ακίδας λήψης του μετασχηματιστή με OLTC.
- ✓ Προστασία του μετασχηματιστή από σφάλματα που συμβαίνουν κοντά στον ουδέτερο κόμβο μετασχηματιστή με γειωμένο τον αστέρα, ή μεταξύ των τυλιγμάτων του.

3.5.1.7 Μέθοδοι διάκρισης ρεύματος σφάλματος και ρεύματος μαγνήτισης

Όπως έγινε κατανοητό και από τα παραπάνω η λειτουργία της διαφορικής προστασίας μπορεί να επηρεαστεί από πολλούς παράγοντες όπως το ρεύμα μαγνήτισης κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή, καταστάσεις υπερδιέγερσης αλλά και κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως εξαιτίας κάποιου εξωτερικού σφάλματος. Κατά συνέπεια, για να εξασφαλιστεί η ακριβής και αποδοτική λειτουργία της διαφορικής προστασίας θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι ο ηλεκτρονόμος της διαφορικής προστασίας είναι ικανός να διακρίνει πότε ένα ρεύμα είναι ρεύμα σφάλματος εντός της προδιαγεγραμμένης ζώνης προστασίας και πότε το διαφορικό ρεύμα που εισέρχεται σε αυτόν είναι εξαιτίας των καταστάσεων που αναλύθηκαν ποιο πάνω. Σήμερα με την εξέλιξη των ψηφιακών ηλεκτρονόμων διαφορικής προστασίας (numerical differential protection), έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι οι οποίοι είναι σε θέση να διακρίνουν εύκολα καταστάσεις σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας του μετασχηματιστή από άλλες κατάστασης (ηλέκτριση μετασχηματιστή καταστάσεις υπερδιέγερσης κτλ.).

Επιπλέον, πολύ σημαντική παράμετρο όπου διακρίνει και διαχωρίζει κάθε αλγόριθμου είναι η ταχύτητα εκτέλεσης των αλγορίθμων ελέγχου καθώς αυτό θα επηρεάσει την ταχύτητα λειτουργίας της προστασίας. Όπως είναι γνωστό τα διεθνή πρότυπα της IEEE έχουν ορίσει ως επιτρεπτό όριο ενεργοποίησης της προστασίας των μετασχηματιστών τα 100 msec. Σήμερα με την εξέλιξη της έρευνας πάνω στους αλγόριθμους της διαφορικής προστασίας έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι όπου εκτελούν τους υπολογισμούς τους σε λιγότερο από 10 msec, πράγμα το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την ταχύτατη απόκριση της διαφορικής προστασίας καθώς με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται καλύτερα η προστασία του μετασχηματιστή. Συνεπώς με γνώμονα την ακριβή αλλά και γρήγορη απόκριση της διαφορικής προστασίας κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι αναγνώρισης:

A. **Μέθοδοι βασισμένοι στις αρμονικές (Harmonic restrain method):**

Αποτελεί την πιο γνωστή και ποιο διαδεδομένη μέθοδο που χρησιμοποιούν σήμερα οι ηλεκτρονόμοι της διαφορικής προστασίας. Όπως έγινε αναφορά και στην προηγούμενη ενότητα, κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή ισχύος το ρεύμα μαγνήτισης παίρνει πολύ μεγάλες τιμές. Παράλληλα, το ρεύμα μαγνήτισης εμφανίζει μεγάλο ποσοστό της $2^{ης}$ αρμονικής συνιστώσας. Αυτό το στοιχείο χρησιμοποιείται σήμερα από πολλούς ψηφιακούς ηλεκτρονόμους ως παράγοντας συγκράτησης έτσι ώστε να αποφεύγεται η λανθασμένη ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου στην φάση της ηλέκτρισης του μετασχηματιστή. Ποιο συγκεκριμένα, οι ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας συνήθως συγκρίνουν το μέτρο της δεύτερης αρμονικής συνιστώσας στο ρεύμα της διαφορικής προστασίας με το μέτρο στην θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος της διαφορικής προστασίας, και όταν το αποτέλεσμα της σύγκρισης ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο (συνήθως 12-20%) **[38]**, τότε παρεμποδίζεται η λειτουργία της διαφορικής προστασίας, αποτρέποντας έτσι την λανθασμένη λειτουργία του ηλεκτρονόμου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το ποσοστό των αρμονικών το εξάγουμε χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους με ποιο διαδεδομένη την χρήση της ανάλυσης Fourier με χρήση ημιτονοειδών και συν-ημιτονοειδών συναρτήσεων.

Ο πίνακας που ακολουθεί, αναφέρει αναλυτικά το αρμονικό περιεχόμενο αλλά και το ποσοστό της DC συνιστώσας κατά την διάρκεια της ηλέκτρισης ενός μετασχηματιστή. Όπως είναι φανερό και από τον πίνακα, το αρμονικό περιεχόμενο της $2^{ης}$ αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος καταλαμβάνει και το μεγαλύτερο ποσοστό ,63% της θεμελιώδους αρμονικής.

Πίνακας 3-8 Αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος μαγνήτισης (inrush current)

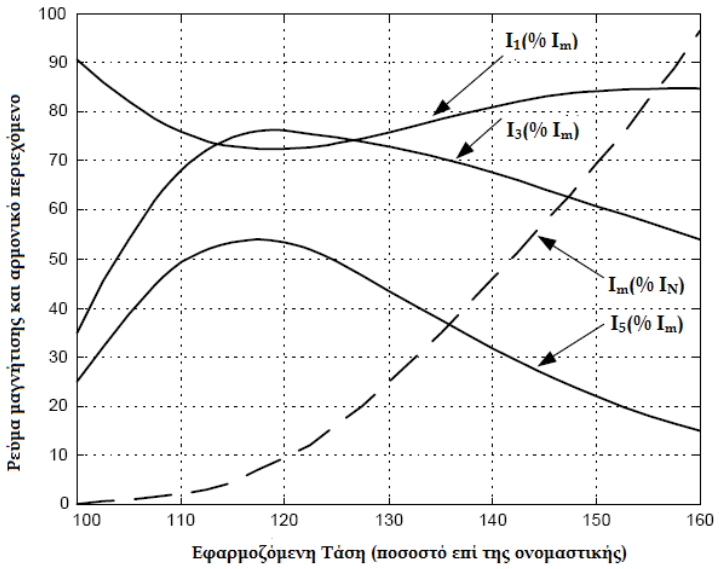
Τάξη αρμονικής	**Ποσοστό επί της θεμελιώδους (%)**
$2^{η}$	63
$3^{η}$	26.8
$4^{η}$	5.1
$5^{η}$	4.1
$6^{η}$	3.7
$7^{η}$	2.4
DC-Συνιστώσα	55

Από την άλλη μεριά, εκτός από την κατάσταση της ηλέκτρισης του μετασχηματιστή, το φαινόμενο της υπερδιέγερσης αποτελεί και αυτό μία περίπτωση εμφάνισης ανώτερων αρμονικών κυρίως της $3^{ης}$ αλλά και $5^{ης}$ τάξης. Ο πίνακας που ακολουθεί περιγράφει το αρμονικό περιεχόμενο ενός μετασχηματιστή κατά την περίπτωση της υπερδιέγερσης.

Πίνακας 3-9 Αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος σε κατάσταση υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή

Τάξη αρμονικής	**Ποσοστό επί της θεμελιώδους (%)**
$3^{η}$	49.2
$5^{η}$	21.7
$7^{η}$	8.1

Στο Σχήμα 3.30 που ακολουθεί, απεικονίζεται το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος διέγερσης σαν συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Όπως είναι φανερό, καθώς αυξάνεται η τάση αυξάνεται το ρεύμα διέγερσης και κατ' επέκταση ο κορεσμός. Επίσης στο Σχήμα 3.30 οι περιττές αρμονικές του ρεύματος διέγερσης απεικονίζονται ως ποσοστό της θεμελιώδους αρμονικής. Όπως είναι ξεκάθαρο οι περιττές αρμονικές του ρεύματος διέγερσης αρχικά φαίνεται να αυξάνονται, όμως όταν η υπέρταση κυμαίνεται από 115-120%, το περιεχόμενο των περιττών αρμονικών αρχίζει να μειώνεται αισθητά.



Σχήμα 3.30 Αρμονικό περιεχόμενο Μ/Σ σε κατάσταση υπερδιέγερσης ως προς την εφαρμοζόμενη τάση

Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή, καθώς εάν ο μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένος σε τρίγωνο, η $3^{η}$ αρμονική του ρεύματος διέγερσης εγκλωβίζεται στο τρίγωνο και δεν περνά στο κύκλωμα της διαφορικής προστασίας. Επιπρόσθετα, η κυματομορφή του ρεύματος μαγνήτισης σε έναν μετασχηματιστή με συνδεσμολογία τριγώνου δεν είναι ίδια με έναν μετασχηματιστή συνδεσμολογίας αστέρα και αυτό διότι τα φασικά ρεύματα του μετασχηματιστή συνδεσμολογίας τριγώνου δημιουργούνται από τα τυλίγματα των δύο κορμών του πυρήνα του μετασχηματιστή. Αυτό αποτελεί μία κρίσιμη λεπτομέρεια στις ρυθμίσεις της διαφορικής προστασίας όπου δεν θα πρέπει να παραλείπεται.

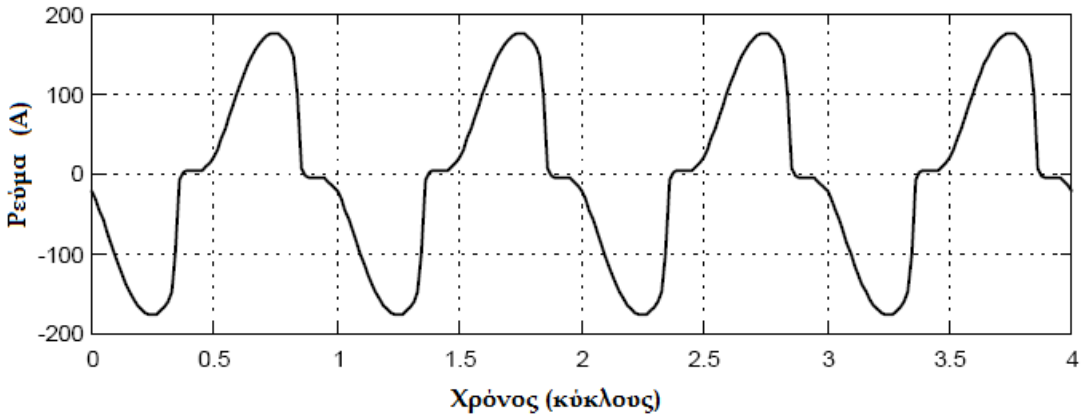
Ποιο αναλυτικά, κατά την ενεργοποίηση μετασχηματιστή ισχύος συνδεσμολογίας τριγώνου, τα περιττά πολλαπλάσια του ρεύματος μαγνήτισης ($3^{η}$, $9^{η}$ αρμονική) ακολουθούν μία κυκλική πορεία εντός του τριγώνου και εγκλωβίζονται. Αυτό συμβαίνει για το λόγο ότι οι περιττές αρμονικές του ρεύματος μαγνήτισης είναι σε φάση μεταξύ τους όπως ακριβώς συμβαίνει και με τη μηδενική ακολουθία του ρεύματος σε μετασχηματιστές με τρίγωνο όπου εγκλωβίζεται. Κατά συνέπεια, σε αυτή την περίπτωση βασικό κριτήριο συγκράτησης της διαφορικής προστασίας αποτελεί το αρμονικό περιεχόμενο της $5^{ης}$ αρμονικής. Βέβαια, το ποσοστιαίο αρμονικό περιεχόμενο της $5^{ης}$ αρμονικής

Επίσης ένα άλλο φαινόμενο το οποίο θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη είναι ο κορεσμός των μετασχηματιστών εντάσεως. Όπως έχουμε προαναφέρει, ο κορεσμός ενός μετασχηματιστή εντάσεως μπορεί να προκληθεί εξαιτίας της AC αλλά και DC-συνιστώσας του ρεύματος. Όσον αφορά την περίπτωση του AC-κορεσμού, αυτή συνδέεται καθαρά με την ικανότητα του μετασχηματιστή εντάσεως να αναπαράγει στο δευτερεύον πιστά το ρεύμα του πρωτεύοντος. Από την άλλη μεριά η εμφάνιση της DC-συνιστώσας(που αποτελεί και την χειρότερη περίπτωση κορεσμού) είναι συνδεδεμένη κυρίως με σφάλματα αλλά και άλλες καταστάσεις όπως η ηλέκτριση του μετασχηματιστή, η εκκίνηση ενός κινητήρα ή ακόμα και ο συγχρονισμός γεννητριών στο σύστημα. Το στοιχείο βέβαια που ξεχωρίζει την DC-συνιστώσα σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις είναι ο χρόνος εξάλειψης του φαινομένου (Decay time). Κατά συνέπεια, εφόσον ο χρόνος εξάλειψης της DC-συνιστώσας αλλάξει σε κάθε περίπτωση, αλλάζει και ο χρόνος κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως. Αυτό αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο που θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη κατά την μελέτη της διαφορικής

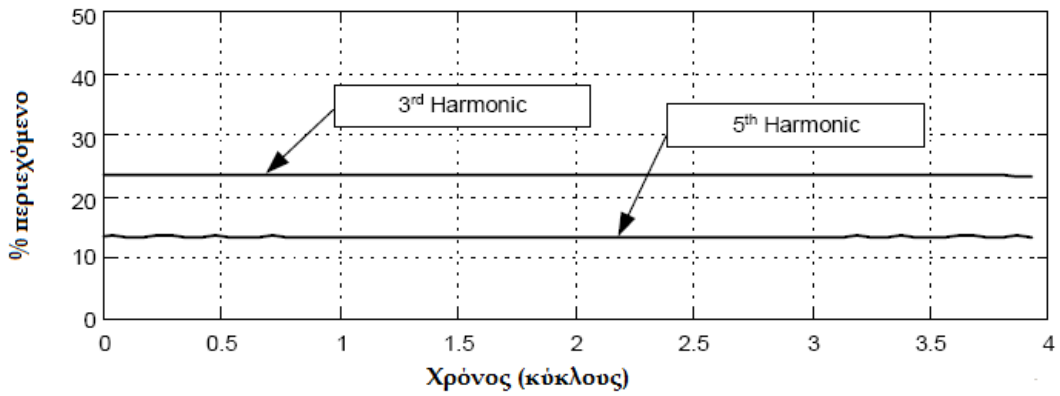
προστασίας, καθώς μπορεί να δημιουργήσει λανθασμένα ρεύματα στην διαφορική προστασία και κατά συνέπεια την μη επιθυμητή ενεργοποίηση της.

Βέβαια, ο κορεσμός των μετασχηματιστών εντάσεως εκτός από DC-συνιστώσα, εμφανίζει άρτιες αλλά και περιττές αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος ιδίως σε περιπτώσεις ασύμμετρου σφάλματος. Αυτή η παράμετρος αποτελεί ένα σημείο κλειδί στην σωστή ρύθμιση της διαφορικής προστασίας καθώς σε περίπτωση όπου η διαφορική προστασία έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρεμποδίζεται η λειτουργία της μόνο στις άρτιες αρμονικές (π.χ $5^{ης}$ τάξης αρμονικές) , κατά πάσα πιθανότητα να αποτύχει η λειτουργία της διαφορικής προστασίας σε περίπτωση όπου το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος ενός κορεσμένου μετασχηματιστή εντάσεως υπερβεί το όριο ρύθμισης του ηλεκτρονόμου. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να υπάρχει ένα χρονικό περιθώριο όπου να παρεμποδίζεται η λειτουργία της διαφορικής προστασίας έτσι ώστε να εξαλειφθεί η DC-συνιστώσα του ρεύματος και να επανέλθει ο μετασχηματιστής εντάσεως σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Όπως σημειώθηκε και ποιο πάνω, το είδος του σφάλματος (συμμετρικό ή ασύμμετρο), αλλά και ο χρόνος εξάλειψης της DC-συνιστώσας του ρεύματος αποτελούν δύο παράγοντες που καθορίζουν το αρμονικό περιεχόμενο. Ποιο συγκεκριμένα, κατά την εξάλειψη της DC-συνιστώσας, το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή εντάσεως παρουσιάζει μόνο περιττές αρμονικές . Τυπικό παράδειγμα αποτελεί το Σχήμα 3.31 όπου απεικονίζει το ρεύμα στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή εντάσεως σε κατάσταση συμμετρικού σφάλματος. Ακόμα, το Σχήμα 3.32 απεικονίζει το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος για την ίδια περίπτωση, επιβεβαιώνοντας την παρουσία μόνο περιττών αρμονικών σε περίπτωση συμμετρικού σφάλματος.



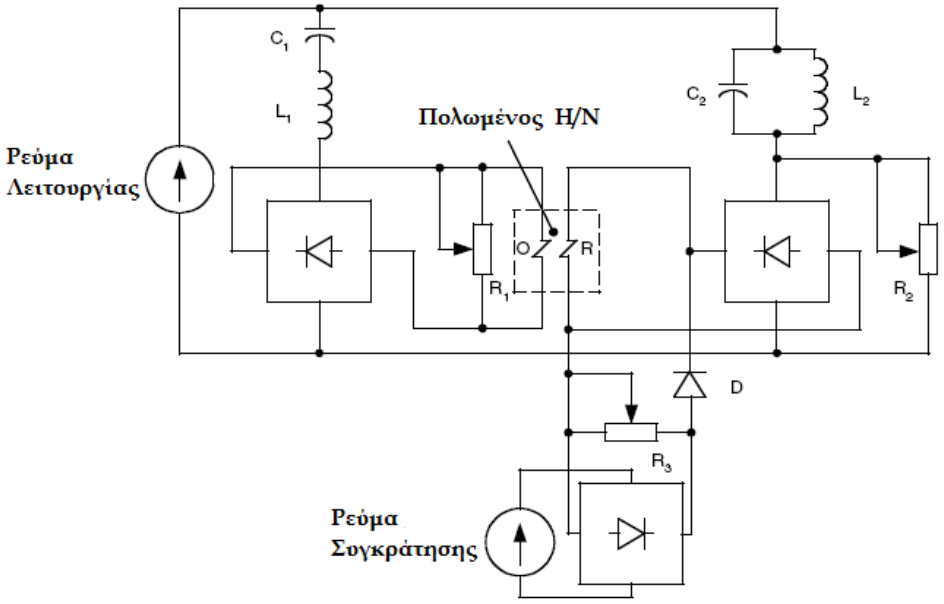
Σχήμα 3.31 ρεύμα στο δευτερεύον Μ/Σ εντάσεως εξαιτίας συμμετρικού σφάλματος



Σχήμα 3.32 Αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος στο δευτερεύον σε περίπτωση συμμετρικού σφάλματος

Όπως προαναφέρθηκε, ορισμένοι ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας λαμβάνουν ως κριτήριο ενεργοποίησης ή παρεμπόδισης το αρμονικό περιεχόμενο του διαφορικού ρεύματος που μετρούν.

Οι πρώτοι ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας χρησιμοποιούσαν όλες τις αρμονικές για την λειτουργία της συγκράτησης. Αυτή η μέθοδος εξασφάλιζε υψηλή συγκράτηση ιδίως σε περιπτώσεις εμφάνισης ρεύματος μαγνήτισης (inrush current) κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή ισχύος ή ακόμα και σε περίπτωση κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως. Το Σχήμα 3.33 που ακολουθεί αποτελεί ένα παράδειγμα ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας όπου χρησιμοποιεί το αρμονικό περιεχόμενο του διαφορικού ρεύματος για να διακρίνει καταστάσεις σφάλματος εντός ζώνης προστασίας, ή άλλου είδους καταστάσεις όπου και θα πρέπει να παρεμποδιστεί ή λειτουργία του.



