

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕ ΘΕΜΑ

“ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ
ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ
ΦΟΡΤΙΟΥ”

ΠΟΥΛΙΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ
ΑΜ:39617

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε.
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τ.Ε.Ι Πειραιά

Εισηγητής: Δρ. Πέτρος Καραϊσάς
Επίκουρος Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μετασχηματιστές αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Κατά συνέπεια, ο συνεχής έλεγχος της σωστής λειτουργίας, της απόδοσης, των καταπονήσεων και των απωλειών των μετασχηματιστών είναι ζωτικής σημασίας.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, ύστερα από μια εκτενή αναφορά στους μετασχηματιστές και στα βασικά χαρακτηριστικά τους, επικεντρωνόμαστε στις απώλειες, την προστασία καθώς και το διαγνωστικό έλεγχο των μεγάλων μετασχηματιστών ελαίου.

Τέλος περιέχει ακόμα την εφαρμογή της μεθόδου σε υποδειγματικό Μετασχηματιστή. Ακολουθεί επιβεβαίωση της προτεινόμενης μεθόδου συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με εκείνα προέκυψαν από αριθμητική ανάλυση και συγκεκριμένα πεδιακή ανάλυση με μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων, τη σύγκριση με τα αποτελέσματα κατασκευασμένου Μετασχηματιστή ισχύος και τα συμπεράσματα.

ABSTRACT

Transformers are one of the most important elements of an Electricity System. Consequently, continuous control of proper operation, performance, stresses and losses of transformers is vital.

In this thesis, after extensive reference to transformers and their key features, we focus on losses, protection as well as diagnostic testing of the major oil transformers.

Finally, it still contains the application of the method to an exemplary Transformer. Below is confirmation of the proposed method by comparing the results with those obtained by numerical analysis and specific field analysis with Finite Element method, comparison with the results of a manufactured Power Transformer and the conclusions.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	2
Abstract.....	2
Εισαγωγή	5
Κεφάλαιο 1: Μέσα προστασίας σε Υ/Σ Μέσης και Υψηλής Τάσης	9
1.1 Η ασφάλεια σε Υ/Σ μέσης και υψηλής τάσης	9
1.2. Μέσα προστασίας σε υποσταθμούς Μέσης Τάσης	11
1.2.1. Απαιτήσεις εσωτερικών χώρων Υ/Σ Μέσης Τάσης	11
1.2.2. Τύποι παροχών και προστασία στη μέση τάση	14
1.2.3. Μετασχηματιστές ισχύος	15
1.2.4. Προστασία Μ/Σ ισχύος.....	19
1.2.4.1. Προστασία Μ/Σ ισχύος από υπερφόρτιση.....	19
1.2.4.2. Προστασία Μ/Σ ελαίου από εσωτερικά σφάλματα	20
1.2.4.3. Διαφορική προστασία Μ/Σ ισχύος.....	20
1.2.4.4. Επιλογική συνεργασία μεταξύ οργάνων προστασίας στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή	21
1.2.5. Συσκευές διακοπής και απομόνωσης μέσης τάσης	22
1.2.5.1. Ασφάλειες μέσης τάσης.....	22
1.2.5.2. Διακόπτες ισχύος	24
1.2.5.3. Διακόπτες φορτίου	24
1.2.5.4. Αποζεύκτες – γειωτές	25
Κεφάλαιο 2: Μετασχηματιστής	26
.....	26
2.1 Ιστορία	27
2.2 Βασικές αρχές	29
2.3 Νόμος επαγωγής	29
2.4 Ιδανική εξίσωση ισχύος.....	30
2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα	31

2.6 Έννοια του μετασχηματιστή - αρχή λειτουργίας.....	33
2.7 ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ.....	38
2.8 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ ΤΥΛΙΧΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ.....	43
Κεφάλαιο 3: ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ.....	46
3.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ.....	46
3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ.....	50
3.2.1 Απώλειες από υστέρηση.....	51
3.2.2 Απώλειες από δινορρεύματα.....	54
3.2.3 Συνολικές απώλειες πυρήνα.....	57
Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ Μ/Σ ΙΣΧΥΟΣ.....	61
4.1 Διδιάστατη ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	61
4.2 Διδιάστατη ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος FEMM.....	64
4.2.1 Δομή προγράμματος FEMM.....	64
4.2.2 Μοντελοποίηση μετασχηματιστή με τη διδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	65
4.2.2.1 Γεωμετρική διαμόρφωση μοντέλου.....	65
4.2.2.2 Προσομοίωση δοκιμής ανοιχτοκύκλωσης.....	68
4.2.2.3 Υπολογισμός απωλειών πυρήνα.....	68
4.2.3 Διδιάστατη πεδιακή ανάλυση μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.....	69
4.2.4 Μετασχηματιστής ισχύος 1000 kVA.....	69
Βιβλιογραφία.....	78

Εισαγωγή

Την τελευταία εικοσαετία γίνεται παγκοσμίως έντονη προσπάθεια για τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας και τον ορθολογικότερο τρόπο χρήση της, κυρίως μέσω της εφαρμογής εθνικών προγραμμάτων εξοικονόμησης ενέργειας. Σημαντική εμπειρία έχει αποκτηθεί από σειρά ερευνητικών προγραμμάτων που εκπονήθηκαν στον ενεργειακό τομέα με επίκεντρο τη βιομηχανία. Η εμπειρία αυτή είναι σκόπιμο να διαδοθεί για την επίτευξη του τελικού στόχου για μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση και προστασία του περιβάλλοντος.

Το Ελληνικό ενεργειακό σύστημα βρίσκεται σε φάση σημαντικών αλλαγών. Η διείσδυση του φυσικού αερίου, η κατασκευή των διευρωπαϊκών δικτύων, η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της εξοικονόμησης ενέργειας, η πρόκληση του φαινομένου του θερμοκηπίου και τέλος η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τα νέα δεδομένα του. Σημαντικές είναι οι επιπτώσεις των νέων αυτών δεδομένων στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας, στη μείωση της εξάρτησής της από το εισαγόμενο πετρέλαιο, με όλα τα συνεπαγόμενα οφέλη στην εθνική οικονομία, στην εξοικονόμηση μη ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων, στην αύξηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, στην προστασία του περιβάλλοντος και τέλος στην βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών στους καταναλωτές.

Η βελτίωση της απόδοσης στους μετασχηματιστές, επιφυλάσσει το μεγαλύτερο ευεργετικό αντίκτυπο στην ενεργειακή χρήση και οικονομία των χωρών περισσότερο από ότι σε κάθε άλλο συστατικό του ηλεκτρικού συστήματος διανομής ισχύος. Έτσι, η αναζήτηση τρόπων μείωσης των απωλειών τους, με χρήση τεχνικών οι οποίες βελτιώνουν τη σχεδίαση του πυρήνα και την πρόβλεψη των λειτουργικών του χαρακτηριστικών είναι σήμερα περισσότερο αναγκαία, τόσο για τους κατασκευαστές όσο και για τους φορείς εκμετάλλευσης των ηλεκτρικών δικτύων και τους τελικούς του χρήστες

Η ακριβής εκτίμηση των απωλειών κατά τη φάση σχεδίασης των μετασχηματιστών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς:

- Αυξάνει την αξιοπιστία των μετασχηματιστών, □
- Εξασφαλίζει την υψηλή απόδοση των μετασχηματιστών, □
- Μειώνει το κόστος των υλικών, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικρότερο περιθώριο ασφαλείας, □
- Βοηθά τον κατασκευαστή να αποφύγει την πληρωμή ρητρών απωλειών

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται οι απώλειες σιδήρου (κενού φορτίου) σε μετασχηματιστές ισχύος. Η μελέτη γίνεται τόσο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όσο και μέσω συστηματικής ανάλυσης των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών (βρόχοι υστέρησης, δινορρέυματα) με αναλυτικές μεθοδολογίες και ειδικότερα με το μοντέλο Preisach-Neel.

Η μελέτη των απωλειών κενού φορτίου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς οι απώλειες αυτές είναι σταθερές και ανεξάρτητες του φορτίου του μετασχηματιστή. Έτσι, για ένα μετασχηματιστή που είναι καθημερινά υπό τάση, οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές και καταναλώνονται καθημερινά, 24 ώρες το 24ωρο, 365 μέρες το χρόνο.

Από τη στιγμή που οι απώλειες αυτές είναι σταθερές για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, προκαλούν το ειδικό ενδιαφέρον των ηλεκτρικών εταιρειών, οι οποίες συνεχώς αναζητούν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, στο σημερινό, έντονα ανταγωνιστικό και παγκοσμιοποιημένο επιχειρηματικό περιβάλλον, η ανάγκη για περισσότερο αποδοτικούς μετασχηματιστές, γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική, γεγονός το οποίο στρέφει το

ενδιαφέρον των κατασκευαστών στην προσπάθεια αύξησης της απόδοσης των μετασχηματιστών μέσω μείωσης των απωλειών κενού φορτίου τους.

Η συστηματική αύξηση των επιδόσεων των υπολογιστών και η δραματική εξέλιξη των αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης πεδιακών μεγεθών καθιστά δυνατή την λεπτομερέστατη ανάλυση μαγνητικού πεδίου διατάξεων με υπολογιστικά συστήματα ευρείας διάδοσης και χαμηλού κόστους. Για παράδειγμα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία έχει επικρατήσει στην ανάλυση του πεδίου διατάξεων τρισδιάστατης γεωμετρίας που περιλαμβάνουν υλικά με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως οι μετασχηματιστές, η οποία προ δεκαετίας απαιτούσε διανυσματικό υπολογιστή ή άλλο σύστημα υψηλών επιδόσεων, μπορεί πλέον να εφαρμοσθεί σε εύλογο χρόνο χρησιμοποιώντας κατάλληλο προσωπικό υπολογιστή.

Στα πλαίσια αυτά η βελτίωση της μεθοδολογίας μοντελοποίησης των μετασχηματιστών μέσω λεπτομερούς αναλύσεως του μαγνητικού πεδίου με χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων συμβάλλει ουσιαστικά στην αύξηση της ακρίβειας πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών ισχύος. Εν τούτοις η εφαρμογή των προαναφερομένων μεθόδων στην εκτίμηση των απωλειών σιδήρου εμφανίζει συχνά αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές για δύο κυρίως λόγους:

- η αναπαράσταση των υλικών πραγματοποιείται σε μακροσκοπική κλίμακα μέσω κατάλληλων χαρακτηριστικών με αποτέλεσμα να ομογενοποιούνται ή αγνοούνται φαινόμενα που διαδραματίζονται σε μικροσκοπική κλίμακα στα χρησιμοποιούμενα υλικά. Για το λόγο αυτό πολλές φορές η αναπαράσταση των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ατελής. □
- η μηχανική και η θερμική κατεργασία για την διαμόρφωση των πυρήνων τροποποιεί τα αρχικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι αναγκαία η συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών με αναλυτικές μεθοδολογίες με σκοπό την προσαρμογή τους για την κατά περιοχές εφαρμογή τους σε μοντέλα μακροσκοπικής κλίμακας (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Το μοντέλο υστέρησης Preisach-Neel θεωρείται από τους πιο ακριβείς τρόπους εξομοίωσης του φαινομένου υστέρησης. Σύμφωνα με αυτό, το μαγνητικό υλικό αποτελείται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό (σχεδόν άπειρο) μαγνητικών διπόλων, κάθε ένα από τα οποία έχει ένα στοιχειώδη ορθογώνιο βρόχο

υστέρησης ο οποίος αντιστοιχεί μόνο σε δύο καταστάσεις μαγνήτισης, τη θετική και την αρνητική.

Η συνολική μαγνήτιση του εξεταζόμενου δοκιμίου προκύπτει σωρευτικά από τη μαγνήτιση όλων των διπόλων ή ισοδύναμα προσδιορίζεται από τη μαγνητική κατάσταση της πλειοψηφίας των διπόλων. Η χρήση του μοντέλου και των διάφορων τροποποιημένων εκδοχών του επιτρέπει την εξαγωγή της μαγνητικής επαγωγής B σε κάθε σημείο του δοκιμίου, λαμβάνοντας ως είσοδο την ένταση του μαγνητικού πεδίου H . Έτσι, οδηγεί και στον υπολογισμό των απωλειών υστέρησης για δεδομένο σημείο λειτουργίας στην καμπύλη μαγνήτισης του υλικού.

Η ακριβής εκτίμηση των απωλειών και της τάσης βραχυκύκλωσης κατά τη φάση σχεδίασης των μετασχηματιστών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς,

- Αυξάνει την αξιοπιστία των μετασχηματιστών,
- Εξασφαλίζει την υψηλή απόδοση των μετασχηματιστών,
- Μειώνει το κόστος των υλικών, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικρότερο περιθώριο ασφαλείας,
- Βοηθά τον κατασκευαστή να αποφύγει την πληρωμή ρητρών απωλειών,
- Ελαχιστοποιεί την ανάγκη κατασκευής πρωτοτύπου μετασχηματιστών (για την επιβεβαίωση της ακρίβειας της σχεδίασης) καθώς και των δοκιμών βραχυκύκλωσης υπό ονομαστική τάση, οι οποίες είναι επίπονες και δαπανηρές,
- Μειώνει το χρόνο παράδοσης των μετασχηματιστών.

Για τους παραπάνω λόγους, η ακριβής πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου είναι αντικείμενο συνεχούς μελέτης και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 1:

Μέσα προστασίας σε Υ/Σ Μέσης και Υψηλής Τάσης

1.1 Η ασφάλεια σε Υ/Σ μέσης και υψηλής τάσης

Όσον αφορά στην ασφάλεια, σύμφωνα με το Πρότυπο Διαχείρισης Κινδύνου 2002, τα αποτελέσματα ενός κινδύνου είναι μόνο αρνητικά. Έτσι και η Διαχείριση Κινδύνου δίνει έμφαση και περισσότερη προσοχή στο να προλαμβάνει την εμφάνιση αρνητικών συνεπειών, αλλά και στο πώς μπορεί να περιορίσει τις βλάβες. Η ηλεκτρική ασφάλεια ενός υποσταθμού είναι σημαντικό θέμα στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό του συστήματος, στην εγκατάσταση, την λειτουργία και την συντήρηση. Είναι γεγονός πως ένας αριθμός σοβαρών ατυχημάτων, συμβαίνουν κάθε χρόνο σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, που αφορούν την ηλεκτρική ενέργεια. Η κατάληξη είναι να υπάρχουν τεράστιες οικονομικές απώλειες και σπατάλη εργατοωρών. Υπάρχουν διάφοροι κανονισμοί και νομοθετήματα που έχουν θεσπιστεί για το θέμα της ασφάλειας, με κύριο μέλημά τους τη διαφύλαξη του προσωπικού από κινδύνους που προκύπτουν κατά την εγκατάσταση, τη συντήρηση ή τη λειτουργία του υποσταθμού. Υπάρχει μεγάλο άγχος για την ευθύνη τόσο των εργοδοτών αλλά και των εργαζομένων, προκειμένου να εξασφαλιστούν οι κατάλληλες συνθήκες εργασίας.

Η ασφάλεια στην περίπτωση αυτή, δεν έχει να κάνει μόνο με τη λήψη προληπτικών μέτρων στο χώρο εργασίας. Η ασφάλεια πρέπει να συμπεριλαμβάνεται και να ενσωματώνεται και κατά το σχεδιασμό του εξοπλισμού, και ο κατασκευαστής

έχει υποχρέωση να απομακρύνει κάθε κίνδυνο που μπορεί να προκύψει από τη χρήση του. Σημαντικό είναι επίσης η κατάλληλη επιλογή των ηλεκτρικών μηχανών καθώς και η περιοδική επιθεώρηση κατά την αρχική ανέγερση και ανάθεση. Στη συνέχεια, οι διαδικασίες της ασφάλειας εξελίσσονται με την μεθοδική εκπαίδευση κάθε ατόμου που εκμεταλλεύεται ή συντηρεί τον εξοπλισμό, προκειμένου να λάβει την κατάλληλη γνώση σχετικά. (IDC Technologies, n.d.).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η πρώτη προτεραιότητα σε έναν υποσταθμό είναι η ασφάλεια, και σε κάθε περίπτωση η εργασία σε αυτό το χώρο θα πρέπει να είναι ασφαλής. Οι έξι βασικές αρχές που παρέχουν ασφάλεια στον υποσταθμό είναι:

1. Διατήρηση ασφαλούς αποστάσεως από τα ενεργοποιημένα μέρη του υποσταθμού, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε τυχαία επαφή μαζί τους. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό, τα ηλεκτροφόρα μέρη θα πρέπει να είναι κλειστά ή να φυλάσσονται

2. Το ελάχιστο ύψος από το έδαφος, σε οποιοδήποτε μέρος της ηλεκτρικής εγκατάστασης που δεν έχει βάση, θα πρέπει να είναι μεταξύ 2,44 – 1,83 m, ώστε ένα άτομο που βρίσκεται στο έδαφος να μην μπορεί να αγγίξει ένα μέρος του υποσταθμού, που μπορεί να ενεργοποιηθεί τυχαία.

3. Θα πρέπει να υπάρχει επαρκής φωτισμός για το προσωπικό, προκειμένου να μπορεί να έχουν καλή ορατότητα στο περιβάλλον εργασίας τους, ώστε να εκτελέσουν οποιαδήποτε εργασία με ασφάλεια. Τα επίπεδα φωτισμού καθορίζονται στο πρότυπο IEEE C2-2012 2012 National Electrical Safety Code®” (NESC®).

4. Όλοι οι διάδρομοι και σκάλες χρειάζεται να είναι αρκετά μεγάλοι, ώστε οι εργαζόμενοι να έχουν τη δυνατότητα να μετακινηθούν με ασφάλεια, ενώ χρειάζονται επαρκή κιγκλιδώματα.

5. Οι έξοδοι θα πρέπει να επισημαίνονται επαρκώς, ενώ οι διάδρομοι εκκένωσης απαιτείται να είναι ελεύθεροι από οποιοδήποτε εμπόδιο, για να αποφευχθεί η περίπτωση εγκλωβισμού προσωπικού σε περίπτωση βλάβης εξοπλισμού, φωτιά κ.α.

6. Όλες οι μεταλλικές κατασκευές, περιφράξεις και βάσεις εξοπλισμού, θα πρέπει να είναι κατάλληλα γειωμένες, και να εξασφαλιστεί ότι οι πιθανές τιμές είναι χαμηλότερες από τις ισχύουσες προδιαγραφές (Edvard, 2014)

Επειδή στη περίπτωση των υποσταθμών μέσης και υψηλής τάσης, υπάρχει μεγάλη επικινδυνότητα αλλά και υψηλό κόστος εξοπλισμού, αναλύονται τα μέσα προστασίας της εγκατάστασης του υποσταθμού, αφού αναφερθούν οι τεχνικές οδηγίες από τη ΔΕΔΔΗΕ για τη διαμόρφωση των κατάλληλων χώρων των Υ/Σ, προκειμένου να περιοριστούν ή και να εξαλειφθούν οι κίνδυνοι..

1.2. Μέσα προστασίας σε υποσταθμούς Μέσης Τάσης

Οι προστατευτικές διατάξεις έχουν σκοπό την άμεση προστασία ενός κυκλώματος, ολόκληρης της εγκατάστασης και κατ' επέκταση των ανθρώπων που εργάζονται κατά τη διάρκεια λειτουργίας ή συντήρησης αυτής. Πρωτεύον στόχος είναι ο συντονισμός των συσκευών και η αποτελεσματική απομόνωση ώστε οποιοδήποτε σφάλμα προκύψει, να έχει το μικρότερο αντίκτυπο στους ανθρώπους και στο εξοπλισμό. Κύρια προτεραιότητα των μέσων προστασίας είναι να αποτραπούν:

- Πυρκαγιές και εκρήξεις

• Περαιτέρω βλάβη σε εξοπλισμό χρησιμότητας, όπως μετασχηματιστές και καλώδια Δευτερεύοντες στόχοι της προστασίας είναι οι πρακτικές που βοηθούν στη μείωση της επίπτωσης των βλαβών:

- ✓ Στην αξιοπιστία (διακοπές μακράς διάρκειας)
- ✓ Στην ποιότητα του ρεύματος (βυθίσεις τάσης και στιγμιαίες διακοπές) (Short, 2004).

1.2.1. Απαιτήσεις εσωτερικών χώρων Υ/Σ Μέσης Τάσης

Προκειμένου να κατασκευαστούν οι χώροι του κάθε καταναλωτή που θα συνδεθούν με το δίκτυο Μ.Τ., είναι απαραίτητο να τηρηθούν οι τεχνικές οδηγίες της ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας), οι οποίες σε περίπτωση που παραβιαστούν για οποιοδήποτε λόγο, τότε η ΔΕΔΔΗΕ έχει το δικαίωμα διακοπής της ηλεκτροδότησης. Απαιτούνται τα εξής:

- ✓ Η εγκατάσταση του υποσταθμού υποβιβασμού τάσης, προϋποθέτει κατάλληλους χώρους των :
 - Διακοπών μέσης τάσης
 - Μετασχηματιστών
 - Διανομής χαμηλής τάσης

Στη περίπτωση αυτή, οι χώροι διακοπών Μ.Τ. και μετασχηματιστών, θα πρέπει να είναι κλειστοί και φτιαγμένοι από υλικά που δεν καίγονται, με μεταλλικές πόρτες από χαλυβδοέλασμα πάχους 1 mm το ελάχιστο, που να έχουν περσίδες. Ο χώρος πρέπει να διαθέτει ελάχιστο ύψος 3,00 m. Η διάταξη των συσκευών πρέπει να διευκολύνει τη συντήρηση και τη λειτουργία τους. Ο πίνακας της Μ.Τ. πρέπει να έχει απόσταση από τον αντικείμενο τοίχο 1,20 m το λιγότερο. Οι Μ/Σ πρέπει να έχουν τέτοια τοποθέτηση ώστε η οριζόντια απόσταση μεταξύ του κελύφους της ΧΤ του αντικείμενου τοίχου να είναι κατ' ελάχιστο 1,20 m. Αντίστοιχα, η απόσταση μεταξύ κελύφους μετασχηματιστή και αντικείμενου τοίχου από την πλευρά της ΜΤ πρέπει να είναι 0,40 m. Η ελάχιστη κατακόρυφη απόσταση από το ψηλότερο σημείο του Μ/Σ και του χαμηλότερου σημείου της οροφής να είναι 0,40 m. Ο χώρος των Μ/Σ θα πρέπει να αερίζεται επαρκώς με φυσικό εξαερισμό κατά προτίμηση, ώστε να ψύχονται καλύτερα οι μετασχηματιστές ισχύος. Δεν επιτρέπεται οποιαδήποτε αλλαγή στα ανοίγματα αερισμού, ούτε το κλείσιμο αυτών με οποιοδήποτε αντικείμενο. Όσον αφορά τη περισυλλογή λαδιού των Μ/Σ, θα πρέπει να διατίθεται στο χώρο ειδική λεκάνη που να χωράει αρκετή ποσότητα σε περίπτωση διαρροής, χωρίς να επιτρέπει στο λάδι ελεύθερη επιφάνεια, προκειμένου να αποφευχθεί η πυρκαγιά. Οι χώροι μέσης τάσης, δεν επιτρέπεται να έχουν άνοιγμα προς κλιμακοστάσια, αλλά μόνο πόρτα για την είσοδο σε αυτούς, σιδερένια με λαμαρίνα πάχους 1,5 mm, χωρίς γρίλιες, με μηχανισμό επαναφοράς στην θέση κλεισίματος και επαφή στην κάσα σε πλάτος τουλάχιστον 25 mm. Η κατασκευή υπαίθριου ή προκατασκευασμένου υποσταθμού, επιτρέπεται μετά από άδεια πολεοδομικού γραφείου και με την προϋπόθεση να μην ενοχλούνται οι γείτονες. Απαγορεύεται οποιαδήποτε ξένη εγκατάσταση προς τον Υ/Σ να περνά στο χώρο του, στους περιμετρικούς τοίχους ή στο δάπεδο. Σε περίπτωση που κάποιο κτίριο διαθέτει ίδια πηγή ηλεκτροπαραγωγής, θα πρέπει να έχουν καθοριστεί ειδικοί χώροι, κλειστοί, με επαρκή αερισμό. Επίσης, οι

χώροι του Υ/Σ πρέπει να διαθέτουν υποχρεωτικά κατάλληλη σήμανση με πινακίδες απαγόρευσης εισόδου, αναγγελίας κινδύνου και υψηλής τάσης. (LMCo, 2013)

- ✓ Η διαμόρφωση και παραχώρηση ειδικού χώρου στη ΔΕΔΔΗΕ από τον καταναλωτή, για τη σύνδεση με την Μ.Τ., με την προϋπόθεση ότι αυτός δεν θα βρίσκεται κάτω από το 1ο υπόγειο ή σε βάθος παραπάνω από 4 m από την επιφάνεια του εδάφους. Ο χώρος της ΔΕΔΔΗΕ θα πρέπει να έχει θέση ώστε:

- ✓ Η λειτουργία του να μην ενοχλεί διπλανούς χώρους
- ✓ Να διαθέτει διάδρομο προς δημόσιο δρόμο με πλάτος 1,8 κατ' ελάχιστο και ύψος 2,50 m, ο οποίος θα είναι πάντα ελεύθερος για να μπορεί να εισέλθει είτε το προσωπικό είτε οποιοδήποτε μηχάνημα.
- ✓ Να μπορεί να εισέλθει το προσωπικό της ΔΕΔΔΗΕ οποιαδήποτε ώρα χρειασθεί.
- ✓ να μπορεί να περνάει μόνο το τροφοδοτικό καλώδιο Μ.Τ. του καταναλωτή.
- ✓ Να μην δέχεται επιρροές από εγκαταστάσεις που προκαλούν παλμική κίνηση.
- ✓ Να είναι στεγανός και να αποκλείεται η είσοδος νερών.
- ✓ Να μην έχει καμία επικοινωνία με χώρους που μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα στην λειτουργία των εγκαταστάσεων. Ο καταναλωτής έχει την υποχρέωση να εκτελέσει μια σειρά από εργασίες στο χώρο της ΔΕΔΔΗΕ, με δική του ευθύνη και δαπάνη επίσης.

