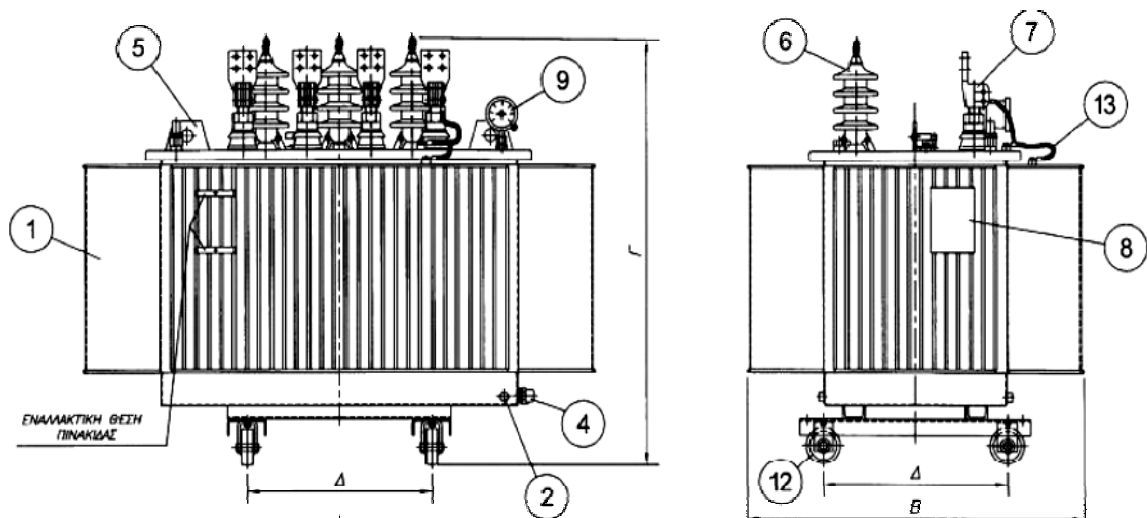




**ΝΕΟΤΕΡΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ
ΜΕ ΜΕΙΩΜΕΝΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ**



ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: Ρουμπελάκης Γεώργιος

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: Γιασαφάκης Κωστής

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι κατ' αρχήν η παρουσίαση των νεότερων εξελίξεων, των καινοτόμων τεχνολογιών αλλά και της σημερινής και της μέλλουσας κατάστασης στην κατασκευή των μετασχηματιστών διανομής (*distribution transformers*), αλλά και η ανάδειξη σημαντικών πτυχών πάνω στο θέμα των απωλειών τους. Γίνεται επίσης αναφορά για την υφιστάμενη κατάσταση και πραγματικότητα των δικτύων Η.Ε. ως προς τους μετασχηματιστές διανομής σε Ευρωπαϊκή Ένωση και Ελλάδα.

Στην εργασία δεν γίνεται αναφορά στη θεωρία των μαγνητικών πεδίων (μαγνητικά κυκλώματα, μαγνητική συμπεριφορά υλικών, κτλ.) διότι θεωρείται βασική προαπαιτούμενη γνώση για την ανάγνωση της. Τέλος, δε χρησιμοποιήθηκαν, σκόπιμα, μαθηματικές σχέσεις (μόνο σε αναπόφευκτες περιπτώσεις), αφού **α)** οι επεξηγήσεις των τεχνικών εννοιών γίνονται –όπου χρειάζεται– αναφορικά, **β)** υπάρχει σεβαστού μεγέθους βιβλιογραφία στην οποία μπορεί να ανατρέξει ο αναγνώστης για να τις επικαλεστεί, **γ)** δεν κρίθηκε απαραίτητο για την εν λόγω εργασία να παρατεθούν οι μαθηματικές αποδείξεις των ως τώρα γνωστών σχέσεων που διέπουν τους μετασχηματιστές.