Σχήμα 3.33 Η/Ν Διαφορικής προστασίας με χρήση συγκράτησης αρμονικών

Ποιο αναλυτικά: το ρεύμα λειτουργίας όπου απεικονίζεται στην είσοδο του κυκλώματος αποτελεί το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων εντός της ζώνης προστασίας. Από την άλλη μεριά, το ρεύμα συγκράτησης παρέχεται μέσω βοηθητικών μετασχηματιστών εντάσεως (δεν απεικονίζονται στο σχήμα) που διαθέτουν δύο πρωτεύοντα τυλίγματα. Το τελικό ρεύμα συγκράτησης δίνεται από την διανυσματική διαφορά μεταξύ των ρευμάτων εντός της ζώνης προστασίας όπως περιγράφηκε από την εξίσωση eq. 3-3.

Ο πολωμένος ηλεκτρονόμος (polarized relay) που απεικονίζεται στην παραπάνω διάταξη, αποτελεί το κύριο στοιχείο λειτουργίας αυτού του ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας. Σκοπός του πολωμένου ηλεκτρονόμου είναι η σύγκριση μεταξύ των ανορθωμένων ρευμάτων λειτουργίας και συγκράτησης. Έτσι, ο πολωμένος ηλεκτρονόμος δίνει εντολή ενεργοποίησης (TRIP) όταν το ρεύμα στο πηνίο λειτουργίας του εμφανίζεται να είναι μεγαλύτερο του ρεύματος στο πηνίο συγκράτησης.

Επιπρόσθετα, το ρεύμα συγκράτησης του ηλεκτρονόμου της διαφορικής προστασίας περνά μέσα από το πηνίο συγκράτησης του πολωμένου ηλεκτρονόμου παρέχοντας έτσι την δυνατότητα ποσοστιαίας διαφορικής προστασίας. Κατά συνέπεια, ο πολωμένος ηλεκτρονόμος συγκρίνει την θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος λειτουργίας με ένα σήμα συγκράτησης που αποτελείται από τις αρμονικές του ρεύματος λειτουργίας αλλά και το αφιλτράριστο ρεύμα συγκράτησης. Κατά συνέπεια η συνθήκη ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου της διαφορικής προστασίας περιγράφεται από την εξίσωση του ακολουθεί:

$$I_{OP} > SLP \times I_{RES} + K_2 \times I_2 + K_3 \times I_3 + \cdots \qquad \textbf{eq. 3-24}$$

Όπου :

I_{OP}: είναι η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος λειτουργίας

I_2, I_3: αποτελούν τις ανώτερες αρμονικές του ρεύματος λειτουργίας

K_2, K_3: σταθερές

Από την άλλη μεριά στο κύκλωμα εμφανίζεται ένα πλήθος αντιστάσεων με διαφορετικό αντικείμενο λειτουργίας.

Ποιο αναλυτικά:

Αντίσταση $\boldsymbol{R_1}$:ορίζει το ελάχιστο ρεύμα ενεργοποίησης της διαφορικής προστασίας,

Αντίσταση $\boldsymbol{R_2}$:ορίζει το επίπεδο της αρμονικής συγκράτησης στον ηλεκτρονόμο.

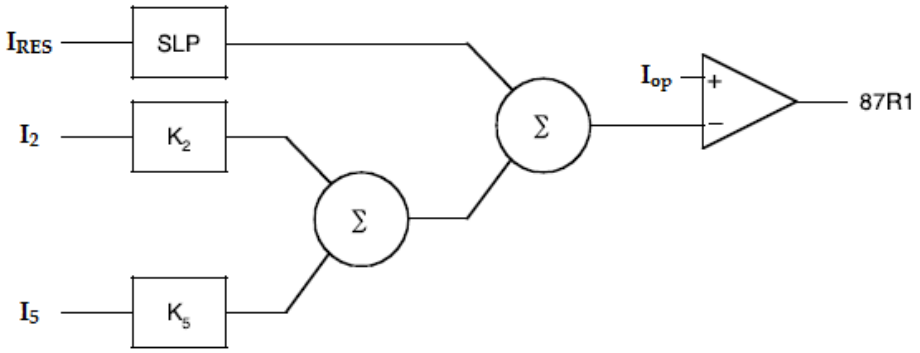
Αντίσταση $\boldsymbol{R_3}$**:** προσαρμόζει την κλίση της χαρακτηριστικής (ποσοστιαίας διαφορικής προστασίας). Έτσι ανάλογα με την θέση της ακίδας λήψης η κλίση της χαρακτηριστικής της διαφορικής προστασίας μεταβάλλεται από 15,25,40%

Ακόμα, όπως είναι φανερό και από το παραπάνω σχήμα και στο κύκλωμα που τροφοδοτεί το πηνίο λειτουργίας αλλά και συγκράτησης του πολωμένου ηλεκτρονόμου συνδέονται δύο φίλτρα L_1, C_1 & L_2, C_2 (αντίστοιχα) με λειτουργία στα 60 Hz. Η λειτουργία αυτών των δύο φίλτρων σχετίζεται με την διαδικασία ενεργοποίησης του μετασχηματιστή ισχύος και την εμφάνιση αρμονικών αλλά και DC-συνιστώσας. Σκοπός του φίλτρου L_1, C_1 είναι να μπλοκάρει την DC-συνιστώσα από το πηνίο λειτουργίας του πολωμένου ηλεκτρονόμου. Αντίθετα, το φίλτρο L_2, C_2 επιτρέπει την διέλευση της DC-συνιστώσας αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία και παρεμποδίζοντας έτσι την ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας σε τέτοιες συνθήκες.

Οι Einval και Linders **[45]** πρώτοι κατασκεύασαν έναν τριφασικό ηλεκτρονόμο διαφορικής προστασίας με συγκράτηση της 2ης και 5ης αρμονικής συνιστώσας, έτσι ώστε να παρεμποδίζεται η λειτουργία του ηλεκτρονόμου σε καταστάσεις ενεργοποίησης αλλά και υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή ισχύος. Ο ηλεκτρονόμος αυτός περιείχε βοηθητικούς μετασχηματιστές εντάσεως με διάκενο αέρα, και παρήγαγε δευτερεύοντα σήματα τάσης φιλτράροντας την DC-συνιστώσα από τα εισερχόμενα ρεύματα. Η συνθήκη λειτουργίας αυτού του τριφασικού ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας περιγράφεται από την εξίσωση που ακολουθεί:

$$I_{OP} > SLP \times I_{RES} + \sum_{n=1}^{3} (K_2 \times I_2 + K_5 \times I_5) \qquad \textbf{eq. 3-25}$$

Όπως είναι φανερό και από την παραπάνω εξίσωση η ποσότητα της αρμονικής συγκράτησης είναι ανάλογη του αθροίσματος των ρευμάτων της 2ης και 5ης αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος και για τα τρία διαφορικά στοιχεία του ηλεκτρονόμου. Το Σχήμα 3.34 που ακολουθεί απεικονίζει το λογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας με συγκράτηση της 2ης και 5ης αρμονικής. Όπως είναι φανερό και από το σχήμα ο ηλεκτρονόμος απαρτίζεται από τρία διαφορετικά στοιχεία. Κατά συνέπεια η εντολή για TRIP του ηλεκτρονόμου, δίνεται ακόμα και στην περίπτωση όπου ένα από τα τρία στοιχεία του ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο.



Σχήμα 3.34 Λογικό διάγραμμα Η/Ν διαφορικής προστασίας με παρεμπόδιση 2ης & 5ης αρμονικής

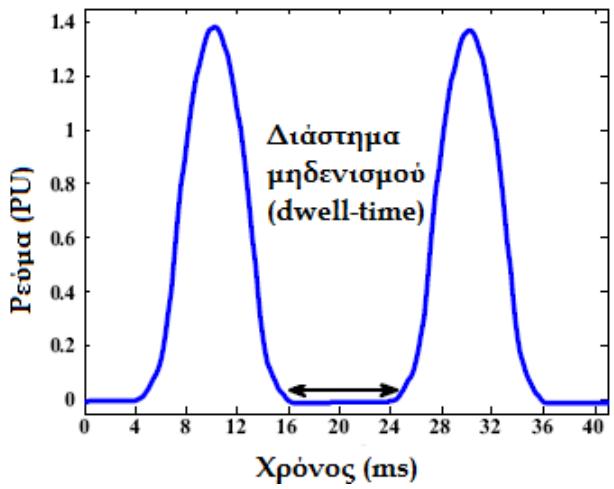
Σήμερα, οι περισσότεροι ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας χρησιμοποιούν την μέθοδο αναγνώρισης των αρμονικών και ποιο συγκεκριμένα ένα μεγάλο πλήθος εμπορικών ηλεκτρονόμων διαφορικής προστασίας εξετάζει κάθε φορά το λόγο μεταξύ της 2ης αρμονικής με την θεμελιώδης αρμονική του διαφορικού ρεύματος για την διάκριση μεταξύ σφαλμάτων εντός ζώνης προστασίας και καταστάσεις ενεργοποίησης του μετασχηματιστή. Συνήθως αυτός ο λόγος κυμαίνεται μεταξύ 12-20%

B. Μέθοδοι βασισμένοι στην διαμόρφωση των κυματομορφών (Wavelet transformation):

Εκτός από την μέθοδο αναγνώρισης των αρμονικών που αναλύθηκε ποιο πάνω, μία άλλη μέθοδος που χρησιμοποιούν οι ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας για τη διάκριση μεταξύ ενός ρεύμα σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας αλλά και ενός ρεύματος μαγνήτισης (inrush current) που εμφανίζεται κατά την ενεργοποίησης των μετασχηματιστών ισχύος αποτελεί και η μέθοδος αναγνώρισης της κυματομορφής του διαφορικού ρεύματος.

Σε αυτή την μέθοδο χρησιμοποιούνται πολλές τεχνικές όπως για παράδειγμα η απόσταση διαδοχής μεταξύ των κορυφών του διαφορικού ρεύματος. Μία ακόμα πολύ γνωστή τεχνική που χρησιμοποιείται

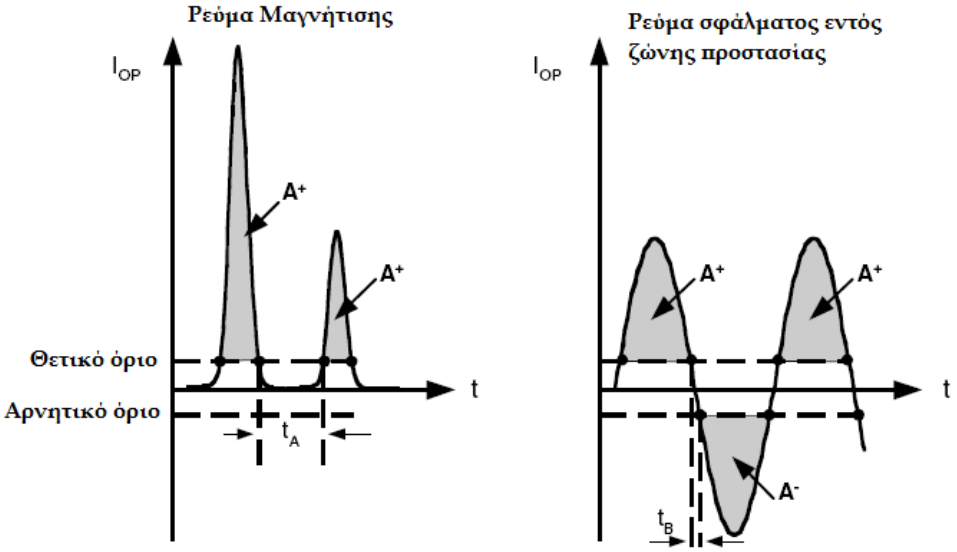
αναγνωρίζει το μήκος των χρονικών περιόδων όπου το διαφορικό ρεύμα είναι κοντά στο μηδέν (gap detection criterion). Τυπικό παράδειγμα μίας τέτοιας τεχνικής απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί



Σχήμα 3.35 Μέθοδος διάκρισης ρεύματος μαγνήτισης (gap detection criterion) ***[38]***

Κατά συνέπεια με αυτή την τεχνική ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας αναγνωρίσει την εμφάνισης ρεύματος μαγνήτισης όταν το διαφορικό ρεύμα που εισέρχεται στον ηλεκτρονόμο είναι περίπου το 5% του ονομαστικού ρεύματος για χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στο ένα τέταρτο της περιόδου.

Παρόμοια τεχνική με την προηγούμενη απεικονίζεται και στο σχήμα που ακολουθεί:

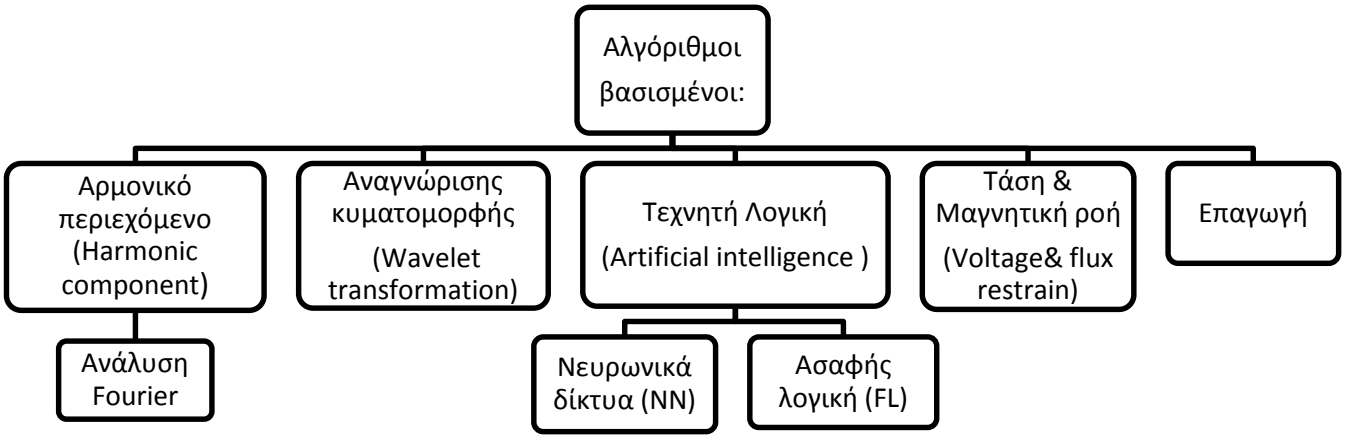


Σχήμα 3.36 Μέθοδος διάκρισης ρεύματος μαγνήτισης & ρεύματος σφάλματος μέσω σύγκρισης ορίων (θετικών και αρνητικών)

Σε αυτή την περίπτωση το διαφορικό ρεύμα συγκρίνεται κάθε φορά με ένα θετικό και ένα αρνητικό όριο με το ίδιο μέτρο. Αυτή η σύγκριση βοηθά τον καθορισμό της διάρκειας των χρονικών διαστημάτων κατά

τα οποία η απόλυτη τιμή του ρεύματος είναι μικρότερη από την απόλυτη τιμή του ορίου. Αυτό το χρονικό διάστημα έπειτα συγκρίνεται ψηφιακά με μία σταθερή τιμή ίση με το ένα τέταρτο της περιόδου. Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.36 σε περίπτωση ενεργοποίησης του μετασχηματιστή ισχύος το χρονικό διάστημα t_A μεταξύ των κυματομορφών του ρεύματος μαγνήτισης είναι μεγαλύτερο από το ένα τέταρτο της περιόδου με αποτέλεσμα την παρεμπόδιση της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου. Όμως από την άλλη πλευρά σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας το χρονικό διάστημα t_B της κυματοφορφής του ρεύματος είναι μικρότερο από το ένα τέταρτο της περιόδου ενεργοποιώντας έτσι την διαφορική προστασία.

Εκτός βέβαια από τις προαναφερθήσες μεθόδους σήμερα η έρευνα και η ανάπτυξή στον τομέα της διαφορικής προστασίας έχει επιφέρει την δημιουργία νέων τεχνικών διάκρισης μεταξύ εσωτερικών σφαλμάτων αλλά και άλλων καταστάσεων που οδηγούν στην λανθασμένη ενεργοποίηση της προστασίας. Έτσι σήμερα έχουν αναπτυχθεί ηλεκτρονόμοι οι οποίοι χρησιμοποιούν αλγόρυθμους βασισμένους σε τεχνητή λογική αλλά και μέθοδοι όπου βασίζονται στα χαρακτηριστικά της τάσης και της επαγωγής στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Στο Σχήμα 3.37 που ακολουθεί γίνεται μία αναφορά σε μερικές μεθόδους διάκρισης που έχουν αναπτυχθεί. Ωστόσω αξίζει να σημειωθεί ότι σήμερα επικρατέστερη και ποιο αξιόπιστη μέθοδος διάκρισης είναι η μέθοδος βασισμένη στο αρμονικό περιεχόμενο του διαφορικού ρεύματος.



Σχήμα 3.37 Μέθοδοι διάκρισης εσωτερικών σφαλμάτων και άλλων καταστάσεων σε ηλεκτρονόμους διαφορικής προστασίας

C. Μέθοδοι βασισμένοι στην τάση και την μαγνητική ροή (Voltage & Flux restraint):

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση εκδήλωσης εσωτερικού σφάλματος, οι φασικές τάσεις εμφανίζουν μειωμένη τιμή. Αντίθετα, σε καταστάσεις υπερδιέγερσης ή ενεργοποίησης του μετασχηματιστή οι φασικές τάσεις δεν παρουσιάζουν τέτοια μεταβολή. Αυτό το στοιχείο χρησιμοποιούν κάποιοι ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας για να διακρίνουν ένα εσωτερικό σφάλμα εντός της προστατευόμενης ζώνης προστασίας του μετασχηματιστή με μία άλλη κατάσταση. Κατά συνέπεια, οι συγκεκριμένοι ηλεκτρονόμοι παρακολουθούν κάθε φορά την μεταβολή στις φασικές τάσεις και παρεμποδίζεται η λειτουργία (restrain for tripping) τους σε περίπτωση όπου η φασική τάση είναι πάνω από κάποιο όριο.

