



Τ.Ε.Ι. Πειραιά

Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε.

Πτυχιακή Εργασία

«Μετασχηματιστές Μεταφοράς»

Παρασκευόπουλος Γεώργιος

Τηνιακός Δημήτριος

Επιβλέπων: καθηγητής εφαρμογών **Πέτρος Καραϊσάς**

Αθήνα 2013

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε το 2013, από τους φοιτητές του τμήματος **Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε.** του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά,

Γεώργιο Παρασκευόπουλο με αριθμό μητρώου σχολής **33834** και **Δημήτριο Τηνιακό** με αριθμό μητρώου σχολής **35136**

Επιβλέπων καθηγητής

Καθηγητής εφαρμογών **Πέτρος Καραϊσάς**

Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία προέκυψε από συλλογική προσπάθεια, μελέτη, ανταλλαγή απόψεων και εμπειριών. Σκοπός της είναι η ανάλυση των μετασχηματιστών μεταφοράς. Στόχοι μας είναι να μελετήσουμε την αρχή λειτουργίας των μετασχηματιστών, να περιγράψουμε τις διατάξεις και τα εξαρτήματα που περιλαμβάνει ένας μετασχηματιστής και τέλος να ερευνήσουμε τις τεχνικές συντήρησης των μηχανών αυτών.

Ευχαριστίες

Από την θέση αυτή, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Πέτρο Καραϊσά καθηγητή Τ.Ε.Ι. Πειραιά, στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., ο οποίος μας εμπιστεύθηκε με την ανάθεση της παρούσας εργασίας και μας έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστούμε μαζί του στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλουμε σε όλους τους κοντινούς μας ανθρώπους και σε όσους μας συμπαραστάθηκαν στην εκπόνηση της πτυχιακής μας εργασίας.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλουμε στις οικογένειές μας, για την συμπαράστασή τους σε όλη την περίοδο των σπουδών μας στο Τ.Ε.Ι. Πειραιά.

Περιεχόμενα

Ιστορική αναδρομή	8
Κεφάλαιο 1 ^ο	10
Εισαγωγή	10
1.1 Γενικά	10
1.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	10
1.3 Μετασχηματιστής	12
Κεφάλαιο 2 ^ο	14
Αρχή λειτουργίας και απώλειες	14
2.1 Δομή μετασχηματιστών	14
2.2 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών ισχύος	15
2.3 Λειτουργία ιδανικού μετασχηματιστή	18
2.3.1 Βασικές εξισώσεις	18
2.3.2 Εξίσωση στοιχείου	21
2.3.3 Η συνολική ισχύς	22
2.3.4 Ιδανικός μετασχηματιστής	22
2.4 Λειτουργία πραγματικού μετασχηματιστή	23
2.4.1 Αντιστοίχιση απωλειών χαλκού	24
2.4.2 Αντιστοίχιση ροής σκέδασης	24
2.4.3 Αντιστοίχιση ρεύματος μαγνήτισης και απωλειών πυρήνα	25
2.4.4 Το ιδανικό ισοδύναμο κύκλωμα	26
2.5 Απώλειες μετασχηματιστή	26
2.5.1 Απώλειες κενού φορτίου	27
2.5.1.1 Απώλειες υστερήσεως	28
2.5.1.2 Απώλειες δινορευμάτων	29
2.5.2 Απώλειες φορτίου	30
2.5.3 Επιπρόσθετες απώλειες λόγω αρμονικών	36
2.6 Είδη μετασχηματιστών ισχύος	38
2.6.1 Μετασχηματιστές τύπου ελαίου	39
2.6.2 Μετασχηματιστές ξηρού τύπου	39
2.6.3 Μετασχηματιστές τύπου GIS	40

Κεφάλαιο 3 ^ο	41
Κατασκευαστικά στοιχεία	41
3.1 Τα εξαρτήματα	41
3.1.1 Περιγραφή των πιο σημαντικών στοιχείων	45
3.2 Η πινακίδα	51
3.2.1 Πινακίδα μετασχηματιστή της ΔΕΗ	52
3.3 Το σύστημα μόνωσης	54
3.3.1 Μονωτικό λάδι	55
3.3.2 Ηλεκτρομονωτικό χαρτί	56
Κεφάλαιο 4 ^ο	59
Συντήρηση	59
4.1 Οπτικός έλεγχος	60
4.2 Ανάλυση διαδικασιών συντήρησης	61
4.2.1 Έλεγχος του μονωτικού λαδιού	61
4.2.1.1 Δειγματοληψία μονωτικού λαδιού	61
4.2.1.2 Έλεγχος χρώματος του μονωτικού λαδιού	63
4.2.1.3 Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού	63
4.2.1.4 Έλεγχος επιφανειακής τάσης στο μονωτικό λάδι	64
4.2.1.5 Έλεγχος βαθμού εξουδετέρωσης του μονωτικού λαδιού	64
4.2.1.6 Έλεγχος συντελεστή ισχύος του μονωτικού λαδιού	64
4.2.1.7 Επιβραδυντές οξείδωσης του μονωτικού λαδιού	65
4.2.1.8 Έλεγχος φουρανίων του μονωτικού λαδιού	65
4.2.2 Έλεγχος συστήματος μόνωσης	66
4.2.2.1 Μέτρηση της αντίστασης της μόνωσης	66
4.2.2.2 Έλεγχος μονωτήρων διέλευσης	67
4.2.2.3 Συντελεστής απωλειών	68
4.2.2.3.1 Διηλεκτρικές απώλειες	68
4.2.2.3.2 Μέθοδος διαλυμένων αερίων	69
4.2.3 Έλεγχος εναλλάκτης θερμότητας	69
4.2.3.1 Θερμογραφικός έλεγχος	70
4.2.4 Όργανα μέτρησης ηλεκτρονόμοι	72
4.2.4.1 Θερμόμετρο ελαίου	72
4.2.4.2 Θερμόμετρο τυλιγμάτων	72
4.2.4.3 Ενδεικτικό στάθμης ελαίου	73

4.2.4.4 Βαλβίδες ανακούφισης.....	74
4.2.4.5 Ηλεκτρονόμος άμεσης εκτόνωσης.....	74
4.2.4.6 Ηλεκτρονόμος Bucholz.....	75
4.2.4.7 Πίνακας ελέγχου.....	75
4.2.4.8 Αφυγραντής.....	76
4.2.4.9 Μεταγωγέας λήψεων.....	77
4.2.4.10 Φλάντζες.....	78
4.2.4.11 Μετασχηματιστές οργάνων.....	81
4.2.4.12 Αλεξικέραυνα.....	81
Πίνακας περιεχομένων εικόνων και σχημάτων	83
Βιβλιογραφία	86

Ιστορική αναδρομή



André-Marie Ampère
(1775-1836)



Hans Christian Ørsted
(1777-1851)



James Clerk Maxwell
(1831-1879)



James Joule
(1818-1889)



William Gilbert
(1544-1603)

Στην αναδρομή που ακολουθεί παραθέτουμε κάποια στοιχεία που αφορούν την ηλεκτρική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα γίνονται εκτενείς αναφορές σχετικά με τον ηλεκτρομαγνητισμό, τους επιστήμονες που συνέβαλαν στην κατανόηση των φυσικών φαινομένων και την εξιδανίκευση των τεχνικών εκμετάλλευσης της ενέργειας προς όφελος της ανθρωπότητας. Ο 19^{ος} αιώνας είναι το σημείο αναφοράς της εξέλιξης της τεχνολογίας γύρω από τον ηλεκτρισμό και τους μετασχηματιστές.

Κατά την αρχαιότητα, το 600 π.χ. παρατηρήθηκε από τον Θαλή, η ιδιότητα που αποκτά το κεχριμπάρι να έλκει μικρά αντικείμενα όπως χνούδι, άχυρο κλπ., εάν το τρίψουμε σε μετάξι ή μαλλί. Αυτό αποδόθηκε στην υπόθεση ότι το κεχριμπάρι ήταν έμψυχο. Αυτή ήταν η πρώτη παρατήρηση που έγινε σε σχέση με τον ηλεκτρισμό, δεδομένου ότι ο όρος ηλεκτρισμός προέρχεται από την λέξη “ήλεκτρο” που σημαίνει κεχριμπάρι.

Γύρω στο 1600, στην Αγγλία, ο William Gilbert, ήταν ένας από τους πρώτους που διερεύνησε τα ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα. Έγραψε το βιβλίο “De Magnete” και πέραν των ανακαλύψεών του, ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο “ηλεκτρικός”.

Η πρώτη γεννήτρια στατικού ηλεκτρισμού κατασκευάστηκε το 1672 από τον γερμανό Otto Van Guericke. Η γεννήτρια αυτή ήταν μια σφαίρα από θειάφι η οποία είχε τις ίδιες ηλεκτρικές ιδιότητες με το κεχριμπάρι.

Ο Andre Mari Ampere περιέγραψε και ερμήνευσε τις παρατηρήσεις του δανού επιστήμονα Hans Christian Oersted, ο οποίος έκανε την πρώτη διαπίστωση για την συγγένεια των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων.

Πολύ σημαντική για την ιστορία του ηλεκτρισμού ήταν η συμβολή του Michael Faraday, ο οποίος θεωρείται ο μεγαλύτερος πειραματικός φυσικός όλων των εποχών. Προς τιμήν του καθιερώθηκε η “Σταθερά του Faraday”. Γεννήθηκε το 1791 στην Αγγλία και έζησε μέχρι το 1867. Ήταν ένας από τους θεμελιωτές των σύγχρονων αντιλήψεων για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το 1831 ανακάλυψε το φαινόμενο της “ηλεκτρο-μαγνητικής επαγωγής”. Επί της ουσίας διαπίστωσε ότι ο

μαγνητισμός μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό. Κατασκεύασε το πρώτο μετασχηματιστή, γνωστό ως “Δακτύλιο του Faraday”, δημιούργησε τον γνωστό “Κλωβό του Faraday”, επίσης απέδειξε την “Αρχή Διατήρησης του Φορτίου”. Ο ίδιος πειραματίστηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μηχανική μέσω μηχανών. Οι μηχανές αυτές αρχικά ονομάστηκαν “μαγνητοηλεκτρικές” και εξέλιξη τους είναι οι γνωστές σε μας γεννήτριες και τα δυναμό. Επίσης λίγο παλαιότερα είχε κατασκευάσει ένα πρώτο μοντέλο ηλεκτροκινητήρα.

Το 1841 ο James Prescott Joule διατύπωσε τον νόμο που σχετίζεται με την θερμότητα που απελευθερώνεται από έναν αγωγό όταν αυτός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Ο νόμος αυτός πήρε το όνομα του Joule. Επίσης παρατήρησε ότι είναι δυνατή και η αντίστροφη μετατροπή δηλαδή η θερμότητα να μας δώσει ηλεκτρισμό, στην παρατήρηση αυτή βασίζεται το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο.

Ο James Clerk Maxwell το 1867 έκανε μια σπουδαία τομή στην κατανόηση του ηλεκτρομαγνητισμού. Συνόψισε όλα τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα σε τέσσερις μαθηματικές εξισώσεις. Από αυτές προέκυπτε ότι η ταλάντωση ενός ηλεκτρικού φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ότι τα κύματα αυτά διαδίδονται στο χώρο με την ταχύτητα του φωτός. Εξ αυτού συμπεράνε ότι το φως είναι μια από τις πολλές μορφές των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Ο αμερικανός εφευρέτης Thomas Alva Edison έθεσε ηλεκτρισμό και μαγνητισμό σε πρακτικές εφαρμογές στην τηλεγραφία, την τηλεφωνία αλλά κυρίως στον φωτισμό και την μεταφορά ισχύος. Πολύ σημαντική ήταν η συμβολή του στην ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας διανομής ηλεκτρισμού σε εργοστάσια, γραφεία και σπίτια. Το 1882 οι δύο πρώτοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Edison στο Λονδίνο και τη Νέα Υόρκη έδωσαν για πρώτη φορά φως στους καταναλωτές.

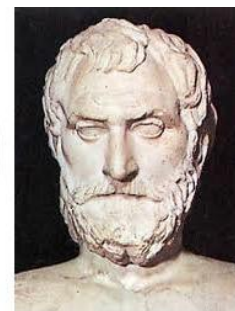
Ο σέρβος φυσικός Νικόλα Τεσλα ήταν αυτός που απέδειξε την αξία του εναλλασσόμενου ρεύματος. Σχεδίασε το μεγάλο σύστημα παραγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος στους καταρράκτες του Νιαγάρα το οποίο παρήγαγε τόση ισχύ, όση όλοι οι άλλοι σταθμοί συνεχούς ρεύματος στις Η.Π.Α. μαζί. Ο σταθμός αυτός ξεκίνησε να λειτουργεί το 1895. Ο Tesla κατασκεύασε επίσης μια άλλη μορφή ηλεκτροκινητήρα, που λειτουργούσε με εναλλασσόμενο ρεύμα πλέον και ονομάστηκε επαγωγικός κινητήρας.



Thomas Alva Edison
(1847-1931)



Michael Faraday
(1791-1867)



Κεφάλαιο 1°

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής εξαρτάται άμεσα από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συνεχώς αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις, τόσο στο αστικό, όσο και στο βιομηχανικό περιβάλλον, καθιστούν αναγκαία την ύπαρξη ενός αποτελεσματικού συστήματος παραγωγής ενέργειας, αλλά και ενός ισχυρού, αξιόπιστου και ασφαλούς συστήματος μεταφοράς και διανομής.

Όλη η διαδικασία ξεκινά από τους Σταθμούς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ηλεκτρική ενέργεια μπορούμε να πάρουμε πρακτικά από κάθε άλλη μορφή ενέργειας. Παρ' όλα αυτά όμως έχει δοθεί ιδιαίτερο βάρος στους οικονομικότερους τρόπους παραγωγής ηλεκτρισμού. Έτσι, σήμερα έχουμε οργανωμένους θερμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς και πυρηνικούς σταθμούς, ενώ γίνεται μια προσπάθεια για ανάπτυξη αιολικών, ηλιακών αλλά και άλλων σταθμών για εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

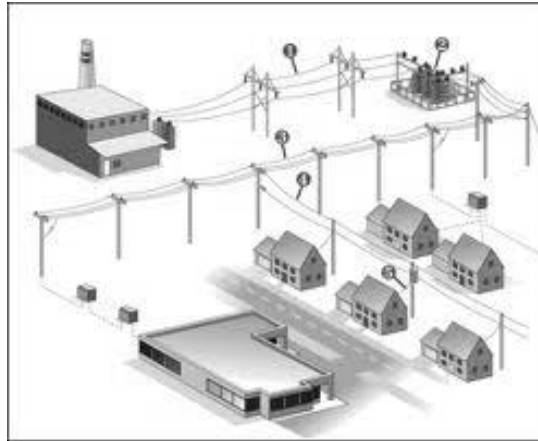
Όλοι οι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί μετατρέπουν κάποιο είδος ενέργειας (θερμική, πυρηνική, δυναμική κλπ) σε κινητική ενέργεια κάποιας τουρμπίνας (ή αλλιώς στροβίλου), η οποία θέτει σε κίνηση μια γεννήτρια για να μας δώσει τελικά ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό που διαφέρει λοιπόν στους διάφορους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς, είναι το "καύσιμο" που χρησιμοποιούν.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό να περιγράψει την δομή, τον τρόπο λειτουργίας και συντήρησης των Ηλεκτρικών Μετασχηματιστών Μεταφοράς Μέσης Τάσης.

1.2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Μια τυπική γεννήτρια ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού, δίνει εναλλασσόμενη τάση της τάξης των 25.000 V. Έξω από τους ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς, υπάρχουν μετασχηματιστές, οι οποίοι ανυψώνουν την τάση στα εκατοντάδες χιλιάδες Volts, μια και κατά την μεταφορά υψηλής τάσης επιτυγχάνετε μείωση των απωλειών ενέργειας. Το ρεύμα φτάνει στους υποσταθμούς, οι οποίοι και πάλι με τη βοήθεια μετασχηματιστών υποβιβάζουν την τάση, πριν τη διοχετεύσουν στις εγκαταστάσεις των καταναλωτών.

Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται η πορεία της ηλεκτρικής ενέργειας από τον σταθμό παραγωγής στον υποσταθμό ανύψωσης και στην συνέχεια στους αστικούς και βιομηχανικούς καταναλωτές.



Κατά κανόνα, καταναλωτές με ζητούμενη ισχύ μέχρι και 135kVA, η εταιρία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας τους συνδέει με το δίκτυο χαμηλής τάσης δηλαδή 400V. Όταν η ζήτηση των καταναλωτών ξεπερνά το όριο των 135kVA επιβάλλεται η σύνδεσή τους στο δίκτυο μέσης τάσης δηλαδή πολική τάση 20kV.

Για την μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 1000m είναι απαραίτητα τα δίκτυα μέσης τάσης, για τον λόγο αυτό τα δίκτυα μέσης τάσεις τα συναντούμε σε όλες τις αστικές και επαρχιακές περιοχές. Για την μεταφορά σε μεγαλύτερες αποστάσεις όπως για παράδειγμα από την Πτολεμαΐδα στην Αθήνα χρησιμοποιούνται τάσεις μεγέθους 150kV και 400kV, δηλαδή δίκτυα υψηλής και υπέρ-υψηλής τάσης αντίστοιχα.

Για τα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει η εξής τυποποίηση που απεικονίζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Περιγραφή Τάσεων	Πολική Τάση σε kV
Υπέρ-Υψηλή Τάση	400
Υψηλή Τάση	150
Μέση Τάση	20
Χαμηλή Τάση	0.4

Για την παροχή της μέσης τάσης από την εταιρία ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν δυο τύποι:

- Ο πρώτος είναι η εξωτερική παροχή μέσω του εναέριου δικτύου μέσης τάσης στο οποίο συνδέεται ο υποσταθμός του καταναλωτή. Υπάρχουν δύο διατάξεις, η μία χρησιμοποιεί ασφαλειοαποζεύκτη με ασφάλειες βραδείας τήξης έως 30A και η δεύτερη χρησιμοποιεί διακόπτη απομόνωσης.
- Ο δεύτερος είναι η στεγανή παροχή για καταναλωτές με αυξημένη ζήτηση ισχύος, όπου ο καταναλωτής παρέχει ένα χώρο στον πάροχο της ηλεκτρικής ενέργειας για να εγκαταστήσει την διάταξή του ώστε να συνδεθεί με τον υποσταθμό του καταναλωτή.

1.3 Μετασχηματιστής



Ο μετασχηματιστής είναι μια σταθερή ηλεκτρική μηχανή με την οποία μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η σχεδίαση και κατασκευή του είναι αρκετά σύνθετη. Αυτό οφείλεται σε δύο παράγοντες, στους οποίους πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του, στη μόνωση και στην ψύξη των τυλιγμάτων. Η απαγωγή της θερμότητας των απωλειών επιβάλλει καλή κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου και κατάλληλες θέσεις και διατάξεις τυλιγμάτων. Επίσης, βασικοί παράμετροι, στους οποίους πρέπει να δοθεί προσοχή κατά τη σχεδίαση των μετασχηματιστών, είναι η μαγνητική επαγωγή, η πυκνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα και η ισορροπία σιδήρου και χαλκού.

Ένας μετασχηματιστής διαθέτει δύο πηνία, δηλαδή συμμάτινες περιελίξεις τυλιγμένες γύρω από σιδερένιους πυρήνες. Όταν ένα εναλλασσόμενο ρεύμα ορισμένης τάσης, περνάει από το πρώτο πηνίο (πρωτεύον), δημιουργεί ένα επίσης εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο μέσα στον σιδερένιο πυρήνα. Καθώς το μαγνητικό πεδίο αλλάζει διαρκώς κατεύθυνση, δημιουργείται ένα εναλλασσόμενο επαγωγικό ρεύμα στο δεύτερο πηνίο (δευτερεύον). Αυτό το ρεύμα του δευτερεύοντος πηνίου έχει μια άλλη τάση διαφορετική από αυτήν του πρωτεύοντος, η οποία μάλιστα εξαρτάται από τον αριθμό των σπειρών

των δύο πηνίων. Πιο συγκεκριμένα, αν το δευτερεύον πηνίο έχει περισσότερες σπείρες από το πρωτεύον η τάση που θα δημιουργηθεί θα είναι μεγαλύτερη από την τάση του πρωτεύοντος, ενώ στην αντίθετη περίπτωση μικρότερη. Κατά την αύξηση αυτήν της τάσης, μειώνεται η ένταση του ρεύματος έτσι ώστε η ενέργεια να παραμένει σταθερή. Επειδή όλες οι οικιακές συσκευές αλλά και οι βιομηχανικές διατάξεις χρησιμοποιούν ηλεκτρικό ρεύμα τάσης πολύ χαμηλότερης από αυτή που δίνουν οι ηλεκτροπαραγωγοί σταθμοί, οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται ευρύτατα.

Κεφάλαιο 2°

Αρχή λειτουργίας και απώλειες

Στο κεφάλαιο αυτό θα μιλήσουμε για την δομή, την λειτουργία των μετασχηματιστών, τα μαγνητικά τους κυκλώματα, θα αναφερθούμε στα είδη μετασχηματιστών, τρόπους κατασκευής τους και τις απώλειές τους.

2.1 Δομή μετασχηματιστών

Όπως έχουμε προαναφέρει, ο μετασχηματιστής είναι μία ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια διαφορετικού επιπέδου τάσης χρησιμοποιώντας σαν μέσο το μαγνητικό πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η συσκευή αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά συνήθως δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η μόνη σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των σπειρών είναι το κοινό μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του πυρήνα.

Το ένα από τα δύο πηνία του μετασχηματιστή συνδέεται με μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το δεύτερο (ή το τρίτο, εάν υπάρχει) συνδέεται με το φορτίο. Το πρώτο τύλιγμα ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα ή τύλιγμα εισόδου του μετασχηματιστή και το δεύτερο ονομάζεται δευτερεύον ή τύλιγμα εξόδου. Εάν υπάρχει και τρίτο τύλιγμα, αυτό ονομάζεται τριτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή.

Ο σπουδαιότερος σκοπός των μετασχηματιστών είναι η προσαρμογή της ηλεκτρικής ενέργειας στην εκάστοτε τάση. Οι μετασχηματιστές μπορεί να είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί. Οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία ανήκουν στην εταιρία που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια και τα διαχειρίζεται. Όπως είπαμε και προηγουμένως, η εταιρία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιεί μετασχηματιστές για να αυξήσει την τάση του παραγόμενου ρεύματος το οποίο μεταφέρεται με γραμμές υψηλής τάσης, έτσι ώστε να περιορίζονται οι απώλειες. Προκειμένου όμως να παραχθεί η χαμηλή τάση των 230V, εγκαθίστανται άλλοι μετασχηματιστές που μετατρέπουν την υψηλή τάση σε μέση τάση και τελικά σε χαμηλή. Η τελευταία υποβίβαση είναι συνήθως από 20 kV σε 230/400 V που χρησιμοποιούνται στην κατανάλωση.

Η μεταφορά της ενέργειας στο σύστημα συνεχούς ρεύματος έχει αφεθεί, εξ αιτίας της ανεπάρκειας των μηχανών και της αδυναμίας μετασχηματισμού. Ο μετασχηματιστής έχει την ικανότητα να υψώνει την τάση της γεννήτριας σε μία επιθυμητή τιμή και έτσι παρέχει την ικανότητα εύκολης μεταφοράς μεγάλης ισχύος (π.χ. 1500MVA) μίας σύγχρονης γεννήτριας. Οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται και σε άλλες εφαρμογές, όπως στην αποβολή υψηλών συχνοτήτων και απομόνωση κυκλωμάτων, σε συστήματα ελέγχου, σε

τροφοδοτικά, σε τηλεπικοινωνιακά κυκλώματα, σε μετατροπείς από 230V σε 110V και αντίστροφα, κλπ. Ανάλογα με τη χρήση τους, διακρίνονται σε μετασχηματιστές απομόνωσης (isolation transformers), αυτομετασχηματιστές (autotransformers) και μετασχηματιστές ρεύματος ή ισχύος (power transformers). Στον ενεργειακό κλάδο ο μετασχηματιστής χρησιμοποιείται επίσης για τη σύνδεση δύο δικτύων.

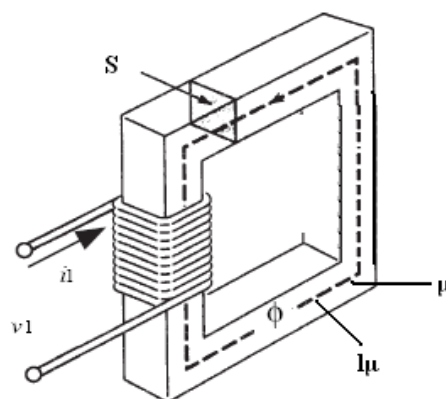
Τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος κατασκευής ενός μετασχηματιστή έχουν να κάνουν και με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Οι πλέον συνήθεις μετασχηματιστές, για την χρήση τους, είναι οι εξής:

- Μετασχηματιστές ισχύος, για την μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας
- Μετασχηματιστές τροφοδοσίας διατάξεων στατικών μετατροπών
- Μετασχηματιστές μετρήσεων, για την σύνδεση μετρητικών διατάξεων σε δίκτυα
- Μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιών κλπ

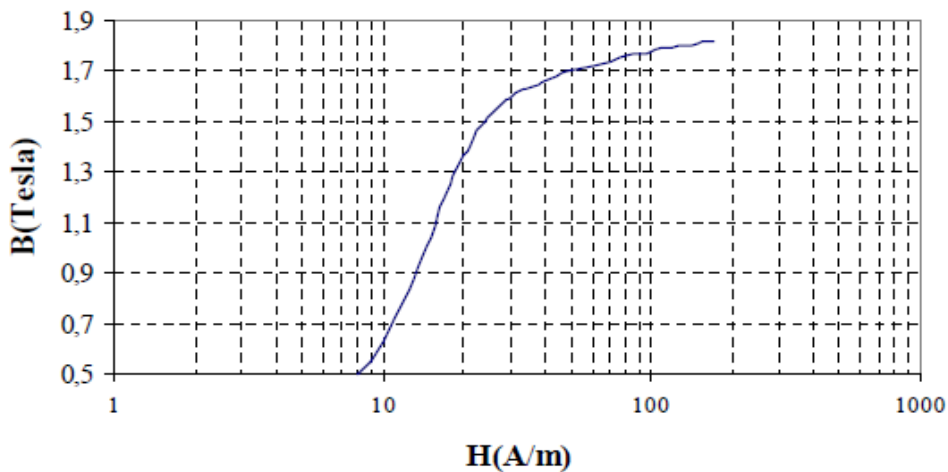
Η πρόοδος στα ολοκληρωμένα κυκλώματα επιτρέπει την αντικατάσταση των μετασχηματιστών και των επαγωγών από κυκλώματα αντιστάσεων, πυκνωτών και τελεστικών ενισχυτών που παράγονται ευκολότερα και πιο οικονομικά. Ωστόσο οι μετασχηματιστές είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία στην διανομή και την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου και θα εστιάσουμε στην εργασία αυτή.

