



Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών

Πτυχιακή Εργασία

Τίτλος: Σχεδίαση Μονοφασικού
Μετασχηματιστή

Κραβαριώτη Χρυσούλα ΑΜ: 6773

Κακοταρίτη Χάιδω ΑΜ: 6895

Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλειος Χαραλαμπάκος

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή	3
Κεφάλαιο 1 ^ο - μετασχηματιστής	4
1.1 Μετασχηματιστής – περιγραφή	4
1.2 Ιστορική αναδρομή	5
1.3 Είδη μετασχηματιστών	6
1.3.1 Μετασχηματιστές ισχύος	7
1.3.2 Μετασχηματιστές οργάνων (ή μέτρησης)	9
1.3.2.1 Μετασχηματιστής τάσης	10
1.3.2.2 Μετασχηματιστής έντασης	11
1.4 Χρήση μετασχηματιστών	13
Κεφάλαιο 2 ^ο – Μονοφασικός μετασχηματιστής	14
2.1 Μονοφασικός Μετασχηματιστής	14
2.2 Δομή μονοφασικού μετασχηματιστή	14
2.3 Τυλίγματα μετασχηματιστή	16
2.3.1 Συγκεντρικά τυλίγματα	17
2.3.2 Τυλίγματα κατά δίσκους	18
2.4 Απώλειες ενέργειας μετασχηματιστή	18
2.5 Προστασία μετασχηματιστή	20
2.6 Βαθμός απόδοσης μονοφασικού μετασχηματιστή	21
Κεφάλαιο 3 ^ο – Κατασκευή μονοφασικού μετασχηματιστή	22
3.1 Κατασκευή μονοφασικού μετασχηματιστή	22
3.2 Αρχή λειτουργίας μονοφασικού μετασχηματιστή	24
3.2.1 Λειτουργία υπό φορτίο	27
3.2.2. Λειτουργία στο κενό	29
3.3 Πυρήνας μονοφασικού μετασχηματιστή	30
3.4 Μονοφασικός αυτοσχηματιστής	32
Κεφάλαιο 4 ^ο – Ερευνητικό μέρος	33
4.1 Σχεδιασμός μετασχηματιστή	33
4.1.1. Καθορισμός των προδιαγραφών- στοιχείων του Μετασχηματιστή	33
4.1.2. Σχεδίαση μαγνητικού κυκλώματος	34
4.1.3. Σχεδίαση τυλίγματος χαμηλής τάσης	39
4.1.4. Σχεδίαση τυλίγματος υψηλής τάσης	41
4.1.5. Απόδοση Μετασχηματιστή	44
4.1.6. Σχεδίαση κελύφους	45
4.1.7. Μελέτη ψύξης	45
4.1.8. Υπολογισμός κόστους κατασκευής Μετασχηματιστή	46
Συμπεράσματα	49
Βιβλιογραφία	50

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 :Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον πηνίο επάγει τάση στο δευτερεύον πηνίο, αν και τα δύο πηνία δεν εφάπτονται	4
Εικόνα 2: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τάσης	11
Εικόνα 3: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης	12
Εικόνα 4: Μονοφασικός Μετασχηματιστής	15
Εικόνα 5: Τυλίγματα μετασχηματιστή	17
Εικόνα 6: Συγκεντρικά ή κυλινδρικά τυλίγματα μονοφασικού μετασχηματιστή	17
Εικόνα 7: Τυλίγματα κατά δίσκους (δισκοειδή) μετασχηματιστή	18
Εικόνα 8: Δινορεύματα (eddy currents)	20
Εικόνα 9: Μικρός μονοφασικός μετασχηματιστής	24
Εικόνα 10: Χαρακτηριστική φορτίου μονοφασικού μετασχηματιστή, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις.	28
Εικόνα 11: Μονοφασικός μετασχηματιστής κατά τη λειτουργία του στο κενό	29
Εικόνα 12: Τύποι πυρήνων μονοφασικού μετασχηματιστή	30
Εικόνα 13: τύποι πυρήνα μονοφασικού μετασχηματιστή	30
Εικόνα 14: μετασχηματιστής, τύπου πυρήνα	31
Εικόνα 15: μετασχηματιστής, τύπου κελύφους – μανδύα	31
Εικόνα 16: Μονοφασικός αυτοσχηματιστής	32

Εισαγωγή

Ο μετασχηματιστής είναι μια συσκευή στην οποία μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια ανάμεσα σε δύο κυκλώματα, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών. Οι μετασχηματιστές θεωρούνται από τις πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές. Η πιο απλή μορφή ενός μετασχηματιστή (transformer) αποτελείται από δύο τυλίγματα τα οποία είναι μεταξύ τους ηλεκτρικά απομονωμένα. Αυτά τα τυλίγματα βρίσκονται σε μαγνητική σύζευξη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε ένα εκ των δυο τυλιγμάτων, που τροφοδοτείται με τάση, η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής να επάγει ηλεκτρεγερτική στο άλλο τύλιγμα. Το Πρωτεύον τύλιγμα είναι αυτό το οποίο τροφοδοτείται με μια χρονικά μεταβαλλόμενη από το δίκτυο τάση. (primary current). Το δευτερεύον τύλιγμα είναι αυτό στο οποίο επάγεται η τάση (secondary current).

Ένας μετασχηματιστής μπορεί να λειτουργήσει είτε ως μετασχηματιστής ανύψωσης (step-up transformer) είτε ως μετασχηματιστής υποβιβασμού (step-down transformer). Στον μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης, η επαγόμενη τάση του δευτερεύοντος είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του πρωτεύοντος. Ο μετασχηματιστής υποβιβασμού, η τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος, είναι μικρότερη από τη τάση του πρωτεύοντος.

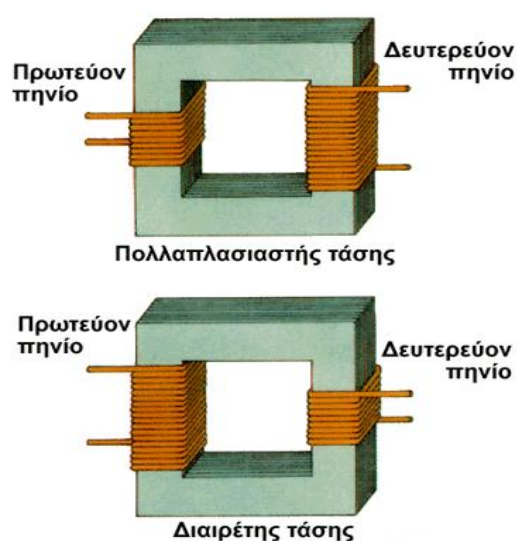
Ανάλογα με το σχήμα που έχει ο πυρήνας ενός μετασχηματιστή, οι μετασχηματιστές διακρίνονται σε δύο τύπους: α) τον μετασχηματιστή τύπου πυρήνα (core-type transformer) και β) τον μετασχηματιστή τύπου κελύφους (shell-type transformer). Για να περιοριστούν οι απώλειες σκέδασης στο μετασχηματιστή τύπου πυρήνα, θα πρέπει τα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος να μοιράζονται με τον ίδιο τρόπο και στα δύο σκέλη. Οι αγωγοί των τυλιγμάτων είναι κατασκευασμένοι συνήθως από χαλκό ή από αλουμίνιο.

Στην παρούσα εργασία θα πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη ενός τυπικού τρόπου σχεδίασης ενός Μετασχηματιστή ισχύος τύπου πυρήνα. Πιο συγκεκριμένα θα παρουσιαστεί βήμα- βήμα ο τρόπος που θα καθοριστούν οι διάφοροι παράγοντες οι οποίοι έχουν να κάνουν με τη σχεδίαση του μετασχηματιστή ενώ παράλληλα θα πραγματοποιηθούν και οι απαραίτητοι υπολογισμοί που θα καθορίσουν τους παραπάνω παράγοντες.

Κεφάλαιο 1^ο - μετασχηματιστής

1.1 Μετασχηματιστής – περιγραφή

Ο μετασχηματιστής είναι συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο κυκλωμάτων, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών. Οι μετασχηματιστές έχουν μεγάλο εύρος μεγεθών, που κυμαίνεται από μέγεθος μερικών κυβικών χιλιοστών (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 (Αντωνόπουλος, 1995). Όλοι λειτουργούν με βάση τις ίδιες αρχές, αν και υπάρχει πληθώρα διαφορετικών υλοποιήσεων. Ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο πρώτο κύκλωμα (το «πρωτεύον») δημιουργεί ανάλογα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει μεταβαλλόμενη τάση στο δεύτερο κύκλωμα (το «δευτερεύον»). Το φαινόμενο αυτό καλείται αμοιβαία επαγωγή (Flanagan, 1993).



Εικόνα 1 :Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον πηνίο δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο, αν και τα δύο πηνία δεν εφάπτονται

Πηγή: <https://www.noesis.edu.gr/>

Στους μετασχηματιστές προσδίδεται ορισμένο ποσό ενέργειας δεδομένων χαρακτηριστικών $P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1$ από μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης, συχνότητας f , και αποδίδεται λίγο μικρότερο ποσό ενέργειας (ανάλογα με τον βαθμό απόδοσης) σε μια ή περισσότερες καταναλώσεις διαφορετικών χαρακτηριστικών, $P_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2$.

Η προσδιδόμενη ισχύς (P_1) μπορεί να θεωρηθεί περίπου ίση προς την παραλαμβανόμενη (P_2) ($P_1 \approx P_2$), αφού δεν υπάρχουν περιστρεφόμενα μέρη (στατοί μετασχηματιστές). Κατά συνέπεια ο βαθμός απόδοσής είναι υψηλός, της τάξης του 95% έως 98%. Από την στιγμή που δεν υπάρχουν μηχανικές απώλειες, η απόδοσή καθορίζεται αποκλειστικά από τις ηλεκτρικές απώλειες ή και τις μαγνητικές, οι οποίες ανέρχονται συνολικά στο 2% έως 5% της μεταβιβαζόμενης ισχύος (Kareem, 2019).

Ο βαθμός απόδοσης των μετασχηματιστών δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης τους, όπως επίσης και από την κατάσταση συντήρησης ή εγκατάστασής τους (Kareem, 2019).

Οι μετασχηματιστές κάνουν δυνατή τη χρησιμοποίηση συσκευών σχεδιασμένων να λειτουργούν με οποιαδήποτε τάση αρκεί να υπάρχουν μετασχηματιστές που μπορούν να δώσουν τέτοιες τάσεις. Όταν οι μετασχηματιστές είναι κατασκευασμένοι για να χρησιμοποιούνται στην μετατροπή της τάσης τριφασικού συστήματος ονομάζονται τριφασικοί μετασχηματιστές. Κατασκευάζονται επίσης και μονοφασικοί μετασχηματιστές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο μονοφασικό ρεύμα ή για την μετατροπή της τάσης μιας φάσης τριφασικού συστήματος (Lituma, 2002).

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η εφεύρεση ενός μετασχηματιστή μπορεί να αποδοθεί στον Faraday, ο οποίος το 1831 χρησιμοποίησε την αρχή του για να δείξει ότι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή δεν προβλέπει πρακτικές εφαρμογές. Ο πρώτος μετασχηματιστής που τέθηκε σε ευρεία χρήση ήταν το πηνίο επαγωγής, το οποίο εφηύρε ο Ιρλανδός κληρικός Nicolas Kalan

το 1836. Ο Kalan ήταν ένας από τους πρώτους που κατανόησαν ότι όσο περισσότερες περιελίξεις περιλαμβάνει το τύλιγμα ενός μετασχηματιστή, τόσο μεγαλύτερη ηλεκτρεγερτική δύναμη παράγει (Φουρμούζης, 2018).

Στην συνέχεια το 1876, ο Ρώσος μηχανικός Yablochkon, εφήυρε ένα σύστημα φωτισμού βασισμένο σε ένα σύνολο επαγωγικών πηνίων, τα οποία λειτουργούσαν ως μετασχηματιστές. Ο Gaulard και ο Gibbs παρουσίασαν για πρώτη φορά μια συσκευή με ανοικτό πυρήνα από σίδηρο που ονομαζόταν «δευτερογενής γεννήτρια» στο Λονδίνο το 1882 και στη συνέχεια πούλησαν την ιδέα στην εταιρία Westinghouse. Παρουσίασαν επίσης την εφεύρεσή τους στο Τορίνο το 1884, όπου υιοθετήθηκε για ένα ηλεκτρικό σύστημα φωτισμού. Το 1885, ο William Stanley, μηχανικός του Westinghouse, δημιούργησε το πρώτο εμπορικό μετασχηματιστή, αφότου ο George Westinghouse αγόρασε τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας των Gaulard και Gibbs. Ο πυρήνας κατασκευάστηκε από συνδεδετικά σιδερένια ελάσματα σε σχήμα «Ε». Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά εμπορικά το 1886 (Tcheslavski, 2008).

Οι Ούγγροι μηχανικοί Zipernowsky, Bláthy και Déri δημιούργησαν το αποτελεσματικό μοντέλο κλειστού πυρήνα «ZBD» το 1885 με βάση το σχεδιασμό των Gaulard και Gibbs. Στην αίτηση διπλώματος ευρεσιτεχνίας πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά η χρήση του όρου "μετασχηματιστής". Ένας άλλος Ρώσος μηχανικός ο Dolivo-Dobrovolsky ανέπτυξε τον πρώτο τριφασικό μετασχηματιστή το 1889. Τέλος, το 1891 ο Nikola Tesla εφήυρε το πηνίο Tesla, έναν μετασχηματιστή συντονισμού με διπλό συντονισμό για την παραγωγή πολύ υψηλών τάσεων σε υψηλή συχνότητα (Tcheslavski, 2008).

1.3 Είδη μετασχηματιστών

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετασχηματιστή που χρησιμοποιούνται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικούς τομείς όπως η παραγωγή, η διανομή και η μετάδοση και η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

1. Μετασχηματιστές Ισχύος
2. Μετασχηματιστές οργάνων ή μέτρησης
 - ο Μετασχηματιστές τάσης
 - ο Μετασχηματιστές έντασης

1.3.1 Μετασχηματιστές ισχύος

Οι μετασχηματιστές ισχύος είναι μεγαλύτεροι σε μέγεθος και χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ενέργειας σε υποσταθμούς ή δημόσιους παροχείς ηλεκτρισμού. Ο μετασχηματιστής αυτός λειτουργεί ως διασύνδεση μεταξύ της γεννήτριας ισχύος και του δικτύου μεταφοράς αλλά και για την διασύνδεση του δικτύου μεταφοράς με το δίκτυο διανομής. Ανάλογα με την ονομαστική ισχύ και τις προδιαγραφές, οι μετασχηματιστές ισχύος μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: Μετασχηματιστές χαμηλής ισχύος, μετασχηματιστές μεσαίας ισχύος και μετασχηματιστές υψηλής ισχύος (Winders, 2002). Η ισχύς μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 30KVA στα 500-700KVA ή σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι ίση ή μεγαλύτερη από 7000KVA για μετασχηματιστή χαμηλής ισχύος. Ο μετασχηματιστής μεσαίας ισχύος μπορεί να φτάσει τα 50-100 MVA, ενώ οι μετασχηματιστές υψηλής ισχύος είναι ικανοί να χειρίζονται περισσότερα από 100MVA (Sourav, 2019).

Ανάλογα με τη συγκεκριμένη λειτουργία τους στο σύστημα ισχύος οι μετασχηματιστές παίρνουν διάφορες ονομασίες. Ο μετασχηματιστής που συνδέεται στην έξοδο μιας γεννήτριας και ανυψώνει το επίπεδο της τάσης εξόδου της (π.χ. στα 110 kV), πριν οδηγηθεί στη γραμμή μεταφοράς, ονομάζεται μετασχηματιστής μονάδος. Ο μετασχηματιστής στο άλλο άκρο της γραμμής μεταφοράς που υποβιβάζει το επίπεδο τάσης της γραμμής στα επίπεδα διανομής (2,3 ως 34,5 kV) ονομάζεται μετασχηματιστής υποσταθμού. Τέλος, ο μετασχηματιστής που υποβιβάζει την τάση διανομής στα επίπεδα της χρησιμοποιήσιμης τάσης ονομάζεται μετασχηματιστής διανομής. Όλοι οι παραπάνω μετασχηματιστές παρουσιάζουν μικρές διαφορές μεταξύ τους και η βασικότερη απ' αυτές είναι στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο καθένας (Κυρουβίδης, 2012).