Παράλληλα με αυτή την μέθοδο, υπάρχουν τεχνικές όπου εκτός από την μεταβολή της φασικής τάσης ελέγχουν την μεταβολή την μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή**.[46]** Κατά συνέπεια, από την μεταβολή της μαγνητικής ροής στον πυρήνα ο ηλεκτρονόμος διακρίνει καταστάσεις υπερδιέγερσης αλλά και ενεργοποίησης του μετασχηματιστή. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι κατά την φάση της ηλέκτρισης του μετασχηματιστή αλλά και σε καταστάσεις υπερδιέγερσης η τάση εξόδου του μετασχηματιστή εμφανίζει μεγάλη παραμόρφωση, και η μαγνητική ροή στον πυρήνα εμφανίζει μεγάλες τιμές. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό το κριτήριο, αλλά γνωρίζοντας ακριβώς και την ποσότητα της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή, ο αλγόριθμός αυτός διακρίνει καταστάσεις εσωτερικών σφαλμάτων αλλά και καταστάσεις διέγερσης και ηλέκτρισης του μετασχηματιστή και ανάλογα, ενεργοποιείται ή παρεμποδίζεται η λειτουργία του. Ωστόσο, βασική προϋπόθεση στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι ο ακριβής υπολογισμός της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή, διότι σε αντίθετη περίπτωση η μέθοδος αυτή δεν θα επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

D. Μέθοδοι βασισμένοι στην επαγωγή (inductance based method):

Αυτή η μέθοδος διάκρισης μεταξύ εσωτερικών σφαλμάτων και άλλων καταστάσεων ενεργοποίησης της διαφορικής προστασίας στηρίζεται στο γεγονός ότι κατά την κανονική λειτουργία του μετασχηματιστή αλλά και σε περίπτωση εσωτερικού σφάλματος ο πυρήνας του μετασχηματιστή δεν είναι κορεσμένος. Επιπρόσθετα και στις δύο καταστάσεις το ρεύμα μαγνήτισης παίρνει πολύ μικρές τιμές. Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα ο μετασχηματιστής να λειτουργεί στην γραμμική περιοχή όπου η μαγνητική επαγωγή του είναι σχεδόν σταθερή. Ωστόσο, κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή το μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης που εμφανίζεται είναι αποτέλεσμα του κορεσμού του πυρήνα. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι, κατά την ενεργοποίηση του μετασχηματιστή η λειτουργία του πυρήνας του μετασχηματιστή εναλλάσσεται μεταξύ κορεσμένης και μη κορεσμένης περιοχής κάτι που προκαλεί δραστική μεταβολή στην μαγνητική επαγωγή.**[47]**

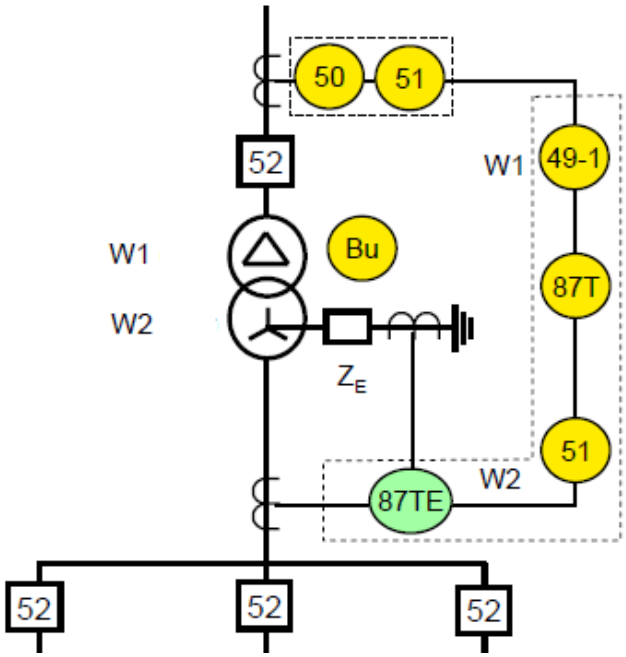
Συνεπώς από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το βασικό κριτήριο διάκρισης μεταξύ εσωτερικών σφαλμάτων και άλλων καταστάσεων (inrush current) που χρησιμοποιεί αυτή η μέθοδος , είναι η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής του πυρήνα(L_m). Ποιο αναλυτικά: σε περίπτωση κανονικής λειτουργίας αλλά και εσωτερικών σφαλμάτων η μαγνητική επαγωγή του πυρήνα εμφανίζεται σχεδόν σταθερή. Από την άλλη μεριά σε περίπτωση ενεργοποίησης του μετασχηματιστή και εμφάνισης ενός μεγάλου ρεύματος μαγνήτισης η μαγνητική επαγωγή του πυρήνα μεταβάλλεται δραστικά.

E. Μέθοδοι βασισμένοι σε τεχνητή λογική (Artificial intelligence):

Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη της επιστήμης των υπολογιστών έχει αρχίσει η ανάπτυξη μεθόδων διάκρισης εσωτερικών σφαλμάτων και καταστάσεων ενεργοποίησης του μετασχηματιστή με χρήση της τεχνητής λογικής. Σήμερα, η ποιο διαδεδομένη μορφή τεχνητής λογικής είναι τα νευρωνικά δίκτυα (neutral networks), αλλά και η ασαφής λογική (fuzzy logic). Αποτέλεσμα αυτών των τεχνικών είναι η κατασκευή γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithm) όπου λαμβάνουν πολλαπλά κριτήρια για την διάκριση μεταξύ εσωτερικών σφαλμάτων, καταστάσεων ενεργοποίησης του μετασχηματιστή αλλά και καταστάσεων υπερδιέγερσης του μετασχηματιστή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέθοδος αυτή να παρέχει ταχύτητα αποφάσεων αλλά και ακρίβεια.

3.5.2 Ηλεκτρονόμοι προστασίας έναντι σφαλμάτων γης (Restricted earth fault, ANSI code: 87N ή TE ή 64REF)

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε εκτενής ανάλυση της διαφορικής προστασίας, εξετάζοντας τα πολλαπλά πλεονεκτήματα της μεθόδου. Όμως στους μετασχηματιστές ισχύος εκτός από τα κύρια μέσα προστασίας όπως η διαφορική προστασία, συναντάμε και άλλα συμπληρωματικά μέσα προστασίας (back-up protection) με σκοπό την ολοκληρωμένη προστασία του μετασχηματιστή. Σε μία τέτοια κατηγορία ανήκουν και οι ηλεκτρονόμοι προστασίας έναντι σφαλμάτων γης (REF protection). Στο Σχήμα 3.38 που ακολουθεί, απεικονίζονται όλα τα μέσα προστασίας (κύρια και δευτερεύοντα) που θα πρέπει να διαθέτει ένας μετασχηματιστής ισχύος, για την πλήρη προστασία του. Όπως είναι φανερό, ο ηλεκτρονόμος γης εγκαθίστανται μεταξύ του ουδέτερου κόμβου του μετασχηματιστή και του δευτερεύοντος τυλίγματός του.

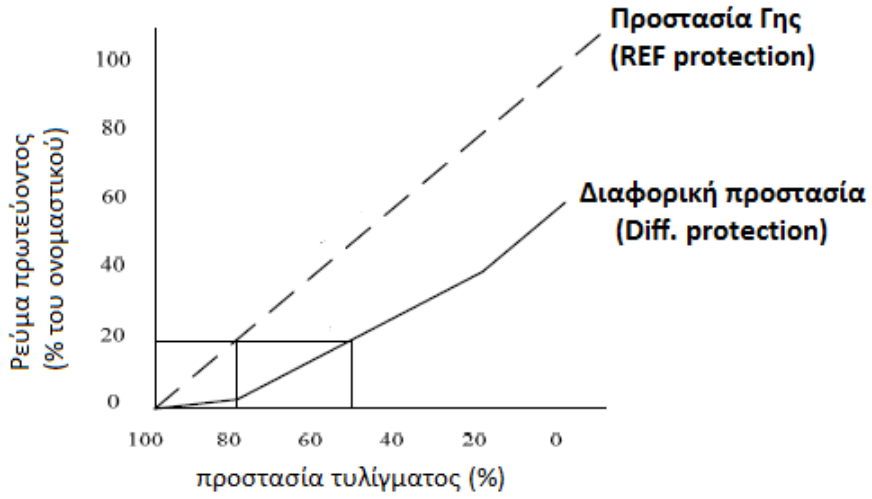


Σχήμα 3.38 Συμπληρωματικά μέσα προστασίας του μετασχηματιστή, εφαρμογή του H/N γης

Όπως προαναφέρθηκε η διαφορική προστασία αποτελεί το κύριο μέσο προστασίας στους μετασχηματιστές ισχύος εξαιτίας της γρήγορης απόκρισης της και της επιλεκτικότητας. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή εμφανίζει μειωμένη ευαισθησία στο να ανιχνεύσει σφάλματα μεταξύ τυλιγμάτων και γης που συμβαίνουν κοντά στον ουδέτερο κόμβο ενός γειωμένου μετασχηματιστή. Και αυτό διότι σε περίπτωση δημιουργίας σφάλματος μεταξύ τυλιγμάτων και γης η αύξηση του φασικού ρεύματος θα είναι τόσο μικρή όπου δεν θα είναι ανιχνεύσιμη στον ηλεκτρονόμο της διαφορικής προστασίας. Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ανάλογα με την θέση του σφάλματος αλλά και με την μέθοδο γείωσης του μετασχηματιστή ισχύος το φασικό ρεύμα σε κάθε περίπτωση διαφοροποιείται.**[48]**

Κατά συνέπεια, σε αυτή την περίπτωση η διαφορική προστασία δεν καλύπτει εξολοκλήρου την προστασία των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Το Σχήμα 3.39 συγκρίνει το ποσοστό προστασίας του τυλίγματος ενός μετασχηματιστή με την χρήση ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας και ηλεκτρονόμου γης. Σε περίπτωση όπου το ρεύμα πρωτεύοντος είναι 20% του ονομαστικού, ο ηλεκτρονόμος διαφορικής

προστασίας παρέχει προστασία μόνο στο 45% του τυλίγματος, ενώ ο ηλεκτρονόμος γης προστατεύει περισσότερο από το 78% του τυλίγματος.**[49]**



Σχήμα 3.39 Προστασία τυλίγματος του Μ/Σ μέσω Η/Ν διαφορικής προστασίας και Η/Ν γης (επί %)

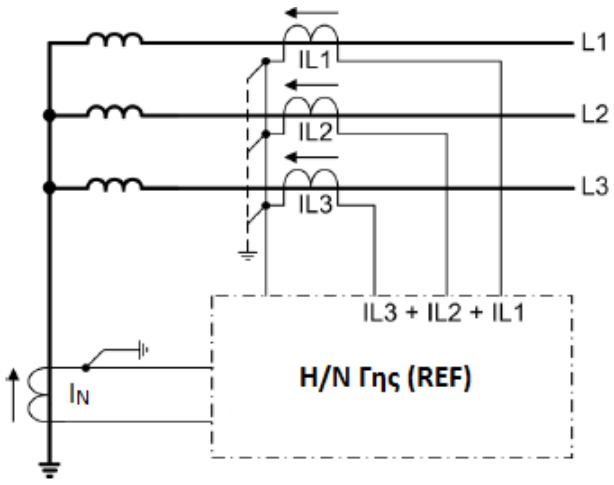
Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η διαφορική προστασία καλύπτει ένα μικρό ποσοστό σε περιπτώσεις σφαλμάτων που συμβαίνουν μεταξύ των τυλιγμάτων και γης. Για αυτό το σκοπό παράλληλα με την εφαρμογή των ηλεκτρονόμων διαφορικής προστασίας εγκαθίστανται και ηλεκτρονόμοι προστασίας έναντι σφαλμάτων γης.

3.5.2.1 Αρχή λειτουργίας των ηλεκτρονόμων γης (REF)

Απαραίτητη προϋπόθεση της εγκατάστασης αυτής της προστασίας είναι ο μετασχηματιστής ισχύος να είναι γειωμένος σε έναν ουδέτερο κόμβο (γείωση του κοινού σημείου σε μετασχηματιστές συνδεσμολογίας αστέρα, η γείωση του τριγώνου μέσω εξωτερικού μετασχηματιστή γείωσης (διάταξη broken delta)).

Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρονόμων γης είναι παρόμοια με εκείνη της διαφορικής προστασίας. Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στην σύγκριση μεταξύ των ρευμάτων που εισέρχονται και εξέρχονται εντός μίας προδιαγεγραμμένης ζώνης προστασίας. Αυτή η ζώνη προστασίας ορίζεται με βάση την θέση των ηλεκτρονόμων εντάσεως.

Σε αυτή την περίπτωση, η ζώνη προστασίας είναι ποιό περιορισμένη (σε σύγκριση με την ζώνη προστασίας της διαφορικής προστασίας) και ορίζεται μεταξύ του μετασχηματιστή εντάσεως (Neutral current transformer, NCT) που είναι συνδεδεμένος στον ουδέτερο κόμβο του μετασχηματιστή ισχύος, καθώς και μεταξύ των μετασχηματιστών εντάσεως που είναι συνδεδεμένοι σε κάθε φάση. Τυπικό παράδειγμα εφαρμογής της προστασίας αποτελεί το σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.40 Σύνδεση του Η/Ν γής (REF)

Συνεπώς όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, η προστασία γης αποτελεί και αυτή ένα είδος διαφορικής προστασίας, αφού ο ηλεκτρονόμος γης επιτηρεί και συγκρίνει (κατά μέτρο και φορά) το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας του ουδετέρου με το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας των φάσεων ($3 \times I_0$). Σκοπός του ηλεκτρονόμου γης είναι να διακρίνει άμεσα και γρήγορα, πότε ένα σφάλμα είναι εντός της ζώνης προστασίας και να ενεργήσει ακαριαία και πότε ένα σφάλμα είναι εκτός της ζώνης προστασίας όπου εκεί θα πρέπει να παρεμποδιστεί η λειτουργία του ηλεκτρονόμου. Η παρεμπόδιση της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου γης πραγματοποιείται μέσω της κατάλληλης σύνδεσης μεταξύ των μετασχηματιστών εντάσεως, όπου στη περίπτωση σφάλματος εκτός της ζώνης προστασίας, η μηδενική συνιστώσα του ρεύματος σφάλματος ακολουθεί μία παράπλευρη (bypass) πορεία και δεν περνά μέσα από τον ηλεκτρονόμο γης.

Όπως προαναφέρθηκε, η λειτουργία της προστασίας γης στηρίζεται στην ύπαρξη ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας εντός της προδιαγεγραμμένης ζώνης κάτι το οποίο μπορεί να συμβεί μόνο στην περίπτωση σφάλματος με συμμετοχή γης. Κατά συνέπεια, η προστασία έναντι σφαλμάτων γης μπορεί να έχει πολύ μεγάλη ευαισθησία ανεξάρτητα από το ρεύμα φορτίου. Βέβαια, το γεγονός ότι η προστασία γης αποτελεί μία πολύ ευαίσθητη αλλά και ταυτόχρονα γρήγορη προστασία, πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη ενεργοποίηση της. Για αυτό το σκοπό, είναι σημαντικό ο ηλεκτρονόμος να λαμβάνει σωστές μετρήσεις αλλά και οι μετασχηματιστές εντάσεως να είναι κατάλληλοι για αυτή την εφαρμογή.

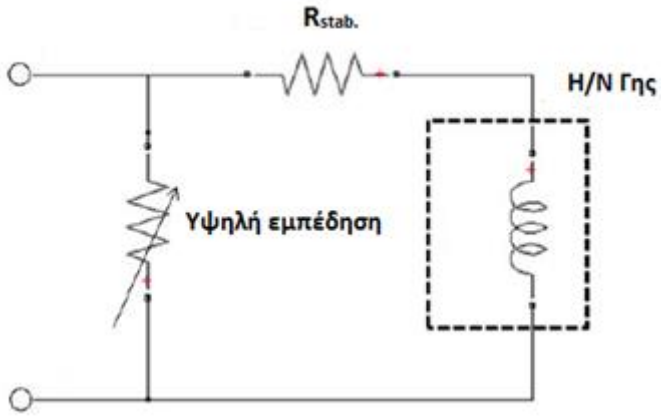
Γενικότερα, η σύνδεση των μετασχηματιστών εντάσεως στον ηλεκτρονόμο γης μπορεί να γίνει μέσω δύο βασικών διατάξεων:

- Υψηλής εμπέδισης (High-impedance REF)
- Χαμηλής εμπέδησης (Low-impedance REF)

Ποιο αναλυτικά:

A. Ηλεκτρονόμοι γης υψηλής εμπέδησης (High -impedance REF)

Στην μέθοδο αυτή ο ηλεκτρονόμος γης συνδέεται παράλληλα με μία υψηλή εμπέδηση, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.41 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.41 Η/Ν γης υψηλής εμπέδησης (High-impedance) [50]

Σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος η υψηλή τάση που θα αναπτύσσονταν στα άκρα του μετασχηματιστή εντάσεως θα μπορούσε να επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα τόσο στον μετασχηματιστή εντάσεως όσο και στον ηλεκτρονόμο. Για αυτό το λόγο, η σύνδεση του ηλεκτρονόμου γης και των μετασχηματιστών εντάσεως γίνεται μέσω μίας υψηλής εμπέδησης (μη γραμμικής αντίστασης) έτσι ώστε να μειώσει το μέτρο της τάσης σε περίπτωση σφάλματος. Κατά την διάρκεια του σφάλματος θεωρητικά η αντίσταση του ηλεκτρονόμου είναι μικρότερη από την εσωτερική αντίσταση της υψηλής εμπέδησης. Ωστόσο, για να διασφαλίσουμε υψηλότερη αντίσταση μεταξύ του ηλεκτρονόμου και της υψηλής εμπέδησης, εισάγεται στο κύκλωμα μία αντίσταση R_{stab}

1) Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά:

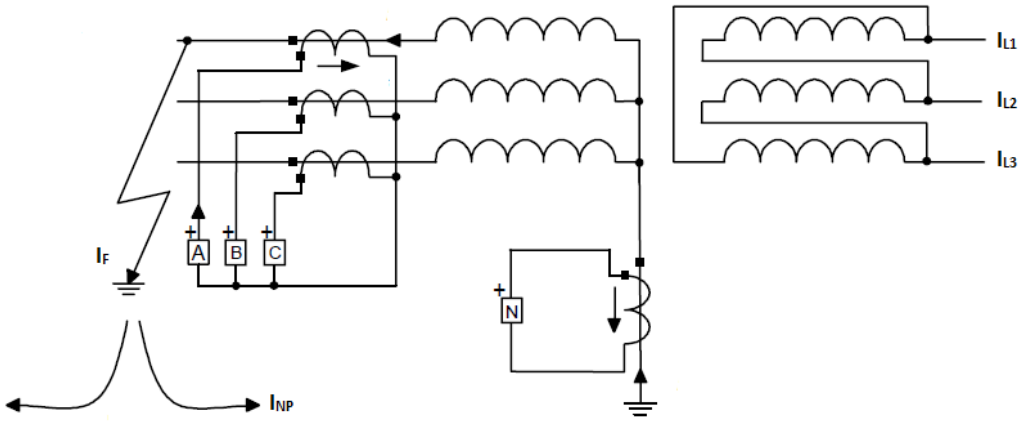
Ωστόσο, κατά την εγκατάσταση ηλεκτρονόμων γης υψηλής εμπέδησης θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη **[51]**

- Οι μετασχηματιστές εντάσεως μεταξύ των φάσεων και του ουδετέρου πρέπει να είναι ίδιου λόγου μετασχηματισμού,
- Οι μετασχηματιστές να έχουν ίδια χαρακτηριστικά κορεσμού,
- Για σφάλματα εκτός ζώνης, η τάση κορεσμού (knee-point voltage) των μετασχηματιστών εντάσεως να είναι μεγαλύτερη από την τάση της εν σειράς αντίστασης R_{stab}
- Η τάση μεταξύ του ηλεκτρονόμου αλλά και των μετασχηματιστών εντάσεως θα πρέπει πάντα να διατηρείται σε ασφαλή επίπεδα. Υπενθυμίζουμε ότι το ρεύμα μαγνήτισης των μετασχηματιστών εντάσεως εξαρτάται άμεσα από την εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα τους. Όμως η μεγάλη τάση στα άκρα τους θα οδηγούσε σε μεγάλα ρεύματα μαγνήτισης και κατ' επέκταση εγκυμονεί ο κίνδυνος του κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως.

Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ηλεκτρονόμοι γης υψηλής εμπέδησης παρουσιάζουν μεγάλη ανοχή σε καταστάσεις κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως εξαιτίας κάποιου εξωτερικού σφάλματος. Αυτό αποτελεί πολύ μεγάλο πλεονέκτημα έναντι των ηλεκτρονόμων γης χαμηλής εμπέδησης.