2.2 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών ισχύος

Στο ακόλουθο σχήμα, βλέπουμε ένα απλό μαγνητικό κύκλωμα το οποίο αποτελείται από τον πυρήνα και το πηνίο. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό και χαρακτηρίζεται από τη διατομή S , το μέσο μήκος l_{μ} και τη μαγνητική διαπερατότητα μ . Η συμπεριφορά της διαπερατότητας του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα φαίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης του, η οποία είναι μη γραμμική $B = F(H)$ του σχήματος 2.2.



Εικόνα 2.1 Απλό μαγνητικό κύκλωμα



Εικόνα 2.2 Καμπύλη μαγνήτισης

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη μαγνητικού πεδίου

Μέγεθος	Σύμβολο	Μονάδες
Ένταση μαγνητικού πεδίου	H	(Aτ/m)
Μαγνητική επαγωγή	B	(T)
Μαγνητική ροή	Φ	(Wb)
Μαγνητική διαπερατότητα υλικού	μ	(H/m)
Σχετική μαγνητική διαπερατότητα	μr	Αδιάστατο μέγεθος
Μαγνητική διαπερατότητα του κενού	μo	(H/m)

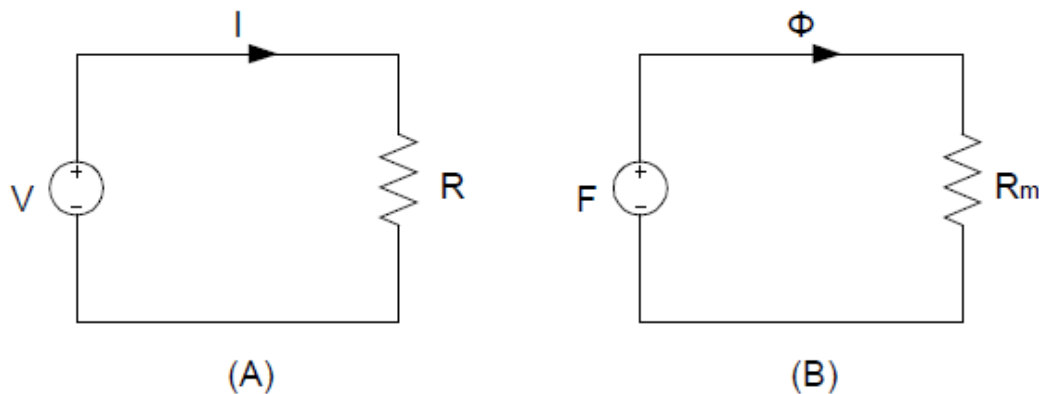
Πίνακας 2.1

Στην αρχή μια μικρή αύξηση της έντασης του πεδίου H προκαλεί μεγάλη αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B. Η περιοχή αυτή ονομάζεται ακόρεστη. Μετά από ένα συγκεκριμένο σημείο η επιπλέον αύξηση του πεδίου H προκαλεί σχετικά μικρότερη αύξηση μαγνητικής επαγωγής B. Αυτή η περιοχή είναι η περιοχή μετάβασης από την ακόρεστη στην κορεσμένη περιοχή και ονομάζεται γόνατο κορεσμού. Κορεσμένη περιοχή είναι η περιοχή όπου η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια.

Η χρήση σιδηρομαγνητικών υλικών στους μετασχηματιστές παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι για συγκεκριμένη ένταση πεδίου H στο εσωτερικό τους παράγεται πολλαπλάσια μαγνητική ροή από αυτή που θα παράγονταν στον αέρα.

Το πηνίο είναι τυλιγμένο γύρω από τον πυρήνα και αποτελείται από N σπείρες μονωμένες ηλεκτρικά μεταξύ τους και ως προς τον πυρήνα. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μαγνητικού κυκλώματος του σχ. 2.1 φαίνεται στο σχ. 2.3 και χρησιμοποιείται για την απλοποίηση της πολύπλοκης ανάλυσης και σχεδίασης μαγνητικών κυκλωμάτων. Εδώ η αντίστοιχη

ποσότητα της τάξης είναι η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) : $F=NI$ σε At. Η ΜΕΔ προκαλεί ροή Φ , η οποία είναι η αντίστοιχη ποσότητα του ρεύματος I των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος συμβολίζεται με R_m σε AT / wb όπου $R_m = l/\mu \cdot S$ και αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του ηλεκτρικού κυκλώματος. Όπως στον ηλεκτρισμό ισχύει ο νόμος του Ohm $U=IR$, ενώ στο μαγνητισμό ισχύει ο τύπος του Hopkinson, $F=\Phi R_m$.



Εικόνα 2.3

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μαγνητικού κυκλώματος.

(A) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

(B) Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του σχήματος (A)

Ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής Φ ενός μαγνητικού κυκλώματος με τη βοήθεια ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι προσεγγιστικός, διότι :

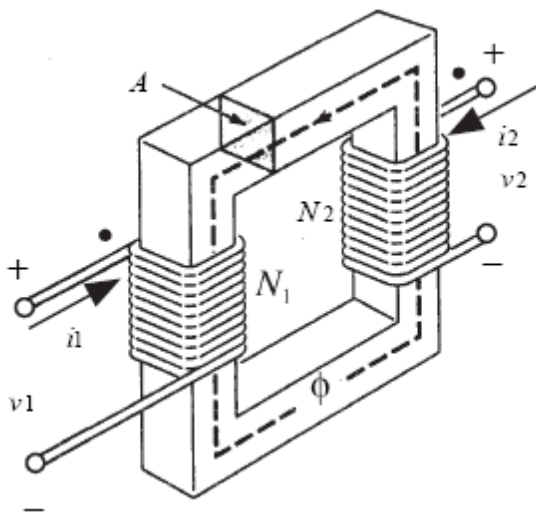
1. έγινε η παραδοχή ότι η ροή είναι συγκεντρωμένη μέσα στον πυρήνα, ωστόσο ένα μικρό κλάσμα της ροής που δε λήφθηκε υπόψη ξεφεύγει από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Η ροή αυτή ονομάζεται ροή σκεδάσεως.
2. κατά τον υπολογισμό της μαγνητικής αντίστασης θεωρούνται σταθερά το μέσο μήκος και η διατομή του πυρήνα. Αυτές οι προσεγγίσεις δεν είναι απολύτως σωστές κυρίως στις γωνίες του πυρήνα.
3. η μαγνητική διαπερατότητα εξαρτάται από την τιμή της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται στο υλικό άρα κι από τη ροή.

Ως εκ τούτου συμπεραίνουμε ότι δεν είναι σταθερή όπως θεωρήθηκε.

2.3 Λειτουργία ιδανικού μετασχηματιστή

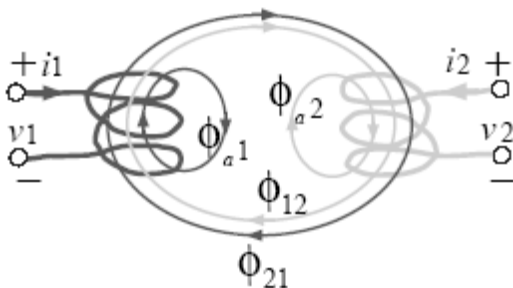
2.3.1 Βασικές εξισώσεις

Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία πολλών σπειρών με κοινό πυρήνα. Έχει δύο θύρες από τις οποίες λαμβάνει ή αποδίδει ενέργεια και τέσσερις ακροδέκτες. Για τον λόγο αυτό το αποκαλούμε διθύριο σύστημα.



Εικόνα 2.4 Μετασχηματιστής με θετικό συντελεστή αλληλεπαγωγής

Στην παραπάνω εικόνα 2.4 απεικονίζεται ένας μετασχηματιστής με θετικό συντελεστή αυτεπαγωγής του οποίου τα πηνία φαίνονται στην επόμενη εικόνα 2.5, παραλείποντας την αντίσταση που αντιστοιχεί στο μήκος του σύρματος, θεωρούμε δηλαδή τα πηνία ιδανικά.



Εικόνα 2.5 Πηνία σε μαγνητική σύζευξη

Το πηνίο 1 αριστερά στην εικόνα 2.4 διαρρέεται από ρεύμα i_1 και το πηνίο 2 δεξιά στην εικόνα 2.5 διαρρέεται από ρεύμα i_2 . Το πηνίο 1 προκαλεί μαγνητική ροή Φ_{21} που εμπλέκει το πηνίο 2 και μαγνητική ροή Φ_{12} που εμπλέκει το

πηνίο 1. Κατά τον ίδιο τρόπο, το πηνίο 2 προκαλεί μαγνητική ροή Φ_{12} που εμπλέκει το πηνίο 1 και μαγνητική ροή Φ_{22} που εμπλέκει το πηνίο 2.

Επομένως η συνολική πεπλεγμένη ροή που διέρχεται από το πηνίο 1 αποδίδεται από τη σχέση:

$$\lambda_1 = N_1(\varphi_{11} + \varphi_{21} + \varphi_{12}) = N_1(\varphi_{11} + \varphi_{12})$$

και η συνολική πεπλεγμένη ροή που διέρχεται από το πηνίο 2 αποδίδεται από τη σχέση:

$$\lambda_2 = N_2(\varphi_{22} + \varphi_{12} + \varphi_{21}) = N_2(\varphi_{22} + \varphi_{21})$$

Η φ_{11} είναι η συνολική ροή που οφείλεται στο i_1 και η φ_{22} είναι η συνολική ροή που οφείλεται στο i_2 .

Τις σχέσεις αυτές μπορούμε να τις γράψουμε σαν συνάρτηση των ρευμάτων που προκαλούν οι αντίστοιχες ροές:

$$\lambda_1 = N_1(N_1P_{11}i_1 + N_2P_{12}i_2) = N_1^2P_{11}i_1 + N_1N_2P_{12}i_2$$

$$\lambda_2 = N_2(N_2P_{22}i_2 + N_1P_{21}i_1) = N_1N_2P_{21}i_1 + N_2^2P_{22}i_2$$

οι παράμετροι P_{ij} είναι σταθερές που εξαρτώνται από την γεωμετρία και τη μορφή του μαγνητικού πεδίου.

Εφαρμόζοντας στην συνέχεια τον νόμο του Faraday ($v = \frac{d\lambda}{dt}$) έχουμε:

$$v_1 = N_1^2P_{11} \frac{di_1}{dt} + N_1N_2P_{12} \frac{di_2}{dt} = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt}$$

$$v_2 = N_1N_2P_{21} \frac{di_1}{dt} + N_2^2P_{22} \frac{di_2}{dt} = L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt}$$

όπου:

$$L_{11} = N_1^2P_{11} \quad L_{12} = N_1N_2P_{12}$$

$$L_{22} = N_2^2P_{22} \quad L_{21} = N_1N_2P_{21}$$

Οι συντελεστές αυτών των εξισώσεων έχουν μονάδες αυτεπαγωγής και μετράνε σε H. ο συντελεστής L_{11} είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πρώτου πηνίου και ο L_{22} είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του δεύτερου πηνίου. Οι άλλοι δύο συντελεστές οφείλονται στην σύζευξη των δύο πηνίων. Εάν το μέσο από το οποίο διέρχεται η ροή είναι γραμμικό, τότε ισχύει ότι: $L_{21} = L_{12} = M$

Η σταθερά M λέγεται συντελεστής αυτεπαγωγής των πηνίων. Για ευκολία θέτουμε $L_{11} = L_1$ και $L_{22} = L_2$.

Με αυτές τις παρατηρήσεις, θα έχουμε για τις τάσεις v_1 και v_2 συναρτήσεις του χρόνου t :

$$v_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$v_2(t) = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Οι εξισώσεις αυτές, τάσης-ρεύματος αποτελούν τις εξισώσεις στοιχείου του γραμμικού μετασχηματιστή.

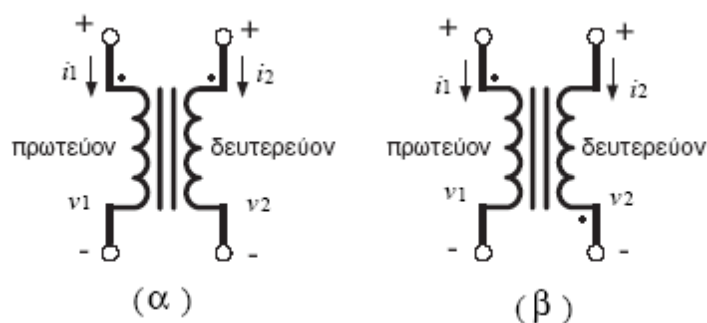
Στην παραπάνω ανάλυση δείξαμε ότι η ροή ϕ_{12} προστίθεται με την ροή ϕ_{11} . Αυτό υπό την προϋπόθεση ότι το πηνίο 2 δεν έχει περιελιχθεί με αντίστροφη φορά από αυτήν του πηνίου 1, σε αντίθετη περίπτωση η ροή ϕ_{12} θα πρέπει να αφαιρεθεί από την ροή ϕ_{11} . Για τον λόγο αυτό, στις παραπάνω εξισώσεις ο όρος που περιέχει τον συντελεστή αλληλεπαγωγής δύο πηνίων μπορεί να έχει θετικό ή και αρνητικό πρόσημο. Στο παράδειγμα που έχουμε αναπτύξει, οι εξισώσεις είναι ορθές διότι στο σχήμα τις εικόνες 2.5 η ροή ϕ_{21} και η ροή ϕ_{12} έχουν την ίδια φορά συνεπώς προστίθενται. Η φορά ορίζεται από τον νόμο του δεξιόστροφου κοχλία και τη γεωμετρία κατασκευής του μετασχηματιστή.

Επειδή όταν επιλύονται κυκλώματα δεν είναι δυνατό να σχεδιάζεται προσεκτικά τη γεωμετρία περιέλιξης, χρησιμοποιείται η σύμβαση των στιγμών. Κατά τη σύμβαση αυτή, τοποθετείται αυθαίρετα μία στιγμή στον ένα ακροδέκτη του ενός πηνίου και άλλη στιγμή στον ακροδέκτη του άλλου πηνίου, έτσι ώστε αν και από τους δύο ακροδέκτες με στιγμή εισέλθουν θετικά ρεύματα, οι μαγνητικές ροές να προστίθενται. Αυτό συμβαίνει και στο μετασχηματιστή του σχ. 2.4.

Εάν οι στιγμές έχουν τεθεί, τότε η σύμβαση χρησιμοποιείται ως εξής:

Σε κάθε πηνίο, εκλέγεται η φορά αναφοράς του ρεύματος έτσι ώστε τα ρεύματα να εισέρχονται από το θετικό ακροδέκτη. Εάν τα ρεύματα και των δύο πηνίων εισέρχονται ή εξέρχονται από τους ακροδέκτες με τη στιγμή, ο M λαμβάνεται με θετικό πρόσημο. Σε αντίθετη περίπτωση, λαμβάνεται με αρνητικό.

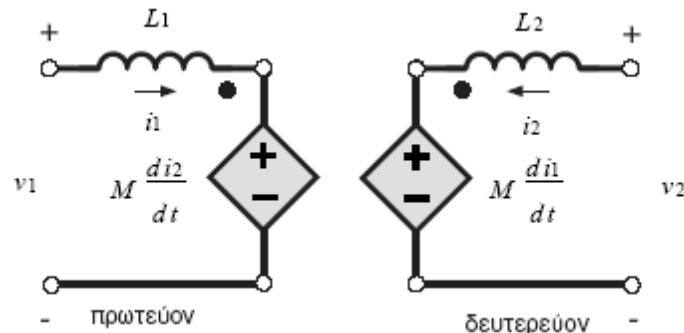
Το σχ. 2.6 περιλαμβάνει δύο κυκλωματικά σύμβολα μετασχηματιστών που διαφέρουν μόνο κατά τη θέση των στιγμών. Όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα, το ένα από τα πηνία ονομάζεται πρωτεύον και το άλλο δευτερεύον. Συνήθως, πρωτεύον είναι το πηνίο που είναι συνδεδεμένο με μια πηγή ενέργειας, ενώ δευτερεύον είναι το πηνίο που συνδέεται με το φορτίο (καταβόθρα ενέργειας).



Εικόνα 2.6 Μετασχηματιστές σε κύκλωμα

2.3.2 Εξίσωση στοιχείου

Τέλος, οι εξισώσεις στοιχείου ενός μετασχηματιστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατασκευαστεί ένα μοντέλο με τη βοήθεια εξαρτημένων πηγών τάσης, όπως φαίνεται στο σχ. 2.7. Πράγματι, στις εξισώσεις αυτές, οι όροι που περιέχουν τους συντελεστές αυτεπαγωγής L_1 και L_2 αντιστοιχούν σε δύο επαγωγείς. Οι όροι που περιέχουν την αλληλεπαγωγή αντιστοιχούν σε τάση ανάλογη της παραγώγου του ρεύματος του άλλου πηνίου και επομένως αντιστοιχούν σε εξαρτημένες πηγές.



Εικόνα 2.7 Μετασχηματιστές με εξαρτημένη πηγή

Ο ιδανικός μετασχηματιστής είναι ένα απλό μοντέλο μετασχηματιστή, όπου ο συντελεστής ζεύξης k ισούται με τη μονάδα και οι παράμετροι P_{ij} έχουν πολύ μεγάλες τιμές. Στην πράξη, υπάρχουν μετασχηματιστές που προσεγγίζουν το μοντέλο αυτό.

Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{N_2^2}{N_1^2} = n^2 \quad \text{με} \quad n = \frac{N_2}{N_1}$$

Όπου n ο λόγος σπειρών του ιδανικού μετασχηματιστή.

Με $k=1$, οι εξισώσεις στοιχείου του μετασχηματιστή δίνουν

$$v_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + nL_1 \frac{di_2}{dt}$$

$$v_2(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + n^2 L_1 \frac{di_2}{dt}$$

$$\text{Δηλαδή} \quad \frac{v_1(t)}{N_1} = \frac{v_2(t)}{N_2}$$

$$\text{ή ισοδυναμία (α)} \quad v_2(t) = nv_1(t)$$

Επίσης, στο όριο όπου ο L_1 απειρίζεται (διότι το P_{11} είναι πολύ μεγάλο), έχουμε

$$\frac{di_1}{dt} + n \frac{di_2}{dt} = 0$$

Ολοκληρώνοντας αυτή την εξίσωση από $-\infty$ έως t , παίρνουμε

$$i_2(t) = -\frac{1}{n}i_1(t)$$

$$\text{ή ισοδυναμία } (\beta) \frac{i_1(t)}{N_2} = \frac{i_2(t)}{N_1}$$

Αυτή η εξίσωση (β) μαζί με την εξίσωση (α) μπορούν να γραφούν σε μορφή πινάκων ως εξής

$$\begin{bmatrix} v_2(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & 0 \\ 0 & -\frac{1}{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ i_1(t) \end{bmatrix}$$

Και αποτελούν μια απλή αλγεβρική σχέση μεταξύ των μεταβλητών των δύο θυρών 1 και 2.

Αυτή η σχέση είναι η εξίσωση στοιχείου του ιδανικού μετασχηματιστή.

2.3.3 Η συνολική ισχύς

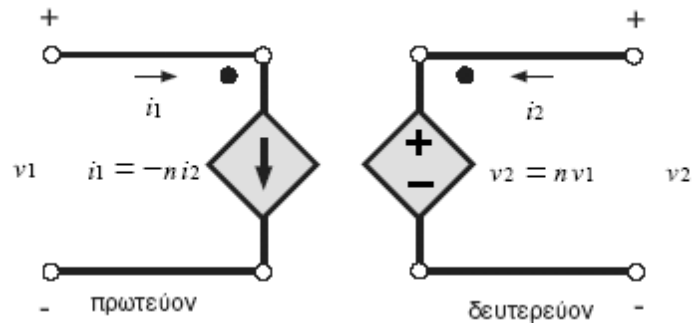
Για τη συνολική ισχύ που προσδίδεται ή αποδίδεται από έναν ιδανικό μετασχηματιστή βρίσκουμε ότι

$$p(t) = v_1(t)i_1(t) + v_2(t)i_2(t) \equiv 0$$

Επομένως, όση ισχύς εισέρχεται από τη μία θύρα του ιδανικού μετασχηματιστή, πρέπει απαραίτητα να εξέλθει από την άλλη. Η συνέπεια αυτής της σημαντικής παρατήρησης είναι ότι ο ιδανικός μετασχηματιστής έχει μηδενικές απώλειες ηλεκτρικής ισχύος. Επίσης, εάν η τελευταία εξίσωση ολοκληρωθεί, θα δώσει ενέργεια μηδέν, δηλαδή ο ιδανικός μετασχηματιστής δε μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια και είναι ένα στατικό στοιχείο μετασχηματισμού τάσεων και ρευμάτων.

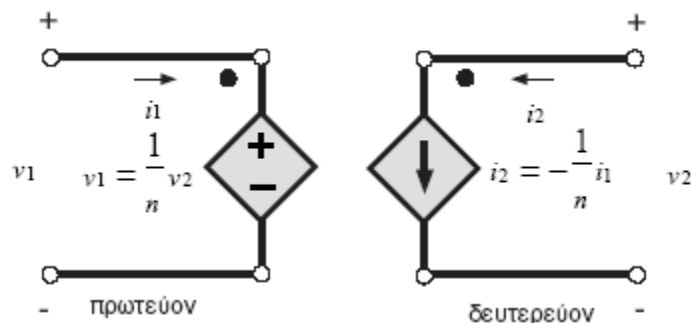
2.3.4 Ιδανικός μετασχηματιστής

Μετά από τις παρατηρήσεις αυτές, κατασκευάζουμε το κυκλωματικό μοντέλο του ιδανικού μετασχηματιστή. Λόγω της παραπάνω μητρικής εξίσωσης, εάν το ρεύμα μίας θύρας καθορίζεται από το κύκλωμα, τότε το ρεύμα της άλλης θύρας θα παράγεται από εξαρτημένη πηγή. Το ίδιο ισχύει και για τις τάσεις. Εάν μία τάση του μετασχηματιστή καθορίζεται από το κύκλωμα, η άλλη θα παράγεται από εξαρτημένη πηγή.



Εικόνα 2.8 Ιδανικός μετασχηματιστής με εξαρτημένη πηγή

Έτσι, εάν θεωρήσουμε ότι το ρεύμα i_2 καθορίζεται από το κύκλωμα, το ρεύμα i_1 θα αντιστοιχεί σε εξαρτημένη πηγή ρεύματος. Για το λόγο αυτό, στο σχ. 2.8 χρησιμοποιούμε μία εξαρτημένη πηγή ρεύματος στον κλάδο 1. Για την πηγή αυτή, η τάση δε μπορεί να είναι εξαρτημένη, αλλά θα πρέπει να καθορίζεται από το κύκλωμα. Άρα η τάση v_1 πρέπει να καθορίζεται από το κύκλωμα, και τότε η τάση v_2 θα παράγεται από εξαρτημένη πηγή τάσης. Χρειαζόμαστε λοιπόν και μία εξαρτημένη πηγή τάσης στον κλάδο 2, όπως φαίνεται στο σχ. 2.9.



Εικόνα 2.9 Ιδανικός μετασχηματιστής με εξαρτημένη πηγή

Εάν όμως θεωρήσουμε ότι το ρεύμα i_1 καθορίζεται από το κύκλωμα, ο παραπάνω συλλογισμός μας δίνει το μοντέλο του σχ. 2.8(β). Άλλο μοντέλο δεν είναι δυνατό να προκύψει. Η επιλογή του μοντέλου θα εξαρτηθεί από το κύκλωμα στο οποίο συνδέεται ο μετασχηματιστής.

2.4 Λειτουργία πραγματικού μετασχηματιστή

Πραγματικός μετασχηματιστής είναι ο μη ιδανικός μετασχηματιστής, δηλαδή ένας μετασχηματιστής χωρίς τέλεια σύζευξη. Η ακρίβεια κάθε μοντέλου πραγματικού μετασχηματιστή εξαρτάται από το αν στην ανάπτυξη του λαμβάνονται υπ όψιν όλα σχεδόν τα είδη των απωλειών κατά τη λειτουργία του. Οι πιο βασικές από αυτές είναι οι ακόλουθες.

