



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
“Δοκιμή μετασχηματιστή ισχύος”



Νικόλαος Κ. Σωτηριάδης
Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Μανουσάκης, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2019

Copyright © Νικόλαος Κ. Σωτηριάδης, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της παρούσας πτυχιακής εργασίας ολοκληρώνεται η περάτωση των προπτυχιακών σπουδών μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Νικόλαο Μανουσάκη για την υποστήριξη του, την καθοδήγηση του και το πολύ καλό κλίμα συνεργασίας που διαμόρφωσε, συμβάλλοντας τα μέγιστα για την κατάρτιση της πτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας, καθώς και για όλες τις θυσίες που έχουν κάνει προκειμένου να ολοκληρώσω το πρόγραμμα σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποσκοπεί στον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή ισχύος, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab της MathWorks. Ως γνωστόν, οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος προσδιορίζονται από τις δοκιμές κενού φορτίου και βραχυκύκλωσης. Επομένως θα δημιουργηθεί ένας κώδικας στο Matlab στον οποίο θα δίνονται οι τιμές των δοκιμών κενού φορτίου και βραχυκύκλωσης καθώς και κάποιων άλλων στοιχείων του μετασχηματιστή, είτε χρησιμοποιώντας δικές μας τιμές είτε τυποποιημένες τιμές, με στόχο την εύρεση των παραμέτρων.

Πιο αναλυτικά στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής παρουσίαση των Αρχών του Ηλεκτρομαγνητισμού, βάση των οποίων στηρίζεται και η λειτουργία του μετασχηματιστή. Αναλύονται οι βασικές ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών, ο τρόπος παραγωγής του μαγνητικού πεδίου και η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του μετασχηματιστή.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στις αρχές λειτουργίας του μονοφασικού μετασχηματιστή. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι εξισώσεις που διέπουν τον μετασχηματιστή κατά την εν κενώ και την υπό φορτίο λειτουργία του καθώς και παρουσιάζεται το ισοδύναμό του κύκλωμα. Το κεφάλαιο κλείνει παραθέτοντας τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή.

Το 3^ο κεφάλαιο αναφέρεται στους τριφασικούς μετασχηματιστές, όπου αναλύονται οι τρόποι σύνδεσης τους καθώς και η διάκριση ως προς τον τρόπο ψύξης τους. Επίσης αναλύεται ο τρόπος παραγωγής τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος και οι εξισώσεις που ισχύουν στα τριφασικά συστήματα.

Το 4^ο κεφάλαιο αναφέρεται στους αυτομετασχηματιστές. Αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του, η συνδεσμολογία και τα μεγέθη του μονοφασικού αυτομετασχηματιστή.

Στο 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κενού φορτίου και βραχυκύκλωσης σε διαφορετικής ισχύος μετασχηματιστές.

Λέξεις κλειδιά: Μετασχηματιστής, Matlab, δοκιμή κενού φορτίου, δοκιμή βραχυκύκλωσης, ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή, τύλιγμα υψηλής τάσης, τύλιγμα χαμηλής τάσης

ABSTRACT

This thesis aims to determine the electrical equivalent circuit parameters of a power transformer by using MathWorks' Matlab software. As it is already known, the parameters of the equivalent circuit are endured by open-circuit and short-circuit tests. Therefore, a code will be created in Matlab on which values of the open-circuit and short circuit tests will be given as well as some other elements of the transformer, either using our own values or standard values, in order to find the parameters.

Precisely, in Chapter 1 an extensive presentation of the Principles of Electromagnetism has been made, on which the transformer function is based. There is an analysis of the basic properties of ferromagnetic materials, the way of producing the magnetic field and of the electromagnetic Induction on which a transformer's function is based.

In Chapter 2 there is an extensive reference on the principles of the operation of single-phase transformer. More precisely, the equations which rule the transformer during its empty and load operation are analyzed and also there is a presentation of the equivalent circuit. This Chapter is closing by listing the parameters of the equivalent circuit of the transformer.

Moreover, Chapter 3 concerns to the three-phase transformers. There is an analysis of their connection patterns and a distinction on which way they are cooled. In Addition, we analyze the way of producing three-phase electric current and of the equations that apply to three-phase systems.

In Chapter 4, there is a reference on autotransformers. There is a detailed presentation of advantages and disadvantages of an autotransformer, the way of its connections and the equations of the single-phase autotransformer.

To conclude, in Chapter 5 which is the last part of this research there is a submission of the results of the no load and short-circuit tests in different transformers.

Keywords: Transformer, Matlab, open circuit test, short circuit test, equivalent circuit of transformer, high voltage winding, low voltage winding

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ABSTRACT	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	vi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ	1
1.1 Το μαγνητικό πεδίο και τα μεγέθη του	1
1.2 Μαγνητικά κυκλώματα	4
1.3 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή	6
1.4 Μαγνητικές ιδιότητες της ύλης	6
1.5 Καμπύλη μαγνήτισης	8
1.6 Βρόγχος υστέρησης	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ	12
2.1. Ιστορική ανασκόπηση και χρησιμότητα του μετασχηματιστή	12
2.2. Ορισμός και αρχή λειτουργίας	14
2.3. Κατασκευαστικά στοιχεία του μετασχηματιστή	15
2.3.1. Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα	16
2.3.2. Μετασχηματιστής τύπου μανδύα	16
2.4. Ιδανικός μετασχηματιστής	17
2.4.1. Λειτουργία ιδανικού μετασχηματιστή εν κενώ	18
2.4.2. Λειτουργία ιδανικού μετασχηματιστή υπό φορτίο	20
2.5. Πραγματικός μετασχηματιστής	23
2.6. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή	29
2.6.1. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον	29

2.6.2.	Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον	31
2.7.	Μαγνητικά συζευγμένα κυκλώματα	33
2.8.	Απώλειες ενεργείας στον μετασχηματιστή	36
2.8.1.	Απώλειες κενού φορτίου	36
2.8.2.	Απώλειες φορτίου	37
2.9.	Βαθμός απόδοσης μετασχηματιστή	38
2.10.	Ρύθμιση τάσης μετασχηματιστή	41
2.11.	Τάση βραχυκύκλωσης	42
2.12.	Προσδιορισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος	43
2.12.1.	Δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος	43
2.12.2.	Δοκιμή βραχυκύκλωσης	44
2.13.	Μετασχηματιστές μετρήσεων	46
2.13.1.	Μετασχηματιστές τάσης	46
2.13.2.	Μετασχηματιστές έντασης	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ		49
3.1.	Εισαγωγή στους τριφασικούς μετασχηματιστές	49
3.2.	Παραγωγή τριφασικού ρεύματος	49
3.3.	Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών	50
3.3.1.	Συνδεσμολογία αστέρα	51
3.3.2.	Συνδεσμολογία τριγώνου	53
3.3.3.	Συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα	54
3.3.4.	Συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα (Yy0)	55
3.3.5.	Συνδεσμολογία τριγώνου – τριγώνου (Dd0)	57
3.3.6.	Συνδεσμολογία αστέρα – τριγώνου (Yd1)	58
3.3.7.	Συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα (Dy1)	59
3.4.	Διάκριση μετασχηματιστών ως προς τον τρόπο ψύξης τους	61

3.4.1.	Μετασχηματιστές ελαίου	61
3.4.2.	Μετασχηματιστές ξηρού τύπου	66
3.4.3.	Μετασχηματιστές τύπου GIS	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΥΤΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ		69
4.1.	Εισαγωγικά στοιχεία	69
4.2.	Ανάλυση χαρακτηριστικών μεγεθών του αυτομετασχηματιστή	71
4.3.	Ρυθμιζόμενος αυτομετασχηματιστής	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ		73
5.1.	Δοκιμές μετασχηματιστών ισχύος	73
Βιβλιογραφία		78

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Παρακάτω παρατίθεται ο κατάλογος των σχημάτων της πτυχιακής εργασίας.

1.1	Στοιχειώδες μαγνητικό κύκλωμα.	2
1.2	Ηλεκτρικό ανάλογο του μαγνητικού κυκλώματος.	4
1.3	Η θυσάνωση στο διάκενο ενός πυρήνα.	5
1.4	Περιοχές Weiss σιδηρομαγνητικού υλικού α) χωρίς την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου β) κάτω από την επίδραση ισχυρού μαγνητικού πεδίου.	8
1.5	Καμπύλη μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού το οποίο είναι αρχικά αμαγνήτιστο.	9
1.6	Βρόγχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.	10
1.7	Βρόγχος υστέρησης ενός α) μαλακού μαγνητικού υλικού β) σκληρού μαγνητικού υλικού.	11
2.1	Ο πρώτος πρακτικός μετασχηματιστής του William Stanley, το 1885.	13
2.2	Στοιχειώδες μοντέλο μονοφασικού μετασχηματιστή που λειτουργεί με φορτίο.	14
2.3	Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα.	16
2.4	Μετασχηματιστής τύπου μανδύα.	17
2.5	Κυκλωματικό διάγραμμα του ιδανικού μετασχηματιστή κατά την εν κενώ λειτουργία.	19
2.6	Διανυσματικό διάγραμμα του ιδανικού μετασχηματιστή κατά την εν κενώ λειτουργία.	20
2.7	Ιδανικός μετασχηματιστής κατά την υπό φορτίο λειτουργία.	21
2.8	Διανυσματικό διάγραμμα του ιδανικού μετασχηματιστή κατά την υπό φορτίο λειτουργία.	22
2.9	Διανυσματικό διάγραμμα της ανάλυσης του ρεύματος διέγερσης κατά την εν κενώ λειτουργία του μετασχηματιστή.	24
2.10	Ηλεκτρικό κύκλωμα του πρωτεύοντος τυλίγματος μετασχηματιστή κατά την εν κενώ λειτουργία.	25

2.11	Ο πραγματικός μετασχηματιστής κατά την υπό φορτίο λειτουργία.	26
2.12	Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή κατά την υπό φορτίο λειτουργία.	27
2.13	Διανυσματικό διάγραμμα κατά την υπό φορτίο λειτουργία.	28
2.14	Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον.	30
2.15	Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον.	30
2.16	Διανυσματικό διάγραμμα απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον.	31
2.17	Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον.	32
2.18	Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον.	33
2.19	Διανυσματικό διάγραμμα απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον.	33
2.20	Συνθήκη για βέλτιστο βαθμό απόδοσης.	39
2.21	Διανυσματικό διάγραμμα μετασχηματιστή, ανηγμένο στο πρωτεύον.	42
2.22	Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος.	43
2.23	Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης.	45
2.24	Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τάσης	47
2.25	Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης	47
2.26	Αμπεροτσιμπίδα	48
3.1	Τρίγωνο ισχύος.	50
3.2	Συμβολισμός συνδεσμολογίας τυλιγμάτων τριφασικού μετασχηματιστή.	51
3.3	Συνδεσμολογία αστέρα.	52
3.4	Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων συνδεσμολογίας αστέρα.	53
3.5	Συνδεσμολογία τριγώνου.	53
3.6	Διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων συνδεσμολογίας τριγώνου.	54

3.7	Συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα.	55
3.8	Συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα.	56
3.9	Συνδεσμολογία τριγώνου – τριγώνου.	58
3.10	Συνδεσμολογία αστέρα – τριγώνου.	59
3.11	Συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα.	60
3.12	Τριφασικός μετασχηματιστής τύπου ελαίου.	62
3.13	Ηλεκτρονόμος Buchholz.	64
3.14	Πινακίδα τριφασικού μετασχηματιστή ελαίου, 630 KVA.	65
3.15	Συμβολισμός των μετασχηματιστών ελαίου ανάλογα με τον τρόπο ψύξης τους βάση του προτύπου IEC 60076-2.	66
3.16	Τριφασικός μετασχηματιστής ξηρού τύπου με μόνωση χυτορητίνης.	67
3.17	Μετασχηματιστής ισχύος 1500 KVA με μόνωση SF ₆ .	68
4.1	Μετασχηματιστής με τα τυλίγματά του (α) συνδεδεμένα κατά τον συμβατικό τρόπο (β) επανασυνδεδεμένα ως αυτομετασχηματιστής.	70
4.2	Συνδεσμολογία ρυθμιζόμενου αυτομετασχηματιστή.	72
5.1	Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 1 ^η δοκιμή.	73
5.2	Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 1 ^{ης} δοκιμής.	74
5.3	Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 2 ^η δοκιμή.	74
5.4	Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 2 ^{ης} δοκιμής.	74
5.5	Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 3 ^η δοκιμή.	75
5.6	Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 3 ^{ης} δοκιμής.	75

5.7	Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 4 ^η δοκιμή.	76
5.8	Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 4 ^{ης} δοκιμής.	76
5.9	Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 5 ^η δοκιμή.	76
5.10	Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 5 ^{ης} δοκιμής.	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ

1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ

1.1. Το μαγνητικό πεδίο και τα μεγέθη του

Μία από τις πιο στοιχειώδεις αρχές στον μαγνητισμό είναι η έννοια του μαγνητικού πεδίου. Όταν παράγεται ένα τέτοιο πεδίο σε έναν συγκεκριμένο χώρο είναι προφανές ότι αλλάζει η ενέργεια στο χώρο αυτό, με αποτέλεσμα να παράγεται μια δύναμη. Μαγνητικό πεδίο, ονομάζεται ο χώρος μέσα στον οποίο ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις επί μαγνητικών μαζών ή ρευματοφόρων αγωγών ή ηλεκτρικών φορτίων σε κίνηση, και εκδηλώνεται με την ανάπτυξη δυνάμεων μέσα σ' αυτά. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται σε κάθε περίπτωση που υπάρχει κίνηση ηλεκτρικού φορτίου. Η κίνηση αυτή μπορεί να οφείλεται στο ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, όπως ανακαλύφθηκε από τον Oersted το 1819. Επίσης, το μαγνητικό πεδίο παράγεται από έναν μόνιμο μαγνήτη. Το μαγνητικό πεδίο των μόνιμων μαγνητών οφείλεται στις κινήσεις των ηλεκτρονίων γύρω από τον άξονα τους (spin) και από τον πυρήνα του ατόμου. Οι κινήσεις αυτές των ηλεκτρονίων αντιστοιχούν σε στοιχειώδη ηλεκτρικά ρεύματα, τα οποία αναπτύσσουν στοιχειώδη μαγνητικά πεδία. Έτσι, κάθε άτομο οποιοδήποτε υλικού μπορεί να παράγει κάποιο μαγνητικό πεδίο και να είναι ένας στοιχειώδης μαγνήτης με βόρειο και νότιο πόλο. Στα σιδηρομαγνητικά υλικά, από τα οποία κατασκευάζονται οι μαγνήτες, τα μαγνητικά πεδία των ατόμων του υλικού είναι προσανατολισμένα μέσα σε πολύ μικρές περιοχές του υλικού. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται περιοχές Weiss και κάθε μια αποτελεί ένα μικροσκοπικό μαγνήτη. Όταν οι περιοχές Weiss του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι προσανατολισμένες στην ίδια διεύθυνση, το υλικό έχει τα χαρακτηριστικά ενός μαγνήτη, ενώ όταν είναι τυχαία προσανατολισμένες, τότε το υλικό εμφανίζεται αμαγνήτιστο. Η μορφή του μαγνητικού πεδίου, παριστάνεται με τις μαγνητικές γραμμές. Οι μαγνητικές γραμμές είναι συνεχείς (κλειστές) καμπύλες, μη τεμνόμενες και έχουν φορά από τον βόρειο προς τον νότιο πόλο. Επίσης ο αριθμός των μαγνητικών γραμμών είναι ανάλογος της έντασης του μαγνητικού πεδίου, το οποίο σημαίνει ότι όσες περισσότερες μαγνητικές γραμμές διέρχονται από ένα σημείο του μαγνητικού πεδίου τόσο μεγαλύτερη είναι και η ένταση του πεδίου στο σημείο αυτό. Οι μαγνητικές γραμμές είναι πιο πυκνές κοντά στους πόλους και όσο απομακρύνονται από αυτούς αραιώνουν.

Ο βασικός νόμος που διέπει την παραγωγή ενός μαγνητικού πεδίου εξαιτίας του ρεύματος είναι ο νόμος του Ampere, σύμφωνα με τον οποίο το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος μιας οποιασδήποτε κλειστής διαδρομής, ισούται με το ρεύμα που περικλείεται από τη συγκεκριμένη διαδρομή.

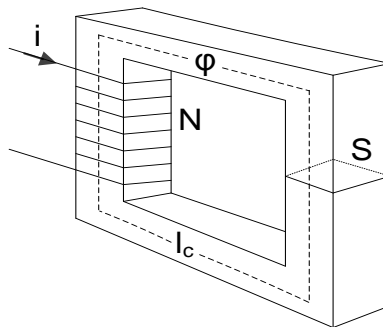
$$\oint_C \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I \quad (1.1)$$

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την σημασία της σχέσης 1.1, είναι χρήσιμο να την εφαρμόσουμε στο απλό παράδειγμα του σχήματος 1.1. Θεωρούμε ένα πηνίο με N αριθμό σπειρών, το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης i . Το πηνίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα του σχήματος 1.1. Στην περίπτωση αυτή, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το πηνίο περιορίζεται στο εσωτερικό του πυρήνα. Επομένως ο νόμος του Ampere ορίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα, σύμφωνα με τη σχέση

$$H l_c = N i \quad (1.2)$$

Όπου l_c είναι το μέσο μήκος διαδρομής του πυρήνα, το οποίο αποτελεί την κλειστή διαδρομή ολοκλήρωσης στο νόμο του Ampere. Η διεύθυνση και η φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου ταυτίζονται με τη διεύθυνση και τη φορά των μαγνητικών γραμμών. Το μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του πυρήνα, σύμφωνα με τη σχέση 1.2 είναι

$$H = \frac{NI}{l_c} = \frac{F}{l_c} \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.1- Στοιχειώδες μαγνητικό κύκλωμα.

Οι μονάδες στο SI, της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι αμπεροστροφές ανά μέτρο (At/m) και του ρεύματος είναι amperes (A). Ο αριθμητής στη σχέση 1.3 ονομάζεται μαγνητεγερτική δύναμη και συμβολίζεται με F . Μονάδα μέτρησης της μαγνητεγερτικής δύναμης είναι οι αμπεροστροφές (At). Η ένταση του μαγνητικού πεδίου εκφράζει το πόσο ισχυρό είναι ένα πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου καθώς και το έργο που καταβάλλει το

ηλεκτρικό ρεύμα για την δημιουργία μαγνητικού πεδίου στον πυρήνα. Η ισχύς του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του πυρήνα. Το αποτέλεσμα της προσπάθειας της έντασης του ρεύματος να παράγει μαγνητικό πεδίο εκφράζεται με το μέγεθος της μαγνητικής επαγωγής. Η μαγνητική επαγωγή, συχνά αναφέρεται και σαν πυκνότητα μαγνητικής ροής και εκφράζει τον αριθμό των μαγνητικών γραμμών που τέμνουν κάθετα μία επιφάνεια 1m^2 . Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής, είναι το Tesla ($T = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$). Η σχέση η οποία συνδέει την ένταση του μαγνητικού πεδίου με την μαγνητική επαγωγή είναι

$$B = \mu H \quad (1.4)$$

Στην σχέση 1.4, με μ συμβολίζεται η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα και αντιπροσωπεύει τη σχετική ευκολία της ανάπτυξης μαγνητικού πεδίου σε ένα συγκεκριμένο υλικό. Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής διαπερατότητας είναι H/m. Επιπλέον η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1.5)$$

Συγκεκριμένα με μ_0 συμβολίζεται η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και η τιμή της είναι

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m} \quad (1.6)$$

Ο συντελεστής μ_r , ονομάζεται σχετική μαγνητική διαπερατότητα, και ορίζει πόσες φορές η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού είναι μεγαλύτερη από τη διαπερατότητα του κενού.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.7)$$

Ο συνολικός αριθμός των μαγνητικών γραμμών που διαπερνά μια επιφάνεια, ονομάζεται μαγνητική ροή. Η μονάδα της μαγνητικής ροής είναι το weber (Wb) και δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$\Phi = \int_S B ds \quad (1.8)$$

Όπου ds είναι η στοιχειώδης μονάδα επιφάνεια της διατομής του πυρήνα. Σε περίπτωση που το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής είναι σταθερό σ' όλη την επιφάνεια και το διάνυσμά της είναι κάθετο στην επιφάνεια, η σχέση (1.8) γράφεται ως

$$\Phi = B S \quad (1.9)$$

1.2. Μαγνητικά κυκλώματα

Ως μαγνητικό κύκλωμα ορίζεται ένα σύστημα από σιδηρομαγνητικά υλικά που οδηγούν την μαγνητική ροή σε κλειστές διαδρομές. Από το σχήμα 1.1 παρατηρούμε ότι η μαγνητεγερτική δύναμη είναι υπεύθυνη για την δημιουργία της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μαγνητικού κυκλώματος. Αυτό είναι κατά κάποιο τρόπο ανάλογο με την τάση σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που παράγει τη ροή ρεύματος σε αυτό. Για να ισχύει αυτή η αναλογία θεωρούμε ότι τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν σταθερή μαγνητική διαπερατότητα καθώς και ότι η μαγνητική ροή περιορίζεται αποκλειστικά στον πυρήνα του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος. Αν αντικαταστήσουμε τις σχέσεις 1.4 και 1.9 στην εξίσωση 1.3 τότε προκύπτει ότι

$$F = \frac{1}{\mu S} \Phi = \Phi R_m \quad (1.10)$$

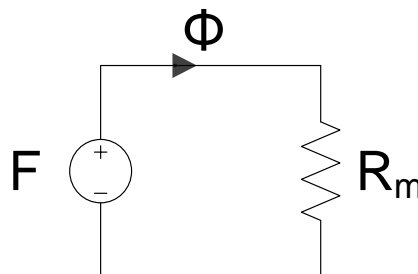
όπου η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος ισούται με

$$R_m = \frac{1}{\mu S} \text{ At/Wb} \quad (1.11)$$

Στα μαγνητικά κυκλώματα η σχέση μεταξύ της μαγνητεγερτικής δύναμης και της μαγνητικής ροής δίνεται από την σχέση 1.10 ενώ στα ηλεκτρικά κυκλώματα η σχέση μεταξύ της τάσης και του ρεύματος δίνεται από τον νόμο του Ohm

$$V = I R \quad (1.12)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις 1.10 και 1.12 παρατηρούμε ότι η μαγνητεγερτική δύναμη είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού, η μαγνητική ροή είναι ανάλογη με το ρεύμα και η μαγνητική αντίσταση είναι ανάλογη της ηλεκτρικής αντίστασης. Επομένως το ηλεκτρικό ανάλογο του μαγνητικού κυκλώματος του σχήματος 1.1 δίνεται από το παρακάτω σχήμα



Σχήμα 1.2- Ηλεκτρικό ανάλογο του μαγνητικού κυκλώματος.

Όπως και η πηγή τάσης στο ηλεκτρικό κύκλωμα, έτσι και η μαγνητεγερτική δύναμη στο μαγνητικό κύκλωμα έχει μια πολικότητα. Την φορά της μαγνητικής ροής και επομένως την πολικότητα της μαγνητεγερτικής

δύναμης μπορούμε να την προσδιορίσουμε με τον κανόνα του δεξιού χεριού. Βάσει του κανόνα αυτού, αν με τα δάχτυλα του δεξιού χεριού μας αγκαλιάσουμε το πηνίο έτσι ώστε όταν τα δάχτυλα κλείνουν ως προς τη φορά του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο τότε ο αντίχειρας μας δείχνει άκρη στην οποία θα βρίσκεται ο βόρειος πόλος.

Άλλο ένα μέγεθος στα μαγνητικά κυκλώματα είναι η μαγνητική αγωγιμότητα όπου είναι το αντίστροφο από την μαγνητική αντίσταση και δίνεται από την παρακάτω σχέση

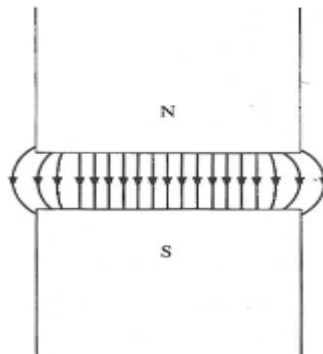
$$P_m = \frac{1}{R_m} \quad (1.13)$$

Επίσης οι μαγνητικές αντιστάσεις σε ένα μαγνητικό κύκλωμα ακολουθούν τους ίδιους κανόνες με τις αντιστάσεις σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Συνεπώς οι ισοδύναμες εν σειρά και εν παραλλήλω μαγνητικές αντιστάσεις ενός κυκλώματος το οποίο αποτελείται από η μαγνητικές αντιστάσεις δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$R_{m,eqse} = R_{m,1} + R_{m,2} + R_{m,3} + \dots + R_{m,n} \quad (1.14)$$

$$\frac{1}{R_{m,eqpa}} = \frac{1}{R_{m,1}} + \frac{1}{R_{m,2}} + \frac{1}{R_{m,3}} + \dots + \frac{1}{R_{m,n}} \quad (1.15)$$

Υπάρχει και η περίπτωση κατά την οποία στο μαγνητικό κύκλωμα μπορεί να υπάρχει και διάκενο αέρα το οποίο προκαλεί μια διαταραχή στη μαγνητική ροή. Στο διάκενο παρατηρείται αύξηση στην ενεργό διατομή διέλευσης της μαγνητικής ροής, σχήμα 1.3. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται θυσάνωση και γίνεται εντονότερο με την αύξηση του μήκους του διακένου.



Σχήμα 1.3- Η θυσάνωση στο διάκενο ενός πυρήνα.

1.3. Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Στις προηγούμενες ενότητες αναλύθηκε η παραγωγή του μαγνητικού πεδίου και οι ιδιότητές του. Όμως το υπάρχον μαγνητικό πεδίο μπορεί να επηρεάσει με διάφορους τρόπους το περιβάλλον γύρω από αυτό. Ένας από τους παραπάνω τρόπους είναι το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ή νόμος του Faraday, το οποίο αποτελεί την βάση της λειτουργίας του μετασχηματιστή. Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ανακαλύφθηκε και διατυπώθηκε μαθηματικά από τον Άγγλο επιστήμονα Michael Faraday το 1831, όπου σύμφωνα με αυτό η ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται σε ένα κύκλωμα είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από την επιφάνεια που ορίζει το κύκλωμα.

$$e = - N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.16)$$

Η εξίσωση 1.16 ισχύει στην περίπτωση κατά την οποία, η ίδια μαγνητική ροή διέρχεται από όλες τις σπείρες του πηνίου. Στην ανάλυση των μετασχηματιστών η παραπάνω σχέση γράφεται και ως

$$e = - \frac{d\lambda}{dt} \quad (1.17)$$

όπου, η πεπλεγμένη ροή ισούται με

$$\lambda = N*\phi \quad (1.18)$$

Στην περίπτωση που η μαγνητική ροή είναι διαφορετική σε κάθε σπείρα η σχέση που μας δίνει την επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι

$$e = - \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N \phi_i \right) \quad (1.19)$$

Το αρνητικό πρόσημο στην σχέση που μας δίνει την ηλεκτρεγερτική δύναμη οφείλεται στον κανόνα του Lenz. Η επίδραση του κανόνα αυτού στους μετασχηματιστές είναι για την πρόβλεψη της πολικότητας των τάσεων που επάγονται στα τυλίγματα τους. Βάση του κανόνα αυτού η πολικότητα της επαγόμενης τάσης είναι τέτοια ώστε τα επαγόμενα ρεύματα που δημιουργούνται να αντιτίθεται στο αίτιο που τα προκάλεσε.