Λόγω του ότι ο μετασχηματιστής διαχειρίζεται μεγάλα ποσά ενέργειας, η κατασκευή ενός μετασχηματιστή ισχύος είναι σημαντική. Η κατασκευή περιλαμβάνει στερεά

μονωτικά περιφερειακά και καλά ισορροπημένα συστήματα ψύξης. Οι πιο συνηθισμένοι μετασχηματιστές ισχύος είναι γεμάτοι με μονωτικά έλαια. Η κύρια αρχή του μετασχηματιστή ισχύος είναι η μετατροπή του υψηλού ρεύματος χαμηλής τάσης σε χαμηλό ρεύμα υψηλής τάσης. Αυτό απαιτείται για την ελαχιστοποίηση της απώλειας ισχύος στο σύστημα διανομής ισχύος (Winders, 2002)

Οι μετασχηματιστές ισχύος χαρακτηρίζονται από τα παρακάτω στοιχεία:

Ονομαστική Τάση Πρωτεύοντος (kV): Πρόκειται για την ονομαστική Τάση λειτουργίας του πρωτεύοντος τυλίγματος του Μ/Σ.

Ονομαστική Τάση Δευτερεύοντος (kV): Πρόκειται για την Ονομαστική Τάση λειτουργίας του Δευτερεύοντος τυλίγματος του Μ/Σ.

Ονομαστική Ισχύς (kVA): Όπως κάθε ηλεκτρική συσκευή έτσι και οι Μ/Σ ισχύος χαρακτηρίζεται από την ονομαστική ισχύ, η οποία μετριέται σε kVA αντίθετα με άλλες μηχανές στις οποίες μετριέται σε kW. Στην ουσία είναι η φαινόμενη ισχύς η οποία δύναται να περάσει μέσα από τον Μ/Σ.

Τάση Βραχυκύκλωσης (%): Η τάση αυτή μετριέται από τον κατασκευαστή του Μ/Σ με τον εξής τρόπο: Βραχυκυκλώνονται οι ακροδέκτες Χαμηλής Τάσης και μετριέται η τάση η οποία πρέπει να εφαρμοστεί στο πρωτεύον ώστε να εξασφαλιστεί στο δευτερεύον το ονομαστικό ρεύμα του Μ/Σ. Η τάση αυτή στην συνέχεια ανάγεται σε % στην ονομαστική τάση του πρωτεύοντος. Πιο συγκεκριμένα δείχνει την εσωτερική αντίσταση των τυλιγμάτων του Μ/Σ.

Απώλειες Κενού P_0 (W): Πρόκειται για τις εσωτερικές απώλειες του Μ/Σ όταν αυτός λειτουργεί εν κενώ, όταν δηλαδή υπάρχει τάση στο πρωτεύον (και κατά συνέπεια και στο δευτερεύον), εντούτοις δεν κυκλοφορεί ρεύμα στο δευτερεύον. Οι απώλειες που προκύπτουν οφείλονται στα δινορεύματα και την υστέρηση του μαγνητικού κυκλώματος του Μ/Σ.

Απώλειες Χαλκού P_k (W): Πρόκειται για τις εσωτερικές απώλειες του Μ/Σ όταν αυτός λειτουργεί σε πλήρες φορτίο (διέρχεται από αυτόν η ονομαστική ισχύς του).

Οι απώλειες προέρχονται από τις απώλειες Joule των ρευμάτων στις ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων του Μ/Σ.

Μήκος, Πλάτος, Ύψος (mm): που συνιστούν τις εξωτερικές διαστάσεις του Μ/Σ.

Βάρος Μετασχηματιστή (kg): πρόκειται για το συνολικό βάρος του Μ/Σ μαζί με τους τροχούς και το μονωτικό λάδι (για Μ/Σ ελαίου).

1.3.2 Μετασχηματιστές οργάνων (ή μέτρησης)

Ο μετασχηματιστής μέτρησης αναφέρεται συχνά ως μετασχηματιστής οργάνων. Συνιστά συνήθως άλλο ένα χρησιμοποιούμενο όργανο μέτρησης στον τομέα ισχύος. Ένας μετασχηματιστής μέτρησης χρησιμοποιείται για να απομονώνει την κύρια ισχύ και να μετατρέπει το ρεύμα και την τάση σε μικρότερη αναλογία στη δευτερεύουσα έξοδο. Μετρώντας την έξοδο, μπορεί να μετρηθεί η φάση, το ρεύμα και η τάση της πραγματικής γραμμής ισχύος (Souvan, 2019).

Οι μετασχηματιστές οργάνων είναι ηλεκτρικές συσκευές υψηλής ακριβείας που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση ή τη μετατροπή των επιπέδων τάσης ή ρεύματος ώστε αυτά να μπορούν να μετρηθούν πιο εύκολα. Η συνηθέστερη χρήση των μετασχηματιστών οργάνων είναι η λειτουργία οργάνων ή η μέτρηση από κυκλώματα υψηλής τάσης ή υψηλού ρεύματος, με ασφαλή απομόνωση του δευτερεύοντος κυκλώματος ελέγχου από τις υψηλές τάσεις ή ρεύματα. Η πρωτεύουσα περιέλιξη του μετασχηματιστή συνδέεται με το κύκλωμα υψηλής τάσης ή υψηλού ρεύματος και ο μετρητής ή ο ηλεκτρονόμος συνδέεται στο δευτερεύον κύκλωμα (Παρασκευόπουλος, & Τηνιακός, 2013).

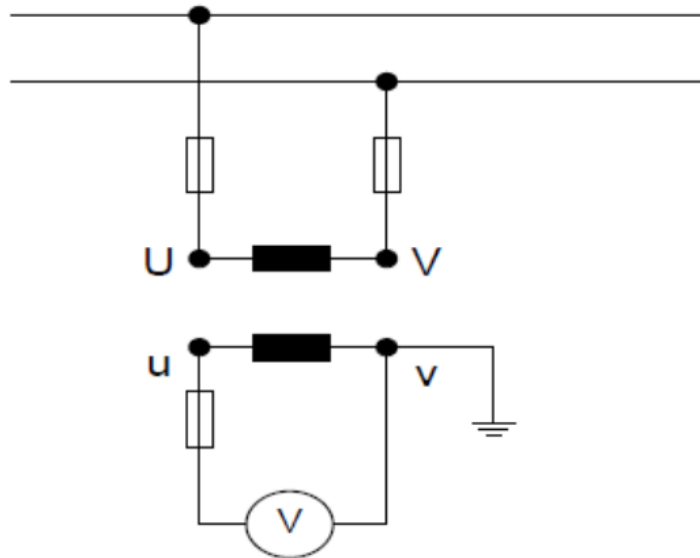
Οι μετασχηματιστές οργάνων μέτρησης στα μετρητικά συστήματα διακρίνονται σε:
α) μετασχηματιστές τάσης και β) μετασχηματιστές έντασης. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι:

- μικρή αυτοκατανάλωση ισχύος,
- υψηλή ακρίβειά τους,
- ηλεκτρική απομόνωση του κυκλώματος μέτρησης από το κύκλωμα υψηλής τάσης.

1.3.2.1 Μετασχηματιστής τάσης

Στους μετασχηματιστές τάσης, η τάση του πρωτεύοντος είναι ίση με τη μέση τάση, με την οποία τροφοδοτείται το σύστημα, ενώ η τάση του δευτερεύοντος είναι συνήθως ίση με 100V. Το πρωτεύον δηλαδή τύλιγμα έχει πολλές σπείρες μικρής διατομής και το δευτερεύον τύλιγμα, λίγες σπείρες αγωγού μεγάλης διατομής. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) Μονοπολικόι, οι οποίοι μετράνε την τάση μεταξύ μιας φάσης και της γης, δηλαδή τη φασική τάση και β) Διπολικόι, οι οποίοι μετράνε την τάση μεταξύ δύο φάσεων, δηλαδή την πολική τάση. Σε μια εγκατάσταση, ανάλογα βέβαια την εγκατάσταση, προτιμάται η χρήση διπολικών μετασχηματιστών, γιατί με δυο μόνο τέτοιους μετασχηματιστές μπορούμε να μετρήσουμε ένα τριφασικό σύστημα. Ενώ αν χρησιμοποιηθούν μονοπολικόι μετασχηματιστές, χρειάζονται αντίστοιχα τρεις (Σωτηριάδης, 2019).

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μετασχηματιστών τάσης είναι η ονομαστική τάση, U_n , η ονομαστική ισχύς ή φορτίο S_n , η κλάση ακριβείας, η ονομαστική τάση πρωτεύοντος U_{1n} , η ονομαστική τάση δευτερεύοντος U_{2n} και η Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς S_{max} (Σωτηριάδης, 2019).



Εικόνα 2: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τάσης
 Πηγή: Σωτηριάδης, 2019

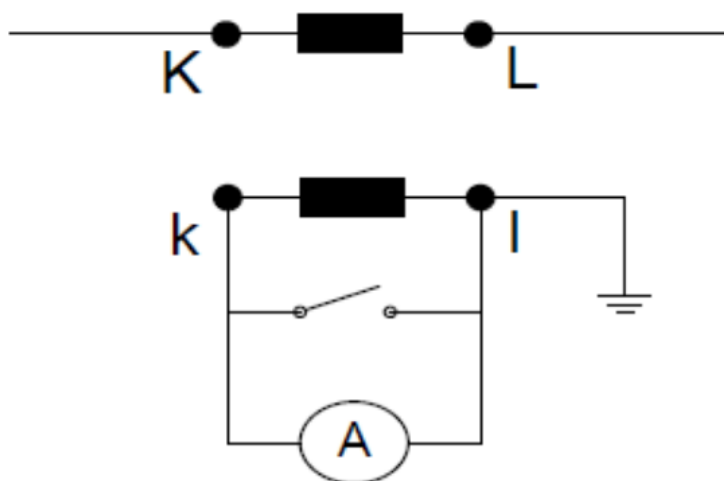
1.3.2.2 Μετασχηματιστής έντασης

Στα κυκλώματα χαμηλής τάσης που διαρρέονται από ρεύμα μεγαλύτερο των 100 A, και για όλα τα κυκλώματα υψηλής τάσης, οι μετασχηματιστές έντασης ή ρεύματος (Current Transformers – CTs) χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτούν τον μετρητή με ένα σήμα, ανάλογο με το ρεύμα που ρέει μέσα από το φορτίο. Είναι αναγκαίοι για τη μέτρηση υψηλών ρευμάτων ή ρευμάτων σε επίπεδα υψηλής τάσης, γιατί είναι σχεδόν ανέφικτο να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένας μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας με επαρκές μέγεθος, σε σύγκριση με τα σημερινά μεγέθη των μετρητών, και με επαρκές επίπεδο μόνωσης, ώστε να μετράμε απευθείας το ρεύμα (Σωτηριάδης, 2019).

Ο μετασχηματιστής έντασης παράγει ένα μικρό σήμα εξόδου, απευθείας ανάλογο του πλάτους του ρεύματος που ρέει στον αγωγό, γύρω από τον οποίο έχει τοποθετηθεί. Το σήμα εξόδου από το μετασχηματιστή έντασης, οδηγείται ως είσοδος στο μετρητή, που με τη σειρά του, το χρησιμοποιεί για να προσδιορίσει το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα. Μια γενική τακτική που εφαρμόζεται στο μετρητή είναι η ανύψωση του σήματος που λαμβάνει από το μετασχηματιστή έντασης, ώστε να αντιπροσωπεύεται η ροή ρεύματος μέσα στο φορτίο. Επίσης, σε κάποιες εφαρμογές, είναι αποδεκτό η είσοδος του ρεύματος να μετρείται σε «δεύτερο επίπεδο» και να τοποθετείται

εξωτερικός πολλαπλασιαστής που θα ανυψώνει τις τιμές που καθορίζονται από το μετρητή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην πολικότητα, όταν εγκαθίσταται ένας τέτοιος μετασχηματιστής. Αν τοποθετηθεί με λάθος τρόπο, τότε ο μετρητής θα ερμηνεύσει εσφαλμένα πως το κύκλωμα καταναλώνει, ενώ αυτό παράγει και αντίστροφα (Σωτηριάδης, 2019).

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι μετασχηματιστή έντασης: α) δακτυλίου, β) χωριστού πυρήνα, γ) άθροισης, δ) τύπος Wound-Primary CT. Τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών έντασης είναι η ονομαστική τάση U_n , η ονομαστική ισχύς ή φορτίο S_n , η κλάση ακρίβειας για το τύλιγμα μέτρησης $c1$, η κλάση ακρίβειας για το τύλιγμα προστασίας, το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος I_{1n} , το ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντος I_{2n} και η αντοχή σε ρεύμα βραχείας διάρκειας I_{th} (Σωτηριάδης, 2019).



Εικόνα 3: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης
Πηγή: Σωτηριάδης, 2019

1.4 Χρήση μετασχηματιστών

Οι πιο σημαντικές χρήσεις και εφαρμογές ενός μετασχηματιστή είναι οι εξής:

- Μπορεί να αυξήσει ή να χαμηλώσει το επίπεδο τάσης ή ρεύματος (όταν αυξάνεται η τάση, μειώνεται το ρεύμα καθώς $S = V \times I$, ενώ η ισχύς είναι ίδια) σε ένα κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εμποδίσει τη μετάβαση συνεχούς ρεύματος από ένα κύκλωμα στο άλλο.
- Μπορεί να απομονώνει δύο ηλεκτρικά κυκλώματα

Ο μετασχηματιστής είναι ο κύριος λόγος για τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ισχύος με εναλλασσόμενο ρεύμα αντί για συνεχές ρεύμα, καθώς ο μετασχηματιστής δεν λειτουργεί στο συνεχές ρεύμα και επομένως υπάρχουν πάρα πολλές δυσκολίες για την μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος στο συνεχές. Η κύρια εφαρμογή του μετασχηματιστή είναι να αυξήσει ή να μειώσει το επίπεδο τάσης (Σαμοΐλης, 2007).

Διάφορα συγκεκριμένα σχέδια ηλεκτρικής εφαρμογής απαιτούν ποικίλους τύπους μετασχηματιστών. Παρόλο που όλες μοιράζονται τις βασικές αρχές χαρακτηριστικών μετασχηματιστών, προσαρμόζονται στις κατασκευαστικές ή ηλεκτρικές ιδιότητες για ορισμένες απαιτήσεις εγκατάστασης ή συνθήκες κυκλώματος (Heathcote, 2011).

Στη μετάδοση ηλεκτρικής ισχύος, οι μετασχηματιστές επιτρέπουν τη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλές τάσεις, γεγονός που μειώνει τις απώλειες λόγω θέρμανσης των αγωγών. Αυτό επιτρέπει στις μονάδες παραγωγής να βρίσκονται σε απόσταση από τους ηλεκτρικούς καταναλωτές (Nailen, 2005). Σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής για τη μετατροπή της τάσης από την τυποποιημένη τάση τροφοδοσίας σε εύχρηστες τιμές για τις απαιτήσεις του κυκλώματος.

Οι μετασχηματιστές σήματος και ήχου χρησιμοποιούνται για τη ζεύξη σταδίων των ενισχυτών και για την αντιστοίχιση συσκευών όπως τα μικρόφωνα και οι συσκευές εγγραφής στην είσοδο των ενισχυτών. Οι μετασχηματιστές ήχου επέτρεψαν

στα τηλεφωνικά κυκλώματα να πραγματοποιούν αμφίδρομη συνομιλία μέσω ενός μόνο ζεύγους καλωδίων.

Κεφάλαιο 2^ο – Μονοφασικός μετασχηματιστής

2.1 Μονοφασικός Μετασχηματιστής

Οι μονοφασικοί μετασχηματιστές ισχύος έχουν σχεδιαστεί για να δέχονται μονοφασικό ρεύμα AC και να παράγουν μονοφασική ισχύ AC. Η ισχύς που παράγεται είναι είτε χαμηλότερης ή υψηλότερης τάσης. Σε αυτούς τους μετασχηματιστές η ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ κυκλωμάτων μέσω της αρχής της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (Lituma, 2002).