Συγκεκριμένα:

- ♣ Να μεριμνήσει για την στεγανή ηλεκτρική εγκατάσταση με αγωγούς 2,5 mm χαλκό, που μέσω ασφαλειοκιβωτίου θα τροφοδοτεί τουλάχιστον 3 φωτιστικά σημεία και ένα μονοφασικό ρευματοδότη με γείωση τύπου «σουκό», ώστε να φωτιστεί ο χώρος μπροστά από τους πίνακες Μ.Τ.
- ♣ Να εγκαταστήσει και να συντηρεί τουλάχιστον 2 πυροσβεστήρες 12 kg ξηρής σκόνης σύμφωνα με τη

νομοθεσία, και να αναρτήσει αυτούς στους τοίχους δεξιά και αριστερά της εισόδου.

♣ Να εγκαταστήσει το τροφοδοτικό του καλωδίου Μ.Τ. και να κάνει τις απαραίτητες συνδέσεις.

♣ Να εγκαταστήσει 2 ο ασφαλειοκιβώτιο με ασφάλεια 6Α , απ' όπου θα ξεκινά καλώδιο NYM 2X2,5 mm² , που θα οδεύει σε χαλυβδοσωλήνα και θα καταλήγει στο κάτω μέρος του δαπέδου όπου στηρίζονται οι πίνακες Μ.Τ. της ΔΕΔΔΗΕ.

♣ Να διατηρεί συνεχώς το χώρο καθαρό και να κόβει τα κλαδιά των δέντρων που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 3m από τα υπό τάση εναέρια δίκτυα της ΔΕΔΔΗΕ. Επιπρόσθετα, ο καταναλωτής θα πρέπει να εγκαταστήσει ένα γενικό μέσο ζεύξης ή ζεύξης προστασίας, με κατάλληλη διάταξη ώστε να μπορεί να ασφαλιζεται στις θέσεις ON – OFF, και να διαπιστώνεται εύκολα η απομόνωση στη θέση OFF. (LMCo, 2013)

1.2.2. Τύποι παροχών και προστασία στη μέση τάση

Για την παροχή μέσης τάσης υπάρχουν 4 διαφορετικοί τύποι και η κατάλληλη επιλογή γίνεται από τη ΔΕΗ, ανάλογα με την ισχύ που έχει συμφωνηθεί με τον καταναλωτή και τη δομή του δικτύου που θα τροφοδοτηθεί. Για κάθε περίπτωση παροχής, απαιτείται από τη ΔΕΗ και η εγκατάσταση της κατάλληλης προστασίας, όπως φαίνεται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 1: Τύποι παροχών και μέσα προστασίας (Πηγή: Ηλεκτροδότηση υποσταθμών μέσης τάσης, www.lmco.gr)

Τύπος	Είδος Παροχής	Μέσα Προστασίας ΔΕΗ	Μέσα Προστασίας Καταναλωτή	Ισχύς Υποσταθμού
A1	Υπαίθρια	Ασφαλειοαποζεύκτης εναέριου δικτύου με τηκτά 30T	Διακόπτης Φορτίου και Ασφάλειες Μ.Τ. (εκτόνωσης, βραδείας τήξης, τύπος T)	800 KVA για Αττική 630 KVA λοιπές περιφέρειες
A2	Υπαίθρια	Διακόπτης απομόνωσης	Διακόπτης Φορτίου και Ασφάλειες Μ.Τ. ή Αποζεύκτης και Αυτόματος διακόπτης ισχύος	>630 KVA μόνο εκτός Αττικής
B1	Στεγασμένη	Διακόπτης Φορτίου με ασφάλειες σκόνης	Αποζεύκτης	800 KVA για Αττική 630 KVA λοιπές περιφέρειες
B2	Στεγασμένη	Αποζεύκτης και Διακόπτης Ισχύος με προστασία σφαλμάτων γης και φάσεων	Αποζεύκτης ή Διακόπτης Φορτίου (για Μ/Σ που παραλληλίζονται)	800 KVA για Αττική 630 KVA λοιπές περιφέρειες

1.2.3. Μετασηματιστές ισχύος

Οι μετασηματιστές ισχύος αποτελούν τη κυριότερη συσκευή σε έναν υποσταθμό μέσης τάσης, επειδή υποβιβάζουν την τάση μεταφοράς των 20 KV σε τάση διανομής των 400 V. Είναι συνήθως κατασκευασμένοι με μόνωση λαδιού, εκτός από ειδικές περιπτώσεις που προτιμούνται οι Μ/Σ ξηρού τύπου με μόνωση από χυτορητίνη. Όταν στους υποσταθμούς ζητείται ισχύς μεγαλύτερη των 600 kVA, έχουμε κυρίως δύο Μ/Σ για λόγους ασφαλείας. Έτσι σε περίπτωση που προκύψει οποιοδήποτε σφάλμα στον ένα, ο δεύτερος θα καλύψει το φορτίο, έως την επισκευή του πρώτου.



Εικόνα 1: Μετασχηματιστής ισχύος, ελαίου και ξηρού τύπου

Πηγή: https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTmmGXGyV6_sQ_ea-8zGe2O7mcH6Dvi82yONOAiDYdJ2XBD5-oo1A

Ο μετασχηματιστής με μόνωση λαδιού, αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Πυρήνας, που είναι φτιαγμένος από ειδικά σιδερένια ελάσματα που είναι μονωμένα μεταξύ τους, προκειμένου να μειωθούν οι μαγνητικές απώλειες

- Στηρίγματα πυρήνα, που βρίσκονται κάτω από τον πυρήνα και μεσολαβεί μία απόσταση για να κυκλοφορεί το λάδι

- Τυλίγματα. Σε κάθε τμήμα του πυρήνα υπάρχουν δύο πηνία, στο εσωτερικό βρίσκεται το πηνίο της Χ.Τ. και στο εξωτερικό το πηνίο της Μ.Τ. Σε περίπτωση που συμβεί βραχυκύκλωμα, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα πηνία μπορούν να καταστρέψουν τον Μ/Σ

- Στηρίγματα τυλιγμάτων.

Η στερέωση των τυλιγμάτων γίνεται με μονωτικά στηρίγματα τόσο μεταξύ τους, όσο και πάνω στον πυρήνα και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

- Ο ακροδέκτης του ουδετέρου, προκύπτει από τη σύνδεση του ουδετέρου με το κάτω μέρος του μονωτήρα διέλευσης. Ο ουδέτερος φτιάχνεται όταν γεφυρωθούν με χάλκινη μπάρα τα τρία άκρα των τυλιγμάτων της Χ.Τ.

- Οι ακροδέκτες 2U, 2V, 2W προκύπτουν από τη σύνδεση των άλλων τριών τυλιγμάτων της Χ.Τ. με τους μονωτήρες διέλευσης.

- Μονωτήρες διέλευσης Χ.Τ. από πορσελάνη. Ονομάζονται έτσι, επειδή το ρεύμα της Χ.Τ. διέρχεται από μέσα τους. Στον ένα ακροδέκτη, συνδέονται τα ακραία

σημεία των τυλιγμάτων της Χ.Τ., και στον άλλο, τα καλώδια Χ.Τ. που αναχωρούν από τον Μ/Σ.

- Μονωτήρες διέλευσης Μ.Τ. από πορσελάνη. Ονομάζονται έτσι, επειδή το ρεύμα της Μ.Τ. διέρχεται από μέσα τους. Στον ένα ακροδέκτη, συνδέονται τα ακραία σημεία των τυλιγμάτων της Μ.Τ., και στον άλλο, τα καλώδια Μ.Τ. που έρχονται από την κυψέλη προστασίας του Μ/Σ.

- Ρυθμιστής τάσης, όταν ρυθμίζεται η τάση του δευτερεύοντος με τη χρήση περισσότερων ή λιγότερων σπειρών του πρωτεύοντος, εφόσον αλλάζει ο λόγος των σπειρών του Μ/Σ

- Χειριστήριο ρύθμισης τάσης

- Δοχείο διαστολής, που συνδέεται μέσω σωλήνα με το δοχείο του Μ/Σ και όσο η θερμοκρασία του λαδιού ανεβαίνει, ανεβαίνει η στάθμη του λαδιού, με αποτέλεσμα να διώχνει τον αέρα στο πάνω μέρος του δοχείου. Όταν η θερμοκρασία κατεβαίνει, συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Αργότερα, φτιάχτηκαν στεγανοί Μ/Σ λαδιού, που παίρνουν τις διαστολές του λαδιού και δεν απαιτείται δοχείο διαστολής. Στη περίπτωση αυτή δεν απαιτείται συντήρηση, επειδή το λάδι δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα και δεν αλλοιώνεται.

- Δείκτης στάθμης λαδιού, που μετράει την ποσότητα του λαδιού και είναι ανθεκτικός στη θερμοκρασία

- Ηλεκτρονόμος Buchholz, ο οποίος χρησιμεύει για την προστασία του Μ/Σ από εσωτερικά σφάλματα, τα οποία προκαλούν ανάπτυξη αερίων ή έντονη ροή λαδιού.

- Αφυγραντήρας, ο οποίος τοποθετείται πάνω στο δοχείο διαστολής και από αυτόν περνά ο αέρας από και προς το δοχείο διαστολής, λόγω συστολής – διαστολής του όγκου του λαδιού. Περιέχει κρυστάλλους SiO₂ (Silicagel), που απορροφούν την υγρασία του αέρα και μπορούν να πάρουν τα χρώματα:

- ✓ Μπλε, όταν είναι πλήρως ξηρό
- ✓ Γαλάζιο, όταν το Silicagel είναι μερικώς υγρό
- ✓ Ροζ, όταν είναι κορεσμένο από υγρασία

- Τάπα αερισμού και συμπλήρωση με λάδι
- Βάνα αποχέτευσης λαδιού
- Τροχοί κύλισης
- Ψυκτήρες

Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου, εμφανίστηκαν στο εμπόριο τη δεκαετία του 1960. Είναι πιο ακριβοί από τους Μ/Σ ελαίου, αλλά επειδή πλεονεκτούν σε πολλά σημεία, τελικά καταλήγουν να είναι πιο οικονομικοί. Τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι:

- ✓ Η στερεή μόνωσή τους είναι άκαυστη, ενώ το λάδι αντιθέτως είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο.
- ✓ Η εγκατάστασή τους μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε σημείο ενός κτιρίου, σε αντίθεση με τους Μ/Σ ελαίου, που χρειάζονται είτε ανεξάρτητο κτίριο, είτε το υπόγειο του κτιρίου για την εγκατάσταση.

Τα μέρη του μετασχηματιστή ξηρού τύπου είναι:

- ✓ Ακροδέκτες Μ.Τ. Κάθε τύλιγμα Μ.Τ., καταλήγει σε δύο ακροδέκτες που γεφυρώνονται χιαστί με μονωμένους αγωγούς, για να φτιάξουν το τρίγωνο των τυλιγμάτων μέσης τάσης.
- ✓ Ακροδέκτες Χ.Τ. Κάθε τύλιγμα Χ.Τ., καταλήγει σε δύο ακροδέκτες που γεφυρώνονται με αλουμινένια ή χάλκινη μπάρα και προκύπτει ο ακροδέκτης του ουδετέρου. Τα υπόλοιπα άκρα καταλήγουν στους ακροδέκτες Χ.Τ., όπου συνδέονται τα καλώδια των 400 V.
- ✓ Τύλιγμα μέσης τάσης, κατασκευασμένο από φύλλο αλουμινίου που τυλίγεται σε μορφή πηνίου
- ✓ Ρυθμιστής τάσης, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης περισσότερων ή λιγότερων σπειρών στο πρωτεύον. Έτσι αλλάζει ο λόγος των σπειρών του Μ/Σ και άρα η ρύθμιση τάσης του δευτερεύοντος
- ✓ Πυρήνας, κατασκευασμένος από ειδικά σιδερένια ελάσματα που μεταξύ τους είναι μονωμένα.
- ✓ Σφικτήρες πυρήνα
- ✓ Τροχοί κύλισης

- ✓ Κουτί με ηλεκτρονόμους προστασίας, που καταλήγουν τα καλώδια από τους θερμίστορες και μας επιτρέπουν να προστατεύσουμε τον Μ/Σ από υπερφόρτιση.
- ✓ Ακροδέκτης γείωσης
- ✓ Άγκιστρα ανύψωσης
- ✓ Πινακίδα

Στο εσωτερικό ενός Μ.Σ δημιουργούνται μαγνητικές και ηλεκτρικές απώλειες:

- ✓ Οι μαγνητικές απώλειες, προέρχονται από τη μαγνητική υστέρηση και τα δινορεύματα που εμφανίζονται στο σιδερένιο πυρήνα του Μ/Σ., και ονομάζονται απώλειες σιδήρου ή απώλειες κενού, επειδή υπάρχουν όσο ο Μ/Σ είναι συνδεδεμένος στη Μ.Τ.
- ✓ Οι ηλεκτρικές απώλειες προκύπτουν από τις ωμικές αντιστάσεις στα χάλκινα τυλίγματα της μέσης και χαμηλής τάσης, ονομάζονται απώλειες χαλκού και εξαρτώνται από το φορτίο. Όταν ο Μ/Σ δουλεύει χωρίς φορτίο είναι μηδενικές, ενώ σε πλήρες φορτίο προσεγγίζουν τη μέγιστη τιμή τους. Αρχικά θα αναλύσουμε τους τρόπους που μπορεί να προστατευτεί ο Μ/Σ ισχύος και ακολούθως θα εξετάσουμε τα υπόλοιπα μέσα προστασίας σε ένα Υ/Σ Μ.Τ. (Κεμίδης, κ.α., 2001).

1.2.4. Προστασία Μ/Σ ισχύος

1.2.4.1. Προστασία Μ/Σ ισχύος από υπερφόρτιση.

Στο εσωτερικό του Μ/Σ αναπτύσσεται θερμότητα, λόγω των απωλειών χαλκού και σιδήρου, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού (ελαιόψυκτος Μ/Σ) ή της χυτορυτίνης (Μ/Σ ξηρού τύπου). Προκειμένου να προστατευτεί σωστά ο Μ/Σ, είναι απαραίτητο να ελέγχεται η θερμοκρασία ώστε να κυμαίνεται μέσα στα όρια που έχει προκαθορίσει ο κατασκευαστής. Στους μετασχηματιστές ελαίου, υπάρχουν θερμομέτρα που ελέγχουν την θερμοκρασία του λαδιού, ώστε να είναι μικρότερη των 100 0C. Το θερμομέτρο αποτελείται από δύο ανοιχτές επαφές και όταν ο δείκτης του ξεπεράσει το πρώτο όριο των 900C, τότε κλείνει η πρώτη επαφή και ενεργοποιείται ο συναγερμός του υποσταθμού. Ο

συντηρητής ελέγχει για να εντοπίσει το πρόβλημα και αν χρειαστεί απορρίπτει κάποια φορτία. Στην περίπτωση που η θερμοκρασία ανέβει περισσότερο και ξεπεράσει το επιτρεπτό όριο, αυτόματα δίνεται εντολή απόζευξης του διακόπτη ισχύος στην πλευρά της χαμηλής τάσης.

Στους Μ/Σ ξηρού τύπου, χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικά στοιχεία που η αντίστασή τους μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και λέγονται θερμίστορες. Είναι τοποθετημένοι στα τυλίγματα της χαμηλής τάσης και εκτελούν τις εξής ενέργειες: η πρώτη ομάδα δίνει εντολή οπτικού και ηχητικού συναγερμού και η δεύτερη δίνει εντολή απόζευξης στη πλευρά της χαμηλής τάσης. (Κεμίδης, κ.α., 2001).

1.2.4.2. Προστασία Μ/Σ ελαίου από εσωτερικά σφάλματα

Όταν προκύψει κάποιο εσωτερικό σφάλμα στον μετασχηματιστή λαδιού, η θερμοκρασία του ελαίου ανεβαίνει απότομα, με αποτέλεσμα να εξατμιστεί και να δημιουργηθούν αέρια που οδεύουν προς τα πάνω, ενώ παρουσιάζεται ταυτόχρονα έντονη ροή λαδιού. Για τη προστασία σε αυτή τη περίπτωση, χρησιμοποιείται ο ηλεκτρονόμος Buchholz, ο οποίος τοποθετείται στο σωλήνα που συνδέει το δοχείο διαστολής με το δοχείο του Μ/Σ. Ο ηλεκτρονόμος αυτός περιέχει χωριστές επαφές για σήμανση κινδύνου και για απόζευξη.

Για να δώσει εντολή προκειμένου να ανοίξουν ή να κλείσουν οι επαφές, πρέπει να εντοπίσει:

1. Συγκέντρωση αερίων. Όταν ο όγκος τους ξεπεράσει κάποιο όριο, δίνει αρχικά εντολή σήμανσης κινδύνου και αν αυξηθεί δίνει εντολή απόζευξης.
2. Έντονη ροή λαδιού και δίνει αυτόματα εντολή απόζευξης.
3. Πτώση στάθμης λαδιού. Αρχικά δίνει εντολή σήμανσης κινδύνου και όταν κατέβει κάτω από το όριο ασφαλείας, δίνει εντολή απόζευξης. Η ανίχνευση και απόζευξη του ηλεκτρονόμου δεν δίνει λύση στο πρόβλημα, αλλά προειδοποιεί για να σταματήσει η λειτουργία του μετασχηματιστή και να επισκευαστεί, αφού γίνει ο απαραίτητος έλεγχος (Tisoft, 2014).

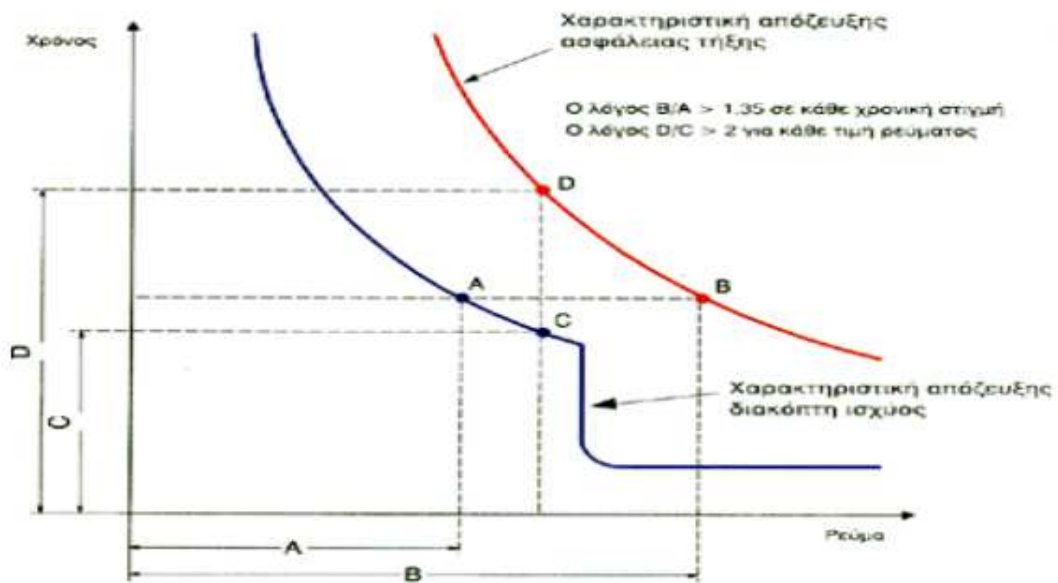
1.2.4.3. Διαφορική προστασία Μ/Σ ισχύος

Στη διαφορική προστασία, έχουμε σύγκριση των ανηγμένων ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, με τη βοήθεια τριών μετασχηματιστών έντασης στη

μέση τάση και τριών μετασχηματιστών έντασης στη χαμηλή τάση. Τα δευτερεύοντα των Μ/Σ καταλήγουν στο διαφορικό ηλεκτρονόμο, που ελέγχει αν τα ανηγμένα εισερχόμενα ρεύματα είναι ίσα με τα εξερχόμενα. Αν η διαφορά των ρευμάτων υπερβαίνει κάποιο καθορισμένο όριο, τότε ο ηλεκτρονόμος δίνει εντολή απόζευξης από τη πλευρά της Μ.Τ. Η διαφορική προστασία πλεονεκτεί σε σχέση με την προστασία με ηλεκτρονόμο Buchholz, επειδή δεν επιτρέπει την επέκταση της ζημιάς, αλλά είναι ιδιαίτερα ακριβή προστασία και χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλους Μ/Σ (> 1600 KVA) (Tisoft, 2014).

1.2.4.4. Επιλογική συνεργασία μεταξύ οργάνων προστασίας στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή

Στην προστασία ενός Μ/Σ είναι ιδιαίτερα σημαντική η δυνατότητα επιλεκτικής συμμετοχής μεταξύ των ασφαλειών της Μ.Τ. και του διακόπτη ισχύος ή των ασφαλειών της Χ.Τ. Επιλεκτικά, πρέπει να συμμετέχει το όργανο που βρίσκεται πιο κοντά στο σφάλμα, το οποίο και θα διακόπτει πρώτο. Έτσι, στην περίπτωση που το βραχυκύκλωμα γίνει στην πλευρά της χαμηλής τάσης, πρέπει να ανοίξει μόνο ο διακόπτης ισχύος της Χ.Τ. και οι ασφάλειες της Μ.Τ. πρέπει να παραμείνουν κλειστές. Για τη μελέτη της επιλογικής συνεργασίας χρησιμοποιούμε τις χαρακτηριστικές απόζευξης, που περιγράφουν τη λειτουργία κάθε οργάνου προστασίας. Στην εικόνα που ακολουθεί και σε κοινό σύστημα αξόνων έχουμε δύο καμπύλες, τη χαρακτηριστική απόζευξης της ασφάλειας Μ.Τ., και τη χαρακτηριστική απόζευξης του διακόπτη ισχύος Χ.Τ. Και στις δύο χαρακτηριστικές όσο μεγαλώνει το ρεύμα, μειώνεται ο χρόνος απόζευξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα.



Εικόνα 2: Επιλεκτική συνεργασία μεταξύ ασφαλειών Μ.Τ. και διακόπτη ισχύος Χ.Τ. για την προστασία του Μ/Σ. Πηγή: <http://www.ti-soft.com>

Ενώ η χαρακτηριστική της ασφάλειας είναι μια συνεχόμενη καμπύλη, αυτή του αυτόματου διακόπτη έχει ένα απότομο σκαλοπάτι, εξαιτίας του μαγνητικού στοιχείου. Για να έχουμε επιλεκτική συνεργασία θα πρέπει:

- I. Όλα τα σημεία της καμπύλης της ασφάλειας να είναι δεξιά και πάνω από την καμπύλη του αυτόματου διακόπτη.
- II. Αν τραβήξουμε μία οριζόντια ευθεία, που κόβει τις καμπύλες του αυτόματου διακόπτη και της ασφάλειας στα σημεία Α και Β, θα πρέπει ο λόγος B/A να είναι $>1,35$
- III. Αν τραβήξουμε μια κάθετη ευθεία, που κόβει τις καμπύλες του αυτόματου διακόπτη και της ασφάλειας στα σημεία C και D, πρέπει ο λόγος D/C να είναι > 2 (Κεμίδης κ.α., 2001).

1.2.5. Συσκευές διακοπής και απομόνωσης μέσης τάσης

1.2.5.1. Ασφάλειες μέσης τάσης

Χρησιμοποιούνται για την προστασία ενός κυκλώματος μέσης τάσης, από βραχυκύκλωμα και υπερφόρτιση μεγάλης διάρκειας. Διαχωρίζονται σε : Ασφάλειες σκόνης, που χρησιμοποιούνται για την διακοπή ενός κυκλώματος όταν προκύπτει βραχυκύκλωμα και υπερφόρτιση. Αποτελούνται από έναν κύλινδρο από πορσελάνη

που μέσα του υπάρχει το τικτό και η σκόνη χαλαζία. Τέτοιες ασφάλειες φαίνονται στην Εικόνα, και μειώνουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης λόγω της σκόνης χαλαζία τόσο πολύ, ώστε να υπάρχει μία περαιτέρω προστασία του εξοπλισμού σε μία εγκατάσταση. Η ασφάλεια αυτή φέρει πινακίδα με τα ονομαστικά της στοιχεία, όπως τον τύπο της, το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας, την ονομαστική πολική τάση κ.α.

Ασφάλειες

μέσης

τάσης



Εικόνα 3: Ασφάλειες σκόνης

Πηγή:

<https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRPCSA8BwMUIi2tyRNwWpw5ywcnmga76rnWrGfKIjxcNJVM6FP>

Επίσης, έχει κάποια χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας, στην οποία φαίνεται ο χρόνος που χρειάζεται για να λιώσει η ασφάλεια. Ασφάλειες εκτόνωσης, πρόκειται για έναν μονωτικό κυλινδρικό σωλήνα, που μέσα του υπάρχει ένας αγωγός το τικτό, το οποίο είναι τετρωμένο με ελατήριο, ενώ ο σωλήνας είναι ανοιχτός πάνω και κάτω. Η προστασία που προσφέρει έγκειται στη βοήθεια σβέση του τόξου που δημιουργείται, σε περίπτωση σφάλματος. Κατά τη διαδικασία αυτή όμως, εκπέμπονται τοξικά αέρια κι έτσι η χρήση της δεν επιτρέπεται σε κλειστούς χώρους, παρά μόνο σε εξωτερικούς και υπαίθριες εγκαταστάσεις Σε αντίθεση, οι ασφάλειες σκόνης χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους και έχουν μεγαλύτερο κόστος.