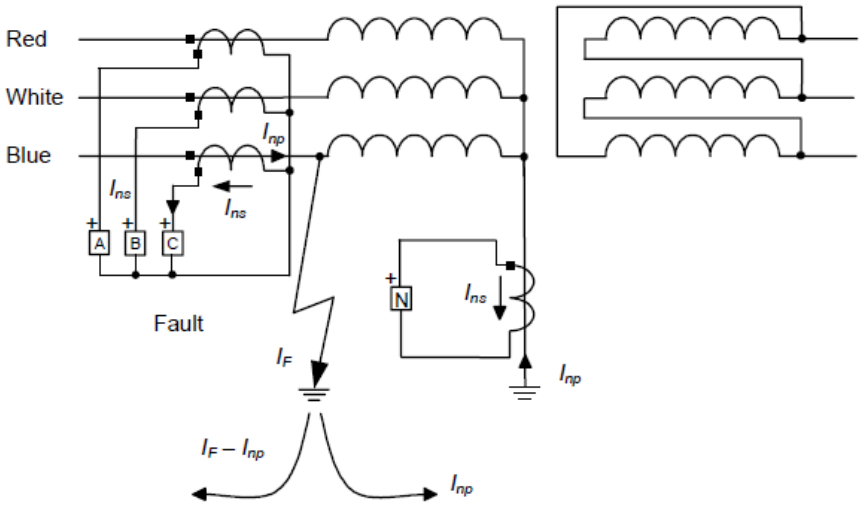
B. Ηλεκτρονόμοι γης χαμηλής εμπέδησης (Low- impedance REF)

Από την άλλη μεριά, στους ηλεκτρονόμους γης χαμηλής εμπέδησης η σύνδεση των μετασχηματιστών εντάσεως με τον ηλεκτρονόμο γης γίνεται απευθείας. Τα ρεύματα των φάσεων προστίθενται και συγκρίνονται εσωτερικά στον ηλεκτρονόμο, κατά συνέπεια δεν απαιτείται η σύνδεση κάποιας εμπέδησης όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη μέθοδο. Αυτή η μέθοδος σήμερα συναντάται ευρέως σε όλους τους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους, και ονομάστηκε έτσι εξαιτίας του γεγονότος ότι όλοι οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι παρουσιάζουν χαμηλή εμπέδηση. Το Σχήμα 3.42 που ακολουθεί περιγράφει την περίπτωση εμφάνισης σφάλματος εκτός της ζώνης προστασίας.



Σχήμα 3.42 κατάσταση εξωτερικού σφάλματος σε H/N γης υψηλής εμπέδησης

Από την άλλη μεριά, το Σχήμα 3.43 περιγράφει την κατάσταση εμφάνισης εσωτερικού σφάλματος .



Σχήμα 3.43 κατάσταση εσωτερικού σφάλματος σε H/N γης υψηλής εμπέδησης.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ηλεκτρονόμοι γης χαμηλής εμπέδησης βασίζονται στην μέτρηση της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος μετά και την αφαίρεση όλων των αρμονικών συνιστωσών. Και εδώ όπως και στην περίπτωση των ηλεκτρονόμων διαφορικής προστασίας, ο ηλεκτρονόμος υπολογίζει ένα διαφορικό ρεύμα (differential current), και ένα ρεύμα παρεμπόδισης (restraint current), για την εκτέλεση των απαραίτητων ενεργειών.

Ωστόσο, βασικό μειονέκτημα των ηλεκτρονόμων γης χαμηλής εμπέδησης είναι ότι δεν αποκρίνονται σωστά σε περίπτωση κορεσμού των μετασχηματιστών εντάσεως εξαιτίας κάποιου εξωτερικού σφάλματος όπως συμβαίνει με τους ηλεκτρονόμους γης υψηλής εμπέδησης

Από την άλλη μεριά, ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα το οποίο παρουσιάζουν οι ηλεκτρονόμοι γης χαμηλής εμπέδησης, έναντι των ηλεκτρονόμων γης υψηλής εμπεδησης, είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται οι μετασχηματιστές εντάσεως των φάσεων με τον μετασχηματιστή εντάσεως του ουδετέρου να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά (λόγο σπειρών, χαρακτηριστικά κορεσμού κ.α)

Βέβαια, η επιλογή μεταξύ των δύο μεθόδων σύνδεσης των ηλεκτρονόμων γης εξαρτάται κατά ένα μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών εντάσεως που είναι διαθέσιμοι, καθώς σε περίπτωση όπου δεν είναι διαθέσιμοι μετασχηματιστές εντάσεως με ίδιο λόγο μετασχηματισμού και ίδια χαρακτηριστικά η επιλογή ηλεκτρονόμων γης χαμηλής εμπέδησης είναι μονόδρομος.

3.5.3 Ηλεκτρονόμοι υπερέντασης (overcurrent protection ANSI code:50-51)

Οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης, αποτελούν και αυτοί ένα συμπληρωματικό μέσο προστασίας της διαφορικής προστασίας του μετασχηματιστή. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση τών μετασχηματιστώς μικρής ισχύος όπου οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης αποτελούν το κύριο μέσο προστασίας.

Σκοπός των ηλεκτρονόμων υπερέντασης είναι η προστασία του μετασχηματιστή από βραχυκυκλώματα που συμβαίνουν εκτός της ζώνης προστασίας της διαφορικής προστασίας. Συνήθως οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης εμπεριέχουν ένα στοιχείο στιγμιαίου χρόνου (instantaneous element), με σκοπό την προστασία του μετασχηματιστή από μεγάλα ρεύματα σφάλματος. Συνήθως οι ηλεκτρονόμοι υπερέντασης ρυθμίζονται στο 150% του ονομαστικού ρεύματος του μετασχηματιστή. Πολύ σημαντική παράμετρος αποτελεί, η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρονόμου όπου θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να αποφευχθεί η λειτουργία του σε περιπτώσεις ενεργοποίησης του μετασχηματιστή εξαιτίας του μεγάλου ρεύματος μαγνήτισης. Από την άλλη μεριά το ακαριαίο στοιχείο του ηλεκτρονόμου θα πρέπει να ρυθμιστεί στο 25% πάνω από το μέγιστο εξωτερικό σφάλμα αλλά και από το μέγιστο ρεύμα μαγνήτισης (inrush current).

Κεφάλαιο 4

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ Μ/Σ ΙΣΧΥΟΣ

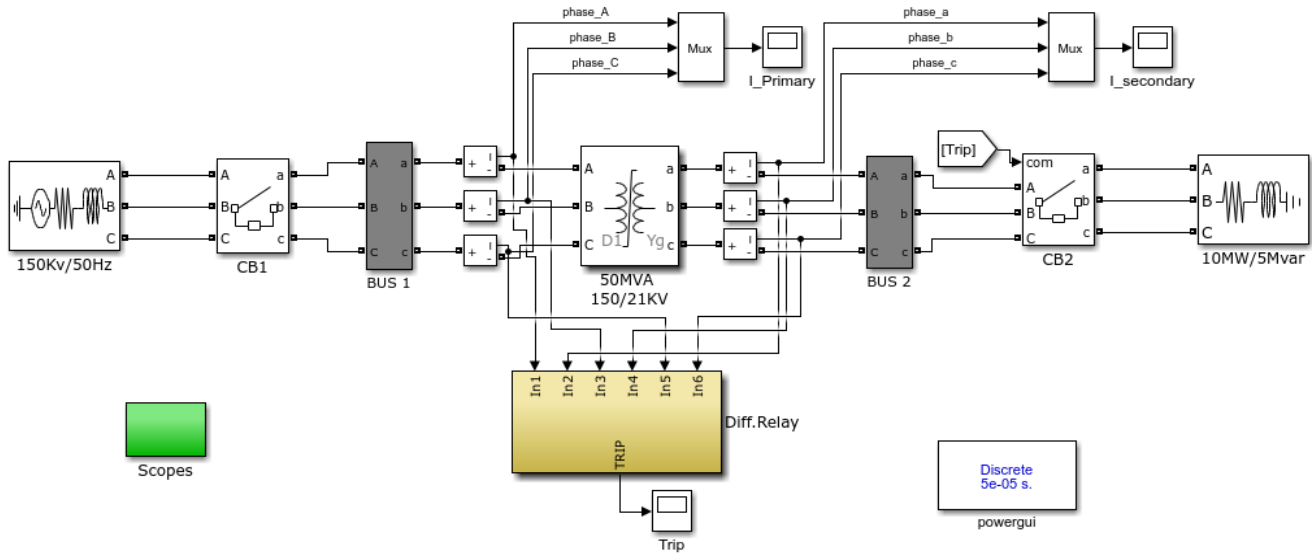
4 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε εκτενής ανάλυση της λειτουργίας της διαφορικής προστασίας στους μετασχηματιστές ισχύος. Παράλληλα, εξετάστηκαν και οι τεχνικές διάκρισης που εφαρμόζουν οι σύγχρονοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι διαφορικής προστασίας για την διάκριση των σφαλμάτων εντός και εκτός ζώνης προστασίας.

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθεί ο σχεδιασμός και η λειτουργία του συστήματος της διαφορικής προστασίας που υλοποιήθηκε, για την προστασία του μετασχηματιστή ισχύος. Κατόπιν, θα εξεταστεί η απόκριση του συστήματος της διαφορικής προστασίας που αναπτύχθηκε κάτω από διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του κυκλώματος.

4.1 Το εξεταζόμενο σύστημα

Στο Σχήμα 4.1 που ακολουθεί, απεικονίζεται το βασικό μοντέλο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab-Simulink, και που περιγράφει την βασική εφαρμογή της διαφορικής προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος.



Σχήμα 4.1 Μοντέλο του συστήματος στο Matlab-Simulink

Ποιο αναλυτικά:

Πηγή (three phase source)

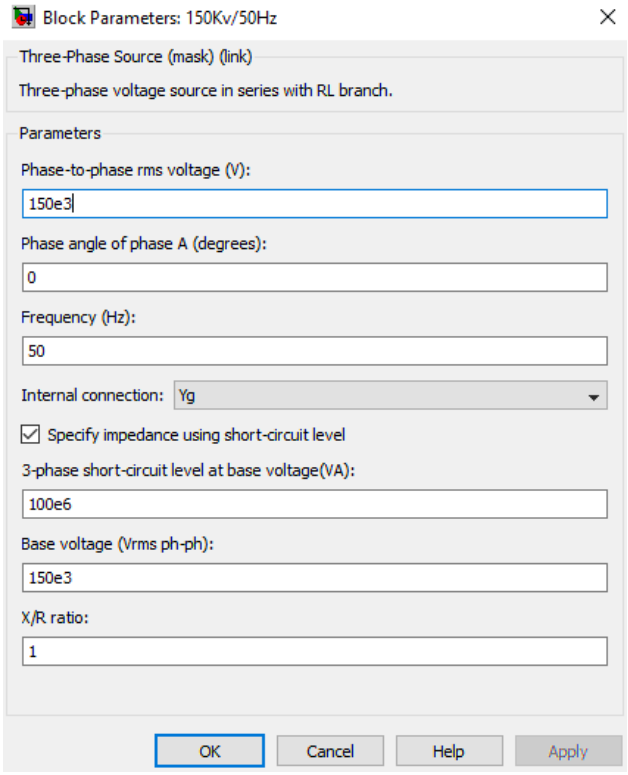
Το μοντέλο μας αποτελείται από μία τριφασική πηγή τάσεως 150KV και συχνότητας 50Hz. Η ισχύς βραχυκύκλωσης στο σημείο του κυκλώματος του μελετάμε υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση:

$$S_{βραχ} = \sqrt{3} \times V_{Π} \times I_{βραχ} \quad \textbf{eq. 4-1}$$

$$S_{βραχ} = \sqrt{3} \times 150 \times 10^{3} V \times 7229{,}6A \quad \textbf{eq. 4-2}$$

$$S_{βραχ} = 1878{,}3 \times 10^{6}\ \text{VA} \quad \textbf{eq. 4-3}$$

Στο Σχήμα 4.2 που ακολουθεί απεικονίζεται το παράθυρο διαλόγου της τριφασικής πηγής, με τις ρυθμήσεις που έχουμε εισάγει στο πρόγραμμα.



Σχήμα 4.2 Παράθυρο διαλόγου της τριφασικής πηγής

Διακόπτες ισχύος (circuit breaker)

Όπως είναι φανερό και από το στο υπό-μελέτη μοντέλο χρησιμοποιούνται δύο διακόπτες ισχύος οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι ανάμεσα στον μετασχηματιστή ισχύος. Σκοπός των διακοπτών ισχύος είναι η άμεση απομόνωση του μετασχηματιστή ισχύος και η προστασία του σε περίπτωση εμφάνισης σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εντολή μεταγωγής του διακόπτη ισχύος πραγματοποιείται αυτόματα μετά από τον έλεγχο που εκτελεί ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας.

Μετασχηματιστής ισχύος (three phase power transformer)

Ο μετασχηματιστής ισχύος που μοντελοποιείται στο κύκλωμα της διαφορικής προστασίας είναι ένας τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος συνδεσμολογίας τρίγωνου-αστέρα (Dyn1) τάσεως 150/21Kv, και συχνότητας 50Hz. Τα στοιχεία του μετασχηματιστή ισχύος περιγράφονται συνοπτικα στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 4-1 Στοιχεία του μετασχηματιστή ισχύος

Ονομαστική ισχύς	40/50MVA	***ELECTROPUTERE S.A***
Επίπεδο τάσης	150/21Kv	
Απώλειες κενού φορτίου	23KW	
Απώλειες φορτίου στους 85 ^{o}C	144KW	
Εμπέδηση	22%	
Ρεύμα διέγερσης (% του ονομαστικού)	0,35%	

Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία του Πίνακας 4-1 πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την μοντελοποίηση του μετασχηματιστή ισχύος. Ποιο αναλυτικά:

- *Τύλιγμα υψηλής τάσης:*

Η σύνθετη αντίσταση στο τύλιγμα της υψηλής τάσης υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση

$$Z_1 = \frac{{U_2}^2}{S_N} \quad \textbf{eq. 4-4}$$

$$Z_1 = \frac{(150 \times 10^3\ V)^2}{50 \times 10^6\ VA} \quad \textbf{eq. 4-5}$$

$$Z_1 = 450\ \Omega \quad \textbf{eq. 4-6}$$

Η ωμική συνιστώσα υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$u_R = \frac{P_{cu}}{S_N} \quad \textbf{eq. 4-7}$$

$$u_R = \frac{144 \times 10^3 W}{50 \times 10^6\ VA} \quad \textbf{eq. 4-8}$$

$$u_R = 2{,}88 \times 10^{-3} \quad \textbf{eq. 4-9}$$

Από την άλλη μεριά, η επαγωγική συνιστώσα υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$u_X = \sqrt{{u_k}^2 - {u_R}^2} \quad \text{eq. 4-10}$$

$$u_X = \sqrt{(0{,}22)^2 - (2{,}88 \times 10^{-3})^2} \quad \text{eq. 4-11}$$

$$u_X = 0{,}219 \quad \text{eq. 4-12}$$

Λαμβάνοντας υπόψη του παραπάνω υπολογισμούς η ωμική αντίσταση στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή θα υπολογιστεί με βάση την εξίσωση eq. 4-13:

$$R_1 = u_R \times Z_1 \quad \text{eq. 4-13}$$

$$R_1 = (2{,}88 \times 10^{-3}) \times 450\ \Omega \quad \text{eq. 4-14}$$

$$R_1 = 1{,}296\ \Omega \quad \text{eq. 4-15}$$

Αντίστοιχα η επαγωγική αντίδραση στο πρωτεύον τύλιγμα θα υπολογιστεί με βάση την εξίσωση :

$$X_1 = u_X \times Z_1 \quad \text{eq. 4-16}$$

$$X_1 = 0{,}219 \times 450\ \Omega \quad \text{eq. 4-17}$$

$$X_1 = 98{,}55\ \Omega \quad \text{eq. 4-18}$$

όμως:

$$X_1 = \omega \times L \quad \text{eq. 4-19}$$

$$L = \frac{98{,}55}{2 \times 3{,}14 \times 50\ Hz} \quad \text{eq. 4-20}$$

$$L = 0{,}313\ H \quad \text{eq. 4-21}$$

- *Τύλιγμα χαμηλής τάσης*

Η σύνθετη αντίσταση στο τύλιγμα της χαμηλής τάσης υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση

$$Z_2 = \frac{(21 \times 10^3\ V)^2}{50 \times 10^6\ VA} \quad \text{eq. 4-22}$$

$$Z_2 = 8{,}82\ \Omega \quad \text{eq. 4-23}$$

Η ωμική αντίσταση στο τύλιγμα της χαμηλής υπολογίστηκε είναι:

$$R_2 = u_R \times Z_2$$ **eq. 4-24**

$$R_2 = 2{,}88 \times 10^{-3} \times 8{,}82\ \Omega$$ **eq. 4-25**

$$R_2 = 0{,}025\ \Omega$$ **eq. 4-26**

Η επαγωγική αντίδραση στο τύλιγμα της χαμηλής είναι:

$$X_2 = u_X \times Z_2$$ **eq. 4-27**

$$X_2 = 0{,}219 \times 8{,}82\ \Omega$$ **eq. 4-28**

$$X_2 = 1{,}931\ \Omega$$ **eq. 4-29**

Συνεπώς,

$$\mathrm{L} = \frac{1{,}931\Omega}{2 \times 3{,}14 \times 50\ Hz}$$ **eq. 4-30**

$$\mathrm{L} = 6{,}149 \times 10^{-3} H$$ **eq. 4-31**

- *Στοιχεία κάθετου κλάδου*

Για να υπολογίσουμε τα στοιχεία του κλάδου μαγνήτισης αρχικά θα πρέπει να υπολογίσουμε το ονομαστικό ρεύμα στην έξοδο του μετασχηματιστή. Συνεπώς:

$$I_2 = \frac{S_N}{\sqrt{3} \times U_2}$$ **eq. 4-32**

$$I_2 = \frac{50 \times 10^6\ VA}{\sqrt{3} \times 21 \times 10^3\ V}$$ **eq. 4-33**

$$I_2 = 1374{,}6\ A$$ **eq. 4-34**

Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του μετασχηματιστή ισχύος το ρεύμα μαγνήτισης είναι 0,35% του ονομαστικού ρεύματος εξόδου του μετασχηματιστή,

Άρα:

$$I_m = 0{,}35\% \times 1374{,}6\ A$$ **eq. 4-35**

$$I_m = 4{,}811\ A$$ **eq. 4-36**

Η σύνθετη αντίσταση του κάθετου κλάδου υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση

$$Z_m = \frac{U_2}{\sqrt{3} \times I_m} \quad \textbf{eq. 4-37}$$

$$Z_m = \frac{21 \times 10^3\, V}{\sqrt{3} \times 4{,}811\, A} \quad \textbf{eq. 4-38}$$

$$Z_m = 2520{,}13\, \Omega \quad \textbf{eq. 4-39}$$

Η ωμική αντίσταση του κάθετου κλάδου υπολογίζεται σύμφωνα με:

$$R_m = \frac{{U_2}^2}{P_{fe}} \quad \textbf{eq. 4-40}$$

$$R_m = \frac{(21 \times 10^3\, V)^2}{23 \times 10^3\, W} \quad \textbf{eq. 4-41}$$

$$R_m = 19173{,}91\, \Omega \quad \textbf{eq. 4-42}$$

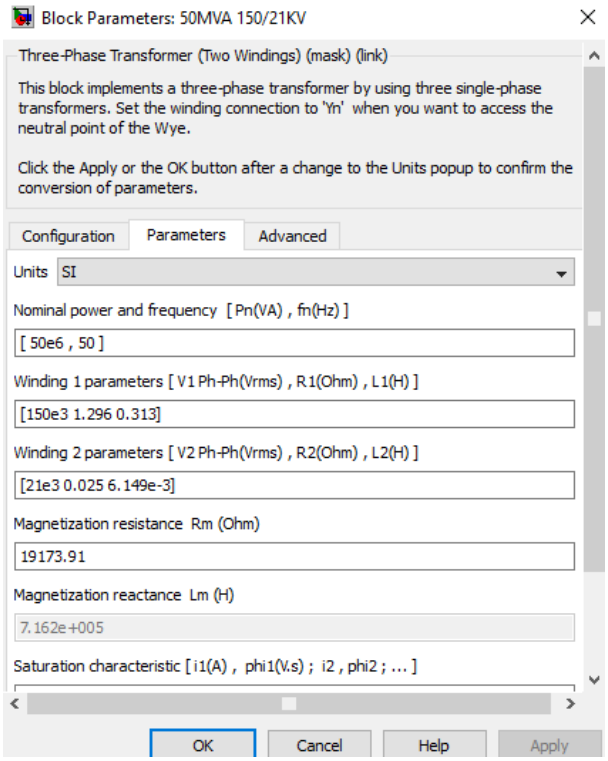
Και η επαγωγική αντίδραση του κάθετου κλάδου:

$$X_m = \frac{R_m \times Z_m}{\sqrt{({R_m}^2 - {Z_m}^2)}} \quad \textbf{eq. 4-43}$$

$$X_m = \frac{19173{,}91\, \Omega \times 2520{,}13\, \Omega}{\sqrt{(19173{,}91\, \Omega^2 - 2520{,}13\, \Omega^2)}} \quad \textbf{eq. 4-44}$$

$$X_m = -7{,}36 \quad \textbf{eq. 4-45}$$

Μετά και τους απαραίτητους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν ποιο πάνω, εισάγαμε τα δεδομένα στο αντίστοιχο παράθυρο διαλόγου του μετασχηματιστή.