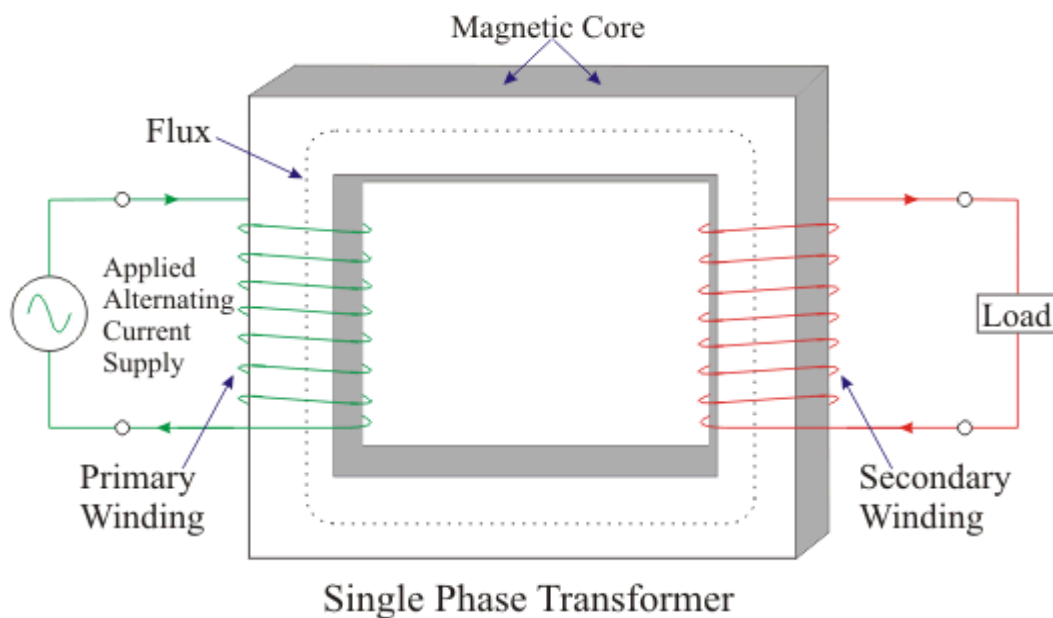
Ο μετασχηματιστής περιλαμβάνει τρία κύρια μέρη - έναν μαγνητικό πυρήνα, ένα πρωτεύον τυλίγμα και ένα δευτερεύον τυλίγμα και λειτουργεί με βάση τον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday (Μαναζής, 2002). Ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής δηλώνει ότι η «επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (EMF) του πηνίου είναι ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής στη μαγνητική ροή». Αυτός ο νόμος εξηγείται καλύτερα μέσω της λειτουργίας του κυκλώματος (Μαναζής, 2002).

2.2 Δομή μονοφασικού μετασχηματιστή

Ένας μονοφασικός μετασχηματιστής αποτελείται από πηνία-τυλίγματα (πρωτεύον και δευτερεύον) γύρω από έναν μαγνητικό πυρήνα (μαγνητική ζεύξη). Τα δυο τυλίγματα περιλαμβάνουν μονωμένα σύρματα χαλκού, τα οποία τυλίγονται σε ένα κοινό μαγνητικό κύκλωμα γνωστό ως πυρήνας. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος συνήθως από σίδηρο και αποτελείται από πολλά στρώματα σιδήρου, τα οποία είναι πλαστικοποιημένα. Αυτή η πλαστικοποίηση βοηθά στη μείωση των απωλειών

πυρήνα. Το πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή συνδέεται με πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ το δευτερεύον συνδέεται με το φορτίο. Η σύνδεση με τον κοινό πυρήνα επιτρέπει την εύκολη μεταφορά ισχύος από το ένα πηνίο στο άλλο. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται όταν το ένα ρεύμα διαρρέει το πρωτεύον πηνίο. Αυτό το μαγνητικό πεδίο επάγει τάση στο δευτερεύον τύλιγμα (Γιαννόπουλος, 2017).

Η κατάρρευση του πυρήνα και η παραγωγή ισχύος στο δευτερεύον τύλιγμα ονομάζεται μαγνητική ροή. Η παραγόμενη τάση και η ένταση ρεύματος καθορίζονται από τον νόμο του Faraday (Γιαννόπουλος, 2017). Η υψηλότερη τάση που θα χρησιμοποιηθεί σε μονοφασικό μετασχηματιστή ελέγχεται συνήθως από βιομηχανικούς κανονισμούς. Μονοφασικοί μετασχηματιστές ισχύος με αναλογία 1: 1 χρησιμοποιούνται για την απομόνωση κυκλωμάτων. Λόγω των τυπικών αρχών κατασκευής και λειτουργίας, αυτοί οι μετασχηματιστές ισχύος χρησιμοποιούνται για τη μείωση των ρευμάτων μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις, έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οικιακές και εμπορικές εφαρμογές



Εικόνα 4: Μονοφασικός Μετασχηματιστής

Πηγή: Μαναζής, 2002

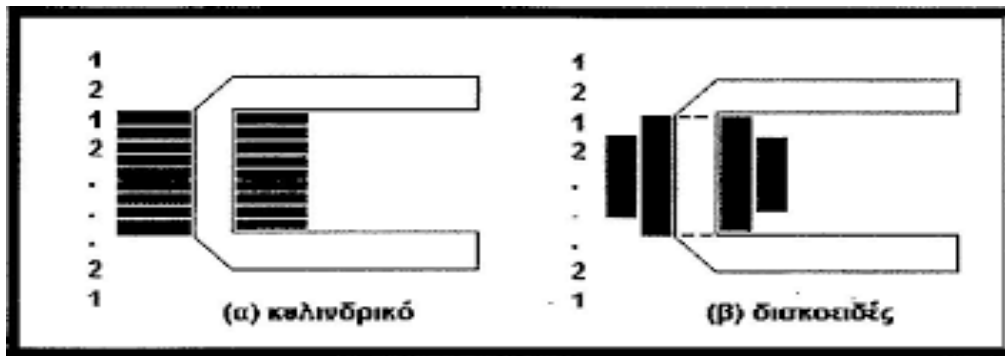
2.3 Τυλίγματα μετασχηματιστή

Τα τυλίγματα (περιελίξεις) αποτελούνται από τους αγωγούς ρεύματος που τυλίγονται γύρω από τα τμήματα του πυρήνα. Πρέπει να είναι σωστά μονωμένοι, υποστηριζόμενοι και να ψύχονται για να αντέχουν στις συνθήκες λειτουργίας και δοκιμής. Ο χαλκός και το αλουμίνιο είναι τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται ως αγωγοί σε τυλίγματα ενός μονοφασικού μετασχηματιστή ισχύος (Μαναζής, 2002).

Ενώ το αλουμίνιο είναι ελαφρύτερο και γενικά λιγότερο ακριβό από το χαλκό, πρέπει να χρησιμοποιείται μεγαλύτερη διατομή αγωγού για τη μεταφορά ρεύματος με παρόμοια απόδοση όπως ο χαλκός. Ο χαλκός έχει επίσης μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά σε όλες τις μικρότερες διαστάσεις, όπου οι αγωγοί αλουμινίου δεν είναι αποδεκτοί (Μαναζής, 2002).

Σε περιπτώσεις όπου συναντώνται ακραίες δυνάμεις, υλικά όπως ο επαργυρωμένος χαλκός μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ακόμη μεγαλύτερη αντοχή. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές ισχύος είναι συνήθως αποκλεισμένοι με ορθογώνια διατομή. Πολλαπλά σύρματα μπορούν να τυλιχθούν παράλληλα και να ενωθούν μεταξύ τους στα άκρα του τυλίγματος, οπότε είναι απαραίτητο να μεταφερθούν σε διάφορα σημεία κατά μήκος του τυλίγματος για να αποφευχθεί η κυκλοφορία των ρευμάτων γύρω από τους βρόχους. Τα μεμονωμένα σύρματα ενδέχεται να υποστούν διαφορές στο πεδίο ροής λόγω των αντίστοιχων θέσεων τους εντός του τυλίγματος, όπου παρατηρείται διαφορά τάσης μεταξύ των συρμάτων (Γιαννόπουλος, 2017).

Όσον αφορά την κατασκευή των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, διακρίνονται δύο τύποι: α) τα κυλινδρικά τυλίγματα και β) τα δισκοειδή τυλίγματα. Τα κυλινδρικά τυλίγματα λόγω πιο απλής κατασκευής χρησιμοποιείται περισσότερο (Γιαννόπουλος, 2017).



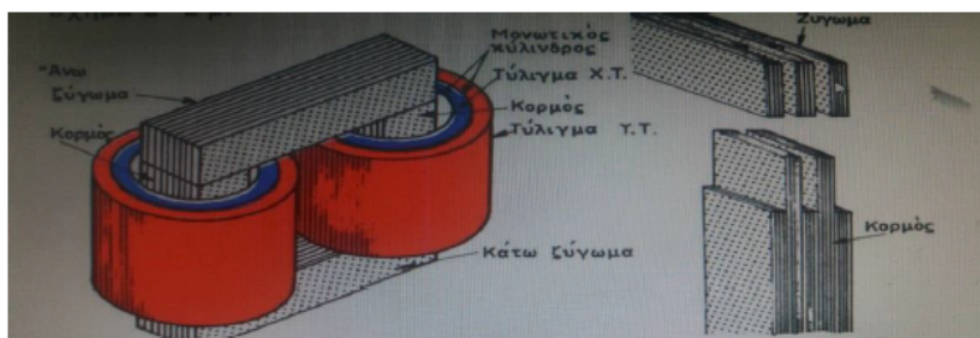
Εικόνα 5: Τυλίγματα μετασχηματιστή

Πηγή: Γιαννόπουλος, 2017

2.3.1 Συγκεντρικά τυλίγματα

Ένας τύπος τυλιγμάτων που συναντώνται στους μετασχηματιστές, είναι τα κυλινδρικά ή συγκεντρικά τυλίγματα. Σε αυτόν το τύπο, ο πυρήνας του μετασχηματιστή, κατασκευάζεται από μαγνητικά ελάσματα και αποτελείται από δύο κορμούς και από δυο ζυγώματα. Οι κορμοί είναι τα κατακόρυφα μέρη και τα ζυγώματα είναι τα οριζόντια.

Το άνω ζύγωμα, αποσπάται από τον πυρήνα, έτσι ώστε να είναι εύκολο να τοποθετηθούν τα τυλίγματα πάνω στους κορμούς. Στην περίπτωση των μεγάλων μετασχηματιστών, το κάτω ζύγωμα συνιστά για τον πυρήνα ένα ιδιαίτερο τμήμα. Στα κυλινδρικά τυλίγματα, αυτό της υψηλής τάσης βρίσκεται στην εξωτερική πλευρά, περιβάλλοντας το τυλίγμα χαμηλής τάσης, με σκοπό να διασφαλίζεται η μόνωση του πυρήνα (Γιαννόπουλος, 2017).

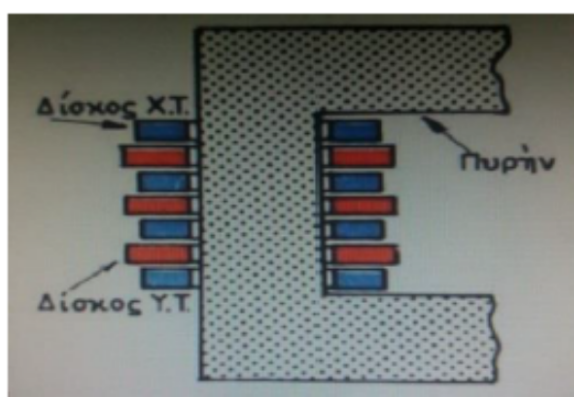


Εικόνα 6: Συγκεντρικά ή κυλινδρικά τυλίγματα μονοφασικού μετασχηματιστή

Πηγή: https://elearning.teicm.gr/file.php/410/Transformer_01.pdf

2.3.2 Τυλίγματα κατά δίσκους

Ένας άλλος τύπος τυλιγμάτων που συναντάται στους μετασχηματιστές, είναι τα τυλίγματα κατά δίσκους (δισκοειδή τυλίγματα). Σε αυτόν τον τύπο κάθε τύλιγμα απαρτίζεται από πολλά τμήματα. Τα τμήματα αυτά διαμορφώνονται σε δίσκους και είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν δύο άκρα σε κάθε τύλιγμα (Bagheri, et al., 2007). Με άλλα λόγια στα δισκοειδή τυλίγματα, το πρωτεύον ή το δευτερεύον είναι υποδιαιρεμένα σε πολλά μικρότερα τυλίγματα τα οποία είναι τοποθετημένα το ένα κάτω από το άλλο (Γιαννόπουλος, 2017).



Εικόνα 7: Τυλίγματα κατά δίσκους (δισκοειδή) μετασχηματιστή
Πηγή: https://elearning.teicm.gr/file.php/410/Transformer_01.pdf

2.4 Απώλειες ενέργειας μετασχηματιστή

Αν και οι μετασχηματιστές είναι πολύ αποδοτικές συσκευές, σημειώνονται σε αυτούς μικρές απώλειες ενέργειας λόγω τεσσάρων κύριων αιτιών (Toledo, Alvarez, & Morales, 2018):

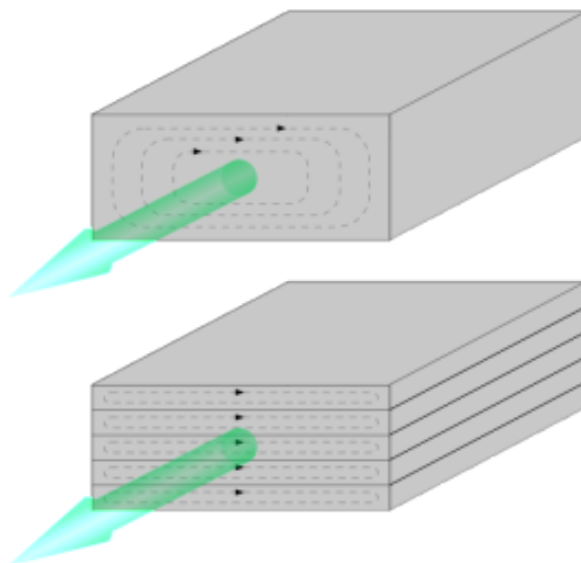
- Αντίσταση των τυλιγμάτων: το σύρμα χαμηλής αντίστασης που χρησιμοποιείται για τις περιελίξεις εξακολουθεί να έχει αντίσταση και συνεπώς συμβάλλει στην απώλεια θερμότητας
- Διαρροή ροής: η οποία προκαλεί πτώση τάσης στα τυλίγματα.
- Δινορεύματα: το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο όχι μόνο προκαλεί ρεύματα στο δευτερεύον πηνίο αλλά και ρεύματα στον ίδιο τον πυρήνα του σιδήρου. Αυτά τα ρεύματα ρέουν σε μικρούς κύκλους στον πυρήνα του

σιδήρου και ονομάζονται δινορεύματα. Τα δινορεύματα προκαλούν απώλεια θερμότητας (Kriezis, et al., 1992). Η απώλεια θερμότητας, ωστόσο, μπορεί να μειωθεί με την ελασματοποίηση του πυρήνα (λεπτά φύλλα από μαλακό σίδηρο μονωμένα το ένα από το άλλο).

- Υστέρηση: Η μαγνήτιση του πυρήνα αντιστρέφεται επανειλημμένα από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία μαγνήτισης του πυρήνα ξοδεύει ενέργεια και αυτή η ενέργεια εμφανίζεται ως θερμότητα. Η θερμότητα που παράγεται μπορεί να διατηρηθεί στο ελάχιστο χρησιμοποιώντας μαγνητικό υλικό το οποίο έχει χαμηλή απώλεια υστέρησης. Ως εκ τούτου, ο μαλακός σίδηρος επιλέγεται συχνά ως υλικό πυρήνα επειδή οι μαγνητικές περιοχές μέσα σε αυτό αλλάζουν γρήγορα με χαμηλή απώλεια ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα δινορεύματα δημιουργούν απώλειες αντίστασης με τη μορφή θερμότητας (Joule). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης των μετασχηματιστών σιδήρου-πυρήνα. (ή οποιεσδήποτε άλλες συσκευές που χρησιμοποιούν μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία) Η ελασματοποίηση (χρησιμοποιώντας λεπτά φύλλα μαγνητικού υλικού) είναι ένας τρόπος αντιμετώπισης των απωλειών αυτών.

Στην παρακάτω εικόνα, τα δινορεύματα μπορούν να κυκλοφορούν σε μεγάλα τόξα μέσα σε έναν πυρήνα σιδήρου. Κάτι τέτοιο όμως θα δημιουργήσει πολλές απώλειες και δεν είναι ιδανικό. Σε αντίθεση με την επόμενη εικόνα όπου ο πυρήνας έχει προστατευτικό περίβλημα. Τα ηλεκτρόνια (φορείς φόρτισης) δεν μπορούν να διασχίσουν το μονωτικό διάκενο μεταξύ των λεπτών φύλλων μαγνητικού υλικού και έτσι δεν μπορούν να κυκλοφορήσουν σε μεγάλα τόξα. Ωστόσο, η συμπερίληψη της ελασματοποίησης στο σχεδιασμό ενός μετασχηματιστή θα αυξήσει το κόστος κατασκευής και το χρόνο (Γιασαφάκης, 2010).