1.4. Μαγνητικές ιδιότητες της ύλης

Σύμφωνα με το κλασικό πρότυπο του ατόμου, τα ηλεκτρόνια κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα. Η κίνηση του ηλεκτρονίου σε κλειστή τροχιά γύρω από τον πυρήνα, ισοδυναμεί με ένα βρόγχο ρεύματος. Οι μαγνητικές ιδιότητες της ύλης, οφείλονται στα εσωτερικά ρεύματα των ατόμων. Η δημιουργία των ρευμάτων οφείλεται στην περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τους πυρήνες των ατόμων (τροχιακή στροφορμή) αλλά και λόγω της περιστροφικής κίνησης γύρω από τον άξονά τους (spin ή εσωτερική στροφορμή). Επομένως οι βρόγχοι των ρευμάτων, δημιουργούν το

δικό τους μαγνητικό πεδίο. Η συνολική μαγνητική ροπή ενός ατόμου, είναι το διανυσματικό άθροισμα των τροχιακών μαγνητικών ροπών και των μαγνητικών ροπών-spin των ηλεκτρονίων του. Όταν ένα υλικό υφίσταται την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, τότε αυτό μαγνητίζεται. Η μαγνήτιση ορίζεται ως η μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού και εκφράζει την πυκνότητα των προσανατολισμένων ατομικών μαγνητικών ροπών στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Η μαγνήτιση ενός υλικού δίνεται από την σχέση 1.20 και μονάδα μέτρησής της είναι A/m.

$$M = \frac{m}{\Delta V} \quad (1.20)$$

Η μαγνήτιση του υλικού έχει ως συνέπεια να αλλάξει η μαγνητική επαγωγή του υλικού. Πιο συγκεκριμένα εάν σε ένα εξωτερικό πεδίο εισάγουμε κάποιο μαγνητικό υλικό τότε η μαγνητική επαγωγή σε οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του υλικού προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα του εξωτερικού πεδίου και του πεδίου που δημιουργείται από το μαγνητικό υλικό.

$$B = B_0 + B_m = \mu_0 (H+M) \quad (1.21)$$

Η μαγνήτιση συνδέεται με την ένταση του εφαρμοζόμενου πεδίου μέσω της σχέσης

$$M = \chi H \quad (1.22)$$

όπου χ είναι η μαγνητική επιδεκτικότητα του υλικού και εκφράζει την ενίσχυση της μαγνητικής επαγωγής που οφείλεται στην παρουσία του υλικού μέσα στο εφαρμοζόμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Με βάση την σχέση (1.22), η σχέση (1.21) γράφεται

$$B = \mu_0 (1+\chi) H \quad (1.23)$$

Από τις σχέσεις (1.4) και (1.23) έχουμε

$$\mu = \mu_0 (1+\chi) \quad (1.24)$$

και από τη σχέση (1.7) προκύπτει

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (1.25)$$

Αντικαθιστώντας την (1.25) στην σχέση (1.23) προκύπτει

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (1.26)$$

Τα υλικά με βάση τις μαγνητικές τους ιδιότητες διακρίνονται στα διαμαγνητικά, στα παραμαγνητικά και στα σιδηρομαγνητικά υλικά. Η σχέση (1.26) ισχύει για τα παραμαγνητικά και τα διαμαγνητικά υλικά.

Στα διαμαγνητικά υλικά εφαρμόζοντας εξωτερικό μαγνητικό πεδίο τα τροχιακά των ηλεκτρονίων και επομένως των μαγνητικών ροπών των ατόμων τροποποιούνται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στο σχηματισμό μικρών μαγνητικών δίπολων μέσα στα άτομα που αντιτίθενται στο εξωτερικό πεδίο (B

$= B_0 - \mu_0 M$). Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των διαμαγνητικών υλικών είναι μικρότερη της μονάδας ($\mu_r < 1$) και η μαγνητική επιδεκτικότητά τους είναι αρνητική ($\chi \approx -10^{-6}$). Το φαινόμενο του διαμαγνητισμού είναι αντιστρεπτό, δηλαδή εάν το υλικό απομακρυνθεί από το μαγνητικό πεδίο εξαφανίζονται οι επαγόμενες μαγνητικές ροπές, οι οποίες αντιτίθενται στο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο και το υλικό πλέον δεν διατηρεί μόνιμο μαγνητισμό.

Στα παραμαγνητικά υλικά εφαρμόζοντας εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι ατομικές μαγνητικές ροπές προσανατολίζονται κατά τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου με αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης του ασκούμενου μαγνητικού πεδίου ($B = B_0 + \mu_0 M$). Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των παραμαγνητικών υλικών είναι μεγαλύτερη της μονάδας ($\mu_r > 1$) και η μαγνητική επιδεκτικότητά τους είναι θετική ($\chi \approx 10^{-6} - 10^{-2}$). Όπως στα διαμαγνητικά υλικά έτσι και τα παραμαγνητικά υλικά όταν απομακρυνθούν από το μαγνητικό πεδίο οι ατομικές μαγνητικές ροπές προσανατολίζονται και πάλι τυχαία με αποτέλεσμα το υλικό να μην παρουσιάζει μαγνήτιση.

Στα σιδηρομαγνητικά υλικά εφαρμόζοντας εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, οι ατομικές μαγνητικές ροπές ευθυγραμμίζονται κατά τη διεύθυνση του εξωτερικού πεδίου με αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να αποκτούν μεγάλη μαγνήτιση, μέρος της οποίας διατηρούν σαν μόνιμη μαγνήτιση και μετά την απομάκρυνση του μαγνητικού πεδίου. Η μαγνητική συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών οφείλεται στο σχηματισμό μαγνητικών περιοχών ή περιοχών Weiss εντός αυτών, ακόμα και χωρίς την ύπαρξη εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, στις οποίες οι ατομικές μαγνητικές ροπές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και προσανατολίζονται παράλληλα και ομόρροπα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αυθόρμητη μαγνήτιση. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της μονάδας ($\mu_r \gg 1$), και συγκεκριμένα οι τιμές της κυμαίνονται από 2000 έως 6000.



(α)



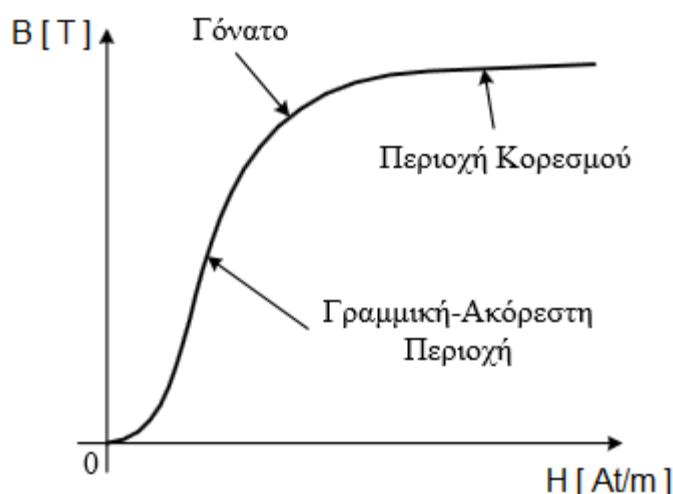
(β)

Σχήμα 1.4- Περιοχές Weiss σιδηρομαγνητικού υλικού α) χωρίς την επίδραση εξωτερικού μαγνητικού πεδίου β) κάτω από την επίδραση ισχυρού μαγνητικού πεδίου.

1.5. Καμπύλη μαγνήτισης

Η μαγνητική διαπερατότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την μεταβολή της μαγνητικής ροής. Στο σχήμα

1.5 η γραφική παράσταση της συνάρτησης $B = f(H)$, απεικονίζει την καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού. Η καμπύλη αυτή είναι μη γραμμική και αυτό οφείλεται στον κορεσμό και στην μαγνητική υστέρηση που εμφανίζουν τα σιδηρομαγνητικά υλικά. Αρχικά υποθέτουμε ότι το υλικό είναι αμαγνήτιστο και στην συνέχεια αυξάνουμε την ένταση του πεδίου από το μηδέν έως μια μέγιστη τιμή. Εν συνεχεία μια μικρή αύξηση της έντασης του πεδίου προκαλεί μεγάλη αύξηση της μαγνητικής επαγωγής ενώ στη συνέχεια έχουμε μια σχεδόν γραμμική μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής. Η περιοχή αυτή ονομάζεται ακόρεστη. Έπειτα από ένα συγκεκριμένο σημείο επιπλέον αύξηση του πεδίου μεταβάλλει ελάχιστα την μαγνητική επαγωγή. Η περιοχή μετάβασης από την ακόρεστη στην κορεσμένη περιοχή ονομάζεται γόνατο κορεσμού. Στην περιοχή του κορεσμού η μαγνητική επαγωγή έχει την μέγιστη τιμή της και παραμένει αμετάβλητη με την αύξηση της έντασης του πεδίου. Με βάση την σχέση 1.4 ο λόγος της μαγνητικής επαγωγής με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, μας δίνει την μαγνητική διαπερατότητα του υλικού σε κάθε τιμή της έντασης του πεδίου. Όταν ο πυρήνας λειτουργεί με ισχυρό κορεσμό η μαγνητική διαπερατότητα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές.

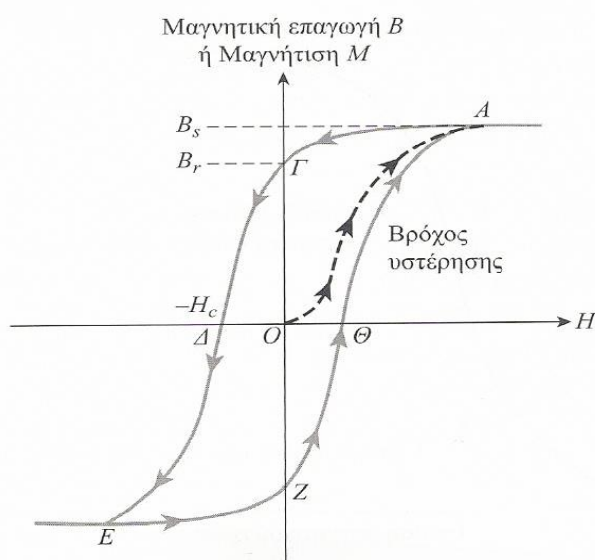


Σχήμα 1.5- Καμπύλη μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού, το οποίο είναι αρχικά αμαγνήτιστο.

1.6. Βρόγχος υστέρησης

Το βασικό χαρακτηριστικό των σιδηρομαγνητικών υλικών που τα διαχωρίζει από τα υπόλοιπα μαγνητικά υλικά είναι, το ότι εμφανίζουν το φαινόμενο της υστέρησης. Οι ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών καθορίζονται ουσιαστικά από τον βρόγχο υστέρησης τους. Κατά την απουσία εξωτερικού πεδίου το υλικό δεν παρουσιάζει μαγνήτιση. Η επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου οδηγεί σε αύξηση της μαγνητικής επαγωγής μέχρι μια ορισμένη τιμή κορεσμού B_s , όπου περαιτέρω αύξηση του πεδίου δεν οδηγεί σε αύξηση της μαγνητικής επαγωγής. Στο σημείο A οι ατομικές μαγνητικές

ροπές του υλικού έχουν ευθυγραμμιστεί πλήρως στη διεύθυνση που επιβάλλει το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Εν συνεχεία, μειώνοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου έως ότου μηδενιστεί, παρατηρούμε ότι η μαγνητική επαγωγή δεν μηδενίζεται, αλλά υπάρχει μια παραμένουσα μαγνήτιση B_r . Επίσης παρατηρούμε ότι τα σημεία της διαδρομής Α-Γ, για τις ίδιες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου, αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής επαγωγής σε σχέση με τα σημεία της αρχικής διαδρομής Ο-Α. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση και η τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης εξαρτάται από το είδος του σιδηρομαγνητικού υλικού και την κατεργασία του. Αν αναστραφεί η φορά του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου επιτυγχάνουμε μηδενισμό της πυκνότητας της μαγνητικής ροής. Στο σημείο Δ της χαρακτηριστικής, το σιδηρομαγνητικό υλικό έχει απομαγνητιστεί πλήρως ($B = 0$) και η αντίστοιχη ένταση, η οποία εφαρμόζεται για την απομαγνήτιση του υλικού ονομάζεται απομαγνητίζουσα δύναμη ή συνεκτικό πεδίο. Επιπλέον αύξηση του πεδίου με αντίθετη φορά οδηγεί σε μια νέα κατάσταση κόρου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται κατά συμμετρικό τρόπο, δημιουργώντας τον κλειστό βρόγχο του σχήματος 1.6.

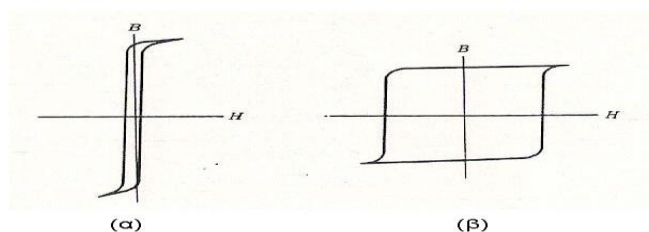


Σχήμα 1.6- Βρόγχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

Η κλειστή καμπύλη ΑΓΔΕΖΘΑ ονομάζεται βρόγχος υστέρησης. Το εμβαδόν του βρόγχου υστέρησης είναι ανάλογο των απωλειών υστέρησης, δηλαδή της ενέργειας που χάνεται σε μορφή θερμότητας κάθε φορά που η ένταση του μαγνητικού πεδίου κάνει ένα πλήρη κύκλο. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που διακρίνει τα σιδηρομαγνητικά υλικά είναι ότι όταν θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες μεταβάλλονται σε παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία μετάβασης ονομάζεται θερμοκρασία Curie. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες της θερμοκρασίας Curie οι ατομικές μαγνητικές ροπές αποπροσανατολίζονται, η διαπερατότητα μειώνεται απότομα και η μαγνητική επαγωγή κορεσμού B_s μηδενίζεται οπότε το υλικό περνάει στην παραμαγνητική φάση. Όταν το υλικό ψυχθεί σε θερμοκρασία χαμηλότερη από

την θερμοκρασία Curie τότε οι μαγνητικές περιοχές ξανασχηματίζονται οπότε το υλικό επανακτά τις σιδηρομαγνητικές του ιδιότητες.

Ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθος του βρόγχου υστέρησης των σιδηρομαγνητικών υλικών, αυτά διακρίνονται σε μαλακά και σκληρά μαγνητικά υλικά. Τα μαλακά μαγνητικά υλικά μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα και ο βρόγχος υστέρησης τους είναι <στενός>, με μικρές απώλειες υστέρησης, με μικρές τιμές της έντασης του συνεκτικού πεδίου H_c , για τις οποίες μηδενίζεται η μαγνητική επαγωγή του υλικού. Γι αυτό τον λόγο τα μαλακά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται σαν πυρήνες μετασχηματιστών, κινητήρων και γεννητριών. Αντιθέτως τα σκληρά μαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται ως μόνιμοι μαγνήτες όπου χρειάζεται μεγάλο συνεκτικό πεδίο, υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση ενώ έχουν μεγάλες απώλειες υστέρησης.



Σχήμα 1.7- Βρόγχος υστέρησης ενός (α) μαλακού μαγνητικού υλικού και (β) σκληρού μαγνητικού υλικού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ

2.1. Ιστορική ανασκόπηση και χρησιμότητα του μετασχηματιστή

Ο Thomas A. Edison ανέπτυξε το πρώτο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ, το οποίο λειτουργούσε με συνεχές ρεύμα στα 120V και τροφοδοτούσε ένα δίκτυο φωτισμού με λαμπτήρες πυρακτώσεως. Το 1882 δημιουργείται ο πρώτος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Νέα Υόρκη, ο οποίος στηρίχθηκε πάνω στο δίκτυο του Edison. Μεταξύ 1883 και 1886 έγιναν οι πρώτες δοκιμές σε γραμμές με συνεχές ρεύμα και έδειξαν ότι υπάρχουν εγγενείς δυσκολίες στο σύστημα Συνεχούς Ρεύματος. Συγκεκριμένα για την τροφοδοσία ενός σημαντικού φορτίου, η παραγόμενη ενέργεια διανέμεται με χαμηλή τιμή τάσης με αποτέλεσμα το ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς να είναι αρκετά υψηλό. Αυτό είχε ως συνέπεια τη δημιουργία απωλειών στις γραμμές μεταφοράς (ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος της γραμμής), γεγονός το οποίο μείωνε την περιοχή διανομής του σταθμού παραγωγής. Επομένως, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αδυναμίας μεταφοράς συνεχούς τάσης με μεγάλο πλάτος, ήταν τοπικοί και μικρής ισχύος.

Η ιστορία του μετασχηματιστή ξεκινάει από τον 19^ο αιώνα. Το 1831 ο Michael Faraday ανακάλυψε και διατύπωσε μαθηματικά το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί την αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή. Αργότερα, ο Ιρλανδός Νίκολας Κάλαν το 1836, εφηύρε το πηνίο επαγωγής το οποίο αποτέλεσε τον πρώτο μετασχηματιστή για πολλές χρήσεις, καθώς ήταν ένας από τους πρώτους που κατάλαβαν την αρχή πως όσο περισσότερες περιελίξεις έχει ένα τύλιγμα, τόσο μεγαλύτερη ηλεκτρεγερτική δύναμη παράγει. Από το 1830 έως το 1880 έγιναν πολλές προσπάθειες και πειραματισμοί για την δημιουργία καλύτερων επαγωγικών πηνίων, αλλά μετά το 1880 επιτεύχθηκαν αποδοτικές προσπάθειες και ανακαλύψεις. Συγκεκριμένα το 1885, ο Αμερικάνος φυσικός William Stanley βασισμένος σε παλαιότερες ανακαλύψεις, δημιούργησε την πρώτη πρακτική συσκευή εναλλασσόμενου ρεύματος. Η συσκευή αυτή ήταν ο πρόδρομος του σύγχρονου μετασχηματιστή, σχήμα 2.1.



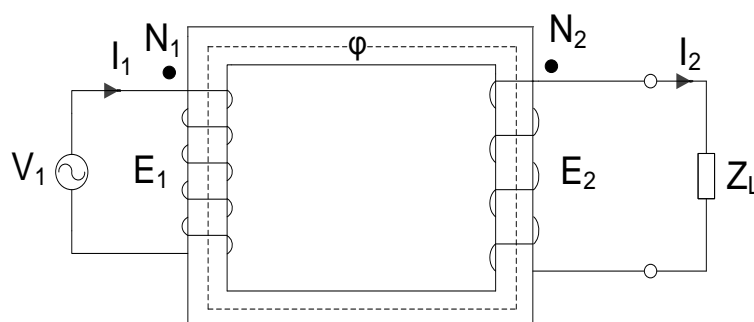
Σχήμα 2.1- Ο πρώτος πρακτικός μετασχηματιστής του William Stanley, το 1885.

Στα τέλη του 1880 ξέσπασε μια διαμάχη για το εάν το εναλλασσόμενο ρεύμα θα έπρεπε να αντικαταστήσει το συνεχές ρεύμα. Το κύριο πλεονέκτημα του εναλλασσόμενου ρεύματος οφείλεται ουσιαστικά στην ευκολία με την οποία μπορούν εύκολα να μεταφερθούν από χαμηλή τάση σε υψηλή και αντίστροφα. Η τιμή της εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να αυξάνεται ή να μειώνεται, διευκολύνοντας έτσι την αποδοτική παραγωγή και μετάδοση της ενέργειας σε σχετικά υψηλές τάσεις και στη συνέχεια τη μείωση σε χαμηλότερες χρησιμοποιήσιμες τάσεις στο σημείο χρήσης. Εκτός από το γεγονός ότι η εναλλασσόμενη τάση μεταβάλλεται εύκολα, υπάρχουν και άλλοι λόγοι για τους οποίους χρησιμοποιούνται εναλλασσόμενα ρεύματα. Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος δεν απαιτούν μεταγωγείς με τα συνοδευτικά προβλήματα και συντήρησή τους, γεγονός που τους καθιστά πιο γρήγορους, απλούστερους, ελαφρύτερους σε βάρος και πιο αξιόπιστους σε σχέση με τις αντίστοιχες γεννήτριες συνεχούς ρεύματος των ίδιων χαρακτηριστικών. Ο όρος εναλλασσόμενη τάση αναφέρεται στην τάση η οποία συνεχώς μεταβάλλεται σε μέγεθος και περιοδικά αναστρέφει την πολικότητά της. Με βάση τα παραπάνω πλεονεκτήματα, το εναλλασσόμενο ρεύμα επικράτησε έναντι του συνεχούς ρεύματος, το οποίο μπορούσε να μετασχηματίζεται εύκολα, γρήγορα και οικονομικά μέσω του μετασχηματιστή.

Ο μετασχηματιστής μετατρέπει το επίπεδο της εναλλασσόμενης τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του, σε διαφορετικό επίπεδο τάσης στην έξοδο του διατηρώντας σταθερή την συχνότητα, με μικρές απώλειες. Επομένως η ενέργεια που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής, οδηγείται σε κοντινούς μετασχηματιστές, οι οποίοι με τη σειρά τους μετατρέπουν την τάση της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλή. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας με τις γραμμές μεταφοράς σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με λιγότερες απώλειες, καθώς οι σταθμοί παραγωγής είναι συνήθως μακριά από τα μεγάλα αστικά κέντρα. Μέσω του δικτύου μεταφοράς, η ηλεκτρική ενέργεια οδηγείται στους υποσταθμούς μέσης και χαμηλής τάσης, όπου με τη βοήθεια μετασχηματιστών η τάση της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται από υψηλή σε μέση και χαμηλή αντίστοιχα, προκειμένου με τη βοήθεια των γραμμών διανομής να διανεμηθεί σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μέση τάση και σε κατοικίες που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση.

2.2. Ορισμός και αρχή λειτουργίας

Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από το ένα κύκλωμα στο άλλο μέσω του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, χωρίς να μεταβληθεί η συχνότητα. Ο μετασχηματιστής είναι μια στατή συσκευή (δεν έχει στρεφόμενες μάζες και κινούμενους μηχανισμούς), με συνέπεια ο βαθμός απόδοσής τους να είναι υψηλός της τάξης των 95% με 98%. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία τα οποία είναι τυλιγμένα γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά δεν συνδέονται μεταξύ τους και είναι ηλεκτρικά απομονωμένα. Η μόνη σύνδεση μεταξύ των πηνίων είναι η κοινή μαγνητική ροή που υπάρχει μέσα στον πυρήνα. Το πηνίο το οποίο συνδέεται με το δίκτυο ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα ενώ το δεύτερο πηνίο στο οποίο επάγεται η τάση ονομάζεται δευτερεύον τύλιγμα.



Σχήμα 2.2- Στοιχειώδες μοντέλο μονοφασικού μετασχηματιστή που λειτουργεί με φορτίο.

Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται η πιο απλή μορφή ενός μετασχηματιστή. Όταν το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή αριθμού σπειρών N_1 , τροφοδοτηθεί με εναλλασσόμενη τάση του δικτύου, τότε κυκλοφορεί σ' αυτό εναλλασσόμενο ρεύμα. Επιπλέον γνωρίζουμε ότι, όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Επομένως, η εναλλασσόμενη ένταση του ρεύματος δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο με μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, η οποία κλείνει κύκλωμα μέσα από τον πυρήνα και διαπερνά τις σπείρες N_2 του δευτερεύοντος κυκλώματος. Αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής είναι η ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων από επαγωγή E_1 και E_2 , στα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα, οι οποίες αντιτίθενται στην εφαρμοζόμενη τάση λόγω του νόμου του Lenz. Εφόσον στο δευτερεύον τύλιγμα υπάρχει φορτίο, τότε η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη δημιουργεί ένα ρεύμα το οποίο ρέει διαμέσου αυτού και συνεπώς η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από το ένα κύκλωμα στο άλλο. Η τιμή της τάσης στα άκρα του φορτίου εξαρτάται από τον αριθμό σπειρών του δευτερεύοντος τυλίγματος.

2.3. Κατασκευαστικά στοιχεία του μετασχηματιστή

Κάθε μετασχηματιστής αποτελείται από δύο βασικά μέρη, τον πυρήνα ο οποίος αποτελεί το μαγνητικό κύκλωμα και δύο τυλίγματα, το τύλιγμα υψηλής τάσης και το τύλιγμα χαμηλής τάσης.

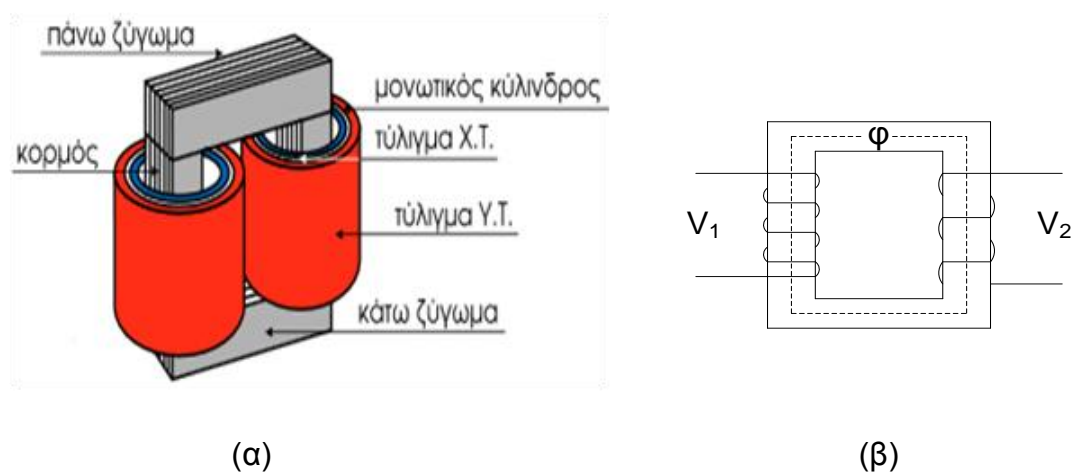
Οι αγωγοί των τυλιγμάτων είναι κατασκευασμένοι από μονωμένο χαλκό. Το τύλιγμα υψηλής τάσης αποτελείται από πολλές σπείρες μικρής διατομής, ενώ το τύλιγμα χαμηλής τάσης αποτελείται από μικρότερο αριθμό σπειρών αλλά μεγαλύτερης διατομής αγωγού και τυλίγονται πάνω σε καλούπια και στη συνέχεια τοποθετούνται στους κορμούς. Τα δύο τυλίγματα είναι μονωμένα το ένα από το άλλο καθώς και ως προς τον πυρήνα, με κατάλληλο εμποτισμένο χαρτί ή μίκα, ανάλογα με τις τάσεις τους. Στον μετασχηματιστή του σχήματος 2.2 παρατηρούμε ότι τα δύο τυλίγματα είναι τοποθετημένα ξεχωριστά στους δύο κορμούς του πυρήνα. Το μειονέκτημα αυτής της σύνδεσης, είναι η αύξηση της μαγνητικής ροής σκέδασης η οποία επηρεάζει την απόδοση του μετασχηματιστή. Για να περιοριστεί η μαγνητική ροή σκέδασης τα δύο τυλίγματα τοποθετούνται ομόκεντρα, όπου το τύλιγμα χαμηλής τάσης τοποθετείται κοντά στον πυρήνα ενώ το τύλιγμα υψηλής τάσης τοποθετείται μετά από αυτό. Υπάρχουν και τα δυσκοειδή τυλίγματα στα οποία κάθε τύλιγμα αποτελείται από πολλούς δίσκους οι οποίοι τοποθετούνται εναλλάξ, ένας δίσκος χαμηλής τάσης ένας δίσκος υψηλής τάσης κ.ο.κ. Οι δίσκοι της χαμηλής τάσης καθώς και της υψηλής τάσης συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους, οπότε έχουμε δύο άκρα για τη χαμηλή και δύο για την υψηλή.