Copyright © Γιασαφάκης Δ. Κωνσταντίνος, 2010. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	5
1.2 Μετασχηματιστές.....	6
1.3 Χαρακτηριστικά των Μ/Σ διανομής.....	8
1.3.1 Απώλειες μετασχηματιστών.....	10
1.3.2 Απόδοση μετασχηματιστών.....	12
1.4 Ιδιωτικοί και δημόσιοι Μ/Σ διανομής.....	13
1.5 Ευρωπαϊκά πρότυπα για Μ/Σ διανομής ισχύος έως 2500 kVA.....	16
1.5.1 Το πρότυπο HD 428.1 S1.....	16
1.5.2 Το πρότυπο EN 50464-1.....	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Θεμελιώδης αρχή λειτουργίας των Μ/Σ διανομής.....	23
2.2 Πυρήνας και τυλίγματα μετασχηματιστή.....	24
2.3 Οι απώλειες στους μετασχηματιστές.....	27
2.3.1 Απώλειες κενού φορτίου.....	27
2.3.2 Απώλειες φορτίου.....	33
2.3.3 Επιπρόσθετες απώλειες λόγω αρμονικών.....	36
2.4 Θόρυβος στους Μ/Σ διανομής.....	39
2.5 Ψύξη των Μετασχηματιστών διανομής.....	41
2.5.1 Ψυκτικά υγρά.....	44
2.6 Θερμική γήρανση των μετασχηματιστών.....	45
2.6.1 Πρόληψη με θερμογραφία υπερύθρων.....	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Περιβαλλοντικά θέματα και Σ.Η.Ε.....	51
3.1.1 Κλιματική αλλαγή.....	52
3.1.2 Το Πρωτόκολλο του Κιότο.....	53
3.2 Η εξοικονόμηση ενέργειας στην Ε.Ε.....	55
3.3 Θέματα οικονομίας/κόστους στους Μ/Σ διανομής.....	57
3.3.1 Τεχνοοικονομική ανάλυση της μείωσης των απωλειών.....	58
3.4 Δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στους Μ/Σ διανομής.....	60
3.4.1 Απώλειες του ηλεκτρικού δικτύου.....	60
3.4.2 Απώλειες των Μ/Σ Διανομής.....	63
3.4.3 Δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας από τους Μ/Σ διανομής στην Ελλάδα.....	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Η κατάσταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	67
4.2 Απώλειες και απόδοση Μ/Σ διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	71
4.3 Η Ελληνική πραγματικότητα.....	77
4.3.1 Οι Μ/Σ διανομής ελαίου της Schneider Electric-ΕΛΒΗΜ.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Θέματα σχεδίασης μετασχηματιστών.....	89
5.2 Πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου.....	91
5.3 Βελτίωση απόδοσης με εφαρμογή τεχνητής νοημοσύνης.....	95
5.4 Τυλίγματα των πηνίων των Μ/Σ διανομής.....	96
5.5 Σιδηρομαγνητικά υλικά μετασχηματιστών.....	101
5.6 Μ/Σ διανομής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο (AMDT's).....	104
5.6.1 Ο άμορφος σίδηρος.....	104
5.6.2 Κατασκευαστές.....	105
5.6.3 Τρόπος κατασκευής.....	107
5.6.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	109
5.6.5 Κόστος.....	112
5.7 Μετασχηματιστές εξαγωγικού πυρήνα.....	115
5.8 Υπεραγωγίμα υλικά και μετασχηματιστές.....	116
5.8.1 Υλικά και υπεραγωγιμότητα.....	116
5.8.2 Κατασκευή υπεραγωγίμων μετασχηματιστών.....	118
5.8.3 Εφαρμογή στους μετασχηματιστές.....	119
Βιβλιογραφία.....	123