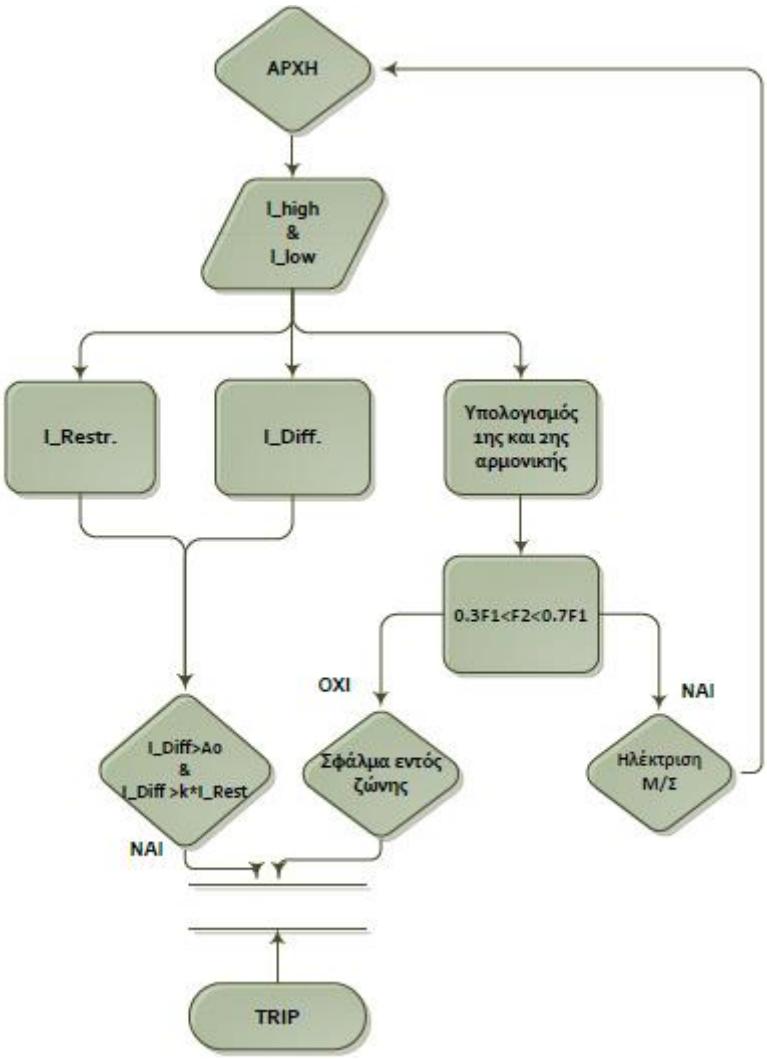
Σχήμα 4.3 Παράθυρο διαλόγου του μετασχηματιστή ισχύος

Φορτίο (load)

Το φορτίο το οποίο έχουμε χρησιμοποιήσει για την μοντελοποίηση του συστήματος αποτελεί ένα φορτίο RL, ισχύος P=10MW, Q=5 Mvar.

4.2 Σχεδιασμός της διαφορικής προστασίας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε εκτενής αναφορά στις διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούν οι σύγχρονοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι για την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου διαφορικής προστασίας μετασχηματιστών. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ο οποίος αναπτύχθηκε βασίζεται στην ανάλυση Fourier (FFT), και ποιο συγκεκριμένα στο αρμονικό περιεχόμενο των ρευμάτων που εισέρχονται από τους μετασχηματιστές εντάσεως. Στο Σχήμα 4.4 που ακολουθεί περιγράφεται συνοπτικά το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου ηλεκτρονόμου.

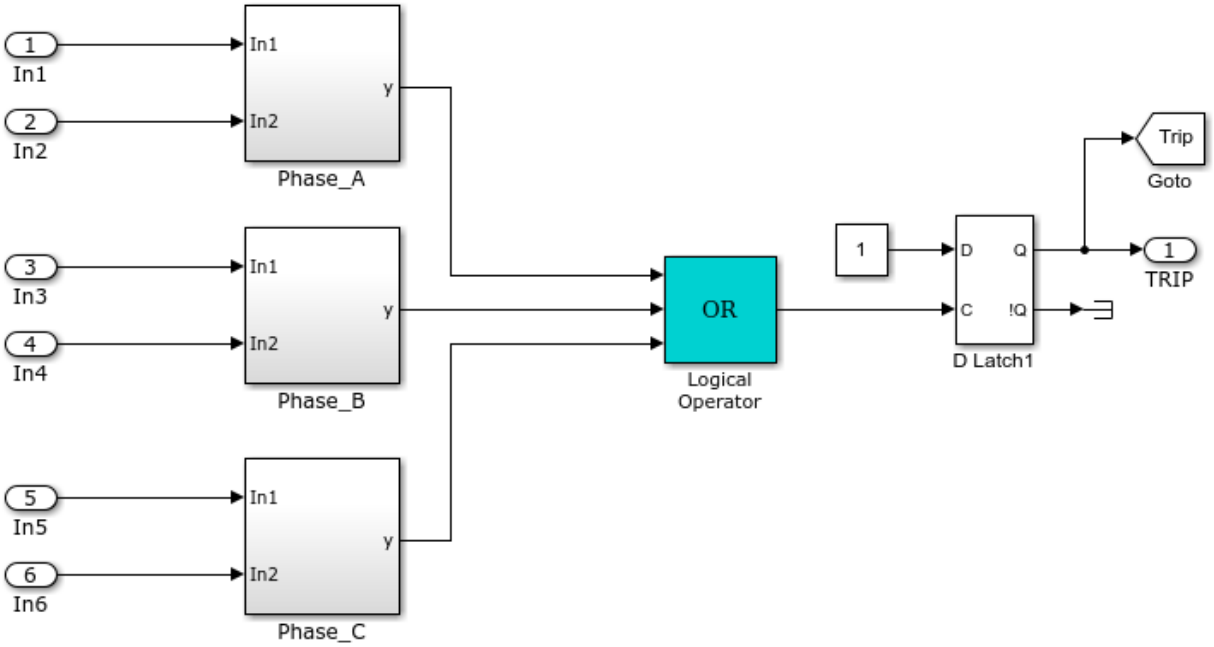


Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας

Ποιο αναλυτικά:

Βήμα 1:

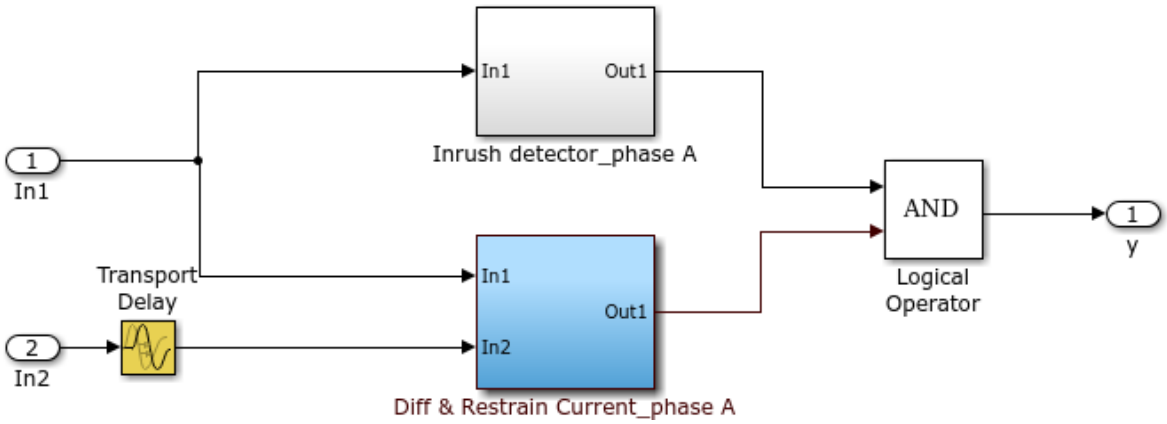
Στο πρώτο βήμα, το σύστημα το οποίο αναπτύχθηκε δέχεται ως εισόδους τα ρεύματα που προέρχονται από τους μετασχηματιστές εντάσεως όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.5 Εισαγωγή των ρευμάτων στο σύστημα της διαφορικής προστασίας

Βήμα 2:

Στο δεύτερο βήμα, το σύστημα λαμβάνοντας υπόψη ότι το μοντέλο του μετασχηματιστή ισχύος που χρησιμοποιήθηκε είναι συνδεσμολογίας Dy-11, πραγματοποιεί διόρθωση της μετατόπισης φάσης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Η παραπάνω διαδικασία υλοποιείται μέσω της συνάρτησης transport delay όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 που ακολουθεί.

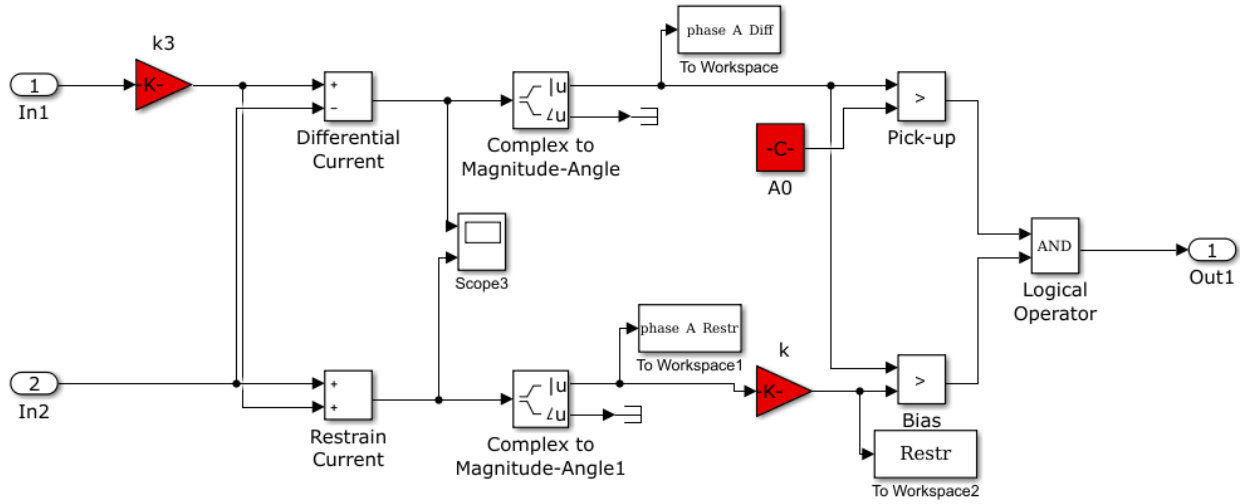


Σχήμα 4.6 Διόρθωση της μετατόπισης φάσης (phase shift correction)

Βήμα 3:

Μετά και την διόρθωση στην ολίσθηση φάσης μεταξύ των δύο ρευμάτων εισόδου (ρεύμα υψηλής, ρεύμα χαμηλής), ακολουθεί η διόρθωση στο μέτρο των ρευμάτων υψηλής και χαμηλής των μετασχηματιστών εντάσεως. Αυτή η ενέργεια πραγματοποιείται μέσω ενός Gain όπου αντισταθμίζει την διαφορά μεταξύ των δύο ρευμάτων.

Εν συνεχεία, το σύστημα υπολογίζει το διαφορικό ρεύμα αλλά και το ρεύμα συγκράτησης όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4.7 Υπολογισμός διαφορικού ρεύματος και ρεύματος συγκράτησης ***[52]***

Όπως είναι φανερό από το Σχήμα 4.7 βασική συνθήκη ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας είναι:

$$TRIP = (I_{Diff} > A_0) \ \& \ (I_{Diff} > k \times I_{Rest}) \qquad \textbf{eq. 4-46}$$

Όπου:

I_{Diff}: Διαφορικό ρεύμα

I_{Rest}: Ρεύμα συγκράτησης

A_0: Κατώφλι του H/N συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 10-20% του ονομαστικού ρεύματος.

k: κλίση της γραφικής μεταξύ διαφορικού ρεύματος και ρεύματος συγκράτησης. Συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 10-50% του ονομαστικού ρεύματος.

Συνεπώς σε περίπτωση όπου ισχύει η συνθήκη που ορίζει η εξίσωση eq. 4-46 ο ηλεκτρονόμος δίνει εντολή για TRIP οπότε και ανοίγουν οι διακόπτες ισχύος που υπάρχουν εγκατεστημένοι ανάμεσα στον μετασχηματιστή ισχύος.

Βήμα 4:

Μία πολύ σημαντική λειτουργία του συστήματος της διαφορικής προστασίας που υλοποιήθηκε αποτελεί και η αναγνώριση καταστάσεων εμφάνισης ρεύματος μαγνήτισης, και η παρεμπόδιση της λειτουργίας του ηλεκτρονόμου. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, κατά την ενεργοποίηση του μετασχηματιστή ισχύος, εμφανίζεται ένα μεγάλο ποσοστό της $2^{ης}$ αρμονικής συνιστώσας. Συνεπώς, με βάση αυτό το δεδομένο αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος όπου ελέγχει αν το ποσοστό της $2^{ης}$ αρμονικής συνιστώσας ως προς την θεμελιώδη είναι εντός προδιαγεγραμμένων ορίων. Κατά συνέπεια, όταν ισχύει η παραπάνω συνθήκη, ο αλγόριθμος λειτουργίας αντιλαμβάνεται την κατάσταση ενεργοποίησης του μετασχηματιστή ισχύος οπότε και θέτει τον ηλεκτρονόμο σε κατάσταση συγκράτησης.

Για να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος που περιγράφηκε ποιο πάνω, έγινε χρήση των μετασχηματισμών Fourier (FFT). Υπενθυμίζουμε ότι κάθε περιοδικό σήμα f(t), μπορεί να αναλυθεί από μία σειρά ημιτονοειδών και συν-ημιτονοειδών συναρτήσεων όπως περιγράφεται από την εξίσωση eq. 4-47 που ακολουθεί.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_1^\infty a_n \times \cos(n \times \omega \times t) + b_n \sin(n \times \omega \times t) \quad \textbf{eq. 4-47}$$

Όπου:

n: συντελεστής που αναπαριστά τον βαθμό των αρμονικών ($n = 1$ αποτελεί την θεμελιώδη συνιστώσα)

a_0: αποτελεί την DC συνιστώσα

a_n, b_n: συντελεστές όπου δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις

$$a_n = \frac{2}{T} \times \int_{t-T}^{t} f(t) \times \cos(n \times \omega \times t) dt \quad \textbf{eq. 4-48}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \times \int_{t-T}^{t} f(t) \times \sin(n \times \omega \times t)\, dt \quad \textbf{eq. 4-49}$$

Όπου

$$T = \frac{1}{f_1} \quad \textbf{eq. 4-50}$$

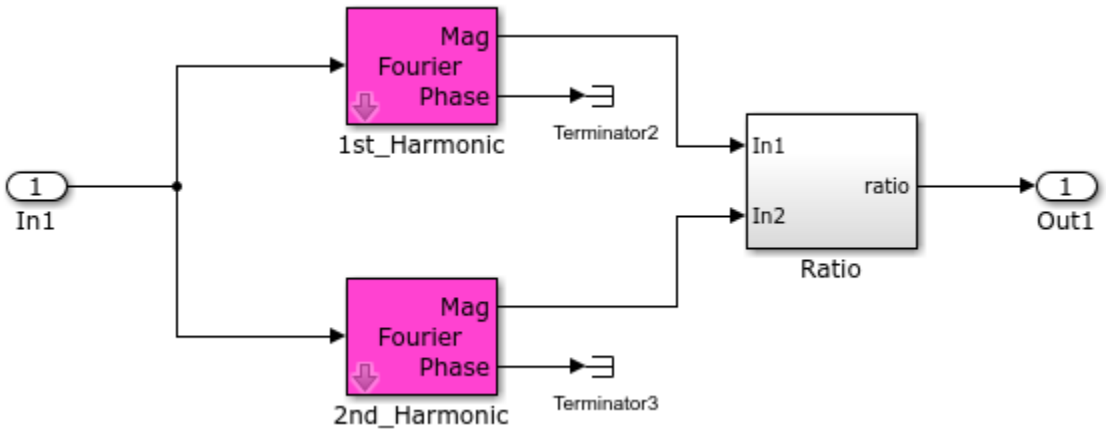
Με

f_1: η θεμελιώδη συνιστώσα

Συνεπώς, το μέτρο της επιλεγμένης αρμονικής συνιστώσας υπολογίζονται από την εξίσωση eq. 4-51 που ακολουθεί:

$$|H_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \textbf{eq. 4-51}$$

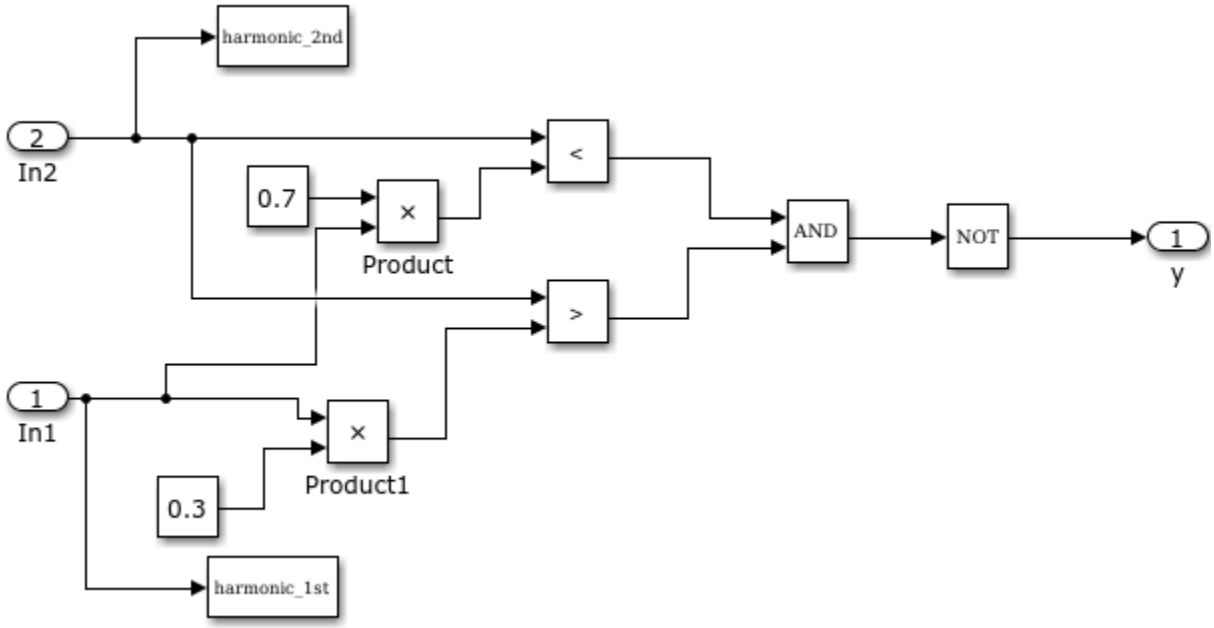
Στο Σχήμα 4.8 που ακολουθεί περιγράφεται πώς πραγματοποιήθηκε η ανάλυση Fourier από όπου εξάγαμε το μέτρο της θεμελιώδης αλλά και της δεύτερης αρμονικής συνιστώσας.