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή έχει είτε ορθογώνιο είτε τετράγωνο σχήμα. Ο πυρήνας με τετράγωνο σχήμα χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρής ισχύος μετασχηματιστές ενώ σε μεγάλης ισχύος χρησιμοποιείται ο πυρήνας ορθογωνίου σχήματος. Επίσης χωρίζεται περαιτέρω σε δύο μέρη. Το κάθετο τμήμα του πυρήνα επί του οποίου τυλίγονται τα πηνία ονομάζεται κορμός, ενώ τα άνω και κάτω οριζόντια τμήματα ονομάζονται ζυγώματα. Στον πυρήνα εμφανίζονται δύο είδη απωλειών, οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων, τις οποίες πρέπει να περιορίσουμε. Για την κατασκευή του χρησιμοποιούνται λεπτά ελάσματα πάχους 0,3 - 0,5 mm και τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο, με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν μια συνεχή μαγνητική διαδρομή με το ελάχιστο διάκενο αέρος. Ο πυρήνας ο οποίος είναι κατασκευασμένος με την προηγούμενη μέθοδο, ονομάζεται στοιβαχτός πυρήνας. Τα ελάσματα αυτά είναι μονωμένα το ένα από το άλλο χρησιμοποιώντας το βερνίκι ή επίστρωση οξειδίου σαν μονωτικό υλικό, αυξάνοντας την ηλεκτρική τους αντίσταση, για τον περιορισμό των δινορρευμάτων. Επιπλέον τα ελάσματα είναι κατασκευασμένα από κράμα σιδήρου ψυχρής έλασης, προσανατολισμένων κόκκων στην διεύθυνση της έλασης, με πρόσμιξη πυριτίου 3 – 4%. Ο σίδηρος με περιεκτικότητα σε πυρίτιο μειώνει τις απώλειες υστέρησης διότι μειώνει την αντίσταση των μορίων κατά την απομαγνήτισή τους. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται και ο άμορφος σίδηρος σαν υλικό για τον πυρήνα του μετασχηματιστή, διότι οι απώλειες στον πυρήνα είναι έως και 70% μικρότερες σε σχέση με την

προηγούμενη μέθοδο. Η υψηλή μαγνητική διαπερατότητα του σιδηρομαγνητικού πυρήνα αυξάνει την μαγνητική σύζευξη των τυλιγμάτων, που σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής περιορίζεται σε μια ορισμένη διαδρομή που συνδέει και τα δύο τυλίγματα. Οι μετασχηματιστές ανάλογα με τη μορφή του μαγνητικού τους κυκλώματος και την τοποθέτηση των τυλιγμάτων τους στους κορμούς, διακρίνονται σε μετασχηματιστές τύπου πυρήνα και μετασχηματιστές τύπου μανδύα.

2.3.1 Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα

Ο μετασχηματιστής τύπου πυρήνα αποτελείται από ένα μαγνητικό κύκλωμα και κύριο χαρακτηριστικό του είναι ότι τα τυλίγματά του μοιράζονται ισομερώς γύρω από τους δύο κορμούς ενός ορθογωνίου πυρήνα. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζουμε τις απώλειες σκέδασης καθώς και η φυσική ψύξη του μετασχηματιστή είναι πιο αποτελεσματική. Σε κάθε κορμό υπάρχει ένα τύλιγμα χαμηλής τάσης και, πάνω απ' αυτό ένα τύλιγμα υψηλής τάσης με τη μορφή κυλίνδρων, τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους και ως προς τον κορμό, με κατάλληλο μονωτικό χαρτί ή μίκα, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.3 (α). Τα τυλίγματα τόσο της χαμηλής, όσο και της υψηλής τάσης συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους, έτσι ώστε να μείνουν ελεύθερα δύο άκρα για την χαμηλή τάση και δύο άκρα για την υψηλή τάση αντίστοιχα. Η τοποθέτηση των τυλιγμάτων στους κορμούς γίνεται αφαιρώντας το άνω ζύγωμα του πυρήνα του μετασχηματιστή. Το σχήμα 2.3 (β) μας δείχνει την σχηματική αναπαράσταση του μετασχηματιστή τύπου πυρήνα.

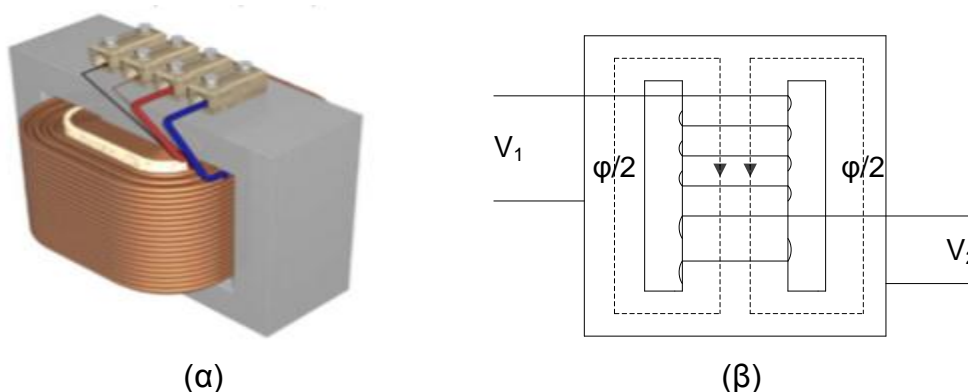


Σχήμα 2.3 - Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα.

2.3.2 Μετασχηματιστής τύπου μανδύα

Ο μετασχηματιστής τύπου μανδύα αποτελείται από δύο μαγνητικά κυκλώματα και έχει τρεις κορμούς. Η διατομή του μεσαίου κορμού του πυρήνα είναι διπλάσια από την διατομή των δύο ακριανών κορμών και αυτό γιατί η

μαγνητική ροή στο μεσαίο κορμό είναι διπλάσια από την αντίστοιχη των ακριανών κορμών, σχήμα 2.4. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής να είναι ίδια και στους τρεις κορμούς. Τα τυλίγματα είναι τοποθετημένα στον μεσαίο κορμό και οι δύο ακραίοι κορμοί χρησιμεύουν για να κλείνουν το μαγνητικό κύκλωμα. Ο πυρήνας περιβάλλει το μεγαλύτερο μέρος των τυλιγμάτων και αυτό έχει ως συνέπεια η φυσική ψύξη του μετασχηματιστή να μην είναι αποτελεσματική. Τα τυλίγματα μπορεί να είναι διαμορφωμένα είτε σε συγκεντρική είτε σε δισκοειδή μορφή. Το σχήμα 2.4 (β) μας δείχνει την σχηματική αναπαράσταση του μετασχηματιστή τύπου μανδύα.



Σχήμα 2.4 - Μετασχηματιστής τύπου μανδύα.

2.4. Ιδανικός μετασχηματιστής

Ιδανικός ονομάζεται ο μετασχηματιστής ο οποίος δεν παρουσιάζει απώλειες κατά τη μεταφορά ισχύος από το πρωτεύον στο δευτερεύον τύλιγμα. Στην πραγματικότητα ο ιδανικός μετασχηματιστής δεν υφίσταται, αλλά η μελέτη του είναι σημαντική για την κατανόηση του πραγματικού μετασχηματιστή. Οι προϋποθέσεις που ισχύουν στον ιδανικό μετασχηματιστή είναι οι εξής:

- Ο πυρήνας του μετασχηματιστή δεν παρουσιάζει απώλειες. Δηλαδή οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης καθώς και οι απώλειες δινορρευμάτων είναι μηδενικές.
- Οι ωμικές αντιστάσεις τόσο του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος τυλιγματος αμελούνται.
- Η μαγνητική ροή περιορίζεται στον πυρήνα και συνδέει πλήρως τα δύο τυλίγματα. Δηλαδή η μαγνητική ροή σκέδασης είναι μηδενική.
- Η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα είναι άπειρη οπότε το ρεύμα μαγνήτισης είναι σχεδόν μηδενικό.

2.4.1. Λειτουργία ιδανικού μετασχηματιστή εν κενώ

Κατά την εν κενώ λειτουργία του μετασχηματιστή το δευτερεύον τυλίγμα είναι ανοιχτό με αποτέλεσμα να μην διαρρέεται από ρεύμα, ενώ το πρωτεύον τυλίγμα τροφοδοτείται με τάση και κυκλοφορεί σ' αυτό ρεύμα το οποίο είναι απαραίτητο για την δημιουργία της μαγνητικής ροής στον πυρήνα, σχήμα 2.5. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα μαγνήτισης, αφού σκοπός του είναι να μαγνητίσει τον πυρήνα και συμβολίζεται με I_m . Ο ιδανικός μετασχηματιστής κατά την εν κενώ λειτουργία του συμπεριφέρεται όπως ένα καθαρά επαγωγικό κύκλωμα. Επομένως στον πυρήνα του μετασχηματιστή δημιουργείται μια εναλλασσόμενη μαγνητική ροή, η οποία διαπερνά τις σπείρες τόσο του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή. Αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής είναι η δημιουργία ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων από επαγωγή, στα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα. Σύμφωνα με το νόμο του Lenz, η πολικότητα των επαγόμενων τάσεων είναι τέτοια ώστε να αντιτίθεται στο αίτιο που τις προκάλεσε, δηλαδή στην τάση εισόδου. Επομένως, η τάση εξ' επαγωγής του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι ίση και αντίθετη με την τάση της πηγής και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$e_1 = - N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.1)$$

Η στιγμιαία τιμή της μαγνητικής ροής είναι

$$\varphi = \varphi_{\max} \cos \omega t \quad (2.2)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση 2.2 στην σχέση 2.1 προκύπτει ότι

$$e_1 = - N_1 \frac{d}{dt} (\varphi_{\max} \cos \omega t) \quad (2.3)$$

$$e_1 = N_1 \omega \varphi_{\max} \sin \omega t \quad (2.4)$$

Η τάση εξ' επαγωγής αποκτά τη μέγιστη τιμή της όταν το $\sin \omega t$ είναι ίσο με τη μονάδα,

$$E_{1,\max} = N_1 \omega \varphi_{\max} \quad (2.5)$$

Ενώ η ενεργός τιμή (rms) της τάσης εξ' επαγωγής του πρωτεύοντος τυλίγματος δίνεται από

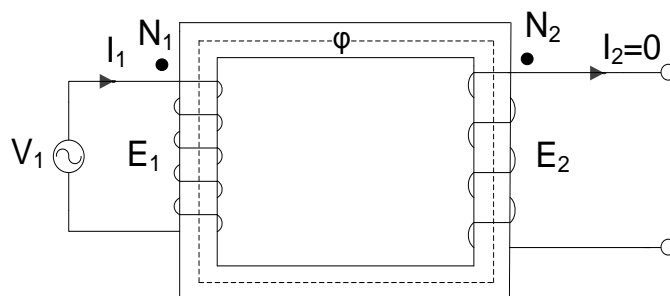
$$E_1 = \frac{E_{1,\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 2 \pi f \varphi_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (2.6)$$

$$E_1 = 4.44 f N_1 \varphi_{\max} \quad (2.7)$$

Λύνοντας την σχέση 2.7 ως προς Φ_{\max} , και δεδομένου ότι η τάση εξ' επαγωγής του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι ίση με την τάση που εφαρμόζεται προκύπτει ότι

$$\Phi_{\max} = \frac{V_1}{4.44 f N_1} \quad (2.8)$$

Από την σχέση 2.8 συμπεραίνουμε ότι η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής που εγκαθίσταται στον πυρήνα, καθορίζεται αποκλειστικά από την ενεργό τιμή και τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας καθώς και από τον αριθμό των σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος.



Σχήμα 2.5- Κυκλωματικό διάγραμμα του ιδανικού μετασχηματιστή κατά την εν κενώ λειτουργία.

Εφ' όσον το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή είναι ανοιχτό, η τάση εξ' επαγωγής του δευτερεύοντος τυλίγματος ισούται με την τάση στους ακροδέκτες του. Επίσης η τάση εξ' επαγωγής αντιτίθεται στην τάση εισόδου, οπότε είναι αντίθετη με αυτήν, αλλά η τιμή της εξαρτάται από τις σπείρες του δευτερεύοντος τυλίγματος. Η σχέση η οποία μας δίνει την ενεργό τιμή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης από επαγωγή του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_{\max} \quad (2.9)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις 2.7 και 2.9 προκύπτει

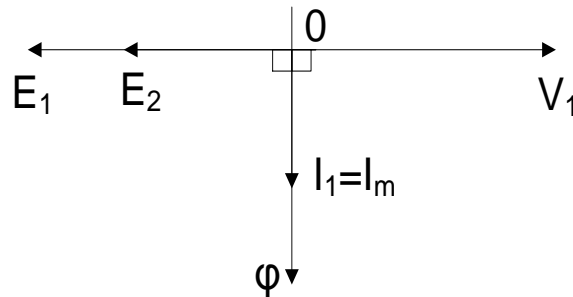
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \alpha \quad (2.10)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση ο λόγος των επαγόμενων τάσεων ισούται με τον λόγο των σπειρών των δύο τυλιγμάτων καθώς επίσης και με τον λόγο των τάσεων των τυλιγμάτων. Ο λόγος αυτός είναι γνωστός ως λόγος μετασχηματισμού και συμβολίζεται με α . Έτσι,

- Εάν $N_1 > N_2$ δηλαδή $\alpha > 1$ τότε ο μετασχηματιστής ονομάζεται μετασχηματιστής υποβιβασμού.
- Εάν $N_1 < N_2$ δηλαδή $\alpha < 1$ τότε ο μετασχηματιστής ονομάζεται μετασχηματιστής ανύψωσης.

- Εάν $N_1 = N_2$ δηλαδή $\alpha = 1$ τότε ο μετασχηματιστής ονομάζεται μετασχηματιστής απομόνωσης ή μετασχηματιστής 1:1.

Το διανυσματικό διάγραμμα του ιδανικού μετασχηματιστή κατά την εν κενώ λειτουργία απεικονίζεται στο σχήμα 2.6.



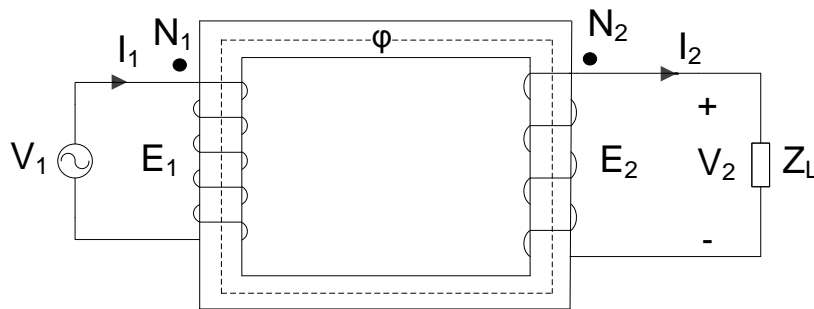
Σχήμα 2.6- Διανυσματικό διάγραμμα του ιδανικού μετασχηματιστή κατά την εν κενώ λειτουργία.

Από το σχήμα 2.6 παρατηρούμε ότι η τάση εισόδου προπορεύεται του ρεύματος μαγνήτισης κατά 90° . Αυτό συμβαίνει διότι ο μετασχηματιστής συμπεριφέρεται σαν ένα καθαρά επαγωγικό κύκλωμα. Το ρεύμα μαγνήτισης το οποίο παράγει την μαγνητική ροή στον πυρήνα είναι σε φάση με την μαγνητική ροή και η τιμή του είναι πολύ μικρή. Οι επαγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι αντίθετες ως προς την τάση εισόδου. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι ίση σε μέγεθος με την τάση εισόδου ενώ η ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι μικρότερη σε μέγεθος από την τάση εισόδου, διότι το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή του σχήματος 2.5 αποτελείται από μικρότερο αριθμό σπειρών. Δηλαδή λειτουργεί ως μετασχηματιστής υποβιβασμού ($E_1 > E_2$).

2.4.2. Λειτουργία ιδανικού μετασχηματιστή υπό φορτίο

Κατά την υπό φορτίο λειτουργία του ιδανικού μετασχηματιστή το πρωτεύον τύλιγμά του τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση του δικτύου, ενώ στο δευτερεύον συνδέεται φορτίο και κυκλοφορεί σε αυτό ρεύμα έντασης I_2 . Η κυκλοφορία του ρεύματος στις σπείρες του δευτερεύοντος τυλίγματος, θα δημιουργήσει στον πυρήνα του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος μια νέα μαγνητεγερτική δύναμη η οποία θα είναι αντίθετη από την αντίστοιχη του πρωτεύοντος, σύμφωνα με την συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του σχήματος 2.7. Κάνοντας εφαρμογή του νόμου του Ampere θα έχουμε

$$\sum F = N_1 I_1 - N_2 I_2 = R_m \Phi \quad (2.11)$$



Σχήμα 2.7- Ιδανικός μετασχηματιστής κατά την υπό φορτίο λειτουργία.

Επειδή όμως ο μετασχηματιστής είναι ιδανικός η μαγνητική διαπερατότητα του πυρήνα είναι άπειρη με αποτέλεσμα η μαγνητική αντίσταση του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος να είναι μηδενική. Οπότε η σχέση 2.11 παίρνει τη μορφή

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (2.12)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \alpha \quad (2.13)$$

Σύμφωνα με την σχέση 2.13, ο λόγος των ρευμάτων των δύο τυλιγμάτων ισούται με τον αντίστροφο του λόγου μετασχηματισμού του αριθμού των σπειρών των δύο τυλιγμάτων. Επομένως η σχέση 2.10 μπορεί να γραφτεί

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = \alpha \quad (2.14)$$

Όπως προαναφέρθηκε, το ρεύμα το οποίο κυκλοφορεί στο δευτερεύον τύλιγμα δημιουργεί μια μαγνητική ροή ϕ_2 στον πυρήνα του μετασχηματιστή, η οποία αντιτίθεται στην μαγνητική ροή. Συνεπώς η μαγνητεγερτική δύναμη του δευτερεύοντος τυλιγματος ονομάζεται απομαγνητίζουσα. Αποτέλεσμα της μαγνητικής ροής ϕ_2 , είναι η στιγμιαία μείωση της μαγνητικής ροής, η οποία με την σειρά της θα δημιουργήσει μια ανισορροπία μεταξύ της τάσης εισόδου και της τάσης εξ' επαγωγής του πρωτεύοντος τυλιγματος. Για να μειωθεί η επίδραση της μαγνητικής ροής του δευτερεύοντος στην μαγνητική ροή, το πρωτεύον τύλιγμα απορροφά μεγαλύτερο ρεύμα. Το ποσό του ρεύματος αυτού ονομάζεται ρεύμα αντιδράσεως και συμβολίζεται με I_2' . Το ρεύμα αντιδράσεως δημιουργεί μια μαγνητική ροή ϕ_2' η οποία αντιτίθεται και εξουδετερώνει την μαγνητική ροή ϕ_2 , αλλά είναι σε φάση με την μαγνητική ροή. Επομένως η μαγνητική ροή διατηρείται και πάλι σε σταθερό επίπεδο. Άρα καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η κοινή ροή μαγνήτισης είναι πρακτικά σταθερή, είτε ο μετασχηματιστής δουλεύει στο κενό είτε στο πλήρες φορτίο (η μείωση από το κενό στο πλήρες φορτίο δεν ξεπερνά το 1-3%) και ως εκ τούτου το ρεύμα μαγνήτισης δεν υφίσταται αλλαγή. Συνεπώς θα ισχύει ότι

$$(N_1 I_m)_{nl} = (N_1 I_1)_{fl} \quad (2.15)$$

και

$$I_1 = I_m + I_2' \quad (2.16)$$

Αντικαθιστώντας την σχέση 2.16 στην 2.15 και λαμβάνοντας υπόψη την απομαγνητίζουσα επίδραση του ρεύματος του δευτερεύοντος τυλίγματος έχουμε

$$N_1 I_m = N_1 I_m + N_1 I_2' - N_2 I_2 \quad (2.17)$$

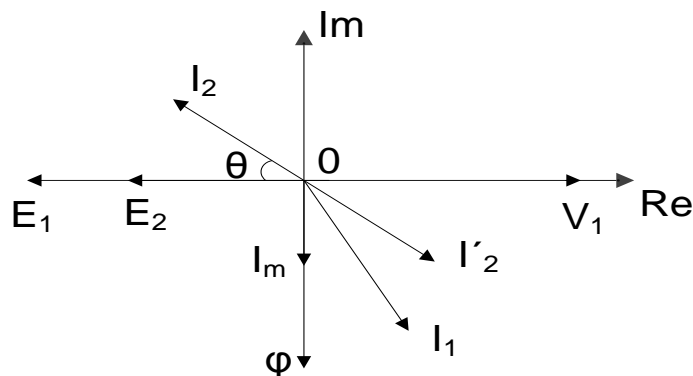
Λύνοντας ως προς το ρεύμα αντίδρασης την παραπάνω σχέση έχουμε

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (2.18)$$

Η σύνθετη αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι ίση με την σύνθετη αντίσταση του φορτίου. Δηλαδή $Z_2 = Z_L = R + jX_L$, με την προϋπόθεση ότι το φορτίο μας είναι επαγωγικό. Όσο αφορά τη σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος τυλίγματος θα ισχύει ότι

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2 \alpha}{\frac{I_2}{\alpha}} = \alpha^2 Z_L \quad (2.19)$$

Από την σχέση 2.19 διαπιστώνουμε ότι η σύνθετη αντίσταση του φορτίου από την πλευρά της εισόδου φαίνεται πολλαπλασιασμένη με το τετράγωνο του λόγου μετασχηματισμού. Το διανυσματικό διάγραμμα του ιδανικού μετασχηματιστή κατά την υπό φορτίο λειτουργία απεικονίζεται στο σχήμα 2.8.



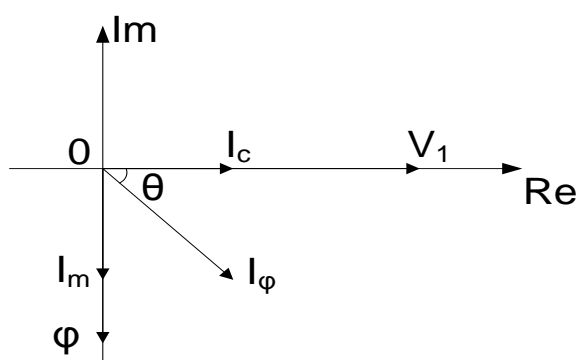
Σχήμα 2.8- Διανυσματικό διάγραμμα του ιδανικού μετασχηματιστή κατά την υπό φορτίο λειτουργία.

Από το σχήμα 2.8 παρατηρούμε ότι το διάνυσμα του ρεύματος του δευτερεύοντος τυλίγματος, έπεται του διανύσματος της τάσης E_2 κατά γωνία θ .

Αυτό οφείλεται στο ότι το φορτίο το οποίο συνδέθηκε στα άκρα του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι επαγωγικής φύσεως. Το διάνυσμα του ρεύματος αντίδρασης είναι ίσο σε τιμή αλλά βρίσκεται σε αντίφαση σε σχέση με το διάνυσμα του ρεύματος του δευτερεύοντος τυλίγματος. Το διάνυσμα του ρεύματος του πρωτεύοντος, σύμφωνα με τον νόμο του παραλληλογράμμου, είναι το διανυσματικό άθροισμα του ρεύματος αντίδρασης και του ρεύματος μαγνήτισης. Εφόσον ο μετασχηματιστής δεν παρουσιάζει απώλειες η ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι ίση με την τάση στα άκρα του φορτίου καθώς και ότι αντιτίθενται στο αίτιο που την προκάλεσε, δηλαδή την τάση εισόδου.

2.5. Πραγματικός μετασχηματιστής

Κατά την ανάλυση της κενής λειτουργίας του πραγματικού μετασχηματιστή πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας τις απώλειες που παρουσιάζει ο μετασχηματιστής. Οι απώλειες αυτές συγκεκριμένα διακρίνονται σε απώλειες πυρήνα, απώλειες χαλκού και απώλειες σκέδασης. Όταν εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή και στο δευτερεύον δεν είναι συνδεδεμένο κανένα φορτίο, τότε το πρωτεύον τύλιγμα απορροφά ένα ρεύμα το οποίο ονομάζεται ρεύμα διέγερσης. Επομένως το ρεύμα του πρωτεύοντος πρέπει να καλύψει τις προαναφερθείσες απώλειες. Το ρεύμα διέγερσης αποτελείται από δύο συνιστώσες, εκ των οποίων η πρώτη ονομάζεται ρεύμα μαγνήτισης, το οποίο είναι άεργου χαρακτήρα και υπεύθυνο για την δημιουργία και την διατήρηση της μαγνητικής ροής στον πυρήνα. Το ρεύμα μαγνήτισης όπως έχει προαναφερθεί είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται, όμως το διάνυσμά του έπεται του διανύσματος της τάσης κατά 90° , ενώ είναι σε φάση με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής. Όσο αφορά την δεύτερη συνιστώσα, αυτή ονομάζεται ρεύμα απωλειών πυρήνα το οποίο είναι υπεύθυνο για την αντιμετώπιση των απωλειών του πυρήνα. Συγκεκριμένα οι απώλειες πυρήνα διαχωρίζονται στις απώλειες λόγω δινορρευμάτων και στις απώλειες από μαγνητική υστέρηση οι οποίες ελκύονται υπό την μορφή θερμότητας στον πυρήνα του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες της τάσης τροφοδοσίας. Επίσης το ρεύμα απωλειών του πυρήνα είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης και το διάνυσμά του είναι σε φάση με το αντίστοιχο της τάσης. Το ρεύμα διέγερσης αποτελεί ένα μικρό ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος, επομένως η πτώση τάσης στην σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι μικρή και έτσι με καλή προσέγγιση μπορεί να αμεληθεί. Στο σχήμα 2.9 αποτυπώνονται όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για το ρεύμα διέγερσης.



Σχήμα 2.9- Διανυσματικό διάγραμμα της ανάλυσης του ρεύματος διέγερσης κατά την εν κενώ λειτουργία του μετασχηματιστή.

Σύμφωνα με το σχήμα 2.9, το ρεύμα διέγερσης είναι το διανυσματικό άθροισμα του ρεύματος μαγνήτισης και του ρεύματος απωλειών του πυρήνα.

$$\bar{I}_\varphi = \bar{I}_m + \bar{I}_c \quad (2.20)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος μαγνήτισης καθώς και του ρεύματος απωλειών του πυρήνα δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις

$$I_m = I_\varphi \sin \theta \quad (2.21)$$

$$I_c = I_\varphi \cos \theta \quad (2.22)$$

Παρατηρούμε επίσης ότι το διάνυσμα του ρεύματος διέγερσης έπεται του διανύσματος της τάσης εισόδου κατά γωνία θ . Η ενεργός τιμή του ρεύματος διέγερσης είναι

$$I_\varphi = \sqrt{I_m^2 + I_c^2} \quad (2.23)$$

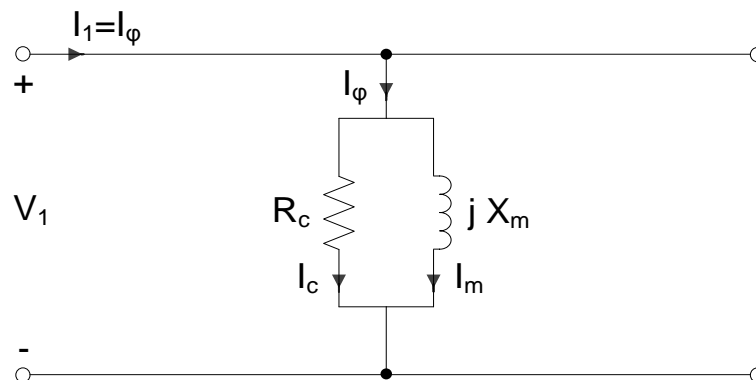
Το ρεύμα διέγερσης το οποίο υπολογίζεται κατά την εν κενώ λειτουργία του μετασχηματιστή είναι το ίδιο και κατά την υπό φορτίο λειτουργία. Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως η κυματομορφή του ρεύματος διέγερσης παρουσιάζεται παραμορφωμένη και με πολλές αρμονικές, λόγω της μη γραμμικότητας του φαινομένου της υστέρησης και του κορεσμού του πυρήνα. Η ισχύς κενού φορτίου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

$$P_{oc} = V_1 I_\varphi \cos \theta \quad (2.24)$$

Όπου $\cos \theta$ ονομάζεται συντελεστής ισχύος και η γωνία θ δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{I_m}{I_c} \right) \quad (2.25)$$

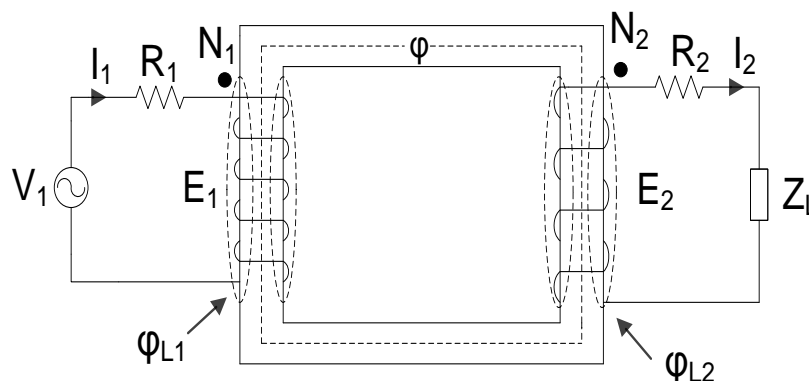
Η ενεργός ισχύς του μετασχηματιστή κατά την εν κενώ λειτουργία αντιπροσωπεύει τις απώλειες του πυρήνα, οι οποίες θεωρούνται σταθερές και κατά τη λειτουργία υπό φορτίο. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται το ηλεκτρικό κύκλωμα του πρωτεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή αμελώντας την σύνθετη αντίσταση.