Εικόνα 8: Ρεύματα Eddy

Πηγή: <https://www.miniphysics.com/energy-losses-in-transformer.html>

2.5 Προστασία μετασχηματιστή

Ο τύπος προστασίας για τους μετασχηματιστές ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή και τη σημασία του μετασχηματιστή. Οι μετασχηματιστές προστατεύονται κυρίως από σφάλματα και υπερφορτώσεις. Οποιαδήποτε εκτεταμένη λειτουργία του μετασχηματιστή υπό ανώμαλη κατάσταση, όπως σφάλματα ή υπερφόρτωση, θέτει σε κίνδυνο τη ζωή του, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να παρέχεται επαρκής προστασία για ταχύτερη απομόνωση του μετασχηματιστή υπό τέτοιες συνθήκες (Lituma, 2002). Οι βλάβες που μπορεί να υποστεί ένας μετασχηματιστής, είναι σε περιπτώσεις όπως:

- Βραχυκύκλωμα παρατεταμένης διάρκειας, μέσα ή έξω από το δοχείο στην πλευρά της χαμηλής ή της υψηλής τάσης
- Έπειτα από υπερφόρτιση μεγάλης διάρκειας
- Από σφάλματα που παρατηρούνται στην μόνωση.

Κατά συνέπεια η προστασία ενός μετασχηματιστή σε περίπτωση βραχυκυκλώματος είναι επιτακτική ανάγκη, καθώς μπορεί να δημιουργηθεί πυρκαγιά. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος η προστασία πραγματοποιείται με ασφάλειες σκόνης ή με

διακόπτες ισχύος μέσης τάσης. Οι ασφάλειες συνήθως προτιμώνται ως μέσα προστασίας, αντί των διακοπών ισχύος γιατί περιορίζουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Ωστόσο, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ασφάλειες για απόζευξη υπό φορτίο και για το λόγο αυτό πρέπει να συνδυάζονται με διακόπτες φορτίου (Flanagan, 1993).

Σε περίπτωση παρατεταμένης συνεχής υπερφόρτισης, η προστασία επιτυγχάνεται με τη χρήση θερμομέτρου λαδιού. Επίσης χρησιμοποιούνται αυτόματοι διακόπτες ισχύος αλλά και ασφάλειες. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η υπερφόρτιση. Οι ασφάλειες που χρησιμοποιούνται είναι τύπου NH και έχουν την ονομαστική ένταση του δευτερεύοντος πηνίου. Οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος, λειτουργούν στην ονομαστική σύσταση του μετασχηματιστή (Flanagan, 1993).

2.6 Βαθμός απόδοσης μονοφασικού μετασχηματιστή

Ο βαθμός απόδοσης ενός μετασχηματιστή είναι ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύος P_2 προς την προσλαμβανόμενη ισχύ P_1 ή του P_2 δια το άθροισμα του P_2 και των απωλειών. Οι ισχύεις P_1 και P_2 είναι κάθε μια ενεργός ισχύς (Μαναζής, 2002).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_v} = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_{Cu}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

όπου:

$P_2 = \sqrt{3} \cdot V_2 \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2$ (ισχύς δευτερεύοντος).

P_{Cu} = Ηλεκτρικές απώλειες λόγω του φαινομένου τζάουλ στα τυλίγματα, οι οποίες καλούνται και «απώλειες χαλκού».

P_{Fe} = Μαγνητικές απώλειες λόγω υστέρησης και δινορρευμάτων στο σιδερένιο πυρήνα του μαγνητικού κυκλώματος, οι οποίες καλούνται και «απώλειες σιδήρου».

Κεφάλαιο 3^ο – Κατασκευή μονοφασικού μετασχηματιστή

3.1 Κατασκευή μονοφασικού μετασχηματιστή

Όπως έχει αναφερθεί κάθε μετασχηματιστής αποτελείται από δυο τυλίγματα τα οποία περιτυλίγονται σε ένα μαγνητικό κύκλωμα. Το ένα τύλιγμα χαρακτηρίζεται ως τύλιγμα υψηλής τάσεως και το άλλο ως χαμηλής τάσεως. Το μαγνητικό κύκλωμα καλείται πυρήνας του μετασχηματιστή. Κατασκευάζεται από μαγνητικά ελάσματα. Τα μαγνητικά αυτά ελάσματα είναι τα ίδια που χρησιμοποιούνται στις στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές και συγκεκριμένα στην κατασκευή πυρήνα του επαγωγικού τυμπάνου. Το πάχος τους κυμαίνεται από 0,35 έως και 0,5 mm. Η επιφάνεια τους μονώνεται με την επικάλυψη ειδικού βερνικιού, με σκοπό να περιορίσουν τα δινορρεύματα (Αντωνόπουλος, 1995 · Σαμοΐλης, 2007)

Τα μαγνητικά ελάσματα που κατασκευάζονται πλέον για τους μετασχηματιστές παρουσιάζουν πολύ χαμηλές ολικές απώλειες, με αποτέλεσμα να κατασκευάζονται μετασχηματιστές με πολύ καλούς βαθμούς απόδοσης. Οι μετασχηματιστές διαθέτουν, ελάσματα και τύλιγμα κατασκευασμένο από αλουμίνιο ή χαλκό, σε μορφή συρμάτων (αγωγών), με τετραγωνική ή κυκλική διατομή (Αντωνόπουλος, 1995).

Στην περίπτωση των μικρών μετασχηματιστών το τύλιγμα (πηνίο) από μονωμένο με βερνίκι χαλκό με κυκλική διατομή. Το πηνίο αυτό, τυλίγεται γύρω από ένα συνήθως θερμοπλαστικό σωληνοειδές. Επίσης αποτελείται από στρώματα. Από το πόσα στρώματα αποτελείται, εξαρτάται από τη διάμετρο διατομής και το ύψος του τυλίγματος. Ο αριθμός των τυλιγμάτων μέσα στο ίδιο στρώμα εξαρτάται από τη διάμετρο του αγωγού και το πλάτος του πηνίου (Αντωνόπουλος, 1995).

Στην περίπτωση των μετασχηματιστών δικτύου των ηλεκτρονικών συσκευών, τοποθετείται ανάμεσα στο πηνίο χαμηλής τάσης και στο πηνίο υψηλής τάσης ένα πηνίο προστασίας μίας στρώσης που διαθέτει μια μοναδική σύνδεση. Όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί, το πηνίο προστασίας, συνδέεται με τον αγωγό προστασίας, χωρίς να διαρρέεται από ρεύμα. Η παρουσία του αγωγού προστασίας,,

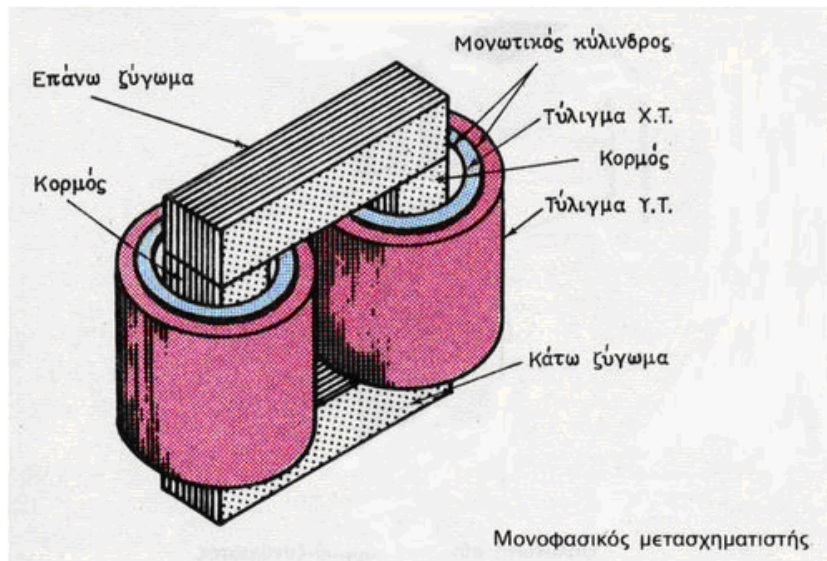
πέρα του ότι θωρακίζει, είναι να εμποδίσει την μετάδοση της υψηλής τάσης προς την χαμηλή, ακόμα και στην περίπτωση που η μόνωση του πηνίου υψηλής τάσης καταστραφεί (Αντωνόπουλος, 1995).

Η ψύξη, το μονωτικό και το μέγεθος (κατασκευαστικό), καθορίζουν την τιμή της πυκνότητας ρεύματος στους μετασχηματιστές, η οποία συνήθως κυμαίνεται από 8 A/mm² έως 1 A/mm². Η ψύξη λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του τυλίγματος, σε αντίθεση με τις θερμικές απώλειες που πραγματοποιούνται σε ολόκληρο το τύλιγμα.

Στους μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσης, η κατανάλωση τροφοδοτείται από το τύλιγμα χαμηλής τάσης, ενώ η πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας συνδέεται με το τύλιγμα υψηλής τάσης. Στην περίπτωση αυτή το τύλιγμα χαμηλής τάσης είναι το δευτερεύον, σε αντίθεση με την περίπτωση των μετασχηματιστών ανύψωσης τάσεως, που δευτερεύον είναι το τύλιγμα υψηλής τάσεως (Αντωνόπουλος, 1995).

Ο πυρήνας του μονοφασικού μετασχηματιστή κατασκευάζεται από μαγνητικά ελάσματα. Αποτελείται επίσης από δυο ζυγώματα και δύο κορμούς. Για να μπορούν τα τυλίγματα να τοποθετούνται στους κορμούς, άνω ζύγωμα αφαιρείται από τον πυρήνα. Σε κάθε έναν από τους δύο κορμούς του μετασχηματιστή, υπάρχει ένα κυλινδρικό τύλιγμα χαμηλής τάσης και ένα κυλινδρικό τύλιγμα χαμηλής τάσης. Το τύλιγμα χαμηλής τάσης περιβάλλεται από το τύλιγμα υψηλής τάσης και μονώνονται μεταξύ τους (Αντωνόπουλος, 1995 · Σαμοΐλης, 2007)

Η σύνδεση των τυλιγμάτων χαμηλής τάσης των δύο κορμών, είναι σε σειρά. Με αυτόν τον τρόπο τα άκρα του τυλίγματος χαμηλής τάσης μένουν ελεύθερα (το αντίστοιχο συμβαίνει και με τα τυλίγματα υψηλής τάσης). Τα τυλίγματα που έχουν κατασκευαστεί με τον τρόπο αυτόν, ονομάζονται κυλινδρικά (συγκεντρικά) τυλίγματα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν και τα τυλίγματα κατά δίσκους, όπου το κάθε τύλιγμα αποτελείται από δίσκους, συνδεδεμένους σε σειρά. Οι μετασχηματιστές που διαθέτουν τυλίγματα στους δύο κορμούς ονομάζονται μετασχηματιστές τύπου πυρήνα. Επίσης υπάρχουν οι μετασχηματιστές στους οποίους ο πυρήνας έχει τρεις κορμούς, με τον μεσαίο να έχει διπλάσια διατομή. Αυτοί οι μετασχηματιστές ονομάζονται τύπου μανδύα (Αντωνόπουλος, 1995· Σαμοΐλης, 2007)



Εικόνα 9: Μικρός μονοφασικός μετασχηματιστής

Πηγή: <https://slideplayer.gr/slide/11859064/>

3.2 Αρχή λειτουργίας μονοφασικού μετασχηματιστή

Όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί στο κενό, λόγος των τάσεων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος, είναι ίσος με τον λόγο των αριθμών σπειρών των αντίστοιχων τυλιγμάτων. Ο τελευταίος αυτός λόγος ονομάζεται σχέση μεταφοράς k του μετασχηματιστή (Αντωνόπουλος, 1995).

$$U_1 = E_1 \quad \& \quad U_2 = E_2$$

Συνεπώς:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{4.44fw_1\Phi_\mu}{4.44fw_2\Phi_\mu} = \frac{w_1}{w_2} = k$$

Όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί υπό φορτίο τότε:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad \text{ή} \quad I_2 = kl_1$$

Προσεγγιστικά ισχύει και η σχέση:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad \text{ή} \quad U_2 = \frac{U_1}{k}$$

Όσο πιο μικρές είναι οι απώλειες καθώς και οι ροές σκέδασης του μετασχηματιστή, τόσο πιο μεγάλες είναι οι προσεγγίσεις. Συγκεκριμένα οι σχέσεις αυτές εφαρμόζονται ακριβώς σε ένα ιδανικό μετασχηματιστή. Όταν ένας μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση, υποβιβάζει την ένταση που κυκλοφορεί. Αυτό συνεπάγεται και από τις σχέσεις. Κατά συνέπεια, το τύλιγμα με την χαμηλή τάση, και μεγάλη ένταση, θα έχει έναν αγωγό μεγάλης διατομής και μικρό αριθμό σπειρών. Από την άλλη πλευρά το τύλιγμα υψηλής τάσης και μικρής έντασης, θα έχει έναν αγωγό μικρής διατομής και μεγάλο αριθμό σπειρών (Αντωνόπουλος, 1995).

Όταν οι απώλειες του μετασχηματιστή είναι πάρα πολύ μικρές (αμελητέες), τότε η ισχύς P1 που απορροφά το πρωτεύον τύλιγμα από το δίκτυο είναι το 1/2 της ισχύος P2 που δίνει το δευτερεύον τύλιγμα (Αντωνόπουλος, 1995).

$$P_1 = P_2 \quad \text{ή} \quad U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

Για το δευτερεύον:

$$U_2 I_2 = U_1 I_1$$

Συνεπώς:

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2$$

Η απόκλιση φάσης ανάμεσα στην ένταση και την τάση στο πρωτεύον, είναι ίση με την αντίστοιχη του συντελεστή ισχύος του φορτίου του μετασχηματιστή.

Το κάθε τύλιγμα του μετασχηματιστή, έχει συγκεκριμένη τιμή ωμικής αντίστασης. Έτσι δημιουργεί συγκεκριμένη ροή σκέδασης. Αυτό έχει ως συνέπεια, όταν ο

σχηματιστής λειτουργεί υπό φορτίο, να εμφανίζεται πτώση τάσης σε κάθε τύλιγμα. Σε αυτήν την περίπτωση η τάση του δευτερεύοντος υπό φορτίο, δεν είναι ίση με αυτή στο κενό. Η μεταβολή της τάσης από τη λειτουργία του δευτερεύοντος στο κενό έως τη λειτουργία του υπό φορτίο, καλείται διακύμανση τάσης. Η διακύμανση τάσης εκφράζεται ως επί τοις εκατό ποσοστό της τάσης του δευτερεύοντος στο ονομαστικό φορτίο (Αντωνόπουλος, 1995).

Για την διακύμανση τάσης ισχύει:

$$\varepsilon\% = \frac{E - U_{2N}}{U_{2N}} 100\%$$

Η τάση του δευτερεύοντος σε λειτουργία στο κενό, είναι ίση με την ηλεκτρεργετική δύναμη.

Το μέγεθος της $\varepsilon\%$ ενός μετασχηματιστή χαρακτηρίζει την ποιότητα του. Τις περισσότερες φορές δεν ξεπερνά το 5% για μετασχηματιστές μεσαίου και μεγάλου μεγέθους.

Για την τάση βραχυκύκλωσης ισχύει:

$$U_k = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} 100\%$$

U_{1K} : η τάση στο πρωτεύον όταν το βραχυκυκλωμένο δευτερεύον διαρρέεται από το ονομαστικό ρεύμα I_{2N} .

Η τάση βραχυκύκλωσης καθορίζει την διανομή των φορτίων σε μετασχηματιστές που λειτουργούν παράλληλα. Η τάση βραχυκύκλωσης τις περισσότερες φορές είναι μικρότερη από 7 % (Αντωνόπουλος, 1995). Γνωρίζοντας τη τάση βραχυκύκλωσης, μπορεί να υπολογισθεί η ένταση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή όταν το

πρωτεύον τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση η οποία δίνεται από την

σχέση:
$$I_{2k} = \frac{I_{2N}}{U_K} 100$$

3.2.1 Λειτουργία υπό φορτίο

Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή χωρίς φορτίο, δηλαδή όταν τα άκρα του δευτερεύοντος πηνίου είναι ελεύθερα, ο λόγος των τάσεων παραμένει ανεπηρέαστος. Στην περίπτωση όμως που γίνει σύνδεση του δευτερεύοντος πηνίου με έναν καταναλωτή, τότε διαρρέεται από ρεύμα (Αντωνόπουλος, 1995 · Ραϊτσίου, 2000). Έστω I_p και I_s η ένταση του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο και στο δευτερεύον αντίστοιχα. Τότε ισχύει:

$$I_p / I_s = N_s / N_p = 1 / a$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο λόγος των εντάσεων είναι αντιστρόφως ανάλογος των τάσεων των δυο πηνίων. Όταν ο μετασχηματιστής ανυψώνει τη τάση στο δευτερεύον πηνίο, τότε το ρεύμα υποβιβάζεται με τον ίδιο βαθμό. Το τύλιγμα υψηλής τάσης διαθέτει μικρής διατομής αγωγό και μεγάλο αριθμό σπειρών, ενώ το τύλιγμα χαμηλής τάσης, έχει μεγάλης διατομής αγωγός και μικρό αριθμό σπειρών (Αντωνόπουλος, 1995 · Ραϊτσίου, 2000).

Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή, η συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος και στα δυο πηνία είναι η ίδια. Η φαινόμενος ισχύς του ιδανικού μετασχηματιστή, όπως και η ενεργός και η άεργος είναι η ίδια και στα δυο πηνία. Ο συντελεστής ισχύος ισούται με τον συντελεστή ισχύος του καταναλωτή που είναι συνδεδεμένος με το δευτερεύον πηνίο (Αντωνόπουλος, 1995 · Ραϊτσίου, 2000).

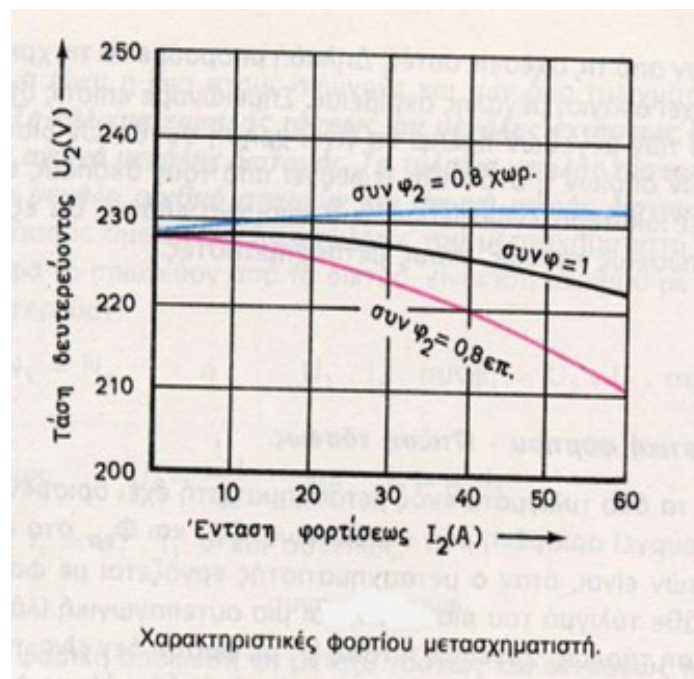
Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή με φορτίο, εξαιτίας της ωμικής αντίστασης των αγωγών των πηνίων αλλά και της αυτεπαγωγής, εμφανίζεται πτώση τάσης σε κάθε τύλιγμα. Αυτό σημαίνει πως η τάση στο δευτερεύον πηνίο χωρίς φορτίου δεν ισούται ποτέ με την τάση στο δευτερεύον πηνίο με φορτίο. Όσο πιο μεγάλη είναι η ένταση του ρεύματος στο δευτερεύον τύλιγμα τόσο πιο μεγάλη είναι η

διαφοροποίηση από την τάση στο κενό (Αντωνόπουλος, 1995 · Ραΐτσιος, 2000). Για τη διακύμανση τάσης ισχύει:

$$VR(\%) = V_{20} - V_{2N} / V_{2N} \cdot 100\%$$

Τα μεγέθη V_{20} , V_{2N} συνιστούν τη τάση στα άκρα του δευτερεύοντος τυλίγματος στην λειτουργία στο κενό και στην ονομαστική λειτουργία. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσο πιο μικρή είναι η διακύμανση τάσης, τόσο πιο καλός ποιοτικά είναι ο μετασχηματιστής.

Η γραφική παράσταση του δευτερεύοντος πηνίου ως προς την τάση, όταν ο συντελεστής ισχύος του φορτίου και η τάση του πρωτεύοντος μένουν σταθερά, ονομάζεται χαρακτηριστική φορτίου του μετασχηματιστή. Ακολουθεί το διάγραμμα όπου απεικονίζει την χαρακτηριστική φορτίου μονοφασικού μετασχηματιστή για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Η τάση χωρίς φορτίο είναι υψηλότερη από την τάση με φορτίο (Αντωνόπουλος, 1995 · Ραΐτσιος, 2000).



Εικόνα 10: Χαρακτηριστική φορτίου μονοφασικού μετασχηματιστή, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις.

Πηγή: Αντωνόπουλος, 1995

3.2.2. Λειτουργία στο κενό

Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή στο κενό, το δευτερεύον τύλιγμα μένει ανοιχτό, ενώ το πρωτεύον τύλιγμα τροφοδοτείται, με μια ημιτονοειδή πηγή τάσης.

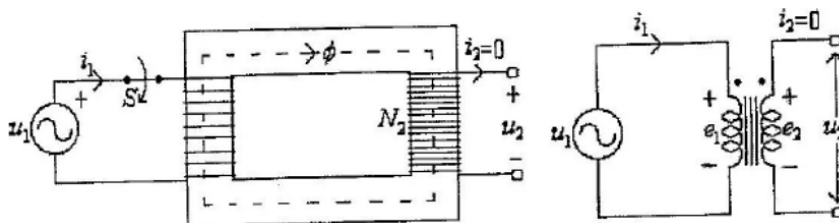
Κατά τη λειτουργία αυτή, δεν υπάρχει σύνδεση του δευτερεύοντος με την αντίσταση ($R_2 = \infty$) και ο μετασχηματιστής τροφοδοτείται με την τάση του δικτύου. (U_1). Για την τάση δικτύου ισχύει $U_1 = I_1 \omega L_1$, ενώ στην περίπτωση του ιδανικού μετασχηματιστή δεν υπάρχει ωμική αντίσταση (Αντωνόπουλος, 1995 · Γιαννόπουλος, 2017). Για το ρεύμα που διέρχεται ισχύει:

$$I_{10} = \frac{U_1}{j \cdot \omega \cdot L_1} = -j \frac{U_1}{\omega \cdot L_1} \quad U_2 \neq 0 ,$$

Το ρεύμα αυτό προηγείται της I_1 κατά 90° . Στην λειτουργία στο κενό, το ρεύμα αυτό συμβολίζεται με $I_m = I_{10}$ και ονομάζεται ρεύμα μαγνήτισης. Το ρεύμα μαγνήτισης δημιουργεί ένα ομόρροπο διάρρευμα $\Theta_{10} = I_m W_1$. Το ομόρροπο διάρρευμα δημιουργεί μια ομόρροπη ροή (Αντωνόπουλος, 1995 · Γιαννόπουλος, 2017)

$$\Phi_{10} = \Phi \frac{U_{10}}{R_m}$$

Παρακάτω ακολουθεί το κυκλωματικό διάγραμμα κατά τη λειτουργία μονοφασικού μετασχηματιστή στο κενό.

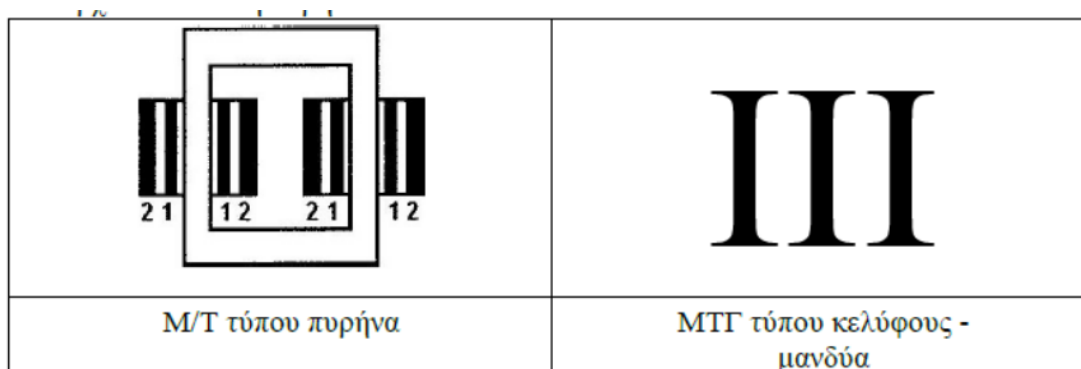


Εικόνα 11: Μονοφασικός μετασχηματιστής κατά τη λειτουργία του στο κενό

Πηγή: Γιαννόπουλος, 2017

3.3 Πυρήνας μονοφασικού μετασχηματιστή

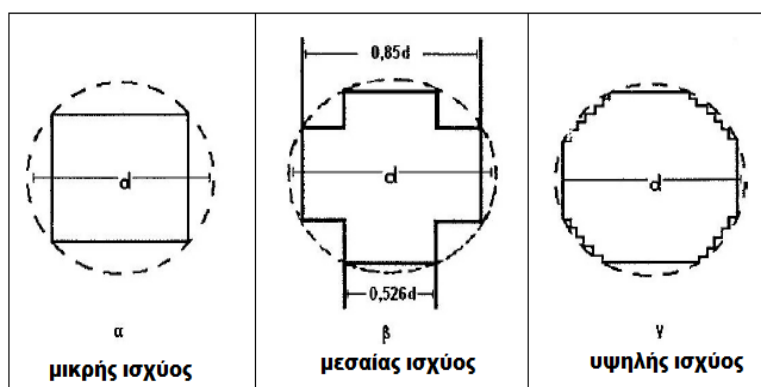
Για τους πυρήνες στους μονοφασικούς μετασχηματιστές, υπάρχουν δύο είδη κατασκευής: α) Ο μετασχηματιστής τύπου πυρήνα και β) ο μετασχηματιστής τύπου μανδύα.



Εικόνα 12: Τύποι πυρήνων μονοφασικού μετασχηματιστή

Πηγή: Γιαννόπουλος, 2017

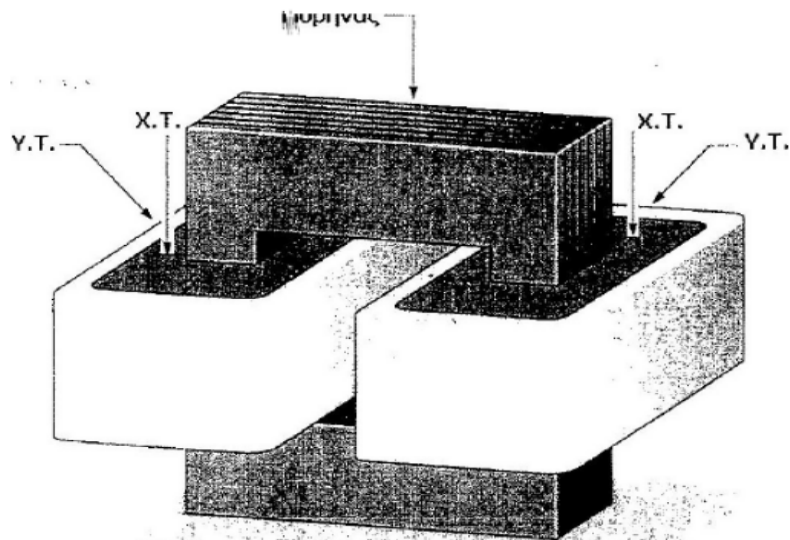
Επίσης υπάρχουν οι τύποι πυρήνων: α) Μικρής και μεσαίας ισχύος και β) υψηλής ισχύος.



Εικόνα 13: τύποι πυρήνα μονοφασικού μετασχηματιστή

Πηγή: Γιαννόπουλος, 2017

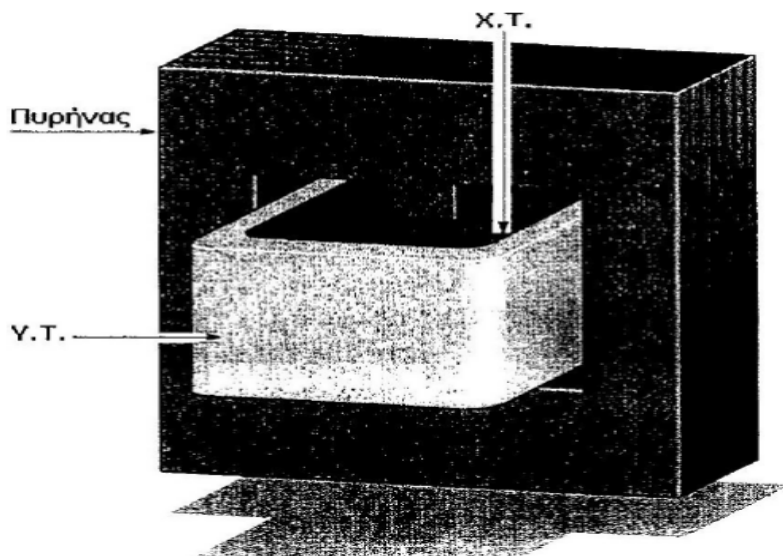
Στον μετασχηματιστή τύπου πυρήνα, τα τυλίγματα είναι τοποθετημένα γύρω από τα δυο στελέχη. Το κάθε στέλεχος έχει τον μισό αριθμό σπειρών. Τα στελέχη είναι ενωμένα το ένα με το άλλο, με τα ζυγώματα.



Εικόνα 14: μετασχηματιστής, τύπου πυρήνα

Πηγή: Γιαννόπουλος, 2017

Στον πυρήνα τύπου κελύφους – μανδύα, τα τυλίγματα είναι τοποθετημένα στο μεσαίο στέλεχος. Δυο εξωτερικά στελέχη περιβάλλουν τα τυλίγματα. Στο μεσαίο στέλεχος, η διατομή του είναι διπλάσια αυτής των άλλων στελεχών καθώς και των ζυγωμάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί η διερχόμενη από το μεσαίο στέλεχος μαγνητική ροή, είναι διπλάσια της μαγνητικής ροής που διέρχεται στα άλλα δυο στελέχη.



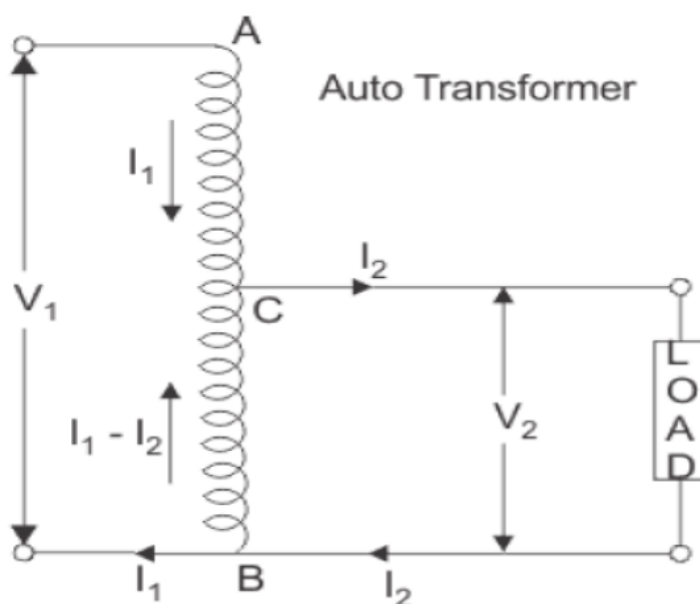
Εικόνα 15: μετασχηματιστής, τύπου κελύφους – μανδύα

Πηγή: Γιαννόπουλος, 2017

3.4 Μονοφασικός αυτοσχηματιστής

Ο μετασχηματιστής ο οποίος έχει μόνο ένα τύλιγμα, που τα άκρα του είναι οι ακροδέκτες A και B υψηλής τάσης, ονομάζεται μονοφασικός αυτοσχηματιστής. Οι ακροδέκτες C και B της χαμηλής τάσης συνδέονται με το άκρο B του τυλίγματος. Επίσης συνδέεται με την ενδιάμεση λήψη C. Κατά συνέπεια το τμήμα CB του τυλίγματος ανήκει ταυτόχρονα τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον τύλιγμα.

Οι σχέσεις της έντασης ρεύματος και της τάσεως του μονοφασικού μετασχηματιστή, είναι οι ίδιες και για τον μονοφασικό αυτομετασχηματιστή. Ωστόσο το κοινό τμήμα είναι κατασκευασμένο από αγωγό με πιο μικρή διατομή και αυτό γιατί διαρρέεται από τη διαφορά ρευμάτων των δυο τυλιγμάτων. Εντούτοις οι αυτοσχηματιστές δεν έχουν μονωμένο το τύλιγμα χαμηλής τάσης, κατά το μέρος της υψηλής. Το γεγονός αυτό τους κάνει επικίνδυνους κατά τη χρήση τους (Ραΐτσιος, 2000).