1. Απώλειες χαλκού (I^2R). Πρόκειται για τις θερμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος στα τυλίγματά του.
2. Απώλειες δινορευμάτων. Είναι οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετασχηματιστή.
3. Απώλειες υστέρησης. Έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα η οποία συμβαίνει σε κάθε ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Η μεταβολή τους με το χρόνο είναι μια πολύπλοκη μη γραμμική συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στον μετασχηματιστή.
4. Ροή σκέδασης. Πρόκειται για τις μαγνητικές ροές οι οποίες ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει και εμφανίζονται μόνο στο ένα από τα δύο τυλίγματα. Οι ροές αυτές παράγουν τις αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του πυρήνα οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπ όψιν στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.

Από τα παραπάνω προκύπτουν οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή ως ακολούθως.

2.4.1 Αντιστοίχιση απωλειών χαλκού

Οι απώλειες χαλκού σαν θερμικές απώλειες, ενσωματώνονται απλά στο ισοδύναμο κύκλωμα με την προσθήκη δύο ωμικών αντιστάσεων. Την R_p στο πρωτεύον και την R_s στο δευτερεύον τύλιγμα.

2.4.2 Αντιστοίχιση ροής σκέδασης

Η ροή σκέδασης του πρωτεύοντος Φ_{LP} παράγει την τάση e_{LP} που δίδεται από τη σχέση

$$e_{LP}(t) = N_p \frac{d\Phi_{LP}}{dt}$$

Η ροή σκέδασης του δευτερεύοντος Φ_{LS} παράγει την τάση e_{LS} που δίδεται από τη σχέση

$$e_{LS}(t) = N_s \frac{d\Phi_{LS}}{dt}$$

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει επειδή οι διαδρομές των ροών σκέδασης βρίσκονται στον αέρα του οποίου η αντίσταση είναι σταθερή και πολύ μεγαλύτερη της μαγνητικής αντίστασης του πυρήνα, η ροή Φ_{LP} είναι ανάλογη

του ρεύματος του πρωτεύοντος i_p , ενώ η φ_{LS} είναι ανάλογη του ρεύματος του δευτερεύοντος i_s σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\varphi_{LP} = (PN_p)i_p \text{ και } \varphi_{LS} = (PN_s)i_s$$

Όπου:

P , η μαγνητική αγωγιμότητα της διαδρομής της μαγνητικής ροής

N_p , ο αριθμός σπειρών του πρωτεύοντος τυλίγματος

N_s , ο αριθμός σπειρών του δευτερεύοντος τυλίγματος

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει

$$e_{LP} = N_p \frac{d}{dt} (PN_p)i_p = N_p^2 \frac{di_p}{dt}$$

και

$$e_{LS} = N_s \frac{d}{dt} (PN_s)i_s = N_s^2 \frac{di_s}{dt}$$

Επομένως έχουμε

$$e_{LP} = L_p \frac{di_p}{dt}$$

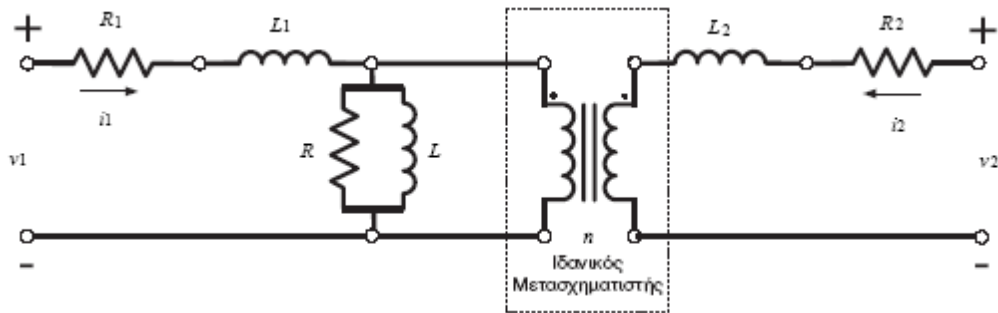
και

$$e_{LS} = L_s \frac{di_s}{dt}$$

Όπου $L_p = N_p^2 P$ η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος τυλίγματος και $L_s = N_s^2 P$ η αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή. Δηλαδή οι ροές σκέδασης αντιστοιχίζονται στο ισοδύναμο κύκλωμα σε αυτεπαγωγές.

2.4.3 Αντιστοίχιση ρεύματος μαγνήτισης και απωλειών πυρήνα

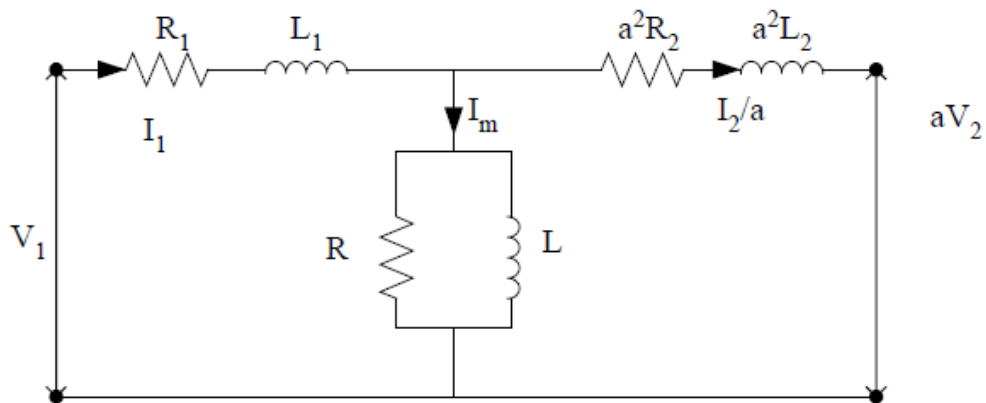
Το ρεύμα μαγνήτισης i_m είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή ενώ η κυματομορφή του έπεται της κυματομορφής της τάσης κατά 90° . Έτσι το ρεύμα αυτό αντιστοιχίζεται σε μία αντίδραση X_m τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης. Τέλος το ρεύμα απωλειών του πυρήνα i_{h+e} είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή και η κυματομορφή του είναι σε φάση με την κυματομορφή της τάσης. Έτσι αυτό το ρεύμα είναι δυνατόν να παρουσιάζεται με μία αντίσταση R_c τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης.



Εικόνα 2.10 Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού (μη ιδανικού) μετασχηματιστή

2.4.4 Το ιδανικό ισοδύναμο κύκλωμα

Στην εικόνα 2.10 βλέπουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του μη ιδανικού μετασχηματιστή, το κύκλωμα αυτό θα έδινε μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς ωστόσο δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμο. Για την ανάλυση κυκλωμάτων που περιλαμβάνουν μετασχηματιστές, είναι απαραίτητη η μετατροπή του αρχικού κυκλώματος σε ένα ιδανικό κύκλωμα το οποίο θα παρουσιάζει μόνο ένα επίπεδο τάσης. Έτσι το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματίζεται ώστε το επίπεδο τάσης να ισούται με το επίπεδο τάσης του πρωτεύοντος ή του δευτερεύοντος.



Εικόνα 2.11 Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον

2.5 Απώλειες μετασχηματιστή

Οι μετασχηματιστές είναι το πιο σημαντικό στοιχείο στο ενεργειακό σύστημα. Με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, ο αριθμός και η

χωρητικότητα των εγκατεστημένων μετασχηματιστών μεταφοράς, αλλά κυρίως των μετασχηματιστών διανομής, έχει αυξηθεί. Παρ' όλα αυτά δεν έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ποσότητα των απωλειών και στην απόδοση των μετασχηματιστών, διότι ένας μετασχηματιστής, ως στοιχείο του δικτύου, έχει αποδοτικότητα 97-99%. Το σύνολο όμως των μετασχηματιστών στη μεταφορά και στη διανομή παρουσιάζει υψηλές συνολικές απώλειες λόγω του μεγάλου πλήθους τους. Επομένως, κάθε μείωση στις απώλειες των μετασχηματιστών θα μείωνε αισθητά τις συνολικές απώλειες του ηλεκτρικού δικτύου.

Πολύ μεγάλη σημασία για τον υπολογισμό των απωλειών των μετασχηματιστών του δικτύου έχει το είδος του φορτίου, το οποίο τροφοδοτείται. Με την πάροδο των χρόνων τα φορτία, που συνδέονται και τροφοδοτούνται από το δίκτυο, έχουν αλλάξει σημαντικά. Πολλοί από τους μετασχηματιστές, που είχαν εγκατασταθεί αρχικά για να τροφοδοτούν γραμμικά φορτία με πλήρως ημιτονοειδές ρεύμα, σταδιακά απέκτησαν ως κύριο φορτίο μη γραμμικά φορτία, τα οποία παράγουν ρεύματα με υψηλότερες αρμονικές. Αύξηση της περιεκτικότητας σε αρμονικές του ρεύματος φόρτισης δημιουργεί παραπάνω απώλειες και επομένως οδηγεί σε αύξηση στη θερμοκρασία hot - spot των μετασχηματιστών, άρα και στη μείωση της διάρκειας ζωής τους και στην υποβάθμιση της μόνωσής τους.

Οι μετασχηματιστές συγκρινόμενοι με άλλες ηλεκτρικές μηχανές είναι αρκετά αποδοτικοί. Στο μετασχηματιστή παρατηρούνται οι εξής απώλειες :

- I. Απώλειες κενού φορτίου (σιδήρου ή πυρήνα)
- II. Απώλειες φορτίου (χαλκού ή τυλιγμάτων)
- III. Επιπρόσθετες απώλειες (σύστημα ψύξης κλπ)

Κυριότερες είναι οι απώλειες κενού φορτίου και οι απώλειες φορτίου. Ως εκ τούτου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι

$$P_T = P_{NL} + P_{LL}$$

P_T συνολικές απώλειες μετασχηματιστή (total losses)

P_{NL} απώλειες κενού φορτίου (no load losses)

P_{LL} απώλειες φορτίου (load losses)

2.5.1 Απώλειες κενού φορτίου

Από την στιγμή που ένας μετασχηματιστής τεθεί υπό τάση, ακόμα και αφόρτιστος παρουσιάζει απώλειες. Θεωρώντας ότι τροφοδοτούμε το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή με εναλλασσόμενη τάση και το

δευτερεύον παραμένει ανοικτοκυκλωμένο, ο μετασχηματιστής λειτουργεί εν κενώ. Κατά την εν κενώ λειτουργία, το πρωτεύον απορροφά ένα πολύ μικρό ρεύμα, το ρεύμα διεγέρσεως. Το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Το ρεύμα απωλειών πυρήνα, το οποίο αντιστοιχεί στις απώλειες πυρήνα και το ρεύμα μαγνητίσεως, το οποίο προκαλεί την μαγνητική ροή Φ , που διαρρέει το σιδηροπυρήνα.

Επομένως διαπιστώνουμε ότι οι απώλειες πυρήνα είναι ανεξάρτητες από το επίπεδο φόρτισης του μετασχηματιστή και εξαρτώνται από το τετράγωνο της τάσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

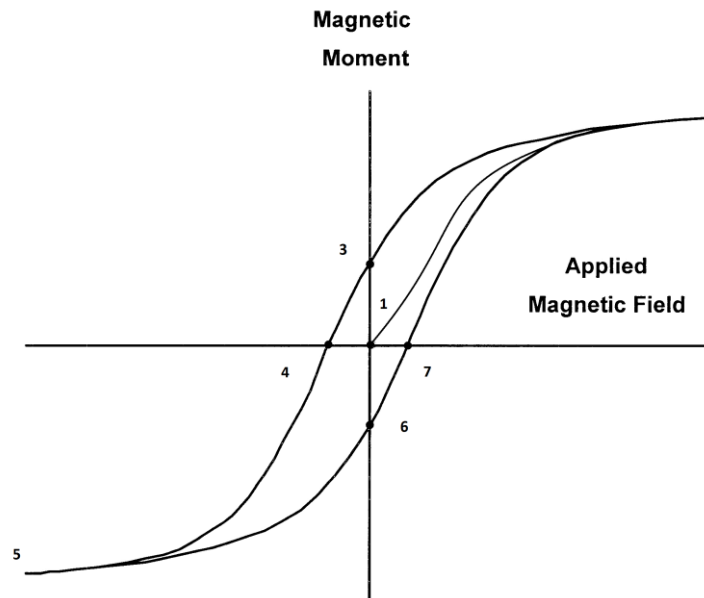
Οι απώλειες πυρήνα προκύπτουν από την ενέργεια, που απαιτείται, προκειμένου να διατηρηθεί η συνεχώς μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή στον πυρήνα. Αποτελούνται από τις απώλειες υστερήσεως και τις απώλειες δινορευμάτων. Οι εν λόγω απώλειες είναι σταθερές και συνεισφέρουν αρκετά στις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή, διότι εμφανίζονται όταν και όσο ο μετασχηματιστής είναι σε λειτουργία.

2.5.1.1 Απώλειες υστερήσεως

Όπως προαναφέρθηκε, ο πυρήνας του μετασχηματιστή είναι από σίδηρο, δεδομένου ότι η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται στις μαγνητικές ιδιότητές του. Είναι γνωστό ότι τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν την ιδιότητα, όταν μαγνητίζονται, να διατηρούν για κάποιο χρονικό διάστημα έναν παραμένοντα μαγνητισμό. Η ιδιότητα αυτή προκαλεί το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης.

Ας θεωρήσουμε ένα αρχικά αμαγνήτιστο σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο υφίσταται μία εναλλασσόμενη ένταση μαγνητικού πεδίου H . Παρακάτω παρατίθεται ένας πλήρης κύκλος της εναλλασσόμενης εντάσεως H . Αρχίζοντας από το μηδέν, αφού υποθέσαμε αμαγνήτιστο αρχικά υλικό, καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι τη μέγιστη τιμή της πάνω στην καμπύλη 1-2, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής θα μεταβληθεί αντίστοιχα κατά μήκος της καμπύλης αυτής μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή της. Στη συνέχεια, η ένταση του μαγνητικού πεδίου αρχίζει να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί ξανά ακολουθώντας τώρα την καμπύλη 2-3, αφού το υλικό είναι πλέον μαγνητισμένο, με αποτέλεσμα όταν μηδενίζεται η ένταση να εξακολουθεί να υπάρχει μαγνητική ροή. Στη συνέχεια, η ένταση του μαγνητικού πεδίου γίνεται αρνητική και η πυκνότητα μαγνητικής ροής εξακολουθεί να μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί πάνω στην καμπύλη 3-4. Στην κατάσταση αυτή, η απαιτούμενη ένταση για να απομαγνητιστεί το μαγνητισμένο υλικό ονομάζεται ένταση επαναφοράς (H). Μετά από το σημείο αυτό, η μαγνητική επαγωγή αρχίζει να παίρνει αρνητικές τιμές έως το

αρνητικό της μέγιστο (καμπύλη 4-5) και αφού φτάσει στο σημείο αυτό, η εναλλασσόμενη ένταση του μαγνητικού πεδίου αρχίζει πάλι να αυξάνεται αλγεβρικά κατά μήκος της καμπύλης 5-6 μέχρι που φτάνει στο σημείο όπου μηδενίζεται, ενώ υπάρχει και πάλι μία παραμένουσα αρνητική μαγνητική ροή. Καθώς η ένταση του μαγνητικού πεδίου συνεχίζει να αυξάνεται παίρνοντας θετικές τιμές, η πυκνότητα της μαγνητικής ροής μηδενίζεται στο σημείο 7 και μεγιστοποιείται και πάλι στο σημείο 2, όπου και κλείνει ο πρώτος κύκλος και επαναλαμβάνεται.



Εικόνα 2.12 Ο βρόχος υστέρησης

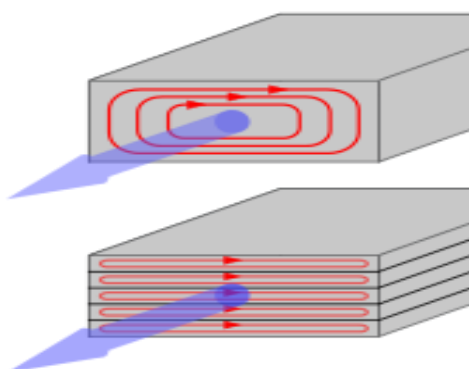
Παρατηρώντας έναν πλήρη κύκλο υστέρησης, διαπιστώνουμε ότι το μαγνητικό πεδίο απορροφά περισσότερη ενέργεια απ' ότι αποδίδει. Δεδομένου ότι η τελική κατάσταση είναι ακριβώς η ίδια με την αρχική, αυτή η επιπλέον ενέργεια, η οποία ισούται με το εμβαδό του βρόχου υστερήσεως, πρέπει να χάνεται με τη μορφή απωλειών. Πρόκειται για ενέργεια, η οποία χάνεται σε μορφή θερμότητας από τη μεταβολή του προσανατολισμού των στοιχειωδών μαγνητών, που αποτελούν το σιδηρομαγνητικό υλικό, τότε προς τη θετική και τότε προς την αρνητική κατεύθυνση. Αυτές οι απώλειες ονομάζονται απώλειες υστέρησης και αποτελούν το 50 έως 80% των συνολικών απωλειών κενού φορτίου.

2.5.1.2 Απώλειες δινορευμάτων

Εκτός από απώλειες υστερήσεως στα μαγνητικά κυκλώματα, τα οποία διεγείρονται από εναλλασσόμενα ρεύματα, εμφανίζονται και οι απώλειες λόγω ανάπτυξης δινορευμάτων, δηλαδή λόγω εναλλασσόμενων ρευμάτων, που επάγονται στο εσωτερικό του σιδερένιου πυρήνα από την περιοδικά

μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή Φ . Οι απώλειες αυτές ονομάζονται απώλειες δινореυμάτων και εξαρτώνται από το τετράγωνο της συχνότητας, το τετράγωνο του πάχους του υλικού και από την ειδική αντίστασή του.

Γνωρίζουμε από το νόμο επαγωγής του Faraday, ότι όταν αγωγίμη μάζα βρεθεί μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο τότε επάγεται σε αυτή μία ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Η δύναμη αυτή αναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της μάζας να κινηθούν σε τυρβώδεις τροχιές, σχηματίζοντας κλειστούς βρόχους ή δίνες και δημιουργώντας τα δινореύματα (eddy currents). Τα ρεύματα αυτά θερμαίνουν τη μάζα του σιδήρου μέσα στην οποία ρέουν, σύμφωνα με το νόμο του Joule ($P = Ri^2$). Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου ο πυρήνας στην πράξη κατασκευάζεται από πολλά λεπτά φύλα και όχι από ένα κομμάτι.



Εικόνα 2.13 Αναπτυσσόμενα δινореύματα στον πυρήνα

2.5.2 Απώλειες φορτίου

Οι απώλειες φορτίου είναι σημαντικές σε μέγεθος και πιθανόν να ισοδυναμούν ή να είναι ακόμα και μεγαλύτερες από τις απώλειες κενού φορτίου. Είναι το μέρος εκείνο των απωλειών, που παράγονται από το ρεύμα του φορτίου, είναι κυρίως απώλειες Joule στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και μεταβάλλονται με το τετράγωνο του ρεύματος αυτού. Χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- I. Απώλειες αντίστασης – Ωμικές στα τυλίγματα των αγωγών (απώλειες χαλκού)
- II. Απώλειες δινореυμάτων στα τυλίγματα των αγωγών (eddy currents losses)
- III. Απώλειες δινореυμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή (δοχείο, τοιχώματα κτλ)

Για τις απώλειες φορτίου ισχύει η παρακάτω σχέση

$$P_{LL} = P_{dc} + P_{EC} + P_{OSL}$$

Όπου

P_{LL} Απώλειες φορτίου

P_{dc} Ωμικές απώλειες

P_{EC} Απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα των αγωγών

P_{OSL} Απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή

Το άθροισμα των απωλειών δινορευμάτων στα τυλίγματα των αγωγών και στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή μας δίνει τις συνολικές απώλειες δινορευμάτων.

Οι απώλειες αντίστασης συχνά αναφέρονται και ως απώλειες χαλκού, επειδή συμβαίνουν στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, τα οποία είναι συνήθως από χαλκό. Λαμβάνουν χώρα τόσο στο πρωτεύον τύλιγμα όσο και στο δευτερεύον και είναι αποτέλεσμα της αντίστασης R του χάλκινου αγωγού κατά τη ροή του ρεύματος μέσα στον αγωγό αυτό. Οι απώλειες αντίστασης υπολογίζονται από τον τύπο:

$$P_{dc} = VA = (\text{volts}) \times (\text{amperes}) = V \times I = R \times I^2$$

Αν η RMS τιμή του ρεύματος φορτίου αυξάνεται λόγω αρμονικών συνιστωσών, οι ωμικές απώλειες αυξάνονται με το τετράγωνο της RMS τιμής του ρεύματος φορτίου. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση, που έχουμε υψηλότερες αρμονικές ρεύματος, οι απώλειες αντίστασης στα τυλίγματα του μετασχηματιστή υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{dc} = R_{dc} \times I^2 = R_{dc} \times \sum_{n=1}^{n=nmax} I_{n,max}^2$$

Οι απώλειες δινορευμάτων σε έναν αγωγό είναι παρόμοιες με εκείνες, που συμβαίνουν στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Οφείλονται στη μαγνητική ροή,

η οποία διαπερνά κάθετα τον αγωγό και προκαλεί τη ροή δινορευμάτων στο εσωτερικό του. Όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται υπό φορτίο, τότε προκαλείται ένα πρόσθετο πεδίο σκεδάσεως από τα ρεύματα φορτίου. Το πεδίο αυτό εξουδετερώνεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή, όχι όμως και στο χώρο των τυλιγμάτων και στο μεταξύ τους χώρο. Αυτό το πεδίο σκεδάσεως ονομάζεται κύριο πεδίο σκεδάσεως, προκαλεί το μεγαλύτερο μέρος της άεργης πτώσης τάσης και τα δινορεύματα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή.

Το μέγεθος της ανεπιθύμητης σκέδασης του πεδίου εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή. Το φαινόμενο της σκέδασης στα τυλίγματα έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ακατάπαυστων ακτινικών και αξονικών μεταβολών της ροής σε όλο το χώρο, που διατίθεται. Οι μεταβολές αυτές προκαλούν τάσεις, που οδηγούν το ρεύμα να ρέει κάθετα στις ροές, και αυτό προκαλεί πρόσθετες απώλειες.

Οι απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα των αγωγών προκαλούνται από τη χρονικά μεταβαλλόμενη ηλεκτρομαγνητική ροή, που καλύπτει τα τυλίγματα. Το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) και η επίδραση εγγύτητας (proximity effect) είναι τα πιο σημαντικά φαινόμενα, τα οποία δημιουργούν αυτές τις απώλειες. Το μεγαλύτερο ποσοστό των απωλειών είναι στο τελευταίο στρώμα των αγωγών των τυλιγμάτων, διότι σ' αυτό το τμήμα έχουμε τη μεγαλύτερη πυκνότητα ακτινικής ροής. Οι απώλειες δινορευμάτων υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_{EC} = \frac{\pi \tau^2 \mu^2}{\rho} f^2 \times H^2$$

Όπου

ρ η αντίσταση του αγωγού

τ πλάτος του αγωγού σε τομή του κάθετη στις πεδιακές γραμμές

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, η ποσότητα των ονομαστικών απωλειών δινορευμάτων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή αποτελεί το 33% των συνολικών απωλειών δινορευμάτων στους μετασχηματιστές λαδιού και το 67% στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου.

Οι απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή είναι συνάρτηση του τετραγώνου του ρεύματος και του τετραγώνου της αρμονικής

συχνότητας στην περίπτωση που έχουμε ρεύμα με αρμονικές συνιστώσες. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται με τη σχέση:

$$P_{EC} = P_{EC-R} \times \sum_{n=1}^{n=nmax} n^2 \left[\frac{I_n}{I_R} \right]^2$$

Όπου

P_{EC-R} ονομαστικές απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα

I_n ονομαστικό ρεύμα στην n-οστή αρμονική

I_R ονομαστικό ρεύμα φόρτισης

n τάξη της αρμονικής

Ο συντελεστής αρμονικών απωλειών για τις απώλειες δινορευμάτων από τα τυλίγματα είναι:

$$F_{HL} = \frac{\sum_{n=1}^{n=nmax} n^2 I_n^2}{\sum_{n=1}^{n=nmax} I_n^2} = \frac{\sum_{n=1}^{n=nmax} n^2 \left[\frac{I_n}{I_R} \right]^2}{\sum_{n=1}^{n=nmax} \left[\frac{I_n}{I_R} \right]^2}$$

Οι ονομαστικές απώλειες λόγω δινορευμάτων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή όταν το ρεύμα φόρτισης δεν είναι ημιτονοειδές πρέπει να πολλαπλασιαστούν με το συντελεστή αρμονικών απωλειών για να μας δώσουν τις σωστές απώλειες.

Σύμφωνα με αποτελέσματα από έρευνες και δοκιμές, που έχουν πραγματοποιηθεί, ο συντελεστής αρμονικών απωλειών, ο οποίος υπολογίζεται με την παραπάνω σχέση, είναι αποδεκτός μόνο για μετασχηματιστές, για τους οποίους οι διαστάσεις της ακολουθίας των αγωγών τους είναι μικρότερες των 3mm. Για αγωγούς με διαστάσεις μεγαλύτερες των 3 mm ο συντελεστής αρμονικών απωλειών πρέπει να υπολογιστεί διορθωμένος για να μην οδηγήσει σε ανακριβείς υπολογισμούς.