Σχήμα 4.8 Υπολογισμός της θεμελιώδους και 2ης αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος

Σε περίπτωση όπου η δεύτερη αρμονική συνιστώσα του ρεύματος ικανοποιεί την ανισότητα που περιγράφεται παρακάτω, τότε ο ηλεκτρονόμος της διαφορικής προστασίας αναγνωρίζει την κατάσταση ηλέκτρισης του μετασχηματιστή και παρεμποδίζει την λειτουργία του. **[53]**

$$0.3 \times F1 < 2^{nd} < 0.7 \times F1 \qquad \textbf{eq. 4-52}$$



Σχήμα 4.9 Σύγκριση της 2ης αρμονικής συνιστώσας προς την θεμελιώδη.

4.3 Απόκριση του μοντέλου της διαφορικής προστασίας σε διάφορες καταστάσεις.

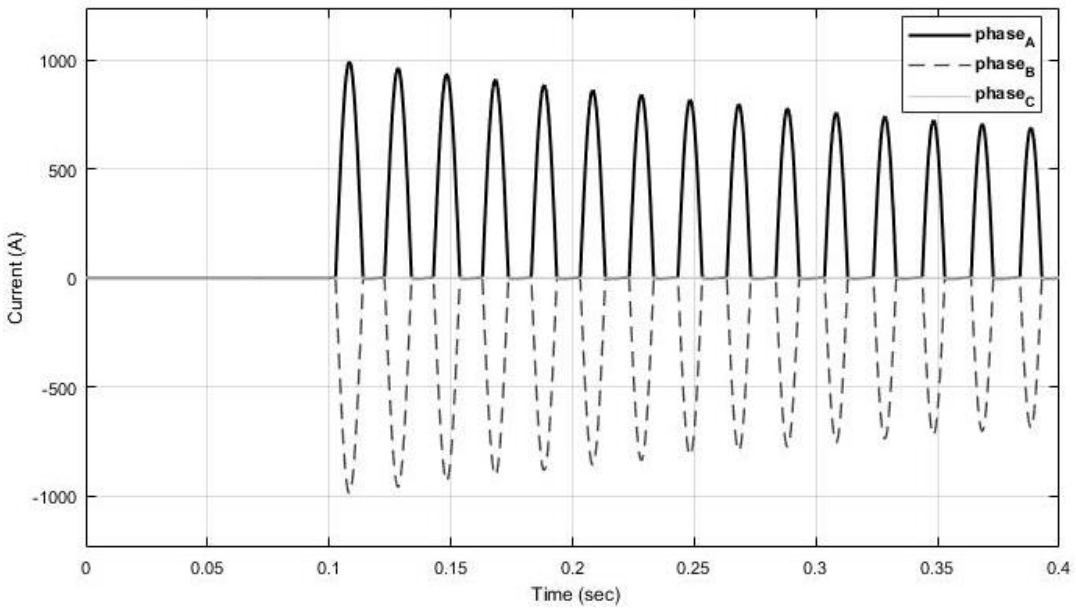
Ποιο αναλυτικά το σύστημα της διαφορικής προστασίας που μοντελοποιήθηκε θα εξεταστεί κάτω από τις παρακάτω καταστάσεις λειτουργίας,

- **A.** Ενεργοποίηση του μετασχηματιστή ισχύος
- **B.** Ενεργοποίηση του μετασχηματιστή ισχύος, και φόρτιση.
- **C.** Περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με συμμετοχή γης εντός της ζώνης προστασίας
- **D.** Περίπτωση διφασικού σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας
- **E.** Περίπτωση τριφασικού σφάλματος με συμμετοχή γης εντός της ζώνης προστασίας
- **F.** Κατάσταση εμφάνισης τριφασικού σφάλματος εκτός της προστατευόμενης ζώνης προστασίας

Από τις παραπάνω δοκιμές θα προκύψει το κατά πόσο ο αλγόριθμος λειτουργίας της διαφορικής προστασίας που αναπτύχθηκε είναι σε θέση να αναγνωρίσει τα σφάλματα εντός της ζώνης προστασίας και να θέσει εκτός τον μετασχηματιστή ισχύος

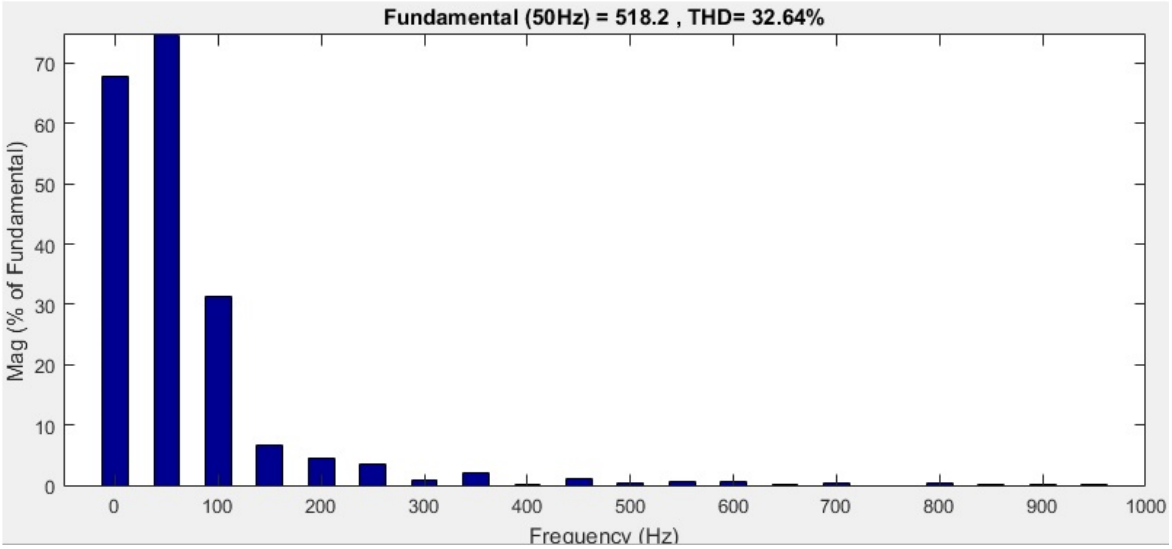
4.3.1 Ηλέκτριση του μετασχηματιστή ισχύος

Σε αυτή την περίπτωση ο διακόπτης CB1 του κυκλώματος, κλείνει την χρονική στιγμή t=0.1 sec, ενώ ο διακόπτης CB2 είναι μόνιμα ανοιχτός. Όπως είναι προφανές, μόνο το ρεύμα μαγνήτισης (inrush current) ρέει στο πρωτεύον του μετασχηματιστή ισχύος καθώς ο μετασχηματιστής δεν τροφοδοτεί κάποιο φορτίο στο δευτερεύον του.



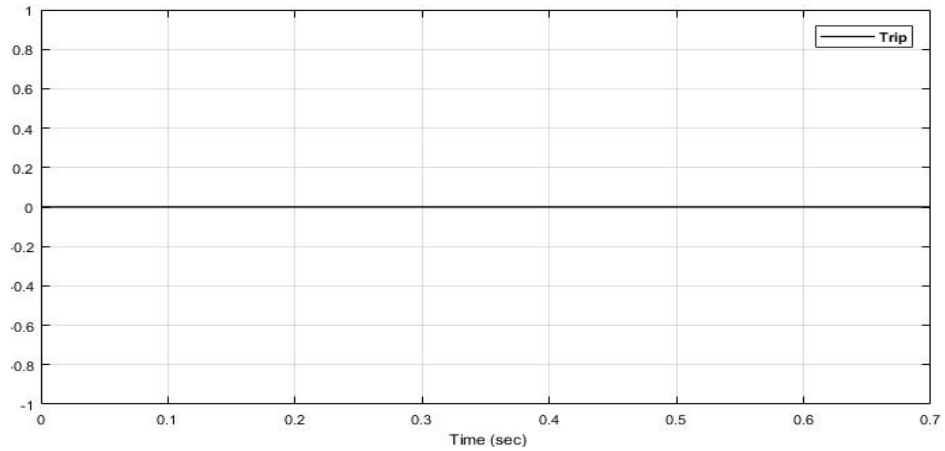
Σχήμα 4.10 Ρεύμα μαγνήτισης (inrush current) κατά την ηλέκτριση του μετασχηματιστή ισχύος.

Παράλληλα σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εξεταστεί και η ορθή απόκριση του ηλεκτρονόμου της διαφορικής προστασίας καθώς σε μία τέτοια κατάσταση θα πρέπει να παρεμποδιστεί η ενεργοποίηση του. Φυσικά αυτή η λειτουργία ελέγχεται μέσα από τον αλγόριθμο που περιγράφηκε στο Σχήμα 4.8 μέσω του οποίου εξετάζεται αν η δεύτερη αρμονική συνιστώσα του ρεύματος είναι μεγαλύτερη από το 0.3 της θεμελιώδους. Στο *Σχήμα 4.11,* που ακολουθεί απεικονίζει το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος μαγνήτισης μέσα από μία ανάλυση Fourier. Όπως είναι φανερό, η $2^{η}$ αρμονική συνιστώσα εντοπίζεται σε ποσοστό 31.32% , ενώ οι υπόλοιπες αρμονικές συνιστώσες καλύπτουν ένα πολύ μικρότερο ποσοστό.



Σχήμα 4.11 Αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος μαγνήτισης (inrush current)

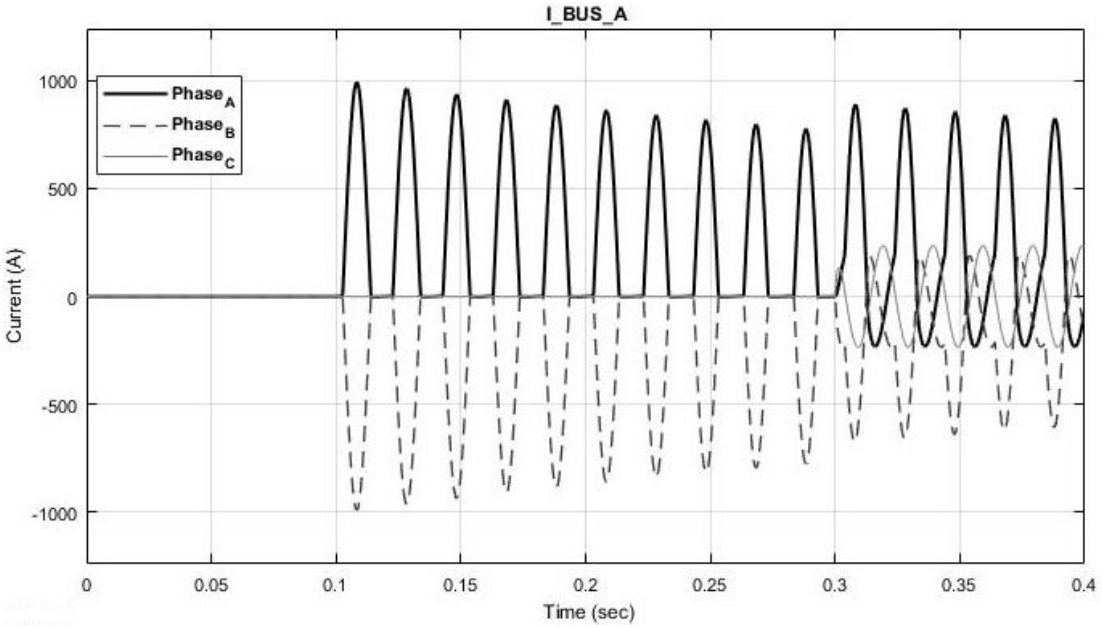
Σύμφωνα με τα παραπάνω ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας έχει σχεδιαστεί ορθά, έτσι ώστε να αναγνωρίζει μία τέτοια κατάσταση λειτουργίας και να παρεμποδίζεται η ενεργοποίηση του όπως επιβεβαιώνεται και στο Σχήμα 4.12 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.12 Απόκριση του Η/Ν σε κατάσταση ηλέκτρισης του Μ/Σ.

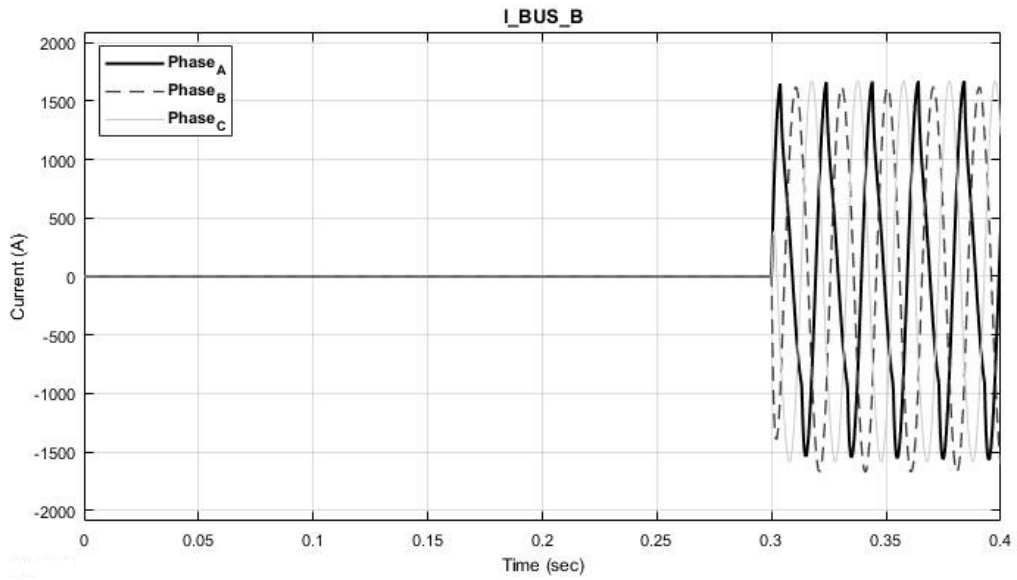
4.3.2 Ηλέκτριση μετασχηματιστή ισχύος και φόρτιση

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζουμε το φαινόμενο της μετάβασης του μετασχηματιστή ισχύος από την κατάσταση της ηλέκτρισης στην κατάστασης φόρτισης. Ποιο αναλυτικά: ο διακόπτης ισχύος CB1 κλείνει την χρονική στιγμή t=0.1 sec ενώ ο διακόπτης CB2 είναι ανοιχτός. Σε αυτή την περίπτωση, έχουμε την εμφάνιση ρεύματος μαγνήτισης στο πρωτεύον του μετασχηματιστή ισχύος. Όμως, την χρονική στιγμή t=0.3 sec αυτή η κατάσταση θα αλλάξει αφού ο μετασχηματιστής καλείται να καλύψει φορτίο μέσω του κλεισίματος του διακόπτη CB2. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 4.13 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.13 Ρεύμα μαγνήτισης και ρεύμα φορτίου στο πρωτεύον του μετασχηματιστή

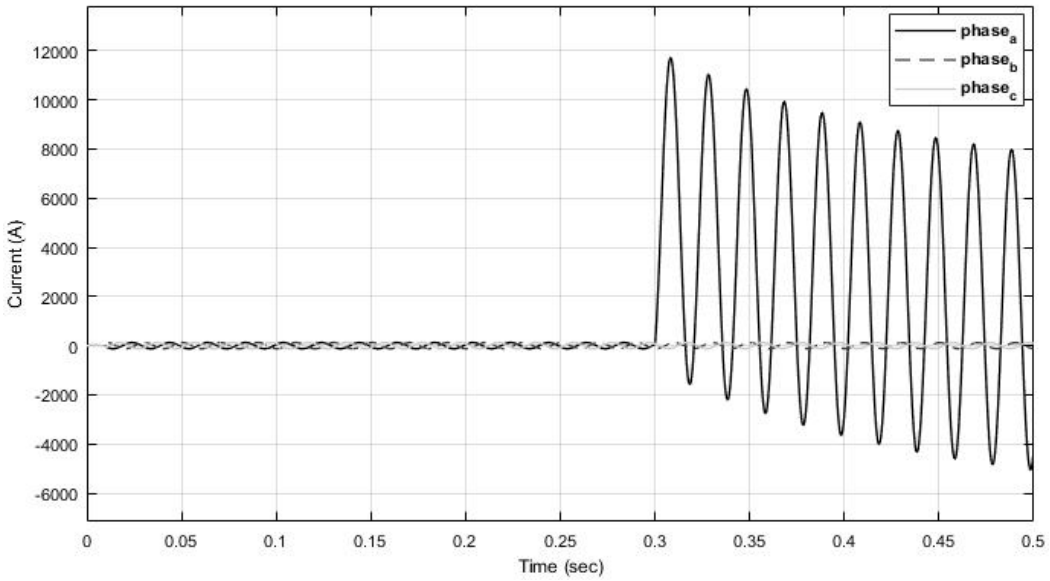
Ακόμα, στο Σχήμα 4.14 που ακολουθεί, απεικονίζεται το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή ισχύος. Όπως είναι φανερό, έως και την χρονική στιγμή t=0,3 sec, το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή είναι μηδέν αφού ο μετασχηματιστής δεν τροφοδοτούσε κάποιο φορτίο στο δευτερεύον του.



Σχήμα 4.14 Ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή ισχύος

4.3.3 Μονοφασικό σφάλμα με γη.