Εικόνα 16: Μονοφασικός αυτοσχηματιστής

Πηγή: <https://crushtymks.com/el/energy-and-power/806-autotransformers-in-few-words.html>

Κεφάλαιο 4ο – Ερευνητικό μέρος

4.1 Σχεδιασμός μετασχηματιστή

Στο κεφάλαιο αυτό θα επιχειρηθεί η ανάπτυξη ενός τυπικού τρόπου σχεδίασης ενός Μετασχηματιστή ισχύος τύπου πυρήνα όπου θα παρουσιαστεί βήμα- βήμα ο τρόπος καθορισμού των επιμέρους παραγόντων που αφορούν τη σχεδίαση του μετασχηματιστή ενώ παράλληλα θα πραγματοποιηθούν και οι απαραίτητοι υπολογισμοί που θα καθορίσουν τους παραπάνω παράγοντες.

Όσον αφορά τους παράγοντες σχεδίασης , αυτοί αναλύονται στα παρακάτω εννέα βήματα :

- 1) Καθορισμός των προδιαγραφών – στοιχείων του Μετασχηματιστή
- 2) Σχεδίαση μαγνητικού κυκλώματος
- 3) Σχεδίαση τυλίγματος Χαμηλής Τάσης
- 4) Σχεδίαση τυλίγματος Υψηλής Τάσης
- 5) Υπολογισμός απόδοσης Μετασχηματιστή
- 6) Υπολογισμός της τάσης βραχυκυκλώσεως Μετασχηματιστή
- 7) Σχεδίαση κελύφους Μετασχηματιστή
- 8) Μελέτη ψύξης Μετασχηματιστή
- 9) Υπολογισμός κόστους κατασκευής Μετασχηματιστή

Ο μετασχηματιστής πάνω στον οποίο θα πραγματοποιηθεί η μελέτη είναι ένας τριφασικός μετασχηματιστής διανομής στιβακτού πυρήνα της ABB συνδεσμολογίας Dyn5 (συνδεσμολογία τριγώνου στην πλευρά της υψηλής και αστέρα στην πλευρά της χαμηλής) που ανήκει στη μικρή κατηγορία μετασχηματιστών διανομής με βάση το πώς τους κατηγοριοποιεί η εταιρία. Βέβαια, πριν ξεκινήσει ο υπολογισμός των επιμέρους στοιχείων του μετασχηματιστή, σκόπιμο κρίνεται να καταγραφούν κάποια σημαντικά δεδομένα που θα βοηθήσουν στον υπολογισμό.

4.1.1. Καθορισμός των προδιαγραφών- στοιχείων του Μετασχηματιστή

- α) Είδος και τύπος Μετασχηματιστή : Τριφασικός Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα
- β) Ονομαστική ισχύς εξόδου $S = 63$ (kVA)
- γ) Ονομαστική τάση πρωτεύοντος $V_{HV} = 16800$ (V)
- δ) Ονομαστική τάση δευτερεύοντος $V_{LV} = 420$ (V)
- ε) Συχνότητα $f = 50$ (Hz)

στ) Μέγιστη ανύψωση θερμοκρασίας τυλίγματος $T = 50$ (°C °C)

ζ) Τάση βραχυκύκλωσης $UK_{max} = 4$ (%)

η) Εγγυημένες απώλειες σιδήρου $E_{γγ} P_{Fe} = 950$ (W)

θ) Εγγυημένες απώλειες χαλκού $E_{γγ} P_{Cu} = 130$ (W)

ι) Υλικό πυρήνα : σιδηρομαγνητικά ελάσματα πυριτιούχου χάλυβα

Παρακάτω αναφέρονται οι ανοχές εγγυημένων τιμών κατά το πρότυπο IEC 76-1 οι οποίες θα ληφθούν υπόψη:

Ονομαστική τάση βραχυκύκλωσης : $\pm 10\%$ της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης

Απώλειες κενού φορτίου : $+ 15\%$ των εγγυημένων απωλειών σιδήρου

Απώλειες φορτίου : $+15\%$ των εγγυημένων απωλειών φορτίου

Συνολικές απώλειες : $+10\%$ των εγγυημένων απωλειών

4.1.2. Σχεδίαση μαγνητικού κυκλώματος

Προκειμένου να υλοποιηθούν οι υπολογισμοί για τη σχεδίαση του μαγνητικού κυκλώματος πρέπει να γίνουν οι παρακάτω παραδοχές:

- Συντελεστής τάσης ανά σπείρα $K_i = 0,62$
- Μέγιστη μαγνητική επαγωγή (τιμή εκκινήσεως) $B_m = 1,8$ T
- Αριθμός βημάτων σκέλους πυρήνα : $A B \Sigma \Pi = 3$ βήματα
- Συντελεστής σκέλους $K = 0,6$

- Συντελεστής παραθύρου $K_w = \frac{10}{30+(KV)_{HV}} \lambda \frac{10}{30+(KV)_{HV}} \lambda = \frac{10}{30+(16800/1000)_{HV}}$
 $\frac{10}{30+(16800/1000)_{HV}} = 0,21$

- Πυκνότητα υλικού Π.Υ.=Fe dens =7650 kgr/m³

- Αναλογία παραθύρου $L / b_w = 2,0$
- Συντελεστής σιδήρου $K_{FE} = 0.92$
- Πυκνότητα ρεύματος $\delta = 2,5 \text{ A/mm}^2$

Όπου $\lambda = 80\%$ για $5 \text{ kVA} < S \leq 50 \text{ kVA}$

100% για $50 \text{ kVA} < S \leq 250 \text{ kVA}$

120% για $S > 250 \text{ kVA}$

Η σχεδίαση ξεκινά με μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής $B_m = 1,8 \text{ T}$, με συγκεκριμένη λαμαρίνα

$$\text{Υπολογισμός τάσης ανά σπείρα : } E_{\text{turn1}} : K_i \sqrt{\frac{S}{3}} \sqrt{\frac{S}{3}} = 0,62 \sqrt{\frac{63}{3}} \sqrt{\frac{63}{3}} = 2,84 \text{ V/σπείρα}$$

$$\text{Υπολογισμός διατομής σκέλους : } A_i = \frac{E_{\text{turn1}}}{4,44f B_m} \frac{E_{\text{turn1}}}{4,44f B_m} = \frac{2,84}{4,44 \times 50 \times 1,8} \frac{2,84}{4,44 \times 50 \times 1,8} = 0,007 \text{ m}^2$$

$$\text{Διάμετρος του περιγεγραμμένου κύκλου στο σκέλος : } D_1 = \sqrt{\frac{A_i}{K}} \sqrt{\frac{A_i}{K}} = \sqrt{0,007/0,6}$$

$$\sqrt{0,007/0,6} = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{Εμβαδόν παραθύρου : } A_w = \frac{S}{3,33f B_m K_w \delta \times 10^6 \times A_i} \frac{S}{3,33f B_m K_w \delta \times 10^6 \times A_i} =$$

$$\frac{63 \times 1000}{3,33 \times 50 \times 1,8 \times 0,21 \times 2,5 \times 10^6 \times 0,007} \frac{63 \times 1000}{3,33 \times 50 \times 1,8 \times 0,21 \times 2,5 \times 10^6 \times 0,007} = 0,057 \text{ m}^2$$

$$\text{Μήκος παραθύρου : } L = \sqrt{2A_w} \sqrt{2A_w} = \sqrt{2 \times 0,057} = \sqrt{2 \times 0,057} = 0,337 \text{ m}$$

$$\text{Πλάτος παραθύρου : } b_w = \sqrt{\frac{A_w}{2}} \sqrt{\frac{A_w}{2}} = \sqrt{\frac{0,057}{2}} \sqrt{\frac{0,057}{2}} = 0,168 \text{ m}$$

$$\text{Απόσταση κέντρων σκελών : } D_2 = b_w + D_1 = 0,168 + 0,1 = 0,268 \text{ m}$$

$$\text{Συνολικό μήκος ζυγώματος : } W = 2D_2 + 0,9D_1 = 0,536 + 0,09 = 0,626 \text{ m}$$

$$\text{Προσαυξημένη διατομή πυρήνα : } A_{ii} = \frac{A_i}{K_i} \frac{A_i}{K_i} = \frac{0,007}{0,62} \frac{0,007}{0,62} = 0,011 \text{ m}^2$$

$$\text{Προσαυξημένη διατομή ζυγώματος : } A_y = 1,15A_{ii} = 1,15 \times 0,011 = 0,012$$

$$\text{Πλάτος σκέλους : } b_y = 0,9D_1 = 0,9 \times 0,1 = 0,09 \text{ m}$$

$$\text{Πλάτος ζυγώματος : } h_y = \frac{A_y}{b_y} \frac{A_y}{b_y} = \frac{0,012}{0,09} \frac{0,012}{0,09} = 0,13 \text{ m}$$

$$\text{Μέγιστη επαγωγή ζυγώματος : } B_{my} = B_m \frac{A_{ii}}{A_y} \frac{A_{ii}}{A_y} = 1,8 \frac{0,011}{0,012} \frac{0,011}{0,012} = 1,64 \text{ T}$$

Απόδοση μαγνητικού κυκλώματος

Σε αυτό σημείο κρίνεται σκόπιμο να γίνει εκτίμηση της απόδοσης του μαγνητικού κυκλώματος, δηλαδή των απωλειών ρεύματος κενού φορτίου και απωλειών σιδήρου έτσι ώστε αν παραβιαστούν οι ανοχές των εγγυημένων τιμών το μαγνητικό κύκλωμα να τροποποιηθεί.

A) Απώλειες σιδήρου

$$\text{Όγκος σκελών : } O\Sigma = V_{limbs} = 3A_{ii}L = 3 \times 0,011 \times 0,337 = 0,011 \text{ m}^3$$

$$\text{Βάρος σκελών : } B\Sigma = G_{limbs} = V_{limbs} \times (\Pi.Y) = 0,011 \times 7650 = 84,15 \text{ Kgr}$$

Ειδικές απώλειες : W / kgr Προκύπτουν από την καμπύλη της μαγνητικού υλικού του πυρήνα και για δεδομένο B_m (σχήμα 1)

$$\text{Απώλειες σκελών : } P_{limbs} = (W / \text{kgr}) \times G_{limbs} = 2 \times 84,15 = 168,3 \text{ W}$$

$$\text{Όγκος ζυγωμάτων : } OZ = V_{yokes} = 2A_y W = 2 \times 0,012 \times 0,626 = 0,015 \text{ m}^3$$

$$\text{Βάρος ζυγωμάτων : } BZ = G_{yokes} = V_{yokes} \times (\Pi.Y) = 0,015 \times 7650 = 114,75 \text{ kgr}$$

Επειδή το εμβαδόν των ζυγμάτων είναι μεγαλύτερο από το εμβαδόν των σκελών ($A_y > A_{ii}$) τα ζυγώματα έχουν μικρότερη μαγνητική επαγωγή B_m .

$$\text{Μαγνητική επαγωγή ζυγώματος : } B_y = B_m \frac{A_{ii}}{A_y} = 1,8 \frac{0,011}{0,012} = 1,64 \text{ T}$$

Ειδικές απώλειες ζυγώματος : Για τη συγκεκριμένη καμπύλη της μαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται και για $B = B_y$ είναι δυνατόν να βρεθεί το W/ kg στο ζύγωμα.

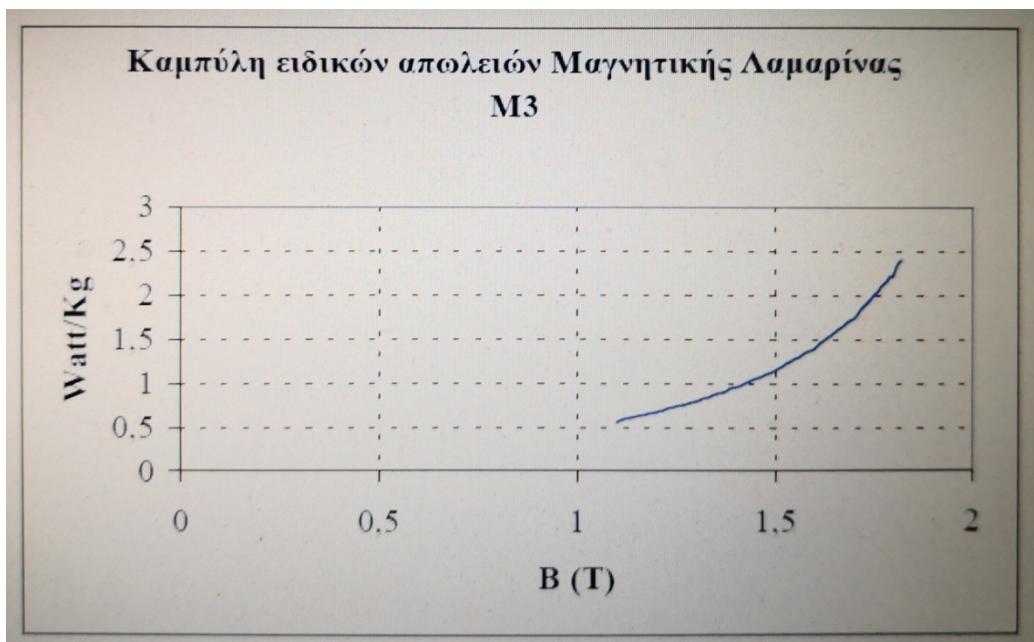
Για $B = B_y = 1,64$ (από σχήμα 1)

$$\text{Απώλειες ζυγμάτων } P_{yokes} = W/kg \times Gyokes = 1,5 \times 114,75 = 172,1 \text{ W}$$

$$\text{Συνολικές απώλειες } P_{FE} = P_{core} = 1,07(P_{limbs} + P_{yokes}) = 1,07 \times (168,3 + 172,1) = 364,2 \text{ W (συνολικές απώλειες σιδήρου).}$$

$$P_{FE} \leq 1,15 \times E_{γγ}(P_{FE}) \rightarrow 364,2 \leq 950 \rightarrow \text{ισχύει}$$

Άρα ο πυρήνας έχει σχεδιαστεί ικανοποιητικά.