Σχήμα 2.10- Ηλεκτρικό κύκλωμα του πρωτεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή κατά την εν κενώ λειτουργία.

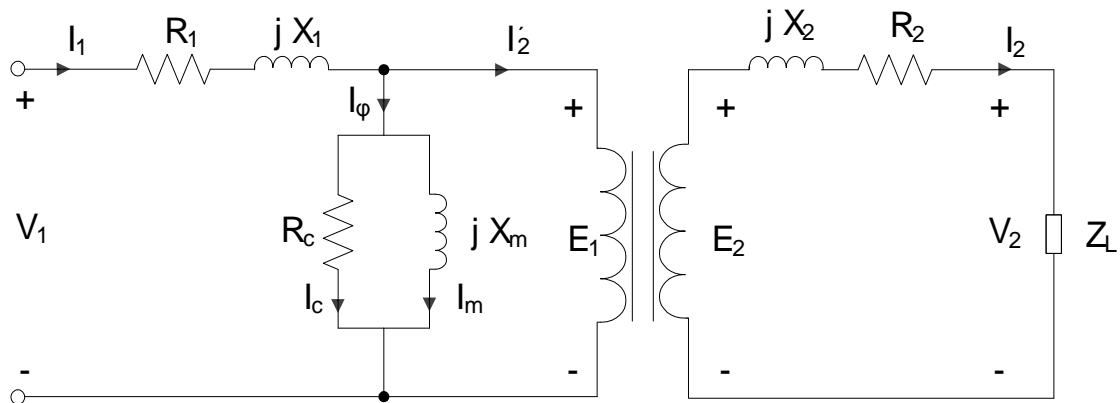
Το ρεύμα μαγνήτισης είναι ανάλογο με την εφαρμοζόμενη τάση όμως έπεται κατά 90° σε σχέση με αυτή οπότε το ρεύμα μαγνήτισης αντιστοιχίζεται σε μια επαγωγική αντίδραση X_m , η οποία τοποθετείται παράλληλα με την πηγή τάσης. Το ρεύμα απωλειών του πυρήνα είναι και αυτό ανάλογο της εφαρμοζόμενης τάσης όμως είναι σε φάση με αυτή, οπότε η ωμική αντίσταση R_c αντιπροσωπεύει τις απώλειες του πυρήνα και τοποθετείται και αυτή παράλληλα με την πηγή τάσης. Η ωμική αντίσταση R_c καθώς και η επαγωγική αντίδραση X_m τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους και αποτελούν τον κλάδο μαγνήτισης του μετασχηματιστή.

Επίσης τα τυλίγματα του μετασχηματιστή παρουσιάζουν ηλεκτρική αντίσταση. Οι ωμικές αντιστάσεις προκαλούν πτώση τάσης καθώς και απώλειες Joule στα τυλίγματα, οπότε οι τιμές τους πρέπει να είναι μικρές για τον περιορισμό των απωλειών. Επιπροσθέτως, οι ωμικές αντιστάσεις των δύο τυλιγμάτων είναι κατανομημένες ομοιόμορφα σε όλο το μήκος των τυλιγμάτων, όμως στην μοντελοποίηση του μετασχηματιστή τις εκφράζουμε ως δύο συγκεντρωμένες αντιστάσεις R_1 και R_2 για το πρωτεύον και για το δευτερεύον τύλιγμα αντίστοιχα. Μέχρι τώρα υποθέταμε ότι ολόκληρη η μαγνητική ροή που δημιουργείται από το ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος, περιορίζεται στον πυρήνα και συνδέει τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα. Στην πράξη όμως αυτό δεν συμβαίνει, διότι ένα μέρος της μαγνητικής ροής του πρωτεύοντος καθώς και του δευτερεύοντος τυλίγματος ρέει σε διαδρομές που βρίσκονται κυρίως στον αέρα και συνδέει ξεχωριστά τα επιμέρους τυλίγματα. Έτσι υπάρχουν δύο ροές σκέδασης όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11- Ο πραγματικός μετασχηματιστής κατά την υπό φορτίο λειτουργία.

Όπως αναφέρθηκε οι διαδρομές των μαγνητικών ροών σκέδασης βρίσκονται στον αέρα, του οποίου η μαγνητική αντίσταση είναι σταθερή και κατά πολύ μεγαλύτερη της μαγνητικής αντίστασης του πυρήνα, με αποτέλεσμα οι μαγνητικές ροές σκέδασης των τυλίγμάτων να είναι ανάλογες των αντίστοιχων ρευμάτων που τις δημιουργούν. Με βάση το παραπάνω σχήμα η ροή ϕ_{L1} , είναι η ροή σκέδασης του πρωτεύοντος, η οποία παράγεται λόγω του ρεύματος του πρωτεύοντος τυλίγματος και εμπλέκει μόνο τις σπείρες του πρωτεύοντος τυλίγματος. Ομοίως η ροή ϕ_{L2} , αντιπροσωπεύει την μαγνητική ροή σκέδασης που δημιουργείται από το ρεύμα του δευτερεύοντος τυλίγματος και εμπλέκει μόνο τις σπείρες του τυλίγματος αυτού. Αποτέλεσμα των μαγνητικών ροών σκέδασης είναι η δημιουργία τάσεων εξ' επαγωγής στα δύο τυλίγματα, e_{L1} και e_{L2} αντίστοιχα. Οπότε η τάση εισόδου πρέπει να υπερνικήσει την τάση εξ' επαγωγής της μαγνητικής ροής σκέδασης του πρωτεύοντος τυλίγματος προκειμένου να δημιουργήσει την τάση που επάγεται στο πρωτεύον τύλιγμα, ενώ η τάση που επάγεται στο δευτερεύον τύλιγμα πρέπει να υπερνικήσει την τάση εξ' επαγωγής της μαγνητικής ροής σκέδασης του δευτερεύοντος τυλίγματος προκειμένου να δημιουργήσει την τάση στα άκρα του φορτίου. Οι μαγνητικές ροές σκέδασης του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος εκφράζονται ως δύο συγκεντρωμένες επαγωγικές αντιδράσεις X_1 και X_2 αντίστοιχα, διότι η μαγνητική ροή σκέδασης είναι σχεδόν ανάλογη με το ρεύμα που την παράγει, και τοποθετούνται σε σειρά με τα αντίστοιχα τυλίγματα. Συνοψίζοντας τα όσα αναφέραμε, το κύκλωμα του σχήματος 2.10 παίρνει τη παρακάτω μορφή



Σχήμα 2.12- Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή κατά την υπό φορτίο λειτουργία.

Με βάση το παραπάνω σχήμα για την υπό φορτίο λειτουργία του μετασχηματιστή θα ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις.

$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1) \quad (2.26)$$

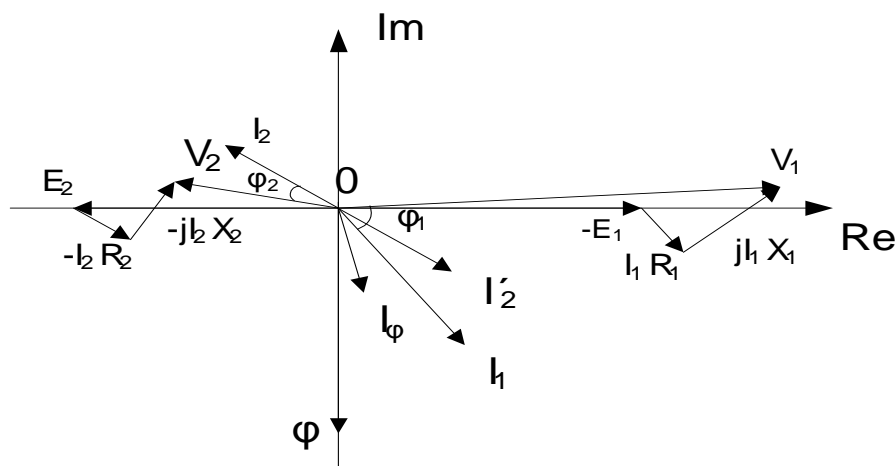
$$E_2 = V_2 + I_2(R_2 + jX_2) \quad (2.27)$$

Όσο αφορά τα ρεύματα του εγκάρσιου κλάδου θα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$I_c = \frac{E_1}{R_c} \quad (2.28)$$

$$I_m = \frac{E_1}{jX_m} \quad (2.29)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα του μετασχηματιστή κατά την υπό φορτίο λειτουργία του δίνεται στο σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13- Διανυσματικό διάγραμμα κατά την υπό φορτίο λειτουργία.

Σαν σημείο αναφοράς παίρνουμε την μαγνητική ροή, η οποία τοποθετείται στον άξονα των φανταστικών και υποθέτουμε ότι είναι ημιτονοειδούς μορφής. Η μαγνητική ροή θα δημιουργήσει δύο ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις από επαγωγή, συγκεκριμένα την E_2 και την E_1 στο δευτερεύον και πρωτεύον τυλίγμα αντίστοιχα, οι οποίες θα καθυστερούν κατά 90° σε σχέση με την μαγνητική ροή. Με την προϋπόθεση ότι το φορτίο είναι επαγωγικό, τότε το ρεύμα του δευτερεύοντος τυλίγματος έπεται της ηλεκτρεγερτικής δύναμης του δευτερεύοντος τυλίγματος. Το ρεύμα του δευτερεύοντος περνάει από την ωμική αντίσταση και την επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια πτώση τάσης στα στοιχεία, η οποία θα είναι συμφασική με το ρεύμα στην περίπτωση της ωμικής αντίστασης και θα προηγείται κατά 90° σε σχέση με το ρεύμα στην περίπτωση της επαγωγικής αντίδρασης. Με την βοήθεια της σχέσης 2.27 και με βάση τα προηγούμενα μπορούμε να δημιουργήσουμε το διάνυσμα της τάσης του δευτερεύοντος τυλίγματος. Η τάση του τυλίγματος προηγείται από το αντίστοιχο ρεύμα κατά γωνία φ_2 , της οποίας το συνημίτονο μας δίνει το συντελεστή ισχύος του δευτερεύοντος τυλίγματος.

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη του πρωτεύοντος τυλίγματος αντιτίθεται στην τάση η οποία εφαρμόζεται στον μετασχηματιστή με βάση τον κανόνα του Lenz. Το ρεύμα του πρωτεύοντος περνάει από την ωμική αντίσταση και την επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια πτώση τάσης στα στοιχεία, η οποία θα είναι συμφασική με το ρεύμα στην περίπτωση της ωμικής αντίστασης και θα προηγείται κατά 90° σε σχέση με το ρεύμα στην περίπτωση της επαγωγικής αντίδρασης. Όπως έχει προαναφερθεί το ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι το διανυσματικό άθροισμα του ρεύματος αντίδρασης και του ρεύματος διέγερσης. Με την βοήθεια της σχέσης 2.26 και με βάση τα προηγούμενα μπορούμε να δημιουργήσουμε το διάνυσμα της τάσης του πρωτεύοντος τυλίγματος. Η τάση του τυλίγματος προηγείται από το αντίστοιχο ρεύμα κατά γωνία φ_1 , της οποίας το συνημίτονο μας δίνει το συντελεστή ισχύος του πρωτεύοντος τυλίγματος.

2.6. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή του σχήματος 2.12, παρατηρούμε ότι ο ιδανικός μετασχηματιστής εξακολουθεί να υπάρχει. Το πρόβλημα του ισοδύναμου κυκλώματος είναι ότι είναι δύσκολο να λυθεί κυκλωματικά. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να κάνουμε αναγωγή των παραμέτρων του κυκλώματος είτε προς την πλευρά του πρωτεύοντος, είτε στην πλευρά του δευτερεύοντος τυλίγματος όπου με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε την παράλειψη του ιδανικού μετασχηματιστή. Με τον όρο παράμετροι του κυκλώματος χαρακτηρίζουμε τις ωμικές αντιστάσεις και τις επαγωγικές αντιδράσεις του ισοδύναμου κυκλώματος.

2.6.1. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον

Η αναγωγή στο πρωτεύον τύλιγμα πραγματοποιείται με την προσαρμογή των παραμέτρων του δευτερεύοντος τυλίγματος στο πρωτεύον. Πολλαπλασιάζοντας την σχέση 2.27 με τον λόγο μετασχηματισμού επιτυγχάνεται η αναγωγή στο πρωτεύον τύλιγμα. Επομένως

$$\alpha E_2 = \alpha (R_2 + j X_2) I_2 + \alpha V_2 \quad (2.30)$$

$$\alpha E_2 = (\alpha^2 R_2 + j \alpha^2 X_2) \frac{I_2}{\alpha} + \alpha V_2 \quad (2.31)$$

$$E'_2 = (R'_2 + j X'_2) I'_2 + V'_2 \quad (2.32)$$

Ο συσχετισμός των σχέσεων 2.32 και 2.30 μας οδηγεί στις παρακάτω σχέσεις

$$E'_2 = \alpha E_2 \quad (2.33)$$

$$V'_2 = \alpha V_2 \quad (2.34)$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{\alpha} \quad (2.35)$$

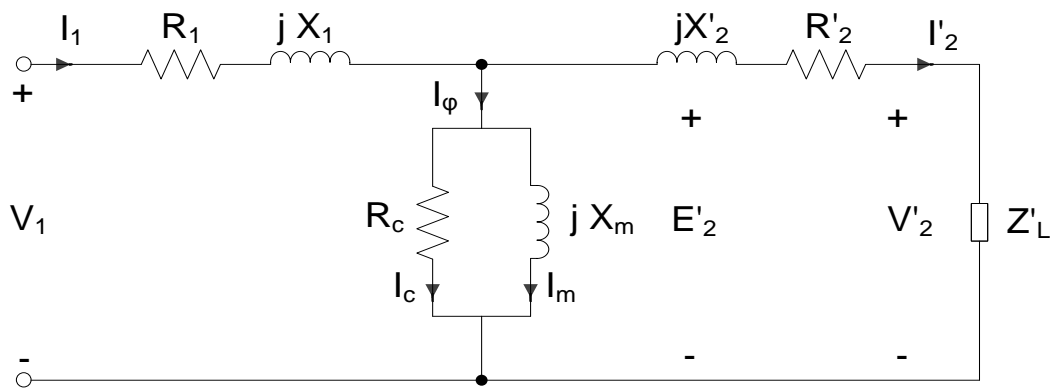
$$R'_2 = \alpha^2 R_2 \quad (2.36)$$

$$X'_2 = \alpha^2 X_2 \quad (2.37)$$

και στην περίπτωση όπου υπάρχει συνδεδεμένο φορτίο στο δευτερεύον, θα ισχύει ότι

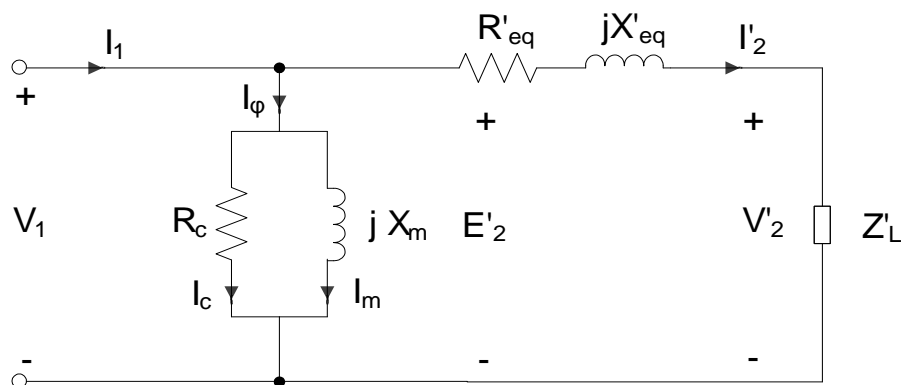
$$Z'_L = \alpha^2 Z_L \quad (2.38)$$

Όπου τα μεγέθη τα οποία έχουν σαν εκθέτη το σύμβολο « ' » συμβολίζουν τα αντίστοιχα μεγέθη του δευτερεύοντος τυλίγματος ανηγμένα στο πρωτεύον. Συνεπώς το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.12 με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παίρνει την παρακάτω μορφή



Σχήμα 2.14– Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον.

Το ρεύμα διέγερσης του μετασχηματιστή αποτελεί ένα μικρό ποσοστό του ρεύματος στο πλήρες φορτίο. Επίσης η πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση και την αντίδραση σκέδασης του πρωτεύοντος τυλίγματος, ακόμα και κατά τη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο, είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίστοιχη ονομαστική τάση. Με βάση τις προηγούμενες παραδοχές, είναι δυνατή η δημιουργία ενός απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος το οποίο λειτουργεί όπως και το αρχικό μοντέλο. Επομένως μπορούμε να μετακινήσουμε τον κλάδο μαγνήτισης μπροστά από την ωμική αντίσταση και την επαγωγική αντίδραση του πρωτεύοντος τυλίγματος, οι οποίες με τον τρόπο αυτό συνδέονται πλέον σε σειρά με την ανηγμένη στο πρωτεύον ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση του δευτερεύοντος τυλίγματος. Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον, δείχνεται στο σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15– Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον.

όπου

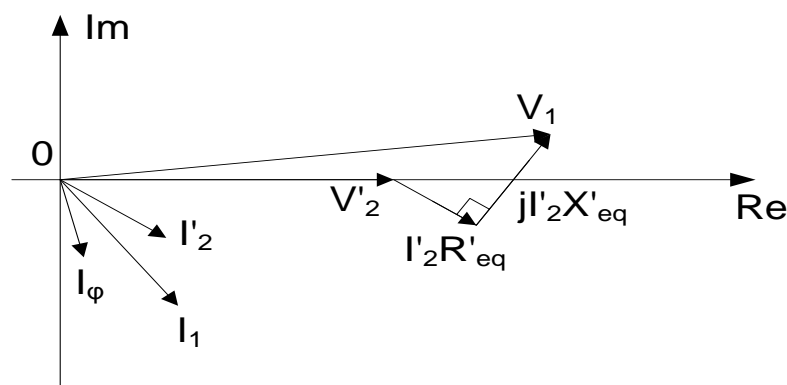
$$R'_{eq} = R_1 + R'_2 \quad (2.39)$$

$$X'_{eq} = X_1 + X'_2 \quad (2.40)$$

Η πρόσθεση των δύο παραπάνω σχέσεων μας δίνει την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του κλάδου σειράς του μετασχηματιστή ανηγμένη στο πρωτεύον.

$$Z'_{eq} = R'_{eq} + j X'_{eq} \quad (2.41)$$

Επίσης ο κλάδος μαγνήτισης μετά την μετακίνησή του, δεν παίζει κανένα ρόλο στη διαμόρφωση των τάσεων στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή, οπότε μπορούμε να τον παραλείψουμε, απλοποιώντας περισσότερο το κύκλωμα του σχήματος 2.15. Το διανυσματικό διάγραμμα του απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.16– Διανυσματικό διάγραμμα απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον.

2.6.2. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον

Αντίστοιχα η αναγωγή στο δευτερεύον τύλιγμα επιτυγχάνεται με την προσαρμογή των παραμέτρων του πρωτεύοντος τυλίγματος στο δευτερεύον. Διαιρώντας την σχέση 2.26 με τον λόγο μετασχηματισμού, έχουμε

$$\frac{V_1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha} (R_1 + j X_1) I_1 + \frac{E_1}{\alpha} \quad (2.42)$$

$$\frac{V_1}{\alpha} = \left(\frac{R_1}{\alpha^2} + j \frac{X_1}{\alpha^2} \right) \alpha I_1 + \frac{E_1}{\alpha} \quad (2.43)$$

$$V_1'' = (R_1'' + j X_1'') I_1'' + E_1'' \quad (2.44)$$

Συσχετίζοντας τις σχέσεις 2.44 και 2.42 προκύπτει ότι

$$V_1'' = \frac{V_1}{\alpha} \quad (2.45)$$

$$E_1'' = \frac{E_1}{\alpha} \quad (2.46)$$

$$I_1'' = \alpha I_1 \quad (2.47)$$

$$R_1'' = \frac{R_1}{\alpha^2} \quad (2.48)$$

$$X_1'' = \frac{X_1}{\alpha^2} \quad (2.49)$$

Ομοίως και για τον παράλληλο κλάδο θα ισχύει ότι και για τα παραπάνω μεγέθη

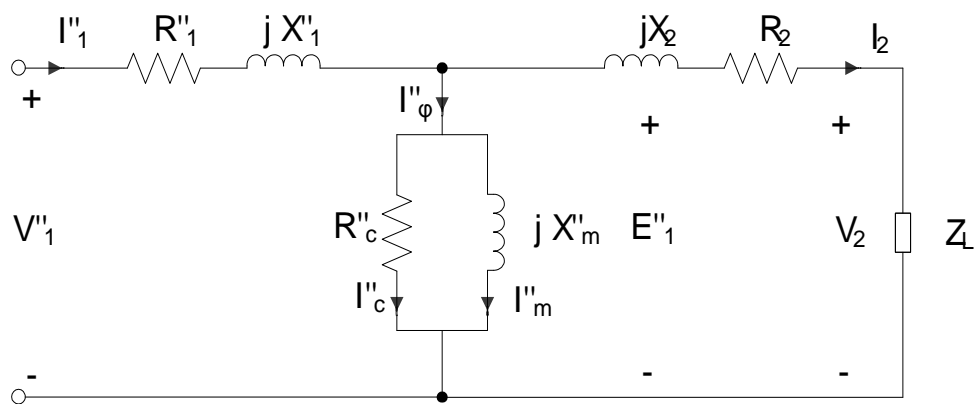
$$R_c'' = \frac{R_c}{\alpha^2} \quad (2.50)$$

$$X_m'' = \frac{X_m}{\alpha^2} \quad (2.51)$$

$$I_c'' = \alpha I_c \quad (2.52)$$

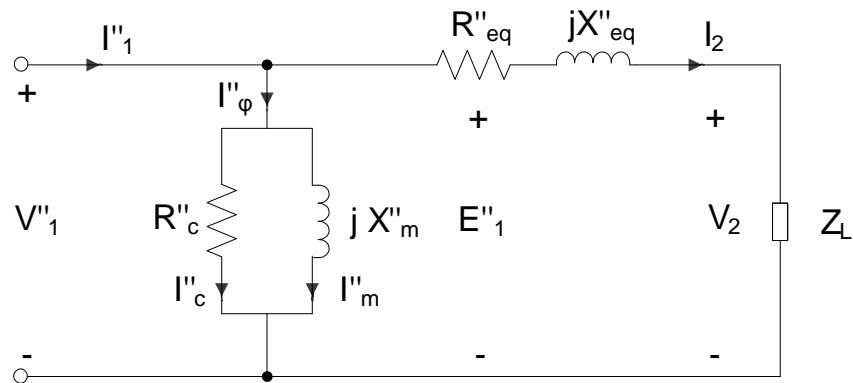
$$I_m'' = \alpha I_m \quad (2.53)$$

Όπου τα μεγέθη τα οποία έχουν σαν εκθέτη το σύμβολο « '' » συμβολίζουν τα αντίστοιχα μεγέθη του πρωτεύοντος τυλίγματος ανηγμένα στο δευτερεύον. Συνεπώς το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.12 με βάση τα όσα αναφέραμε παίρνει την παρακάτω μορφή



Σχήμα 2.17– Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον.

Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.17 καθώς και το διανυσματικό διάγραμμά του απεικονίζονται στο σχήμα 2.18 και 2.19 αντίστοιχα. Επίσης ο κλάδος μαγνήτισης μπορεί να παραλειφθεί και σε αυτή την περίπτωση με σκοπό την διευκόλυνση επίλυσης του κυκλώματος.



Σχήμα 2.18– Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον.

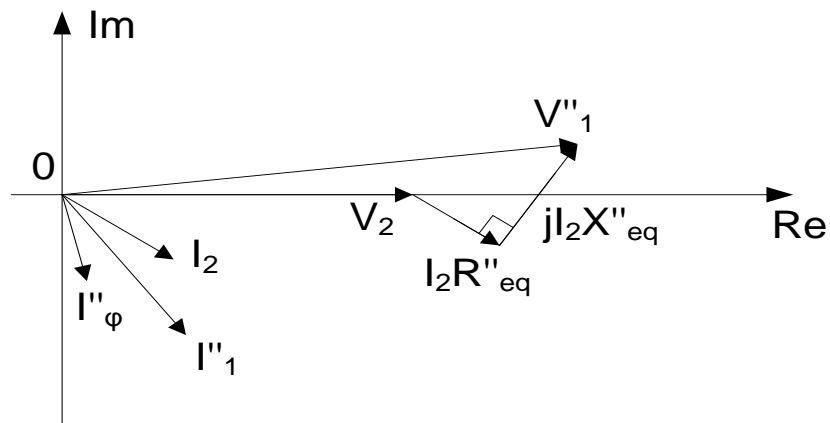
όπου

$$R''_{eq} = R''_1 + R_2 \quad (2.54)$$

$$X''_{eq} = X''_1 + X_2 \quad (2.55)$$

Η πρόσθεση των δύο παραπάνω σχέσεων μας δίνει την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του κλάδου σειράς του μετασχηματιστή ανηγμένη στο δευτερεύον.

$$Z''_{eq} = R''_{eq} + j X''_{eq} \quad (2.56)$$



Σχήμα 2.19– Διανυσματικό διάγραμμα απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή ανηγμένο στο δευτερεύον.

2.7. Μαγνητικά συζευγμένα κυκλώματα

Στο σχήμα 2.11 η φορά του ρεύματος του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι τέτοια ώστε να δημιουργεί μαγνητική ροή, η οποία είναι αντίθετης

διεύθυνσης με τη μαγνητική ροή που παράγεται από το ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος.