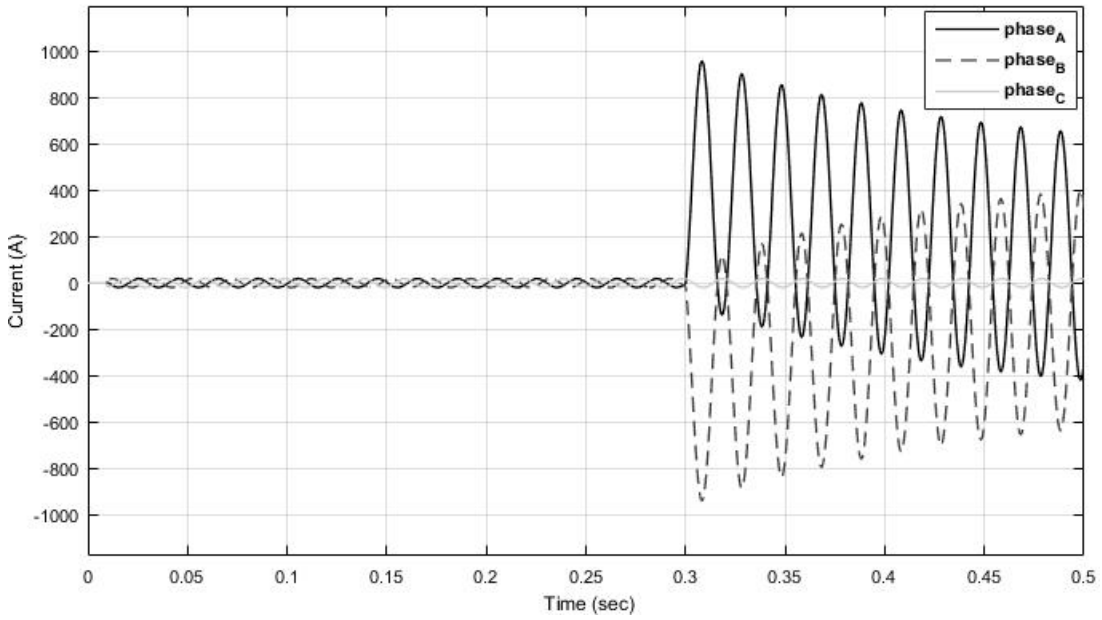
Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η εμφάνιση μονοφασικού σφάλματος με συμμετοχή γης εντός της προστατευόμενης ζώνης. Το σφάλμα λαμβάνει χώρα την χρονική στιγμή t=0.3 sec, στην φάση Α του κυκλώματος της χαμηλής τάσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 4.15 Περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με γη: Ρεύματα στο δευτερεύον.

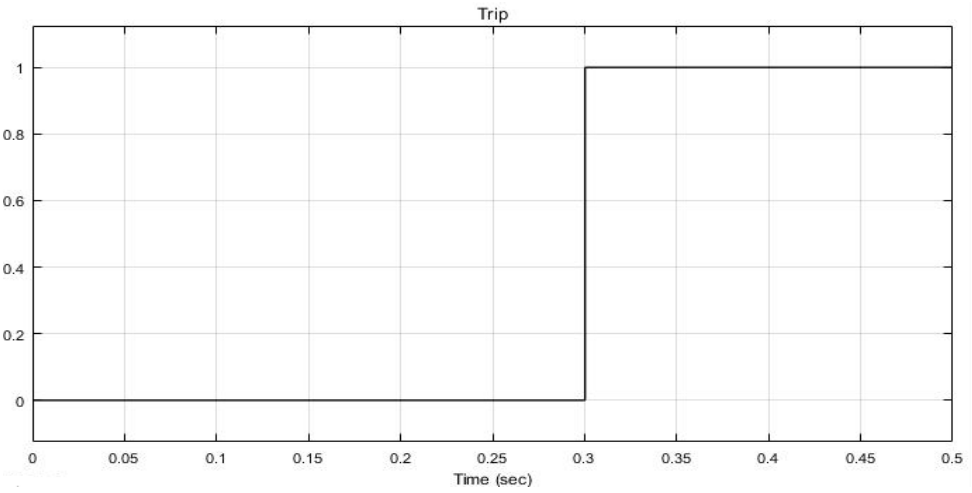
Όπως είναι φανερό από το Σχήμα 4.15 το ρεύμα στην φάση Α του κυκλώματος παρουσιάζει μία μεγάλη αύξηση με μέγιστη τιμή τα 11.72 kA. Αντίθετα, τα ρεύματα στις υγιείς φάσεις παραμένουν αμετάβλητα.

Στο Σχήμα 4.16 που ακολουθεί απεικονίζονται τα ρεύματα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή ισχύος. Όπως είναι αναμενόμενο, το μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά του αστέρα, απεικονίζεται σαν διφασικό στην μεριά του τριγώνου επηρεάζοντας έτσι την φάση Α αλλά και την φάση Β. Από την άλλη μεριά η φάση C μένει ανεπηρέαστη.



Σχήμα 4.16 Περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με γη: Ρεύματα στο πρωτεύον

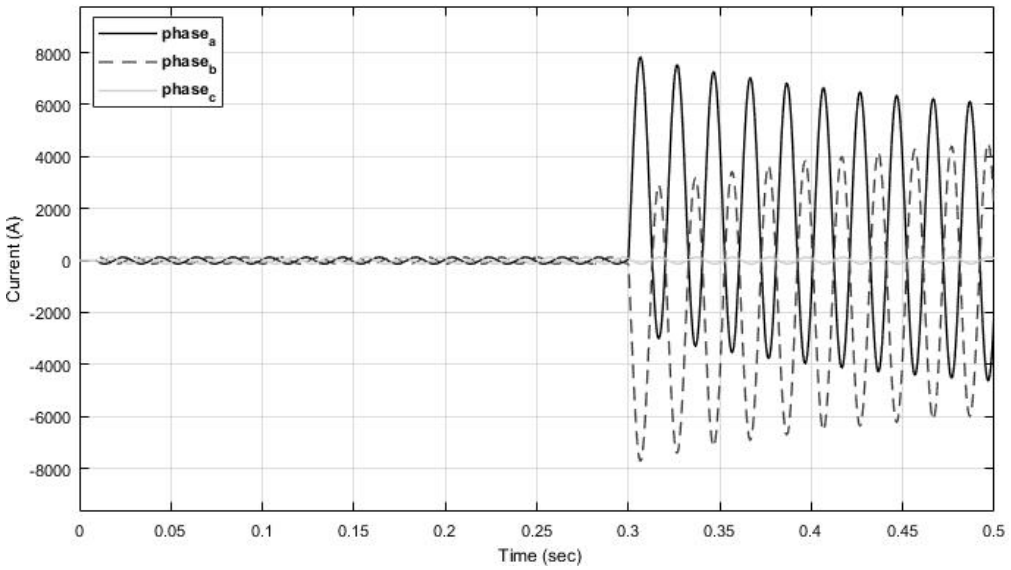
Επιπρόσθετα όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.17 που ακολουθεί απεικονίζεται η απόκριση του ηλεκτρονόμου. Όπως είναι φανερό ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας αντιλήφθηκε άμεσα την περίπτωση του σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας και αποκρίθηκε άμεσα σε χρόνο t=0.00045 sec



Σχήμα 4.17 Απόκριση του H/N στο μονοφασικό σφάλμα

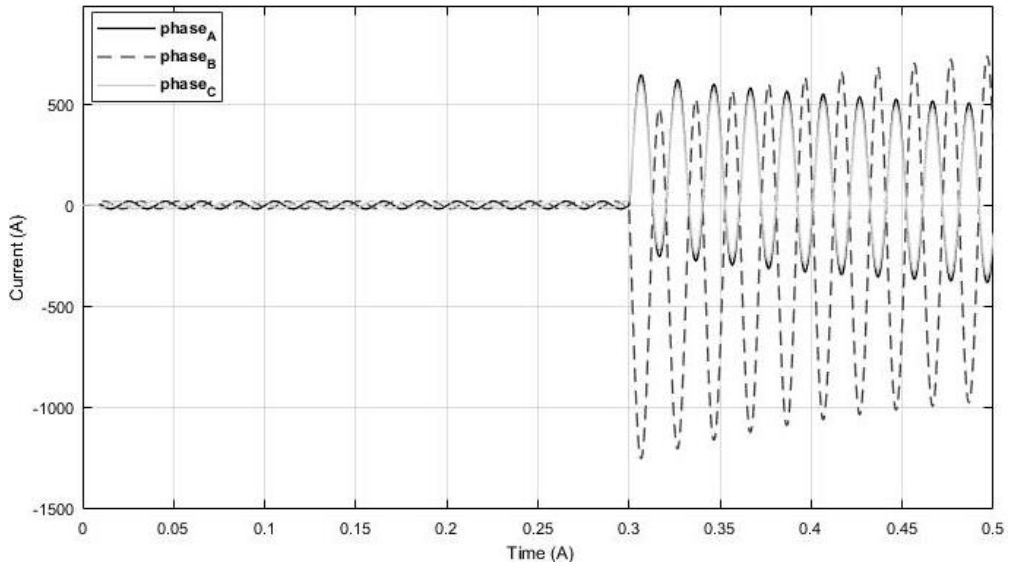
4.3.4 Διφασικό σφάλμα εντός της ζώνης προστασίας.

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η απόκριση του ηλεκτρονόμου κάτω από συνθήκες διαφασικού σφάλματος. Η θέση του σφάλματος είναι στην πλευρά της χαμηλής τάσης και αφορά τις φάσεις Α και Β του κυκλώματος. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στα σχήματα που ακολουθούν



Σχήμα 4.18 Διφασικό σφάλμα (φάση Α & φάση Β): Ρεύματα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.

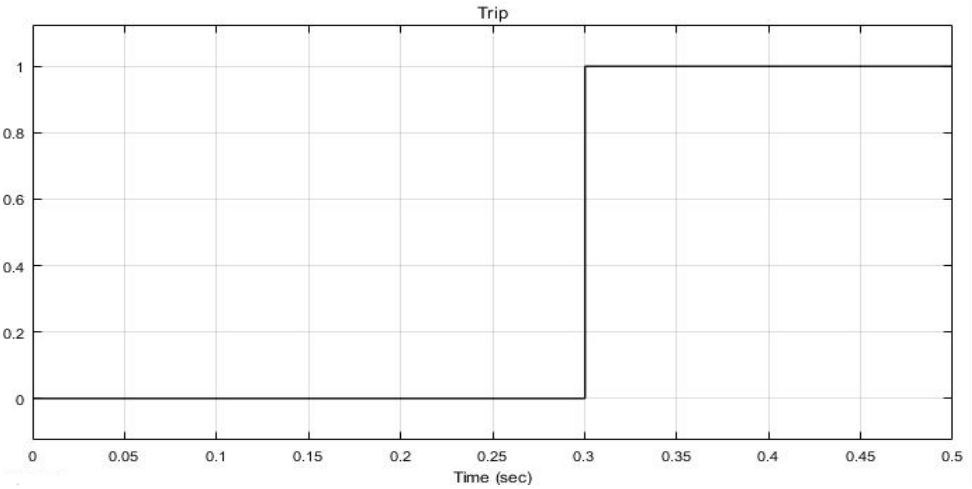
Σύμφωνα με το Σχήμα 4.18, το ρεύμα στις φάσεις Α και Β του κυκλώματος παρουσιάζουν σημαντική αύξηση. Ποιό συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή του ρεύματος που αναπτύσσεται και στις δύο φάσεις αγγίζει τα 7.83 kA. Αντίθετα η φάση C φαίνεται να μην επηρεάζεται.



Σχήμα 4.19 Διφασικό σφάλμα (φάση Α & φάση Β): Ρεύματα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή.

Παρόμοια αποτελέσματα εμφανίζονται και στην πλευρά της υψηλής τάσης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.19.

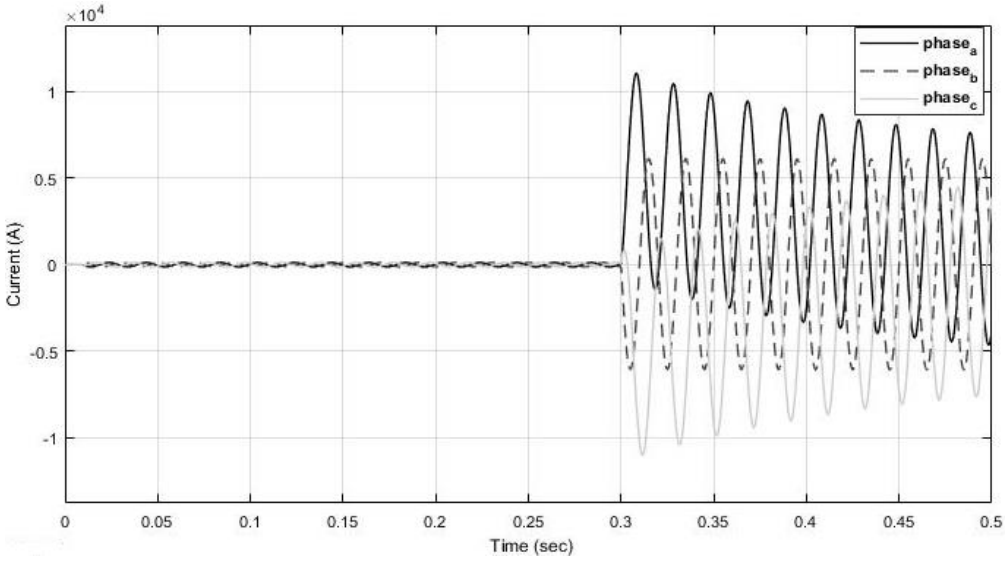
Ενδιαφέρον αποτελεί και ο χρόνος απόκρισης του ηλεκτρονόμου της διαφορικής προστασίας αφού στην παρούσα περίπτωση ο ηλεκτρονόμος απομόνωσε τον μετασχηματιστή ισχύος μέσα σε χρόνο t=0.0002 sec



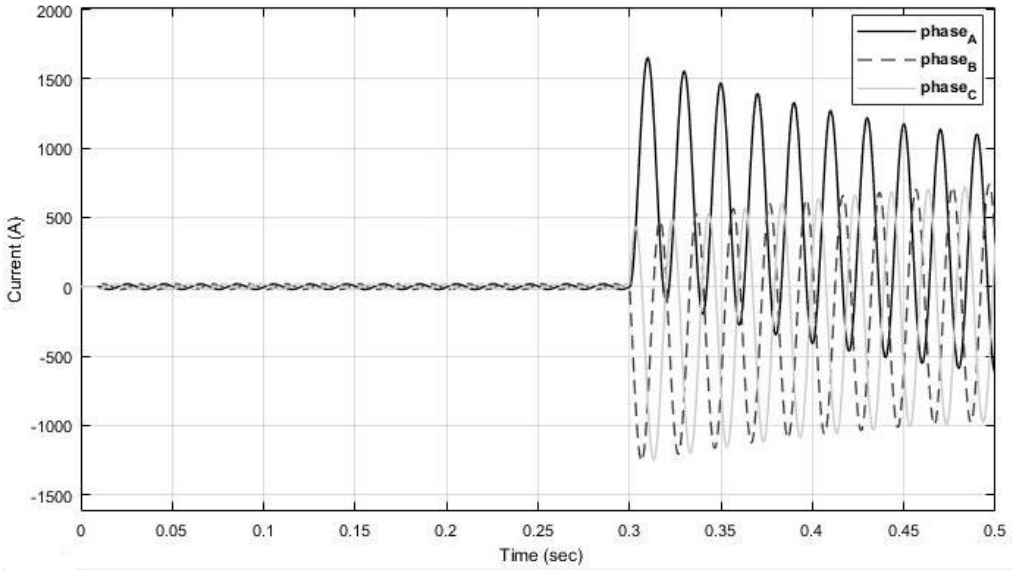
Σχήμα 4.20 Απόκριση του H/N σε διφασικό σφάλμα εντός της ζώνης προστασίας

4.3.5 Τριφασικό σφάλμα με Γη εντός της ζώνης προστασίας.

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η συμπεριφορά του ηλεκτρονόμου κάτω από τριφασικό βραχυκύκλωμα με συμμετοχή γης. Και σε αυτή την περίπτωση το σφάλμα συμβαίνει στην πλευρά της χαμηλής τάσης.

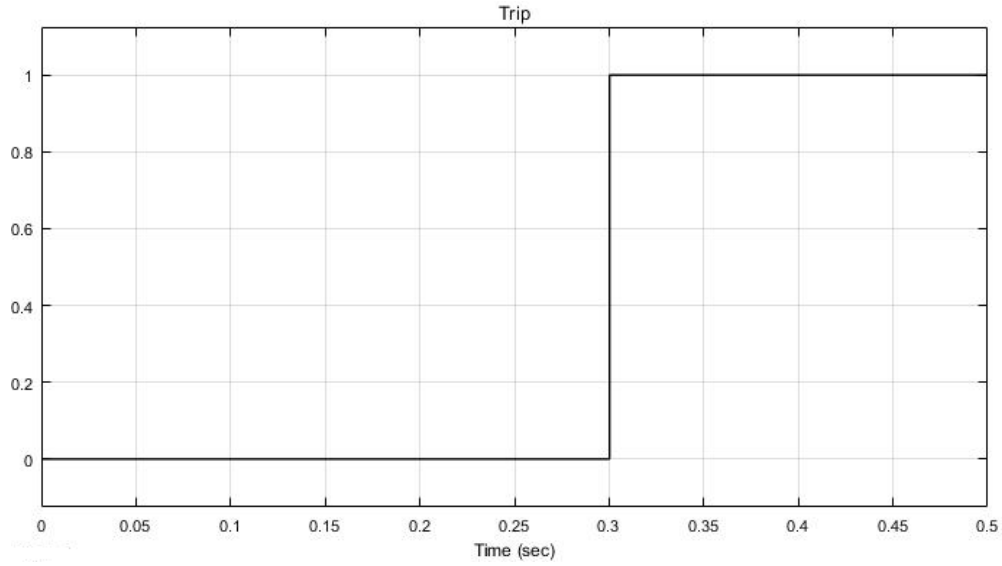


Σχήμα 4.21 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη: Ρεύματα στο δευτερεύον.



Σχήμα 4.22 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη: Ρεύματα στο πρωτεύον.

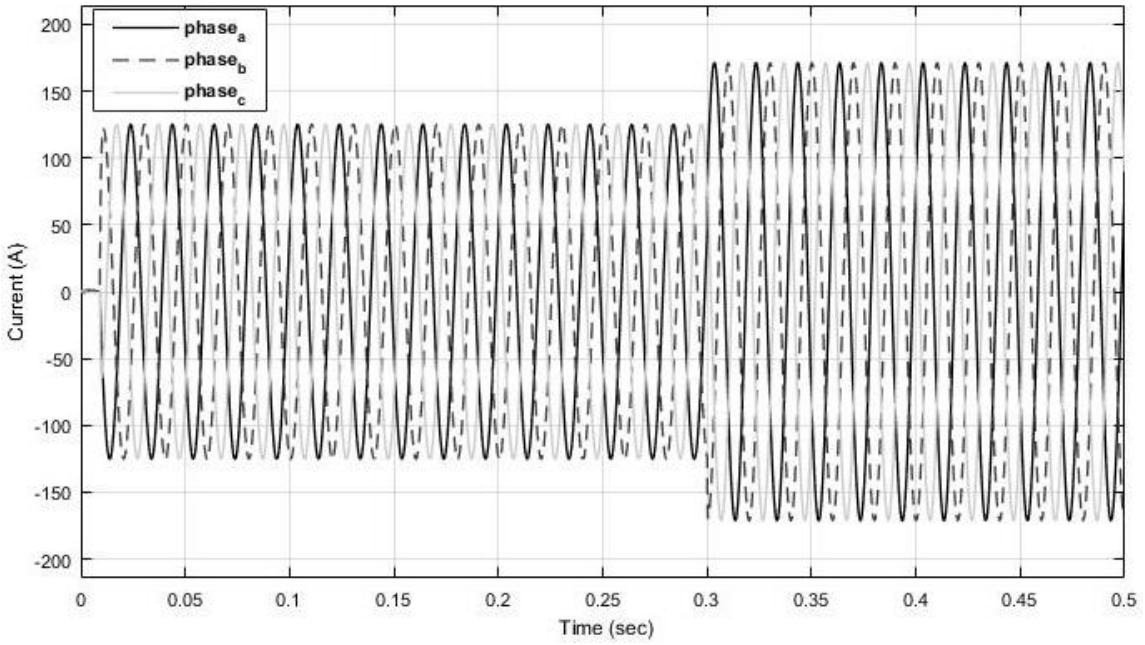
Σύμφωνα με τα παραπάνω σχήματα, τα ρεύματα και στις τρείς φάσεις παρουσιάζουν αύξηση. Τυπικά, αναφέρουμε ότι το ρεύμα στην φάση Α αγγίζει το 1.65 kA. Και σε αυτή την περίπτωση ο ηλεκτρονόμος που έχει αναπτυχθεί αντιλαμβάνεται την ύπαρξη σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας απομονώνοντας έτσι τον μετασχηματιστή ισχύος σε χρόνο t=0.0002 sec.