Σχήμα 1 (Καμπύλη ειδικών απωλειών του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα)

B) Ρεύμα κενού φορτίου

$$L=0,337 \text{ m}$$

$$B_y= 1,64 \text{ T}$$

Ένταση μαγνητικού πεδίου σκελών H σε AT / m .Δίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης του μαγνητικού υλικού (σχήμα 2) που χρησιμοποιείται και για συγκεκριμένο B_m .

$$H=380\text{AT/m}$$

$$W = 0,626 \text{ m}$$

$$\text{AT σκελών} : 3HL = 3 \times 380 \times 0,337 = 384,18$$

Ένταση μαγνητικού πεδίου ζυγώματος $H_y=230$ σε AT/ m .Δίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης της συγκεκριμένης λαμαρίνας που χρησιμοποιείται και με δεδομένη μαγνητική επαγωγή ζυγώματος B_y . (σχήμα 2)

$$\text{Ολικά αμπερελίγματα με τα δύο ζυγώματα} : \text{AT ζυγωμάτων} : 2 H_y W = 2 \times 230 \times 0,626= 288 \text{ AT}$$

$$\text{Ολικά αμπερελίγματα του πυρήνα} : NI_{\text{tot}} = \text{AE σκελών} + \text{AE ζυγωμάτων} = 384,18 + 288= 672,18 \approx 672 \text{ AT}$$

$$\text{Ολικά αμπερελίγματα ανά φάση} : \text{AE}\Phi = NI_{\text{tot}} / 3 = 672/3 = 224 \text{ AT}$$

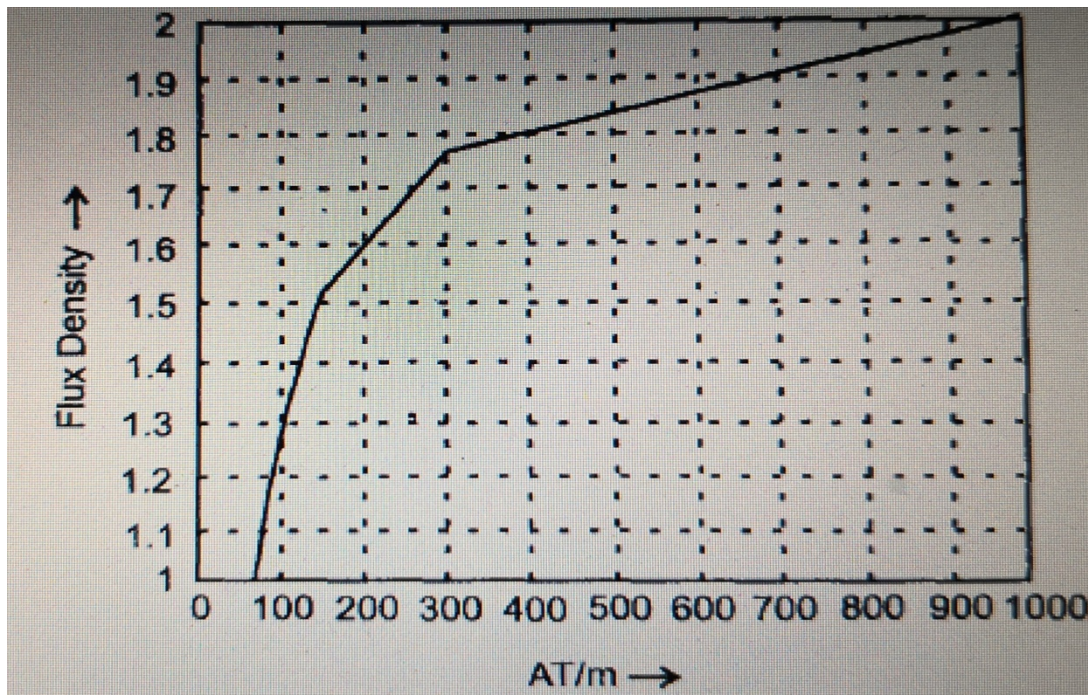
$$\text{Αριθμός ελιγμάτων τυλίγματος X.T.} : N_l = \frac{V_{LV}}{\sqrt{3}AE\Phi} \frac{V_{LV}}{\sqrt{3}AE\Phi} \quad V_{LV} = \frac{420}{\sqrt{3} \times 2,84} \frac{420}{\sqrt{3} \times 2,84} \quad 420 = 85,4 \text{ ή } 85 \text{ σπείρες}$$

$$\text{Ρεύμα μαγνήτισης} : I_m = \frac{AE\Phi}{\sqrt{2}N_l} \frac{AE\Phi}{\sqrt{2}N_l} \quad 1,15 = \frac{224}{\sqrt{2} \times 5582} \frac{224}{\sqrt{2} \times 5582} \quad 1,15 = 0,03 \text{ A}$$

Το ρεύμα μαγνήτισης προσαυξάνεται κατά 15 % για να ληφθεί υπόψη στο αποτέλεσμα η αντίδραση των ενώσεων.

$$\text{Ρεύμα σιδήρου} : I_{FE} = I_W = \frac{P_{FE}}{\sqrt{3}V_{LV}} \frac{P_{FE}}{\sqrt{3}V_{LV}} = \frac{364,2}{\sqrt{3} \times 420} \frac{364,2}{\sqrt{3} \times 420} = 0,5 \text{ A}$$

$$\text{Ρεύμα εν κενώ} : I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_W^2} \sqrt{I_m^2 + I_W^2} = \sqrt{0,03^2 + 0,5^2} \sqrt{0,03^2 + 0,5^2} = 0,5 \text{ A}$$



Σχήμα 2 (Καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται στον πυρήνα)

4.1.3. Σχεδίαση τυλίγματος χαμηλής τάσης

Αριθμός ελιγμάτων $N_1 = 85$

Πυκνότητα ρεύματος $\delta_2 = \delta - 0,2 = 2,5 - 0,2 = 2,3 \text{ A/mm}^2$

Επειδή το τύλιγμα χαμηλής είναι συνδεδεμένο σε αστέρα:

$$\text{Ονομαστικό ρεύμα} : I_2 = \frac{S}{V_{1,V} \times \sqrt{3}} = \frac{S}{V_{1,V} \times \sqrt{3}} = \frac{63}{420 \times \sqrt{3}} \frac{63}{420 \times \sqrt{3}} = 86,70 \text{ A}$$

$$\text{Διατομή αγωγού X.T.} : \alpha_2 = \frac{I_2}{\delta_2} = \frac{86,70}{2,3} = 37,69 \approx 38 \frac{86,70}{2,3} = 37,69 \approx 38 \text{ mm}^2$$

Αξονικός χώρος για το τυλίγμα

Το μήκος του παραθύρου είναι $L = 0,337\text{m}$. Ο αξονικός χώρος για το τυλίγμα θα είναι 80 % του L

Στο 20 % του αξονικού χώρου τοποθετείται η μόνωση .

Ο αγωγός χαμηλής τάσης είναι φύλλο χαλκού με μήκος όσο το αξονικό μήκος του τυλίγματος .Μήκος φύλλου χαλκού : $L_{\phi X} = 0,8L = 0,8 \times 0,337 = 269,6\text{mm}$

$$\text{Πλάτος φύλλου χαλκού : } b_{\phi X} = \frac{\alpha_2}{L_{\phi X}} \frac{\alpha_2}{L_{\phi X}} = \frac{38}{269,6} = 0,14 \frac{38}{269,6} = 0,14 \text{ mm}$$

Ακτινική τοποθέτηση τυλίγματος χαμηλής τάσης

Ακτινικό πλάτος τυλίγματος : $b_2 = N_1 (b_{\phi X} + 0,4) + 0,5 = 85 (0,14 + 0,4) + 0,5 = 49,3$
mm

$$\text{Ακτινικό πλάτος μιας στρώσης : } \frac{b_T}{2} \frac{b_T}{2} = \frac{b_2 - 0,5}{2} \frac{b_2 - 0,5}{2} = \frac{49,3 - 0,5}{2} \frac{49,3 - 0,5}{2} = 24,4 \text{ mm}$$

Συνολικό ακτινικό πλάτος τυλίγματος χαμηλής τάσης : $\Sigma\text{ΑΠΤΧ} = b_2 + 18 = 49,3 + 18 = 67,3 \text{ mm}$

Απόδοση τυλίγματος χαμηλής τάσης

Εσωτερική διάμετρος τυλίγματος X.T. : $dLV_{int} = D_1 + 2,6 = 0,1 + 2,6 = 102,6 \text{ mm}$

Εξωτερική διάμετρος τυλίγματος X.T. : $dLV_{ext} = D_1 + 2(b_2 + 18) = 100 + 2(67,3 + 18) = 234,6 \text{ mm}$

$$\text{Μέση διάμετρος τυλίγματος X.T. : } dLV_{mean} = \frac{dLV_{int} + dLV_{ext}}{2} = \frac{102,6 + 234,6}{2} = 168,6 \text{ mm}$$

Μέσο μήκος τυλίγματος X.T. $LV_{mean} = \pi \times dLV_{mean} = 3,14 \times 168,6 = 529,4 \text{ mm}$

$$\text{Αντίσταση τυλίγματος X.T. ανά φάση : } R_1 = \frac{LV_{\text{mean}} \times \rho_{\text{Cu}} \times N_1}{\alpha_n} = \frac{529,4/1000 \times 0,0178 \times 85}{38} = 0,021 \Omega$$

$$\text{Απώλειες χαλκού X.T. } P_{\text{cuLV}} = 3 I_2^2 \times R_2 / 1000 = 3 \times 86,70^2 \times 0,021 = 473,5 \text{ W}$$

4.1.4. Σχεδίαση τυλίγματος υψηλής τάσης

$$\text{Αριθμός σπειρών ανά φάση : } N_h = N_1 \frac{V_{HV}}{\sqrt{3}V_{LV}} = \frac{85 \times 16800}{420/\sqrt{3}} = 5882$$

$$\text{Ρεύμα ανά φάση : } I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \times V_{HV}} = \frac{63}{\sqrt{3} \times 16800} = 2,16 \text{ A}$$

$$\text{Πυκνότητα ρεύματος : } \delta_1 = \delta_2 + 0,2 = 2,5 + 0,2 = 2,7 \text{ A/mm}^2$$

$$\text{Διατομή αγωγού : } \alpha_1 = \frac{I_1}{\delta_1} = \frac{2,16}{2,7} = 0,8 \text{ mm}^2$$

$$\text{Για } \alpha_1 = 0,8 \text{ mm}^2$$

$$\text{Πλάτος αγωγού Y.T : } b_H = 1,483 \text{ mm}$$

$$\text{Μήκος αγωγού Y.T : } L_H = 2 \text{ mm}$$

		NOMINAL SECTION mm ²																																				
		0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55										
2,00	1,483	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585																											
2,12	1,559		1,734		1,905		2,160		2,435		2,753																											
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369																									
2,36	1,751		1,950		2,145		2,429		2,735		3,089		3,561																									
2,50	1,863	1,970	2,078	2,181	2,285	2,435	2,585	2,735	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,987	4,137																							
2,65	1,983		2,211		2,435		2,753		3,096		3,495		4,025		4,407																							
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,965	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237																					
3,00	2,263		2,526		2,785		3,145		3,535		3,985		4,555		5,037		5,537																					
3,15	2,383	2,527	2,661	2,790	2,925	3,124	3,313	3,502	3,722	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,267	5,522	5,837	6,315	6,693																			
3,30	2,543		2,841		3,135		3,527		3,973		4,475		5,145		5,667		6,337		7,141																			
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,546	3,781	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,103	7,509	7,829	8,326																	
3,75	2,863		3,201		3,535		3,985		4,473		5,035		5,785		6,387		7,137		8,307																			
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,285	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117	8,597	8,891	9,459	10,05	10,65															
4,25	3,263		3,651		4,035		4,545		5,096		5,735		6,585		7,287		8,137		9,157																			
4,50	3,463	3,679	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177	9,717	10,07	10,70	11,30	12,05	12,65	13,63													
4,75	3,663		4,101		4,535		5,105		5,723		6,435		7,385		8,187		9,137		10,28																			
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24	10,84	11,25	11,85	12,70	13,46	14,45	15,20	16,20	17,20											
5,30	4,103		4,596		5,085		5,721		6,410		7,205		8,265		9,177		10,24		11,51																			
5,60	4,343	4,626	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,197	9,717	10,28	10,84	11,51	12,18	12,67	13,45	14,29	15,33	16,25	17,09	18,21	19,29											
6,00	4,663		5,226		5,785		6,505		7,285		8,185		9,385		10,44		11,64		13,06																			
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99	13,78	14,32	15,20	16,16	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82											
6,70			5,856		6,485		7,289		8,160		9,165		10,51		11,70		13,04		14,65																			
7,10			6,216	6,551	6,885	7,311	7,727	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69	15,54	16,24	17,30	18,27	19,39	20,75	21,89	23,24	24,66											
7,50					7,265		8,185		9,160		10,29		11,79		13,14		14,64		16,44																			
8,00					7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,85	26,25	27,85											
8,50							9,305		10,41		11,69		13,39		14,94		16,64		18,68																			
9,00								9,885	10,41	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,84	18,72	19,80	20,69	21,86	23,30	24,84	26,45	27,86	29,60	31,40										
9,50									11,66		13,09		14,99		16,74		18,79		20,92																			
10,00										12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84	22,04	23,05	24,45	25,95	27,65	29,45	30,86	32,95	34,95										
10,60												14,63		16,75		18,72		20,84		23,38																		
11,20													15,47	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38	24,73	25,96	27,45	29,13	30,84	33,05	34,79	36,97										
11,80														18,07		20,80		23,24		26,90																		
12,50															19,79	20,69	22,14	23,39	24,64	26,14	27,64	28,95	30,70	32,58	34,65	36,95	38,83	41,33	43,89									
13,20																23,40		26,04		29,21																		

Πίνακας 1 (Πίνακας τυποποιημένων διατομών για τον αγωγό υψηλής τάσης του σχεδιαζόμενου μετασηματιστή)

Αξονικό μήκος τυλίγματος : $AMT = L_c = 0,7L = 0,7 \times 0,337 = 0,24 \text{ m}$

Το τύλιγμα υψηλής τάσης καταλαμβάνει το 70 % του αξονικού μήκους του παραθύρου ενώ το 30% του μήκους του παραθύρου χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση μόνωσης . Το τύλιγμα υψηλής τάσης έχει 10 % μεγαλύτερο χώρο για μόνωση από το τύλιγμα χαμηλής τάσης Τέλος οι αγωγοί έχουν μόνωση με πάχος 0.4 mm.

Πλάτος αγωγού Υ.Τ. με μόνωση : $M_{bh} = b_H + 0,4 = 1,483 + 0,4 = 1,883\text{mm}$

Μήκος αγωγού Υ.Τ με μόνωση : $M_{LH} = L_H + 0,4 = 2,4\text{mm}$

$$AA\Sigma = \frac{0,7L}{M_{bH}} \frac{0,7L}{M_{bH}} = \frac{0,7 \times 0,24}{1,883} \frac{0,7 \times 0,24}{1,883} = 127,4 \text{ mm}$$

Ο αριθμός αυτός (ΑΑΣ) εάν είναι δεκαδικός στρογγυλοποιείται στον αμέσως μικρότερο ακέραιο αριθμό, άρα ΑΑΣ= 127,4 mm

$$\text{Ακτινικός αριθμός σπειρών} : N_r = \frac{N_h}{\text{ΑΑΣ}} \frac{N_h}{\text{ΑΑΣ}} = \frac{5882}{127,4} \frac{5882}{127,4} = 46,1$$

$$\text{Ακτινικό μήκος τυλίγματος Υ.Τ.} : b_1 = b_{\text{TH}} = M_{\text{bH}} \times N_r = 1,883 \times 46,1 = 86,8 \text{ mm}$$

Αξονική διάταξη τυλίγματος

Μεταλλικός δακτύλιος πάχους 15 mm τοποθετείται στην κορυφή και ένας δεύτερος στη βάση του τυλίγματος Υ.Τ.

Μεταξύ μόνωσης και τυλίγματος Υ.Τ. υπάρχει ανοχή 8 mm .

$$\text{Αξονικό μήκος μόνωσης} : \text{ΑΜΜ} = L - L_{\text{H}} - 38 = 0,1 - 2 - 38 = 100 - 2 - 38 = 60 \text{ mm}$$

Ακτινική τοποθέτηση

$$\text{Συνολικό ακτινικό πλάτος τυλίγματος Υ.Τ.} : \Sigma\text{ΑΠΤΥ} = 24 + b_{\text{TH}} = 24 + 86,8 = 110,8 \text{ mm}$$

Μεταξύ τυλίγματος υψηλής τάσης και χαμηλής τάσης εγκαθίστανται δύο μονωτικοί κύλινδροι πάχους 3mm και υπάρχουν τρία κανάλια ψύξης πάχους 5 mm Στην εξωτερική πλευρά του τυλίγματος υψηλής τάσης θα εγκατασταθεί μονωτικός κύλινδρος πάχους 3 mm.