Οι ασφάλειες εκτόνωσης χωρίζονται σε βραδείας τήξης, που χαρακτηρίζονται με το γράμμα T και σε ταχείας τήξης που χαρακτηρίζονται με το γράμμα K . Επειδή η ασφάλεια αυτή αποσυνδέεται από το ένα άκρο της βάσης, μπορεί να διαπιστωθεί από μακριά ότι είναι καμένη και το κύκλωμα βρίσκεται εκτός λειτουργίας, οπότε λειτουργεί και σαν ασφαλειοαποζεύκτης (Καλπακίδης, 2009).

1.2.5.2. Διακόπτες ισχύος

Οι διακόπτες ισχύος, που είναι αυτόματοι διακόπτες, λειτουργούν εκτός από μηδενικά και ονομαστικά ρεύματα λειτουργίας και σε ρεύματα που εμφανίζονται σε βραχυκυκλώματα. Επομένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προστασία κατά των βραχυκυκλωμάτων.

Υπάρχουν 3 είδη διακοπών ισχύος:

- Διακόπτης κενού
- Διακόπτης αερίου SF₆
- Διακόπτης πτωχού ελαίου

Στις δεκαετίες 1970 – 1990 χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι διακόπτες πτωχού ελαίου, ενώ από εκεί και έπειτα αντικαταστάθηκαν με τους διακόπτες ισχύος με SF₆. Πρόκειται για ένα αδρανές αέριο με πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες, που βρίσκεται μέσα στους πόλους του διακόπτη ισχύος. Όσον αφορά στους διακόπτες κενού, αυτοί χρησιμοποιούν σαν μονωτικό το κενό, χωρίς κανένα αέριο.

1.2.5.3. Διακόπτες φορτίου

Οι διακόπτες φορτίου μπορούν να παραλαμβάνουν ή να απορρίπτουν φορτία σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Κατά το άνοιγμα ή κλείσιμο του διακόπτη δημιουργείται ένα τόξο το οποίο πρέπει να ψυχθεί για να σβήσει. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια ενός μέσου, στο θάλαμο σβέσης τόξου. Ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση, έχουμε τα εξής είδη διακοπών φορτίου:

- Διακόπτης κενού
- Διακόπτης αερίου SF₆

- Διακόπτης με μονωτικά τοιχώματα

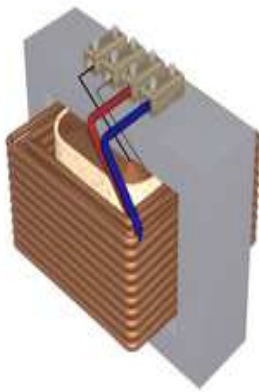
Όταν ο διακόπτης φορτίου δεν έχει ορατές επαφές, πρέπει να συνοδεύεται από έναν αποζεύκτη, ο οποίος εξασφαλίζει τη σίγουρη μόνωση και πρέπει να είναι μανταλωμένος με τον διακόπτη. Έτσι, επιτρέπεται η εργασία με ασφάλεια στο κύκλωμα μετά τη διακοπή του. Επειδή ο διακόπτης φορτίου δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως μέσο προστασίας σε συνθήκες σφάλματος, χρησιμοποιείται συνδυαστικά με ασφάλειες και ονομάζεται ασφαλειοδιακόπτης φορτίου.

1.2.5.4.Αποζεύκτες - γειωτές

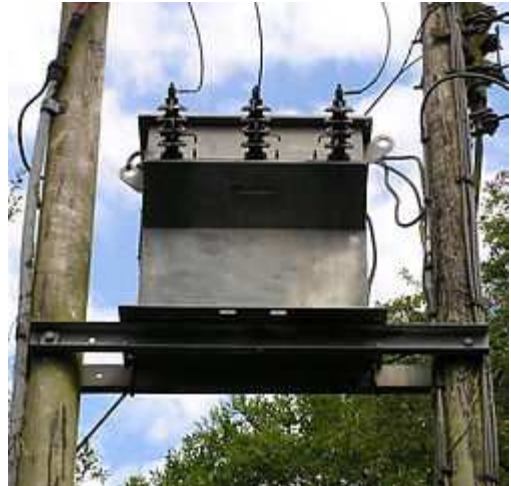
Πρόκειται για διακόπτες που ανοίγουν ένα κύκλωμα υπό ελάχιστο φορτίο και με ελάχιστη τάση. Χρησιμοποιούνται κυρίως, για να ελέγχεται από απόσταση αν η εγκατάσταση βρίσκεται υπό τάση ή όχι σε μία δεδομένη στιγμή. Οι αποζεύκτες μπορούν να απομονώσουν ένα τμήμα της εγκατάστασης, ενώ η υπόλοιπη εγκατάσταση βρίσκεται υπό τάση. Επειδή όμως υπάρχει τάση στη πλευρά που έγινε η διακοπή, είναι δυνατόν να επαχθεί τάση στο απομονωμένο τμήμα, που μπορεί να γίνει επικίνδυνη για τον εργαζόμενο. Γι' αυτό το λόγο, αφού ανοίξουν οι αποζεύκτες και απομονώσουν ένα τμήμα, κλείνουν οι γειωτές οι οποίοι γειώνουν το τμήμα αυτό με τη γη και έτσι μπορεί να εργαστεί κάποιος με ασφάλεια. ((Καλπακίδης, 2009)
Ένας αποζεύκτης αποτελείται από:

- ✓ Δύο μονωτήρες σε κάθε πόλο
- ✓ Τους ακροδέκτες σύνδεσης
- ✓ Τις κινητές επαφές που είναι σαν μαχαίρια
- ✓ Τον σιδερένιο άξονα που δίνει κίνηση στα μαχαίρια κατά την περιστροφή
- ✓ Ράβδους από μονωτικό υλικό που συνδέουν τον άξονα με τα μαχαίρια.

Μετασχηματιστής



Εικόνα 5: Μετασχηματιστής υποβιβασμού



Εικόνα 4: Τριφασικός μετασχηματιστής

Ο **μετασχηματιστής** είναι μια συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο κυκλωμάτων, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών. Οι μετασχηματιστές είναι ανάμεσα στις πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές, με κάποιες μεγάλες μονάδες να αποδίδουν έως και το 99.75% της ισχύος εισόδου τους στην έξοδό τους. Οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται σε ευρεία γκάμα μεγεθών, που κυμαίνονται από μέγεθος νυχιού (όπως αυτοί που βρίσκονται μέσα σε ένα μικρόφωνο) έως τεράστιες μονάδες με βάρος εκατοντάδων τόνων που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση τμημάτων των εθνικών δικτύων ηλεκτροδότησης. Όλοι λειτουργούν με βάση τις ίδιες αρχές, αν και υπάρχει πληθώρα διαφορετικών υλοποιήσεων.

Ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο πρώτο κύκλωμα (το "πρωτεύον") δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει μεταβαλλόμενη τάση στο δεύτερο κύκλωμα (το "δευτερεύον"). Το φαινόμενο αυτό καλείται αμοιβαία επαγωγή.

Αν ένας ηλεκτρικός καταναλωτής είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα, τότε θα υπάρξει ροή ηλεκτρικού φορτίου στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή. Αυτό το φορτίο θα μεταφέρει ενέργεια από το πρωτεύον κύκλωμα, στον καταναλωτή που είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα.

Η επαγόμενη τάση V_S στο δευτερεύον ενός ιδανικού μετασχηματιστή, είναι ανάλογη της τάσης V_P στο πρωτεύον κατά ένα συντελεστή ίσο με το λόγο του αριθμού N των περιελίξεων του σύρματος στα αντίστοιχα τυλίγματα:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

Οι δείκτες S,P προέρχονται από τις αγγλικές λέξεις *secondary*, *primary*, οι οποίες σημαίνουν αντίστοιχα *δευτερεύον* και *πρωτεύον*. Με κατάλληλη επιλογή του αριθμού των περιελίξεων, ένας μετασχηματιστής επιτρέπει την ανύψωση μιας εναλλασσόμενης τάσης (αν $N_S > N_P$) ή τον υποβιβασμό της (αν $N_S < N_P$).

2.1 Ιστορία

Η αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή διατυπώθηκε το 1831 από τον Μάικλ Φαραντέι, αν και την χρησιμοποίησε μόνο για επίδειξη των αρχών της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, χωρίς να προβλέψει την πρακτική της σημασία. Ο πρώτος μετασχηματιστής σε ευρεία χρήση ήταν το πηνίο επαγωγής, το οποίο εφηύρε ο Ιρλανδός κληρικός Νίκολας Κάλαν το 1836. Ήταν ένας από τους πρώτους που κατάλαβαν την αρχή πως όσο περισσότερες περιελίξεις έχει το τύλιγμα ενός μετασχηματιστή, τόσο μεγαλύτερη ηλεκτρεγερτική δύναμη παράγει. Τα πηνία επαγωγής δημιουργήθηκαν από τις προσπάθειες των επιστημόνων για παροχή υψηλότερων τάσεων από μπαταρίες. Δεν τροφοδοτούνταν από εναλλασσόμενο ρεύμα, αλλά από συνεχές, προερχόμενο από μπαταρίες, το οποίο διακόπτονταν από ένα δονούμενο διακοπτικό μηχανισμό. Μεταξύ 1830-1870 οι προσπάθειες για δημιουργία καλύτερων επαγωγικών πηνίων, κυρίως με τη μέθοδο της συνεχούς δοκιμής (trial and error), αποκάλυψαν σταδιακά τις **ασικές αρχές της λειτουργίας του μετασχηματιστή**. Αποδοτικοί σχεδιασμοί δεν ανακαλύφθηκαν παρά μετά το 1880, όμως μέσα σε λιγότερο από μια δεκαετία, ο μετασχηματιστής αποδείχτηκε ουσιώδης στην επικράτηση των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι αυτών του συνεχούς, θέση την οποία κρατούν μέχρι και σήμερα.

Ο Ρώσος μηχανικός Πάβελ Γιαμπλότσκοφ εφηύρε το 1876 ένα σύστημα φωτισμού, βασισμένο σε ένα σύνολο από πηνία επαγωγής, όπου τα πρωτεύοντα τυλίγματα ήταν συνδεδεμένα σε πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ τα δευτερεύοντα μπορούσαν να συνδεθούν σε αρκετά "κεριά Γιαμπλότσκοφ" (είδος ηλεκτρικού λαμπτήρα τόξου). Στην πατέντα ισχυριζόταν ότι το σύστημα μπορούσε να "παρέχει ανεξάρτητα ισχύ σε διάφορους λαμπτήρες, με διαφορετική ισχύ φωτεινότητας, από μία πηγή ηλεκτρικής ισχύος". Προφανώς, το πηνίο επαγωγής σε αυτό το σύστημα λειτουργούσε ως μετασχηματιστής.

Οι Λουσιέν Γκολάρ και Τζον Ντίξον Γκιμπς επέδειξαν πρώτοι το 1882 στο Λονδίνο μια συσκευή με ανοιχτό πυρήνα σιδήρου που αποκαλούσαν "δευτερεύουσα γεννήτρια", ιδέα που πούλησαν στη συνέχεια στην αμερικανική εταιρεία Ουέστινγκχαους. Την ίδια συσκευή επέδειξαν και το 1884 στο Τορίνο, όπου υιοθετήθηκε για ένα ηλεκτρικό σύστημα φωτισμού.

Οι Ούγγροι μηχανικοί Κάρολι Ζιπερνόφσκι, Όττο Μπλάθι και Μίτσα Ντέρι, από την εταιρεία Γκαντζ στην Βουδαπέστη δημιούργησαν το αποδοτικό μοντέλο κλειστού πυρήνα "ZBD" το 1885, βασισμένοι σε ένα σχέδιο των Γκολάρ και Γκιμπς. Ένας φυσικός της Ουέστινγκχαους, ο Ουίλλιαμ Στάνλεϊ, δημιούργησε την πρώτη εμπορική υλοποίηση μετασχηματιστή το 1885, μετά την αγορά από τον Τζορτζ Ουέστινγκχαους των πατεντών των Γκολάρ και Γκιμπς. Ο πυρήνας ήταν κατασκευασμένος από πλάκες σιδήρου σχήματος "E", οι οποίες έμπαιναν η μία μέσα στην άλλη. Αυτό το σχέδιο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1886. Η αίτηση ευρεσιτεχνίας έκανε για πρώτη φορά αναφορά στη λέξη "μετασχηματιστής". Ο Ρώσος μηχανικός Μικαΐλ Ντόλιβο-Ντομπροβόλσκι ανέπτυξε τον πρώτο τριφασικό μετασχηματιστή το 1889. Το 1891 ο Νικόλα Τέσλα εφηύρε το πηνίο Τέσλα, ένα μετασχηματιστή συντονισμού με πυρήνα αέρα, για την παραγωγή πολύ υψηλών τάσεων σε υψηλές συχνότητες. Μετασχηματιστές ακουστών συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκαν για τα πρώτα πειράματα της ανάπτυξης του τηλεφώνου. Παρότι νέες τεχνολογίες έχουν καταστήσει τους μετασχηματιστές παρωχημένους για ορισμένες ηλεκτρονικές εφαρμογές, μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται ακόμα σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές. Οι μετασχηματιστές είναι επίσης βασικοί στην μετάδοση ρευμάτων υψηλής τάσης, τεχνική που κάνει οικονομικά βιώσιμη τη μετάδοση ηλεκτρικής ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.

2.2 Βασικές αρχές

Ο μετασχηματιστής βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον, ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο (ηλεκτρομαγνητισμός) και, δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυλιγμένο σύρμα ("τύλιγμα"), επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλίγματος (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή). Μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα, αλλάζει η ένταση του μαγνητικού του πεδίου. Εφόσον το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εκτείνεται και στο δευτερεύον τύλιγμα, επάγεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος.

Ένας ιδανικός μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης με επισημασμένη την μαγνητική ροή στον πυρήνα του. Ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα περιελίσσονται γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, π.χ. από σίδηρο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όσο το δυνατόν περισσότερες γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγει το πρωτεύον ρεύμα, βρίσκονται εντός του πυρήνα και περνούν τόσο από το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα.

2.3 Νόμος επαγωγής

Το δυναμικό που επάγεται στα άκρα του δευτερεύοντος μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο της επαγωγής του Φάραντεϊ, ο οποίος δηλώνει πως:

$$V_S = N_S \frac{d\Phi}{dt}$$

όπου V_S είναι η στιγμιαία τάση, N_S είναι ο αριθμός των περιελίξεων (στροφών) στο δευτερεύον και Φ η μαγνητική ροή σε μία περιέλιξη του τυλίγματος. Αν οι στροφές του τυλίγματος είναι προσανατολισμένες κάθετα προς τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου, η ροή είναι το γινόμενο της έντασης B του μαγνητικού πεδίου και της επιφάνειας A μέσα από την οποία διέρχεται. Η επιφάνεια είναι σταθερή και ίση με την διατομή του πυρήνα του μετασχηματιστή, ενώ το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται με το χρόνο, ανάλογα με την διέγερση του πρωτεύοντος.

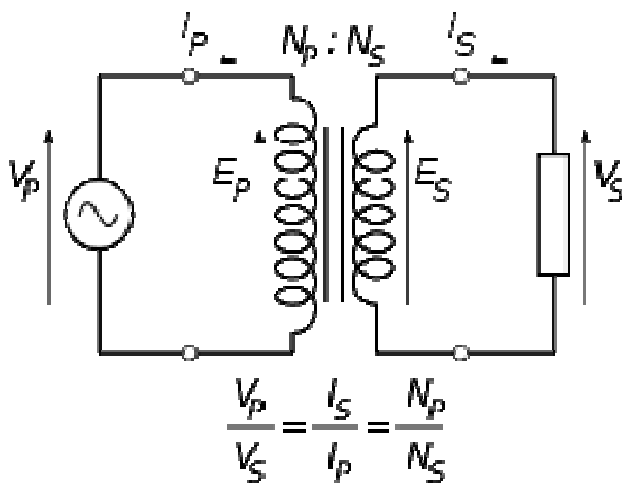
Καθώς σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή η ροή που περνά μέσα τόσο από το πρωτεύον όσο και από το δευτερεύον είναι ίδια, η στιγμιαία τάση στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος ισούται με:

$$V_P = N_P \frac{d\Phi}{dt}$$

Αν διαιρέσουμε τις δύο πιο πάνω σχέσεις κατά μέλη, παίρνουμε την βασική εξίσωση για την ανύψωση ή τον υποβιβασμό της τάσης:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

2.4 Ιδανική εξίσωση ισχύος



Ο ιδανικός μετασχηματιστής ως στοιχείο κυκλώματος

Αν το δευτερεύον είναι συνδεδεμένο σε φορτίο που επιτρέπει την ροή ρεύματος, τότε έχουμε μετάδοση ισχύος από το πρωτεύον κύκλωμα στο δευτερεύον κύκλωμα. Ιδανικά ο μετασχηματιστής έχει τέλεια αποδοτικότητα, δηλαδή όλη η εισερχόμενη ενέργεια μεταφέρεται από το πρωτεύον, μέσω του μαγνητικού πεδίου, στο δευτερεύον. Αν αυτή η συνθήκη ισχύει, η εισερχόμενη ηλεκτρική ισχύς πρέπει να ισούται με την εξερχόμενη ισχύ.

$$P_{\text{incoming}} = I_P V_P = P_{\text{outgoing}} = I_S V_S$$

δίνοντας την εξίσωση του ιδανικού μετασχηματιστή

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{I_P}{I_S}$$

Αν η τάση αυξηθεί (ανυψωθεί) ($V_S > V_P$), τότε το ρεύμα μειώνεται (υποβιβάζεται) ($I_S < I_P$) κατά τον ίδιο συντελεστή. Οι μετασχηματιστές έχουν υψηλή αποδοτικότητα, οπότε αυτός ο τύπος αποτελεί ρεαλιστική προσέγγιση. Η αντίσταση στο ένα κύκλωμα μετασχηματίζεται ανάλογα με το *τετράγωνο* του λόγου περιελίξεων. Για παράδειγμα, αν μια αντίσταση Z_S είναι συνδεδεμένη στα άκρα του δευτερεύοντος, εμφανίζεται στο πρωτεύον να έχει αντίσταση $Z_S \left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2$. Αυτή η σχέση είναι αμφίδρομη, οπότε η αντίσταση Z_P του πρωτεύοντος εμφανίζεται στο δευτερεύον ως

$$Z_P \left(\frac{N_S}{N_P}\right)^2.$$

2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα

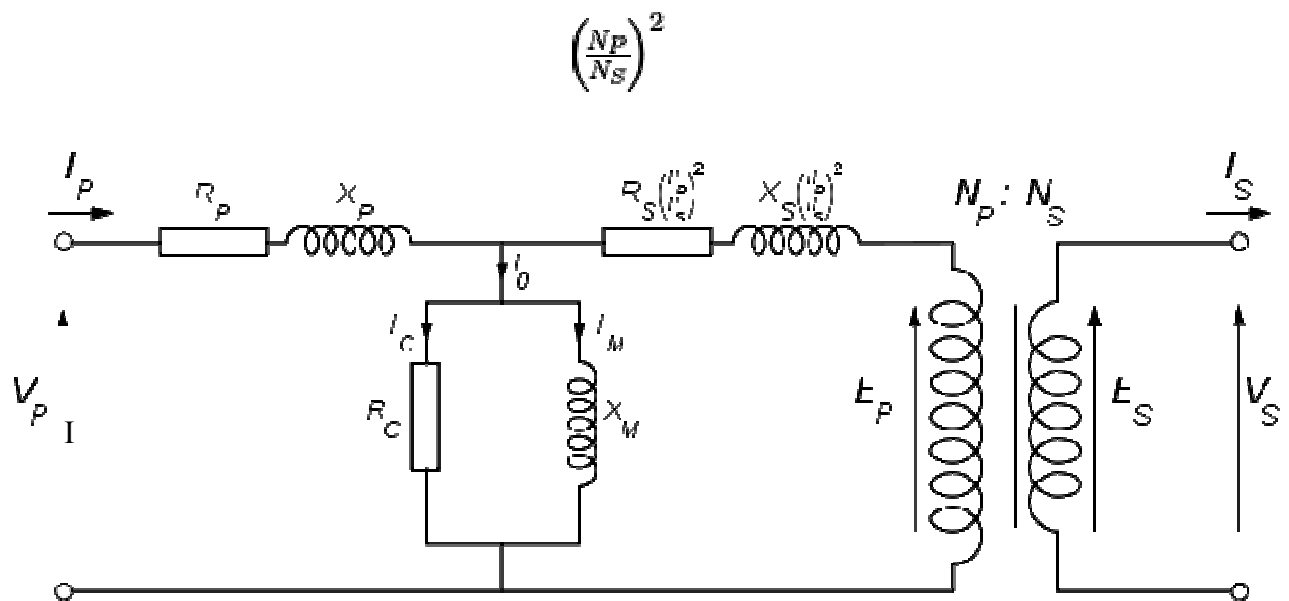
Οι φυσικοί περιορισμοί των πραγματικών μετασχηματιστών μπορούν να συνοψιστούν σε ένα μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος, το οποίο "χτίζεται" γύρω από το μοντέλο του ιδανικού, χωρίς απώλειες, μετασχηματιστή. Η απώλεια ισχύος στα τυλίγματα εξαρτάται από το ρεύμα και αναπαρίσταται με τις σε σειρά συνδεδεμένες αντιστάσεις R_P και R_S . Η απώλεια ροής οδηγεί στην πτώση κλάσματος της εφαρμοζόμενης τάσης, πτώση η οποία δεν συνεισφέρει στην αμοιβαία σύζευξη και, κατά συνέπεια, μπορεί να μοντελοποιηθεί με τις επαγωγικές αντιδράσεις X_P και X_S , συνδεδεμένες σε σειρά με την τέλεια συζευγμένη περιοχή.

Οι απώλειες του πυρήνα οφείλονται κυρίως στην υστέρηση και στις επιπτώσεις των δινορευμάτων στον πυρήνα, ενώ είναι ανάλογα του τετραγώνου της ροής του πυρήνα για λειτουργία σε συγκεκριμένη συχνότητα. Καθώς η ροή στον πυρήνα είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης, οι απώλειές του μπορούν να εκφραστούν με μια αντίσταση R_C τοποθετημένη παράλληλα με τον ιδανικό μετασχηματιστή.

Ένας πυρήνας με πεπερασμένη διαπερατότητα απαιτεί ένα ρεύμα μαγνητισμού I_M για να διατηρήσει την αμοιβαία ροή σε αυτόν. Το ρεύμα μαγνητισμού είναι συμφασικό με τη ροή. Φαινόμενα κορεσμού οδηγούν στην μη γραμμικότητα της σχέσης μεταξύ των δύο, για λόγους απλότητας όμως αυτό το φαινόμενο τείνει να αγνοείται στα περισσότερα ισοδύναμα κυκλώματα. Με ένα ημιτονοειδές τροφοδοτικό, η ροή του πυρήνα υστερεί της επαγόμενης ΗΕΔ κατά 90° και αυτό το φαινόμενο μπορεί να μοντελοποιηθεί ως αντίδραση μαγνητισμού X_M παράλληλα με το στοιχείο απώλειας του πυρήνα. Οι R_C και X_M μερικές φορές

αναφέρονται από κοινού ως ο "κλάδος μαγνητισμού" του μοντέλου. Αν το δευτερεύον είναι ανοιχτοκυκλωμένο, το ρεύμα I_0 που λαμβάνουμε στον κλάδο μαγνητισμού, αναπαριστά το ρεύμα κενού φορτίου του μετασχηματιστή.

Η δευτερεύουσα σύνθετη αντίσταση R_S και X_S συχνά ανάγεται στην πλευρά του πρωτεύοντος, αφού πολλαπλασιαστεί με τον τελεστή.



Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή, με τις δευτερεύουσες σύνθετες αντιστάσεις ανηγμένες στην πλευρά του πρωτεύοντος

Η ανάλυση μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω μεταφέροντας τον κλάδο μαγνητισμού στα αριστερά της σύνθετης αντίστασης του πρωτεύοντος, μια έμμεση παραδοχή ότι το ρεύμα μαγνητισμού είναι χαμηλό, και με την άθροιση στη συνέχεια των σύνθετων αντιστάσεων του πρωτεύοντος και του ανηγμένου δευτερεύοντος, καταλήγοντας σε μια ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση.

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος ενός μετασχηματιστή μπορούν να υπολογιστούν από τα αποτελέσματα δύο δοκιμών στον μετασχηματιστή: της δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος και της δοκιμής βραχυκυκλώματος.

2.6 Έννοια του μετασχηματιστή - αρχή λειτουργίας

Οι μετασχηματιστές είναι διατάξεις πηνίων, όπου με την ιδιότητα του φαινομένου της αυτεπαγωγής πετυχαίνουμε μετασχηματισμό της τάσης και του ρεύματος από μια εναλλασσόμενη πηγή τάσης. Ένας απλός μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία, όπου το ένα ονομάζεται πρωτεύον πηνίο και το άλλο δευτερεύον πηνίο. Στο πρωτεύον πηνίο οδηγείται η τάση που θέλουμε να μετασχηματίσουμε και στο δευτερεύον πηνίο λαμβάνουμε την επιθυμητή τάση. Ο σιδηροπυρήνας αποτελεί βασικό στοιχείο του μετασχηματιστή, καθώς αυξάνει την αυτεπαγωγή των πηνίων και κατά συνέπεια τον πολλαπλασιασμό της μαγνητικής ροής του πηνίου.