Εισαγωγή

Οι μετασχηματιστές συνιστούν μια τεχνολογία η οποία έχει βρει πολλαπλές και ποικίλες εφαρμογές στα ΣΗΕ εδώ και πολλές δεκαετίες. Σήμερα, η διαδικασία απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ιδιωτικοποίησης των ηλεκτρικών εταιρειών έχει δημιουργήσει ένα νέο, ανταγωνιστικό περιβάλλον στην παγκόσμια αγορά ενέργειας με συνέπεια, οι απώλειες των μετασχηματιστών να λαμβάνονται πλέον υπόψη διότι σημαντικά ποσά ενέργειας χάνονται. Ταυτόχρονα, η κλιματική αλλαγή, ως αποτέλεσμα της αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου (τα οποία αυξάνονται με τη ενεργειακή σπατάλη), απειλεί την ευστάθεια του παγκόσμιου κλίματος, της οικονομίας και των κοινωνιών.

Η χρήση μετασχηματιστών χαμηλών απωλειών βοηθάει στη προστασία του περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα οι μετασχηματιστές αυτού του τύπου μπορεί να είναι και οικονομικά αποδοτικότεροι, αν ποσοτικοποιηθεί το περιβαλλοντικό κόστος των απωλειών τους. Σ' αυτό το νέο και ενδιαφέρον περιβάλλον εμφανίζεται στη βιομηχανία παραγωγής μετασχηματιστών η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης και αξιοπιστίας των μετασχηματιστών τους και μείωσης του κόστους τους.

Με βάση τα παραπάνω, το θέμα της βέλτιστης σχεδίασης των μετασχηματιστών, καθώς και τις οικονομικές τους αξιολόγησης έχουν γίνει αντικείμενα συνεχούς μελέτης και απασχολούν πολλούς ερευνητές σε ελληνική και ξένη βιβλιογραφία.

Στις τελευταίες δεκαετίες υπήρξαν ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία των μετασχηματιστών. Αυτές αφορούν κυρίως στο υλικό του πυρήνα με τη βελτίωση της ποιότητας των μαγνητικών ελασμάτων ψυχρής εξέλασης περιεκτικότητας πυριτίου αλλά και τη χρήση, τις τελευταίες δύο δεκαετίες, του άμορφου σιδήρου. Η πρόοδος της τεχνολογίας ως προς την κατασκευή σιδηρομαγνητικών υλικών αλλά και ως προς τον τρόπο παραγωγής άμορφων υλικών, βελτίωσαν σημαντικά τους μετασχηματιστές. Η βελτίωση αυτή είχε ως αποτέλεσμα την αισθητή μείωση των απωλειών κενής λειτουργίας, αλλά και τη σημαντική μείωση των διαστάσεων του μετασχηματιστή. Επίσης, έχουν προταθεί νέοι τρόποι για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, και οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης βρίσκουν πλέον εφαρμογή στην σχεδίαση και την κατασκευή των μετασχηματιστών με πολύ καλά αποτελέσματα. Τέλος, τα υπεραγωγικά υλικά έχουν βρει εφαρμογή και στους μετασχηματιστές και έτσι αναμένεται τα επόμενα χρόνια να οδηγηθούμε σε περεταίρω μείωση των απωλειών και σε άλλα σημαντικά οφέλη.