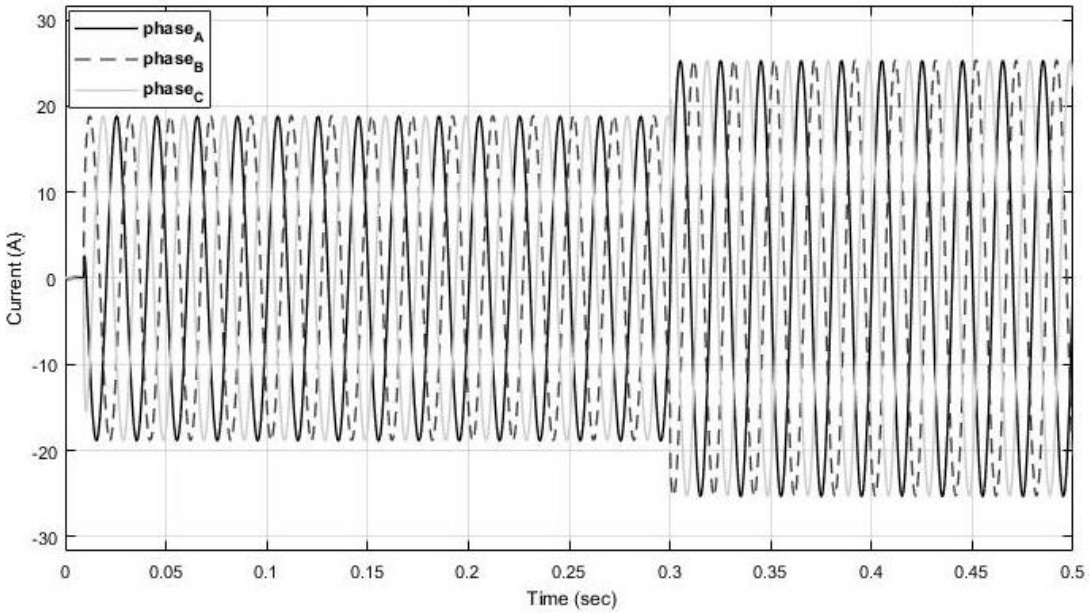
Σχήμα 4.23 Απόκριση του H/N σε περίπτωση τριφασικού σφάλματος με γη

4.3.6 Τριφασικό σφάλμα με Γη εκτός της ζώνης προστασίας.

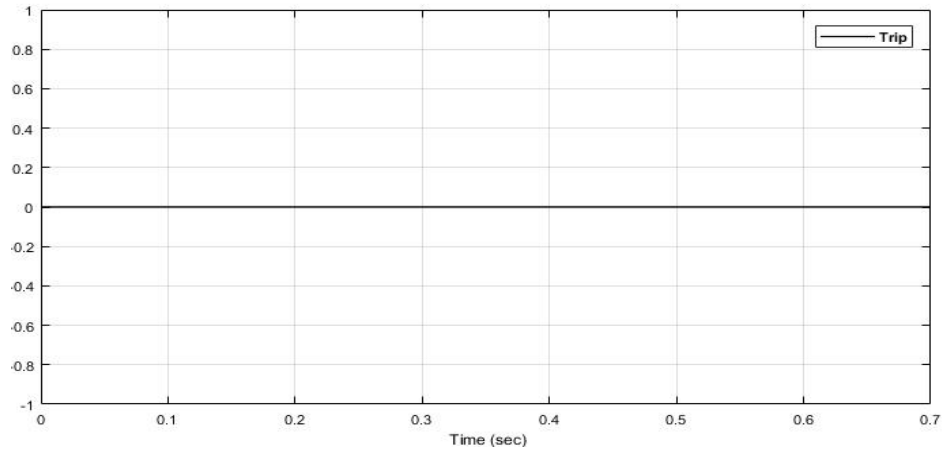
Η τελευταία περίπτωση η οποία εξετάζεται είναι η απόκριση του ηλεκτρονόμου σε κατάσταση σφάλματος εκτός της ζώνης προστασίας. Οι συνθήκες του σφάλματος είναι όμοιες με εκείνες που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 4.24 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη εκτός ζώνης προστασίας: Ρεύματα στο δευτερεύον.



Σχήμα 4.25 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη εκτός ζώνης προστασίας: Ρεύματα στο πρωτεύον.



Σχήμα 4.26 Απόκριση του H/N σε σφάλμα εκτός ζώνης προστασίας

5 Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε η διερεύνηση της συμπεριφοράς της διαφορικής προστασίας σε μετασχηματιστές ισχύος. Για το σκοπό αυτό, αρχικά αναλύσαμε τις αρχές του σχεδιασμού ενός συστήματος προστασίας. Είδαμε τα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να πληρούν οι ηλεκτρονόμοι προστασίας έτσι ώστε ένα τέτοιο σύστημα να μπορεί να χαρακτηριστεί ως αξιόπιστο. Στη συνέχεια, έγινε μία εκτενής ανάλυση της χρήσης των μετασχηματιστών οργάνων σε ένα σύστημα προστασίας. Το κεφάλαιο αυτό κρίθηκε ως πολύ σημαντικό διότι όπως διαπιστώσαμε, η επιλογή των κατάλληλων μετασχηματιστών οργάνων αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα για την ορθή λειτουργία του συστήματος προστασίας. Σε αυτό το κεφάλαιο επίσης δόθηκαν τεχνικές συμβουλές για την σωστή συνδεσμολογία των μετασχηματιστών οργάνων οι οποίες είναι πολύ σημαντικές. Ακόμα, διαπιστώθηκε ότι ανάλογα με την εφαρμογή της προστασίας αλλάζουν και τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την επιλογή των κατάλληλων μετασχηματιστών οργάνων. Είδαμε μέσα από διεθνή πρότυπα πώς έχουν καθιερωθεί μέχρι και σήμερα οι κλάσεις των μετασχηματιστές οργάνων, ανάλογα με την ακρίβεια αλλά και την ορθή λειτουργία τους κάτω από μεταβατικά φαινόμενα.

Στη συνέχεια έγινε μία λεπτομερής αναφορά πάνω στα συστήματα προστασίας που διαθέτει ένας μετασχηματιστής ισχύος. Αρχικά πραγματοποιήθηκε μία ανάλυση σε όλα τα πιθανά σφάλματα που μπορούν να εκδηλωθούν σε ένα μετασχηματιστή και που μπορεί να θέσουν την ορθή λειτουργία του σε κίνδυνο. Εν συνεχεία, έγινε αναφορά σε όλα τα συστήματα προστασίας που εμπεριέχει ένας μετασχηματιστής ισχύος με έμφαση φυσικά στην διαφορική προστασία. Είδαμε ότι η διαφορική προστασία αποτελεί την ποιο διαδεδομένη μέθοδο προστασίας σε μετασχηματιστές άνω των 5MVA. Αναλύσαμε διεξοδικά την λειτουργία αυτής της μεθόδου και φυσικά τα πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου αλλά και τους παράγοντες από τους οποίους επηρεάζεται η ορθή λειτουργία της. Επιπλέον, σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάσαμε λεπτομερώς την αρχή λειτουργίας των σύγχρονων ψηφιακών ηλεκτρονόμων διαφορικής προστασίας. Μέσα από εκτενής έρευνα, συγκεντρώσαμε πληροφορίες όπου δείχνουν την εξέλιξη του σχεδιασμού της διαφορικής προστασίας. Διαπιστώσαμε ότι η έρευνα στο κομμάτι του σχεδιασμού της διαφορικής προστασίας έχει αναπτυχθεί και εξελιχθεί με γοργό ρυθμό. Αυτή η εξέλιξη έχει μειώσει κατά πολύ τους παράγοντες που επηρεάζουν την ορθή λειτουργία της διαφορικής προστασίας παρέχοντας της ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια και επιλεκτικότητα.

Με βάση όλα τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη ενός μοντέλου ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας για μετασχηματιστές ισχύος. Το μοντέλο αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το περιβάλλον Simulink του προγράμματος Matlab. Ο προτεινόμενος ηλεκτρονόμος εξετάστηκε κάτω από διάφορες καταστάσεις που καλείται να αντιμετωπίσει μια τυπική διαφορική προστασία. Τέτοιες καταστάσεις όπως είδαμε αποτελούν: η ενεργοποίηση του μετασχηματιστή ισχύος, καθώς και μία σειρά σφαλμάτων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που σχολιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα, ο ηλεκτρονόμος διαφορικής προστασίας έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να αποκρίνεται άμεσα και ταχύτατα σε περιπτώσεις εμφάνισης σφάλματος εντός της ζώνης προστασίας που του έχει οριστεί. Από την άλλη μεριά, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπου λαμβάνουν υπόψη τις αρμονικές συνιστώσες στο κύκλωμα, ο ηλεκτρονόμος αντιλαμβάνεται καταστάσεις ηλέκτρισης του μετασχηματιστή ισχύος, παρεμποδίζοντας έτσι την λανθασμένη ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου της διαφορικής προστασίας. Κατά συνέπεια, το μοντέλο του ηλεκτρονόμου της διαφορικής προστασίας που αναπτύξαμε θα μπορούσε πολύ εύκολα να χρησιμοποιηθεί ως ένα νέο εφαρμόσιμο μοντέλο ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας μετασχηματιστών ισχύος. Εκτός από το κατασκευαστικό κομμάτι, το μοντέλο το οποίο αναπτύξαμε θα μπορούσε να έχει εφαρμογή ως εκπαιδευτικό υλικό στην εκμάθηση της λειτουργίας αλλά και του σωστού σχεδιασμού ενός ηλεκτρονόμου διαφορικής προστασίας.

Παράρτημα Α: Κατηγοριοποίηση Η/Ν με βάση τα στοιχεία εισόδου

Στοιχείο	Η/Ν	ANSI Code	Αρχή λειτουργίας	Παράμετροι εισόδου	Έξοδος
Γεννήτρια	Out- of- step relay	78	Ο Η/Ν ανιχνεύει τις μεταβολές τις τάσης και της έντασης υπολογίζοντας κάθε φορά την εμπέδηση του συστήματος. Κάτω από τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας οι μεταβολές αυτές διακυμαίνονται σε μικρό βαθμό, ενώ σε συνθήκες σφάλματος οι διακυμάνσεις είναι απότομες.	Ρεύμα και τάση (V,I)	Εμπέδηση $(Z = \frac{V}{I})$
Μετασχηματιστής	Διαφορική προστασίας	87	Δέχεται ως εισόδους το ρεύμα και από τις δύο πλευρές του μετασχηματιστή. Σε ομαλές καταστάσεις το ρεύμα εισόδου είναι περίπου ίσο με το ρεύμα εξόδου, ενώ σε περιπτώσεις εμφάνισης σφάλματος το διαφορικό ρεύμα είναι πολύ μεγάλο.	Ρεύμα πρωτεύοντος & ρεύμα δευτερεύοντος (I_{prim}, I_{second})	Ρεύμα (I_{Diff})
Γραμμές μεταφοράς	Προστασία Αποστάσεως	21	Ένα σφάλμα που θα συμβεί σε μία γραμμή μεταφοράς θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της εμπέδησης της γραμμής. Η προστασία αυτή συγκρίνει την εμπέδηση που θα εμφανιστεί σε κατάσταση σφάλματος με ένα προκαθορισμένο όριο. Εάν η εμπέδηση που μετρηθεί είναι μικρότερη του ορίου, τότε ο Η/Ν δίνει εντολή για TRIP.	Ρεύμα και τάση (V,I)	Εμπέδηση $(Z = \frac{V}{I})$
	Προστασία Υπερεντάσεως	50/51	Ένα σφάλμα που θα συμβεί σε μία γραμμή μεταφοράς θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος που περνά μέσα από την γραμμή. Αυτό το ρεύμα συγκρίνεται με ένα προκαθορισμένο όριο, και στην περίπτωση που είναι μεγαλύτερο ενεργοποιείται ο Η/Ν	Ρεύμα (I)	Ρεύμα (I)

Φορτίο	Προστασία Υπέρτασης/βύθισης τάσεως	27/59	Κατά την εμφάνιση ενός σφάλματος σε έναν ζυγό φορτίου, αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της τερματικής τάσης. Έτσι εάν η μετρούμενη τάση είναι μεγαλύτερη (ή μικρότερη σε περίπτωση βύθισης τάσης) από ένα προκαθορισμένο όριο τότε δίνεται εντολή για TRIP.	Τάση (V)	Τάση (V)

Βιβλιογραφικές Αναφορές

[1] Umar Khan, ” Modeling and Protection of Phase Shifting Transformers”, University of Western Ontario,2013

[2] Mason C. Russell, “The Art and Science of Protective Relaying,” New York Wiley, 1956

[3] John Winders, *Power transformers principles and applications,* New York: Marcel Dekker,2002

[4] S.V.Kulkarni,S.A. Khaparde, *Transformer engineering Design and practice*, Bombay India: Marcel Dekker,2004

[5] C.R.Bayliss, B.j. Hardy, *Transmission and distribution electrical engineering*, 4th ed. Oxford U.K, 2012.

[6] R. Lamedica, M. Pompili, B.A. Cauzillo, S. Saniovanni, L. Calcava, A. Ruvio. “Instrument Voltage Transformer time-response to fast impulse”, 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Brazil, 2016

[7] M. Brehm D. Slomovitz A. Santos G. Aristoy L. Trigo “Modeling Capacitive Voltage Transformers for Distorted Waveforms Measurements”, 2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition, Morelia, Mexico

[8] Power Systems Relaying Committee, Working Group of the Relay Input Sources Subcommittee, “Transient response of coupling capacitor voltage transformers," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 12, pp. 4811-4814, December 1981.

[9] B. Naodovic, “Influence of instrument transformers on power system protection”, university of Texas, May 2005.

[10] Stephen J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 4th ed., New York: McGraw Hill,2005

[11] C. Preve, *Protection of Electrical Networks*, ISTE, United Kindom,2006

[12] H. J. Altuve, N.Fischer, G. Benmouyal, D. Finney, “Sizing Current Transformers for Line Protection Applications”, October 2012, *39th Annual Western Protective Relay Conference.*

[13] OMICRON, *Current transformer theory and testing*, OMICRON Academy,2016

[14] Θ. Τσιπότης, *Τεχνικές περιληπτικές γνώσεις μετασχηματιστών μετρήσεων*,2004

[15] P.M Anderson, *Power system protection* ,IEEE press,1999

[16] ABB, *Application guide: Instrument transformers*, ed.4 2015-02

[17] *IEC 61869 1-2007*,*Instrument transformers Part 1: General requirements*

[18] P.Fonti, “Current transformers: how to specify them”, Schneider Merlin Gerin, Cahier ,no.194, February 2000.

[19] IEEE Standard C37.110-1996, *IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes*

[20] *IEEE Standard C57.13-1993, Requirements for instrument transformers*, New York, June 1993,pp.1-73

[21] *IEC 61869 2-2012*, *Specific requirements for current transformer*

[22] WECC, *Relaying current transformer application*, Salt lake city, July 10, 2014,

[23] L.Blackburn, T.Domin, *Protective relaying principles and operations* ,3nd ed.,2006
[24] M.Riyas Ahamed, M.Vimalraj, S.Arjuna Rao,"Saturation Analysis of current transformer", *International journal of research & review*, vol.2, issue 6, June 2015
[25] 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.49-61,2016.
[26] Lj.A.Kojovic, "Comparative performance characteristics of current transformers and Rogowski coils used for protective relaying purposes", IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 2007
[27] 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
[28] Gerhard Ziegler, "Numerical differential protection, principles and applications",2nd ed. Siemens.
[29] A.H.A. Bakar, H. Mokhlis, N. Nazri, C.H. Wong, *Determination of Current Transformer Dimensioning*, university of Malaya,2011
[30] S.Ganesan, "Selection of current transformers & wire sizing in substations", presented at 59th Annual Conf. Protective Relay Engineers, U.S.A, 2006.
[31] J. Doncuk,P. Trnka, J. Pihera," Failure Gas Generation within the Oil-Paper Insulation System of Shunt Reactor", presented at Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal Canada,2012.
[32] L.G.Hewitson,M. Brown,R. Balakrishnan, *Power system protection*, 1th ed, Oxford, ELSEVIER,2004
[33] Didik Fauzi Dakhlan, "Modeling of internal faults in three phase three winding transformers for differential protection studies" ,Dept. Electrical engineering , Mathematics & computer science, Delft university, June 2009.
[34] "Science and Reactor Fundamentals-Transformers", CNSC Technical training Group, March 2003
[35] EPRI, *Power Transformer Maintenance and Application Guide*, Palo Alto CA: 2002. 1002913.
[36] N. Arapoglou, K. Siderakis,'' Differential Protection schemes and techniques for power transformers – educational aspects'', presented at 11th International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South Eastern Europe, Heraklion,Crete,2016
[37] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal, and H. J. Altuve, "Performance Analysis of Traditional and Improved Transformer Differential Protective Relays", SEL Technical Papers.
[38] H.Dashti, M.Davarpanah, M.Sanaye-Pasand, H.Lesani, "Discriminating transformer large inrush currents from fault currents", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,Vol.75, p.p74-82,Feb.2016
[39] B.Kasztenny, A.Kulidjian, "An improved transformer inrush restraint algorithm increases security while maintaining fault response performance", presented at 53 rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, Canada, January 2000

[40] M.Asrami, M.Gorjikolaie, S. M.Razavi ,S. Gholamian," A novel intelligent protection system for power transformers considering possible electrical faults, inrush current, CT saturation and over-excitation", *Journal of Electrical Power & Energy Systems*,Vol.64, p.p1129-1140,Aug.2014

[41] U. Rudez, R. Mihalic," Sympathetic Inrush Current Phenomenon with Loaded Transformers", *Electric Power Systems Research,*Vol.13,p.p3-10,Sep.2016

[42] G.Rockefeller, "Transformer Protection Application Guide", Basler Electric comp.,2007

[43] James H. Harlow, *Electric Power Transformer Engineering*, 3rd ed. USA, CRC Press, 2004

[44] SIEMENS, *SIPROTEC 4 Differential Protection 7UT6x* ,V4.67, C53000-G1176-C230-5, Edition 09.2016

[45] C.H Einval, J.R Linders, "A three-phase differential relay for transformer protection", IEEE Trans., PAS-94, 1971–1980, 1975

[46] 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.

[47] Ge Baoming, Aníbal T. de Almeida, Zheng Qionglin, Wang Xiangheng, "An Equivalent Instantaneous Inductance-Based Technique for Discrimination Between Inrush Current and Internal Faults in Power Transformers", In: IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, Oct. 2005, p. 2473-2482.

[48] Casper Labuschagne, Izak van der Merwe, "A Comparison Between High-Impedance and Low-Impedance Restricted Earth-Fault Transformer Protection" ,

[49] B. Nim Taj, A. Mahmoudi, S. Kahourzade, "Comparison of Low-Impedance Restricted Earth Fault Protection in Power-Transformer Numerical Relays", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences,* 5(12): 2458-2474, 2011.

[50] 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

[51] M.Gholami, E. Hajipour, M.Vakilian, "High Impedance Restricted Earth Fault Protection: Fundamental Concepts, Design and Performance", *international conference on electrical engineering*, Iran-Tehran, June 2016

[52] Mladen Kezunovic, Jinfeng Ren , Saeed Lotfifard, *Design, Modeling and Evaluation of Protective Relays for Power Systems*, New York: Springer, 2016

[53] Adel Aktaibi, M. Azizur Rahman, "Digital Differential Protection of Power Transformer Using Matlab", Memorial University of Newfoundland Canada, 2012