Εξετάζοντας τα δύο ρεύματα ξεχωριστά, το ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος παράγει τη μαγνητική ροή Φ_{11} , η οποία αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα είναι η μαγνητική ροή σκέδασης του πρωτεύοντος τυλίγματος, η οποία είναι μη ωφέλιμη διότι δεν εμπλέκει τις σπείρες του άλλου τυλίγματος και συμβολίζεται με Φ_{11} , ενώ η δεύτερη συνιστώσα συμβολίζεται με Φ_{21} και αποτελεί την ωφέλιμη συνιστώσα διότι εμπλέκει τις σπείρες και των δύο τυλιγμάτων.

$$\Phi_{11} = \Phi_{11} + \Phi_{21} \quad (2.57)$$

Παρομοίως το ρεύμα του δευτερεύοντος τυλίγματος, το οποίο παράγει τη μαγνητική ροή Φ_{22} , θα αναλυθεί στις συνιστώσες Φ_{12} και Φ_{12} . Η πρώτη συνιστώσα αποτελεί τη μαγνητική ροή σκέδασης του δευτερεύοντος τυλίγματος ενώ η δεύτερη συνιστώσα αποτελεί την ωφέλιμη συνιστώσα διότι εμπλέκει τις σπείρες και των δύο τυλιγμάτων. Δηλαδή

$$\Phi_{22} = \Phi_{12} + \Phi_{12} \quad (2.58)$$

Η μαγνητική ροή μαγνήτισης θα δίνεται από τη σχέση

$$\Phi_m = \Phi_{21} - \Phi_{12} \quad (2.59)$$

Η αυτεπαγωγή ενός τυλίγματος, ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής πεπλεγμένης ροής του τυλίγματος προς το ρεύμα του ίδιου τυλίγματος, θεωρώντας τα ρεύματα των υπόλοιπων τυλιγμάτων μηδενικά. Επομένως για το πρωτεύον τύλιγμα θα ισχύει

$$\lambda_1 = N_1 (\Phi_{11}) = N_1 (\Phi_{11} + \Phi_{21}) \quad (2.60)$$

$$L_{11} = \frac{N_1 (\Phi_{11} + \Phi_{21})}{i_1} \quad (2.61)$$

ή

$$L_{11} = L_1 + L_{21} \quad (2.62)$$

ενώ για το δευτερεύον

$$\lambda_2 = N_2 (\Phi_{22}) = N_2 (\Phi_{12} + \Phi_{12}) \quad (2.63)$$

$$L_{22} = \frac{N_2 (\Phi_{12} + \Phi_{12})}{i_2} \quad (2.64)$$

ή

$$L_{22} = L_2 + L_{12} \quad (2.65)$$

Η αλληλεπαγωγή μεταξύ των δύο μαγνητικά συζευγμένων κυκλωμάτων ορίζεται ως ο λόγος της πεπλεγμένης ροής ενός τυλίγματος προς το ρεύμα του άλλου τυλίγματος, θεωρώντας το ρεύμα του άλλου τυλίγματος μηδενικό.

$$L_{12} = \frac{N_1 (\Phi_{12})}{i_2} \quad (2.66)$$

και

$$L_{21} = \frac{N_2 (\Phi_{21})}{i_1} \quad (2.67)$$

όπου

$$L_{12} = L_{21} = M \quad (2.68)$$

όπου M είναι ο συντελεστής αλληλεπαγωγής και δίνεται από την σχέση

$$M = \frac{N_1 N_2}{R_m} \quad (2.69)$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο τάσεων του Kirchhoff το σχήμα 2.11 έχουμε

$$V_1 = R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + L_{21} \frac{dI_1}{dt} - M \frac{dI_2}{dt} \quad (2.70)$$

$$V_2 = -R_2 I_2 - L_2 \frac{dI_2}{dt} - L_{12} \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} \quad (2.71)$$

και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι

$$L_{21} = \frac{N_1}{N_2} M \quad (2.72)$$

και

$$L_{12} = \frac{N_2}{N_1} M \quad (2.73)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.72) και (2.73) στις (2.70) (2.71), προκύπτει ότι

$$V_1 = R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + \frac{N_1}{N_2} M \left(\frac{dI_1}{dt} - \frac{dI_2'}{dt} \right) \quad (2.74)$$

$$V_2' = -R_2' I_2' - L_2' \frac{dI_2'}{dt} + \frac{N_1}{N_2} M \left(\frac{dI_1}{dt} - \frac{dI_2'}{dt} \right) \quad (2.75)$$

Από την σχέση (2.69) παρατηρούμε ότι όσο μικρότερη είναι η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα τόσο μεγαλύτερη είναι η σύζευξη των δύο τυλιγμάτων.

2.8. Απώλειες ενεργείας στον μετασχηματιστή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από το ένα κύκλωμα στο άλλο. Η ισχύς εισόδου δεν μπορεί να μεταφερθεί ολόκληρη στο κύκλωμα εξόδου, επειδή κάποια ποσότητά της χάνεται στον πυρήνα και στις περιελίξεις του μετασχηματιστή υπό μορφή θερμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή. Συνεπώς το πρόβλημα των απωλειών στον μετασχηματιστή συνδέεται στενά με τα προβλήματα ζωής του (μείωση της απόδοσής του) και άλλων οικονομικών και λειτουργικών παραγόντων. Οι απώλειες ισχύος στους μετασχηματιστές διαχωρίζονται στις απώλειες κενού φορτίου και στις απώλειες φορτίου.

2.8.1. Απώλειες κενού φορτίου

Οι απώλειες κενού φορτίου αναφέρονται και ως απώλειες πυρήνα και οφείλονται στη χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Οι εν λόγω απώλειες υπάρχουν όσο ο μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο ανεξάρτητα από το αν υπάρχει φορτίο στο δευτερεύον τύλιγμά του. Συνεπώς οι απώλειες κενού φορτίου εξαρτώνται από την τάση τροφοδοσίας, είναι σταθερές και αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό των συνολικών απωλειών του μετασχηματιστή. Διαχωρίζονται σε απώλειες μαγνητικής υστέρησης και σε απώλειες δινορρευμάτων.

Οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης εμφανίζονται κατά την μαγνήτιση και απομαγνήτιση του υλικού όταν εφαρμοστεί σ' αυτό εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Όπως έχει προαναφερθεί στο πρώτο κεφάλαιο, τα σιδηρομαγνητικά υλικά με την αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου, μαγνητίζονται μέχρι μια τιμή κορεσμού. Στον κόρο ισχύει ότι επιπλέον αύξηση του πεδίου δεν οδηγεί σε αύξηση της μαγνήτισης καθώς και οι ατομικές μαγνητικές ροπές του υλικού έχουν ευθυγραμμιστεί πλήρως στην διεύθυνση που επιβάλλει το μαγνητικό πεδίο. Εν συνεχεία εάν μηδενιστεί το πεδίο η μαγνήτιση δεν μηδενίζεται αλλά διατηρεί μια θετική τιμή η οποία ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση. Στο σημείο αυτό παρατηρούμε ότι στο υλικό παραμένει ένας αριθμός μαγνητικών περιοχών με προσανατολισμό κατά τη διεύθυνση του πεδίου παρά τον μηδενισμό της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Για να απαλλαγεί το υλικό από τη μαγνήτιση θα πρέπει να εφαρμοστεί ένα μαγνητικό πεδίο με αντίθετη κατεύθυνση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση και η κλειστή καμπύλη του σχήματος 1.6 ονομάζεται βρόγχος υστέρησης. Ο βρόγχος υστέρησης διαγράφεται τόσες φορές το δευτερόλεπτο όσο είναι και η συχνότητα του επιβαλλόμενου πεδίου. Το εμβαδόν του βρόγχου υστέρησης είναι ανάλογο των απωλειών υστέρησης δηλαδή της ενέργειας που χάνεται υπό μορφή θερμότητας κάθε φορά που η ένταση του

μαγνητικού πεδίου κάνει ένα πλήρη κύκλο. Συνεπώς για την κατασκευή των μετασχηματιστών χρησιμοποιούνται τα μαλακά μαγνητικά υλικά, των οποίων το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μικρό άρα και οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης είναι μικρότερες. Οι απώλειες μαγνητικής υστέρησης είναι δυνατόν να υπολογιστούν κάνοντας χρήση του τύπου του Steinmetz.

$$P_h = K_h B_m^n f \quad (2.76)$$

όπου K_h είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από το υλικό, B_m^n είναι η μέγιστη τιμή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής η οποία είναι υψωμένη στην δύναμη n , όπου n είναι ένας εμπειρικός συντελεστής του οποίου η τιμή κυμαίνεται μεταξύ 1.5 και 2.5.

Όσο αφορά τις απώλειες δινορρευμάτων, αυτές οφείλονται στην ανάπτυξη επαγόμενων ρευμάτων στο εσωτερικό του πυρήνα του μετασχηματιστή. Πιο συγκεκριμένα όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό υπόκειται σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο τότε εξαιτίας της χρονικά μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής επάγονται τάσεις σ' αυτό. Αποτέλεσμα των επαγόμενων τάσεων είναι η δημιουργία των δινορρευμάτων. Δημιουργούνται δε σε επίπεδο κάθετο προς την διεύθυνση της μαγνητικής ροής και κινούνται σε στροβιλώδεις τροχιές σχηματίζοντας κλειστούς βρόγχους ή δίνες. Αποτέλεσμα της ροής των δινορρευμάτων είναι η δημιουργία απωλειών οι οποίες εκδηλώνονται υπό μορφή θερμότητας στην ωμική αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα του μετασχηματιστή. Οι απώλειες δινορρευμάτων υπολογίζονται κάνοντας χρήση του τύπου του Steinmetz.

$$P_e = K_e B_m^2 f^2 \quad (2.77)$$

όπου K_e είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από το πάχος των ελασμάτων του υλικού. Το άθροισμα των σχέσεων 2.76 και 2.77 μας δίνουν τις συνολικές απώλειες του πυρήνα του μετασχηματιστή.

$$P_c = P_h + P_e = K_h B_m^n f + K_e B_m^2 f^2 \quad (2.78)$$

2.8.2. Απώλειες φορτίου

Οι απώλειες φορτίου υφίστανται από τη στιγμή που στο δευτερεύον τυλίγμα του μετασχηματιστή συνδεθεί φορτίο. Το ρεύμα του φορτίου είναι υπεύθυνο για την παραγωγή των απωλειών οι οποίες είναι απώλειες Joule στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Η σημαντικότερη κατηγορία των απωλειών φορτίου είναι οι απώλειες χαλκού.

Πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες χαλκού είναι ωμικές απώλειες στα τυλίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος που ρέει στα τυλίγματά του. Η σχέση η οποία μας δίνει τις απώλειες χαλκού είναι

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (2.79)$$

Υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες πρέπει να γίνει αναγωγή στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον των απωλειών χαλκού, επομένως θα έχουμε

$$P'_{cu} = I_1^2 R'_{eq} \quad (2.80)$$

και

$$P''_{cu} = I_2^2 R''_{eq} \quad (2.81)$$

Επίσης στους μετασχηματιστές υπάρχει πάντα η ροή σκέδασης, η οποία επάγει δινορρεύματα στους αγωγούς, στα μπουλόνια, στην δεξαμενή του μετασχηματιστή. Αυτές οι απώλειες ονομάζονται διαφεύγουσες απώλειες. Ακόμη υπάρχουν και οι διηλεκτρικές απώλειες, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο μονωτικό υλικό του μετασχηματιστή, το οποίο βρίσκεται στο λάδι του μετασχηματιστή ή στις στερεές μονώσεις. Σε περίπτωση που το λάδι υποβαθμιστεί ή η στερεή μόνωση υποστεί ζημιά, η απόδοση του μετασχηματιστή επηρεάζεται. Το ποσοστό αυτών των απωλειών είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με τις απώλειες πυρήνα και χαλκού, επομένως μπορεί να αμεληθεί. Επομένως οι απώλειες ενεργείας στους μετασχηματιστές δίνονται από την παρακάτω σχέση

$$P_{los} = P_c + P_{cu} \quad (2.82)$$

Παρατηρείται επίσης ότι οι μετασχηματιστές κατά την λειτουργία τους κάνουν θόρυβο. Η βασική αιτία θορύβου του μετασχηματιστή είναι η μαγνητοσυστολή δηλαδή η διαστολή και η συστολή των ελασμάτων του πυρήνα του μετασχηματιστή, η οποία είναι ανάλογη της μαγνητικής επαγωγής, καθώς ο πυρήνας μαγνητίζεται. Οι ταλαντώσεις αυτές συμβαίνουν δύο φορές κατά τη διάρκεια κάθε πλήρους κύκλου του εναλλασσόμενου ρεύματος και μεταβιβάζονται μέσω του εκάστοτε ψυκτικού μέσου στο δοχείο του μετασχηματιστή και από εκεί ακτινοβολούνται ακουστικά στο περιβάλλον. Η μαγνητοσυστολή δεν μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως, αλλά μπορεί να περιοριστεί εν μέρει από τον σωστό σχεδιασμό, την συναρμολόγηση και σύσφιξη του πυρήνα του μετασχηματιστή. Επίσης το δοχείο του μετασχηματιστή μπορεί να κατασκευαστεί με ενισχυτικά και άλλα υλικά τα οποία ελαχιστοποιούν τον θόρυβο καθώς και με τη χρήση διατάξεων τοποθέτησης ώστε να απομονώνεται από ταλαντώσεις.

Με βάση τα όσα αναφέραμε παρατηρούμε ότι οι απώλειες σιδήρου εξαρτώνται από την τάση τροφοδοσίας ενώ οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από το ρεύμα. Επομένως η ισχύς του μετασχηματιστή εκφράζεται ως συνδυασμός της τάσης και του ρεύματος που ονομάζεται VA και όχι σε Watt. Τις περισσότερες φορές η ισχύς του μετασχηματιστή εκφράζεται σε KVA.

2.9. Βαθμός απόδοσης μετασχηματιστή

Λόγω των απωλειών που λαμβάνουν χώρα στον μετασχηματιστή η ισχύς εξόδου είναι μικρότερη από την παρεχόμενη ισχύ εισόδου. Ο βαθμός

απόδοσης οποιασδήποτε συσκευής ορίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης ισχύς εξόδου ως προς την απαιτούμενη ισχύ εισόδου. Επομένως ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή μπορεί να εκφραστεί ως

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.83)$$

Με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας θα ισχύει ότι

$$P_{in} = P_{out} + P_{los} \quad (2.84)$$

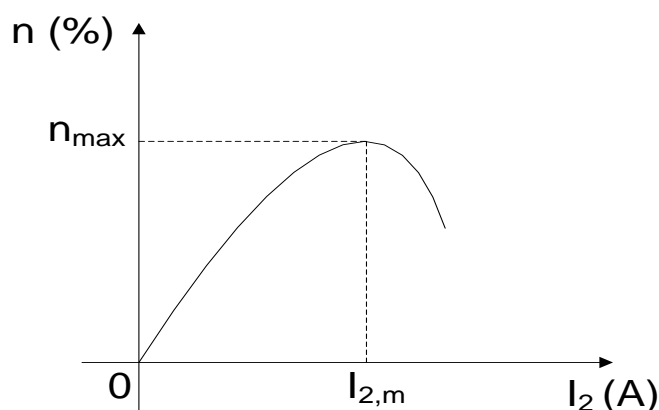
Από τον συνδυασμό των σχέσεων 2.83 και 2.84 προκύπτει ότι

$$n = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{los}} \quad (2.85)$$

Η τελική μορφή της σχέσης του βαθμού απόδοσης του μετασχηματιστή λαμβάνοντας υπ' όψιν τις σχέσεις 2.81 και 2.82 και δεδομένου ότι η ισχύς εξόδου είναι το γινόμενο του συντελεστή ισχύος, της τάσης και του ρεύματος του δευτερεύοντος τυλίγματος, θα δίνεται από την σχέση

$$n = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi}{V_2 I_2 \cos \varphi + P_c + I_2^2 R_{eq}''} \quad (2.86)$$

Η τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος V_2 επηρεάζεται ελάχιστα από τις αλλαγές του φορτίου (περίπου 3-5%) και επομένως μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Επίσης για δεδομένο συντελεστή ισχύος ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή εξαρτάται μόνο από το ρεύμα του φορτίου I_2 . Όμως σε μία συγκεκριμένη τιμή του ρεύματος φορτίου επιτυγχάνεται η μέγιστη τιμή του βαθμού απόδοσης. Αν ο μετασχηματιστής φορτωθεί περαιτέρω η απόδοσή του αρχίζει να μειώνεται. Τα όσα αναφέρθηκαν αποτυπώνονται στο σχήμα 2.20 όπου με $I_{2,m}$ συμβολίζεται η τιμή του ρεύματος στο φορτίο όπου επιτυγχάνεται ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης n_{max} .



Σχήμα 2.20- Συνθήκη για βέλτιστο βαθμό απόδοσης.

Για βέλτιστο βαθμό απόδοσης θα ισχύει,

$$\frac{dn}{dI_2} = 0 \quad (2.87)$$

Επομένως η σχέση 2.87 είναι

$$\frac{d}{dI_2} \left[\frac{V_2 I_2 \cos \varphi}{V_2 I_2 \cos \varphi + P_c + I_2^2 R_{eq}''} \right] = 0 \quad (2.88)$$

Λύνοντας την παράγωγο της παραπάνω σχέσης καταλήγουμε στο παρακάτω αποτέλεσμα

$$P_c - I_2^2 R_{eq}'' = 0 \quad (2.89)$$

$$P_c = I_2^2 R_{eq}'' = P_{cu} \quad (2.90)$$

Δηλαδή ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή επιτυγχάνεται όταν η τιμή του ρεύματος του φορτίου είναι τέτοια ώστε οι απώλειες του πυρήνα να ισοδυναμούν με τις απώλειες χαλκού.

$$I_{2,m} = \sqrt{\frac{P_c}{R_{eq}''}} \quad (2.91)$$

Εάν διαιρέσουμε και τα δύο μέλη της εξίσωσης 2.91 με το ονομαστικό ρεύμα του δευτερεύοντος, προκύπτει ότι

$$\frac{I_{2,m}}{I_{2,no}} = \frac{1}{I_{2,no}} \sqrt{\frac{P_c}{R_{eq}''}} \quad (2.92)$$

$$\frac{I_{2,m}}{I_{2,no}} = \sqrt{\frac{P_c}{I_{2,no}^2 R_{eq}''}} \quad (2.93)$$

$$I_{2,m} = I_{2,no} \sqrt{\frac{P_c}{P_{cu,no}}} \quad (2.94)$$

Επομένως ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$n_{max} = \frac{V_2 I_{2,m} \cos \varphi}{V_2 I_{2,m} \cos \varphi + 2P_c} \quad (2.95)$$

2.10. Ρύθμιση τάσης μετασχηματιστή

Όταν το φορτίο του μετασχηματιστή αυξάνεται, η τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος μειώνεται, λόγω της πτώσης τάσης στις ισοδύναμες

ωμικές αντιστάσεις και επαγωγικές αντιδράσεις του μετασχηματιστή, ακόμα και αν η τάση εισόδου παραμένει σταθερή. Επομένως η τάση του δευτερεύοντος εξαρτάται από το μέγεθος καθώς και από το είδος του φορτίου.

Η ρύθμιση τάσης ορίζεται ως η διαφορά της τάσης του δευτερεύοντος τυλίγματος από το κενό στο πλήρες φορτίο, για ένα δεδομένο συντελεστή ισχύος, με την ίδια τάση στο πρωτεύον και για τις δύο συνθήκες. Συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό της τάσης στο πλήρες φορτίο. Με βάση τα όσα αναφέραμε η ρύθμιση της τάσης του μετασχηματιστή ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$VR = \frac{V_{2,nl} - V_{2,fl}}{V_{2,fl}} 100\% \quad (2.96)$$

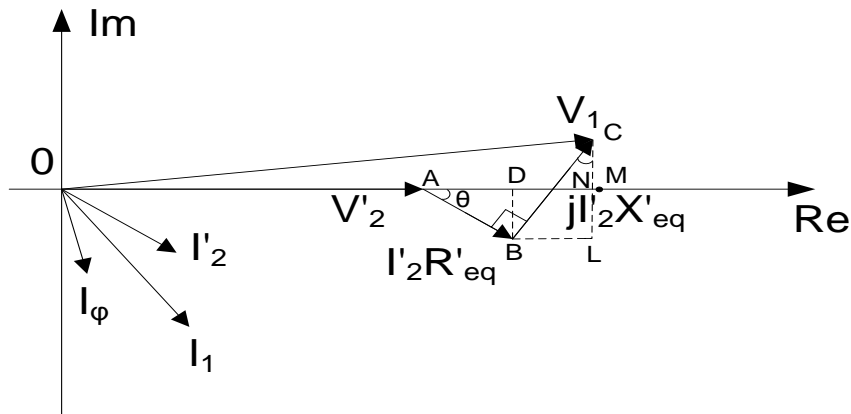
Με βάση την σχέση 2.10 η τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος στο κενό φορτίο είναι ίση με

$$V_{2,nl} = \frac{V_1}{\alpha} \quad (2.97)$$

Επομένως η εκατοστιαία ρύθμιση τάσης μπορεί να εκφραστεί και ως

$$VR = \frac{\left(\frac{V_1}{\alpha}\right) - V_2}{V_2} = \frac{V_1 - \alpha V_2}{\alpha V_2} \quad (2.98)$$

Συνήθως είναι επιθυμητό η εκατοστιαία ρύθμιση τάσης να έχει όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές. Μία άλλη μέθοδος εύρεσης της εκατοστιαίας ρύθμισης τάσης είναι χρησιμοποιώντας το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 2.16. Η φύση του φορτίου είναι επαγωγική διότι το διάνυσμα του ρεύματος έπεται του διανύσματος της τάσης κατά γωνία θ . Με κέντρο το σημείο O και ακτίνα το OC σχεδιάζουμε ένα κύκλο, ο οποίος τέμνει τον άξονα των πραγματικών στο σημείο M . Εφόσον το σημείο OA αντιστοιχεί στην τάση V_2' και το σημείο OC αντιστοιχεί στην τάση V_1 , τότε το σημείο AM μας δείχνει τη συνολική πτώση τάσης. Όμως η γωνία θ είναι πάρα πολύ μικρή οπότε το σημείο M είναι πολύ κοντά στο σημείο N . Επομένως η ρύθμιση τάσης είναι ίση με το σημείο AN αντί του σημείου AM . Ακόμη από το σημείο B τραβάμε κάθετη στον άξονα των πραγματικών όπου τον τέμνει στο σημείο D . Τα όσα αναφέραμε αποτυπώνονται στο σχήμα 2.21.



Σχήμα 2.21 – Διανυσματικό διάγραμμα μετασχηματιστή, ανηγμένο στο πρωτεύον.

όπου

$$AD = AB \cos \theta = I'_2 R'_{eq} \cos \theta \quad (2.99)$$

$$DN = BL = BC \sin \theta = I'_2 X'_{eq} \sin \theta \quad (2.100)$$

Επομένως το σημείο AN είναι το άθροισμα των σημείων AD και DN

$$AN = I'_2 R'_{eq} \cos \theta + I'_2 X'_{eq} \sin \theta \quad (2.101)$$

Η σχέση η οποία μας δίνει την εκατοστιαία ρύθμιση τάσης είναι

$$VR = \frac{I'_2 R'_{eq} \cos \theta + I'_2 X'_{eq} \sin \theta}{V'_2} \quad (2.102)$$

2.11. Τάση βραχυκύκλωσης

Ως τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή ορίζεται η τάση η οποία όταν εφαρμόζεται στο πρωτεύον τύλιγμα ενώ το δευτερεύον είναι βραχυκυκλωμένο, έχουμε τη ροή των ονομαστικών ρευμάτων τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον τύλιγμα. Η τάση βραχυκύκλωσης συνήθως εκφράζεται σαν ποσοστό επί τοις εκατό, επομένως

$$V_{sc} (\%) = \frac{V_{sc}}{V_{1,no}} 100\% \quad (2.103)$$

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος ενός μετασχηματιστή αναπτύσσονται πολύ μεγάλες εντάσεις ρεύματος, που είναι επικίνδυνες για τον μετασχηματιστή, διότι υπάρχει πιθανότητα καταστροφής των μονώσεων και των τυλιγμάτων του, καθώς και για το δίκτυο που τον τροφοδοτεί. Όσο πιο

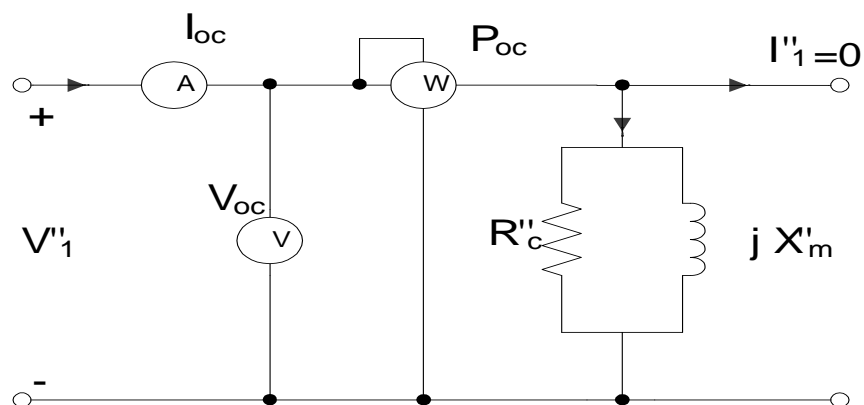
μικρή είναι η τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης τόσο μεγαλύτερες είναι οι εντάσεις ρεύματος που αναπτύσσονται. Η περίπτωση στην οποία επιθυμούμε μεγάλες εντάσεις ρεύματος είναι η ηλεκτροσυγκόλληση, όπου ο μετασχηματιστής λειτουργεί με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον τύλιγμα του.

2.12. Προσδιορισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος μπορούν να προσδιοριστούν, με την διεξαγωγή δύο πολύ απλών και χαμηλής κατανάλωσης ισχύος εργαστηριακών δοκιμών, την δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος και την δοκιμή βραχυκύκλωσης. Με αυτές τις παραμέτρους, μπορούμε εύκολα να προκαθορίσουμε την απόδοση και τη ρύθμιση του μετασχηματιστή σε οποιαδήποτε κατάσταση φορτίου. Η μέθοδος εύρεσης των παραμέτρων ενός μετασχηματιστή καλείται ως μέθοδος έμμεσης φόρτισης.

2.12.1. Δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος

Με την δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες πυρήνα καθώς επίσης και τα στοιχεία του παράλληλου κλάδου του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή. Κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος, εφαρμόζουμε στο πρωτεύον τύλιγμα τάση ίση με την ονομαστική ενώ, το δευτερεύον τύλιγμα διατηρείται ανοιχτό. Δεδομένου ότι η δοκιμή διεξάγεται χωρίς να τοποθετηθεί φορτίο, ονομάζεται επίσης και δοκιμή κενού φορτίου. Η συγκεκριμένη δοκιμή συνηθίζεται να πραγματοποιείται από την πλευρά του τυλίγματος χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή, με το κύκλωμα υψηλής τάσης ανοιχτό. Επίσης στο τύλιγμα χαμηλής τάσης συνδέεται ένα βολτόμετρο, ένα αμπερόμετρο και ένα βατόμετρο για την μέτρηση των αντίστοιχων μεγεθών. Με βάση τα παραπάνω η συνδεσμολογία του κυκλώματος θα έχει τη μορφή του σχήματος 2.22.



Σχήμα 2.22- Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος.

Το ρεύμα που απορροφά το πρωτεύον τύλιγμα, είναι κατά προσέγγιση ίσο με το ρεύμα διέγερσης, το οποίο αποτελεί ένα μικρό ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος (1-5%). Η σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος

τύλιγματος είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την σύνθετη αντίσταση του κλάδου μαγνήτισης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η πτώση τάσης της σύνθετης αντίστασης του πρωτεύοντος να είναι πολύ μικρή από την αντίστοιχη πτώση τάσης στον κλάδο μαγνήτισης και για το λόγο αυτό μπορεί να αμεληθεί. Επομένως ολόκληρη η τάση εισόδου εφαρμόζεται στον κλάδο μαγνήτισης. Επειδή το ρεύμα στο πρωτεύον είναι πολύ μικρό και στο δευτερεύον είναι μηδέν οι απώλειες χαλκού είναι αμελητέες, οπότε το βατόμετρο μετρά τις απώλειες σιδήρου.