Εάν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση στο πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή, η μεταβολή του ρεύματος έχει σαν συνέπεια την μεταβολή της μαγνητικής ροής στο δευτερεύον τύλιγμα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα άκρα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Η τάση και το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή εξαρτάται από το πάχος του σύρματος των πηνίων, τον αριθμό στροφών των πηνίων και το μέγεθος του σιδηροπυρήνα.

Οι μετασχηματιστές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες: **α) μετασχηματιστές τροφοδοσίας, β) μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων, γ) μετασχηματιστές ρεύματος, δ) αυτομετασχηματιστές, και ε) μετασχηματιστές υψηλής τάσης.**

Οι μετασχηματιστές τροφοδοσίας είναι διατάξεις οι οποίες παίρνουν την ηλεκτρική ενέργεια από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος και την αποδίδουν στην έξοδό τους μεταβάλλοντας του βασικούς παράγοντες που είναι η τάση και το ρεύμα. Όπως αναφέραμε και ποιο πάνω ένας απλός μετασχηματιστής τροφοδοσίας

αποτελείται από δύο πηνία το πρωτεύον και το δευτερεύον τα οποία βρίσκονται σε μαγνητική ζεύξη μεταξύ τους, με την βοήθεια σιδηροπυρήνα.

Επειδή ο σιδηροπυρήνας είναι καλό αγωγός του ηλεκτρισμού και διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, αναπτύσσονται σε αυτόν επαγωγικά ρεύματα (ρεύματα Φουκώ), τα οποία προκαλούν την θερμότητά του. Η θέρμανση αυτή σημαίνει απώλεια ενέργειας και θα πρέπει αυτή η ενέργεια που χάνεται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

Αν θεωρήσουμε έναν μετασχηματιστή χωρίς απώλειες (ιδανικός μετασχηματιστής), τότε το ρεύμα που κυκλοφορεί στο πρωτεύον αναπτύσσει στο δευτερεύον μια ηλεκτρεγερτική δύναμη E_2 . Αν E_1 είναι η τάση του πρωτεύοντος τότε οι μεταβολές της κοινής ροής θα είναι ανάλογες προς τον αριθμό στροφών n_1 και n_2 του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου.

Δηλαδή θα ισχύει η σχέση:

$E_1/E_2=N_1/N_2$. Ο λόγος N_1/N_2 ονομάζεται **λόγος μετασχηματισμού**.

άρα λοιπόν αν $N_1>N_2$, τότε θα έχουμε $E_1>E_2$. Με άλλα λόγια ο μετασχηματιστής θα είναι **μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης**. Αν η $E_2>E_1$, τότε ο μετασχηματιστής ονομάζεται **μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης**.

Το βάθος απόδοσης του μετασχηματιστή εκφράζει τις απώλειες ενέργειας ενός μετασχηματιστή τροφοδοσίας και δίνεται από την σχέση:

$$\eta=P_1/P_2,$$

όπου P_1 είναι η ισχύς εισόδου του μετασχηματιστή και P_2 η ισχύς εξόδου του. Σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή θα έχουμε $\eta=1$ που σημαίνει ότι η ισχύς εξόδου είναι ίση με την ισχύ εξόδου. Κάτι τέτοιο πρακτικά δεν συμβαίνει λόγω των απωλειών του μετασχηματιστή που θα αναφερθούμε παρακάτω.

Αν $P_1=P_2$ τότε $E_1 I_1=E_2 I_2$ οπότε $I_1/I_2=E_2/E_1=N_2/N_1$. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα στο δευτερεύον ανυψώνεται, όταν η τάση στο δευτερεύον υποβιβάζεται και αντίστροφα.

Ο λόγος E_1/I_1 εκφράζει την σύνθετη αντίσταση Z_1 του πρωτεύοντος οπότε θα έχουμε:

$$Z1 = E1/I1 = (E1/I2) (I2/I1) (E2/I2) = (N1/N2)^2 E2/I2 = (N1/N2)^2 Z2.$$

Αυτό σημαίνει ότι η επαγωγική ή ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος μπορεί να αναχθεί στο πρωτεύον με πολλαπλασιασμό επί το τετράγωνο του λόγου μετασχηματισμού.

α) Απώλειες μετασχηματιστών τροφοδοσίας

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω ιδανικός μετασχηματιστής δεν υπάρχει, με αποτέλεσμα ένα μέρος της ενέργειάς του να μετατρέπεται στον σιδηροπυρήνα σε θερμότητα. Έτσι η ισχύς που αποδίδεται στην έξοδο είναι μικρότερη της εισόδου. Τα αίτια των απωλειών σε ένα μετασχηματιστή είναι τα εξής:

α) Απώλειες σιδήρου. Οφείλονται στο υλικό του πυρήνα του μετασχηματιστή και προέρχονται από τα ρεύματα Φουκώ και την μαγνητική υστέρηση.

β) Απώλειες χαλκού. Το σύρμα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, έχει μεγάλο μήκος και κατά συνέπεια κάποια υπολογίσιμη ωμική αντίσταση. Οι ωμικές αντιστάσεις των πηνίων σχηματίζουν μια επιπλέον απώλεια ισχύος στα τυλίγματα των πηνίων.

β) Ο σιδηροπυρήνας του μετασχηματιστή - κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.

Οι απώλειες ενός σιδηροπυρήνα περιορίζονται με την επιλογή κατάλληλου υλικού το οποίο έχει κύκλο υστέρησης με μικρό εμβαδόν. Πρέπει επίσης να έχουν μεγάλη ειδική αντίσταση ρ για τον περιορισμό των δεινορευμάτων. Οι απώλειες αυτές περιορίζονται κατασκευάζοντας τον πυρήνα από λεπτά πυριτιούχα ελάσματα, πάχους 0,3 - 0,5 cm ή από μίγμα σκόνης σιδήρου με μονωτικό υλικό που είναι μονωμένα από την μία όψη τους.

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή μπορεί να είναι είτε τύπος μανδύα, είτε τύπος πυρήνα. Ο τύπος μανδύα συνηθίζεται σε μετασχηματιστές πολύ μεγάλης ισχύος. Τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγονται στο κεντρικό στέλεχος αυτού, η δε όλη περιέλιξη προφυλάσσεται από δύο απέναντι στελέχη.

Στους μετασχηματιστές με τύπο πυρήνα τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κατανέμονται ομοιόμορφα στα δύο ακραία στελέχη και χρησιμοποιούνται συνήθως σαν μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων. Οι περιελίξεις διαιρούνται εξίσου στα δύο σκέλη του πυρήνα και στον καθένα περιελίσσεται το μισό κάθε πηνίου. Η περιέλιξη χαμηλής τάσης μπαίνει κοντά στον πυρήνα και η περιέλιξη υψηλής τάσης εξωτερικά της περιέλιξης χαμηλής τάσης, για να μειωθούν οι απαιτήσεις μόνωσης.

Οι συνδέσεις ενός σιδηροπυρήνα γίνονται με συνδετήρες ή βίδες. Οι καλές συνδέσεις περιορίζουν τον μαγνητικό θόρυβο.

Η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή εξαρτάται περισσότερο από τις μονώσεις του και από τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται. Τα μονωτικά υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι το εμποτισμένο χαρτί, η μίκα και ειδικό λάδι.

Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή γίνονται συνήθως με σύρμα κυκλικής διατομής, μονωμένο με ειδικό μονωτικό υλικό. Συνήθως στην περιέλιξη τα κενά που δημιουργούνται κατά το τυλίγμα γεμίζονται από ειδικό σκληρυντικό βερνίκι.

γ) Χρήση μετασχηματιστών τροφοδοσίας.

Οι μετασχηματιστές τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα τροφοδοτικών σε ηλεκτρονικές συσκευές, οι οποίοι υποβιβάζουν την υψηλή τάση του δικτύου σε χαμηλές τάσεις για τα κυκλώματα των συσκευών. Παράλληλα παρέχουν γαλβανική απομόνωση των κυκλωμάτων των συσκευών για προστασία από κινδύνους ηλεκτροπληξίας.

Πολλοί μετασχηματιστές χρησιμοποιούν περισσότερες από μία εξόδους για διάφορες τάσεις και ρεύματα σε ηλεκτρονικές συσκευές ενώ σε κυκλώματα παλμοτροφοδοτικών οι μετασχηματιστές είναι κατασκευασμένοι για υψηλότερες συχνότητες από τα 50Hz, με εντελώς διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά από τους απλούς μετασχηματιστές των 50 - 60 Hz.

Οι μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για να λειτουργούν σωστά σε όλο το ακουστικό φάσμα από 16HZ έως 16KHZ. Χρησιμοποιούνται συνήθως ως μετασχηματιστές εξόδου σε ενισχυτές τάξης A

μεγάλης ισχύος, ενώ σε πολύ μικρές ισχύς μπορούμε να συναντήσουμε μικρούς μετασχηματιστές σε ραδιόφωνα με ενισχυτή push pull για προσαρμογή της χαμηλής αντίστασης του μεγαφώνου. Η κατασκευή ενός μετασχηματιστή ήχου είναι ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς λαμβάνονται πολλοί παράγοντες, όπως όρια συχνοτήτων, παρασιτικές χωρητικότητες, μαγνητικές διαφυγές, κτλ.

Οι αυτομετασχηματιστές αποτελούνται από ένα πηνίο με σιδηροπυρήνα, το οποίο διαθέτει μία ή περισσότερες λήψεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση που λαμβάνεται ανάμεσα σε μία λήψη και ένα κοινό σημείο να είναι μικρότερη από την τάση εισόδου. Έτσι πετυχαίνουμε υποβιβασμό τάσης. Για ανύψωση τάσης κάνουμε την αντίστροφη διαδικασία, τροφοδοτούμε τον αυτομετασχηματιστή από το τύλιγμα λήψης και ένα κοινό σημείο και παίρνουμε μεγαλύτερη τάση στα δύο άκρα του.

Αν η λήψη του αυτομετασχηματιστή είναι μεταβλητή, τότε θα παίρνουμε διάφορες τάσεις στην έξοδό του. Το πλεονέκτημα που έχει αυτός ο μετασχηματιστής είναι ότι είναι φτηνότερος σε κόστος διότι διαθέτει μόνο ένα τύλιγμα άρα λιγότερος χαλκός, καθώς επίσης και λιγότερο σιδηρομαγνητικό υλικό.

Επίσης ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματά του είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης που έχει. Η χρήση του όμως είναι πάρα πολύ περιορισμένη διότι δεν παρέχει γαλβανική απομόνωση και υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης της φάσης στην έξοδό του. Το μεγάλο αυτό μειονέκτημα που έχει καθιστά την χρήση του σε πολύ ειδικές εφαρμογές.

Οι μετασχηματιστές ρεύματος αποτελούνται από δύο πηνία, το πρωτεύον και το δευτερεύον και έναν σιδηροπυρήνα, όπως και οι μετασχηματιστές τάσης. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι μετασχηματιστές ρεύματος έχουν λίγες σπείρες στο πρωτεύον τους και το χάλκινο σύρμα που χρησιμοποιείται είναι πολύ χοντρό. Το δευτερεύον πηνίο τους έχει περισσότερες σπείρες και το σύρμα που χρησιμοποιείται είναι ψιλότερης διατομής. Στο δευτερεύον πηνίο συνδέεται ένα αμπερόμετρο σαν φορτίο για την μέτρηση του ρεύματος.

Η χρήση των μετασχηματιστών ρεύματος είναι στα αμπερόμετρα καθώς με αυτόν των τρόπο αυξάνεται η ευαισθησία τους.

Οι μετασχηματιστές υψηλής τάσης είναι μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται στους δέκτες τηλεοράσεως για την τροφοδότηση των πηνίων απόκλισης του

καθοδικού σωλήνα. Η κατασκευή αυτών των μετασχηματιστών έχει διαφορές καθώς απαιτούνται μονώσεις υψηλής ποιότητας και συμπαγής πυρήνας. Ο πυρήνας στους μετασχηματιστές υψηλής τάσης αποτελείται από δύο κομμάτια φερρίτη σχήματος Π.

Στο ένα σκέλος του πυρήνα περιελίσσονται το πρωτεύον και δύο άλλα δευτερεύοντα πηνία, ενώ στο άλλο σκέλος του περιελίσσεται το δευτερεύον, δηλαδή το τύλιγμα υψηλής τάσης.

Κατά την περιέλιξη του δευτερεύοντος παρεμβάλλονται μεταξύ των στρωμάτων φύλλα από πλαστική ταινία μεγάλης μόνωσης και η όλη περιέλιξη γίνεται συμπαγής χωρίς να υπάρχουν κενά. Μετά τοποθετείται σε φούρνο με θερμοκρασία από 200 έως 300C° και ψήνεται. Τέλος εμποτίζεται σε πολυεστέρα και τοποθετείται μέσα σε θήκη από πολυκαρβονικό υλικό. Στην τελική μορφή του καλύπτεται ξανά με πολυεστέρα.

Η υπερυψηλή τάση που φτάνει τα 16KV επιτυγχάνεται με την βοήθεια διόδων (καταρράκτης), που στους σύγχρονους μετασχηματιστές υψηλής τάσης περιέχεται και το κύκλωμα του καταρράκτη.

Ένας τοροειδής μετασχηματιστής ανήκει στην κατηγορία των μετασχηματιστών τροφοδοσίας, όπου η κατασκευαστική του μορφή είναι διαφορετική από την συνήθη κατασκευή των μετασχηματιστών με σιδηροπυρήνα. Αποτελούνται από έναν στρογγυλό πυρήνα από φερρίτη, πάνω στον οποίο τυλίγονται το πρωτεύον και το δευτερεύον πηνίο. Οι μετασχηματιστές αυτοί έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα από έναν μετασχηματιστή τροφοδοσίας με σιδηροπυρήνα, διότι έχουν μικρότερο μέγεθος και δημιουργούν μικρότερο μαγνητικό πεδίο γύρω τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εξαλείφεται ο θόρυβος που μπορεί τυχόν να δημιουργηθεί σε κυκλώματα, από την κοντινή απόσταση του μετασχηματιστή. Γι' αυτό σε κυκλώματα ήχου υψηλής ποιότητας, (προενισχυτές, ενισχυτές, κ.τ.λ.), χρησιμοποιούν τοροειδείς μετασχηματιστές στα κυκλώματα τροφοδοσίας τους. Το μόνο μειονέκτημά τους είναι το υψηλότερο κόστος τους.

2.7 ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Οι μετασχηματιστές διακρίνονται ως προς την ισχύ τους σε : □

- Μετασχηματιστές οργάνων: Είναι μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται σε όργανα μέτρησης και σε πίνακες εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων □
- Μετασχηματιστές ισχύος: Μεταβιβάζουν σημαντικές ισχύς και χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μετασχηματιστές ισχύος διακρίνονται: □

Ως προς τον αριθμό των φάσεων τους σε :

- Τριφασικούς μετασχηματιστές: Χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της τάσεως σε τριφασικό σύστημα
- Μονοφασικούς μετασχηματιστές: Χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της τάσεως μίας φάσεως του τριφασικού συστήματος . □

Ως προς τον τρόπο ψύξης τους σε:

- Μετασχηματιστές ξηρού τύπου : Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου ψύχονται με αέρα .
- Μετασχηματιστές λαδιού: Οι μετασχηματιστές λαδιού ψύχονται με κυκλοφορία λαδιού □

Ως προς τον χώρο τοποθέτησής τους σε :

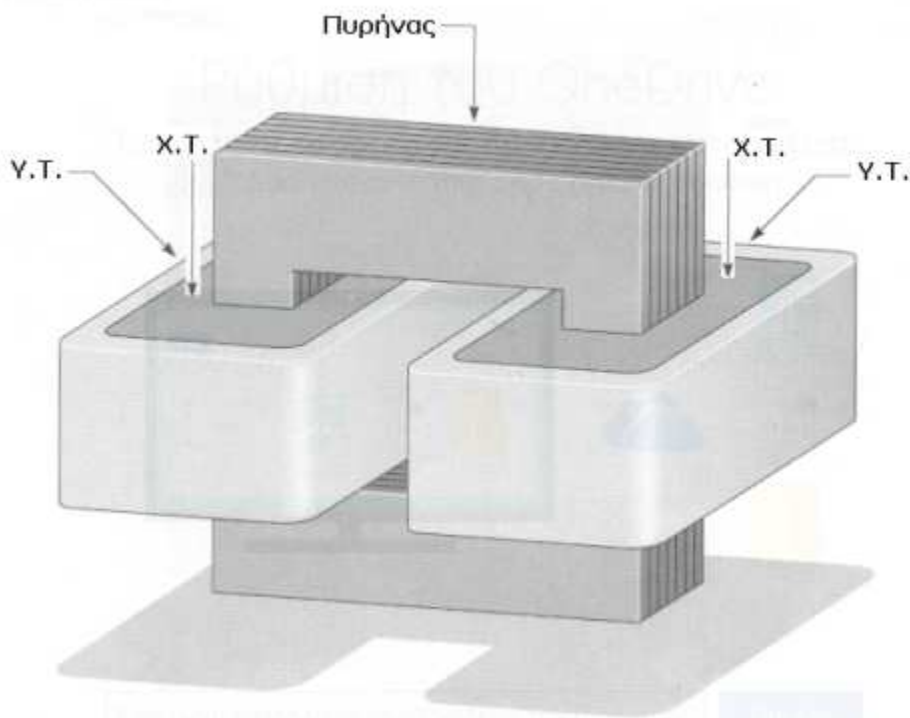
- Μετασχηματιστές υπαίθρου
- Μετασχηματιστές κλειστού χώρου □

Ως προς τη χρήση τους στο σύστημα ηλεκτροδότησης

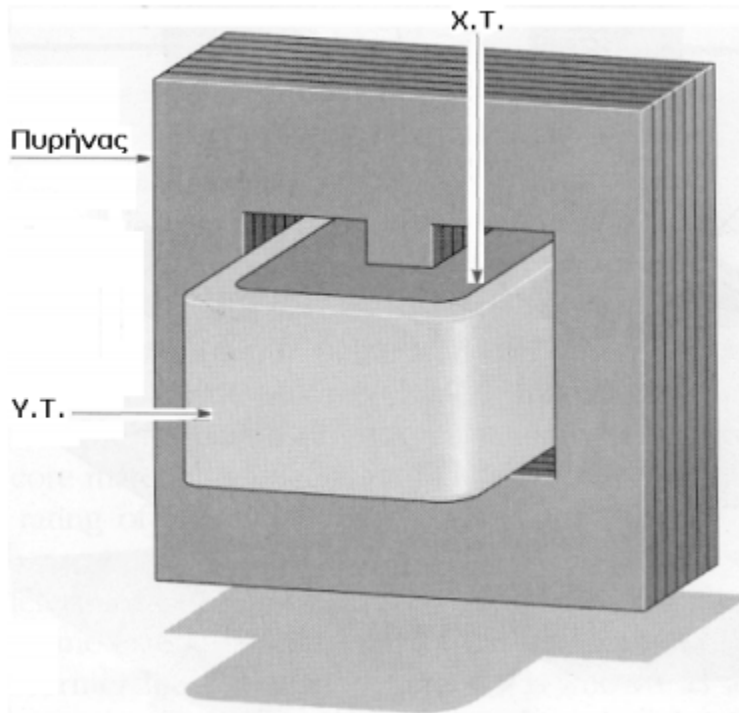
- Μετασχηματιστές μονάδος ή ανυψώσεως : Συνδέονται στην έξοδο των γεννητριών και ανυψώνουν την τάση ώστε να οδηγηθεί στη γραμμή μεταφοράς .
- Μετασχηματιστές υποσταθμών ή υποβιβασμού : Συνδέονται στο τέλος των γραμμών μεταφοράς και υποβιβάζουν την τάση στα επίπεδα διανομής .
- Μετασχηματιστές διανομής : Υποβιβάζουν την τάση στα επίπεδα χρησιμοποίησης. □

Ως προς τον τύπο του πυρήνα

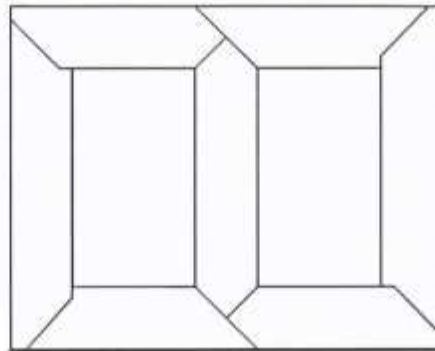
- Μετασχηματιστές τύπου πυρήνα : Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται γύρω από τις δύο πλευρές (σκέλη) ενός ορθογώνιου πυρήνα.
- Μετασχηματιστές τύπου κελύφους ή μανδύα: Σε αυτού του τύπου τους μετασχηματιστές τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος και η ροή κλείνει κύκλωμα από τα ακριανά σκέλη και το ζύγωμα . Ο πυρήνας περιβάλλει τα τυλίγματα . Οι μετασχηματιστές τύπου κελύφους έχουν μικρότερη ροή σκεδάσεως από τους μετασχηματιστές τύπου πυρήνα



Εικόνα 6: Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα.



Εικόνα 7: Μετασχηματιστής τύπου μανδύα.



Εικόνα 8: Στοιβαχτός πυρήνας

Όταν τα ελάσματα τυλίγονται σε μορφή πυρήνα με αποκομμένες λωρίδες μαγνητικού υλικού τότε ο πυρήνας ονομάζεται τυλιχτός πυρήνας .

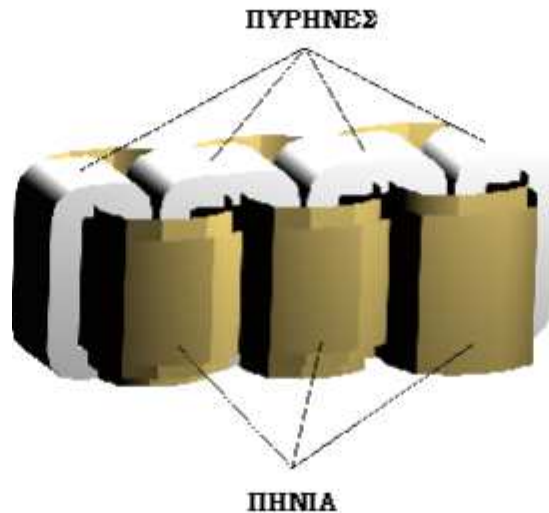
Ανεξάρτητα από τον τύπο στον οποίο ανήκει ένας μετασχηματιστής ο πυρήνας του είναι κατασκευασμένος από λεπτά σιδηρομαγνητικά ελάσματα πυριτιούχου χάλυβα πάχους 0.5 mm ή 0.3 mm . Τα ελάσματα αυτά είναι μονωμένα μεταξύ τους με ειδικό μονωτικό βερνίκι για την ελάττωση των δυναμικών που επάγονται στον πυρήνα . Όταν τα ελάσματα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο έτσι ώστε τα κενά μεταξύ του τέλους των ελασμάτων του ενός στρώματος να

επικαλύπτονται από το έλασμα του επόμενου στρώματος τότε ο πυρήνας ονομάζεται στοιβαχτός πυρήνας. Οι μετασχηματιστές τυλιχτού πυρήνα παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα έναντι των μετασχηματιστών στοιβαχτού πυρήνα :

- Έχουν μικρότερο ρεύμα μαγνήτισης
- Έχουν μικρότερο θόρυβο διότι αποτελούνται από μικρότερα φύλλα μαγνητικού υλικού
- Υπάρχει πλήρης εκμετάλλευση της διατομής του πυρήνα
- Μικρότερες απώλειες πυρήνα
- Δεν απαιτείται σημαντική εργασία διότι η τύλιξη γίνεται με κατάλληλη αυτόματη μηχανή.

Τα μειονεκτήματά τους έναντι των μετασχηματιστών τύπου στοιβαχτού πυρήνα είναι αντίστοιχα:

- Τα κενά αέρος πιθανόν να διαφέρουν μεταξύ τους λόγω των ανοχών της μηχανής περιέλιξης των πυρήνων και λόγω των δυσκολιών στην επεξεργασία του μαγνητικού υλικού.
- Οι επιθυμητές διαστάσεις των τυλιχτών πυρήνων δεν μπορούν να επιτευχθούν με ακρίβεια
- Η μηχανή περιέλιξης πυρήνων έχει συγκεκριμένες δυνατότητες. Μπορεί να τυλίξει πυρήνες εώς ένα μέγιστο βάρος και μέχρι κάποια μέγιστη διάμετρο. Αντίθετα οι στοιβαχτοί πυρήνες κατασκευάζονται για οποιαδήποτε επιθυμητή διάσταση.



Εικόνα 9: Τριφασικός μετασχηματιστής διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα.