Απόδοση τυλίγματος υψηλής τάσης

$$\text{Εσωτερική διάμετρος τυλίγματος Υ.Τ.} : d_{\text{HVint}} = 234,6 + 32 = 266,6 \text{ mm}$$

$$\text{Εξωτερική διάμετρος τυλίγματος Υ.Τ.} : d_{\text{HVext}} = 266,6 + 2 \cdot 110,8 = 488,2 \text{ mm}$$

$$\text{Μέση διάμετρος τυλίγματος Υ.Τ. : } dHV_{\text{mean}} = \frac{dHV_{\text{int}} + dHV_{\text{ext}}}{2} = \frac{266,6 + 488,2}{2} = 337,4 \text{ mm}$$

$$\text{Μέσο μήκος τυλίγματος Υ.Τ. : } HVl_{\text{mean}} = \pi \times dHV_{\text{mean}} = 3,14 \times 337,4 = 1185 \text{ mm}$$

$$\text{Αντίσταση τυλίγματος Υ.Τ. : } R_h = \frac{HVl_{\text{mean}} \times \rho_{\text{Cu}} \times N_h}{\alpha_1} = \frac{1185/1000 \times 0,0178 \times 5882}{0,8} = 150 \Omega$$

$$\text{Απώλειες χαλκού τυλίγματος Υ.Τ.: } P_{\text{CuHV}} = 3 \times I_1^2 \times R_h / 1000 = 3 \times 2,16^2 \times 150 = 2100 \text{ W}$$

Συνολικές απώλειες χαλκού και των δύο τυλιγμάτων

Οι συνδέσεις των τυλιγμάτων και οι επιπρόσθετες απώλειες αυξάνουν τις απώλειες χαλκού κατά 5 %.

$$P_{\text{cutotal}} = 1,05(P_{\text{cuLV}} + P_{\text{cuHV}}) = 1,05(473,5 + 2100) = 2701 \text{ W}$$

$$P_{\text{cutotal}} \leq 1,15 E_{\gamma\gamma} P_{\text{Cu}}$$

4.1.5. Απόδοση Μετασχηματιστή

$$\text{Συνολικές απώλειες Μετασχηματιστή : } P_{\text{total}} = P_{\text{FE}} + P_{\text{cutotal}} = 364,2 + 2701 = 3065,2 \text{ W}$$

$$E_{\gamma\gamma}(P_{\text{total}}) = E_{\gamma\gamma}P_{\text{FE}} + E_{\gamma\gamma}P_{\text{Cu}} = 950 + 130 = 1080 \text{ W}$$

$P_{\text{total}} = 3065,2 < E_{\gamma\gamma}(P_{\text{total}}) = 1080 \text{ W} \rightarrow$ Άρα δε χρειάζεται να ελαττωθούν οι απώλειες χαλκού και σιδήρου.

$$\text{Βαθμός απόδοσης Μετασχηματιστή} : \eta = \frac{\frac{S \times \cos\varphi}{S \times \cos\varphi + P_{\text{total}}}}{\frac{S \times \cos\varphi}{S \times \cos\varphi + P_{\text{total}}}} \cdot 100 =$$

$$\frac{63000 \times 0,85}{63000 \times 0,85 + 3065} \cdot \frac{63000 \times 0,85}{63000 \times 0,85 + 3065} \cdot 100 = 94,6 \%$$

4.1.6. Σχεδίαση κελύφους

Υψηλότερο επίπεδο τάσης (kV)	Ισχύς Μετασχηματιστή (kVA)	Απόσταση από κέλυφος (cm)		
		Δl	Δb	Δh
<11	<1000	8	10	45
	Μεταξύ 1000 και 5000	14	18	50
Μεταξύ 11 και 33	<1000	15	20	55
	Μεταξύ 1000 και 5000	17	25	60

Πίνακας 2 (Αποστάσεις ενεργού μέρους από το κέλυφος)

$$\text{Μήκος κελύφους} : l_t = 2D_2 + d_{HVE\text{ext}} + \Delta l + 0,006 = 2 \times 0,268 + 488,2/1000 + 15/100 + 0,006 = 1,18 \text{ m}$$

$$\text{Πλάτος κελύφους} : b_t = d_{HVE\text{ext}} + \Delta b + 0,006 = 488,2/1000 + 20/100 + 0,006 = 0,69 \text{ m}$$

$$\text{Ύψος κελύφους} : h_t = L + 2b_y + \Delta h = 0,337 + 2 \times 0,09 + 55/100 = 1,06 \text{ m}$$

4.1.7. Μελέτη ψύξης

Αύξηση θερμοκρασίας

Η περιοχή που αφορά την ψύξη είναι το εμβαδόν των πλευρικών τοιχωμάτων του κελύφους :

$$\text{Εμβαδόν πλευρικής επιφάνειας κελύφους} : S_t = 2(b_t + l_t)h_t = 2(0,69 + 1,18)1,06 = 3,96 \text{ m}^2$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση : $\theta = \frac{P_{total}}{12,5 \times S_r} = \frac{3065}{12,5 \times 3,96}$

$$\frac{3065}{12,5 \times 3,96} = 61,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Επειδή η θερμοκρασία $\theta=61,9 > T=50 \text{ } ^\circ\text{C}$ θα πρέπει είτε να μειωθεί η αντίσταση των τυλιγμάτων, είτε να αυξηθεί η επιφάνεια του κελύφους.

4.1.8. Υπολογισμός κόστους κατασκευής Μετασχηματιστή

Ειδικό βάρος χαλκού $\text{ειδ.}\beta.=8.94\text{gr/cm}^3 = 8.94 \times 10^3 \text{ kgr/m}^3 = 8.94 \times 10^{12} \text{ kgr/km}^3$

Μάζα χαλκού $M_{cu} = 3(b_H \times L_H \times N_h \times HVl_{mean} \times \text{ειδ.}\beta. + L_{\phi X} \times b_{\phi X} \times N_I \times LVl_{mean} \times \text{ειδ.}\beta.) = 3(1,483/1000 \times 2/1000 \times 10520 \times 14082,46/1000 \times 8.94 \times 10^3 + 48/1000 \times 0,79/1000 \times 455 \times 1147,67 \times 8,94 \times 10^3) = 3(0,001483 \times 0,002 \times 10520 \times 14,08246 \times 8,94 \times 10^3 + 0,048 \times 0,00079 \times 455 \times 1147,67 \times 8,94 \times 10^3) = 3(4912,59 + 785,5) = 542,86 \text{ kgr}$

Βάρος σιδήρου : $M_{Fe} = \text{Βάρος σκελών} + \text{Βάρος ζυγωμάτων} = 84,15 + 114,75 = 198,9 \text{ kgr}$

ΥΛΙΚΟ	EURO/Kgr
ΧΑΛΚΟΣ	2,64
ΣΙΔΗΡΟΣ	1,76
	1,47
ΛΑΔΙ	0,67
ΜΟΝΩΤΙΚΑ	3,52

Σταθερά κόστη

□ Κόστος Bucholz , θερμοστάτη αφυγραντήρα : C1=176 €

□ Μονωτήρες YT : C2 = 35.21 €

□ Μονωτήρες XT : C3 = 140.86 €

Υπολογισμός επιφάνειας μονωτικών

Ειδικό βάρος χαρτιού 1.350 kgr/m²

□ Επιφάνεια πρώτου μονωτικού κυλίνδρου

$$E_{M1} = 2\pi L(D_1 + 13 \times 10^{-3}) + 2\pi \left\{ \left(\frac{D_1}{2} \frac{D_1}{2} + 8 \times 10^{-3} \right)^2 - \left(\frac{D_1}{2} \frac{D_1}{2} + 5 \times 10^{-3} \right)^2 \right\} = 2 \times 3,14 \times 0,337 \times (0,1 + 13 \times 10^{-3}) + 2 \times 3,14 \left\{ \left(\frac{0,1}{2} + 8 \times 10^{-3} \right)^2 - \left(\frac{0,1}{2} + 5 \times 10^{-3} \right)^2 \right\} = 2,23 + 2 \times 3,14 (0,00336 - 0,00302) = 2,23 \text{ m}^2$$

□ Επιφάνεια δεύτερου μονωτικού κυλίνδρου

$$E_{M2} = 2\pi L(dLVext + 13 \times 10^{-3}) + 2\pi \left\{ \left(\frac{dLVext}{2} \frac{dLVext}{2} + 8 \times 10^{-3} \right)^2 - \left(\frac{dLVext}{2} \frac{dLVext}{2} + 13 \times 10^{-3} \right)^2 \right\} = 2 \times 3,14 \times 0,337 (234,6 + 13 \times 10^{-3}) + 2 \times 3,14 \left\{ \left(\frac{234,6}{2} \frac{234,6}{2} + 8 \times 10^{-3} \right)^2 - \left(\frac{234,6}{2} \frac{234,6}{2} + 13 \times 10^{-3} \right)^2 \right\} = 483,6 \text{ m}^2$$

□ Επιφάνεια τρίτου μονωτικού κυλίνδρου

$$E_{M3} = 2\pi L(dLV_{ext} + 29 \times 10^{-3}) + 2\pi \left\{ \left(\frac{dLV_{ext}}{2} \frac{dLV_{ext}}{2} + 16 \times 10^{-3} \right)^2 - \left(\frac{dLV_{ext}}{2} \frac{dLV_{ext}}{2} + 13 \times 10^{-3} \right)^2 \right\} = 2 \times 3,14 \times 0,337 (234,6 + 29 \times 10^{-3}) + 2 \times 3,14 \left\{ \left(\frac{234,6}{2} \frac{234,6}{2} + 16 \times 10^{-3} \right)^2 - \left(\frac{234,6}{2} \frac{234,6}{2} + 13 \times 10^{-3} \right)^2 \right\} = 500,98 \text{ m}^2$$

□ Επιφάνεια τέταρτου μονωτικού κυλίνδρου

$$E_{M4} = 2\pi L(dHV_{ext} + 3 \times 10^{-3}) + 2\pi \left\{ \left(\frac{dHV_{ext}}{2} \frac{dHV_{ext}}{2} + 3 \times 10^{-3} \right)^2 - \left(\frac{dHV_{ext}}{2} \frac{dHV_{ext}}{2} \right)^2 \right\} = 2 \times 3,14 \times 0,337 (488,2 + 3 \times 10^{-3}) + 2 \times 3,14 \left\{ \left(\frac{488,2}{2} \frac{488,2}{2} + 3 \times 10^{-3} \right)^2 - \left(\frac{488,2}{2} \frac{488,2}{2} \right)^2 \right\} = 1042,4 \text{ m}^2$$

$$E_m = 3(E_{M1} + E_{M2} + E_{M3} + E_{M4}) = 3(2,23 + 483,6 + 500,98 + 1042,4) = 6087,6 \text{ m}^2$$

Υπολογισμός κόστους υλικών

Κόστος σιδήρου : Κ.Σ = Τιμή/κιλό x Μάζα σιδήρου = 1,76€ x 198,9 = 350,064€

Κόστος χαλκού : Κ.Χ = Τιμή/κιλό x Μάζα χαλκού = 2,64 x 17094,27 = 45128,87€

Κόστος κελύφου : Κ.Κ = επιφάνεια ψύξης x 10kg x 4,69€/kg = 52,42 x 10 x 4,69 = 2458,49€

Κόστος μονωτικών : Τιμή(€)/kg x 1,35 x E_m = 3,52 x 1,35 x 32,69 = 155,34 €

Συνολικό κόστος : Κ.Σ. + Κ.Χ. + Κ.Λ. + Κ.Κ. + Κ.Μ. + C1 + C2 + C3 = 350,064 + 45128,87 + 2458,49 + 155,34 + 176 + 35,21 + 140,86 = 48.445 €

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία επιχειρήθηκε να αναπτυχθεί ένας τυπικός τρόπος σχεδίασης ενός Μετασχηματιστή ισχύος τύπου πυρήνα. Η κατασκευή θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από δυο βασικές παραμέτρους: α) την καλή λειτουργία του μετασχηματιστή αλλά και β) το χαμηλό της κόστος. Καθορίστηκαν σε πρώτη φάση όλοι οι επιμέρους παράγοντες οι οποίοι αφορούν τη σχεδίαση του μετασχηματιστή, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκαν και οι απαραίτητοι υπολογισμοί οι οποίοι σχετίζονταν με τους παραπάνω παράγοντες. Οι παράγοντες σχεδίασης, αναλύθηκαν ως προς: τον καθορισμό των προδιαγραφών – στοιχείων του Μετασχηματιστή, τη σχεδίαση του μαγνητικού κυκλώματος, τη σχεδίαση του τυλίγματος Χαμηλής Τάσης, τη σχεδίαση του τυλίγματος Υψηλής Τάσης, τον υπολογισμό της απόδοσης Μετασχηματιστή, την σχεδίαση κελύφους Μετασχηματιστή, την μελέτη ψύξης Μετασχηματιστή και τον υπολογισμό του κόστους κατασκευής Μετασχηματιστή.

Οι μετρήσεις έδειξαν πως ο πυρήνας έχει σχεδιαστεί ικανοποιητικά. Ο βαθμός απόδοσης Μετασχηματιστή βρέθηκε περίπου 94 %, γεγονός που δείχνει ότι έχουμε μια αρκετά αποδοτική ηλεκτρική συσκευή. Είναι αποδεκτό ότι ο μετασχηματιστής συνιστά μια από τις αποδοτικότερες μηχανές με κάποιους μάλιστα να φτάνουν σε απόδοση έως και 99% (Flanagan, 1993). Εντούτοις, όσον αφορά την αντίσταση του πρωτεύοντος, η τιμή της είναι μεγάλη και αυτό φαίνεται και στις απώλειες χαλκού που είναι επίσης αρκετά μεγάλες. Για να επιλύσουμε το συγκεκριμένο πρόβλημα, μπορούμε να αυξήσουμε την διατομή του τυλίγματος πρωτεύοντος. Με αυτόν τον τρόπο, θα καταφέρουμε να μειωθεί η αντίσταση του.

Επιπρόσθετα, οι αρκετά μεγάλες απώλειες που προκύπτουν, οδηγούν στην αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από 50C. Αν με την αύξηση της διατομής και την μείωση των απωλειών χαλκού δεν διορθωθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, τότε θα πρέπει να πραγματοποιηθεί και αύξηση των διαστάσεων του κελύφους. Μεγαλύτερες διαστάσεις, συνεπάγεται μεγαλύτερη επιφάνεια κελύφους. Η μεγαλύτερη επιφάνεια η οποία θα δημιουργηθεί θα οδηγήσει στην απαγωγή θερμότητας.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

Αντωνόπουλος, Σ. (1995). *Μετασχηματιστές*. Αθήνα: Ίων

Αντωνόπουλος, Σ. (1995). *Λειτουργία σε κενό και με φορτίο, ισχύς, απόδοση, παράλληλη λειτουργία, εφαρμογές, υπολογισμοί, κατασκευή*. Αθήνα: Ίων.

Γιασαφάκης, Κ. (2010). *Νεότερες εξελίξεις στην κατασκευή και λειτουργία μετασχηματιστών διανομής με μειωμένες απώλειες*, ΤΕΙ Ηρακλείου, Κρήτη

Γιαννόπουλος, Γ. (2017). *Μελέτη και κατασκευή μονοφασικού (1Φ) μετασχηματιστή (2kVA)*. (Πτυχιακή εργασία), ΤΕΙ Πειραιά, Αθήνα

Κυρουβίδης, Μ. (2012). *Προσομοίωση Τριφασικού Μετασχηματιστή*. (Πτυχιακή εργασία) ΤΕΙ Καβάλας, Καβάλα.

Μαναζής, Ι. (2002). *Μετασχηματιστές μετρήσεων*. (Πτυχιακή εργασία). ΤΕΙ Καβάλας, Καβάλα.

Παρασκευόπουλος, Γ. & Τηνιακός, Δ. (2013). *«Μετασχηματιστές Μεταφοράς»*. (Πτυχιακή εργασία). ΤΕΙ Πειραιά. Αθήνα.

Ραΐτσιος, Π. (2000). *Μελέτη μετασχηματιστών*. Αθήνα: Τεχνητό Επιμελητήριο Ελλάδας

Σαμοΐλης, Β. (2007). *Μετασχηματιστές*. Αθήνα: Τεχνητό Επιμελητήριο Ελλάδας

Σωτηριάδης, Ν. (2019). *Δοκιμή μετασχηματιστή ισχύος*. (Πτυχιακή εργασία). Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Αθήνα.

Φουρμούζης, Σ. (2018). *Μελέτη μονοφασικού μετασχηματιστή*. (Πτυχιακή εργασία). Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Αθήνα.

Ξένη βιβλιογραφία

Bagheri, M. & Vakilian, M. & Hekmati, Arsalan & Heidarzadeh, Rouhollah. (2007). Influence of Electrostatic Shielding of Disc Winding on Increasing the Series Capacitance in Transformer. 1780 - 1784. 10.1109/PCT.2007.4538586.

Flanagan, W. M. (1993). Handbook of Transformer Design and Applications. *McGraw-Hill Professional, 1*, 1–2. ISBN 0070212910.

Heathcote, M. (2011). *J & P Transformer Book* (12th ed.). Elsevier.

Kareem, P. (2019). TRANSFORMER: Working principle of transformer. Ανακτήθηκε στις 15/2/21 από https://www.researchgate.net/publication/332874982_TRANSFORMER_Working_principle_of_transformer

Kriezis, E.E. & Tsiboukis, Theodoros & Panas, Stavros & Tegopoulos, John. (1992). Eddy Currents: Theory and Applications. Proceedings of the IEEE. 80. 1559 - 1589. 10.1109/5.168666.

Lituma, S. (2002). Power Transformers Principles and Applications. Ανακτήθηκε στις 20/2/21 από https://www.academia.edu/21899532/Power_Transformers_Principles_and_Applications

Nailen, R. (May 2005). Why We Must Be Concerned With Transformers. Electrical Apparatus.

Sourav, G. (May 14, 2019). *Different Types of Transformers and Their Applications*. Ανακτήθηκε στις 10/3 από <https://circuitdigest.com/tutorial/different-types-of-transformers-and-their-applications>

Tcheslavski, G.V. (2008). *Transformers*. Ανακτήθηκε στις 10/3 από <http://doctord.dyndns.org/courses/Textbooks/Chapman/Lecture%204%20-%20Transformers.pdf>

Toledo, Marco & Alvarez, C. & Morales, Diego. (2018). *Determination of energy losses in distribution transformers using a compensation algorithm in energy meters*. I.S.B.N: 978-84-17293-57-4.

Winders, J.J. (2002). *Power Transformers Principles and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.