Η ισχύς που δείχνει η ένδειξη του βολτομέτρου καταναλώνεται εξολοκλήρου στην ωμική αντίσταση του πυρήνα. Επομένως η ωμική αντίσταση του πυρήνα δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$R_c'' = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad (2.104)$$

Όσο αφορά τη φαινόμενη και την άεργη ισχύ, αυτές θα υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$S_{oc} = V_{oc} * I_{oc} \quad (2.105)$$

και

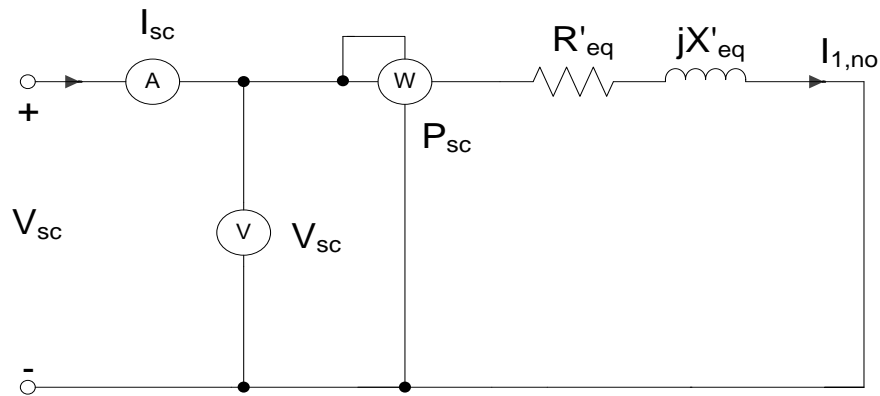
$$Q_{oc} = \sqrt{S_{oc}^2 - P_{oc}^2} \quad (2.106)$$

Η άεργη ισχύς καταναλώνεται στην αντίδραση μαγνήτισης οπότε θα ισχύει ότι

$$X_m'' = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} \quad (2.107)$$

2.12.2. Δοκιμή βραχυκύκλωσης

Με την δοκιμή βραχυκύκλωσης μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες χαλκού καθώς επίσης και τις ισοδύναμες ωμικές αντιστάσεις και αντιδράσεις σκέδασης του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή. Η δοκιμή βραχυκύκλωσης πραγματοποιείται με το τύλιγμα χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή βραχυκυκλωμένο, ενώ στο τύλιγμα υψηλής τάσης στο οποίο θα εφαρμοστεί η τάση τοποθετούνται τα όργανα μέτρησης. Με βάση τα παραπάνω η συνδεσμολογία του κυκλώματος θα έχει τη μορφή του σχήματος 2.23.



Σχήμα 2.23- Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης.

Αρχικά τροφοδοτούμε το πρωτεύον τύλιγμα με τέτοια τάση ώστε τα τυλίγματα του μετασχηματιστή να διαρρέονται από τα αντίστοιχα ονομαστικά ρεύματα. Η τάση που μετράμε στο πρωτεύον ονομάζεται τάση βραχυκύκλωσης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η τάση που απαιτείται για την εφαρμογή ονομαστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι αρκετά μικρή (περίπου 4%-7% της ονομαστικής τάσης τροφοδοσίας). Δεδομένου ότι η τάση εισόδου είναι τόσο μικρή κατά τη δοκιμή αυτή και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η σύνθετη αντίσταση του κλάδου μαγνήτισης είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του εν σειρά κλάδου, μπορούμε να αμελήσουμε το ρεύμα διέγερσης και συνεπώς τον παράλληλο κλάδο. Τέλος οι απώλειες σιδήρου, οι οποίες είναι ανάλογες του τετραγώνου της τάσης εισόδου, λόγω της μικρής εφαρμοζόμενης τάσης μπορούν να αμεληθούν οπότε το βατόμετρο μετρά τις απώλειες χαλκού.

Η πραγματική ισχύς καταναλώνεται στην ισοδύναμη ωμική αντίσταση. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ενδείξεις του αμπερομέτρου και του βατομέτρου, η τιμή της ισοδύναμης ωμικής αντίστασης δίνεται από την σχέση

$$R'_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (2.108)$$

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του κλάδου σειράς δίνεται από τη σχέση

$$Z'_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \sqrt{R_{eq}'^2 + X_{eq}'^2} \quad (2.109)$$

Εφόσον είναι πλέον γνωστές οι τιμές της ισοδύναμης ωμικής και σύνθετης αντίστασης, μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της ισοδύναμης αντίδρασης σκέδασης.

$$X'_{eq} = \sqrt{Z_{eq}'^2 - R_{eq}'^2} \quad (2.110)$$

Βάσει των εξισώσεων 2.39 και 2.40 μπορούμε να υπολογίσουμε τις ωμικές αντιστάσεις καθώς και τις αντιδράσεις σκέδασης των τυλιγμάτων του

μετασχηματιστή, με την προϋπόθεση ότι εφόσον αναχθούν στην ίδια πλευρά είναι μεταξύ τους ίσες. Πιο συγκεκριμένα θα ισχύει ότι

$$R_1 = R'_2 = \frac{R'_{eq}}{2} \quad (2.111)$$

Και

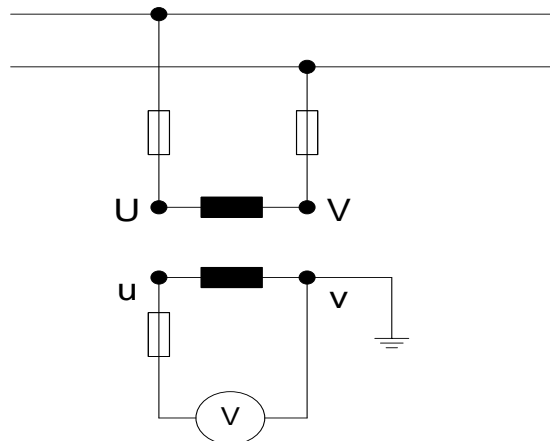
$$X_1 = X'_2 = \frac{X'_{eq}}{2} \quad (2.112)$$

2.13. Μετασχηματιστές μετρήσεων

Οι μετασχηματιστές μετρήσεων χρησιμοποιούνται για να υποβιβάζουν κατά ένα γνωστό λόγο την τάση ή την ένταση ενός δικτύου ή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, την οποία θέλουμε να μετρήσουμε. Η μέτρηση της τάσης ή της έντασης γίνεται με την βοήθεια ενός βολτομέτρου ή ενός αμπερομέτρου αντίστοιχα. Η χρησιμοποίηση των μετασχηματιστών μετρήσεως γίνεται για την προστασία του χρήστη, διότι δεν έρχεται σε επαφή με το σύστημα Υψηλής τάσης για να λάβει την μέτρηση. Επίσης δεν υπάρχει η ανάγκη για την χρήση ειδικών και ακριβών οργάνων για την επέκταση της κλίμακας μέτρησης ενός οργάνου. Οι μετασχηματιστές οργάνων διακρίνονται σε μετασχηματιστές τάσης και μετασχηματιστές έντασης.

2.13.1. Μετασχηματιστές τάσης

Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή συνδέεται παράλληλα με το δίκτυο της υψηλής τάσης που θέλουμε να μετρήσουμε ενώ στο δευτερεύον τύλιγμα συνδέεται το όργανο μέτρησης της τάσης το οποίο είναι το βολτόμετρο. Για λόγους προστασίας του χρήστη ο ένας ακροδέκτης του δευτερεύοντος τυλίγματος γειώνεται ενώ τοποθετούνται ασφάλειες τήξης τόσο στην πλευρά του πρωτεύοντος όσο και στην πλευρά του δευτερεύοντος τυλίγματος για την προστασία του μετασχηματιστή από βραχυκυκλώματα, σχήμα 2.24.



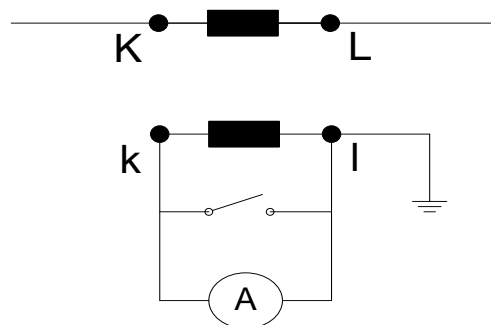
Σχήμα 2.24- Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τάσης.

Εάν η κλίμακα του βολτομέτρου είναι βαθμολογημένη στην πλευρά της χαμηλής τάσης, τότε για να βρούμε την τιμή της υψηλής τάσης θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την ένδειξη του βολτομέτρου με τον λόγο μετασχηματισμού, δηλαδή

$$V_1 = \alpha V_2 \quad (2.113)$$

2.13.2. Μετασχηματιστές έντασης

Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή έντασης συνδέεται σε σειρά με τον κλάδο, του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε την ένταση και αποδίδει στο δευτερεύον τύλιγμά του, τιμή έντασης η οποία μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια ενός αμπερομέτρου. Οι συνηθέστερες τιμές του ρεύματος του δευτερεύοντος είναι 5A ή 1A.



Σχήμα 2.25- Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης.

Σε περίπτωση που αφαιρεθεί το αμπερόμετρο, το δευτερεύον τύλιγμα είναι πλέον ανοικτό με συνέπεια ο μετασχηματιστής να εμφανίζει πολύ υψηλή τάση, με αποτέλεσμα να προκληθεί βλάβη στην μόνωση του μετασχηματιστή λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που θα αναπτυχθεί καθώς και ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας σε περίπτωση επαφής με τους ακροδέκτες του δευτερεύοντος

τυλίγματος. Επομένως το ένα άκρο του δευτερεύοντος τυλίγματος γειώνεται για λόγους προστασίας του χρήστη, σχήμα 2.25. Επίσης μπορούμε να τοποθετήσουμε έναν διακόπτη όπου σε περίπτωση που θελήσουμε να αφαιρέσουμε το αμπερόμετρο θα βραχυκυκλώνει το δευτερεύον τύλιγμα. Οι μετασχηματιστές έντασης δεν κόβουν το κύκλωμα προκειμένου να συνδεθούν σε σειρά με αυτό, αλλά είναι ειδικά κατασκευασμένοι δακτύλιοι οι οποίοι αγκαλιάζουν τον αγωγό που θέλουμε να μετρήσουμε.

Σε περίπτωση βέβαια που δεν θέλουμε να διακόψουμε το κύκλωμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα φορητό τύπο μετασχηματιστή έντασης ο οποίος διαθέτει και αμπερόμετρο και ονομάζεται αμπεροτσιμπίδα, σχήμα 2.26. Σ' αυτή την περίπτωση ο πυρήνας του μετασχηματιστή είναι οι δύο τσιμπίδες, από τις οποίες η μία μετακινείται ώστε να μπορούμε να περάσουμε τον αγωγό. Η μέτρηση του ρεύματος γίνεται προσδιορίζοντας το μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται γύρω από τον αγωγό και το αποτέλεσμα της μέτρησης αποτυπώνεται στην ψηφιακή οθόνη της αμπεροτσιμπίδας.



Σχήμα 2.26- Αμπεροτσιμπίδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

3.1. Εισαγωγή στους τριφασικούς μετασχηματιστές

Τα τριφασικά κυκλώματα εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως οι τριφασικοί μετασχηματιστές αποτελούν σημαντικό παράγοντα από το στάδιο της παραγωγής μέχρι και το στάδιο της κατανάλωσης.

Οι τριφασικοί μετασχηματιστές μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας είτε μια ενιαία τριφασική μονάδα είτε τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μιας ενιαίας τριφασικής μονάδας, είναι ότι το βάρος τους, ο όγκος τους και το κόστος κατασκευής τους είναι μικρότερο σε σχέση την επιλογή χρησιμοποίησης τριών μονοφασικών μετασχηματιστών. Το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης τριών μονοφασικών μετασχηματιστών είναι ότι σε περίπτωση βλάβης του ενός από τους τρεις μετασχηματιστές, οι υπόλοιποι δύο μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες του φορτίου, ώστε να σταλθεί προς επισκευή. Οι τριφασικοί μετασχηματιστές μπορούν να είναι είτε τύπου πυρήνα είτε τύπου μανδύα.

3.2. Παραγωγή τριφασικού ρεύματος

Τα τριφασικά ρεύματα παράγονται από τριφασικές τάσεις. Μια γεννήτρια αποτελεί την τριφασική πηγή τάσης, η οποία έχει τρία διαφορετικά πηνία τα οποία είναι τοποθετημένα στη περιφέρεια του στάτη της και βρίσκονται σε απόσταση 120° μεταξύ τους. Ο ηλεκτρομαγνήτης τοποθετείται στον δρομέα και ο αριθμός των πόλων του εξαρτάται από την συχνότητα που επιθυμούμε να χρησιμοποιήσουμε καθώς και από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Η περιστροφή του ηλεκτρομαγνήτη επάγει μια ημιτονοειδή τάση σε κάθε τύλιγμα του τυμπάνου με αποτέλεσμα η γεννήτρια να μετατρέπει την κινητική ενέργεια που δέχεται σε ηλεκτρική. Οι επαγόμενες τάσεις σε κάθε πηνίο θα έχουν ίδιο μέτρο, ίδια συχνότητα και διαφορά 120° ηλεκτρικές μεταξύ τους. Επομένως τα ρεύματα των φάσεων θα περιγράφονται από τις εξισώσεις

$$i_1 = I_0 \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

$$i_2 = I_0 \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3.2)$$

$$i_3 = I_0 \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (3.3)$$

Το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών σε κάθε χρονική στιγμή είναι ίσο με μηδέν, δηλαδή

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (3.4)$$

Όσο αφορά την πραγματική ισχύ του τριφασικού ρεύματος, αυτή θα είναι τριπλάσια της ισχύος που μεταφέρει η κάθε φάση.

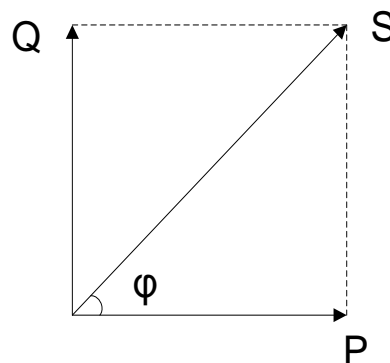
$$P = 3 V_{ph} I_{ph} \cos \theta = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad (3.5)$$

ενώ η άεργος και η φαινόμενη ισχύς θα δίνεται από τις σχέσεις

$$Q = 3 V_{ph} I_{ph} \sin \theta = \sqrt{3} V_L I_L \sin \theta \quad (3.6)$$

$$S = 3 V_{ph} I_{ph}^* = \sqrt{3} V_L I_L^* \quad (3.7)$$

Στο εναλλασσόμενο ρεύμα όμως, τα παραπάνω μεγέθη είναι διανυσματικά οπότε αν τα αναπαραστήσουμε σε άξονες θα έχουμε το τρίγωνο ισχύος.



Σχήμα 3.1- Τρίγωνο ισχύος.

3.3. Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών

Οι τρόποι σύνδεσης των τυλιγμάτων είναι οι ίδιοι, είτε χρησιμοποιήσουμε έναν τριφασικό μετασχηματιστή είτε τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές. Πιο αναλυτικά οι τρόποι σύνδεσης των τυλιγμάτων του τριφασικού μετασχηματιστή είναι σε αστέρα, σε τρίγωνο και σε τεθλασμένο αστέρα. Στο σχήμα 3.2 απεικονίζονται τα σύμβολα τα οποία χαρακτηρίζουν τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων τόσο της υψηλής όσο και της χαμηλής τάσης.

Συνδεσμολογία τυλίγματος	Υψηλή τάση	Χαμηλή τάση
Αστέρας	Y	y
Τρίγωνο	D	d
Τεθλασμένος αστέρας	Z	z

Σχήμα 3.2- Συμβολισμός συνδεσμολογίας τυλιγμάτων τριφασικού μετασχηματιστή.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι όταν αναφερόμαστε στην υψηλή τάση χρησιμοποιούμε κεφαλαίο γράμμα ενώ στην χαμηλή τάση χρησιμοποιούμε μικρό γράμμα. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τη συνδεσμολογία κάθε πλευράς του μετασχηματιστή. Με βάση τα όσα αναφέραμε η ονοματολογία των τριφασικών μετασχηματιστών έχει την εξής μορφή

$$A(N)b(n)k$$

Όπου το γράμμα A αναφέρεται στην σύνδεση των τυλιγμάτων της πλευράς με την υψηλή τάση ενώ το γράμμα b αναφέρεται στην σύνδεση των τυλιγμάτων της χαμηλής τάσης. Σε περίπτωση όπου υπάρχει και ο ακροδέκτης του ουδέτερου αγωγού, ο οποίος συμβολίζεται με το γράμμα n, τότε γράφουμε το γράμμα με το οποίο συμβολίζεται δίπλα από την πλευρά στην οποία υπάρχει. Επίσης το γράμμα k είναι ένας αριθμός και οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι από 0 - 12 οι οποίες πολλαπλασιάζονται με τις 30° μας δείχνουν πόσες φορές το διάνυσμα της χαμηλής τάσης επιπορεύεται του διανύσματος της υψηλής τάσης για την ίδια φάση του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος.

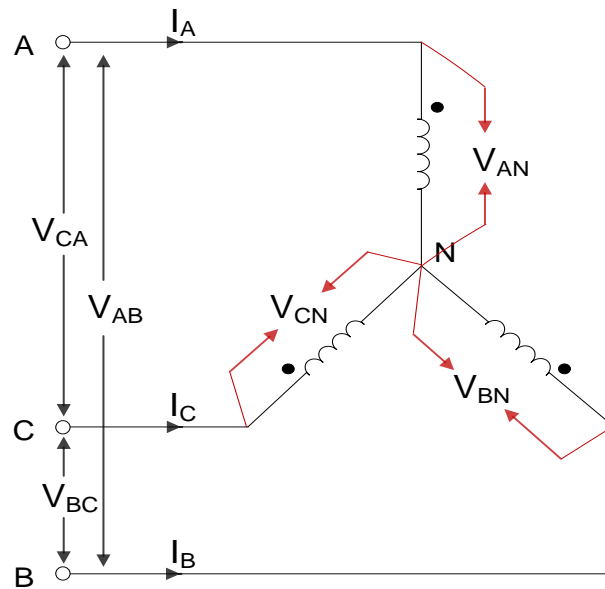
3.3.1. Συνδεσμολογία αστέρα

Κατά τη συνδεσμολογία αστέρα, το ένα από τα δύο άκρα των τυλιγμάτων της κάθε φάσης συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας έναν κοινό κόμβο ενώ τα υπόλοιπα συνδέονται με το δίκτυο, σχήμα 3.3. Ο κοινός κόμβος είναι μηδενικού δυναμικού και σε αυτόν συνδέουμε τον ουδέτερο αγωγό. Με τον όρο φασική τάση εννοούμε την τάση η οποία εφαρμόζεται μεταξύ του ενός τυλίγματος και του ουδέτερου αγωγού ενώ πολική τάση είναι η τάση μεταξύ δύο τυλιγμάτων. Για συμμετρικό δίκτυο και για διαδοχή φάσεων ABC έχουμε

$$V_{AN} = V \angle 0^\circ \quad (3.8)$$

$$V_{BN} = V \angle -120^\circ \quad (3.9)$$

$$V_{CN} = V \angle +120^\circ \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.3- Συνδεσμολογία αστέρα.

Με βάση το σχήμα 3.3 και με όσα έχουν προαναφερθεί, οι τάσεις V_{AN} , V_{BN} και V_{CN} αντιστοιχούν στις φασικές τάσεις ενώ οι τάσεις V_{AB} , V_{BC} και V_{CA} αντιστοιχούν στις πολικές τάσεις. Επομένως θα ισχύει

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} \quad (3.11)$$

$$V_{AB} = V (1 \angle 0^\circ - 1 \angle -120^\circ) \quad (3.12)$$

$$V_{AB} = \sqrt{3} V \angle +30^\circ \quad (3.13)$$

Από την σχέση 3.13 παρατηρούμε ότι οι πολικές τάσεις είναι μεγαλύτερες κατά $\sqrt{3}$ φορές από τις φασικές τάσεις και προπορεύονται κατά 30° . Χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία, για τις υπόλοιπες πολικές τάσεις θα ισχύει

$$V_{BC} = \sqrt{3} V \angle -90^\circ \quad (3.14)$$

$$V_{CA} = \sqrt{3} V \angle +150^\circ \quad (3.15)$$

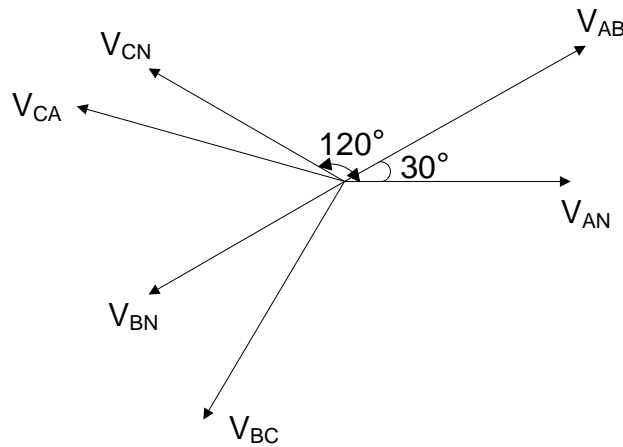
Επομένως η σχέση η οποία συνδέει την φασική με την πολική τάση είναι

$$V_{ph} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (3.16)$$

Ενώ παρατηρούμε ότι τα ρεύματα των γραμμών είναι το ίδιο με το ρεύματα που ρέουν στα αντίστοιχα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Δηλαδή

$$I_{ph} = I_L \quad (3.17)$$

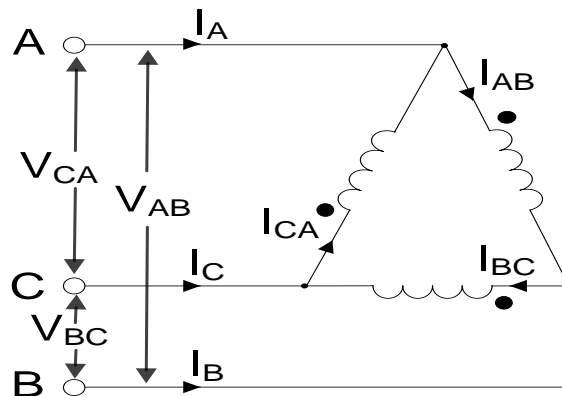
Το διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων της συνδεσμολογίας αστέρα απεικονίζεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4- Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων συνδεσμολογίας αστέρα.

3.3.2. Συνδεσμολογία τριγώνου

Κατά τη συνδεσμολογία τριγώνου, το τελικό άκρο του τυλίγματος της κάθε φάσης, συνδέεται με το αρχικό άκρο του επόμενου τυλίγματος οπότε προκύπτουν τρεις ακροδέκτες οι οποίοι συνδέονται με το δίκτυο. Η συνδεσμολογία τριγώνου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5- Συνδεσμολογία τριγώνου.

Με βάση το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι η πολική τάση ισούται με την φασική τάση. Επομένως θα ισχύει

$$V_{ph} = V_L \quad (3.18)$$

Τα ρεύματα I_A , I_B και I_C αντιστοιχούν στα πολικά ρεύματα ενώ τα φασικά ρεύματα είναι τα I_{AB} , I_{BC} και I_{CA} . Το ρεύμα I_A μπορούμε να το υπολογίσουμε

εφαρμόζοντας τον νόμο ρευμάτων του Kirchhoff στον κόμβο όπου εισέρχεται. Επομένως θα έχουμε

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \quad (3.19)$$

$$I_A = I (1 \angle 0^\circ - 1 \angle -240^\circ) \quad (3.20)$$

$$I_A = \sqrt{3} I \angle -30^\circ \quad (3.21)$$

Από την σχέση 3.21 παρατηρούμε ότι τα πολικά ρεύματα είναι μεγαλύτερα κατά $\sqrt{3}$ φορές από τα φασικά ρεύματα και έπονται κατά 30° . Χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία, μπορούμε να υπολογίσουμε και τα υπόλοιπα πολικά ρεύματα.

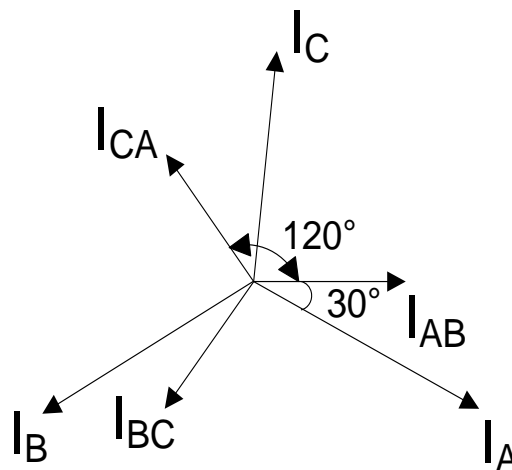
$$I_B = \sqrt{3} I \angle -150^\circ \quad (3.22)$$

$$I_C = \sqrt{3} I \angle 90^\circ \quad (3.23)$$

Επομένως η σχέση η οποία συνδέει τα φασικά με τα πολικά ρεύματα είναι

$$I_{ph} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (3.24)$$

Το διανυσματικό διάγραμμα των ρευμάτων της συνδεσμολογίας τριγώνου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6.

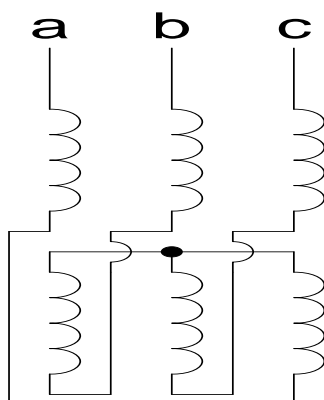


Σχήμα 3.6- Διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων συνδεσμολογίας τριγώνου.

3.3.3. Συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα

Υπάρχουν και περιπτώσεις κατά τις οποίες το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή πρέπει να συνδεθεί σε τεθλασμένο αστέρα. Η σύνδεση αυτή υλοποιείται χωρίζοντας σε δύο ίσα τμήματα το τύλιγμα της κάθε φάσης του δευτερεύοντος και στη συνέχεια το τέλος του μισού τυλίγματος συνδέεται με

την αρχή του προηγούμενου τυλίγματος. Η συνδεσμολογία κατά τεθλασμένο αστέρα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7.



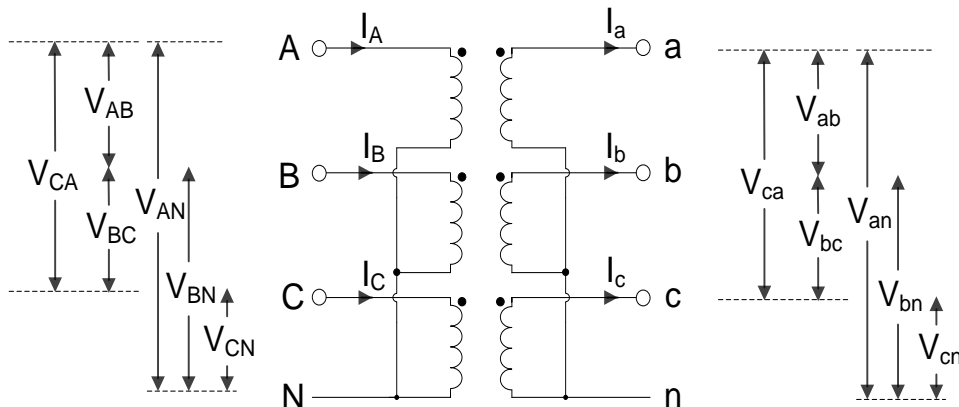
Σχήμα 3.7- Συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα.

Βασικό μειονέκτημα της συνδεσμολογίας είναι ότι απαιτούνται περισσότεροι αριθμός σπειρών, πράγμα το οποίο τον καθιστά πιο ακριβό. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της συνδεσμολογίας είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής ουδέτερου αγωγού καθώς και σε λειτουργία με μη συμμετρικό φορτίο δεν επηρεάζεται το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή.

Οι συνδεσμολογίες οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω βρίσκουν εφαρμογή στους περισσότερους από τους τριφασικούς μετασχηματιστές που βρίσκονται στο εμπόριο.