Τα τυλίγματα Υψηλής Τάσης (ΥΤ) και Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) ενός μετασχηματιστή μπορούν να τοποθετηθούν με δύο τρόπους : □

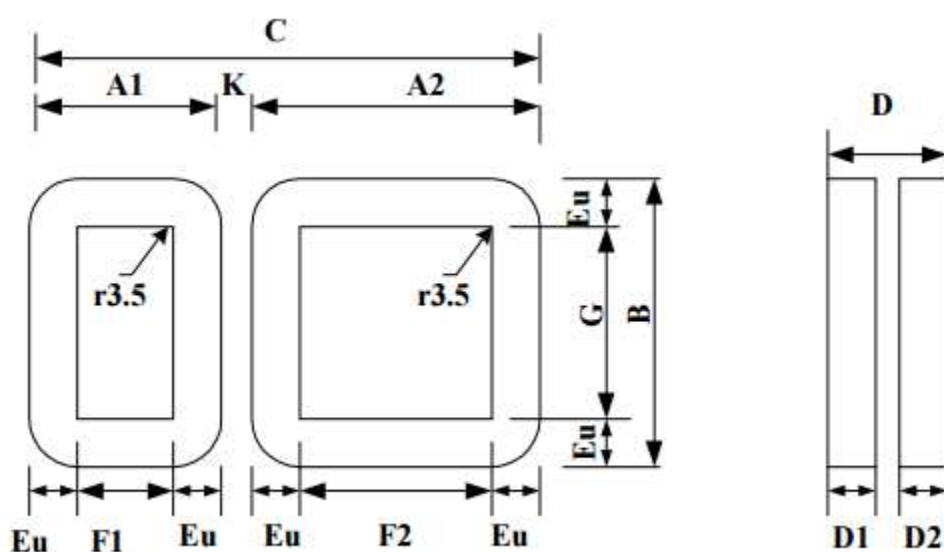
- Ομόκεντρα ή συγκεντρικά: Το τυλίγμα χαμηλής τάσης τοποθετείται στο εσωτερικό του τυλίγματος υψηλής τάσης □
- Σε δίσκους: Τα δύο τυλίγματα χωρίζονται σε υποπηνία (δίσκους) οι οποίοι τοποθετούνται εναλλάξ ένας δίσκος χαμηλής τάσης ένας υψηλής τάσης κλπ. Οι δίσκοι χαμηλής τάσης συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους ομοίως και οι δίσκοι υψηλής τάσης. Έτσι έχουμε δύο άκρα για τη χαμηλή τάση και δύο για την υψηλή τάση.

2.8 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ ΤΥΛΙΧΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ

,Ο υπό μελέτη μετασχηματιστής είναι τριφασικός μετασχηματιστής διανομής, τύπου τυλιχτού πυρήνα της εταιρείας Schneider Electric και απεικονίζεται στο σχήμα 8. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη μετασχηματιστή αφορούν τόσο στον πυρήνα όσο και στα πηνία. Για να κατασκευαστεί ένας τριφασικός μετασχηματιστής διανομής τύπου πυρήνα, πρέπει να συναρμολογηθούν δύο μικροί και δύο μεγάλοι ατομικοί πυρήνες. Οι πυρήνες είναι τεχνολογίας τυλιχτού πυρήνα (wound core) και κατασκευάζονται από μαγνητική λαμαρίνα χαμηλών απωλειών. Η

διαδικασία παραγωγής τους έχει ως εξής: Αρχικά κόβεται η πρώτη ύλη μαγνητικής λαμαρίνας σε λωρίδες τυποποιημένου πλάτους.

Ακολουθεί η κοπή σε προκαθορισμένα μήκη και η περιέλιξη σε στρογγυλό τύμπανο, οπότε προκύπτει ο στρογγυλός πυρήνας. Στη συνέχεια, ο στρογγυλός πυρήνας διαμορφώνεται σε ειδική πρέσα και λαμβάνει τη μορφή ορθογωνικής διατομής. Τέλος, ο τυλιχτός πυρήνας ανοπτύεται προκειμένου ν' ανακτηθούν πλήρως οι ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητες του μαγνητικού υλικού. Οι διαστάσεις και οι κατασκευαστικές παράμετροι ενός μικρού και ενός μεγάλου πυρήνα φαίνονται στο σχήμα 10.

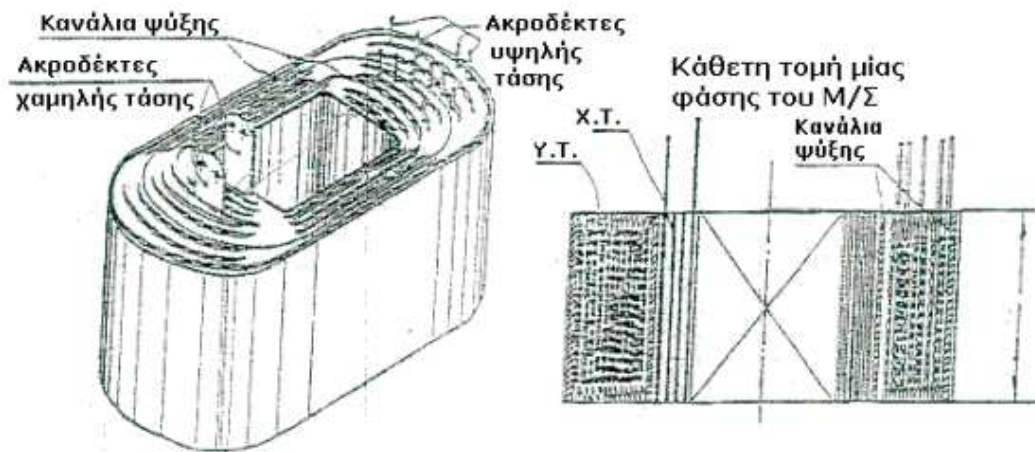


Εικόνα 10: Διαστάσεις μικρού και μεγάλου πυρήνα μετασχηματιστή.

Τα πηνία του μετασχηματιστή είναι συγκεντρικά, ορθογωνικής διατομής, με το τύλιγμα της χαμηλής τάσης να βρίσκεται πλησιέστερα στον πυρήνα. Για την κατασκευή του τυλίγματος της υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό. Η κατασκευή του τυλίγματος της χαμηλής τάσης είναι απλούστερη καθώς αποτελείται από στρώσεις φύλλου χαλκού, οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες. Μεταξύ του τυλίγματος της υψηλής τάσης και του πυρήνα, μεταξύ των στρώσεων των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης, μεταξύ του τυλίγματος της χαμηλής

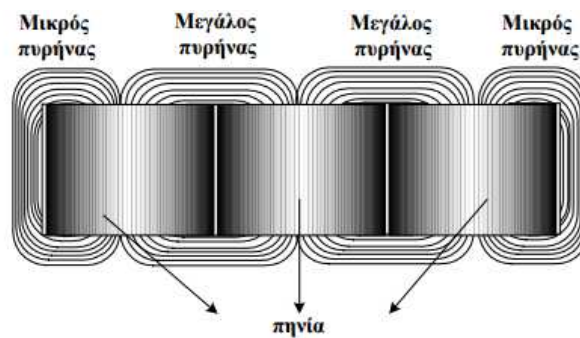
τάσης και του πυρήνα, καθώς και μεταξύ των τυλιγμάτων της υψηλής και χαμηλής τάσης υπάρχει στρώμα μονωτικού χαρτιού.

Στο σχήμα 11 φαίνεται με περισσότερη λεπτομέρεια μία εκ των τριών φάσεων του μετασχηματιστή μαζί με τους ακροδέκτες της χαμηλής και της υψηλής τάσης καθώς και τα κανάλια ψύξης του μετασχηματιστή εντός των οποίων κυκλοφορεί λάδι με φυσική κυκλοφορία. Στο ίδιο σχήμα διακρίνεται μία κάθετη τομή του μετασχηματιστή.



Εικόνα 11: Φάση τριφασικού μετασχηματιστή - κάθετη τομή μετασχηματιστή.

Στο σχήμα 12 φαίνεται το συναρμολογημένο ενεργό μέρος ενός τριφασικού μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα.



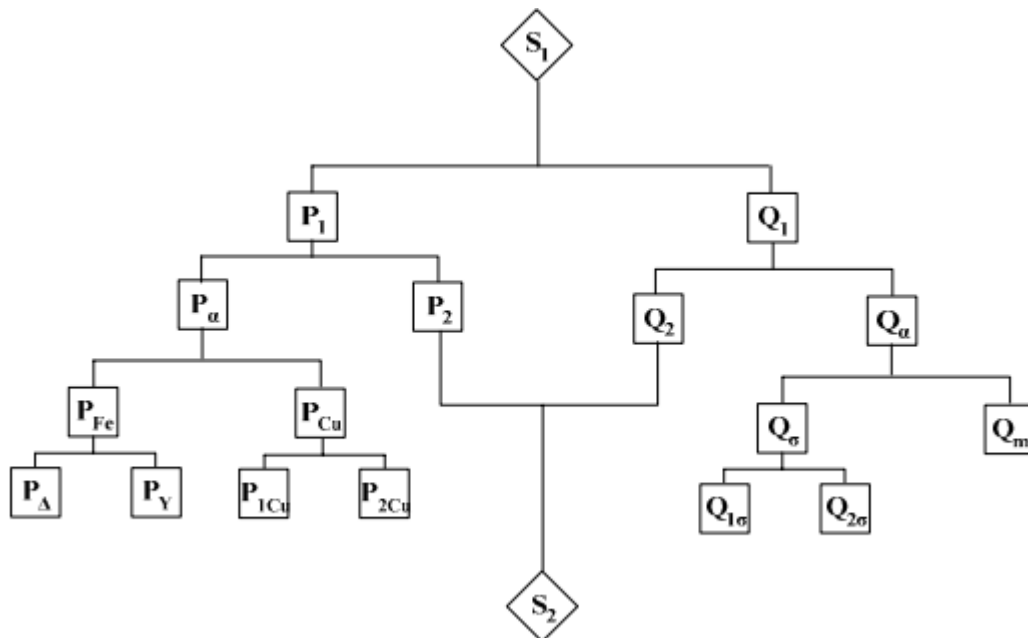
Εικόνα 12: Συναρμολογημένο ενεργό μέρος μετασχηματιστή.

Κεφάλαιο 3:

ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

3.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Η μετατροπή ισχύος από τους μετασχηματιστές γίνεται πάντα με κάποιες απώλειες. Η σχεδίαση των σύγχρονων μετασχηματιστών ισχύος συνήθως υπερβαίνει το 95% σε λειτουργικότητα. Είναι χρήσιμο, ωστόσο, να γνωρίζουμε πού καταλήγει ένα μέρος των απωλειών αυτών και τι προκαλεί το φαινόμενο αυτό.



Εικόνα 13: Διάγραμμα ροής ισχύος μετασχηματιστή

Όπου:

S_1 : Φαινόμενη ισχύς εισόδου

S_2 : Φαινόμενη ισχύς εξόδου

P_1 : Πραγματική ισχύς εισόδου

P_2 : Πραγματική ισχύς εξόδου

Q_1 : Άεργη ισχύς εισόδου

Q_2 : Άεργη ισχύς εξόδου

P_{ap} : Πραγματικές απώλειες

P_{fe} : Απώλειες σιδήρου

P_{Δ} : Απώλειες χαλκού

P_{γ} : Απώλειες δινορρευμάτων

P_{cu} : Απώλειες υστέρησης

P_{1cu} : Απώλειες χαλκού στο πρωτεύον τύλιγμα

P_{2cu} : Απώλειες χαλκού στο δευτερεύον τύλιγμα

Q_{ap} : Άεργες απώλειες

Q_{σ} : Απώλειες σκέδασης

$Q_{1\sigma}$: Απώλειες σκέδασης στο πρωτεύον τύλιγμα

$Q_{2\sigma}$: Απώλειες σκέδασης στο δευτερεύον τύλιγμα

Q_m : Απώλειες μαγνήτισης

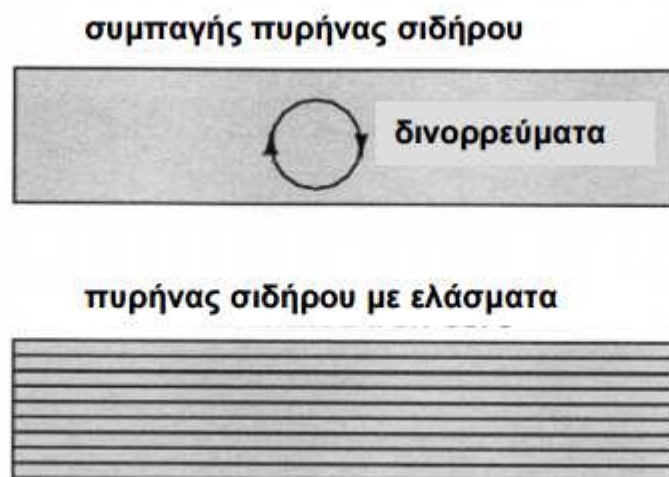
Στο σχήμα 3 φαίνεται το διάγραμμα ροής ισχύος ενός μετασχηματιστή. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζεται το μέρος της ισχύος εισόδου το οποίο καταναλώνεται στο μετασχηματιστή με τη μορφή απωλειών. Στη συνέχεια, δίνεται μια συνοπτική περιγραφή του κάθε είδους απωλειών που εμφανίζεται στο σχήμα αυτό.

Αρχικά, υπάρχουν απώλειες ισχύος που οφείλονται στην αντίσταση των τυλιγμάτων. Αν δε χρησιμοποιούνται υπεραγωγίμα σύρματα, θα υπάρχει πάντα ισχύ διαχεόμενη με τη μορφή θερμότητας μέσα από την αντίσταση των αγωγών που μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Επειδή οι μετασχηματιστές απαιτούν μεγάλα μήκη αγωγού, αυτές οι απώλειες μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας. Αυξάνοντας τις διαστάσεις των τυλιγμάτων, επιτυγχάνουμε μείωση των απωλειών, αλλά με ταυτόχρονη σημαντική αύξηση στο κόστος, το μέγεθος και το βάρος. Εκτός από τις απώλειες στην αντίσταση, το μέγεθος των απωλειών των μετασχηματιστών ισχύος οφείλεται σε μαγνητικές επιδράσεις στον πυρήνα. Ίσως οι πιο σημαντικές από αυτές τις «απώλειες πυρήνα» είναι οι απώλειες δινορρευμάτων, οι οποίες είναι ωμικές και οφείλονται στη διαδρομή επαγόμενων ρευμάτων μέσα από τον πυρήνα σιδήρου.

Επειδή ο σίδηρος είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, καθώς επίσης και ένας εξαιρετικός «αγωγός» της μαγνητικής ροής, θα υπάρχουν επαγόμενα ρεύματα στο σίδηρο όπως υπάρχουν επαγόμενα ρεύματα στα δευτερεύοντα τυλίγματα από το

εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτά τα επαγόμενα ρεύματα-όπως περιγράφονται από την υπόθεση καθετότητας του νόμου του Faraday-τείνουν να κυκλοφορήσουν μέσα από τη διατομή του πυρήνα κάθετα προς τα ελίγματα του πρωτεύοντος. Η περιστροφική τους κίνηση τους δίνει αυτό το ασυνήθιστο όνομα: όπως οι δίνες σε ένα ρέμα που περιστρέφονται αντί να κινούνται σε ευθύγραμμες τροχιές. Ο σίδηρος είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, αλλά όχι τόσο όσο ο χαλκός ή το αλουμίνιο από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως τα τυλίγματα. Συνεπώς, αυτά τα «δινορρεύματα» πρέπει να υπερνικήσουν σημαντική ηλεκτρική αντίσταση καθώς περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα. Υπερνικώντας την αντίσταση που οφείλεται στο σίδηρο, ελευθερώνουν ισχύ με τη μορφή θερμότητας. Αυτή είναι μια αιτία μείωσης της απόδοσης του μετασχηματιστή που είναι δύσκολο να εξαλειφθεί.

Η κύρια στρατηγική για τη μείωση αυτών των περιττών δινορρευμάτων στους πυρήνες των μετασχηματιστών είναι η διαμόρφωση του σιδηρού πυρήνα σε ελάσματα, με κάθε έλασμα να καλύπτεται με μονωτικό υλικό έτσι ώστε αυτός να διαμερίζεται σε λεπτά τμήματα. Το αποτέλεσμα είναι ένα πολύ μικρό βάθος στον πυρήνα για την κυκλοφορία των δινορρευμάτων:



Εικόνα 14: Διαμόρφωση υλικού πυρήνα μετασχηματιστών για τη μείωση των δινορρευμάτων

Οι πυρήνες με ελάσματα, όπως αυτός που φαίνεται στο σχήμα 3.2, είναι καθιερωμένοι σε όλους σχεδόν τους μετασχηματιστές που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες. Οι απώλειες δινορρευμάτων αυξάνονται με τη συχνότητα, έτσι ώστε εκείνοι οι μετασχηματιστές οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν με ισχύ

μεγαλύτερης συχνότητας (όπως τα 400 Hz, που χρησιμοποιούνται σε πολλές στρατιωτικές και αεροναυτικές εφαρμογές) να πρέπει να χρησιμοποιούν λεπτότερα στρώματα για να κρατούν τις απώλειες σε ένα ελάχιστο επίπεδο. Αυτό όμως έχει το ανεπιθύμητο αποτέλεσμα της αύξησης του κατασκευαστικού κόστους του μετασχηματιστή. Μία άλλη, παρόμοια τεχνική για την ελαχιστοποίηση των απωλειών δινορρευμάτων η οποία είναι πιο αποτελεσματική σε υψίσυχνες εφαρμογές, είναι η κατασκευή του πυρήνα από ρινίσματα σιδήρου αντί λεπτών φύλλων. Όπως τα ελάσματα, τα ρινίσματα σιδήρου επικαλύπτονται ξεχωριστά με ένα ηλεκτρικά μονωτικό υλικό, το οποίο καθιστά τον πυρήνα μη αγωγίμο εκτός από το πάχος του κάθε τεμαχίου.

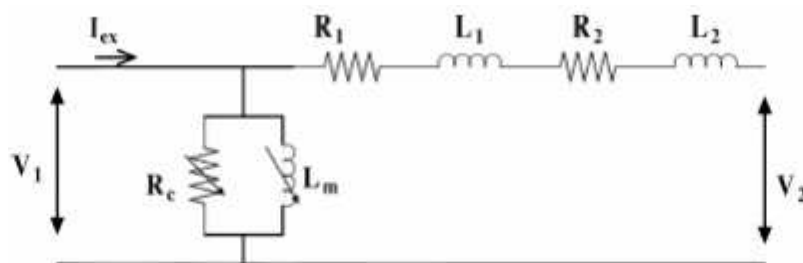
Τέτοιοι πυρήνες απαντώνται συχνά σε μετασχηματιστές που χειρίζονται ρεύματα στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων. Ακόμα ένα είδος «απωλειών πυρήνα» είναι εκείνο της μαγνητικής υστέρησης. Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά τείνουν να διατηρήσουν κάποιο επίπεδο μαγνήτισης μετά από έκθεση σε κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η ροπή του να παραμένουν τα υλικά αυτά υπό μαγνήτιση αποκαλείται «υστέρηση», και απαιτείται κάποια επένδυση σε ενέργεια για να υπερνικηθεί η αντίθεση κατά την εκάστοτε αλλαγή πολικότητας του μαγνητικού πεδίου το οποίο παράγεται από τα τυλίγματα πρωτεύοντος. Αυτό το είδος απωλειών μπορεί να μειωθεί μέσα από μια σωστή επιλογή υλικού για τον πυρήνα, διαλέγοντας π.χ. ένα κράμα με χαμηλή υστέρηση, όπως αποδεικνύεται από μια «λεπτή» καμπύλη υστέρησης B/H, καθώς επίσης και από μια σχεδίαση η οποία θα επιτρέπει ένα ελάχιστο όριο ανοχής του πυρήνα στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής (μεγάλη περιοχή διατομής).

Οι απώλειες ενέργειας στους μετασχηματιστές έχουν την τάση να επιδεινώνονται αυξανόμενης της συχνότητας. Το επιδερμικό φαινόμενο μέσα στα τυλίγματα των αγωγών μειώνει τη διαθέσιμη επιφάνεια διατομής για τη ροή ηλεκτρονίων, έτσι που να αυξάνει την ενεργό αντίσταση με τη συχνότητα και να προκαλεί περισσότερες απώλειες ισχύος μέσω των αντιστάσεων. Οι μαγνητικές απώλειες πυρήνα αυξάνονται επίσης ραγδαία με τη συχνότητα και έχουμε σοβαρές επιπτώσεις από τα φαινόμενα της υστέρησης και των δινορρευμάτων. Για το λόγο αυτό, οι μετασχηματιστές μεγάλου μεγέθους σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν αποτελεσματικά σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων.

Στα περισσότερα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπου η συχνότητα των γραμμών μεταφοράς είναι πολύ σταθερή, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η μεγάλη συχνότητα δε μπορεί ποτέ να αποτελεί πρόβλημα. Ωστόσο αποτελεί πρόβλημα, με τη μορφή των αρμονικών που παράγονται από μη γραμμικά φορτία. Όπως είναι γνωστό, οι μη ημιτονοειδείς κυματομορφές είναι ισοδύναμες με μια σειρά πολλαπλών ημιτονοειδών κυματομορφών με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες. Σε συστήματα ισχύος, αυτές οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, που σημαίνει ότι θα είναι πάντα υψηλότερες, ποτέ χαμηλότερες, από τη συχνότητα σχεδίασης του μετασχηματιστή. Όταν μάλιστα είναι πάρα πολύ υψηλές, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή υπερθέρμανση. Οι μετασχηματιστές ισχύος μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να χειρίζονται συγκεκριμένα επίπεδα αρμονικών στα ενεργειακά συστήματα, και αυτή η ικανότητα μερικές φορές δηλώνεται με το ονομαστικό μέγεθος του «παράγοντα K».

3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ

Το κυκλωματικό μοντέλο για τη μελέτη των μαγνητικών απωλειών πυρήνα ενός μονοφασικού μετασχηματιστή με λειτουργία στο κενό φορτίο φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Στο πρωτεύον τύλιγμα, η πτώση τάσης αγνοείται. Η μη γραμμική συμπεριφορά των απωλειών πυρήνα αναπαρίσταται από μια μεταβλητή αντίσταση R_c και από μια μεταβλητή επαγωγή L_m , αντίστοιχα. Η αντίσταση πρωτεύοντος και η επαγωγή σκέδασης συμβολίζονται, αντίστοιχα, R_1 και L_1 . Η αντίσταση δευτερεύοντος και η επαγωγή σκέδασης, ανηγμένες στο πρωτεύον τύλιγμα, συμβολίζονται, αντίστοιχα, R_2 και L_2 . Οι στιγμιαίες τάσεις εισόδου και εξόδου δηλώνονται, αντίστοιχα, με V_1 και V_2 .



Εικόνα 15: Κυκλωματικό μοντέλο μονοφασικού μετασχηματιστή υπό κενό φορτίο

Σε συνθήκες κενού φορτίου, μετρώνται οι μαγνητικές απώλειες πυρήνα που έχουν δύο συνιστώσες: τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες δινορρευμάτων. Η

μονάδα μέτρησής τους είναι το Watt/kg σε ειδικά πάχη ελασμάτων, συχνότητα, και μέγιστη πυκνότητα ροής. (Αντίστοιχα, σε συνθήκες βραχυκυκλώματος, μετρώνται οι απώλειες φορτίου, που οφείλονται στο ρεύμα που διέρχεται από τα τυλίγματα. Αποτελούνται από τις απώλειες τυλιγμάτων και τις διαφεύγουσες απώλειες στα τυλίγματα, τα τοιχώματα του κελύφους, τις γωνιακές συνδέσεις των πυρήνων κτλ.). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πέρα από τα δύο γενικευμένα είδη απωλειών σιδήρου στο υλικό του πυρήνα, υπάρχουν και πρόσθετες απώλειες που προκαλούνται από το συντελεστή κατασκευής (Building Factor), ο οποίος επιφέρει μία αύξηση 10% στις απώλειες πυρήνα. Ο συντελεστής αυτός είναι γενικά μία συνάρτηση του είδους του υλικού του πυρήνα, της γεωμετρίας του, του τρόπου συσσώρευσης των ελασμάτων, και της ποιότητας κατασκευής του.

Μία περιοδική παροχή τάσης V_1 στο κύκλωμα που εικονίζεται στο σχήμα παράγει ένα βρόχο υστέρησης συνεχούς ρεύματος (ΣP). Η περιοχή στο εσωτερικό του βρόχου B-H αναπαριστά τις απώλειες υστέρησης ΣP , οι οποίες αυξάνονται με τη μέγιστη πυκνότητα ροής B_m και τη συχνότητα διέγερσης f . Οι κατασκευαστές ελασμάτων παρέχουν τόσο τις απώλειες υστέρησης, όσο και τα δεδομένα των μαγνητικών απωλειών πυρήνα συναρτήσει του B_m για διάφορες συχνότητες. Οι κλασικές απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται από τα f , B_m , καθώς επίσης και από την αντίσταση και το πάχος των ελασμάτων του υλικού του πυρήνα. Όπως είναι γνωστό, η επίδραση των δινορρευμάτων συνίσταται στην αύξηση του H για δεδομένο B επάνω στο βρόχο υστέρησης.

3.2.1 Απώλειες από υστέρηση

Όπως είναι γνωστό, όταν η πυκνότητα ροής σε κάποιο μέσο μεταβληθεί από μια τιμή B_1 σε μια άλλη τιμή B_2 , απορροφάται ενέργεια από το μέσο. Η απορροφούμενη ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

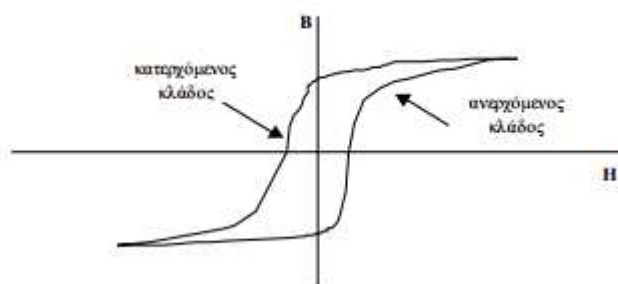
$$w = \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (3.1)$$

Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης αυτής είναι ανάλογο του εμβαδού που ορίζεται από την καμπύλη $B(H)$ του μέσου, τον άξονα των B και τις ευθείες που είναι παράλληλες στον άξονα των H και παριστάνουν τις σταθερές τιμές B_1 και B_2 , αντίστοιχα. Το μέτρο του ολοκληρώματος εξαρτάται από τις τιμές B_1 , B_2 , και τη

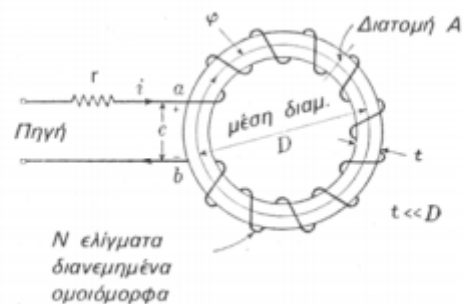
μορφή της καμπύλης. Εάν η πυκνότητα ροής μειωθεί από μια ορισμένη τιμή σε μικρότερη, το αλγεβρικό σημείο του w είναι αρνητικό και έχουμε απόδοση ενέργειας από το υλικό.