Λόγω του επιδερμικού φαινομένου στις ακολουθίες των αγωγών με διαστάσεις μεγαλύτερες από 3mm, η ηλεκτρομαγνητική ροή δεν μπορεί να διεισδύσει πλήρως στην ακολουθία των αγωγών των τυλιγμάτων σε υψηλή συχνότητα. Γι αυτό, η επιτρεπτότητα του πεδίου δ μπορεί να προσδιοριστεί σε διαφορετική αρμονική συχνότητα, ως εξής:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f_n}} = \frac{\delta_R}{\sqrt{n}}$$

Όπου

δ_R το βάθος διείσδυσης σε ονομαστική συχνότητα, το οποίο είναι περίπου 10mm για το χαλκό και περίπου 13mm για το αλουμίνιο σε συχνότητα 50Hz

ρ αντίσταση του αγωγού

μ επιτρεπτότητα

f θεμελιώδης συχνότητα

Βασιζόμενοι στα παραπάνω, για να υπολογίσουμε τις απώλειες δινореυμάτων, διορθωμένες από τον αρμονικό συντελεστή, χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_{EC} = \mu_0 \omega \times H^2 \times F(\xi)$$

$$F(\xi) = \frac{1}{\xi} \times \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi - \csc \xi}$$

$$\xi = \frac{\tau}{\delta}$$

$$\xi_n = \xi_R \times \sqrt{n}$$

$$F'_{HL} = \frac{\sum_{n=1}^{n=imax} n \left[\frac{(F\xi_n)}{(F\xi_R)} \right] \left[\frac{I_n}{I_R} \right]^2}{\sum_{n=1}^{n=imax} \left[\frac{I_n}{I_R} \right]^2}$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις και υπό μη ημιτονοειδή ρεύμα, οι ονομαστικές απώλειες δινореυμάτων πρέπει να πολλαπλασιαστούν με τον συντελεστή F'_{HL} .

Όπως έχει αναφερθεί ανωτέρω, τα δινореύματα προκαλούνται από την τάση, που αναπτύσσεται στους αγωγούς, λόγω των διαρροών της ηλεκτρομαγνητικής ροής του μετασχηματιστή προς αυτούς. Τα ρεύματα αυτά προκαλούν απώλειες και αυξάνουν τη θερμοκρασία. Ένα μέρος των απωλειών αυτών και συγκεκριμένα αυτό, που παράγεται στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή, και όχι στα τυλίγματα του, ονομάζεται απώλειες δινореυμάτων στα δομικά μέρη (Other Stray Loss).

Οι απώλειες αυτές αναπτύσσονται στα μεταλλικά τμήματα του μετασχηματιστή, όπως είναι το δοχείο, το περίβλημα, και οι σφικτήρες (clamps) και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι το μέγεθος του πυρήνα, η τάση της τάσης του μετασχηματιστή, και τα χαρακτηριστικά των υλικών, από τα οποία είναι κατασκευασμένη η δεξαμενή και οι σφικτήρες.

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές διαφορετικές δοκιμές για τον προσδιορισμό της επίδρασης της συχνότητας στις απώλειες δινореυμάτων στα δομικά μέρη.

Σύμφωνα με αποτελέσματα κάποιων τέτοιων δοκιμών, η αντίσταση των απωλειών δινορευμάτων στα δομικά μέρη σε χαμηλές συχνότητες (0-360Hz) ισούται με:

$$R_{AC}^{lf} = 0.00129 \left(\frac{fh}{f} \right)^{0.8}$$

Για συχνότητες στο εύρος των (420-1200Hz) η αντίσταση υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R_{AC}^{hf} = 0.33358 \left(\frac{fh}{f} \right)^{-1.87}$$

Οι απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη αυξάνονται προς την καθορισμένη συχνότητα και μετά από αυτήν μειώνονται. Στο ενδιάμεσο, η καθορισμένη συχνότητα, στην οποία μεγιστοποιούνται οι απώλειες, εξαρτάται από το είδος των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για τα δομικά μέρη του μετασχηματιστή.

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, η ονομαστική τιμή των απωλειών δινορευμάτων στα δομικά μέρη (other stray loss, P_{OSL-R}) είναι περίπου το 67% των συνολικών απωλειών δινορευμάτων στους μετασχηματιστές λαδιού και το 33% στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου.

Όταν έχουμε μη ημιτονοειδές ρεύμα η τιμή των απωλειών λόγω δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της RMS τιμής του ρεύματος και με την αρμονική συχνότητα, υψωμένη σε δύναμη 0.8 .

$$P_{OSL} = P_{OSL-R} \times \sum_{n=1}^{n=nmax} n^{0.8} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2$$

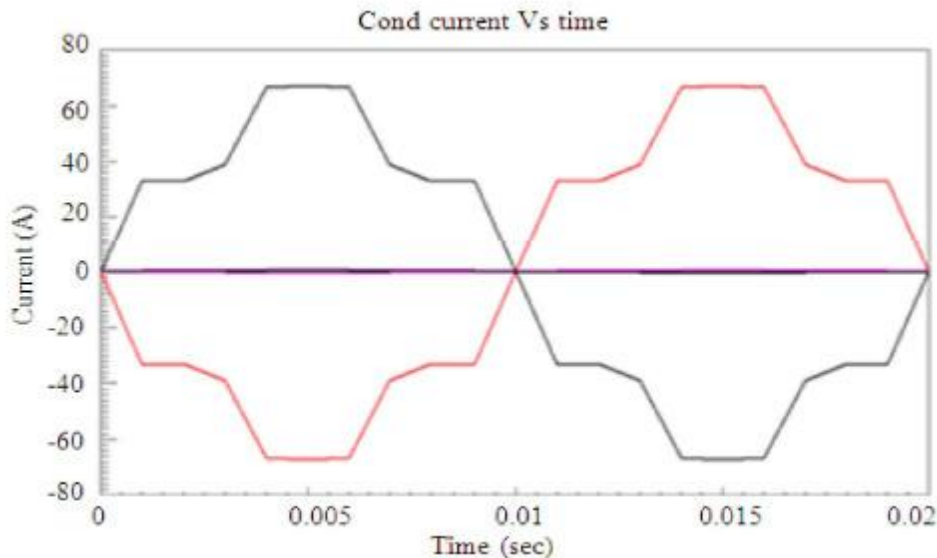
Ο συντελεστής αρμονικών απωλειών για τις απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_{HL-STR} = \frac{P_{OSL}}{P_{OSL-R}} = \frac{\sum_{n=1}^{n=nmax} n^{0.8} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2}{\sum_{n=1}^{n=nmax} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2}$$

Επομένως, όταν έχουμε μη ημιτονοειδές ρεύμα αρκεί να πολλαπλασιάσουμε τις ονομαστικές απώλειες λόγω δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή με το συντελεστή F_{HL-STR} .

2.5.3 Επιπρόσθετες απώλειες λόγω αρμονικών

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δίκτυα σχεδιασμένα να λειτουργούν στη βασική συχνότητα των 50 Hz. Σχεδόν όλες οι βιομηχανίες έχουν μη γραμμικά φορτία, τα οποία παράγουν υψηλά επίπεδα αρμονικών ρευμάτων. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος, για τον οποίο οι μετασχηματιστές διανομής, που είναι εγκατεστημένοι στις βιομηχανίες, είναι διαφορετικοί από τους μετασχηματιστές διανομής της ΔΕΗ.



Εικόνα 2.14 Αρμονικά ρεύματα

Όπως προαναφέρθηκε, οι απώλειες φορτίου είναι κυρίως απώλειες αντίστασης πάνω στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα και στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή. Και οι δύο αυτές κατηγορίες απωλειών αυξάνονται εξαιτίας των αρμονικών. Η αύξηση αυτή των απωλειών λόγω των αρμονικών ονομάζεται “extra losses”.

Τυπικά μη γραμμικά φορτία, τα οποία παράγουν αρμονικές στο σύστημα ηλεκτροδότησης, είναι :

- Συστήματα ρύθμισης στροφών κινητήρων
- Εναλλάκτες
- Ηλεκτρονικοί υπολογιστές
- Συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας
- Ballast λαμπτήρων φθορισμού
- Ανορθωτές
- Συστήματα ηλεκτρονικού ελέγχου της φάσης
- Κλίβανοι
- Μεγάλα συστήματα εξαερισμού

Τα αρμονικά ρεύματα οδηγούν σε υψηλότερες απώλειες στους μετασχηματιστές και συνεπώς σε μία υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία επηρεάζει και τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Τα υψηλότερης συχνότητας στοιχεία του ρεύματος του φορτίου δεν διαπερνούν πλήρως τον αγωγό, αλλά ταξιδεύουν στην περιφέρειά του, ένα φαινόμενο, που ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο (skin effect). Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ωφέλιμη περιοχή διατομής του αγωγού, άρα αυξάνονται οι απώλειες αντίστασης στα τυλίγματα, (απώλειες φορτίου) και κατ' επέκταση αυξάνεται η θερμοκρασία του αγωγού και όλων των στοιχείων, που συνδέονται με αυτόν.

Όταν ένας μετασχηματιστής χρησιμοποιείται υπό μη ημιτονοειδή τάση και ρεύμα, λόγω της αύξησης των απωλειών και κατά συνέπεια της αύξησης της θερμοκρασίας, η ονομαστική του ισχύς πρέπει να μειώνεται. Αυτό είναι εφικτό, μειώνοντας τις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή υπό μη ημιτονοειδές ρεύμα στο επίπεδο των απωλειών, που θα παρουσιάζονται στο μετασχηματιστή, αν λειτουργούσε υπό ημιτονοειδή τάση και ρεύμα.

Επομένως, το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα στο μετασχηματιστή υπό αρμονικό φορτίο πρέπει να είναι τέτοιο ώστε οι απώλειες που δημιουργεί να είναι ίσες με αυτές, που θα είχαμε στο hot - spot υπό ημιτονοειδείς συνθήκες.

Οι απώλειες φορτίου όταν έχουμε γραμμικό φορτίο και ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας του μετασχηματιστή είναι ανά μονάδα ίσες με:

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{OSL-R}(pu)$$

Όπου:

P_{LL-R} είναι οι ονομαστικές απώλειες φορτίου του μετασχηματιστή

P_{EC-R} είναι οι ονομαστικές απώλειες δινορευμάτων στα τυλίγματα του μετασχηματιστή

P_{OSL-R} είναι οι ονομαστικές απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή

Το 1 αντιπροσωπεύει τις ωμικές απώλειες, οι οποίες δεν επηρεάζονται από τις αρμονικές του ρεύματος και η ονομαστική τους τιμή είναι 1 ανά μονάδα.

Όταν έχουμε μη ημιτονοειδές ρεύμα και με βάση τους τρόπους υπολογισμού, που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, οι απώλειες φορτίου ανά μονάδα είναι ίσες με:

$$P_{LL}(pu) = I^2(pu) \times [1 + F_{HL} \cdot P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR} \cdot P_{OSL-R}(pu)]$$

Επομένως, το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης για τον προσδιορισμό της μείωσης της χωρητικότητας του μετασχηματιστή είναι:

$$I_{max}(pu) = \left[\frac{P_{LL-R}(pu)}{1 + F_{HL} \cdot P_{EC-R}(pu) + F_{HL-STR} \cdot P_{OSL-R}(pu)} \right]^{0.5}$$

Με βάση την παραπάνω εξίσωση, μπορούμε να προσδιορίσουμε το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα φόρτισης του μετασχηματιστή και επίσης να προσδιορίσουμε τη μείωση της χωρητικότητάς του, όταν λειτουργεί υπό μη ημιτονοειδείς συνθήκες.

2.6 Είδη μετασχηματιστών ισχύος



Εικόνα 2.15 Είδη μετασχηματιστών

Προκειμένου οι μετασχηματιστές διανομής να έχουν φυσιολογική λειτουργία και κατ' επέκταση φυσιολογική διάρκεια ζωής, πρέπει να έχουν μέση ανύψωση θερμοκρασίας στα τυλίγματα τέτοια, ώστε να μην ξεπερνάει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά περισσότερο από 65 οC. Ως εκ τούτου, η θερμότητα, που παράγεται στους μετασχηματιστές λόγω των απωλειών, πρέπει να απάγεται με κάποια μέθοδο ψύξης για την αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων. Ανάλογα με τη μέθοδο ψύξης, που χρησιμοποιείται, οι μετασχηματιστές διακρίνονται, σε ελαίου, (οι οποίοι είναι και πιο αποδοτικοί), σε ξηρού τύπου και σε μετασχηματιστές τύπου GIS.

2.6.1 Μετασχηματιστές τύπου ελαίου

Στους μετασχηματιστές τύπου ελαίου χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι για την ηλεκτρική μόνωση των τυλιγμάτων, (προστασία από βραχυκύκλωμα), και για την απαγωγή της θερμότητας, που αναπτύσσεται. Επιπρόσθετα στα πηνία του μετασχηματιστή τοποθετείται μονωτικό χαρτί με πάχος, το οποίο μπορεί να είναι από μικρότερο του χιλιοστού έως μερικά εκατοστά. Ο συνδυασμός λαδιού και χαρτιού έχει το πλεονέκτημα της ίδιας περίπου διηλεκτρικής σταθεράς, που έχουν τα υλικά αυτά.

2.6.2 Μετασχηματιστές ξηρού τύπου

Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις, στις οποίες η χρήση των μετασχηματιστών λαδιού θεωρείται επισφαλής λόγω κινδύνου πυρκαγιάς ή όταν υπάρχουν απαιτήσεις για αποφυγή μόλυνσης του περιβάλλοντος. Συναντώνται για παράδειγμα σε χαρτοβιομηχανίες, αποθήκες καυσίμων, και εργοστάσια τροφίμων. Στους μετασχηματιστές αυτούς το ψυκτικό μέσο είναι ο αέρας, ενώ χρησιμοποιούνται επιπλέον για ηλεκτρική μόνωση, εποξειδική ρητίνη ή χαρτιά, διαποτισμένα με κατάλληλες ουσίες. Ένας μετασχηματιστής ξηρού τύπου είναι ο μετασχηματιστής ρητίνης, τα τυλίγματα του οποίου εμποτίζονται με μια εποξειδική ρητίνη υπό κενό. Η ρητίνη αυτή δεν είναι τοξική. Είναι διηλεκτρικό υλικό και αποτελεί πηγή υψηλού ηλεκτρικού δυναμικού. Επίσης, στο μετασχηματιστή αναπτύσσονται χωρητικά φορτία. Για τους λόγους αυτούς, είναι αναγκαίο να τηρούνται οι αποστάσεις ασφαλείας, που προδιαγράφονται από τα διεθνή πρότυπα, ως αποστάσεις από ενεργά και εκτεθειμένα τμήματα. Όταν προκύψει βραχυκύκλωμα η θερμοκρασία δεν μεταδίδεται μακριά από το σφάλμα.



2.6.3 Μετασχηματιστές τύπου GIS

Οι μετασχηματιστές τύπου GIS (Gas Insulation System), χρησιμοποιούν ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο κάποιο αέριο σε υψηλή πίεση σε στεγανοποιημένο περιβάλλον. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο αέριο είναι το εξαφθοριούχο θείο (SF_6), το οποίο είναι άχρωμο, άοσμο, άφλεκτο, χημικά αδρανές και μη τοξικό. Η διηλεκτρική αντοχή του SF_6 στην ατμοσφαιρική πίεση είναι περίπου τριπλάσια από την αντίστοιχη του αέρα ή του αζώτου. Υπό τις ίδιες συνθήκες είναι μισή από αυτή των ελαίων, αλλά σε υψηλότερη πίεση υπερέρχει αυτής. Το SF_6 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μόνωση μετασχηματιστών ισχύος μέχρι αρκετές εκατοντάδες MVA. Το πλεονέκτημα των παραπάνω μετασχηματιστών είναι ότι είναι άφλεκτοι, εύκολοι στην εγκατάσταση και τοποθέτησή τους, ενώ καταλαμβάνουν σχετικά μικρό χώρο. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι ότι το SF_6 θεωρείται μη οικολογικό, διότι συμβάλλει στη δημιουργία της τρύπας του όζοντος.

Κεφάλαιο 3°

Κατασκευαστικά στοιχεία

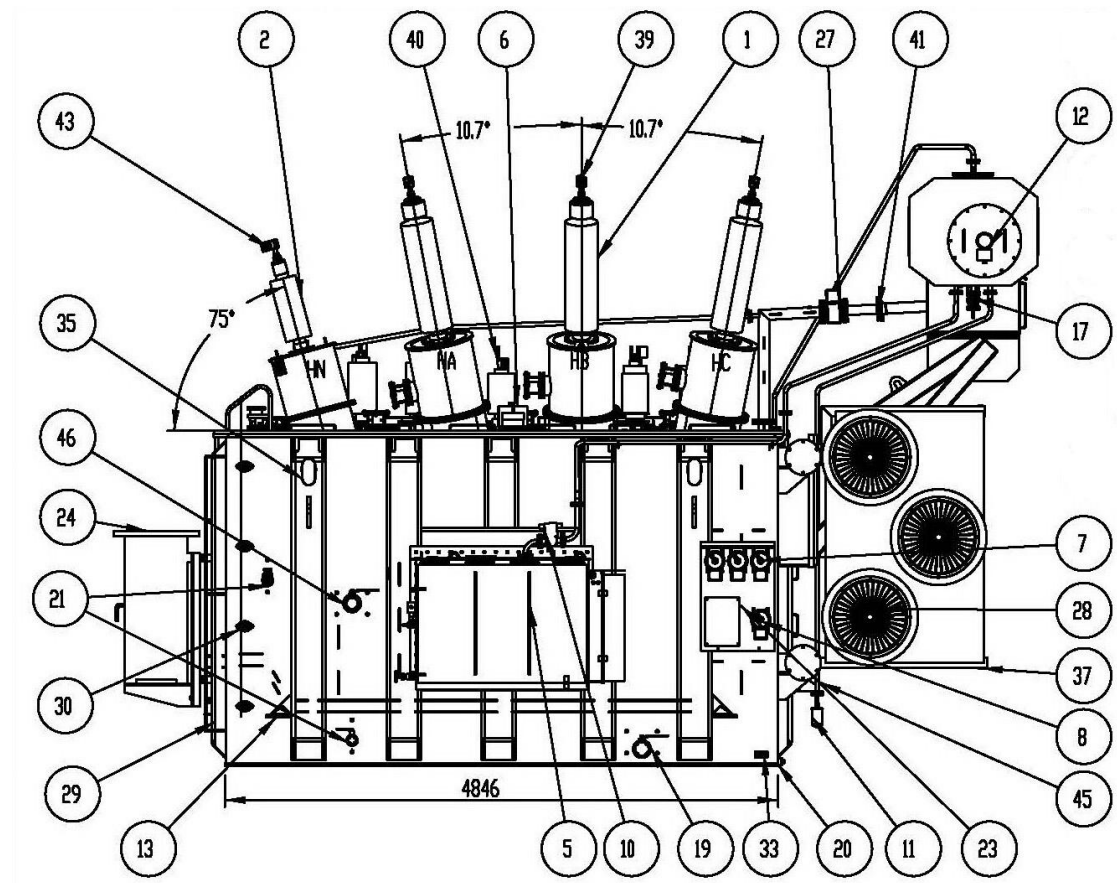
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή των βασικών εξαρτημάτων που αποτελούν ένα μετασχηματιστή ελαίου, θα μιλήσουμε για τα όργανα και τις διατάξεις που είναι απαραίτητες για την σωστή λειτουργία του μετασχηματιστή και για το σύστημα μόνωσης του μετασχηματιστή.

3.1 Τα εξαρτήματα

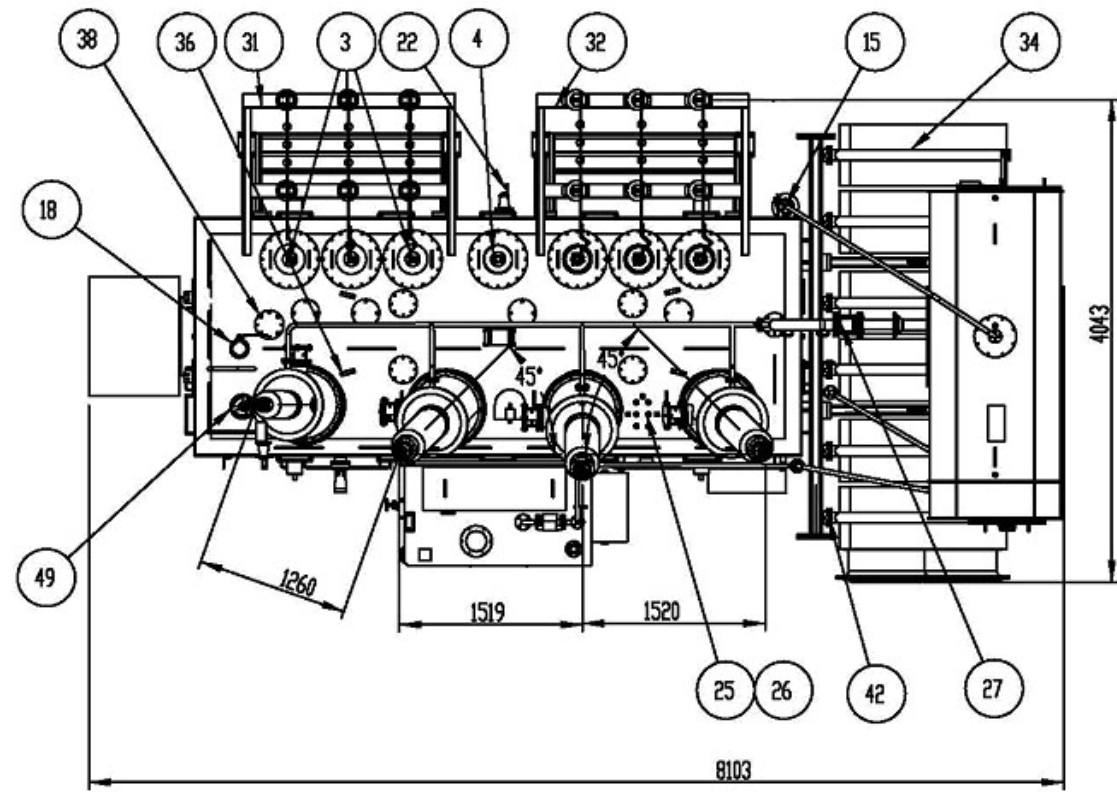
Πιο συγκεκριμένα τα εξαρτήματα ενός μετασχηματιστή 20/25MVA απεικονίζονται στα σχήματα 1,2 και 3 και είναι τα εξής:

1. Μονωτήρας διέλευσης υψηλής τάσης
2. Μονωτήρας ουδέτερου κόμβου
3. Μονωτήρας διέλευσης μέσης τάσης
4. Μονωτήρας διέλευσης χαμηλής τάσης
5. Μεταγωγέας λήψεων υπό φορτίο
6. Συσκευή ανακούφισης πίεσης
7. Θερμόμετρα τυλιγμάτων
8. Θερμόμετρο λαδιού
9. Δοχείο διαστολής μεταγωγέα λήψεων
10. Ηλεκτρονόμος ροής λαδιού από μεταγωγέα
11. Αφυγραντής μεταγωγέα λήψεων
12. Ενδεικτικό στάθμης λαδιού μεταγωγέα
13. Λαβές έλξης
14. Δοχείο διαστολής κύριας δεξαμενής
15. Αφυγραντής δοχείου διαστολής κύριας δεξαμενής
16. Εξαερωτήρας δοχείου διαστολής
17. Βάνα αποστράγγισης δοχείου διαστολής κύριας δεξαμενής
18. Βάνα κένωσης
19. Βάνα πλήρωσης/αποστράγγισης λαδιού
20. Πώμα αποστράγγισης
21. Βάνα δειγματοληψίας
22. Ακροδέκτης γειώσεως ουδέτερου κόμβου
23. Πινακίδα
24. Πίνακας ελέγχου
25. Αισθητήρας θερμοκρασίας ελαίου (προαιρετικά)
26. Αισθητήρας θερμοκρασίας τυλιγμάτων (προαιρετικά)
27. Ηλεκτρονόμος ανίχνευσης αερίων (Buchholz)
28. Ανεμιστήρας ψύξης
29. Σκάλα
30. Γείωση τυλιγμάτων υψηλής τάσης
31. Ζυγοί μέσης τάσης (προαιρετικά)

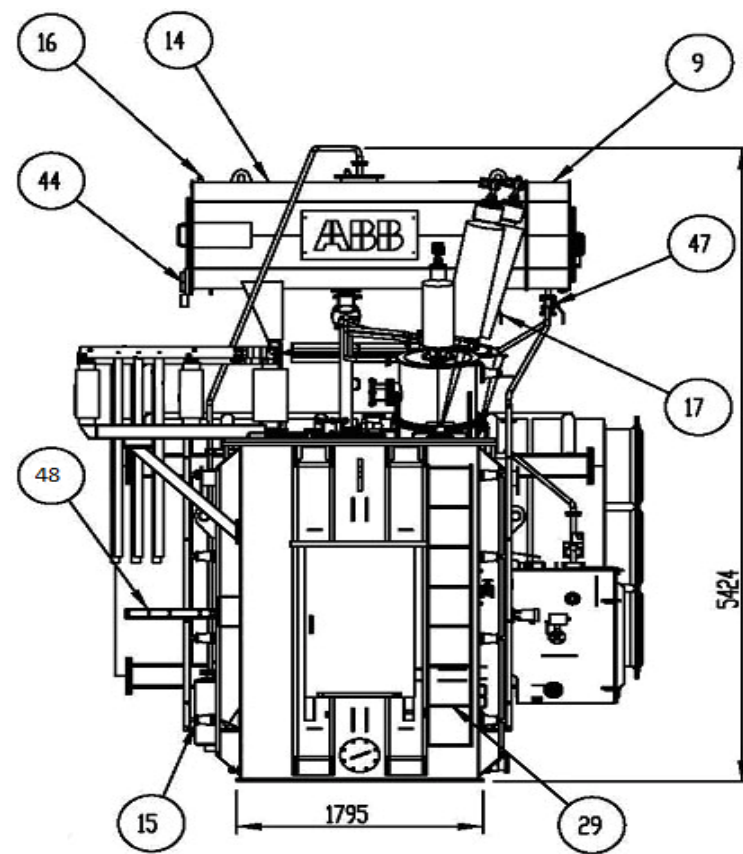
32. Ζυγοί χαμηλής τάσης (προαιρετικά)
33. Ακροδέκτης γείωσης κύριας δεξαμενής
34. Ψυγείο
35. Λαβές ανύψωσης μετασχηματιστή
36. Λαβές ανύψωσης πάνω καλύμματος
37. Βάνα αποστράγγισης ψυγείου
38. Κιβώτιο σύνδεσης γείωσης πυρήνα
39. Ακροδέκτες μονωτήρα διέλευσης υψηλής τάσης
40. Ακροδέκτες μονωτήρα διέλευσης μέσης και χαμηλής τάσης
41. Βάνα απομόνωσης
42. Βάνες ψυγείου
43. Ακροδέκτης μονωτήρα ουδέτερου κόμβου
44. Ενδεικτικό στάθμης για δοχείο διαστολής
45. Βαλβίδα εξαέρωσης δεξαμενής
46. Ηλεκτρονόμος άμεσης εκτόνωσης
47. Βάνα αποστράγγισης δοχείου διαστολέα
48. Σχάρα όδευσης καλωδίων
49. Μεταγωγέας λήψεων εν κενό