3.3.4. Συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα (Υγ0)

Το σχήμα 3.8 απεικονίζει τη σύνδεση κατά αστέρα – αστέρα, είτε χρησιμοποιώντας τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές είτε μία ενιαία τριφασική μονάδα.



Σχήμα 3.8- Συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα.

Σύμφωνα με αυτή τη σύνδεση, η τάση κάθε τυλίγματος είναι κατά $\frac{1}{\sqrt{3}}$ φορές μικρότερη σε σχέση με την τάση της γραμμής και αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αριθμός των σπειρών ανά φάση να είναι μικρότερος καθώς και η ποσότητα της μόνωσης να είναι μειωμένη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες συνδέσεις. Συνεπώς η συνδεσμολογία αυτή είναι κατάλληλη για πολύ υψηλές τάσεις. Με βάση τα παραπάνω ο λόγος των πολικών τάσεων του μετασχηματιστή είναι

$$\frac{V_{L,p}}{V_{L,s}} = \frac{\sqrt{3} V_{ph,p}}{\sqrt{3} V_{ph,s}} \quad (3.25)$$

$$\frac{V_{L,p}}{V_{L,s}} = \alpha \quad (3.26)$$

Επίσης, το ρεύμα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή είναι το ίδιο με το ρεύμα της γραμμής. Αυτό έχει ως συνέπεια, αυξημένο κόστος και δυσκολία στην κατασκευή, διότι η διατομή των τυλιγμάτων είναι μεγαλύτερη λόγω των υψηλών ρευμάτων που κυκλοφορούν σε αυτά. Στην περίπτωση συμμετρικού φορτίου, τα δευτερεύοντα ρεύματα είναι σε φάση με τα πρωτεύοντα ρεύματα

$$\frac{I_a}{I_A} = \alpha \quad (3.27)$$

Ακόμη, θα ισχύει ότι οι φασικές τάσεις του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος, της ίδιας φάσης, είναι σε φάση μεταξύ τους. Το ίδιο θα ισχύει και με τις πολικές τάσεις με την μόνη διαφορά ότι είναι κατά $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερες σε μέγεθος και προηγούνται κατά 30° από τις αντίστοιχες φασικές τάσεις. Επομένως θα ισχύει ότι

$$\frac{V_{AN}}{V_{an}} = \frac{V_{BN}}{V_{bn}} = \frac{V_{CN}}{V_{cn}} = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{V_{BC}}{V_{bc}} = \frac{V_{CA}}{V_{ca}} = \alpha \quad (3.28)$$

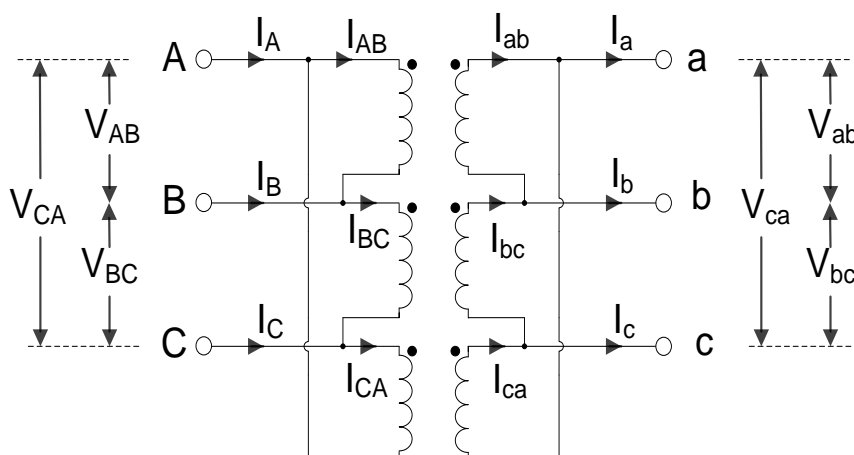
Η σύνδεση αστέρα – αστέρα δεν είναι ικανοποιητική στην περίπτωση που το φορτίο δεν είναι ισορροπημένο. Επομένως, κατά την σύνδεση αυτή απαιτείται η χρησιμοποίηση του ουδέτερου αγωγού τόσο στην πλευρά του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος τυλίγματος. Σε περίπτωση μη συμμετρικής φόρτισης του δευτερεύοντος τυλίγματος, οι φάσεις του πρωτεύοντος φορτίζονται αντίστοιχα, με αποτέλεσμα να γίνονται αρκετά μη ισορροπημένες. Επομένως με την χρήση του ουδέτερου προσφέρεται μια οδός επιστροφής στα μη συμμετρικά ρεύματα που παράγει το φορτίο.

Επίσης παρατηρούμε την ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών στα ρεύματα διέγερσης των τριών φάσεων, που οφείλονται από τη μη γραμμικότητα του σιδηρομαγνητικού πυρήνα του μετασχηματιστή. Ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι περιττές συνιστώσες αρμονικών και κυρίως η αρμονική τρίτης τάξης διότι προκαλούν παραμορφώσεις οι οποίες είναι ανάλογες με το πλάτος τους. Τα παραπάνω προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν γειώνοντας τον ουδέτερο αγωγό κυρίως του πρωτεύοντος τυλίγματος. Με την χρήση αυτού του τρόπου δεν υπερφορτώνεται ο ουδέτερος αγωγός διότι έχουμε ροή ρεύματος προς τη γη. Μια άλλη μέθοδος η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αποφεύγοντας την χρήση του ουδέτερου αγωγού στο πρωτεύον τύλιγμα, είναι η προσθήκη ενός τρίτου τυλίγματος το οποίο συνδέεται κατά τρίγωνο. Με αυτήν την μέθοδο οι αρμονικές συνιστώσες εμφανίζονται στο τριτεύον τύλιγμα, το οποίο παρέχει μια κλειστή διαδρομή για αυτές και προκαλούν κάποιο παρασιτικό ρεύμα στο εσωτερικό του. Το τριτεύον τύλιγμα θα πρέπει να έχει αρκετή ισχύ, ίση με το $\frac{1}{3}$ της ονομαστικής ισχύος των δύο άλλων τυλιγμάτων, ώστε να μην παρουσιάζει πρόβλημα με τα παρασιτικά ρεύματα.

Επομένως για την σύνδεση κατά αστέρα – αστέρα απαραίτητη προϋπόθεση είναι η χρήση μια εκ των παραπάνω μεθόδων.

3.3.5. Συνδεσμολογία τριγώνου – τριγώνου (Dd0)

Το σχήμα 3.9 δείχνει έναν τριφασικό μετασχηματιστή, του οποίου τα πρωτεύοντα και τα δευτερεύοντα του τυλίγματα να είναι συνδεδεμένα σε τρίγωνο. Η συνδεσμολογία αυτή χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου δεν είναι απαραίτητη η σύνδεση του ουδέτερου αγωγού τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα χαμηλής τάσης διότι υπάρχει πλήρης τάση γραμμής κατά μήκος των τυλιγμάτων και σε συστήματα ισχυρού ρεύματος διότι τα τυλίγματα φέρουν το 0,58 του ρεύματος της γραμμής.



Σχήμα 3.9- Συνδεσμολογία τριγώνου – τριγώνου.

Όπως έχει προαναφερθεί στη σύνδεση κατά τρίγωνο οι πολικές τάσεις είναι ίσες με τις φασικές τάσεις. Επομένως οι απαιτήσεις σε μόνωση των τυλιγμάτων ειδικά από την πλευρά της υψηλής τάσης είναι αυξημένες σε σχέση με την συνδεσμολογία κατά αστέρα. Επίσης για συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων, δεν υπάρχει διαφορά φάσης των τάσεων και των ρευμάτων μεταξύ των δύο τυλιγμάτων της ίδιας φάσης.

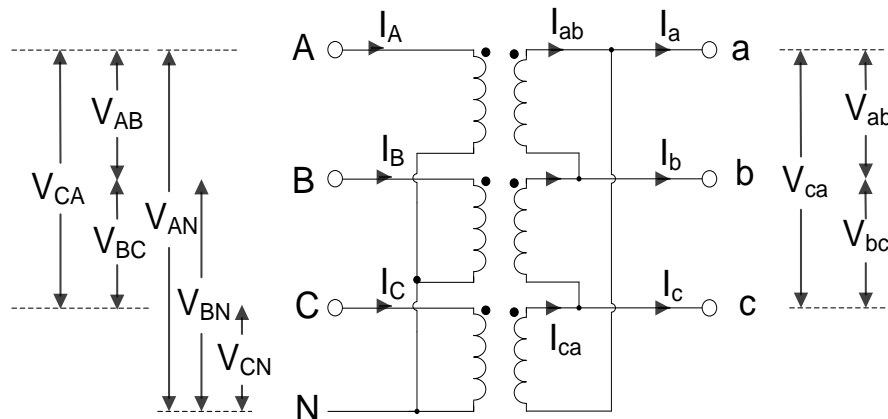
$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{V_{BC}}{V_{bc}} = \frac{V_{CA}}{V_{ca}} = \alpha \quad (3.29)$$

$$\frac{I_a}{I_A} = \frac{I_b}{I_B} = \frac{I_c}{I_C} = \frac{I_{ab}}{I_{AB}} = \frac{I_{bc}}{I_{BC}} = \frac{I_{ca}}{I_{CA}} = \alpha \quad (3.30)$$

Επίσης στην σύνδεση αυτή δεν εμφανίζονται τα προβλήματα της τρίτης αρμονικής στα ρεύματα διέγερσης των τριών φάσεων διότι, το τρίγωνο παρέχει μια κλειστή διαδρομή για την κυκλοφορία των ρευμάτων αυτών καθώς και δεν επηρεάζεται από μη συμμετρική φόρτιση του φορτίου.

3.3.6. Συνδεσμολογία αστέρα – τριγώνου (Yd1)

Στο σχήμα 3.10 απεικονίζεται η σύνδεση κατά αστέρα – τρίγωνο, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές υποβιβασμού της τάσης. Το πρωτεύον τύλιγμα του τριφασικού μετασχηματιστή, το οποίο συνδέεται με την υψηλή τάση, είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα ενώ το δευτερεύον τύλιγμα είναι σε τρίγωνο.



Σχήμα 3.10- Συνδεσμολογία αστέρα – τριγώνου.

Με βάση τη συνδεσμολογία αυτή, οι τάσεις των γραμμών του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι μεγαλύτερες κατά $\sqrt{3}$ φορές από τις αντίστοιχες τάσεις που δέχονται τα τυλίγματα, με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις σε μόνωση των τυλιγμάτων της υψηλής τάσης είναι μειωμένες. Όσο αφορά τη σύνδεση του δευτερεύοντος τυλίγματος, οι τάσεις των γραμμών του είναι ίσες με τις αντίστοιχες φασικές τάσεις των τυλιγμάτων. Σύμφωνα με όσα έχουν προαναφερθεί, ο λόγος των πολικών τάσεων του πρωτεύοντος τυλίγματος σε σχέση με τις πολικές τάσεις του δευτερεύοντος ισούται με

$$\frac{V_{L,p}}{V_{L,s}} = \frac{\sqrt{3} V_{ph,p}}{V_{ph,s}} \quad (3.31)$$

$$\frac{V_{L,p}}{V_{L,s}} = \sqrt{3} \alpha \quad (3.32)$$

Εφόσον το δευτερεύον τύλιγμα είναι συνδεδεμένο κατά τρίγωνο, τα ρεύματα των τυλιγμάτων θα είναι μειωμένα κατά $\sqrt{3}$ φορές σε σχέση με τα ρεύματα των γραμμών. Ο ουδέτερος στο πρωτεύον τύλιγμα γειώνεται τυπικά. Η σύνδεση αυτή δεν επηρεάζεται από τις αρμονικές συνιστώσες των ρευμάτων διέγερσης, διότι τα ρεύματα αυτά κυκλοφορούν σε κλειστές διαδρομές στην πλευρά του τριγώνου. Επίσης σε περίπτωση ασύμμετρης φόρτισης αυτή η σύνδεση είναι πιο σταθερή. Το μειονέκτημα της σύνδεσης αυτής είναι ότι δεν είναι δυνατή η παράλληλη σύνδεση με τους μετασχηματιστές αστέρα – αστέρα και τρίγωνο – τρίγωνο.

Επιπλέον, οι φασικές τάσεις των τυλιγμάτων είναι σε φάση χρόνου μεταξύ τους ενώ για τις πολικές τάσεις των δύο τυλιγμάτων ισχύει

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \sqrt{3} \angle 30^\circ \quad (3.33)$$

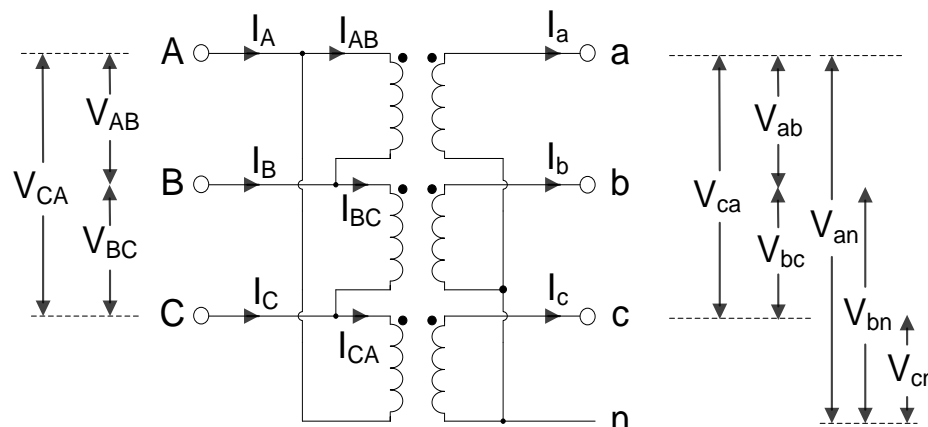
Δηλαδή οι πολικές τάσεις του πρωτεύοντος τυλίγματος προπορεύονται από τις αντίστοιχες τάσεις του δευτερεύοντος κατά 30° . Επίσης για τα ρεύματα των γραμμών τόσο του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος τυλίγματος θα ισχύει ότι

$$\frac{I_a}{I_A} = \frac{I_b}{I_B} = \frac{I_c}{I_C} = \sqrt{3} \angle -30^\circ \quad (3.34)$$

Από την σχέση 3.34 παρατηρούμε ότι τα πολικά ρεύματα του δευτερεύοντος τυλίγματος έπονται κατά 30° από τα αντίστοιχα ρεύματα του πρωτεύοντος τυλίγματος.

3.3.7. Συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα (Dy11)

Στο σχήμα 3.11 απεικονίζεται η σύνδεση κατά τρίγωνο – αστέρα, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές ανύψωσης της τάσης. Το πρωτεύον τυλίγμα του τριφασικού μετασχηματιστή, το οποίο συνδέεται με την υψηλή τάση, είναι συνδεδεμένο κατά τρίγωνο ενώ το δευτερεύον τυλίγμα είναι σε αστέρα.



Σχήμα 3.11- Συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα.

Με βάση τη συνδεσμολογία αυτή, οι τάσεις των γραμμών του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι ίσες με τις αντίστοιχες τάσεις που δέχονται τα τυλίγματα ενώ οι τάσεις των γραμμών του δευτερεύοντος τυλίγματος είναι μεγαλύτερες κατά $\sqrt{3}$ φορές από τις αντίστοιχες τάσεις που δέχονται τα τυλίγματα. Επομένως, ο λόγος των πολικών τάσεων του πρωτεύοντος τυλίγματος σε σχέση με τις πολικές τάσεις του δευτερεύοντος ισούται με

$$\frac{V_{L,p}}{V_{L,s}} = \frac{V_{ph,p}}{\sqrt{3} V_{ph,s}} \quad (3.35)$$

$$\frac{V_{L,p}}{V_{L,s}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \alpha \quad (3.36)$$

Επίσης οι πολικές τάσεις του πρωτεύοντος τυλίγματος επιπορεύονται σε σχέση με τις αντίστοιχες τάσεις του δευτερεύοντος, οπότε θα ισχύει

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \alpha \angle -30^\circ \quad (3.37)$$

Όσο αφορά τα ρεύματα των γραμμών

$$\frac{I_a}{I_A} = \frac{I_b}{I_B} = \frac{I_c}{I_C} = \frac{1}{\sqrt{3}} \alpha \angle 30^\circ \quad (3.38)$$

Δηλαδή τα πολικά ρεύματα του δευτερεύοντος τυλίγματος προπορεύονται κατά 30° από τα αντίστοιχα ρεύματα του πρωτεύοντος τυλίγματος.

3.4. Διάκριση μετασχηματιστών ως προς τον τρόπο ψύξης τους

Με βάση τα πρότυπα ANSI και IEEE προκειμένου ο μετασχηματιστής να λειτουργεί σωστά, πρέπει η μέση ανύψωση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος να μην ξεπερνάει τους 65°C . Επομένως η θερμότητα η οποία παράγεται κυρίως από τις απώλειες του μετασχηματιστή θα πρέπει να απάγεται με κάποια μέθοδο ούτως ώστε να μην ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια πέρα των οποίων ο μετασχηματιστής θα υποστεί βλάβη. Ανάλογα με την μέθοδο ψύξης οι μετασχηματιστές διακρίνονται σε μετασχηματιστές ελαίου, ξηρού τύπου και GIS.

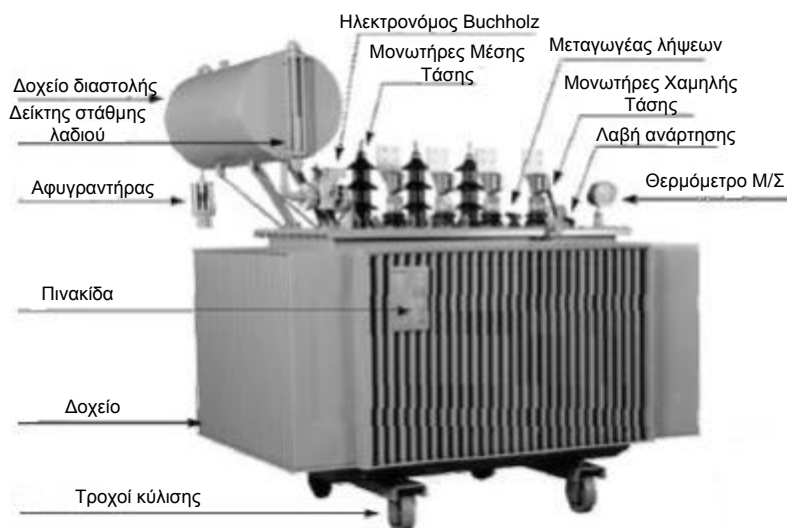
3.4.1. Μετασχηματιστές ελαίου

Οι μετασχηματιστές ελαίου αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο μετασχηματιστή που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία λόγω του χαμηλού κόστους αγοράς τους και τοποθετούνται κυρίως σε ανοικτούς ή σε καλά αεριζόμενους χώρους. Ονομάζονται ελαίου διότι είναι εμβαπτισμένοι σε κάποιο υγρό συγκεκριμένα το μονωτικό λάδι, επικρατέστερο του οποίου είναι το ορυκτέλαιο, το οποίο ψύχει τα τυλίγματα του.

Το μονωτικό λάδι σε σχέση με τον αέρα παρουσιάζει υψηλή διηλεκτρική αντοχή και έτσι υπάρχει αντίσταση στην διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης κατά την ροή του, το λάδι παρεμβάλλεται και γεμίζει τα μικρά κενά αέρα μεταξύ των μονώσεων και μεταξύ των μονώσεων και των

αγωγών αποτρέποντας έτσι τον ιονισμό. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η εισχώρηση υγρασίας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των μονωτικών ιδιοτήτων του χαρτιού και των υλικών κυτταρίνης, ενισχύοντας τις μονωτικές ιδιότητες του χαρτιού. Άλλο ένα πλεονέκτημα του μονωτικού λαδιού είναι ότι στους καινούργιους μετασχηματιστές απομακρύνει τα ξένα σωματίδια τα οποία συγκρατούνται από την διάταξη διηθήσεως. Ένας παράγοντας ο οποίος αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά του λαδιού είναι η παρουσία οξυγόνου ειδικά όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή.

Βασικό μειονέκτημα των μετασχηματιστών ελαίου είναι ότι σε περίπτωση καταστροφής του μετασχηματιστή υπάρχει μεγάλος κίνδυνος πυρκαγιάς, διότι το λάδι είναι αρκετά εύφλεκτο. Επομένως σε περίπτωση διαρροής του μονωτικού λαδιού θα πρέπει να είναι εγκατεστημένος ένας συλλέκτης ελαίου καθώς και συσκευές αυτόματης κατάσβεσης ώστε να μην συντηρηθεί η πυρκαγιά. Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται ένας τριφασικός μετασχηματιστής ελαίου ο οποίος περιλαμβάνει κάποια επιπλέον στοιχεία τα οποία συμβάλουν στην σωστή λειτουργία του.



Σχήμα 3.12 – Τριφασικός μετασχηματιστής τύπου ελαίου.

Ανάλογα με τις αλλαγές της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή το λάδι του συστέλλεται ή διαστέλλεται. Η θερμοκρασία του λαδιού σε κανονική λειτουργία του μετασχηματιστή φτάνει τους 100°C, με αποτέλεσμα την διαστολή του. Το δοχείο διαστολής συνδέεται με σωλήνα με το δοχείο του μετασχηματιστή και χρησιμεύει διότι δέχεται την αύξηση του όγκου του λαδιού. Το δοχείο διαστολής διαθέτει ένα διάφραγμα (αναπνευστήρα) στο εσωτερικό του και αποτρέπει την άμεση επαφή του αέρα με το λάδι. Ο όγκος του λαδιού ο οποίος βρίσκεται στο δοχείο διαστολής ελέγχεται οπτικά με τη βοήθεια του δείκτη στάθμης λαδιού ο οποίος τοποθετείται εξωτερικά του δοχείου. Επίσης

το δοχείο διαστολής περιλαμβάνει τον αφυγραντήρα, ο οποίος περιέχει μη τοξικούς κόκκους διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) γνωστοί και ως silica gel οι οποίοι εμποδίζουν την υγρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος να εισέλθει σε επαφή με τον μονωτικό λάδι καθώς μπορούν να προσροφήσουν μέχρι 40% του βάρους τους σε νερό. Επομένως ο αφυγραντήρας συνεισφέρει στην ασφαλή λειτουργία του μετασχηματιστή αποτρέποντας την είσοδο υγρασίας η οποία προκαλεί μείωση στη μονωτική ικανότητα του μονωτικού χαρτιού καθώς και της διηλεκτρικής ικανότητας του λαδιού. Η εκκένωση του μονωτικού λαδιού γίνεται μέσω της βάνας αποχέτευσης του λαδιού η οποία βρίσκεται στο κάτω μέρος του δοχείου του μετασχηματιστή. Μέσω της βάνας αποχέτευσης γίνεται και η δειγματοληψία του λαδιού προκειμένου να διαπιστωθεί η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού.

Επίσης στον μετασχηματιστή υπάρχουν οι μονωτήρες μέσης και χαμηλής τάσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ασφαλή έξοδο των αγωγών των τυλιγμάτων από το δοχείο του μετασχηματιστή και εμποδίζουν την δημιουργία ηλεκτρικού τόξου με το δοχείο του μετασχηματιστή λόγω του κεραμικού καλύμματος που διαθέτουν. Οι μονωτήρες μέσης τάσης είναι κατασκευασμένοι από πορσελάνη και είναι εμποτισμένοι με λάδι το οποίο επικοινωνεί υδραυλικά με το λάδι ψύξης του μετασχηματιστή. Η τιμή της τάσης κάθε τυλίγματος του μετασχηματιστή επηρεάζει το μήκος του μονωτήρα.

Οι μονωτήρες είναι τοποθετημένοι στο κάλυμμα του μετασχηματιστή. Στο κάλυμμα υπάρχουν επίσης δύο λαβές ανάρτησης, το θερμόμετρο του μετασχηματιστή και ο μεταγωγέας λήψεων. Πιο αναλυτικά οι λαβές ανάρτησης χρησιμεύουν για την ανύψωση και μεταφορά του μετασχηματιστή. Το θερμόμετρο μετράει τη μέγιστη θερμοκρασία του λαδιού. Διαθέτει τρεις δείκτες εκ των οποίων ο ένας μας δείχνει την πραγματική θερμοκρασία του. Οι άλλοι δύο ρυθμίζονται στις επιθυμητές θερμοκρασίες και συνδέονται στο κύκλωμα προστασίας για διακοπή του κυκλώματος και συναγερμό, όταν γίνει υπέρβαση των αντίστοιχων ορίων των θερμοκρασιών αυτών.

Τα τυλίγματα της μέσης τάσης έχουν ενδιάμεσες λήψεις οι οποίες καταλήγουν στον μεταγωγέα λήψεων, ο οποίος είναι ένας περιστροφικός διακόπτης. Έτσι έχουμε την δυνατότητα διαφορετικών λήψεων στο πρωτεύον του μετασχηματιστή. Με αυτόν τον τρόπο μεταβάλουμε τον λόγο μετασχηματισμού και συνεπώς τη ρύθμιση της τάσης του δευτερεύοντος τυλίγματος. Η ρύθμιση αυτή πραγματοποιείται όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται εκτός τάσης.

Το κάλυμμα του μετασχηματιστή τοποθετείται στο επάνω μέρος του δοχείου του. Περιμετρικά του δοχείου είναι τοποθετημένα τα καλοριφέρ, τα οποία χρησιμεύουν στην απαγωγή θερμότητας του λαδιού του μετασχηματιστή, όμως αυξάνουν τον όγκο και το βάρος του μετασχηματιστή. Επίσης στο δοχείο τοποθετούνται οι αφαλοί γείωσης και οι τροχοί κύλισης.

Ο ηλεκτρονόμος Buchholz είναι μια ασφαλιστική διάταξη η οποία τοποθετείται κυρίως σε μεγάλους ισχύος μετασχηματιστές ελαίου και τοποθετείται μεταξύ του δοχείου του μετασχηματιστή και του δοχείου διαστολής. Χρησιμοποιείται για την προστασία των μετασχηματιστών από σφάλματα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του μετασχηματιστή και προκαλούν ανάπτυξη αερίων ή έντονη ροή λαδιού. Ο ηλεκτρονόμος αυτός αποτελείται από ένα θάλαμο γεμάτο λάδι και μέσα σ' αυτόν υπάρχουν δύο αρθρωτοί πλωτήρες, ένας στην κορυφή και ένας στο κάτω μέρος του θαλάμου. Κάθε πλωτήρας έχει και έναν διακόπτη υδραργύρου οπότε στον άνω πλωτήρα συνδέεται με ένα κύκλωμα συναγερμού και στον κάτω πλωτήρα συνδέεται με ένα εξωτερικό κύκλωμα διακοπής. Στο σχήμα 3.13 απεικονίζεται ο ηλεκτρονόμος Buchholz.

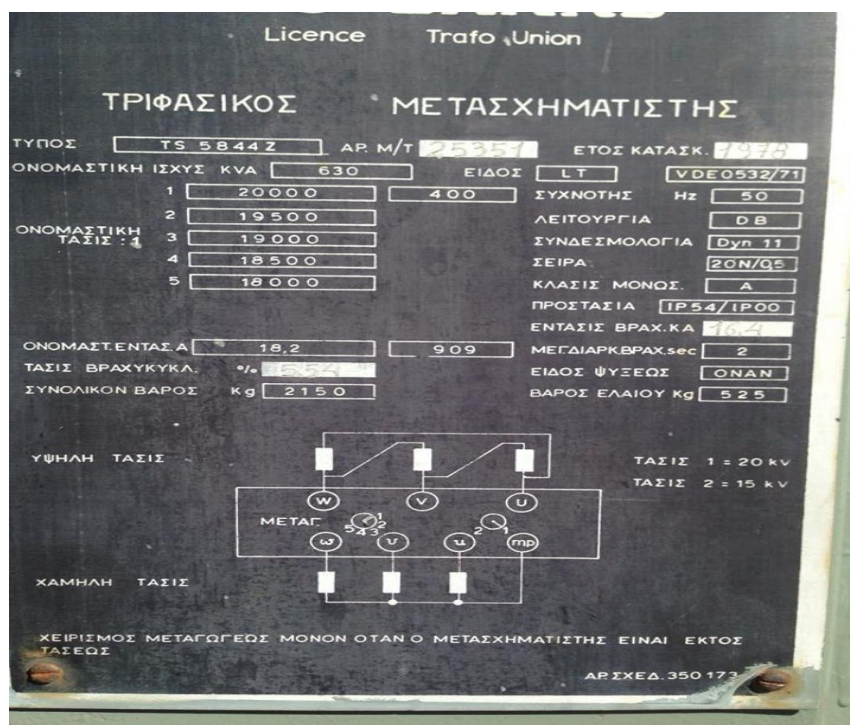


Σχήμα 3.13 – Ηλεκτρονόμος Buchholz.