Όταν το θεωρούμενο μέσο αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό, η καμπύλη μαγνήτισης μεταξύ δύο οποιωνδήποτε τιμών $B1$ και $B2$ οι οποίες αντιστοιχούν σε μειούμενες τιμές του H , είναι διαφορετική από την καμπύλη που αντιστοιχεί σε αυξανόμενες τιμές του. Αυτό είναι προφανές από το βρόχο υστέρησης του σιδηρομαγνητικού υλικού, ο οποίος αποτελείται από δύο κλάδους, έναν για αυξανόμενες τιμές του H , dab , και έναν άλλο για μειούμενες τιμές του, bcd . Ο βρόχος αυτός προκύπτει με κυκλική μαγνήτιση σιδηρομαγνητικού υλικού.

Λόγω της διαφοράς των καμπυλών των δύο κλάδων, προκύπτει ότι η ενέργεια που απορροφάται από το υλικό όταν η πυκνότητα ροής αυξηθεί από $B1$ σε $B2$ είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που επιστρέφεται όταν η πυκνότητα ελαττωθεί από $B2$ σε $B1$. Η διαφορά των δύο αυτών ενεργειών είναι το μέτρο της απώλειας υστέρησης. Με γραφικό υπολογισμό του ολοκληρώματος της παραπάνω εξίσωσης είναι δυνατός ο καθορισμός της απώλειας υστέρησης ανά κύκλο, λόγω της μαγνητικής υστέρησης. Η γραφική μέθοδος δίνεται στον παρακάτω πίνακα για την περίπτωση της αποθηκευμένης ενέργειας στο σύστημα του δακτυλίου του. Το πηνίο διέγερσης του δακτυλίου φέρει εναλλασσόμενο ρεύμα με τρόπο ώστε η ένταση του μαγνητικού πεδίου να αναστρέφεται κυκλικά μεταξύ των ορίων $+H1$ και $-H1$. Η συσχέτιση μεταξύ B .



Εικόνα 16: Βρόχος υστέρησης



Εικόνα 17: Δακτυλιοειδές μαγνητικό κύκλωμα διεγερόμενο από πηνίο για την εξαγωγή ενεργειακών σχέσεων.

Κατά τη διάρκεια του τμήματος Ενέργεια η οποία απορροφάται μαγνητικά από τον πυρήνα (+) ή αποδίδεται στο ηλεκτρικό κύκλωμα από το μαγνητικό πεδίο (-). Η καθαρή ενέργεια w , η οποία απορροφάται από το μαγνητικό πεδίο ανά μονάδα όγκου για έναν πλήρη κύκλο είναι $w_h = w_1 + w_2 + w_3 = w_4 = \text{εμβαδό (abcd)}$ του βρόχου υστέρησης.

Πίνακας 1: Γραφική μέθοδος υπολογισμού αποθηκευμένης ενέργειας συστήματος δακτυλίου σχήματος

Κατά τη διάρκεια του τμήματος	Ενέργεια η οποία απορροφάται μαγνητικά από τον πυρήνα (+) ή αποδίδεται στο ηλεκτρικό κύκλωμα από το μαγνητικό πεδίο (-)
ab	$w_1 = \int_{-B_r}^{B_m} H dB = +\text{εμβαδό (abea)}$
bc	$w_2 = \int_{B_m}^{B_r} H dB = -\text{εμβαδό (bceb)}$
cd	$w_3 = \int_{B_r}^{-B_m} H dB = +\text{εμβαδό (adfc)}$
da	$w_4 = \int_{-B_m}^{B_r} H dB = -\text{εμβαδό (dafd)}$

Η καθαρή ενέργεια w , η οποία απορροφάται από το μαγνητικό πεδίο ανά μονάδα όγκου για έναν πλήρη κύκλο είναι

$$w_h = w_1 + w_2 + w_3 = w_4 = \text{εμβαδό (abcd)} \text{ του βρόχου υστέρησης (3.2)}$$

Η ενέργεια αυτή χάνεται ως θερμότητα στο υλικό για κάθε κύκλο, και ονομάζεται απώλεια από υστέρηση. Η παρουσία της υστέρησης ασκεί σημαντική επίδραση στην απόδοση, την ανύψωση της θερμοκρασίας, και ως εκ τούτου στην ικανότητα πολλών ηλεκτρομαγνητικών συσκευών.

Αν και το εμβαδό του κλειστού βρόχου υστέρησης δείχνει πόση ενέργεια χάνεται στον πυρήνα ανά μονάδα όγκου και ανά κύκλο λόγω της υστέρησης, εντούτοις δεν αποκαλύπτει σε ποιο τμήμα του κύκλου λαμβάνει χώρα η απώλεια.

Η συνολική απώλεια από υστέρηση σε όγκο V (σε m^3) υλικού σε όλα τα σημεία του οποίου η πυκνότητα ροής είναι ομοιόμορφη και μεταβάλλεται κυκλικά με συχνότητα f κύκλους ανά δευτερόλεπτο μπορεί να εκφραστεί εμπειρικά ως εξής:

$$P_h = \eta V f B_m^n \quad (3.3)$$

Στην εξίσωση αυτή, η και n είναι σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό, και B_m η μέγιστη μαγνητική επαγωγή. Όταν ο κύκλος υστέρησης είναι μη συμμετρικός ή περιλαμβάνει μερικούς κύκλους, η εξίσωση δεν ισχύει.

3.2.2 Απώλειες από δινορρεύματα

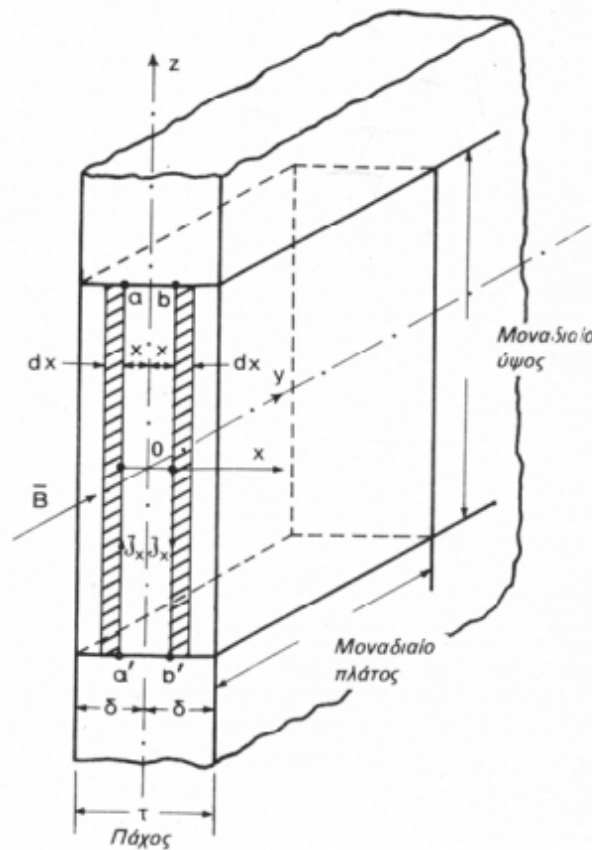
Όταν σε ένα μέσο η μαγνητική ροή μεταβάλλεται με το χρόνο, εμφανίζεται σε αυτό ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το γραμμικό ολοκλήρωμα του πεδίου αυτού E πάνω σε μια κλειστή διαδρομή η οποία περικλείει τη ροή δίνεται από το νόμο επαγωγής του Faraday:

$$\oint_l E dl = - \frac{d}{dt} \int B nds \quad (3.4)$$

όπου l είναι η κλειστή διαδρομή η οποία περιέχει την επιφάνεια επί της οποίας προσπίπτει η ροή Φ , δηλαδή $\int B \cdot nds$, και n το μοναδιαίο άνωσμα κάθετα προς την επιφάνεια αυτή. Εφόσον το μέσο είναι αγωγίμο, ένα ρεύμα εγκαθίσταται γύρω από

τη διαδρομή εξαιτίας της ηλεκτρεγερτικής δύναμης e η οποία προέρχεται από το γραμμικό ολοκλήρωμα του ηλεκτρικού πεδίου.

Τέτοια ρεύματα ονομάζονται δινορρεύματα, και η παρουσία τους έχει ως αποτέλεσμα απώλειες Joule λόγω της κυκλοφορίας ρευμάτων εκτός του υλικού, ή αλλιώς απώλειες από δινορρεύματα. Η ενέργεια απορροφάται από το κύκλωμα το οποίο προκαλεί το πεδίο και μετατρέπεται σε θερμότητα στο μέσο.



Εικόνα 18: Μοναδιαίο στοιχείο ελάσματος για υπολογισμό απώλειας από δινορρεύματα.

Επειδή η πυκνότητα ροής σε σιδηρομαγνητικά υλικά είναι συνήθως σχετικά μεγάλη, και η ειδική αντίσταση των υλικών δεν είναι πολύ υψηλή, οι επαγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις και συνεπώς τα δινορρεύματα και η απώλεια από αυτά μπορεί να είναι υπολογίσιμα εάν δε ληφθούν μέτρα για μείωσή τους. Οι απώλειες αυτές έχουν ιδιαίτερη σημασία για τον καθορισμό της απόδοσης της ανύψωσης της

θερμοκρασίας, και επομένως της ικανότητας των ηλεκτρομαγνητικών συσκευών στις οποίες παρατηρείται μεταβολή της πυκνότητας ροής.

Για τον καθορισμό της απώλειας από δινορρεύματα σε συνθήκες όμοιες προς αυτές που υφίστανται σε σιδηρό πυρήνα, θεωρούμε λεπτή μεταλλική πλάκα, η οποία διαπερνάται από εναλλασσόμενη ροή ϕ .

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3.5)$$

Η τάση αυτή, όταν επιδρά στο κύκλωμα αα'β'β', προκαλεί ρεύμα το οποίο κυκλοφορεί γύρω από την οριακή γραμμή και δημιουργεί μαγνητεγερτική δύναμη με τέτοια φορά ώστε να αντιτίθεται στη μεταβολή της ροής ϕ . Η διανομή της ροής στο θεωρούμενο εμβαδό είναι τέτοια ώστε μικρότερη πυκνότητα ροής εμφανίζεται στο κέντρο της πλάκας παρά κοντά στην περιβάλλουσα επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική ροή τείνει να συγκεντρωθεί κοντά στην περιβάλλουσα επιφάνεια της πλάκας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επιδερμικό. Παρόμοιο φαινόμενο λαμβάνει χώρα σε ηλεκτρικό αγωγό ο οποίος φέρει μεταβαλλόμενο ρεύμα, ακόμα και αν είναι κατασκευασμένος από μη μαγνητικό υλικό, έχοντας δηλαδή σχετική μαγνητική διαπερατότητα τη μονάδα. Σε έναν τέτοιο αγωγό η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια. Τόσο το μαγνητικό όσο και το ηλεκτρικό επιδερμικό φαινόμενο έχουν την ίδια φύση, και επομένως υπόκεινται στην ίδια μαθηματική ανάλυση, η οποία συνίσταται στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης της διάχυσης, λαμβάνοντας υπόψη τις σχετικές οριακές συνθήκες. Επειδή όμως μια τέτοια ανάλυση είναι κάπως περίπλοκη, συνήθως αγνοείται το φαινόμενο αυτό, και τα αποτελέσματα που προκύπτουν έχουν μια σχετική ακρίβεια για πολλές εφαρμογές, ειδικά σε συσκευές οι οποίες διαθέτουν πυρήνες με ελάσματα.

Αποδεικνύεται ότι σε μαγνητικό κύκλωμα το οποίο περιέχει όγκο V υλικού πυρήνα σε ελάσματα και το οποίο υπόκειται στις ίδιες μαγνητικές συνθήκες με το μοναδιαίο όγκο που θεωρήσαμε στο παραπάνω σχήμα, η μέση τιμή απώλειας ισχύος από δινορρεύματα είναι:

$$P_e = \frac{\pi^2 f^2 \tau^2 B_m^2 V}{6\rho} \quad (3.6)$$

Το V εκφράζεται σε m^3 , B_m είναι η μέγιστη τιμή της πυκνότητας ροής σε weber/m^2 , f η συχνότητα μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής σε Hz , ρ η ειδική αντίσταση του υλικού σε $\text{ohm} \cdot m$, τ το πάχος του στοιχείου σε m και η τιμή P_e σε watts . Η απώλεια για ορισμένο υλικό γράφεται και ως εξής:

$$P_e = K_e f^2 \tau^2 B_m^2 V \quad (3.7)$$

όπου, προφανώς

$$K_e = \frac{\pi^2}{6\rho} \quad (3.8)$$

Ωστόσο, είναι προτιμότερος ο καθορισμός του K_e από μετρήσεις σε δείγμα του υλικού, έτσι ώστε να αρθούν αποκλίσεις από τις παραδοχές που ισχύουν λόγω του πεπερασμένου του όγκου του υλικού και της χαμηλής αντίστασης μεταξύ των ελασμάτων και των διακένων αέρα μέσα στον πυρήνα.

3.2.3 Συνολικές απώλειες πυρήνα

Οι συνολικές απώλειες ισχύος που λαμβάνουν χώρα σε σιδηρούς πυρήνες οι οποίοι υπόκεινται σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο είναι το άθροισμα των απωλειών από υστέρηση και δινορρεύματα. Εάν το υλικό του πυρήνα είναι τέτοιο ώστε η απώλεια υστέρησης να ακολουθεί την εμπειρική σχέση (3.3) και η μέση τιμή της πυκνότητας ροής είναι σταθερή σε ολόκληρο τον όγκο V του πυρήνα, η συνολική απώλεια P_π στον όγκο αυτό είναι:

$$P_\pi = \eta V f B_m^n + \frac{\pi^2 f^2 \tau^2 B_m^2 V}{6\rho} \quad (3.9)$$

Οι συσκευές στις οποίες τα σιδηρομαγνητικά υλικά φέρουν εναλλασσόμενες ροές, σχεδόν πάντοτε διαθέτουν ηλεκτρικά κυκλώματα τα οποία εμπλέκουν τα αντίστοιχα μαγνητικά. Μετασηματιστές και αντιδραστήρες σιδηρού πυρήνα π.χ. έχουν σιδηρομαγνητικούς πυρήνες με ελάσματα ή από σκόνη, γύρω από τους οποίους τυλίγονται τα ελίγματα ενός ή περισσότερων πηνίων. Οι απώλειες πυρήνα σχετίζονται με την ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται σε ένα τέτοιο πηνίο από τη

μεταβαλλόμενη ροή. Η μέγιστη τιμή της ροής συναρτήσει της ενδεικνύμενης τιμής της επαγόμενης ΗΕΔ E σε πηνίο από N ελίγματα είναι:

$$\Phi_m = \frac{E}{4.44 f N} \quad (3.10)$$

όταν η ροή και συνεπώς η ΗΕΔ μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο. Εάν η πυκνότητα ροής στη διατομή του πυρήνα εμβαδού A είναι ομοιόμορφη, τότε ισχύει:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{A} = \frac{E}{4.44 f N A} \quad (3.11)$$

Για δεδομένο μετασχηματιστή ή επαγωγικό αντιδραστήρα, ο αριθμός ελιγμάτων και η διατομή του πυρήνα είναι σταθερά από κατασκευής, και η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$B_m = K \frac{E}{f} \quad (3.12)$$

όπου, προφανώς, η σταθερά $K = 1/4.44 N A$. Τελικά προκύπτει ότι η συνολική απώλεια ισχύος ανά μονάδα όγκου είναι:

$$P_{\pi} = \eta f \left(\frac{K E}{f} \right)^n + \frac{\pi^2 f^2 \tau^2 K^2 E^2}{6 \rho f^2} \quad (3.13)$$

Η εξίσωση αυτή ισχύει μόνο όταν η μορφή του κύματος είναι ημιτονοειδής. Αν και η απώλεια υστέρησης εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή της πυκνότητας ροής και είναι ανεξάρτητη της μορφής κύματος της ροής, εφόσον ο κύκλος υστέρησης είναι συμμετρικός και χωρίς μερικούς κύκλους, η σχέση μεταξύ της μέγιστης τιμής της πυκνότητας ροής και της ενδεικνύμενης τιμής της επαγόμενης ΗΕΔ εξαρτάται από την κυματομορφή. Επομένως, η απώλεια υστέρησης εκφραζόμενη συναρτήσει της ΗΕΔ δίνεται ορθά από τον πρώτο όρο του δευτέρου μέλους της εξίσωσης, μόνο για την περίπτωση ημιτονοειδούς κυματομορφής.

Αντίθετα, ο δεύτερος όρος της απώλειας πυρήνα της εξίσωσης (3.13) παρέχει την ορθή απώλεια από δινορρέυματα ανεξάρτητα από την κυματομορφή, υπό τον όρο ότι οι συχνότητες των αρμονικών του μη ημιτονοειδούς κύματος δεν είναι αρκετά

υψηλές ώστε να προκαλούν έντονο επιδερμικό φαινόμενο. Όταν το κύμα ροής αποτελείται από συνιστώσες, η κάθε μια από αυτές επάγει δινορρεύματα στον πυρήνα. Η απώλεια δινορρευμάτων που παράγεται από κάθε αρμονική συνιστώσα στη ροή είναι ανάλογη του τετραγώνου της ίδιας αρμονικής συνιστώσας της ηλεκτρεγερτικής δύναμης η οποία επάγεται στο τύλιγμα. Εάν E_1, E_3, E_5, \dots είναι οι ενδεικνύμενες τιμές της θεμελιώδους και των αρμονικών συνιστωσών της επαγόμενης ΗΕΔ, η συνολική απώλεια από δινορρεύματα ανά μονάδα όγκου προκύπτει, σύμφωνα με το δεύτερο όρο της ανωτέρω εξίσωσης:

$$p_e = K_1(E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots) \quad (3.14)$$

όπου K_1 κατάλληλη σταθερά. Σημειώνεται εδώ ότι το άθροισμα των E_1^2, E_3^2, E_5^2 ισούται με το τετράγωνο της ενεργού τιμής E της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης.

Επίσης, η απώλεια δινορρευμάτων όταν εκφράζεται ως συνάρτηση του E είναι ανεξάρτητη της συχνότητας. Μεταβολές στη θερμοκρασία όπως απαντώνται στην πράξη έχουν αμελητέα επίδραση στις απώλειες από υστέρηση. Οι απώλειες δινορρευμάτων ελαττώνονται κάπως με αύξηση της θερμοκρασίας. Για δοσμένη μεταβολή της ροής, οι απώλειες αυτού του είδους είναι αντιστρόφως ανάλογες της ειδικής αντίστασης του υλικού του πυρήνα. Η ειδική αντίσταση αυξάνει με τη θερμοκρασία. Στους πυρήνες δοθέντος σχηματισμού και δεδομένων συνθηκών κάτω από τις οποίες αυτοί χρησιμοποιούνται, η απώλεια υστέρησης μπορεί να μειωθεί με την εισαγωγή υλικού πυρήνα το οποίο να έχει βρόχο υστέρησης μικρού εμβαδού.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η απώλεια από δινορρεύματα μπορεί να ελαττωθεί με τη χρήση λεπτών ελασμάτων υλικού το οποίο έχει υψηλή ειδική αντίσταση και μόνωση μεταξύ των ελασμάτων. Σκόνη του κράματος Permalloy (Ni, Cr) το οποίο έχει μικρό βρόχο υστέρησης, αναμιγνύεται συνήθως με μονωτική συνδετική ουσία και συμπιέζεται σε συμπαγή πυρήνα του επιθυμητού σχήματος. Το κράμα αυτό εμφανίζει μεγάλη ειδική αντίσταση. Γενικά με κατάλληλα κράματα και θερμικές κατεργασίες είναι δυνατή η επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων σε αρκετό βαθμό.

Εάν η δέσμη από ελάσματα μετασχηματιστή φέρει πείρους ή συσφιγκτήρες για την σύσφιξη ή άλλα συμπαγή τεμάχια μετάλλου στην περιοχή όπου υφίσταται η μεταβαλλόμενη ροή, τότε οι απώλειες αυξάνονται. Εξάλλου η χρήση πολύ λεπτών ελασμάτων αυξάνει το κόστος κατασκευής και το μέγεθος της συσκευής λόγω ελάττωσης του συντελεστή σώρευσης. Εάν η μείωση του συντελεστή σώρευσης είναι υπολογίσιμη σε πυρήνες μετασχηματιστών, ο συντελεστής σύζευξης, του οποίου η τιμή πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη στη μονάδα, μπορεί να ελαττωθεί μέχρι κάποιο ανεπιθύμητο όριο.

Στις βιομηχανικές συχνότητες, οι απώλειες από δινορρεύματα μπορούν να μειωθούν εύκολα σε αρκετά χαμηλή τιμή με τη χρήση λεπτών ελασμάτων υψηλής ειδικής αντίστασης, ενώ η ελάττωση της απώλειας υστέρησης είναι δυσκολότερη, επειδή απαιτείται η εξεύρεση υλικού με μικρό βρόχο υστέρησης. Για αυτό συνήθως η απώλεια από υστέρηση είναι περίπου τα $2/3$ έως $3/4$ της συνολικής απώλειας πυρήνα στη συχνότητα των 50 Hz.

Κεφάλαιο 4:

Εφαρμογή: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ Μ/Σ ΙΣΧΥΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσονται εφαρμογές υπολογισμών απωλειών πυρήνα σε μετασχηματιστές ισχύος. Αρχικά παρατίθεται υπολογισμός των απωλειών με τη διδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε τρεις μετασχηματιστές διαφορετικής ισχύος και τα αποτελέσματα της συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές του κατασκευαστή. Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος συστηματικής μελέτης των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού με τη χρήση του μοντέλου υστέρησης Preisach-Neel. Το μοντέλο εφαρμόζεται στην ανάλυση των ιδιοτήτων ενός τύπου μαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών σιδήρου.

4.1 Διδιάστατη ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος επίλυσης μαγνητοστατικών προβλημάτων, στην οποία ανήκει και η ανάλυση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Μαγνητοστατικά είναι τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι χρονικά αμετάβλητο. Σ' αυτήν την περίπτωση, η ένταση (\vec{H}) και η πυκνότητα (\vec{B}) του μαγνητικού πεδίου (ή μαγνητική επαγωγή) ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \text{ (διαφορική μορφή νόμου Ampere) (4.1)}$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \text{ (διαφορική μορφή νόμου Gauss) (4.2)}$$

ενώ εν γένει συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$B = \mu H \quad (4.3)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, η οποία συνδέεται με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού μ_0 με τη σχέση:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (4.4)$$

Αν το μαγνητικό υλικό που εξετάζεται είναι μη γραμμικό, η μαγνητική διαπερατότητα είναι συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής και δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (4.5)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (4.1) και (4.2) στις δύο διαστάσεις γίνεται με χρήση του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού \vec{A} , το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4.6)$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης, η (4.1) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (4.7)$$

Για γραμμικά υλικά, η παραπάνω σχέση καταλήγει στη σχέση:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J} \Rightarrow \nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (4.8)$$

Έτσι, ο υπολογισμός του διανυσματικού δυναμικού \vec{A} ανάγεται στην επίλυση μιας μερικής διαφορικής εξίσωσης ελλειπτικού τύπου. Στη συνέχεια, οι τιμές των \vec{B} και \vec{H} μπορούν να προκύψουν με διαφορίση του \vec{A} . Η μοναδικότητα της λύσης που προκύπτει από τις μερικές διαφορικές εξισώσεις (4.7) ή (4.8) εξασφαλίζεται με ορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών, των τιμών δηλαδή του \vec{A} ή της κάθετης παραγώγου του $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}$ στο σύνορο του εξεταζόμενου πεδίου.

Οι οριακές συνθήκες μπορεί να είναι τριών ειδών:

1. *Dirichlet*: όταν ορίζεται η τιμή του διανυσματικού δυναμικού \vec{A} στο σύνορο. Η συνθήκη $\vec{A}=0$ (φυσική συνθήκη Dirichlet) αναπαριστά τα όρια μέσα στα

οποία περιορίζεται το πεδίο (έξω από αυτά το πεδίο μηδενίζεται) ή επίπεδα συμμετρίας της γεωμετρίας του προβλήματος όπου οι πηγές έχουν αντίθετη κατεύθυνση (αντισυμμετρική συνθήκη) \vec{A}

2. *Neumann*: όταν ορίζεται η τιμή της κάθετης παραγώγου $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}$ στο σύνορο.

Θέτοντας $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}=0$ (φυσική συνθήκη Neumann) σε ένα σύνορο περιγράφεται ένα πεδίο το οποίο διαπερνά κάθετα το σύνορο αυτό. Μία τέτοια οριακή συνθήκη σχετίζεται με σύνορα μεταξύ αέρα και υλικών με μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα ή με επίπεδα συμμετρίας της γεωμετρίας του προβλήματος και των πηγών (συμμετρική συνθήκη).