Σχήμα 3.16

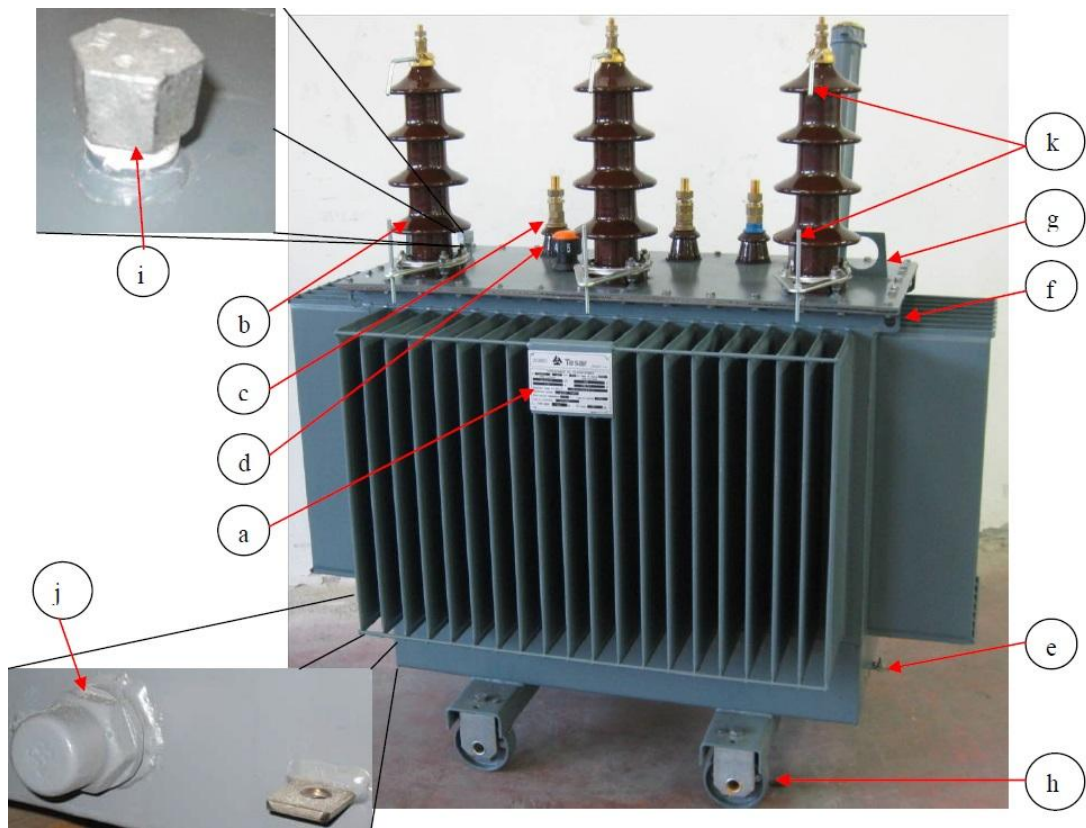


Σχήμα 3.17

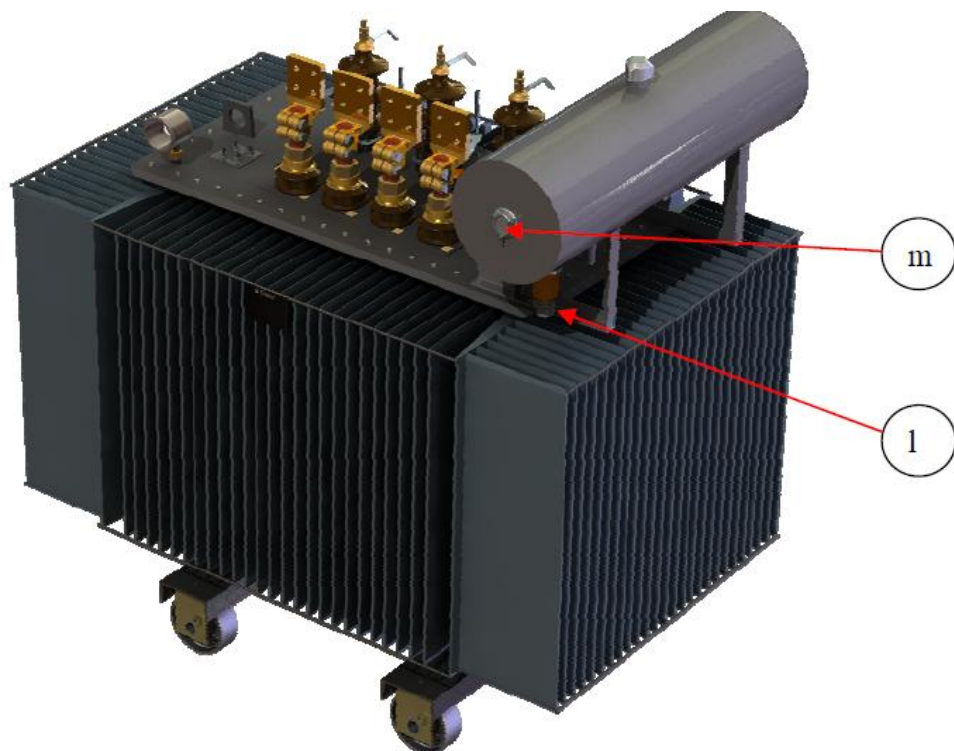


Σχήμα 3.18

Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε τα στοιχεία ενός μετασχηματιστή Μέσης Τάσης σε Χαμηλή Τάση MV/LV.



Εικόνα 3.19 ΜΣ



Εικόνα 3.20 ΜΣ

Τα στοιχεία του μετασχηματιστή αυτού είναι τα εξής :

- a. Πινακίδα
- b. Διαπεραστήρες ή μονωτήρες ΜΤ
- c. Διαπεραστήρες ή μονωτήρες ΧΤ
- d. Μεταγωγέας λήψεων
- e. Πώμα αποστράγγισης
- f. Λαβή ρυμούλκησης
- g. Λαβή ανύψωσης ή ανάρτησης
- h. Τροχοί κύλισης
- i. Σημείο θερμομέτρου
- j. Βάνα κένωσης και σημείο σύνδεσης γείωσης κελύφους
- k. Ακίδες εκτόνωσης διάσπασης
- l. Δοχείο αφυγραντής
- m. Βαλβίδα εξαέρωσης δοχείου διαστολής

3.1.1 Περιγραφή των πιο σημαντικών στοιχείων

Οι μονωτήρες διέλευσης

Ονομάζονται αλλιώς και διαπεραστήρες και χρησιμοποιούνται για το ασφαλές πέρασμα των αγωγών των τυλιγμάτων από το κύριο δοχείο. Οι μονωτήρες διέλευσης παρουσιάζουν συχνά βλάβες, έρευνες ακόμα έχουν δείξει ότι περίπου το 25% των βλαβών των μετασχηματιστών οφείλεται στους διαπεραστήρες. Υπάρχουν δύο τύποι μονωτήρων διέλευσης και είναι οι εξής:

A) Τύπου με μόνωση εναλλάξ, με στρώσεις από στερεό και υγρό μονωτικό ή μόνωση αερίου ή μόνωση στερεού υλικού.

B) Τύπου πυκνωτή, ο οποίος έχει μόνωση χαρτιού εμποτισμένου με λάδι ή με ρητίνη.

Δοχείο διαστολής

Το δοχείο αυτό χρησιμεύει για την απόσβεση της διαστολής του λαδιού κατά την αύξηση της θερμοκρασίας. Στο εσωτερικό του διαθέτει διάφραγμα ώστε να μην επιτρέπεται η άμεση επαφή αέρα και λαδιού, με αυτόν τον τρόπο προστατεύεται το λάδι από την υγρασία και παραμένει καθαρό. Το δοχείο διαστολής τοποθετείται στην επάνω πλευρά, στο πίσω μέρος του μετασχηματιστή. Επάνω στο δοχείο διαστολής είναι ο αφυγραντής ο οποίος επιτρέπει την «ανάσα» του μετασχηματιστή εμποδίζοντας ταυτόχρονα την εισροή υγρασίας από το εξωτερικό περιβάλλον. Στην επόμενη εικόνα βλέπουμε το δοχείο διαστολής.



Εικόνα 3.21 Δοχείο διαστολής

Αφυγραντής ή αφυγραντήρας

Χρησιμοποιείται για την εμπόδιση επαφής της υγρασίας του περιβάλλοντος με το μονωτικό λάδι, δηλαδή για την αποφυγή της υποβάθμισης του μονωτικού λαδιού και την διατήρηση της ακεραιότητας της μόνωσης. Περιέχει υγροσκοπικούς κρυστάλλους silica gel που απορροφούν υγρασία ίση έως και το 20% του βάρους τους. Το μέγεθος του αφυγραντή διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή. Μπορούμε να συνδέσουμε αφυγραντές παράλληλα σε περίπτωση μεγάλης εγκατάστασης ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.



Εικόνα 3.22 Αφυγραντής ο οποίος περιέχει silica gel.

Ανεμιστήρας και Ψυγείο

Για την καλύτερη ψύξη, οι μετασχηματιστές διαθέτουν ανεμιστήρες και εναλλάκτες. Οι ανεμιστήρες μπορούν να ενεργοποιούνται σταδιακά ανά βαθμίδα, ανάλογα με την ανάγκη ψύξης που παρουσιάζεται. Οι ανεμιστήρες τοποθετούνται πάνω στα ψυγεία ώστε να αποβάλλεται μεγαλύτερο ποσοστό θερμότητας. Τα ψυγεία χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση της θερμότητας που αναπτύσσεται από το λάδι, προς το εξωτερικό περιβάλλον. Οι ανεμιστήρες και τα ψυγεία είναι αποσπώμενα, έτσι επιτυγχάνεται η ευκολότερη αντικατάσταση ή επισκευή τους.

Αντλίες λαδιού

Οι αντλίες λαδιού χρησιμοποιούνται για να δημιουργούν εξαναγκασμένη ροή λαδιού από το εσωτερικό της δεξαμενής προς το ψυγείο. Η ενεργοποίησή τους πραγματοποιείτε μέσω του θερμόμετρου τυλιγμάτων το οποίο ανάλογα με την θερμοκρασία ανοίγει ή κλείνει τις κατάλληλες επαφές. Για την εξασφάλιση της λειτουργίας τους, αλλά και της σωστής περιστροφής της πτερωτής τους, η οποία αναγράφεται με ένα βέλος πάνω στην αντλία, οι αντλίες εξοπλίζονται με ροόμετρο.

Για την προστασία και την παρακολούθηση των μετασχηματιστών τα βασικότερα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται είναι τα εξής:

Όργανο ένδειξης στάθμης λαδιού

Το όργανο αυτό δείχνει την στάθμη του λαδιού ακόμα και όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί υπό φορτίο. Επίσης διαθέτει επαφές για την σήμανση χαμηλής στάθμης λαδιού. Αποτελείται από ένα πλωτήρα ο οποίος είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό της δεξαμενής και βρίσκεται σε μαγνητική σύζευξη με τον δείκτη, ο οποίος βρίσκεται στο εξωτερικό της δεξαμενής. Τα εξαρτήματα αυτά είναι πλήρως στεγανοποιημένα μεταξύ τους.

Θερμόμετρο λαδιού

Το θερμόμετρο λαδιού δίνει την θερμοκρασία του άνω στρώματος λαδιού. Παρέχει επίσης τη δυνατότητα σήμανσης χαμηλής θερμοκρασίας λαδιού όπως και τον έλεγχο μίας ή και περισσοτέρων βαθμίδων ανεμιστήρων. Το θερμόμετρο αυτό αποτελείται από το ενδεικτικό στέλεχος, το θερμοευαίσθητο στοιχείο (βολβός) και τον διακόπτη. Ο βολβός είναι τοποθετημένος σε

στεγανή υποδοχή έτσι ώστε να είναι δυνατή η απομάκρυνσή του χωρίς να μειώνεται η στάθμη του λαδιού. Υπάρχει ένας ακόμα δείκτης ο οποίος δείχνει την υψηλότερη θερμοκρασία που έχει παρουσιαστεί από τον τελευταίο μηδενισμό του θερμομέτρου. Ο μηδενισμός γίνεται χειροκίνητα με τον διακόπτη μηδενισμού.

Θερμόμετρο τυλιγμάτων

Το θερμόμετρο αυτό δίνει την θερμοκρασία στο θερμότερο σημείο των τυλιγμάτων. Αποτελείτε από το ενδεικτικό και το στέλεχος, το στέλεχος είναι τοποθετημένο σε στεγανή υποδοχή, η οποία θερμαίνεται από το λάδι που την περιβάλλει και από μια θερμαντική αντίσταση. Η αντίσταση αυτή τροφοδοτείται από ένα μετασχηματιστή έντασης που βρίσκεται στο εσωτερικό της δεξαμενής και προσομοιώνει τη μεταβολή θερμοκρασίας στο θερμό σημείο. Η ένδειξη του οργάνου βγαίνει από τον συνδυασμό των θερμοκρασιών της αντίστασης και του λαδιού. Υπάρχουν επίσης βοηθητικές επαφές για την σήμανση κινδύνων και την ενεργοποίηση ανεμιστήρων. Τέλος όπως και στο θερμόμετρο λαδιού, έτσι και στο θερμόμετρο τυλιγμάτων, υπάρχει ένας ακόμα δείκτης ο οποίος δείχνει την μέγιστη τιμή που έχει παρουσιαστεί από τον τελευταίο μηδενισμό. Ο μηδενισμό και εδώ γίνεται χειροκίνητα με το κατάλληλο κουμπί.

Ηλεκτρονόμος ανίχνευσης αερίων (Buchholz)

Ο ηλεκτρονόμος αυτός τοποθετείται σε μετασχηματιστές που διαθέτουν δοχείο διαστολής και παρεμβάλλεται ανάμεσα στην κύρια δεξαμενή και το δοχείο διαστολής. Αποτελείτε από τον θάλαμο συσσώρευσης αερίων άνω και κάτω, τους αντίστοιχους πλωτήρες και το κύκλωμα διακοπής λειτουργίας του μετασχηματιστή. Ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται σε περίπτωση έκλυσης σημαντικής ποσότητας αερίων, όπως σφάλμα που μειώνει την μονωτική ιδιότητα του λαδιού ή διάσπαση του λαδιού σε πολύ θερμά σημεία και σημαίνεται συναγεργμός.



Εικόνα 3.23 Ηλεκτρονόμος Buchholz

Ηλεκτρονόμος ξαφνικής εκτόνωσης

Κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή ο ηλεκτρονόμος αυτός επιτηρεί τον ρυθμό μεταβολής της πίεσης και έτσι ανιχνεύει τις ενδεχόμενες ξαφνικές αιχμές της πίεσης κατά την διάρκεια εσωτερικών σφαλμάτων. Εάν η πίεση υπερβεί μία προκαθορισμένη τιμή, ο ηλεκτρονόμος θέτει εκτός λειτουργίας τον μετασχηματιστή, ενεργοποιώντας το κύκλωμα ασφαλείας του μετασχηματιστή.



Βαλβίδα ανακούφισης πίεσης

Η βαλβίδα αυτή είναι ένα εξάρτημα που διαθέτουν όλοι οι μετασχηματιστές και χρησιμεύει στην εκτόνωση των μεταβολών πίεσης που παρουσιάζονται από εσωτερικά σφάλματα. Διαθέτει επαφές για το άνοιγμα του διακόπτη του μετασχηματιστή. Αποτελείται από το διάφραγμα και μια μηχανικά κινούμενη ενδεικτική ράβδο. Στην περίπτωση όπου η πίεση ξεπερνά μια προκαθορισμένη τιμή, η βαλβίδα κινείται προς τα επάνω ώστε να εκτονωθούν τα αέρια. Καθώς η βαλβίδα ανεβαίνει, ανεβάζει την ράβδο. Μετά την εκτόνωση των αερίων η βαλβίδα επιστρέφει στην κανονική της θέση μέσω ελατηρίων, σφραγίζοντας τον μετασχηματιστή, αλλά η ενδεικτική ράβδος

παραμένει στην υψηλότερη θέση που την έσπρωξε η βαλβίδα. Η ράβδος επιστρέφει στην κανονική του θέση μόνο χειροκίνητα.

3.2 Η πινακίδα

Στην βασική μορφή μίας τυπικής πινακίδας ενός μετασχηματιστή, αναγράφονται οι πληροφορίες για την σωστή λειτουργία και την συντήρηση του μετασχηματιστή. Θα πρέπει να είναι ευδιάκριτη και κατασκευασμένη από κατάλληλο υλικό ώστε να μην αλλοιώνονται οι ενδείξεις με το πέρασμα του χρόνου. Στην πινακίδα συναντάμε τα εξής τεχνικά στοιχεία: Το όνομα του κατασκευαστή, το έτος κατασκευής, τον σχετικό κανονισμό, το βάρος, τον αριθμό σειράς, τον αριθμό φάσεων, την ονομαστική ισχύ – συχνότητα – ρεύματα – τάση και το εύρος λήψεων, τον συμβολισμό συνδεσμολογίας τυλιγμάτων, την πολικότητα, την σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης, τον τύπο του πυρήνα, το είδος μονωτικού λαδιού, την κλάση ψύξεως, την ανύψωση θερμοκρασίας άνω τμήματος λαδιού και περιβάλλοντος, την στάθμη μόνωσης, αντοχή στην πίεση κενού (και για το δοχείο διαστολής).

				s.r.l. AREZZO-ITALY	
IEC 60076-1					
OIL TRANSFORMER					
Type	<input type="text"/>	N°	<input type="text"/>	Year	<input type="text"/>
kVA	<input type="text"/>	Hz	<input type="text"/>	Phases	<input type="text"/>
PRIMARY			SECONDARY		
kV	<input type="text"/>	kV	<input type="text"/>		
A	<input type="text"/>	A	<input type="text"/>		
Vcc%	<input type="text"/>	Group	<input type="text"/>	Install.	<input type="text"/>
Insulation level [kV] <input type="text"/>					
TOT. kg	<input type="text"/>	OIL kg	<input type="text"/>		
450176					

Εικόνα 3.24 Πινακίδα ΜΣ ελαίου της εταιρίας Tesar.

3.2.1 Πινακίδα μετασχηματιστή της ΔΕΗ

Στην υποενότητα αυτή γίνεται αναφορά στην πινακίδα ενός μετασχηματιστή διανομής Μ.Τ. της ΔΕΗ. Έχουμε καταγράψει όσα στοιχεία αναγράφονται ενώ στην συνέχεια βλέπουμε μια τέτοια πινακίδα.

Τα στοιχεία της πινακίδας είναι τα ακόλουθα:

- I. Το όνομα της κατασκευάστριας εταιρίας
- II. Ιδιοκτησία, δηλαδή σε ποιον ανήκει ο Μ/Σ
- III. Ο αριθμός σειράς και ο αριθμός μητρώου του συγκεκριμένου Μ/Σ από το εργοστάσιο που κατασκευάστηκε
- IV. Η ισχύς του Μ/Σ
- V. Οι φάσεις
- VI. Η συχνότητα
- VII. Η ζεύξη
- VIII. Το έτος κατασκευής
- IX. Η ονομαστική τάση λειτουργίας
- X. Η τάση βραχυκυκλώσεως στους 75°C
- XI. Το ολικό βάρος και τα αντίστοιχα για κάθε τύλιγμα και για το λάδι
- XII. Το υλικό τυλιγμάτων
- XIII. Τα σχέδια συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή
- XIV. Πινακάκι το οποίο προσδιορίζει την λήψη ανάλογα με την θέση του διακόπτη (μεταγωγέα), πόσο τοις εκατό σπείρες προσθέτει ή αφαιρεί σε κάθε θέση.

Επεξηγήσεις

Τα περισσότερα στοιχεία που αναγράφονται στην πινακίδα, είναι γνωστά ή πολύ απλά στην κατανόηση, εστιάζουμε λοιπόν στην ομάδα ζεύξης.

Ζεύξη για παράδειγμα Dyn11(1), είναι οι συνδεσμολογία την οποία θα πρέπει να έχει ένας μετασχηματιστής για να συνδεθεί σε ένα δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, η ομάδα ζεύξεως είναι εκείνη που καθορίζει αν μπορεί να παραλληλιστεί ένας νέος μετασχηματιστής με τους άλλους του δικτύου, αφού υπάρχουν και οι προϋποθέσεις παραλληλισμού.

Αναλυτικά, το D σημαίνει ότι τα τυλίγματα της υψηλής είναι κατά τρίγωνο και το y ότι τα τυλίγματα της χαμηλής κατά αστέρα. Το n σημαίνει ότι ο μετασχηματιστής στην χαμηλή βγάζει ουδέτερο. Ζευξοδείκτης είναι ο αριθμός 11 ή 1 ο οποίος φανερώνει τη γωνία μεταξύ των τάσεων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Για παράδειγμα αν πολλαπλασιάσουμε 11 επί 30° έχουμε

330°, αυτό σημαίνει ότι η τάση του δευτερεύοντος προηγείται κατά 330° της τάσης του πρωτεύοντος. Για να παραλληλιστούν μετασχηματιστές με διαφορετικούς ζευξοδείκτες θα πρέπει οι σύνδεση των ακραίων φάσεων στην υψηλή και την χαμηλή να αντιστραφεί. Σε διαφορετική περίπτωση θα προκληθεί βραχυκύκλωμα.

A
AREVA
AREVA Hellas A.E.

ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑ	Δ.Ε.	ΑΡΙΘ. ΠΑΡΑΓΓΕΛΙΑΣ	5045012
ΑΡΙΘ. ΣΕΙΡΑΣ	98299	ΟΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	772 kg
ΙΣΧΥΣ	160 KVA	ΒΑΡΟΣ ΛΑΔΙΟΥ	160 kg
ΤΥΠΟΣ ΨΥΞΕΩΣ	ΟΝΑΝ	ΥΛΙΚΟ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ Υ.Τ.	ΧΑΛΚΟΣ
ΦΑΣΕΙΣ	3	ΒΑΡΟΣ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ...Γ.	29.0 kg
ΣΥΧΝΟΤΗΣ	50 Hz	ΥΛΙΚΟ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ Χ.Τ.	ΧΑΛΚΟΣ
ΖΕΥΞΗ	Dyn 11 (1)	ΒΑΡΟΣ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ Χ.Τ.	23.0 kg
ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	2005	ΑΡ. ΣΧΕΔ. ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ	425679
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ	20000/400 V		425678
ΤΑΣΗ ΒΡΑΧΥΚΛΩΣΕΩΣ ΣΤΟΥΣ 75°C	3.24 %		

α(X3) b(X2) c(X1) η(X0)
A(H3) B(H2) C(H1)
Ua Va Wa
5,Xa 5,Ya 5,Za

ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ $\begin{matrix} a & (X1) \\ | & \\ n & \dots & b & (X3) \\ | & & & \dots & (X0) \\ c & & & & \\ & & & & \text{Dyn11} \end{matrix}$ Dyn1 (X2)

ΤΑΣΗ V	ΜΕΤΑΓΩΓΕΑΣ ΘΕΣΗ	ΣΥΝΔ.	ΛΗΨΕΙΣ %
19000	1	1	-5
19500	2	2	-2,5
20000	3	3	0
20500	4	4	+2,5
21000	5	5	+5

ΥΨΗΛΗ ΤΑΣΗ $\begin{matrix} & A(H3) \\ & \triangle \\ C(H1) & & B(H2) \end{matrix}$

Η ΑΛΛΑΓΗ ΛΗΨΩΝ ΘΑ ΓΙΝΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΕΚΤΟΣ ΤΑΣΕΩΣ

ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ, ΑΣΚΛΗΠΙΟΥ 10, ΚΡΥΟΝΕΡΙ-ΑΤΤΙΚΗΣ ΑΡΙΘ. ΣΧΕΔ. 351088 Α

Εικόνα 3.25 Πινακίδα Μ/Σ διανομής ΔΕΗ



Εικόνα 3.26 Πινακίδες Μετασχηματιστών ελαίου ΜΤ

3.3 Το σύστημα μόνωσης



Εικόνα 3.27 Εσωτερική όψη των τυλιγμάτων ΜΣ μέσης τάσης.

Το σύστημα μόνωσης των μετασχηματιστών αποτελείται από τα μονωτικά λάδια και το ηλεκτρομονωτικό χαρτί για τα οποία θα μιλήσουμε στις παραγράφους που ακολουθούν.