Κάθε φορά που εμφανίζεται ένα μικρό σφάλμα αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμότητας η οποία προκαλεί φυσαλίδες αερίου στο εσωτερικό του μετασχηματιστή. Οι φυσαλίδες αυτές ρέουν προς τα πάνω και συλλέγονται από τον ηλεκτρονόμο Buchholz. Ανάλογα με τη ποσότητα του αερίου που συλλέχθηκε στον ηλεκτρονόμο Buchholz παρατηρείται και η αντίστοιχη μετατόπιση λαδιού η οποία αναγκάζει τον άνω πλωτήρα να κλείσει τον διακόπτη υδραργύρου του. Με αυτόν τον τρόπο ενεργοποιείται όπως αναφέραμε παραπάνω το κύκλωμα συναγερμού. Η συλλεγμένη ποσότητα αερίου δείχνει τη σοβαρότητα του σφάλματος που συνέβη. Κατά τη διάρκεια ελαφρών σφαλμάτων η παραγωγή αερίου δεν αρκεί για να μετακινήσει το κατώτερο πλωτήρα. Όμως σε περίπτωση σημαντικού σφάλματος, για

παράδειγμα βραχυκύκλωμα από φάση με γείωση, παράγεται ένα μεγάλο μέρος αερίου του οποίου η κίνησή του είναι αρκετά υψηλή ώστε να ενεργοποιηθεί ο διακόπτης υδραργύρου του κάτω πλωτήρα με αποτέλεσμα την διακοπή της τροφοδοσίας του μετασχηματιστή.

Τέλος στη πινακίδα του μετασχηματιστή αναγράφονται πληροφορίες για τη σωστή λειτουργία του μετασχηματιστή. Η πινακίδα του μετασχηματιστή κατασκευάζεται από μη διαβρώσιμο υλικό και τοποθετείται σε ευδιάκριτο σημείο. Τα βασικά στοιχεία τα οποία αναγράφονται είναι : το όνομα του κατασκευαστή, ο τύπος, ο αριθμός σειράς και το έτος κατασκευής του, η ονομαστική ισχύς και συχνότητα λειτουργίας, ονομαστικές τάσεις – εντάσεις των δύο τυλιγμάτων, η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων, το είδος ψύξης και η κλάση μόνωσης, η τάση και ένταση βραχυκύκλωσης και η μέγιστη διάρκεια βραχυκυκλώματος, το συνολικό βάρος του μετασχηματιστή και το βάρος του ελαίου καθώς και τις θέσεις του μεταγωγέα λήψεων και τάσεων εφόσον υπάρχουν. Στο σχήμα 3.14 αποτυπώνονται τα όσα αναφέραμε για την πινακίδα των μετασχηματιστών.



Σχήμα 3.14 – Πινακίδα τριφασικού μετασχηματιστή ελαίου, 630 KVA .

Σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 60076-2, οι μετασχηματιστές ελαίου ανάλογα με τον τρόπο ψύξης τους διακρίνονται σε κλάσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τέσσερα γράμματα τα οποία περιγράφουν τον τρόπο

κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου σε αυτούς. Πιο συγκεκριμένα τα δύο πρώτα γράμματα αφορούν την ψύξη στο εσωτερικό μέρος του μετασχηματιστή ενώ τα δύο τελευταία γράμματα προσδιορίζουν την ψύξη στο εξωτερικό μέρος του μετασχηματιστή. Το πρώτο και το τρίτο γράμμα αφορούν το ψυκτικό μέσο ενώ το δεύτερο και το τέταρτο αφορούν τον μηχανισμό απαγωγής της θερμότητας. Ο συμβολισμός αυτός αναγράφεται στις πινακίδες των μετασχηματιστών. Όσα αναφέρθηκαν αποτυπώνονται στο σχήμα 3.15.

		Γράμμα	Περιγραφή
		Εσωτερικό μετασχηματιστή	1 ^ο γράμμα (ψυκτικό μέσο)
K	Υγρό με σημείο καύσης μεγαλύτερο των 300°C		
L	Υγρό με μη μετρήσιμο σημείο καύσης		
2 ^ο γράμμα (μηχανισμός ψύξης)	N		Φυσική ροή στον εξοπλισμό ψύξης και στα τυλίγματα
	F		Εξαναγκασμένη κυκλοφορία στον εξοπλισμό ψύξης, φυσική ροή στα τυλίγματα
	D		Εξαναγκασμένη κυκλοφορία στον εξοπλισμό ψύξης, κατευθυνόμενη ροή στα τυλίγματα
Εξωτερικό μετασχηματιστή	3 ^ο γράμμα (ψυκτικό μέσο)	A	Αέρας
		W	Νερό
	4 ^ο γράμμα (μηχανισμός ψύξης)	N	Φυσική ροή
		F	Εξαναγκασμένη κυκλοφορία

Σχήμα 3.15 – Συμβολισμός των μετασχηματιστών ελαίου ανάλογα με τον τρόπο ψύξης τους βάση του προτύπου IEC 60076-2.

3.4.2. Μετασχηματιστές ξηρού τύπου

Αντίθετα όταν ελλοχεύει ο κίνδυνος πυρκαγιάς συνίσταται η χρήση των μετασχηματιστών ξηρού τύπου των οποίων η στερεή τους μόνωση είναι άκαυστη. Επομένως δεν απαιτείται μια σειρά από ειδικές προφυλάξεις τις οποίες συναντάμε στον μετασχηματιστή ελαίου κάτι το οποίο καθιστά τους μετασχηματιστές αυτού του είδους να καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο (τουλάχιστον 30%). Ονομάζονται ξηρού τύπου διότι δεν χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο κάποιο υγρό αλλά τον αέρα, ενώ χρησιμοποιείται επιπλέον ως διηλεκτρικό μέσο, η χυτορητίνη η οποία εμποτίζεται στα τυλίγματά του και είναι μη τοξική και ανεπηρέαστη από νερό και υγρασία. Η θερμότητα η οποία αναπτύσσεται κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή απάγεται στο περιβάλλον είτε με φυσική κυκλοφορία αέρα είτε με τη βοήθεια εξωτερικού

αερισμού, συνήθως ανεμιστήρα, όταν ο μετασχηματιστής είναι εγκατεστημένος σε κλειστό χώρο. Ρήγματα στο μονωτικό υλικό μπορούν να προκληθούν λόγω συνεχής υπερφόρτισης του μετασχηματιστή (θερμική γήρανση), από κρούσεις και από υπερβολικό σφίξιμο των συνδέσεων του πυρήνα του μετασχηματιστή. Σημαντικό μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος αγοράς τους το οποίο κυμαίνεται στο 35-45% όμως μερικές φορές εξισορροπείται με το χαμηλό κόστος συντήρησής τους καθώς και με τα πλεονεκτήματα τα οποία παρουσιάζει. Το σχήμα 3.16 μας δείχνει έναν μετασχηματιστή ξηρού τύπου.



Σχήμα 3.16 – Τριφασικός μετασχηματιστής ξηρού τύπου με μόνωση χυτορητίνης .

3.4.3. Μετασχηματιστές τύπου GIS

Οι μετασχηματιστές τύπου GIS χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο κάποιο αέριο σε υψηλή πίεση. Το συνηθέστερο αέριο το οποίο προτιμάται είναι το εξαφθοριούχο θείο (SF_6) λόγω της εξαιρετικής του απαγωγής θερμότητας καθώς και ότι σε κανονικές συνθήκες είναι άφλεκτο, άοσμο, μη τοξικό. Επίσης η τάση διάσπασής του είναι σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερη απ' αυτή του αέρα σε κανονικές συνθήκες πίεσης και ο χρόνος σβέσης τόξου είναι 100 φορές μικρότερος. Το κυριότερο μειονέκτημα του εξαφθοριούχου θείου είναι ότι συμβάλλει ισχυρά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (1 kg SF_6 συμβάλλει όσο 22 τόνοι CO_2) οπότε γίνονται προσπάθειες μείωσης των

χρησιμοποιημένων ποσοτήτων του. Τα πλεονεκτήματα αυτών των μετασχηματιστών είναι ότι έχουν μικρότερο βάρος και μέγεθος έναντι των συστημάτων που μονώνονται με αέρα, μπορούν να τοποθετηθούν σε κλειστούς χώρους λόγω της μεγάλης ασφάλειας στη χρήση τους και ότι έχουν χαμηλά επίπεδα θορύβου. Το σχήμα 3.17 μας δείχνει έναν μετασχηματιστή 1500 KVA με μόνωση SF₆.



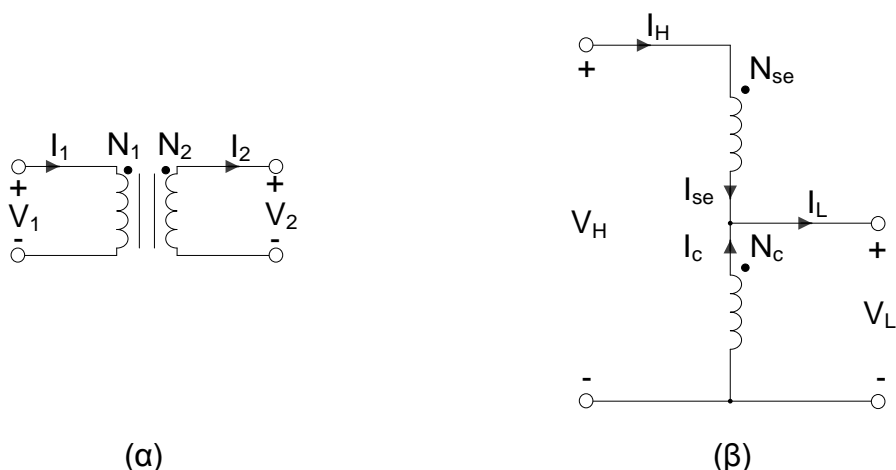
Σχήμα 3.17 – Μετασχηματιστής ισχύος 1500 KVA με μόνωση SF₆.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΥΤΟΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

4.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Σε μερικές εφαρμογές είναι επιθυμητό το επίπεδο της τάσης να υφίσταται μικρές αλλαγές. Σ' αυτή την περίπτωση η κατασκευή ενός μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων, του οποίου η ονομαστική τάση του κάθε τυλίγματος του θα είναι περίπου η ίδια, θα ήταν αρκετά δαπανηρή. Αντ' αυτού χρησιμοποιείται ένας ειδικού τύπου μετασχηματιστής, ο οποίος ονομάζεται αυτομετασχηματιστής. Ο αυτομετασχηματιστής έχει τον συνήθη μαγνητικό πυρήνα αλλά αποτελείται από ένα τύλιγμα, το οποίο διαθέτει μία ή περισσότερες λήψεις, σχήμα 4.1(β). Συνεπώς, στον αυτομετασχηματιστή, το πρωτεύον τύλιγμα καθώς και το δευτερεύον συνδέονται μεταξύ τους τόσο ηλεκτρικά όσο και μαγνητικά. Λόγω της γαλβανικής σύνδεσης, το ένα από τα δύο τυλίγματα ανήκει από κοινού στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τύλιγμα και ονομάζεται κοινό τύλιγμα, ενώ το άλλο τύλιγμα ονομάζεται τύλιγμα σειράς, διότι συνδέεται σε σειρά με το κοινό τύλιγμα. Ο αυτομετασχηματιστής μπορεί να λειτουργήσει είτε ως ανύψωσης είτε ως υποβιβασμού της τάσης τροφοδοσίας, ανάλογα με την συνδεσμολογία των δύο τυλιγμάτων. Ο αυτομετασχηματιστής του σχήματος 4.1(β) είναι υποβιβασμού της τάσεως τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.1- Μετασχηματιστής με τα τυλίγματα του (α) συνδεδεμένα κατά τον συμβατικό τρόπο (β) επανασυνδεδεμένα ως αυτομετασχηματιστής.

Το κυριότερο πλεονέκτημα του αυτομετασχηματιστή είναι ότι μπορούμε να έχουμε μεταβλητή τάση εξόδου σύμφωνα με τις απαιτήσεις, το οποίο δεν συμβαίνει με τον μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων του οποίου η τιμή της τάσης εξόδου είναι σταθερή. Επίσης έχει χαμηλό κόστος κατασκευής, μειωμένο βάρος αλλά και μέγεθος, λόγω του ότι διαθέτει ένα τύλιγμα οπότε είναι προφανές ότι ο συνολικός αριθμός σπειρών θα είναι μικρότερος καθώς επίσης και η διατομή του σύρματος που θα χρησιμοποιηθεί είναι μικρότερη. Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά ο αυτομετασχηματιστής παρουσιάζει μικρότερες απώλειες και συνεπώς μεγάλο βαθμό απόδοσης στην μεταφορά ισχύος. Το βασικό μειονέκτημα του αυτομετασχηματιστή είναι η έλλειψη γαλβανικής απομόνωσης, όπου ελλοχεύει ο κίνδυνος της ηλεκτροπληξίας. Εφόσον το πρωτεύον και το δευτερεύον ανήκουν στο ίδιο τύλιγμα, τυχόν διαταραχές στην πλευρά όπου εφαρμόζεται η τάση μεταδίδονται στην πλευρά του φορτίου και μπορεί να προκαλέσουν βλάβες στο φορτίο το οποίο μπορεί να είναι συνδεδεμένο. Επίσης σε περίπτωση βραχυκυκλώματος του φορτίου το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα είναι πολύ μεγάλο λόγω της μικρής σύνθετης αντίστασης που παρουσιάζει.

Λόγω του μειονεκτήματος της γαλβανικής σύνδεσης ο αυτομετασχηματιστής χρησιμοποιείται σε ειδικές εφαρμογές όπως :

1. Στα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ,όπου αντισταθμίζει τις πτώσεις τάσεων σε μεγάλου μήκους γραμμές και για την σύνδεση δικτύων διαφορετικών επιπέδων τάσης.
2. Για την εκκίνηση κινητήρων (είτε επαγωγικών είτε σύγχρονων).
3. Ως ρυθμιζόμενος αυτομετασχηματιστής (variac) σε εργαστηριακές δοκιμές και όπου απαιτείται μεταβλητή τάση εξόδου.

4.2. Ανάλυση χαρακτηριστικών μεγεθών του αυτομετασχηματιστή

Στον αυτομετασχηματιστή του σχήματος 4.1(β) η τάση και το ρεύμα του κοινού τυλίγματος συμβολίζονται με V_c και I_c αντίστοιχα ενώ με V_{se} και με I_{se} συμβολίζουμε την τάση και το ρεύμα του εν σειρά τυλίγματος. Επίσης η τάση και το ρεύμα του αυτομετασχηματιστή στην πλευρά που εμφανίζει την υψηλότερη τάση συμβολίζονται με V_H και I_H αντίστοιχα, ενώ με V_L και I_L συμβολίζουμε την τάση και το ρεύμα στην πλευρά με την χαμηλότερη τάση. Η τάση εισόδου είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων του κοινού και του εν σειρά τυλίγματος, ενώ η τάση εξόδου είναι ίση με την τάση του κοινού τυλίγματος. Με βάση τα όσα αναφέραμε θα ισχύει

$$V_H = V_{se} + V_c \quad (4.1)$$

$$V_L = V_c \quad (4.2)$$

Όσον αφορά τα ρεύματα του αυτομετασχηματιστή θα ισχύουν οι σχέσεις

$$I_L = I_{se} + I_c \quad (4.3)$$

$$I_H = I_{se} \quad (4.4)$$

Δηλαδή το ρεύμα του τυλίγματος σειράς ισούται με το ρεύμα του πρωτεύοντος, ενώ το ρεύμα του δευτερεύοντος ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων του κοινού και του εν σειρά τυλίγματος. Όπως στον απλό μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων έτσι και στον αυτομετασχηματιστή του σχήματος 4.1(β), ισχύει ότι

$$\frac{V_{se}}{V_c} = \frac{N_{se}}{N_c} = \frac{I_c}{I_{se}} \quad (4.5)$$

Λύνοντας ως προς την τάση του τυλίγματος σειράς την σχέση 4.5 και αντικαθιστώντας την, στην σχέση 4.1 έχουμε

$$V_H = \frac{N_{se}}{N_c} V_c + V_c \quad (4.6)$$

από τις σχέσεις 4.2 και 4.6 προκύπτει

$$V_H = \frac{N_{se}}{N_c} V_L + V_L \quad (4.7)$$

$$V_H = \frac{N_{se} + N_c}{N_c} V_L = \alpha_T V_L \quad (4.8)$$

όπου

$$\alpha_T = \frac{N_{se} + N_c}{N_c} \quad (4.9)$$

είναι ο λόγος μεταφοράς του αυτομετασχηματιστή. Παρόμοια θα είναι η διαδικασία η οποία μας δίνει το ρεύμα στην πλευρά της χαμηλής τάσης συναρτήσει του ρεύματος τη υψηλής τάσης. Επομένως θα ισχύει ότι

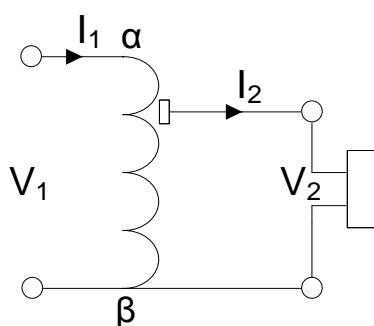
$$I_L = \frac{N_{se} + N_c}{N_c} I_H = \alpha_T I_H \quad (4.10)$$

Τελικά θα ισχύει ότι

$$\frac{V_H}{V_L} = \frac{N_H}{N_L} = \frac{I_L}{I_H} = \alpha_T \quad (4.11)$$

4.3. Ρυθμιζόμενος αυτομετασχηματιστής

Υπάρχουν και αυτομετασχηματιστές οι οποίοι μπορούν να μεταβάλουν την τάση του δευτερεύοντος τυλίγματός τους και ονομάζονται, ρυθμιζόμενοι αυτομετασχηματιστές ή variac. Η μεταβολή της τάσης γίνεται γυρνώντας έναν περιστροφικό διακόπτη, ο οποίος μετακινεί μια επαφή πάνω στο τύλιγμα. Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία του ρυθμιζόμενου αυτομετασχηματιστή.



Σχήμα 4.2- Συνδεσμολογία ρυθμιζόμενου αυτομετασχηματιστή.

Όταν η επαφή βρίσκεται στο σημείο α τότε η τάση που εφαρμόζεται στο φορτίο είναι ίση με την τάση εισόδου ενώ όταν η επαφή βρίσκεται στο σημείο β τότε η τάση που εφαρμόζεται στο φορτίο είναι με μηδέν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1. Δοκιμές μετασχηματιστών ισχύος

Στο κεφάλαιο αυτό υπολογίζονται οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος πέντε μετασχηματιστών, διαφορετικοί μεταξύ τους ως προς την ισχύ και τις τάσεις των τυλιγμάτων τους όμως ίδιας συχνότητας. Καταχωρώντας τις τιμές ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης στον κώδικα που γράψαμε στο Matlab μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος των μετασχηματιστών.

- **1^η Δοκιμή**

Ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε έχει ισχύ 20 kVA με ονομαστική τάση στο πρωτεύον τύλιγμα 2400 V ενώ στο δευτερεύον 240 V. Η συχνότητα λειτουργίας είναι στα 50 Hz. Η δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος πραγματοποιήθηκε στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή ενώ η δοκιμή βραχυκύκλωσης πραγματοποιήθηκε στο πρωτεύον τύλιγμα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης δίνονται στον σχήμα 5.1.

Δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (Open circuit test)	V_{oc} (V)	I_{oc} (A)	P_{oc} (W)
	240	1,04	120
Δοκιμή βραχυκύκλωσης (Short circuit test)	V_{sc} (V)	I_{sc} (A)	P_{sc} (W)
	62	9,5	280

Σχήμα 5.1- Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 1^η δοκιμή.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του υποκεφαλαίου 2.12 μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή. Επομένως

r_1 (Ω)	r_2 (Ω)	x_1 (Ω)	x_2 (Ω)	r_c (k Ω)	x_m (k Ω)
1,5512	0,015512	2,8708	0,028708	48	26,318

Σχήμα 5.2- Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 1^{ης} δοκιμής.

• **2^η Δοκιμή**

Ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε έχει ισχύ 48 kVA με ονομαστική τάση στο πρωτεύον τύλιγμα 4800 V ενώ στο δευτερεύον 240 V. Η συχνότητα λειτουργίας είναι στα 50 Hz. Η δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος πραγματοποιήθηκε στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή ενώ η δοκιμή βραχυκύκλωσης πραγματοποιήθηκε στο πρωτεύον τύλιγμα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης δίνονται στον σχήμα 5.3.

Δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (Open circuit test)	V_{oc} (V)	I_{oc} (A)	P_{oc} (W)
	240	2	120

Δοκιμή βραχυκύκλωσης (Short circuit test)	V_{sc} (V)	I_{sc} (A)	P_{sc} (W)
	150	10	600

Σχήμα 5.3- Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 2^η δοκιμή.

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του υποκεφαλαίου 2.12 είναι

r_1 (Ω)	r_2 (Ω)	x_1 (Ω)	x_2 (Ω)	r_c (k Ω)	x_m (k Ω)
3	0,0075	6,8738	0,0171845	192	49,57418

Σχήμα 5.4- Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 2^{ης} δοκιμής.

• **3^η Δοκιμή**

Ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε έχει ισχύ 50 kVA με ονομαστική τάση στο πρωτεύον τύλιγμα 2400 V ενώ στο δευτερεύον 240 V. Η συχνότητα λειτουργίας είναι στα 50 Hz. Η δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος πραγματοποιήθηκε στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή ενώ η δοκιμή βραχυκύκλωσης πραγματοποιήθηκε στο πρωτεύον τύλιγμα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης δίνονται στον σχήμα 5.5.

Δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (Open circuit test)	V_{oc} (V)	I_{oc} (A)	P_{oc} (W)
	240	5,41	186

Δοκιμή βραχυκύκλωσης (Short circuit test)	V_{sc} (V)	I_{sc} (A)	P_{sc} (W)
	48	20,8	617

Σχήμα 5.5- Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 3^η δοκιμή.

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του υποκεφαλαίου 2.12 είναι

r_1 (Ω)	r_2 (Ω)	x_1 (Ω)	x_2 (Ω)	r_c (k Ω)	x_m (k Ω)
0,7130	0,007130	0,9071	0,009071	30,97674	4,48246

Σχήμα 5.6- Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 3^{ης} δοκιμής.

• **4^η Δοκιμή**

Ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε έχει ισχύ 20 kVA με ονομαστική τάση στο πρωτεύον τύλιγμα 2500 V ενώ στο δευτερεύον 250 V. Η συχνότητα λειτουργίας είναι στα 50 Hz. Η δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος πραγματοποιήθηκε στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή ενώ η δοκιμή βραχυκύκλωσης πραγματοποιήθηκε στο πρωτεύον τύλιγμα. Τα

αποτελέσματα των δοκιμών ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης δίνονται στον σχήμα 5.7.

Δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (Open circuit test)	V_{oc} (V)	I_{oc} (A)	P_{oc} (W)
	250	1,4	105
Δοκιμή βραχυκύκλωσης (Short circuit test)	V_{sc} (V)	I_{sc} (A)	P_{sc} (W)
	104	8	320

Σχήμα 5.7- Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 4^η δοκιμή.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του υποκεφαλαίου 2.12 μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή. Επομένως

r_1 (Ω)	r_2 (Ω)	x_1 (Ω)	x_2 (Ω)	r_c (kΩ)	x_m (kΩ)
2,5	0,025	6	0,06	59,5238	18,7193

Σχήμα 5.8- Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 4^{ης} δοκιμής.

- **5^η Δοκιμή**

Ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε έχει ισχύ 50 kVA με ονομαστική τάση στο πρωτεύον τύλιγμα 2400 V ενώ στο δευτερεύον 120 V. Η συχνότητα λειτουργίας είναι στα 50 Hz. Η δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος πραγματοποιήθηκε στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή ενώ η δοκιμή βραχυκύκλωσης πραγματοποιήθηκε στο πρωτεύον τύλιγμα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ανοιχτού κυκλώματος και βραχυκύκλωσης δίνονται στον σχήμα 5.9.

Δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (Open circuit test)	V_{oc} (V)	I_{oc} (A)	P_{oc} (W)
	120	9,65	396
Δοκιμή βραχυκύκλωσης (Short circuit test)	V_{sc} (V)	I_{sc} (A)	P_{sc} (W)
	92	20,8	810

Σχήμα 5.9- Αποτελέσματα δοκιμών βραχυκύκλωσης και ανοιχτού κυκλώματος για την 5^η δοκιμή.

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του υποκεφαλαίου 2.12 είναι

r_1 (Ω)	r_2 (Ω)	x_1 (Ω)	x_2 (Ω)	r_c (k Ω)	x_m (k Ω)
0,9361	0,00234025	2,0036	0,005009	14,5454	5,29321

Σχήμα 5.10- Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος μετασχηματιστή της 5^{ης} δοκιμής.

Από τις παραπάνω μετρήσεις παρατηρούμε ότι οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων και των επαγωγικών αντιδράσεων είναι μικρές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στον κλάδο μαγνήτισης, το οποίο επιβεβαιώνει και την θεωρία. Επίσης όσο αυξάνει ο λόγος μετασχηματισμού τόσο μειώνονται οι τιμές της ωμικής αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης στο δευτερεύον τύλιγμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παντελής Β. Μαλατέστας, « Ηλεκτρικές Μηχανές », Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.
- [2] Χάρης Δημουλιάς, « Ηλεκτρικές Μηχανές, Σύγχρονες Μηχανές », Εκδόσεις Τζιόλα, 2013.
- [3] Βασίλης Σαμοΐλης, « Μετασχηματιστές », Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, 2007.
- [4] C. I. Hubert, « Ηλεκτρικές Μηχανές », Εκδόσεις Ίων, 2008.
- [5] Cathey J. J., « Electric Machines: Analysis and Design Applying Matlab», McGraw - Hill, 2001.
- [6] Stephen J. Chapman, « Electric Machinery Fundamentals », McGraw - Hill, 4th Edition.
- [7] Uday A. Bakshi, Mayuresh V. Bakshi, « Magnetic Circuits and Transformers », Technical Publications Pune, 2008.
- [8] Smarajit Ghosh, « Electrical Machines », Pearson Education, 2005.
- [9] D. C. Kulshreshtha, « Basic Electrical Engineering», McGraw - Hill, 2009.
- [10] S. K. Sahdev, « Electrical Machines », Cambridge University Press, 2017.
- [11] A. S. Mahajan, A. A. Rangwala, « Electricity and Magnetism », McGraw - Hill, 1988.
- [12] Σ. Καλογεροπούλου, « Μαγνητικές ιδιότητες – Μαγνητικά Υλικά », Διαλέξεις θεωρίας του μαθήματος Τεχνολογία Υλικών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ.
- [13] <https://hlektrologia.weebly.com/>
- [14] <https://www.electriceasy.com/>
- [15] <https://www.ti-soft.com>