3. *Robin* (ή μεικτές): όταν ορίζεται μία σχέση μεταξύ της τιμής του \vec{A} και της κάθετης παραγώγου του $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}$ σε διάφορα σημεία του συνόρου. Τέτοιες οριακές συνθήκες εμφανίζονται συχνά σε προβλήματα δινορρευμάτων.

Αν δεν ορίζονται συγκεκριμένες οριακές συνθήκες σε ένα πρόβλημα, θεωρείται από το πρόγραμμα ότι $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}=0$ σε κάθε σύνορο.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι αριθμητική τεχνική για την επίλυση προβλημάτων που περιγράφονται με μερικές διαφορικές εξισώσεις. Το πεδίο ενδιαφέροντος αναπαρίσταται ως μία ομάδα από πεπερασμένα στοιχεία. Η διακριτοποίηση του χώρου γίνεται συνήθως με τρίγωνα ή τετράεδρα, αν το πρόβλημα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο αντίστοιχα και το πεδίο προσεγγίζεται με συναρτήσεις μορφής, με άγνωστες τιμές στις κορυφές των τριγώνων ή τετραέδρων του χώρου. Έτσι, ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων με άγνωστες τιμές στους κόμβους των κορυφών τους. Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος ανάγεται σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, ενώ οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων μπορούν να ανακτηθούν με τη βοήθεια των υπολογισμένων τιμών στις κορυφές τους.

Δύο αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι τα εξής:

1. Η προσέγγιση του φυσικού πεδίου με πεπερασμένα στοιχεία παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια (ακόμη και όταν οι συναρτήσεις μορφής είναι απλές) η οποία μεγαλώνει με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων

2. Η προσέγγιση του πεδίου με τιμές στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε συστήματα εξισώσεων με «αραιές» μήτρες. Αυτό σημαίνει ότι με επιλογή κατάλληλης μεθόδου μπορούν να επιλυθούν προβλήματα με μεγάλο αριθμό αγνώστων.

Με βάση τα παραπάνω, η επίλυση ενός μαγνητοστατικού προβλήματος με τη βοήθεια προγράμματος που χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία: Η περιοχή, στην οποία πρέπει να υπολογιστεί η μαγνητική επαγωγή \vec{B} , χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία (τρίγωνα στο επίπεδο, τετράεδρα στο χώρο κ.λ.π.). Για τη διαδικασία διακριτοποίησης του χώρου, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που δημιουργούν αυτόματα το πλέγμα. Η πλεγματοποίηση ξεκινά συνήθως από τα σύνορα του χώρου και λαμβάνει υπόψη την απαιτούμενη ακρίβεια στις διάφορες περιοχές του πλέγματος. Ο διαχωρισμός της περιοχής του πλέγματος σε ολοένα και μικρότερα τρίγωνα περιορίζεται από την χωρητικότητα (κατάληψη μεγάλου χώρου μνήμης του υπολογιστή) και το «κόστος» των υπολογισμών (χρόνος υπολογισμού). Τα στοιχεία λαμβάνονται επαρκώς μικρά ώστε να μπορεί να θεωρηθεί η μαγνητική επαγωγή σταθερή στο εσωτερικό τους ενώ το μαγνητικό δυναμικό $r A r$ υπολογίζεται στις κορυφές των τριγώνων και θεωρείται ότι μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των στοιχείων (πεπερασμένα στοιχεία πρώτου βαθμού). Μπορεί εξίσου να θεωρηθεί ότι στο εσωτερικό κάθε στοιχείου, το διανυσματικό δυναμικό ακολουθεί πολυωνυμική κατανομή, παραδοχή που μπορεί να οδηγήσει σε χρόνο υπολογισμού πιο σύντομο για δεδομένη ακρίβεια .

4.2 Διδιάστατη ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος FEMM

4.2.1 Δομή προγράμματος FEMM

Το πρόγραμμα Femm αποτελείται από ένα σύνολο υποπρογραμμάτων με τα οποία επιλύονται μαγνητοστατικά προβλήματα. Τα υποπρογράμματα αυτά επιλύουν προβλήματα αξονικής συμμετρίας και είναι τα εξής:

1. *Προεπεξεργασία (preprocessing)*: Πρόκειται για πρόγραμμα τύπου CAD το οποίο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της γεωμετρίας του υπό μελέτη προβλήματος καθώς και για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών και των οριακών συνθηκών.

2. *Επίλυση (Solution)*: Πρόκειται για πρόγραμμα το οποίο λαμβάνει ένα σύνολο δεδομένων τα οποία περιγράφουν το πρόβλημα και επιλύει τις αντίστοιχες εξισώσεις Maxwell για τον καθορισμό του μαγνητικού πεδίου στο χώρο που εξετάζεται.

3. *Μετεπεξεργασία (Postprocessing)*: Με το πρόγραμμα αυτό επιτυγχάνεται τόσο η απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου όσο και ο υπολογισμός της μαγνητικής επαγωγής σε διάφορα τμήματα της γεωμετρίας που εξετάζεται.

Το Femm περιλαμβάνει ξεχωριστό υποπρόγραμμα τριγωνοποίησης του πεδίου ορισμού του προβλήματος (Πλεγματοποιητής-triangle.exe). Με το πρόγραμμα αυτό επιτυγχάνεται η κατάτμηση του πεδίου ορισμού σε πολύ μικρά τριγωνικά στοιχεία, διαδικασία η οποία, όπως προαναφέρθηκε, είναι καθοριστική σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Άλλο πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση γραφικών παραστάσεων οι οποίες προκύπτουν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης είναι το λεγόμενο Πρόγραμμα απεικόνισης (femmplot.exe).

4.2.2 Μοντελοποίηση μετασχηματιστή με τη διδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

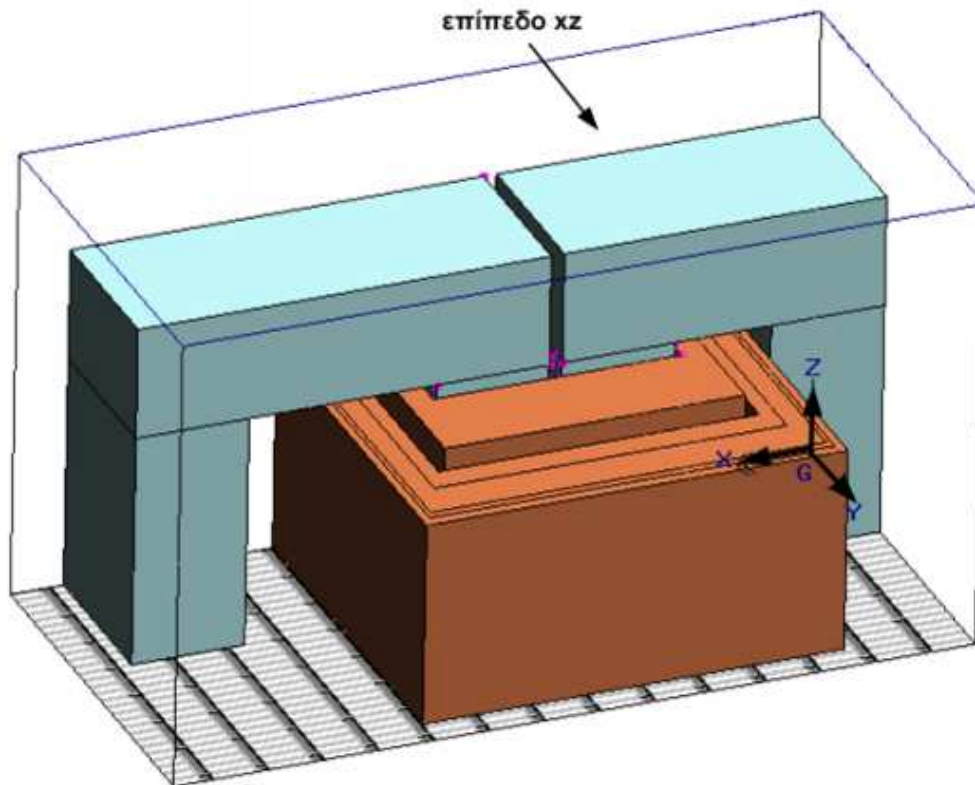
4.2.2.1 Γεωμετρική διαμόρφωση μοντέλου

Το διδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε από το επίπεδο xz του τριδιάστατου μοντέλου του σχήματος 19 το οποίο αναπαριστά τη γεωμετρία των πραγματικών τριφασικών μετασχηματιστών. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει τα τυλίγματα χαμηλής και υψηλής τάσης μίας φάσης καθώς και το μικρό και μεγάλο πυρήνα που τα περιβάλλει. Λόγω των συμμετριών του προβλήματος, έχει ληφθεί υπόψη μόνο το ένα τέταρτο της γεωμετρίας. Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι υπάρχει ασυμμετρία λόγω των ακροδεκτών στη μία πλευρά της υψηλής τάσης, η οποία δε λαμβάνεται υπόψη για τη μείωση του πεδίου ορισμού του εξεταζόμενου προβλήματος. Η χρήση αυτού του μοντέλου έναντι του συνολικού τριφασικού μετασχηματιστή έγινε για δύο λόγους:

1. Το μικρότερο γεωμετρικό μέγεθος του μοντέλου επιτρέπει την κατασκευή πυκνότερου πλέγματος χωρίς μεγάλη επιβάρυνση στο χρόνο υπολογισμού (δεδομένου ότι η ακριβής αναπαράσταση του πεδίου απαιτεί μεγάλη ακρίβεια

υπολογισμών, η οποία συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα του πλέγματος και κατ' επέκταση με το χρόνο επίλυσης του μαγνητοστατικού προβλήματος).

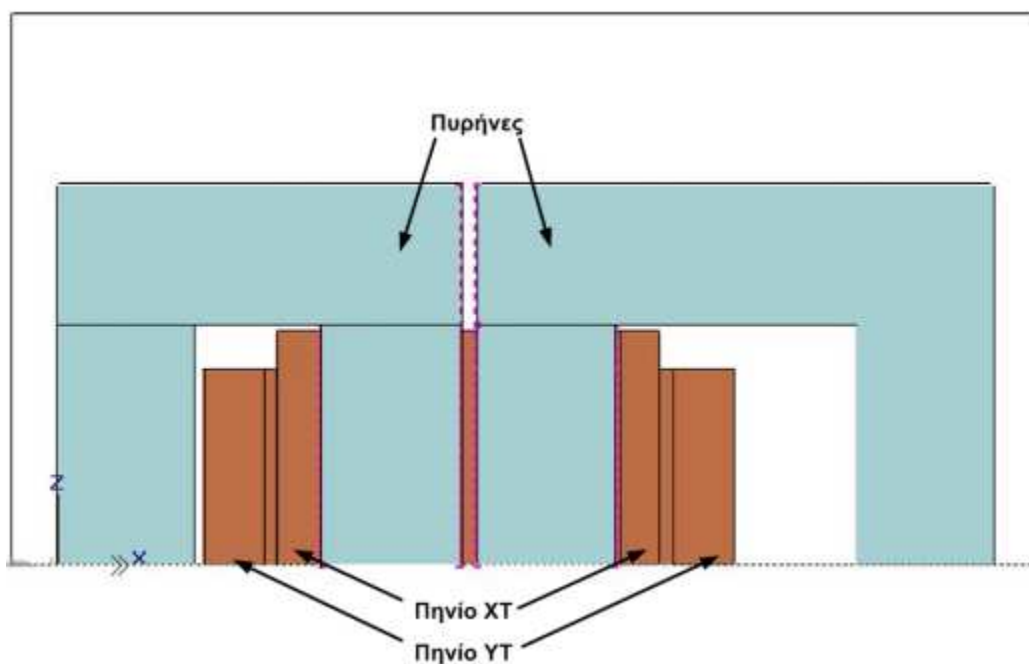
2. Με την αναπαράσταση της μίας μόνο φάσης δε μειώνεται σημαντικά η ακρίβεια στον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος.



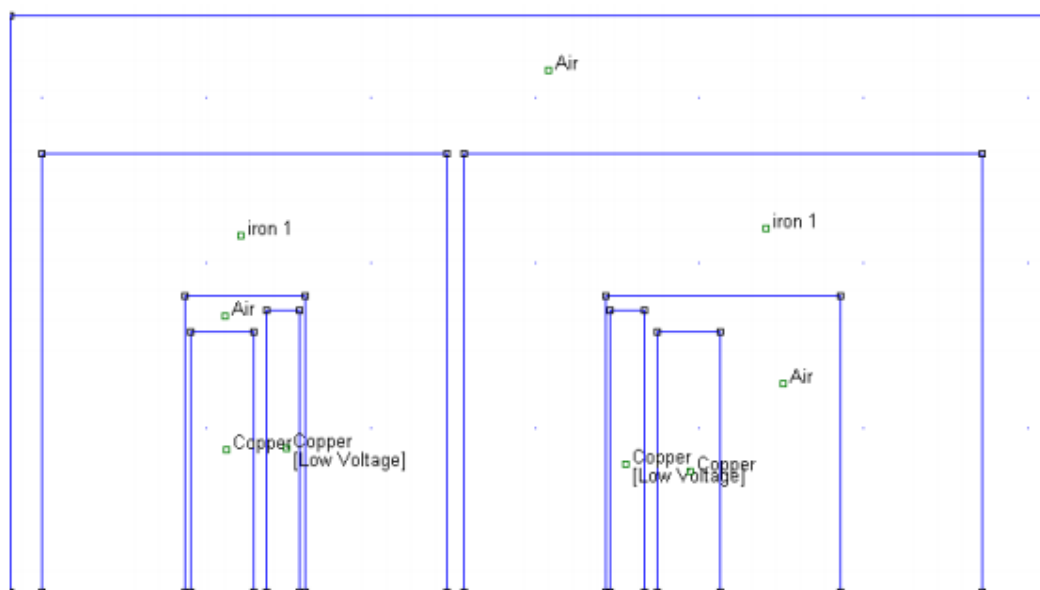
Εικόνα 19: Προοπτική όψη της μίας φάσης του τριφασικού μετασχηματιστή που χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση του γεωμετρικού μοντέλου.

Η γεωμετρία του μοντέλου περιβάλλεται από κουτί αέρα, οι διαστάσεις του οποίου είναι ίδιες με τις διαστάσεις του κελύφους του μετασχηματιστή, περιορίζοντας έτσι τον υπολογισμό του πεδίου σε αυτόν το χώρο. Στις όψεις του κουτιού αέρα έχουν επιβληθεί οριακές συνθήκες κατάλληλες για την αναπαράσταση του μαγνητοστατικού προβλήματος του μετασχηματιστή.

Στο σχήμα 20 δίνεται η γεωμετρία του διδιάστατου μοντέλου του μετασχηματιστή, ενώ στο σχήμα 21 φαίνεται το μοντέλο FEMM το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίησή του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 20: Γεωμετρία διδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 21: Μοντέλο FEMM τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα.

Στο μοντέλο του παραπάνω σχήματος αναγράφονται τα υλικά κάθε περιοχής. Στις τρεις εξωτερικές γραμμές της γεωμετρίας (δηλ. στα σύνορα δεξιά, αριστερά και πάνω από το ενεργό μέρος) επιβάλλεται οριακή συνθήκη Dirichlet ($A=0$), ενώ στη γραμμή συμμετρίας του μοντέλου ($z=0$) δεν επιβάλλεται καμία οριακή συνθήκη,

γεγονός το οποίο, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ισοδυναμεί με την επιβολή της οριακής συνθήκης Neumann ($\frac{\partial A}{\partial n} = 0$).

4.2.2.2 Προσομοίωση δοκιμής ανοιχτοκύκλωσης

Η δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης πραγματοποιείται με εφαρμογή ονομαστικής τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα (τύλιγμα χαμηλής τάσης) ενώ το πρωτεύον τύλιγμα (τύλιγμα υψηλής τάσης) ανοιχτοκυκλώνεται. Υπό αυτές τις συνθήκες το τύλιγμα χαμηλής τάσης διαρρέεται από το ρεύμα μαγνήτισης, ενώ το τύλιγμα υψηλής τάσης δε διαρρέεται από ρεύμα. Έτσι, για τη μελέτη του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή υπό συνθήκες ανοιχτοκυκλώματος, θεωρείται ότι τα αμπερελίγματα του τυλίγματος χαμηλής τάσης λαμβάνονται ίσα με τον αριθμό των ελιγμάτων του πηνίου πολλαπλασιασμένο με το ρεύμα μαγνήτισης. Το ρεύμα μαγνήτισης λαμβάνεται ίσο με το ρεύμα το οποίο έχει μετρηθεί από τον κατασκευαστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης του εκάστοτε εξεταζόμενου μετασχηματιστή.

4.2.2.3 Υπολογισμός απωλειών πυρήνα

Ο υπολογισμός των απωλειών πυρήνα γίνεται με τη χρήση των τιμών της μαγνητικής επαγωγής του πυρήνα οι οποίες υπολογίζονται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής B σε κάθε τρίγωνο του πλέγματος (όταν χρησιμοποιούνται τριγωνικά στοιχεία πρώτης τάξης η τιμή του B είναι σταθερή εντός του στοιχείου) λαμβάνονται από το πρόγραμμα με τη μορφή αρχείου ASCII. Στη συνέχεια, γίνεται προσπέλαση του αρχείου των υλικών των τριγώνων (το οποίο είναι επίσης αρχείο ASCII στο οποίο σε κάθε τριγωνικό στοιχείο αντιστοιχεί αριθμός ο οποίος δηλώνει το υλικό του) και, εφόσον το εξεταζόμενο τριγωνικό στοιχείο ανήκει στον πυρήνα, η αντίστοιχη τιμή μαγνητικής επαγωγής του πολλαπλασιάζεται με την αντίστοιχη τιμή ειδικών απωλειών (η οποία λαμβάνεται από την καμπύλη ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα). Το γινόμενο πολλαπλασιάζεται με το εμβαδό του τριγώνου και με το πάχος του πυρήνα (δηλαδή με τον ισοδύναμο στοιχειώδη όγκο του εξεταζόμενου στοιχείου), για να δώσει τη στοιχειώδη απώλεια στο στοιχείο. Το άθροισμα των απωλειών όλων των στοιχείων του πλέγματος που αντιστοιχούν στον πυρήνα δίνει το $\frac{1}{4}$ των συνολικών απωλειών πυρήνα (δεδομένου ότι, σύμφωνα με το σχήμα μοντελοποιείται το $\frac{1}{4}$ της πραγματικής γεωμετρίας του μετασχηματιστή). Έτσι, οι συνολικές απώλειες πυρήνα υπολογίζονται με τετραπλασιασμό του παραπάνω αθροίσματος.

Οι υπολογισμοί που περιγράφηκαν παραπάνω δε γίνονται από το ίδιο το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, για τη διεξαγωγή τους ήταν αναγκαία η υλοποίηση κάποιων λειτουργιών μετεπεξεργασίας, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- την εξαγωγή των τιμών του B σε κάθε τρίγωνο από το πρόγραμμα, με τη χρήση κατάλληλων εντολών (scripts σε γλώσσα υποστηριζόμενη από το FEMM),
- τον υπολογισμό των στοιχειωδών απωλειών των στοιχείων και την άθροισή τους για να προκύψουν οι συνολικές απώλειες πυρήνα.

Η διαδικασία αυτή έγινε σε κώδικα Visual Basic, με τη χρήση κατάλληλων εντολών και φόρμας εισόδου στην οποία δίνεται η καμπύλη ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα του εξεταζόμενου μετασχηματιστή.

4.2.3 Διδιάστατη πεδιακή ανάλυση μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης

Για κάθε περίπτωση μετασχηματιστή παρατίθενται τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του μαγνητικού του πεδίου και τα αποτελέσματά της ανάλυσης. Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα αυτά υπολογίζονται οι απώλειες πυρήνα του μετασχηματιστή, οι οποίες και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές.

4.2.4 Μετασχηματιστής ισχύος 1000 kVA

- **Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά**

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική ισχύς $S_{nom}=1000$ kVA
- Τάση τυλίγματος υψηλής (πρωτεύον) $V_{1nom}=15-20$ kV
- Τάση τυλίγματος χαμηλής (δευτερεύον) $V_{2nom}=0.4$ kV
- Συνδεσμολογία τυλιγμάτων : Dyn11 (τρίγωνο - αστέρας)
- Λόγος τάσεως/σπείρα $=16.49621$ V/turn
- Σπείρες πρωτεύοντος $N_1=1212$ (20 kV)

- Σπείρες δευτερεύοντος $N_2=14$
- Αριθμός ενδιάμεσων λήψεων (taps) : 5
- Τάση βραχυκύκλωσης $U_k=6\%$

Από τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν τα εξής:

- Ονομαστική φασική τάση του δευτερεύοντος: $V_{LV} = 3 \cdot 2 \cdot 2 \text{ phase nom nom V V}$
 $= 230.94 \text{ V}$.

- Ονομαστικό φασικό ρεύμα πρωτεύοντος: $I_{HV} = I_{1 \text{ nom}} = 1 \text{ nom nom V S} / 3$
 $= 16.67 \text{ A}$

- Ονομαστικό φασικό ρεύμα δευτερεύοντος: $I_{LV} = I_{2 \text{ nom}} = \text{phase } 2 \text{ nom nom V S}$
 $/ 3 = 1443.4 \text{ A}$.

◆ Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Ο Πίνακας περιλαμβάνει τις διαστάσεις των πυρήνων του μετασχηματιστή.

Πίνακας 2: Διαστάσεις πυρήνων μετασχηματιστή 1000 kVA

Μέγεθος	Μήκος (mm)
Eu	86.6
A1	245.2
A2	317.2
F1	72
F2	144
G	360
B	533.2
K	10
D	254
D1	127
D2	127

Για την κατασκευή του τυλίγματος της υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό με δύο διαφορετικές διαμέτρους 2.75 mm και 2.34 mm αντίστοιχα. Συνδεσμολογώντας κατάλληλα τα πηνία μεταξύ τους επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση λειτουργίας (20 kV ή 15 kV), καθώς και οι ενδιάμεσες λήψεις τους. Έτσι,

λαμβάνονται ονομαστικές τάσεις λειτουργίας προτείνοντας από 14kV έως 16kV και από 19 έως 21kV. Η κατασκευή του τυλίγματος της χαμηλής τάσης είναι απλούστερη καθώς αποτελείται από 14 στρώσεις φύλλου χαλκού διατομής 311.22 mm², οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες.

Μεταξύ του τυλίγματος της υψηλής τάσης και του πυρήνα, μεταξύ των στρώσεων των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης, μεταξύ του τυλίγματος της χαμηλής τάσης και του πυρήνα, καθώς και μεταξύ των τυλιγμάτων της υψηλής και χαμηλής τάσης υπάρχει στρώμα μονωτικού χαρτιού.

Οι διαστάσεις των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης καθώς και των μεταξύ τους διακένων έχουν ως εξής:

– Διάκενο μεταξύ πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων: =3.6 mm
HV–HV 1

– Πάχος YT: BLDHV=38.5mm

– Διάκενο μεταξύ YT και XT: 1 HV–LV =7.8 mm

– Πάχος XT: BLDLV=20.3mm

– Διάκενο μεταξύ XT και πυρήνα: =1.5mm LV–C 1

♦ Καμπύλη μαγνήτισης και ειδικών απωλειών Ο πυρήνας του μετασχηματιστή 1000 kVA είναι κατασκευασμένος από μαγνητική λαμαρίνα 27ZH95 (πάχος ελασμάτων 0.27 mm). Στα σχήματα 21 και 22 παρατίθενται οι καμπύλες μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή (πριν τη θερμική και μηχανική κατεργασία του υλικού για τη διαμόρφωση των πυρήνων).

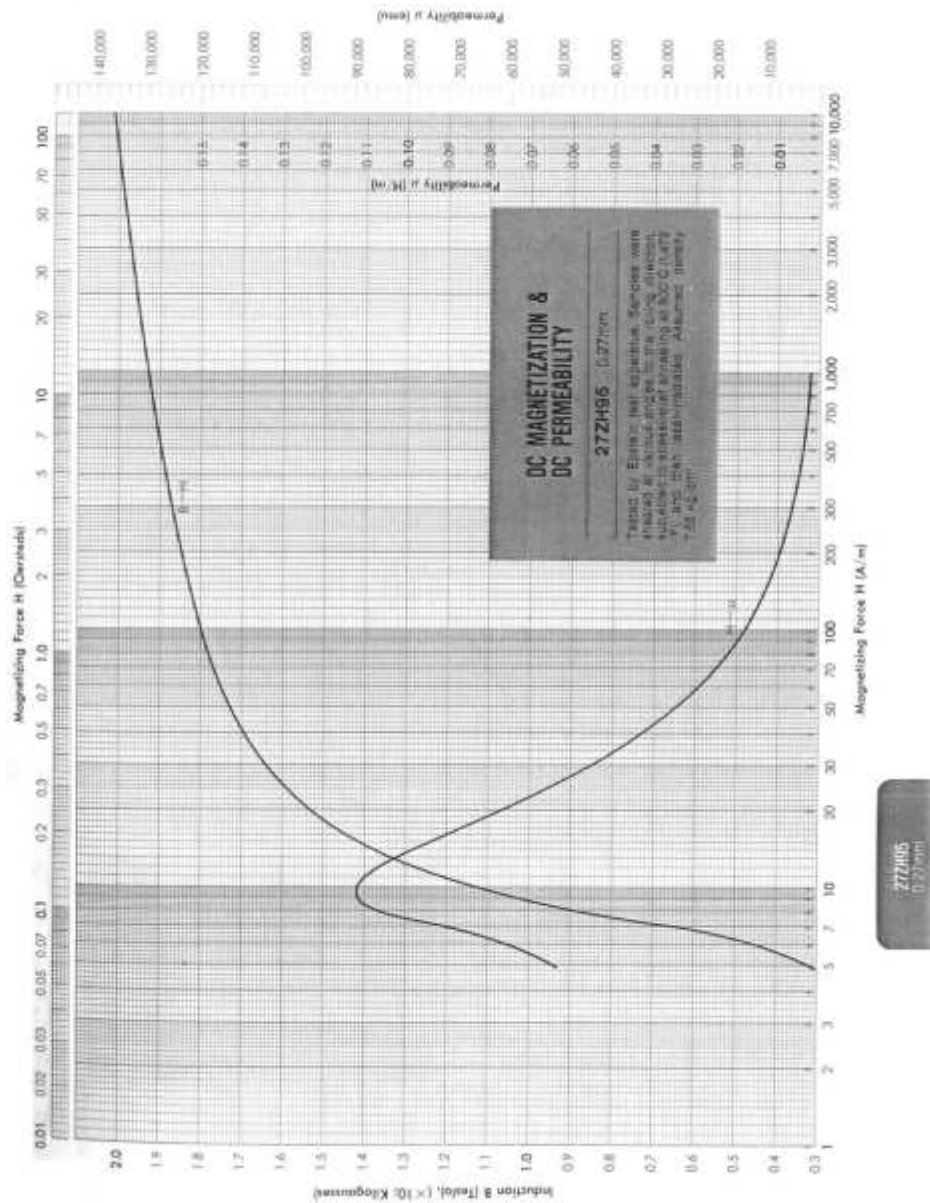
♦ Διαστάσεις μοντέλου FEMM

Το σχήμα 23 περιλαμβάνει τις διαστάσεις του μοντέλου FEMM που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.