3.3.1 Μονωτικό λάδι

Το μονωτικό λάδι σε κάθε μετασχηματιστή παρέχει μόνωση μεταξύ των τυλιγμάτων και μεταξύ τυλιγμάτων και γης. Επίσης απάγει την θερμότητα από τον πυρήνα και την μεταφέρει στο σύστημα ψύξης. Ο πυρήνας, τα τυλίγματα και τα στηρίγματα που συνιστούν τη στερεά μόνωση εμποτίζονται στο λάδι, το οποίο διεισδύει και γεμίζει τα μικρά διάκενα αέρα. Έτσι εμποδίζεται η εισχώρηση υγρασίας, διατηρώντας την ποιότητα του χαρτιού και των υλικών κυτταρίνης. Όταν το χαρτί του μετασχηματιστή εμποτίζεται στο λάδι αποκτά και αυτό καλύτερες μονωτικές ιδιότητες. Άλλη μια χρησιμότητα είναι ότι το λάδι απομακρύνει τα σωματίδια που μπορεί να υπάρχουν σε καινούριους μετασχηματιστές, τα οποία συγκρατούνται από τα φίλτρα.

Το μονωτικό λάδι θα πρέπει να έχει τις εξής ιδιότητες:

- Καθαρότητα, ώστε να μην περιέχονται σωματίδια που μπορούν να καταστρέψουν το σύστημα μόνωσης
- Υψηλή διηλεκτρική αντοχή, ώστε να υπάρχει αντίσταση στην διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος
- Χαμηλό ιξώδες, ώστε να μπορεί να ρέει ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες

Οι περισσότεροι μετασχηματιστές λειτουργούν με ορυκτέλαιο. Το συνηθέστερο μονωτικό λάδι είναι το ορυκτέλαιο καθώς έχει πολύ καλά χαρακτηριστικά και χαμηλό κόστος λόγω της διαθεσιμότητάς του. Οι διηλεκτρικές του ιδιότητες εξαρτώνται από την υγρασία και την θερμοκρασία. Για την διατήρηση των χαρακτηριστικών του και την καθυστέρηση της γήρανσης του μονωτικού λαδιού προσθέτουμε αντιοξειδωτικά (όπως η φαινόλη).

Παλαιότερα χρησιμοποιούνταν αντί του ορυκτέλαιου κάποια χλωριωμένα συνθετικά υγρά, όπως το Askarel, το Aroclor, το Inerteen, το Clophen και άλλα, τα οποία όμως αποδείχθηκαν επιβλαβή για το περιβάλλον και καρκινογόνα, έτσι η χρήση τους απαγορεύτηκε. Έτσι αναπτύχθηκαν άλλα μη τοξικά μονωτικά λάδια, όπως οι συνθετικοί εστέρες, σύνθετοι υδρογονάνθρακες, οι σιλικονούχοι υδρογονάνθρακες, τα λάδια συνθετικών υδρογονανθράκων και οι φυσικοί εστέρες. Όλα αυτά έχουν πολύ υψηλότερο κόστος από τα κοινά ορυκτέλαια και εφαρμόζονται σε ιδιαίτερες εφαρμογές

όπου έχουν να κάνουν με περιβαλλοντικούς λόγους και αποφυγή φωτιάς σε περίπτωση ανάφλεξης. Αν και η συμπεριφορά τους είναι κατάλληλη για υψηλές θερμοκρασίες, η απόδοσή τους σε ψυχρά κλίματα είναι περιορισμένη.

Οι 3 βασικοί παράγοντες στους οποίους οφείλεται η υποβάθμιση της μόνωσης και γενικά των υλικών των Μ/Σ είναι η θερμοκρασία η υγρασία και το οξυγόνο.



Εικόνα 3.28 Βαρέλι μεταφοράς μονωτικού λαδιού.

3.3.2 Ηλεκτρομονωτικό χαρτί

Το υλικό που έχει επικρατήσει για την μόνωση των αγωγών των τυλιγμάτων είναι το ηλεκτρομονωτικό χαρτί, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.11. Κατασκευάζεται από κατάλληλα επεξεργασμένο πολτό υψηλής ποιότητας, ώστε να μην παρουσιάζει χημικά κατάλοιπα και συνήθως είναι από πεύκο ή σκληρότερα ξύλα. Η παραγωγή του είναι απλή και το κόστος της πολύ χαμηλό. Επίσης έχει μεγάλο εύρος διαθεσιμότητας και μπορεί να πάρει την κατάλληλη μορφή ανάλογα με την εφαρμογή. Το χαρτί αυτό εμποτίζεται σε μονωτικό λάδι και έτσι το σύστημα χαρτί-λάδι έχει υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή. Έχει πάρει την ονομασία Kraft «σκληρός» από τον Γερμανό Karl F.Dahl ο οποίος το κατασκεύασε το 1884. Οι τύποι του ηλεκτρομονωτικού χαρτιού είναι οι ακόλουθοι:

Insuldur

Insuldur είναι η εμπορική ονομασία του θερμικώς αναβαθμισμένου χαρτιού. Το χαρτί αυτό είναι Kraft με σταθεροποιητές και λειτουργεί αποτελεσματικά στην παρεμπόδιση της αντίδρασης με τα προϊόντα γήρανσης και το νερό που ενδεχομένως περιέχεται στο λάδι. Με την χρήση αυτού του χαρτιού επιτυγχάνεται λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες από 55°C σε 65°C επομένως και αύξηση ικανότητας φόρτισης του μετασχηματιστή. Εφοδιάζοντας με μονωτικό χαρτί insuldur αντί Kraft έναν μετασχηματιστή μειώνουμε τον ρυθμό γήρανσης του κατά 2,5 φορές περίπου.



Εικόνα 3.29 Παρασκευή χαρτιού Insuldur

Cottonboard

Το cottonboard είναι pressboard το οποίο αποτελείται από 100% βαμβάκι και έχει κατασκευαστεί από εν θερμώ συμπίεση.

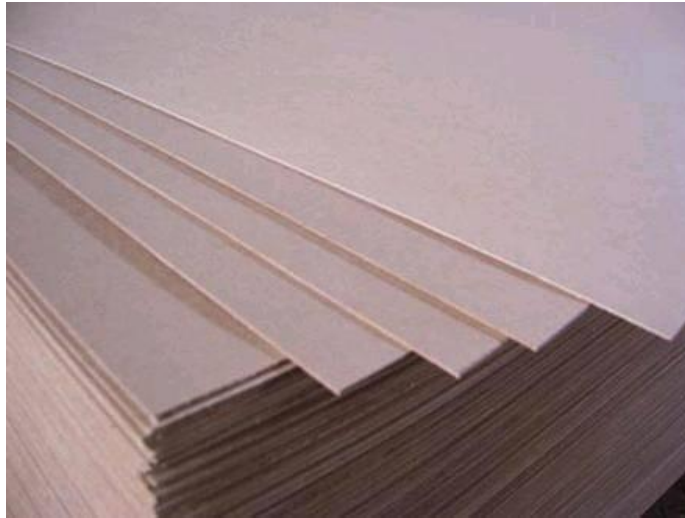
Transformerboard

Ένας άλλος τύπος ηλεκτρομονωτικού χαρτιού είναι το transformerboard, το οποίο αποτελείται από υψηλής ποιότητας θειϊκωμένη κυτταρίνη και πολτό χαρτιού kraft. Το transformerboard διατίθεται σε δύο τύπους, είτε συμπιεσμένο εν θερμώ ή ελαφρά συμπιεσμένο.

Pressboard

Το pressboard είναι κατασκευασμένο από 50% βαμβάκι και 50% πολτό χαρτιού Kraft, ή από 100% μεταχειρισμένο ή παρθένο βαμβάκι. Έχει κατώτερες ιδιότητες από το χαρτί Kraft ίδιου πάχους και έχει την ίδια συμπεριφορά με το απλό χαρτί ενώ η πυκνότητά του είναι μεγαλύτερη. Αποτελεί μαζί με το λάδι, το κύριο μονωτικό υλικό των μετασχηματιστών. Η διηλεκτρική του αντοχή είναι μικρότερη στον αέρα και μεγαλύτερη όταν είναι εμποτισμένο στο λάδι. Έχει αντοχή σε έρπουσες εκφορτίσεις, χαμηλή

συρρίκνωση και υψηλή μηχανική αντοχή. Ανάλογα με την τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή οι κατηγορίες που κατατάσσεται είναι: 1 με τάση $\leq 750\text{kV}$, 2 με τάση $\leq 220\text{ kV}$, 3 για επιμήκη μονωτικά υλικά, 4 για εξαρτήματα τα οποία συγκολλούνται.



Εικόνα 3.30 Χαρτί Pressboard

Nomex

Το nomex έχει σύνθεση από ίνες αρωματικής πολιαμίδης, δημιουργήθηκε την δεκαετία του 1960 και ένα πολύ διαδεδομένο υλικό. Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στη θερμότητα, υψηλή μηχανική αντοχή, προσαρμοστικότητα, πολύ υψηλή αντοχή σε εφαρμοζόμενη ακτινοβολία και ευκαμψία. Το κόστος του είναι υψηλότερο από αυτό του ηλεκτρομονωτικού χαρτιού kraft.



Εικόνα 3.31 Cottonboard Transformerboard Nomex

Κεφάλαιο 4°

Συντήρηση

Η συντήρηση μπορεί να σχετίζεται με κάθε εξοπλισμό που μπορεί να παρουσιάσει βλάβες και είναι ένα από τα κυριότερα μέσα για την αποφυγή διαφόρων βλαβών. Έτσι και στους μετασχηματιστές μεταφοράς οι οποίοι αποτελούν το ακριβότερο κομμάτι ενός υποσταθμού μεταφοράς. Ο προγραμματισμός της συντήρησης γίνεται κυρίως βάσει χρονοδιαγράμματος, με σκοπό τη διασφάλιση της σωστής και ασφαλούς λειτουργίας όλων των διατάξεων κατά την πάροδο του χρόνου και την εναλλαγή των καιρικών συνθηκών.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε στους ελέγχους και τις ενέργειες που πρέπει να γίνονται για τη σωστή συντήρηση και τη πρόληψη βλαβών των μετασχηματιστών, ώστε η λειτουργία τους να είναι ομαλή και οι συνθήκες λειτουργίας τους να είναι σύμφωνες με τις απαιτούμενες. Θα αναφερθούμε επίσης στις καταπονήσεις, στις δοκιμές και τους ποιοτικούς ελέγχους, στα επιμέρους όργανα μέτρησης και τους ηλεκτρονόμους, που συντελούν στην διασφάλιση της σωστής λειτουργία καθώς και τον έλεγχο των μετασχηματιστών.

Καταπονήσεις

Αρχικά πριν μιλήσουμε για την συντήρηση των μετασχηματιστών θα πρέπει να γίνουν σαφείς οι κατηγορίες στις οποίες ξεχωρίζουμε τα είδη των καταπονήσεων. Οι βασικές κατηγορίες καταπονήσεων λοιπόν, θα είναι τρεις.

1. **Μηχανικές** καταπονήσεις - οι οποίες υφίστανται λόγω των υπερεντάσεων βραχείας διάρκειας αλλά και των ρευμάτων βραχυκύκλωσης μεταξύ των αγωγών αλλά και ακροδεκτών και τυλιγμάτων.
2. **Θερμικές** καταπονήσεις - που υφίστανται λόγω της θερμότητας αλλά και τοπικών υπερθερμάνσεων που σχετίζονται με τις υπερεντάσεις, την ροή σκέδασης κατά τη φόρτιση, και τέλος την κακή λειτουργία του συστήματος ψύξης.
3. **Διηλεκτρικές** καταπονήσεις - που υφίστανται λόγω υπερτάσεων του συστήματος, παροδικών κρουστικών τάσεων η και εσωτερικών αντηχήσεων στα τυλίγματα.

Οι βλάβες στους Μ/Σ οφείλονται συνήθως σε βραχυκυκλώματα, τοπικές υπερθερμάνσεις, βλάβες του εξοπλισμού και πολύ σπάνια λόγω της φυσικής γήρανσης του Μ/Σ.

4.1 Οπτικός έλεγχος

Εξωτερικός οπτικός έλεγχος δεξαμενής

Ο εξωτερικός οπτικός έλεγχος είναι ένας απλός και αποτελεσματικός τρόπος για τον εντοπισμό ορισμένων προβλημάτων, τα οποία δεν έχουν εκδηλωθεί σε μεγάλο βαθμό ώστε να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του μετασχηματιστή. Με τον τρόπο αυτό εκτιμάται η κατάσταση του εξοπλισμού και γίνεται η οργάνωση της επόμενης απαιτούμενης συντήρησης. Στα πλαίσια μιας ετήσιας συντήρησης για έναν μετασχηματιστή, ο εξωτερικός οπτικός έλεγχος πραγματοποιείται για παράδειγμα τέσσερις μήνες πριν τη συντήρηση και αντίστοιχα τέσσερις μήνες μετά την συντήρηση.

Επιγραμματικά τα βασικότερα σημεία τα οποία θα πρέπει να ελεγχθούν κατά τη διάρκεια ενός οπτικού ελέγχου είναι τα παρακάτω:

- Ύπαρξη χυμένων λαδιών ή υγρών στη δεξαμενή ή και στο χώρο του μετασχηματιστή
- Παρουσία θερμών σημείων (με χρήση θερμικής κάμερας)
- Παρουσία αποχρωματισμού μετάλλων, σε αυτή την περίπτωση η αλλοίωση θα πρέπει να επισκευάζεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εταιρίας διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η επισκευή πρέπει να γίνει στην επόμενη συντήρηση (καθαρισμός επιφάνειας και βάψιμο)
- Ζημιές σε μονωτήρες διέλευσης
- Ζημιές στο σύστημα αλεξικέρανου
- Ζημιές στο σύστημα ψύξης
- Επαλήθευση στάθμης λαδιού
- Αλλοίωση υγροσκοπικών κρυστάλλων silica gel που περιέχει ο αφυγραντής, σε περίπτωση αλλοίωσης θα πρέπει να γίνει αντικατάσταση στην επόμενη συντήρηση
- Ενδείξεις θερμοκρασιών
- Ενδείξεις πιέσεων
- Παρουσία αερίων στον ηλεκτρονόμο Buchholz
- Επαλήθευση σημάνσεων
- Ρυθμίσεις ελέγχου και διακοπής
- Επαλήθευση σωστής λειτουργίας ανεμιστήρων και αντλιών
- Παρουσία ασυνήθιστων θορύβων
- Παρουσία φαινομένου Corona

Όλες οι παραπάνω ενέργειες πραγματοποιούνται απαραίτητως σε κάθε οπτικό έλεγχο και σε κάθε προγραμματισμένη συντήρηση.

4.2 Ανάλυση διαδικασιών συντήρησης

4.2.1 Έλεγχος του μονωτικού λαδιού

Ο έλεγχος του μονωτικού λαδιού αποτελεί μέρος της συντήρησης, και συνήθως πρέπει να γίνεται κάθε έξι ή δώδεκα μήνες, στα πλαίσια της προληπτικής συντήρησης, για να διερευνηθεί εάν το μονωτικό λάδι έχει υποστεί υποβάθμιση.

Όπως έχουμε προαναφέρει, το ορυκτέλαιο είναι το ευρύτερα διαδεδομένο μονωτικό υγρό σε μετασχηματιστές ισχύος, καθώς αποδίδει την απαιτούμενη διηλεκτρική αντοχή και ψύξη. Τόσο το ορυκτέλαιο όσο και τα λοιπά στερεά υλικά μόνωσης, καταπονούνται μέσω χημικών διεργασιών κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή, εξ αιτίας του οξυγόνου της υγρασίας και της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται.

Για τον έλεγχο του μονωτικού λαδιού πραγματοποιούμε δειγματοληψία, κατά την οποία θα πρέπει η θερμοκρασία του λαδιού να είναι ίση ή μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος, αυτό για την αποφυγή εισχώρησης υγρασία στο δείγμα. Εάν η υγρασία του περιβάλλοντος υπερβαίνει το 50% η δειγματοληψία θα πρέπει να πραγματοποιηθεί άλλη στιγμή. Η διαφορές θερμοκρασίας και υγρασίας λαδιού-περιβάλλοντος θα πρέπει να καταγράφονται. Η ποσότητα του λαδιού θα πρέπει να είναι αρκετή ώστε να διεξάγονται οι απαιτούμενες δοκιμές.

4.2.1.1 Δειγματοληψία μονωτικού λαδιού

Χρησιμοποιώντας ελαστικά γάντια τοποθετούμε το δείγμα με την βοήθεια καθαρού σωλήνα, σε δοχείο αλουμινίου, το οποίο το αριθμούμε για μην υπάρχει πιθανότητα να χαθεί το δείγμα. Πιο συγκεκριμένα, απορρίπτουμε ποσότητα τριπλάσια από αυτήν που περιέχεται στην βάνα, διατηρούμε συνεχόμενη ροή, κατόπιν τοποθετούμε τον σωλήνα περίπου δεκαπέντε εκατοστά μέσα στην φιάλη και αφήνουμε ροή λαδιού τριών λίτρων και ενώ η ροή συνεχίζει απομακρύνουμε τον σωλήνα. Η στάθμη θα πρέπει να είναι 0,5 εκατοστά κάτω από το χείλος του δοχείου. Τέλος προχωρούμε στην σφράγιση του δοχείου.



Εικόνα 4.32 Δειγματοληψία μονωτικού λαδιού

Για την ανάλυση των διαλυμένων αερίων, είναι πολύ σημαντικός ο χειρισμός και η δειγματοληψία του δείγματος. Θα πρέπει να λαμβάνετε προσοχή στην λήψη του δείγματος, ώστε να μην υπάρξει μόλυνση ή ατμοσφαιρική έκθεση, επίσης τα όργανα για την διαδικασία αυτήν θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μία φορά και η βάνα δειγματοληψίας καθαρίζεται πριν την έναρξη της διαδικασίας με ροή μικρής ποσότητας λαδιού. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος θα πρέπει να είναι πάνω από 0°C. Η διαδικασία πραγματοποιείται με χρήση γυάλινης σύριγγας την οποία αριθμούμε για να μην υπάρχει πιθανότητα να χαθεί το δείγμα. Η χρήση γυάλινης σύριγγας επιτρέπει την παρακολούθηση του δείγματος και τον εντοπισμό διαρροής στο κύκλωμα από τις δημιουργούμενες φυσαλίδες, όπως και τον εντοπισμό ακαθαρσιών και λοιπών σωματιδίων.

Οι γυάλινες σύριγγες παρουσιάζουν μειονεκτήματα, καθώς η έκθεση τους σε υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος, ή υψηλή θερμοκρασία λαδιού, ή έκθεση στον ήλιο μπορεί να δημιουργήσει υδρογόνο. Η διαδικασία της δειγματοληψίας για την ανάλυση διαλυμένων αερίων έχει ως εξής.

Χρησιμοποιώντας ελαστικά γάντια, πραγματοποιούμε σύνδεση της σύριγγας με το σωλήνα μέσω τρίοδης βάνας, συνδέουμε το σύστημα αυτό με το σωλήνα που εξέρχεται από την βάνα δειγματοληψίας. Κατόπιν ανοίγουμε την βάνα δειγματοληψίας για την συλλογή μιας ποσότητας δείγματος. Στην συνέχεια μέσω της τρίοδης βάνας, προχωρούμε στην αφαίρεση εγκλωβισμένου αέρα από την σύριγγα με ιδιαίτερη προσοχή για την εξάλειψη κάθε φυσαλίδας. Τέλος πραγματοποιούμε τη λήψη τελικού δείγματος 20ml και κλείσιμο της τρίοδης βάνας.



Εικόνα 4.33 Δειγματοληψίας για την ανάλυση διαλυμένων

4.2.1.2 Έλεγχος χρώματος του μονωτικού λαδιού

Το μονωτικό λάδι πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ανοιχτόχρωμο και καθαρό. Η μεταβολή στο χρώμα κατά την διάρκεια του χρόνου υποδηλώνει υποβάθμιση ή ρύπανση του μονωτικού λαδιού. Για την δοκιμή αυτή γίνεται σύγκριση του χρώματος του δείγματος του μονωτικού λαδιού με έγχρωμα τυποποιημένα αριθμημένα γυαλιά. Τα γυαλιά αυτά είναι κατασκευασμένα και έχουν αριθμηθεί βάσει προτύπων. Η αριθμηση αυτή ξεκινά από 0,5 και φτάνει στο 8. Όσο πιο κοντά στο 0,5 είναι το δείγμα τόσο καθαρό είναι το λάδι, ενώ όσο πλησιάζει στο 8 είναι πιο ακάθατο και ακατάλληλο το μονωτικό λάδι.



Εικόνα 4.34 Διάφοροι χρωματισμοί μονωτικών λαδιών

4.2.1.3 Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού

Η διηλεκτρική αντοχή ενός υγρού είναι ο δείκτης της μονωτικής του ικανότητας. Όταν ο δείκτης αυτός κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές, αίτια είναι είτε η υγρασία, είτε η ύπαρξη αιωρούμενων σωματιδίων. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται με κατάλληλη συσκευή η οποία αυξάνει την τάση βαθμιαία, έως ότου επέλθει διάσπαση στο δείγμα του λαδιού, το οποίο είναι τοποθετημένο στο δοχείο που περιλαμβάνει η συσκευή. Η τιμή διάσπασης που μετράται αναγράφεται και εκτυπώνεται. Η ελάχιστη τιμή της τάσης

διάσπασης για τους μετασχηματιστές στα δίκτυα μεταφοράς στην Ελλάδα είναι 22kV/mm. Για την απομάκρυνση ρύπων και την βελτίωση της διηλεκτρικής αντοχής μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες διατάξεις καθαρισμού λαδιών (φίλτρα).

4.2.1.4 Έλεγχος επιφανειακής τάσης στο μονωτικό λάδι

Το μονωτικό λάδι τοποθετείται σε δοχείο σε θερμοκρασία 25οC, το οποίο περιέχει αποσταγμένο νερό, το λάδι επιπλέει διότι έχει μικρότερο ειδικό βάρος από το νερό. Έτσι δημιουργείται μια διαχωριστική γραμμή «μεμβράνη» ανάμεσα στα δύο υγρά. Η δύναμη σε δύνες ανά εκατοστό, που απαιτείται για να διασπαστεί η «μεμβράνη» που διαχωρίζει τα δύο υγρά, είναι η επιφανειακή τάση του μονωτικού λαδιού. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται με δακτυλιοειδή αγωγό κινούμενο με κατεύθυνση προς τα επάνω, δια μέσω της «μεμβράνης». Όσοι περισσότεροι ρύποι περιέχονται στο μονωτικό λάδι, τόσο μικρότερη είναι η δύναμη της διάσπασης, διότι εξασθενεί η «μεμβράνη». Οι ρύποι μπορεί να είναι σωματίδια από βερνίκια, χρώματα και προϊόντα οξείδωσης, ενώ ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την επιφανειακή τάση είναι η έκθεση του μονωτικού λαδιού στο φως.

4.2.1.5 Έλεγχος βαθμού εξουδετέρωσης του μονωτικού λαδιού

Ο βαθμός εξουδετέρωσης μαζί με την επιφανειακή τάση δείχνουν εάν το μονωτικό λάδι είναι κατάλληλο ή χρειάζεται να αντικατασταθεί. Με τον έλεγχο αυτό διερευνάται η ποσότητα ύπαρξης οργανικών οξέων τα οποία είναι επιβλαβή για το μονωτικό σύστημα. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο επιτόπου με ανεκτή απόκλιση, όσο και σε εργαστηριακό χώρο. Τα οξέα ενδέχεται να δρουν καταλυτικώς στην διαδικασία αποσύνθεσης του χαρτιού, να δημιουργούν διάβρωση και να αυξάνουν την διαλυτότητα του νερού στο λάδι.

4.2.1.6 Έλεγχος συντελεστή ισχύος του μονωτικού λαδιού

Ο συντελεστής ισχύος εκφράζει τις διηλεκτρικές απώλειες του μονωτικού λαδιού, λόγω του ρεύματος διαρροής που δημιουργείται. Εάν ο συντελεστής ισχύος έχει υψηλή τιμή, τότε το μονωτικό λάδι σημαίνει ότι είναι πιθανόν μολυσμένο από σωματίδια υποβάθμισης. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε επιτόπου με την χρήση κατάλληλης μετρητικής

διάταξης, ή εργαστηριακά όπου η μέτρηση πραγματοποιείται στους 25°C και 100°C.

4.2.1.7 Επιβραδυντές οξείδωσης του μονωτικού λαδιού

Όπως έχουμε αναφέρει, ο μετασχηματιστής πρέπει να είναι απαλλαγμένος από την υγρασία και το οξυγόνο, για τον λόγο προστίθενται στα μονωτικά λάδια κάποιες αντιοξειδωτικές ουσίες σε συγκεκριμένες ποσότητες. Τα αντιοξειδωτικά κατά την διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή εξαφανίζονται, ως εκ τούτου πρέπει να αντικαθιστώνται. Η ποσότητα των αντιοξειδωτικών πρέπει να είναι 0,3% του συνολικού βάρους του λαδιού. Η περιεκτικότητα αντιοξειδωτικού ελέγχεται κάθε 3-5 χρόνια.

4.2.1.8 Έλεγχος φουρανίων του μονωτικού λαδιού

Η θερμική γήρανση προκαλεί την παραγωγή χημικών ενώσεων διαλυτών στο λάδι. Οι κυριότερες ενώσεις είναι τα φουράνια τα οποία δημιουργούνται κυρίως από την θερμική γήρανση του χαρτιού. Οι μέθοδοι εκτίμησης των περιεχόμενων στο μονωτικό λάδι φουρανίων υλοποιούνται μέσω δειγματοληψίας μονωτικού λαδιού, χωρίς η διακοπή λειτουργίας του μετασχηματιστή να είναι απαραίτητη. Οι κυριότερες μέθοδοι είναι οι εξής :

- i) χρωματογραφία υγρής φάσης
- ii) αεριοχρωματογραφία
- iii) χρωματική μέθοδος ανίχνευσης
- iv) χρωματογραφική μέθοδος διαπερατότητας

Προς το παρόν δεν υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές που να ορίζουν τα όρια συγκέντρωσης φουρανίων, επομένως δεν είναι δυνατόν να οργανωθεί συντήρηση βασισμένη στον έλεγχο της συγκέντρωσης φουρανίων.



Εικόνα 4.35 Συσκευή ελέγχου διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού

4.2.2 Έλεγχος συστήματος μόνωσης

4.2.2.1 Μέτρηση της αντίστασης της μόνωσης

Όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, για την εκτίμηση της κατάστασης της μόνωσης των τυλιγμάτων χρησιμοποιούμε το όργανο μέτρησης Megger.

Μέτρηση του συντελεστή ισχύος

Με τη μέτρηση αυτή εκτιμάται η μόνωση του μετασχηματιστή και των μονωτήρων διέλευσης. Για την μέτρηση αυτήν χρησιμοποιούμε ένα όργανο, το οποίο λειτουργεί με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Οι μέθοδοι διαφέρουν στις συνδεσμολογίες του οργάνου. Λαμβάνονται υπόψη οι χωρητικότητες ανάμεσα σε πυρήνα - τυλίγματα και δεξαμενή, για κάθε φάση ξεχωριστά. Το

όργανο αυτό διαθέτει τρεις ακροδέκτες, αυτόν της υψηλής τάσης, αυτόν της γείωσης και τον ακροδέκτη μέτρησης.

- Η διαμόρφωση UST του οργάνου : Ο ακροδέκτης γείωσης συνδέεται στην θέση guard έτσι το ρεύμα που τον διαρρέει δεν μετράται. Ο ακροδέκτης μέτρησης συνδέεται στην είσοδο του οργάνου. Έτσι μετράται το ρεύμα που διαρρέει τη μόνωση ανάμεσα στους ακροδέκτες υψηλής τάσης και μέτρησης του οργάνου.
- Η διαμόρφωση GST του οργάνου : Ο ακροδέκτης μέτρησης και ο ακροδέκτης γείωσης, συνδέονται στην είσοδο του οργάνου. Έτσι μετρώνται όλα τα ρεύματα που διαρρέουν που διαρρέουν την μόνωση, ανάμεσα στον ακροδέκτη υψηλής τάσης του οργάνου και της γης.
- Η διαμόρφωση GSTg του οργάνου : ο ακροδέκτης μέτρησης συνδέεται στην θέση guard και ο ακροδέκτης γείωσης συνδέεται στην είσοδο του οργάνου. Έτσι μετράται μόνο το ρεύμα διαρροής ανάμεσα στον ακροδέκτη υψηλής τάσης του οργάνου και τη γη.



Εικόνα 4.36 Όργανο MEGGER

4.2.2.2 Έλεγχος μονωτήρων διέλευσης

Συντελεστής ισχύος

Μετρώντας τον συντελεστή ισχύος της μόνωσης των μονωτήρων διέλευσης, προσδιορίζεται το επίπεδο μόλυνσης ή υποβάθμισης της μόνωσης. Σε ιδανικές συνθήκες ο συντελεστής ισχύος μετράται ίσος με το μηδέν, οι αποκλίσεις από την τιμή αυτή οφείλονται σε υποβάθμιση των μονωτικών υλικών. Τα όργανα που πραγματοποιούν τις μετρήσεις αυτές, μπορούν επίσης να μετρήσουν μεγέθη όπως τις διηλεκτρικές απώλειες και την

χωρητικότητα. Οι επιτόπου μετρήσεις των μεγεθών που αναφέρουμε, ονομάζονται Doble.

Ο μονωτήρας διέλευσης θεωρείται ότι διαθέτει κύρια μόνωση και μόνωση λήψης. Η κύρια μόνωση, είναι του πυρήνα και η μόνωση λήψης είναι η μόνωση του μονωτήρα λήψης. Για την μέτρηση του συντελεστή ισχύος στους μονωτήρες διέλευσης ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Καθαρισμός των μονωτήρων για την αποφυγή επιδράσεων από ρεύματα ερπυσμού και γείωση των απέναντι τυλιγμάτων. Στην συνέχεια απομάκρυνση του καλύμματος του ακροδέκτη λήψης, βραχυκύκλωση του τυλίγματος στο οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις, υλοποίηση μετρήσεων των χωρητικότητων για κάθε συνδεσμολογία του οργάνου. Οι συνδεσμολογίες είναι δύο UST και GST, για τις οποίες γίνεται εκτεταμένη αναφορά στην προηγούμενη υποενότητα (3) παράγραφο (3.2) του κεφαλαίου.

- Για τον συντελεστή ισχύος οι μετρήσεις είναι δύο. Η μέτρηση της κύριας μόνωσης και η μέτρηση της μόνωσης λήψης.
- Εάν δεν υπάρχει ακροδέκτης λήψεων στους μονωτήρες διέλευσης τότε οι μέτρησή μου μπορεί να γίνει είναι μία τρίτη, η μέτρηση κολάρου υπό τάση.

Η μέτρηση αυτή πραγματοποιείται καθώς ο μετασχηματιστής βρίσκεται υπό τάση και απαιτείται μεγάλη προσοχή. Για την μέτρηση αυτή χρησιμοποιούνται τα θερμά κολάρα ως αγωγοί υπό τάση. Με την μέθοδο αυτή πραγματοποιείται έλεγχος της στάθμης του λαδιού και βοηθητικός έλεγχος σε περίπτωση που οι γενικές δοκιμές λήψεων αναδεικνύουν πιθανή ύπαρξη προβλήματος.

4.2.2.3 Συντελεστής απωλειών

Με την μέτρηση του συντελεστή απωλειών εκτιμάται το ρεύμα διαρροής διαμέσω του λαδιού. Σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές ο συντελεστής ισχύος ταυτίζεται με τον συντελεστή απωλειών μέχρι την τιμή 0.1, ενώ πάνω από αυτήν την τιμή οι συντελεστές αυτοί έχουν απόκλιση έως και 30%.

4.2.2.3.1 Διηλεκτρικές απώλειες

Ο προσδιορισμός των διηλεκτρικών απωλειών στο τμήμα του μονωτήρα που βρίσκεται κάτω από το κολάρο, γίνεται με την εφαρμογή τοπικών καταπονήσεων μέσω της δοκιμής θερμού κολάρου. Από την διαδικασία με την χρήση του οργάνου Megger οι μετρήσεις συγκρίνονται με ένα όριο και αν αυτό ξεπεραστεί τότε ο μονωτήρας είναι μη αποδεκτός.

4.2.2.3.2 Μέθοδος διαλυμένων αερίων

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μονωτήρες οι οποίοι περιέχουν λάδι, αν και κατασκευαστικά συνιστάται να μην ανοίγονται οι μονωτήρες διότι καταργείται η εργοστασιακή συμπίεση και στεγανοποίησή τους. Ωστόσο σε περίπτωση εμφάνισης προβλήματος, μπορεί να εφαρμοστεί σε μονωτήρες η μέθοδος αυτή. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μεθόδου γίνεται βάσει του αντίστοιχου κανονισμού.

4.2.3 Έλεγχος εναλλάκτης θερμότητας

Η ανύψωση θερμοκρασίας καθορίζεται από την λειτουργία του εναλλάκτη. Η θερμοκρασία του λαδιού αυξάνεται από την θερμότητα που εκλύουν ο πυρήνας και τα τυλίγματα σε αυτό. Το μέγεθος της αύξησης εξαρτάται από την απόδοση του εναλλάκτη, η οποία μειώνεται όσο ρυπαίνονται οι επιφάνειες ψύξεως. Οι εναλλάκτες πρέπει να καθαρίζονται συχνά, όταν έχουν πτερύγια ο καθαρισμό μπορεί να γίνει με πεπιεσμένο αέρα, νερό, νερό με διάλυμα, ατμός, ή νερό υψηλής πίεσης. Για την αποφυγή οποιασδήποτε βλάβης ή ζημιάς θα πρέπει να γίνονται όλες οι ενέργειες βάσει των προδιαγραφών.

Συνηθέστερες βλάβες στους εναλλάκτες είναι :

- Φραγμένες σωληνώσεις, οι οποίες αυξάνουν το φορτίο του κινητήρα και προκαλούν πτώση του θερμικού. Σε αυτή την περίπτωση συνιστάται καθαρισμός των σωληνώσεων.
- Όσο ο ζεστός αέρας κυκλοφορεί ανάμεσα στις ψήκτρες, μπορεί να προκληθεί μέτρηση αυξημένης θερμοκρασίας και οι κινητήρες να αυξήσουν φορτίο, με αποτέλεσμα πτώση θερμικού. Σε αυτή την περίπτωση συνιστάται τοποθέτηση εκτροπών αέρος ώστε ο θερμός αέρας να κατευθύνεται προς τα επάνω.

Οι εναλλάκτες είναι πολύ σημαντικό να συντηρούνται διότι είναι πολύ δύσκολο εγχείρημα να επισκευάζονται ή να αντικαθίστώνται καθώς είναι πλήρεις από λάδι και προσαρμοσμένοι (κολλημένοι) επάνω στον μετασχηματιστή.

4.2.3.1 Θερμογραφικός έλεγχος

Ο έλεγχος αυτός είναι μία μέθοδος που βασίζεται στην απεικόνιση της κατανομής θερμότητας στον ηλεκτρικό και μηχανολογικό εξοπλισμό, με την χρήση θερμογραφικής κάμερας ή αλλιώς θερμοκάμερας. Αυτό διότι σε περίπτωση δυσλειτουργίας, τα εξαρτήματα ενός συστήματος παρουσιάζουν αύξηση της θερμοκρασίας τους, σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο ή κάποιο σημείο αναφοράς. Παρατηρώντας το θερμογράφημα ενός μετασχηματιστή μπορούμε να εντοπίσουμε χαλαρές συνδέσεις, ασύμμετρη φόρτιση, συνθήκες υπερφόρτισης, φθορά και διάφορα ακόμα προβλήματα υλικού. Η διαδικασία αυτή, της θερμογραφίας, καλείται υπέρυθρη ραδιομετρία ή υπέρυθρη σάρωση ή σάρωση θερμοκρασιών.



Εικόνα 4.37 διάφορες θερμογραφικές κάμερες

Η θερμογραφική κάμερα αποτελεί ένα όργανο υψηλής τεχνολογίας, το οποίο καταγράφει την φυσική υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπει ένα θερμό σώμα, και στην συνέχεια παράγει μία θερμική απεικόνιση. Η απεικόνιση αυτή είναι το θερμογράφημα, το οποίο λαμβάνουμε από την κάμερα με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Η λειτουργία της κάμερας είναι να συγκρίνει την διαφορά της μετρούμενης θερμοκρασίας από την θερμοκρασία αναφορά που ορίζουμε. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας δεν χρειάζεται να διακοπεί η ηλεκτρική τροφοδότηση του μετασχηματιστή και αυτό είναι πολύ σημαντικό για προφανείς λόγους κόστους.

Ορισμένες εφαρμογές της κάμερας είναι οι ακόλουθες :

- Εφαρμογή σε δεξαμενές : Εάν η στάθμη του λαδιού είναι χαμηλή σε κάποιο σημείο, θα είναι πιο σκοτεινή η εικόνα σε σχέση με την εικόνα στα σημεία όπου η στάθμη του λαδιού είναι φυσιολογική.
- Εφαρμογή σε μονωτήρες διέλευσης : Εάν η σύνδεση είναι χαλαρή σε κάποιο σημείο, τότε η εικόνα στο σημείο αυτό θα είναι πιο κόκκινη διότι θα εμφανίζεται ως σημείο με αυξημένη θερμοκρασία.
- Εφαρμογή σε αλεξικέραυνα : Εάν έχει εισχωρήσει υγρασία στην πορσελάνη ενός αλεξικέραυνου, τότε η εικόνα θα είναι πιο σκοτεινή σε σχέση με την υπόλοιπη υγιή περιοχή, αυτό σημαίνει πως η σκοτεινή περιοχή έχει αυξημένη θερμοκρασία.
- Εφαρμογή θερμού κολάρου : Σε περίπτωση εισχώρησης υγρασίας, η περιοχή έχει πιο σκοτεινό χρωματισμό.
- Εφαρμογή σε ψυγεία : Εάν υπάρχει βλάβη σε κάποιο σημείο στο ψυγείο και παρεμποδίζεται η κυκλοφορία του λαδιού, τότε η περιοχή όπου το λάδι είναι στάσιμο θα είναι πιο σκοτεινή.
- Εφαρμογή στον μεταγωγέα λήψεων : Εάν υπάρξει αύξηση θερμοκρασίας στον μεταγωγέα λήψεων, η περιοχή του λαμβάνει πιο φωτεινό χρώμα, συνεπώς υπάρχει μεταβολή λήψεων. Όταν δεν γίνεται μεταβολή λήψεων η θερμοκρασία του μεταγωγέα είναι αμελητέα.

Εάν εμφανιστεί χαμηλή στάθμη λαδιού τότε υπάρχει πρόβλημα με την στεγανοποίηση. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις ο μετασχηματιστής θα πρέπει να απενεργοποιείται ώστε να αποκατασταθεί κάθε είδους δυσλειτουργία για την αποφυγή περεταίρω προβλημάτων.



Εικόνα 4.38 φωτογραφία μετασχηματιστή από θερμογραφική κάμερα

4.2.4 Όργανα μέτρησης ηλεκτρονόμοι

4.2.4.1 Θερμόμετρο ελαίου

Με το όργανο αυτό ελέγχουμε την θερμοκρασία του λαδιού του μετασχηματιστή. Η λειτουργία του οργάνου βασίζεται στην μεταβολή της πίεσης. Το θερμόμετρο λαδιού αποτελείται από έναν βολβό ο οποίος περιέχει υγρό ή αέριο και τοποθετείται στο πάνω μέρος της δεξαμενής. Όσο μεταβάλλεται η θερμοκρασία του λαδιού το υγρό ή αέριο λόγω συστολής και διαστολής μετακινεί τον δείκτη του οργάνου. Τα θερμόμετρα αυτά επιβάλλεται να ελέγχονται τουλάχιστον μία φορά ανά έτος, ενώ μερικά από τα σημεία ελέγχου και συντήρησης είναι η φθορά του σπιδράλ του ενδεικτικού, η σύνδεση του σωλήνα με το ενδεικτικό, η πιθανότητα ύπαρξης σκουριάς και υγρασίας, η κίνηση του δείκτη και τέλος ο έλεγχος των επαφών.

4.2.4.2 Θερμόμετρο τυλιγμάτων

Με το όργανο αυτό καταγράφουμε έμμεσα και όχι άμεσα την θερμοκρασία στο θερμότερο σημείο του τυλίγματος καθώς η τιμή που προκύπτει είναι προϊόν προσομοίωσης και όχι πραγματική θερμοκρασία. Οι έλεγχοι για τα όργανα αυτά είναι, ο έλεγχος για διαρροή (όταν παρατηρούμε χαμηλή θερμοκρασία), ο ηλεκτρικός έλεγχος των επαφών, η σύνδεση του τριχοειδούς σωλήνα μεταξύ υποδοχής βολβού και ενδεικτικού, και η αναβαθμονόμιση (καλιμπράρισμα) είτε αντικαθιστώντας τις λήψεις του μετασχηματιστή έντασης, είτε συνδέοντας ωμικές αντιστάσεις στον πίνακα ελέγχου. Για να έχουμε ακριβείς μετρήσεις με τα συγκεκριμένα όργανα θα πρέπει το φορτίο του μετασχηματιστή να είναι ίσο με το ονομαστικό.



Εικόνα 4.39 Διάφορα θερμόμετρα

4.2.4.3 Ενδεικτικό στάθμης ελαίου

Με το όργανο αυτό καταγράφουμε την στάθμη του λαδιού κάνοντας χρήση πλωτήρα ο οποίος είναι μαγνητικά συζευγμένος με το ενδεικτικό. Όσο η στάθμη του λαδιού ανεβαίνει ο μηχανισμός του πλωτήρα περιστρέφει έναν μαγνήτη (που βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά της δεξαμενής) και η κίνηση αυτή ενεργοποιεί έναν άλλο μαγνήτη (που βρίσκεται στην εξωτερική πλευρά της δεξαμενής) ο οποίος καθώς περιστρέφεται μετακινεί τον δείκτη. Στο κέντρο της κλίμακας του οργάνου υπάρχει η ένδειξη μέσης θερμοκρασίας σε βαθμούς ο C και στα δύο άκρα οι ενδείξεις χαμηλής και υψηλής στάθμης. Ο έλεγχος της στάθμης του λαδιού γίνεται σε συνδυασμό με το θερμόμετρο ελαίου. Ο έλεγχος του οργάνου γίνεται ανά 3-5 έτη και τα τυπικά σημεία ελέγχου είναι ο έλεγχος των ηλεκτρικών επαφών σήμανσης χαμηλής στάθμης, η ύπαρξη υγρασίας, η πιθανή διαρροή λαδιού και τέλος η απομάκρυνση του ενδεικτικού από τη δεξαμενή.

4.2.4.4 Βαλβίδες ανακούφισης

Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται για προστασία από εσωτερική υπερπίεση. Σε περίπτωση ενός οποιουδήποτε βραχυκυκλώματος ή γενικότερα κάποιου σφάλματος, το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται ατμοποιεί ακαριαία το μονωτικό λάδι με αποτέλεσμα την δημιουργία αερίων. Εάν η βαλβίδα λειτουργεί σωστά τότε η πίεση που δημιουργείται εκτονώνεται μέσα σε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου, ενώ σε διαφορετική περίπτωση οι συνέπειες μπορεί να είναι δεινές, η δεξαμενή μπορεί να καταστραφεί και ο περιβάλλοντας χώρος τίθεται σε άμεσο κίνδυνο όπως και οι άνθρωποι που πιθανός να βρίσκονται πλησίον.

Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται στις βαλβίδες ανά έτος και μετά από σφάλμα είναι, αρχικά η δοκιμή των επαφών σήμανσης με χειροκίνητο χειρισμό της βαλβίδας, στην συνέχεια έλεγχος σωστής λειτουργίας της συσκευής μέσω του ενδεικτικού πείρου. Τέλος ανά 3-5 έτη ελέγχουμε το τμήμα του μετασχηματιστή γύρω απ την ανακουφιστική βαλβίδα και σε περίπτωση εμφάνισης διαρροής λαδιού θα πρέπει να αντικατασταθεί η φλάντζα στεγανοποίησης, διαφορετικά η βαλβίδα. Η πιθανότερη εκδοχή, είναι η διαρροή να οφείλεται στην φλάντζα.

Οι βαλβίδες ανακούφισης δεν πρέπει να βάζονται διότι η μπογιά είναι πολύ πιθανόν να εμποδίσει τον πείρο, με συνέπεια να μην γίνει η εκτόνωση και να καταστραφεί ο μετασχηματιστής.

4.2.4.5 Ηλεκτρονόμος άμεσης εκτόνωσης

Ο ηλεκτρονόμος αυτός ενεργοποιείτε πριν την συσκευή ανακούφισης πίεσης και σταματάει την λειτουργία του μετασχηματιστή, όταν διαπιστώνει απότομη αύξηση της πίεσης η οποία οφείλεται στην δημιουργία ηλεκτρικών τόξων στο εσωτερικό του. Εάν υπάρχουν φυσιολογικές μεταβολές της πίεσης λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας ή αιχμές από αντλίες ο ηλεκτρονόμος δεν ενεργοποιείτε.

Η συντήρηση του ηλεκτρονόμου πραγματοποιείται ανά 3-5 έτη. Ο βολβός συμπίεσεων ελέγχεται με μανόμετρο, καθώς επίσης ελέγχεται το κύκλωμα διέγερσης με τη βοήθεια πολυμέτρου και αντιστοίχιση σημάνσεων.

Σε περίπτωση ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου, ο μετασχηματιστής θα πρέπει να τεθεί υπό κανονική τροφοδότηση αφού βρεθούν αίτια και αποκατασταθεί η βλάβη.

4.2.4.6 Ηλεκτρονόμος Buchholz

Η συσκευή αυτή εφαρμόζεται μόνο σε μετασχηματιστές που διαθέτουν δοχείο διαστολής και έχει στο εσωτερικό της δύο θαλάμους με λάδι. Ο κάθε θάλαμος έχει από έναν πλωτήρα ο οποίος ενεργοποιεί το αντίστοιχο ρελέ. Η αρχή λειτουργίας της συσκευής βασίζεται στις φυσαλίδες που δημιουργούνται από ελκυόμενα αέρια στο εσωτερικό της δεξαμενής σε περίπτωση εμφάνισης διανορευμάτων, είτε τοπικής υπερθέρμανσης ή μερικών εκκενώσεων. Οι φυσαλίδες αυτές κινούνται προς τα επάνω και μεταφέρονται από την δεξαμενή προς το δοχείο διαστολής μέσω των σωληνώσεων και κατ' επέκταση μέσω του ηλεκτρονόμου Buchholz. Όταν φτάσουν σε αυτόν μεταφέρονται στον άνω θάλαμο και η στάθμη του λαδιού χαμηλώνει, ενώ αν η στάθμη του λαδιού πέσει σε πολύ χαμηλά επίπεδα (άδειο δοχείο διαστολής), δίνεται εντολή για την απενεργοποίηση του μετασχηματιστή.



Εικόνα 4.40 Ηλεκτρονόμος Buchholz

Ο ηλεκτρονόμος Buchholz ελέγχεται ανά 3-5 έτη ως προς τις επαφές του με την βοήθεια πολυμέτρου, επίσης ελέγχεται από το παράθυρο παρακολούθησης ως προς την λειτουργία του κατά την παραγωγή αερίων.

4.2.4.7 Πίνακας ελέγχου

Ο πίνακας ελέγχου περιέχει όλα τα βοηθητικά εξαρτήματα εκτός όσων βρίσκονται πάνω στον μετασχηματιστή, είναι ένα μεταλλικό ερμάριο που εμποδίζει την εμφάνιση υγρασίας αλλά και την πιθανότητα εμφάνισης οξειδωσης. Τα εξαρτήματα που περιέχονται σε αυτόν είναι ασφάλειες,

διακόπτες, ηλεκτρονόμοι εκκινήτες, ηλεκτρονόμοι συναγερμών, κλεμμοσειρές και ακροκιβώτια δοκιμών καθώς επίσης και βοηθητική τροφοδοσία συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος.

4.2.4.8 Αφυγραντής

Ο αφυγραντής είναι η συσκευή που απομακρύνει την ευρισκόμενη στον αέρα του άνω τμήματος του δοχείου διαστολής υγρασία. Επίσης οι αφυγραντές με τους υγροσκοπικούς κρυστάλλους που διαθέτουν επιτρέπουν την αναπνοή του μετασχηματιστή αποτρέποντας την εισροή υγρασίας σε αυτόν. Κάποιοι εξ αυτών διαθέτουν ειδική μεμβράνη η οποία δεν επιτρέπει την άμεση επαφή των κρυστάλλων με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Οι υγροσκοπικοί αυτοί κρύσταλλοι είναι γνωστοί και ως Silica gel . Το Silica gel όταν απορροφήσει υγρασία της τάξης του 30-40% του βάρους του, φτάνει σε σημείο κορεσμού και το χρώμα του αλλάζει. Τότε συνιστάται αντικατάστασή του, είτε ξήρανσή του μέσω θέρμανσης έτσι ώστε να επανέλθει στο αρχικό του χρώμα.

Η αρχή λειτουργίας των σύγχρονων αυτών αφυγραντών έχει ως εξής, η υγρασία ανιχνεύεται από ενσωματωμένους αισθητήρες, μόλις ξεπεραστεί το όριο αυτής, ενεργοποιείτε μία θερμαντική αντίσταση με την βοήθεια της οποίας το περιεχόμενο υλικό θερμαίνεται και αποβάλλει την υγρασία χωρίς οποιαδήποτε εξωτερική παρέμβαση. Το κόστος των σύγχρονων αφυγραντών σε σχέση με τους συμβατικούς είναι σαφώς μεγαλύτερο, αντισταθμίζεται όμως από το χαμηλό κόστος της αντικατάστασης του υλικού.



Εικόνα 4.41 Αφυγραντής που περιέχει silica gel προσαρμοσμένος στο δοχείο διαστολής

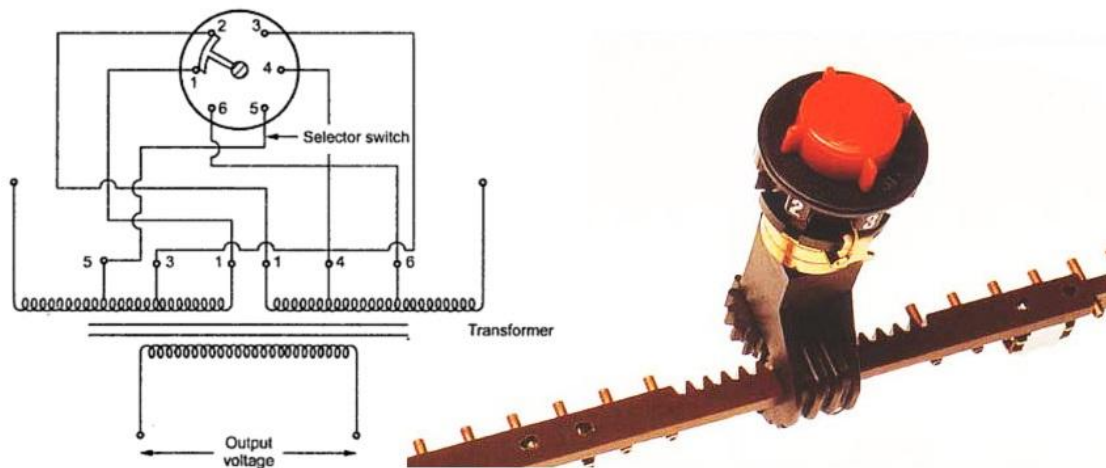
4.2.4.9 Μεταγωγέας λήψεων

Ο μεταγωγέας λήψεων έχει κατασκευαστεί ώστε να λειτουργεί καθώς λειτουργεί ο μετασχηματιστής και τοποθετείται στην κύρια δεξαμενή μαζί με τον πυρήνα και τα τυλίγματα. Ο χειρισμός του μεταγωγέα γίνεται με ηλεκτρονικό μηχανισμό. Για την καλή προσαρμογή των επαφών πριν από την αρχική ενεργοποίηση του μεταγωγέα ή κάθε φορά μετά από αλλαγή της θέσης λήψης ελέγχουμε τον λόγο μετασχηματισμού.