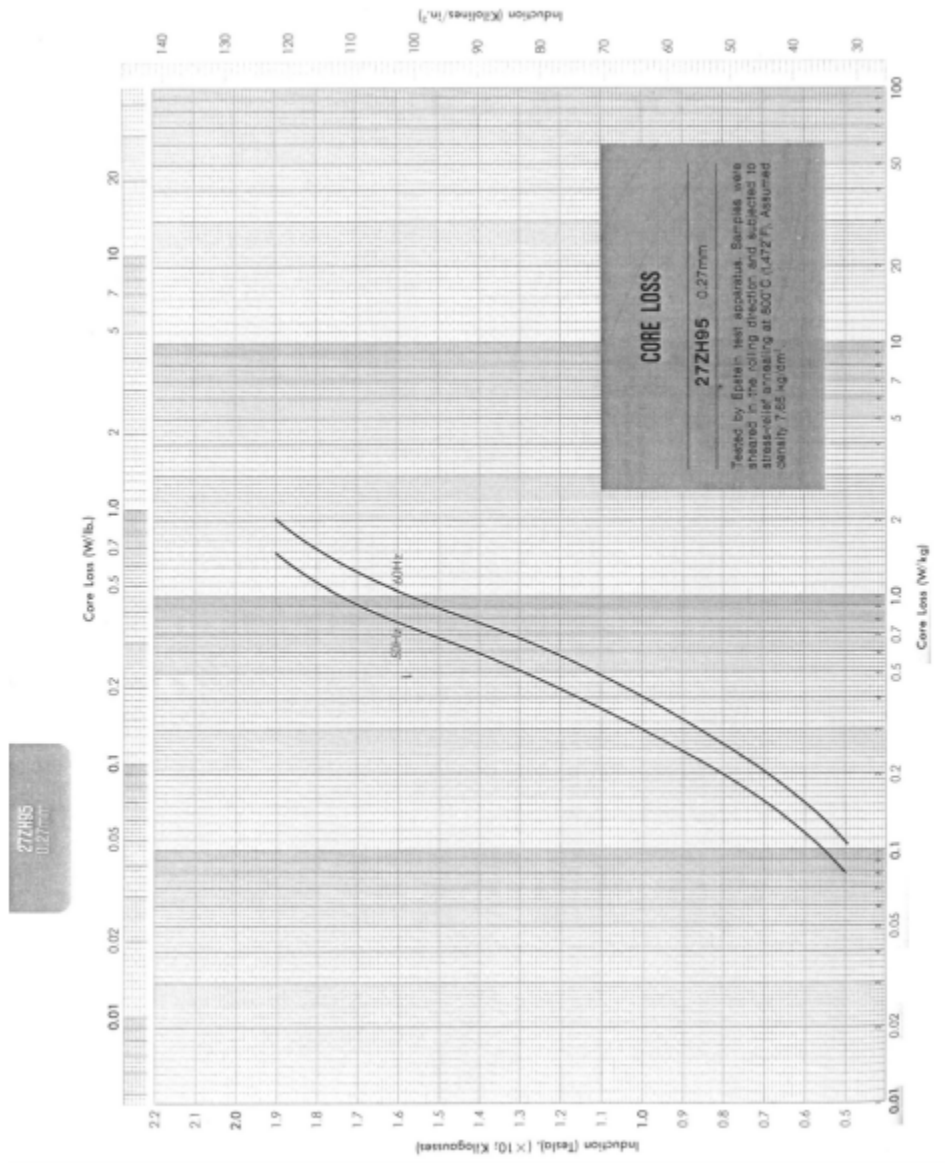
♦ Διδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με τριγωνικά στοιχεία πρώτης τάξης. Κατασκευάστηκαν πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας για να διαπιστωθεί η επίδραση του αριθμού των κόμβων στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

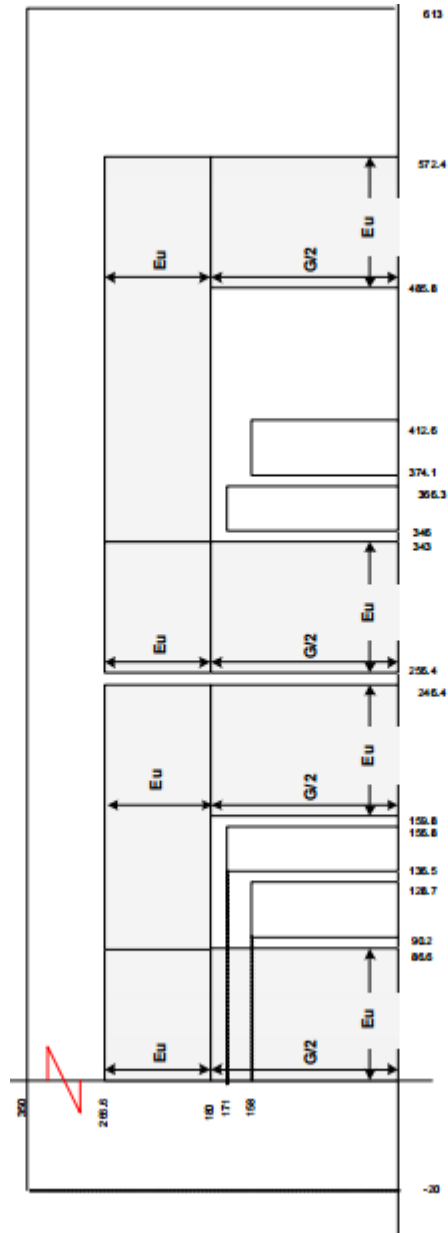
Στο σχήμα 25 εικονίζεται ένα πλέγμα μικρής πυκνότητας, αποτελούμενο από 4818 κόμβους, ενώ στο σχήμα 26 ένα πολύ πυκνότερο πλέγμα, με 54179 κόμβους.



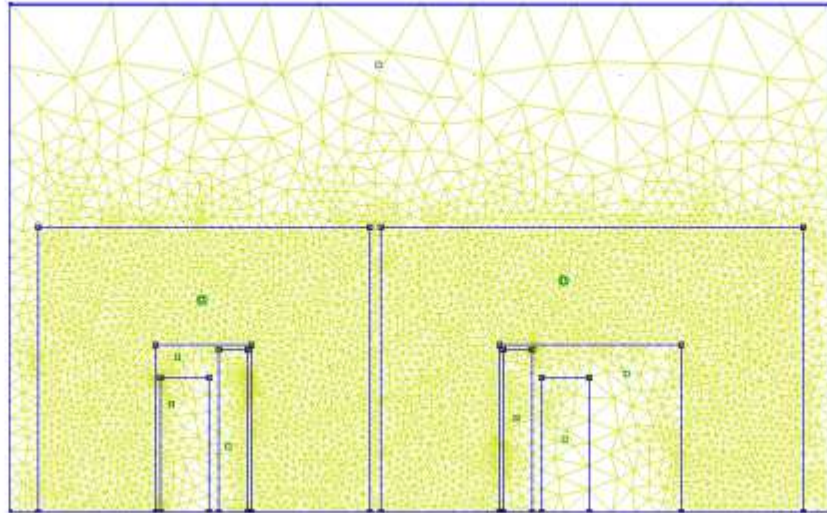
Εικόνα 22: Καμπύλη μαγνήτισης υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 1000 kVA.



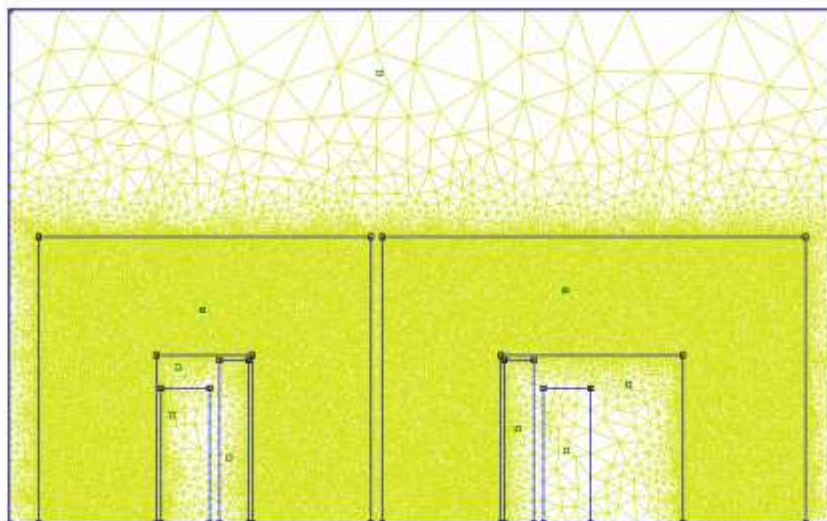
Εικόνα 23: Καμπύλη ειδικών απωλειών υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 1000 kVA.



Εικόνα 24: Διαστάσεις μοντέλου FEMM τριφασικού μετασχηματιστή 1000 kVA.



Εικόνα 25: Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το μετασχηματιστή 1000 kVA (πυκνότητας 4818 κόμβων).



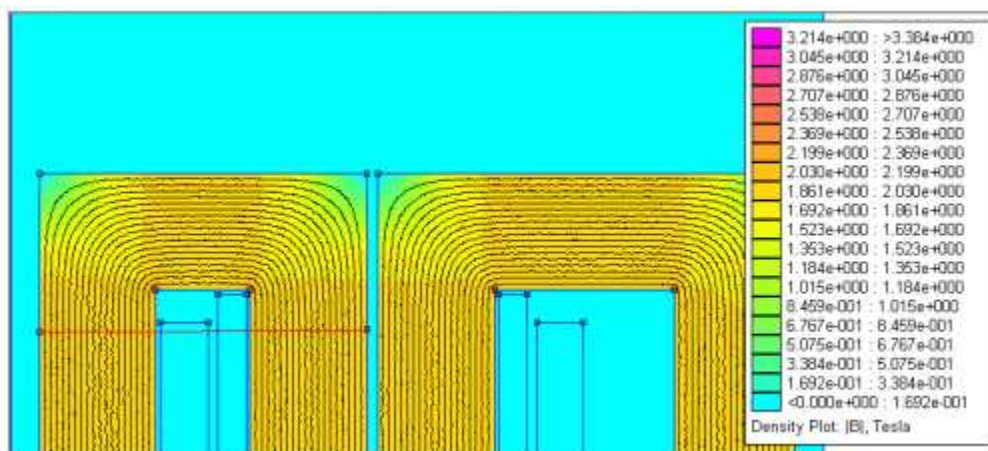
Εικόνα 26: Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το μετασχηματιστή 1000 kVA (πυκνότητας 54179 κόμβων).

Κατά την κατασκευή του πλέγματος δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στις περιοχές των πυρήνων, δεδομένου ότι αυτές επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Έτσι, έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί ομοιογένεια του πλέγματος στην περιοχή των πυρήνων, ενώ για την εξαγωγή πυκνότερων πλεγμάτων, αυξήθηκε ο αριθμός των στοιχείων κυρίως στην περιοχή των πυρήνων (με αυτόν τον τρόπο προέκυψε το πλέγμα του σχήματος 26 από το πλέγμα του σχήματος 27).

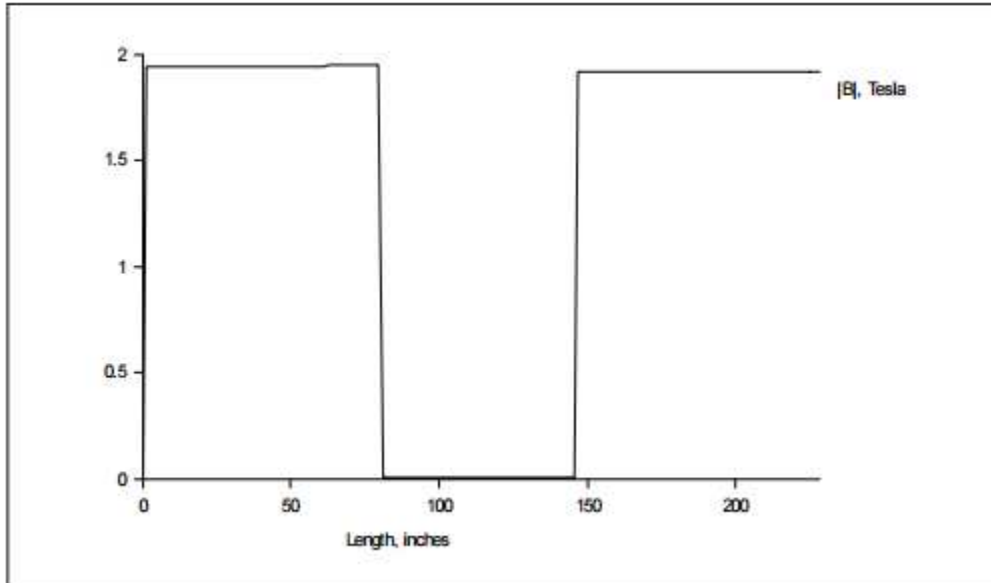
Αποτελέσματα ανάλυσης

Η κατανομή της μαγνητικής ροής, όπως προέκυψε από την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος, με τη χρήση του πλέγματος του σχήματος 26, εικονίζεται στο σχήμα 27. Η κατανομή αυτή αντιστοιχεί στις μαγνητικές ροές σκέδασης, που εμφανίζονται κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης. Μεταξύ των ισοδυναμικών γραμμών του πεδίου κυκλοφορεί η ίδια μαγνητική ροή. Από το σχήμα 29 προκύπτει ότι κατά το ανοιχτοκύκλωμα όλη η μαγνητική ροή περνά μέσα από τους πυρήνες, ενώ είναι πολύ μικρή στην περιοχή των πηνίων. Σύμφωνα με τον τρόπο απεικόνισης της κατανομής του σχήματος 27, το πεδίο είναι ελάχιστο στις περιοχές με το γαλάζιο χρώμα, ενώ μεγιστοποιείται στις περιοχές με το μωβ χρώμα.

Η μορφή της κατανομής της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της κόκκινης διαδρομής του σχήματος 26 φαίνεται στο σχήμα 27. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η κάθετη συνιστώσα της επαγωγής είναι περίπου σταθερή στον πυρήνα και στα διάκενα ενώ πέφτει στο μηδέν στο χώρο των τυλιγμάτων.



Εικόνα 27: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή 1000 kVA κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.



Εικόνα 28: Γραφική απεικόνιση της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής του σχήματος 25.

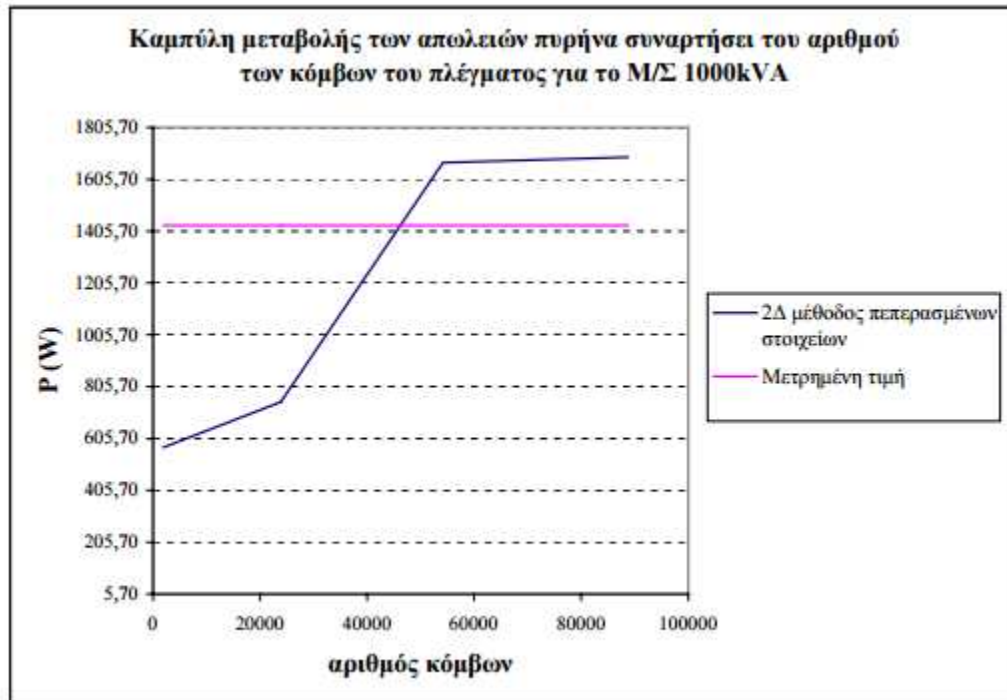
Σύμφωνα με τη δισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, η αύξηση του αριθμού των κόμβων προκαλεί ανάλογη αύξηση της τιμής των απωλειών. Οι τιμές των απωλειών παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στις μικρές πυκνότητες πλέγματος (ξεκινώντας από τιμή μικρότερη των 600W στο αραιό πλέγμα, για να ξεπεράσουν τα 1600W στους 50000 κόμβους και στη συνέχεια να σταθεροποιηθούν σ' αυτήν την τιμή), γεγονός που τονίζει την ανάγκη χρήσης πυκνού πλέγματος για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Η απόκλιση της τιμής που δίνει το πυκνότερο πλέγμα από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή (η οποία υπολογίζεται με τη χρήση της σχέσης (4.9)) είναι ίση με 18.4%. Οφείλεται δε σε δύο λόγους:

- Η καμπύλη ειδικών απωλειών αντιστοιχεί σε υλικό πριν την κατεργασία του για τη διαμόρφωση των πυρήνων του μετασχηματιστή. Έτσι, κατά την παραπάνω ανάλυση αγνοείται η μηχανική και η θερμική κατεργασία για τη διαμόρφωση των πυρήνων, η οποία τροποποιεί σημαντικά τα αρχικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας και κατ' επέκταση και το επίπεδο των απωλειών σιδήρου

- η αναπαράσταση των υλικών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται σε μακροσκοπική κλίμακα με αποτέλεσμα να ομογενοποιούνται ή αγνοούνται φαινόμενα που διαδραματίζονται σε μικροσκοπική κλίμακα στα

χρησιμοποιούμενα υλικά. Για το λόγο αυτό πολλές φορές η αναπαράσταση των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ατελής.

$$\text{απόκλιση} = \frac{|P_{\text{μετρημένες}} - P_{\text{υπολογισμένες}}|}{P_{\text{μετρημένες}}} \cdot 100\% \quad (4.9)$$



Εικόνα 29: Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το Μ/Σ 1000 kVA.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι απώλειες σιδήρου (κενού φορτίου) σε μετασχηματιστές ισχύος. Η μελέτη έγινε τόσο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όσο και μέσω συστηματικής ανάλυσης των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών (βρόχοι υστέρησης) με αναλυτικές μεθοδολογίες και ειδικότερα με το μοντέλο Preisach-Neel.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των απωλειών με τη διδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε τρεις μετασχηματιστές διαφορετικής ισχύος (1000, 400 και 630 kVA) και τα αποτελέσματά της συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές του κατασκευαστή.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρημένες τιμές για τους τρεις μετασχηματιστές προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση της τιμής των απωλειών που δίνει η μέθοδος, η τιμή της οποίας, από μία πυκνότητα πλέγματος και μετά, είναι σχεδόν σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι για τη λήψη αξιόπιστων αποτελεσμάτων απαιτείται η χρήση πυκνού πλέγματος, με αριθμό κόμβων άνω των 60.000.

- Στις δύο από τις τρεις περιπτώσεις μετασχηματιστών που μελετήθηκαν εμφανίστηκε σημαντική απόκλιση από τις μετρήσεις, γεγονός που οφείλεται σε δύο βασικούς λόγους:

- η καμπύλη ειδικών απωλειών αντιστοιχεί σε υλικό πριν την κατεργασία του για τη διαμόρφωση των πυρήνων του μετασχηματιστή. Έτσι, κατά την παραπάνω ανάλυση αγνοείται η μηχανική και η θερμική κατεργασία για την διαμόρφωση των πυρήνων, η οποία τροποποιεί σημαντικά τα αρχικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας και κατ' επέκταση και το επίπεδο των απωλειών σιδήρου και

- η αναπαράσταση των υλικών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται σε μακροσκοπική κλίμακα με αποτέλεσμα να ομογενοποιούνται ή να αγνοούνται φαινόμενα που διαδραματίζονται σε μικροσκοπική κλίμακα στα χρησιμοποιούμενα υλικά. Για το λόγο αυτό πολλές φορές η αναπαράσταση των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ατελής.
- Σε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις μετασχηματιστών εμφανίστηκε απόκλιση μικρότερη του 5% από τις μετρημένες απώλειες σιδήρου. Ωστόσο η καλή ακρίβεια της μεθόδου σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να ληφθεί ως γενικό συμπέρασμα, δεδομένου ότι στις υπόλοιπες περιπτώσεις εμφανίστηκε μεγάλη διακύμανση και σημαντικό μέγεθος σφάλματος.

Οι αποκλίσεις που εμφανίστηκαν κατά τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι είναι αναγκαία η συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών με αναλυτικές μεθοδολογίες με σκοπό την προσαρμογή τους για την κατά περιοχές εφαρμογή τους σε μοντέλα μακροσκοπικής κλίμακας (όπως είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Γι' αυτό το λόγο, στη συνέχεια της εργασίας, αναλύεται ο τρόπος συστηματικής μελέτης των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού με τη χρήση του μοντέλου υστέρησης Preisach-Neel. Το μοντέλο εφαρμόζεται στην ανάλυση των ιδιοτήτων ενός τύπου μαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών σιδήρου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] V. N. Mittle, A. Mittal, «Design of Electrical machines», Standard Publishers Distributors, 1971.

[2] Schneider Electric, «Τεχνικό Τετράδιο Νο.2 – Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ»

[3] Θ. Σουφλάρης, Π. Γεωργιλιάκης, «Εγχειρίδιο μελέτης τριφασικού μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα», Schneider Electric, Σεπτέμβριος 2000.

[4] Χ. Δικαιάκος, Κ. Μόφορη, «Σχεδίαση Μετασχηματιστή Τυλιχτού Πυρήνα και Μελέτη Δυνάμεων σε Βραχυκύκλωμα». ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2001.

[5] Ι. Α. Τεγόπουλος, «Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β: Μόνιμη Κατάσταση». Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.

[6] Β. Κ. Παπαδιάς, «Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Τόμος Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας». ΕΜΠ, Αθήνα 1993.

[7] Π. Σ. Γεωργιλιάκης, «Συμβολή Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης στη μείωση των Απωλειών Κενού Φορτίου Μετασχηματιστών Διανομής». Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2000.

[8] P. P. Silvester, R. L. Ferrari, «Finite Elements for electrical engineers», Cambridge University Press.

[9] G. Dhatt, G. Touzot, «Une presentation de la methode des elements finis». Maloine Editeur S.A., 1984.

[10] G. P. Nikishkov, «Introduction to the Finite Element Method». Lecture Notes, UCLA, 2001.

[11] J. Moses, "Comparison of transformer loss prediction from computed and measured flux density distribution", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, no 4, pp. 1186-1188, 1998.

[12] A. Xiang and Y. Jinsa, «Analysis of Leakage Magnetic Problems in Shell-form Power Transformers». IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, pp. 2049-2052, 1997.

[13] P.S. Georgilakis, N.D. Doulamis, A.D. Doulamis, N.D. Hatziargyriou, and S.D. Kollias, "A Novel Iron Loss Reduction Technique for Distribution Transformers Based on a Combined Genetic Algorithm - Neural Network Approach," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, vol. 31, no.1, February 2001, pp. 16-34.

[14] I.L. Nahas, B. Szabados, R.D. Findlay, M. Poloujadoff, S. Lee, P. Burke, D. Perco: "Three dimensional flux calculation on a three-phase transformer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 1, no 3, pp. 156-160, 1986.

[15] A. Tomezuk: "Analysis of 3D magnetic fields in high leakage reactance transformers", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 30, pp. 94-97, 1988.

[16] Barry W. Kennedy, "Energy Efficient Transformers", McGraw-Hill, New York, 1998.

[17] Α. Κάρτας και Δ. Τσανάκα, "Εξέταση της Δυνατότητας Υπερφόρτισης Μετασχηματιστών Λαδιού", Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, τομ. 17, τεύχος 1-2, 1997, σελ 69-80.