Για την καλύτερη δυνατή συντήρηση του μεταγωγέα και τον εντοπισμό βλαβών πραγματοποιούμε μία σειρά από ελέγχους σε διάφορες διατάξεις.

- Ο αριθμός των χειρισμών του μεταγωγέα υπολογίζεται με την τοποθέτηση μετρητή στον πίνακα ελέγχου του, και η μέτρηση αυτή μας δίνει το επίπεδο φθοράς του. Οι μεταγωγείς τύπου κενού αντέχουν περίπου 300000 χειρισμούς, ενώ οι πιο σύγχρονοι μεταγωγείς τύπου λαδιού αντέχουν από 50000 έως 100000 χειρισμούς .
- Ένας άλλος έλεγχος που πραγματοποιείται και με τον οποίο βλέπουμε την υπολειπόμενη διάρκεια ζωής ενός μεταγωγέα, είναι η μέτρηση της ωμικής αντίστασης των επαφών και η σύγκριση της τιμής αυτής με την αρχική. Η μέτρηση αυτή γίνεται με πολύμετρο και ο μετασχηματιστή βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Όσο η αντίσταση αυξάνεται η διάρκεια ζωής μειώνεται. Η εκτίμηση της γήρανσης γίνεται συνυπολογίζοντας την ένταση του ρεύματος, την θερμοκρασία και τον σχεδιασμό των επαφών.
- Επιπλέον ελέγχεται η θερμοκρασίας της κύριας δεξαμενής του μετασχηματιστή. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, είναι υψηλότερη από αυτήν του μεταγωγέα λήψεων. Όσο οι μεταγωγικές επαφές φθείρονται με το πέρασμα του χρόνου η αντίστασή τους αυξάνεται και δημιουργούνται θερμά σημεία τα οποία αυξάνουν την θερμοκρασία του δοχείου του μεταγωγέα μειώνοντας την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μεταγωγέα και κύριας δεξαμενής. Η έντονη φθορά μπορεί να διαπιστωθεί μετρώντας την διαφορά θερμοκρασίας με κατάλληλους αισθητήρες.
- Υπό κανονικές συνθήκες η μορφή του ρεύματος του μηχανισμού οδήγησης είναι συγκεκριμένη, σε περιπτώσεις φθοράς γραναζιών, επαφών ή άλλων συνδέσμων η μορφή του αυτή μεταβάλλεται και μας βοηθά να διαπιστώσουμε τις φθορές αυτές. Ο έλεγχος της μορφής του ρεύματος σε μεταγωγείς λήψεων που ελέγχονται από μηχανισμούς ελατηρίου μας βοηθά να διαπιστώσουμε πιθανή χαλαρότητα.

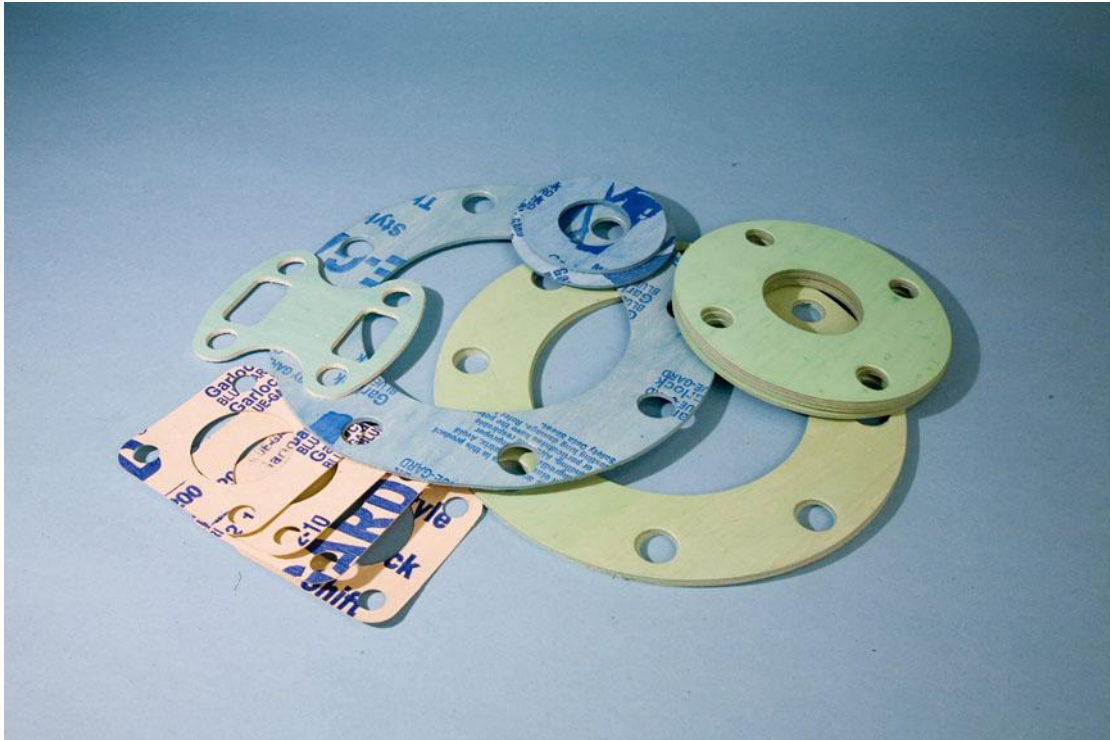
- Για να εντοπίσουμε πιθανή ύπαρξη υγρασίας στον μεταγωγέα ελέγχουμε τον αφυγράντη, ο έλεγχος αυτός είναι οπτικός όπως και στην περίπτωση του αφυγράντη της κύριας δεξαμενής . Εάν ο αφυγράντης δεν είναι ξηρός ή έχει εισχωρήσει σε αυτόν υγρασία απαιτείται η ξήρανση η αντικατάστασή του.
- Τέλος ελέγχεται με την βοήθεια πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων οι μεταβολές στα γρανάζια, ή στις μεταγωγικές επαφές. Για τον έλεγχο αυτό χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό το οποίο συγκρίνει τα ακουστικά σήματα με τις πρότυπες τιμές.



Εικόνα 4.42 κύκλωμα και εικόνα μεταγωγέα λήψεων

4.2.4.10 Φλάντζες

Οι φλάντζες παίζουν σημαντικό ρόλο στην στεγανοποίηση του εξοπλισμού και πρέπει να πληρούν πολλά τεχνικά κριτήρια. Η αφαίρεση ή και αντικατάστασή τους θα πρέπει να γίνεται εύκολα. Επίσης θα πρέπει να είναι στεγανές, αδιαπέραστες και να μην ρυτταίνουν το λάδι. Επιπλέον θα πρέπει να αντέχουν τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές θερμοκρασίες και να είναι ελαστικές για να μπορούν να απορροφήσουν πιθανές ατέλειες των σφραγιζόμενων επιφανειών. Τέλος θα πρέπει να είναι ανθεκτικές και να μην συνθλίβονται όταν φορτίζονται ή δέχονται δυνάμεις υπερπίεσης ή υποπίεσης σε συνθήκες κένωσης.



Εικόνα 4.43 Φλάντζες

Οι διαρροές που συμβαίνουν στις φλάντζες συμβαίνουν λόγω της μη εκπλήρωσης των παραπάνω κριτηρίων. Οι συχνότερες αιτίες διαρροής είναι, η λάθος επιλογή φλάντζας λόγω τύπου, ή μεγέθους καθώς επίσης και η υπερβολική ροπή σύσφιξης κατά την τοποθέτηση. Για την σωστή επιλογή φλάντζας οι παράμετροι που εξετάζουμε είναι το υλικό, η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, ο τύπος του μονωτικού υγρού, η πίεση στο εσωτερικό της δεξαμενής και τέλος το σχέδιο της επιφάνειας σφράγισης.

Οι φλάντζες ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους χωρίζονται στους ακόλουθους τύπους.

- Φελλού - Νιτριλίου: Το υλικό αυτό έχει καλή εφαρμογή στις επιφάνειες, καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχουν αυλάκια και όρια. Η αποθήκευση πρέπει να γίνεται προσεκτικά και χρόνος αποθήκευσης δεν πρέπει να ξεπερνά τα δύο χρόνια. Η δυνατότητα συμπίεσης είναι όμοια με τις φλάντζες φελλού – νεοπρενίου (ii).
- Φελλού - Νεοπρενίου: Οι φλάντζες αυτές υστερούν σε σχέση με τις προηγούμενες. Επειδή το υλικό αυτό είναι πορώδες θα πρέπει να στεγανοποιείται επαρκώς. Σε περίπτωση μεγάλης συμπίεσης ενδέχεται να «κλωσήσουν» λόγω σκλήρυνσης. Επίσης σε συνθήκες συστολών και διαστολών των επαπτόμενων επιφανειών ενδεχομένως να παρουσιάσουν διαρροές. Γενικά οι φλάντζες αυτές είναι σχετικά επιρρεπής σε διαρροές.

- Νιτριλίου: Οι φλάντζες αυτές χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εφαρμογές των μετασχηματιστών και το υλικό τους είναι ευρέως γνωστό και ως NBR ή Buna N και είναι διαφορετικό από το Butyl Rubber που είναι ακατάλληλο για μετασχηματιστές. Για τον λόγο αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά την επιλογή του υλικού. Σε υψηλές θερμοκρασίες η συμπεριφορά τους είναι καλύτερη από τις αντίστοιχες φελλού-νεοπρενίου. Συνιστάται να μην εκτίθενται στην ηλιακή ακτινοβολία διότι φθείρονται.
- Νιτόν: Οι φλάντζες αυτές λόγω της μεγάλης ανθεκτικότητας του υλικού, έχουν πολύ μικρή φθορά και είναι ιδανικές όταν απαιτείται μεγάλη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες ή σε εφαρμογές με κινούμενα μέρη. Το υλικό αυτό μοιάζει με το νιτρίλιο για τον λόγο αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την παραγγελία του. Το κόστος αυτών των φλαντζών είναι πολύ υψηλό.

Για την συντήρηση των φλαντζών σημαντικό κομμάτι είναι ο εντοπισμός και η αντιμετώπιση διαρροών όπως και ο καθαρισμός της επιφάνειάς τους. Ο καθαρισμός της επιφάνειας πρέπει να γίνεται προσεκτικά με στόχο την απομάκρυνση της υγρασίας, των λαδιών και γράσων καθώς επίσης και της σκουριάς. Για την επίτευξη αυτών χρησιμοποιείται βούρτσα η διαλυτικό. Οι ακαθαρσίες δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να πέφτουν εντός του μετασχηματιστή καθώς τα αποτελέσματα θα είναι καταστροφικά όταν αυτός ηλεκτριστεί.

Όσων αφορά τις διαρροές, το πρώτο βήμα είναι ο εντοπισμός τους και στην συνέχεια η αντιμετώπισή τους.

Εάν η διαρροή βρίσκεται κάτω από τη στάθμη του λαδιού, η περιοχή καθαρίζεται με διαλυτικό ή οινόπνευμα. Όταν απομακρύνουμε την σκόνη το σημείο που βρίσκεται η διαρροή φαίνεται σαν μαύρος λεκές.

Εάν η διαρροή συμβαίνει πάνω από τη στάθμη του λαδιού, για τον καθαρισμό χρησιμοποιούμε άζωτο με προκαθορισμένη πίεση. Εφόσον υπάρχει διαρροή στην περιοχή αυτή θα σχηματιστούν φυσαλίδες.

Εάν η διαρροή υφίσταται σε δεξαμενή που περιέχει λάδι έχουμε την δυνατότητα συγκολλήσεων, αφού πρώτα εξασφαλιστεί ότι δεν θα δημιουργηθούν εύφλεκτα αέρια από την υψηλή θερμότητα της συγκόλλησης.

Πιο συγκεκριμένα όταν η διαρροή έχει απόσταση περί τα 7cm από την στάθμη του λαδιού και το πάχος της δεξαμενής είναι άνω των 6mm, το λάδι ψύχει την θερμότητα της συγκόλλησης και δεν δημιουργείται κίνδυνος.

Όταν το πάχος της δεξαμενής είναι κάτω των 4,5mm, τοποθετείται και κολλάται ένα μεταλλικό κομμάτι στο σημείο διαρροής.

Ο απλούστερος τρόπος για να στεγανοποιήσουμε μία μικρή τρύπα είναι μέσω προσεκτικού λοξέματος. Αντίθετα μεγαλύτερες τρύπες δεν πρέπει να επισκευάζονται με αυτόν τον τρόπο αλλά εφαρμόζοντας στεγανοποίηση με γομαλάκα ή ακόμα και με αντικατάσταση του εξαρτήματος της δεξαμενής εφόσον αυτό είναι εφικτό.

Όσον αφορά τις συνδέσεις μεταξύ φλαντζών και παρότι είναι καλό αυτές να αποφεύγονται, σε αρκετές περιπτώσεις αυτό είναι αδύνατον να αποφευχθεί όταν υπάρχουν πολύ μεγάλα μήκη.

4.2.4.11 Μετασχηματιστές οργάνων

Για την μέτρηση του ρεύματος κάθε φάσης οι μετασχηματιστές ισχύος μπορεί να διαθέτουν εσωτερικούς ή εξωτερικούς μετασχηματιστές έντασης. Στους εξωτερικούς οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε μικρή απόσταση από τον μετασχηματιστή πρέπει να πραγματοποιούνται δειγματοληψίες λαδιού καθώς επίσης και δοκιμές συντελεστή ισχύος. Οι εσωτερικοί είναι ενσωματωμένοι στην εσωτερική πλευρά της δεξαμενής.

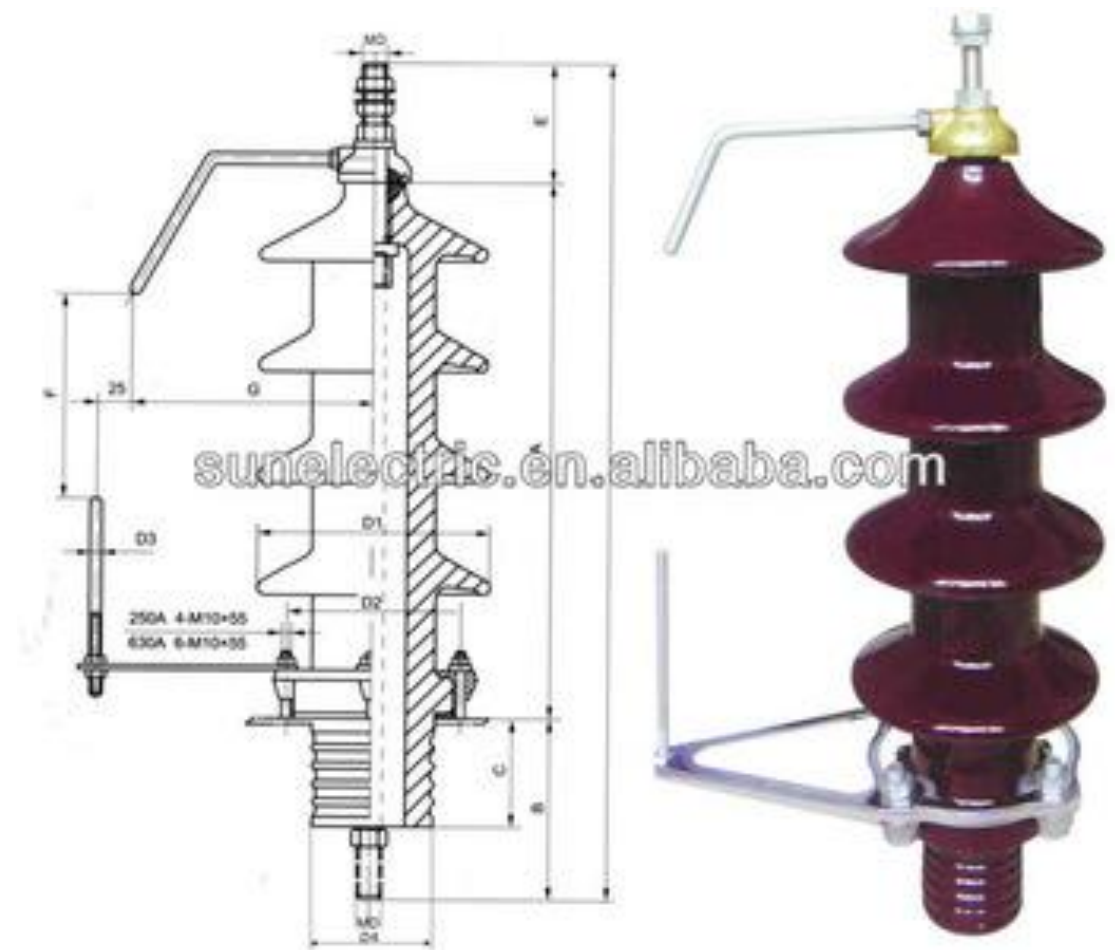
Οι μετασχηματιστές τάσης σε σχέση με τους μετασχηματιστές έντασης παρουσιάζουν λιγότερα προβλήματα.

4.2.4.12 Αλεξικέραυνα

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των υπερτάσεων που δημιουργούνται από την πτώση κεραυνών, διατηρώντας την τάση σε μία συγκεκριμένη τιμή. Η χρήση του αλεξικέραυνου επιβάλλεται και εγκαθίσταται κοντά στους μετασχηματιστές, σε απόσταση μικρότερη των 20m. Η σωστή λειτουργία και η συντήρηση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι πολύ σημαντική, διότι προφυλάσσει τα συστήματα, τόσο από πολυδάπανες καταστροφές, όσο και από καταστάσεις που μπορεί να κοστίζουν ακόμη και ανθρώπινες ζωές. Τα μέρη του αλεξικέραυνου είναι, ο σπινθηριστής και οι μη γραμμικές αντιστάσεις ανθρακικού πυριτίου.

Τα αλεξικέραυνα ελέγχονται οπτικά ως προς την διάβρωση και την χαλάρωση του αγωγού γείωσης, πιθανό σπάσιμο ή ράγισμα της πορσελάνης, πιθανές

υπερθερμάνσεις στις στεγανοποιήσεις, πιθανές ενδείξεις σχηματισμού ηλεκτρικών εκκενώσεων και τέλος την ενεργοποιημένη συσκευή ανακούφισης πίεσης.



Εικόνα 4.44 Διάταξη αλεξικέραυνου στον μονωτήρα πορσελάνης

Πίνακας περιεχομένων εικόνων και σχημάτων

Εικόνα 2.1 Απλό μαγνητικό κύκλωμα	15
Εικόνα 2.2 Καμπύλη μαγνήτισης	16
Εικόνα 2.3	17
Εικόνα 2.4 Μετασχηματιστής με θετικό συντελεστή αλληλεπαγωγής.....	18
Εικόνα 2.5 Πηνία σε μαγνητική σύζευξη.....	18
Εικόνα 2.6 Μετασχηματιστές σε κύκλωμα.....	20
Εικόνα 2.7 Μετασχηματιστές με εξαρτημένη πηγή.....	21
Εικόνα 2.8 Ιδανικός μετασχηματιστής με εξαρτημένη πηγή.....	23
Εικόνα 2.9 Ιδανικός μετασχηματιστής με εξαρτημένη πηγή.....	23
Εικόνα 2.10 Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού (μη ιδανικού) μετασχηματιστή	26
Εικόνα 2.11 Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον.....	26
Εικόνα 2.12 Ο βρόχος υστέρησης.....	29
Εικόνα 2.13 Αναπτυσσόμενα δινορεύματα στον πυρήνα	30
Εικόνα 2.14 Αρμονικά ρεύματα.....	36
Εικόνα 2.15 Είδη μετασχηματιστών	38
Σχήμα 3.1.....	42
Σχήμα 3.2.....	43
Σχήμα 3.3.....	43
Εικόνα 3.4 ΜΣ	44
Εικόνα 3.5 ΜΣ	44
Εικόνα 3.6 Δοχείο διαστολής.....	46
Εικόνα 3.7 Αφυγραντής ο οποίος περιέχει silica gel.....	47
Εικόνα 3.8 Ηλεκτρονόμος Buchholz.....	50
Εικόνα 3.9 Πινακίδα ΜΣ ελαίου της εταιρίας Tesar.....	51
Εικόνα 3.10 Πινακίδα Μ/Σ διανομής ΔΕΗ	53
Εικόνα 3.11 Πινακίδες Μετασχηματιστών ελαίου ΜΤ	54
Εικόνα 3.12 Εσωτερική όψη των τυλιγμάτων ΜΣ μέσης τάσης.	54
Εικόνα 3.13 Βαρέλι μεταφοράς μονωτικού λαδιού.....	56
Εικόνα 3.14 Παρασκευή χαρτιού Insuldur	57
Εικόνα 3.15 Χαρτί Pressboard.....	58
Εικόνα 3.16 Cottonboard Transformerboard Nomex	58
Εικόνα 4.1 Δειγματοληψία μονωτικού λαδιού	62
Εικόνα 4.2 Δειγματοληψία για την ανάλυση διαλυμένων.....	63
Εικόνα 4.3 Διάφοροι χρωματισμοί μονωτικών λαδιών	63
Εικόνα 4.4 Συσκευή ελέγχου διηλεκτρικής αντοχής του μονωτικού λαδιού	66
Εικόνα 4.5 Όργανο MEGGER.....	67
Εικόνα 4.6 διάφορες θερμογραφικές κάμερες.....	70
Εικόνα 4.7 φωτογραφία μετασχηματιστή από θερμογραφική κάμερα.....	71
Εικόνα 4.8 Διάφορα θερμόμετρα	73
Εικόνα 4.9 Ηλεκτρονόμος Buchholz.....	75
Εικόνα 4.10 Αφυγραντής που περιέχει silica gel προσαρμοσμένος στο δοχείο διαστολής.....	76
Εικόνα 4.11 κύκλωμα και εικόνα μεταγωγέα λήψεων	78

Εικόνα 4.12 Φλάντζες	79
Εικόνα 4.13 Διάταξη αλεξικέραυνου στον μονωτήρα πορσελάνης	82

Βιβλιογραφία

1. **“Ηλεκτρικές Μηχανές”** μέρος Β , Ι. Τεγόπουλου , Εκδόσεις Συμμετρία
2. **“Electric Machinery Fundamentals”** , S. Chapman , McGraw Hill
3. **“Schaum's Outline Electric Machines & Electro mechanics”** , S. Nasar , McGraw Hill
4. **“Ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος”** , Στέφανος Τουλόγλου - Βαγγέλης Στεργίου , Εκδόσεις ΙΩΝ
5. **“Ηλεκτρικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις κίνησης και υποσταθμοί μέσης τάσης”** , Στέφανος Τουλόγλου
6. **“ Ηλεκτρικές Μηχανές”** 1Βιβλίο β' τάξη Τ.Ε.Ε. Β κύκλου , Γαντζούδης Σωτήριος - Λαγουδάκης Μιχαήλ – Μπινιάρης Αθανάσιος , Ο.Ε.Δ.Β.
7. **“Συστήματα Διακίνησης Ηλεκτρικής Ενέργειας”** , Εμμανουήλ Θ. Κάλφας , Σύγχρονη Εκδοτική
8. **Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης** , Πέτρος Ντοκόπουλος , εκδόσεις Ζήτη
9. **“Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις καταναλωτών Μέσης και Χαμηλής τάσης”** , Πέτρος Ντοκόπουλος , Εκδόσεις Ζήτη
10. **“Μετασχηματιστές και ηλεκτρικές μηχανές”**, Gregor Haberle - Heinz Haberle , Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις
11. **“Μετασχηματιστές”** , Βασίλης Σαμοίλης , Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος
12. **“Ηλεκτρικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις κίνησης και υποσταθμοί μέσης τάσης”** , Στέφανος Τουλόγλου , Εκδόσεις Ίων
13. **“Υποσταθμοί εσωτερικών χώρων”** , Μιλτιάδης Κάπος , Μιλτιάδης Κάπος
14. **“Ηλεκτρικές μηχανές 1”** , Δημήτρης Ψωμιάδης , Εκδόσεις Ίων
15. **“Εισαγωγή στις υψηλές τάσεις”** , Λάμπρος Οικονόμου - Γιώργος Φώτης , Εκδόσεις Τζιόλα
16. **“Στοιχεία ηλεκτρικών μηχανών”** , Peter Bastian - Horst Bumiller - Walter Eichler, Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές εκδόσεις
17. **“Μελέτη μετασχηματιστών”** , Παύλος Ράιτσιος , Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος
18. **“Εργαστηριακή επαλήθευση της θεωρίας στα Π.Μ.Δ. ΙΙ “** , Γεώργιος Γουναρίδης , Εκδόσεις Ίων
19. **“Εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών”**, Γεωργίου Πολλάλη , Εκδόσεις Ίων
20. Electrical Installation Guide, Technical Series, Groupe Schneider
21. Electrical Installations Handbook, Seip, Siemens
22. www.aveva.com
23. www.tesar.eu
24. www.deddie.gr
25. www.aegps.com
26. www.vpower.gr
27. www.fluke.gr
28. www.megger.com
29. Edisontechcenter.org