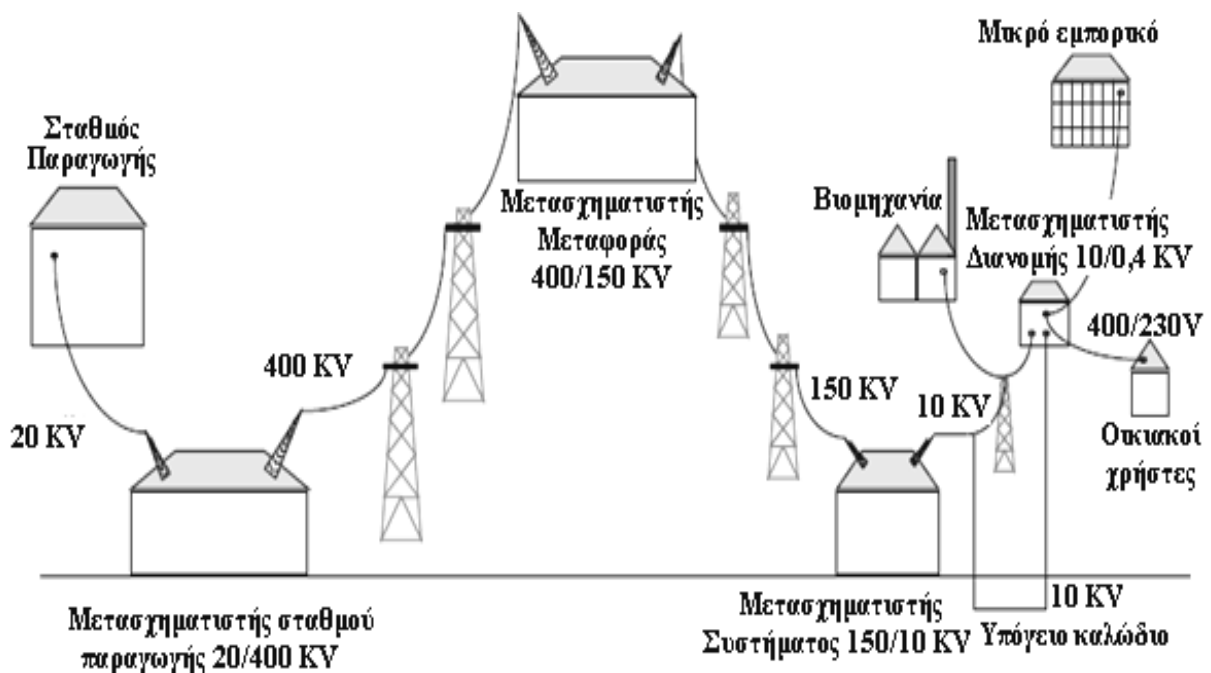


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Μετασχηματιστές Διανομής

1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης. Διακρίνονται σε τρία τμήματα: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στους σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι μετατρέπουν υπάρχουσες στη φύση μορφές ενέργειας, όπως για παράδειγμα τη θερμική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων ή τη μηχανική ενέργεια των υδατοπτώσεων, σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια μεταφέρεται προς τις περιοχές κατανάλωσης με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες καταλήγουν στα κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς του συστήματος. Ακολούθως η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται με τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης.



Σχήμα 1.1: Δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται, ανάλογα με την τάση, σε δίκτυα υψηλής τάσης (400-150 kV), δίκτυα μέσης τάσης¹ (150-10 kV) και δίκτυα χαμηλής τάσης (10-0,4 kV). Οι μεγάλοι βιομηχανικοί πελάτες, όπως για παράδειγμα η βιομηχανία του χάλυβα, τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια στα 110-150 kV. Μικρότεροι βιομηχανικοί πελάτες, μεγάλες επιχειρήσεις, νοσοκομεία, δημόσια κτήρια κτλ. τροφοδοτούνται με μέση τάση, δηλαδή 10–20 kV. Τέλος, στους οικιακούς και μικρούς εμπορικούς πελάτες η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στα 400/230 V.

Ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαμόρφωση τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Τα πλεονεκτήματα των εναερίων δικτύων είναι το γεγονός ότι είναι λιγότερο δαπανηρά και ότι η αποκατάσταση των βλαβών σε αυτά είναι ταχύτερη. Τα υπόγεια δίκτυα προτιμώνται στις πόλεις για αισθητικούς λόγους και λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου. Οι υποσταθμοί υποβιβασμού της μέσης σε χαμηλή τάση εγκαθίστανται συνήθως στα υπόγεια πολυκατοικιών ή κάτω από τα πεζοδρόμια ή τις πλατείες, ενώ οι υποσταθμοί των εναερίων δικτύων τοποθετούνται πάνω σε στύλους κι έχουν ονομαστική ισχύ συνήθως μεταξύ 25 και 250 kVA.

1.2 Μετασχηματιστές

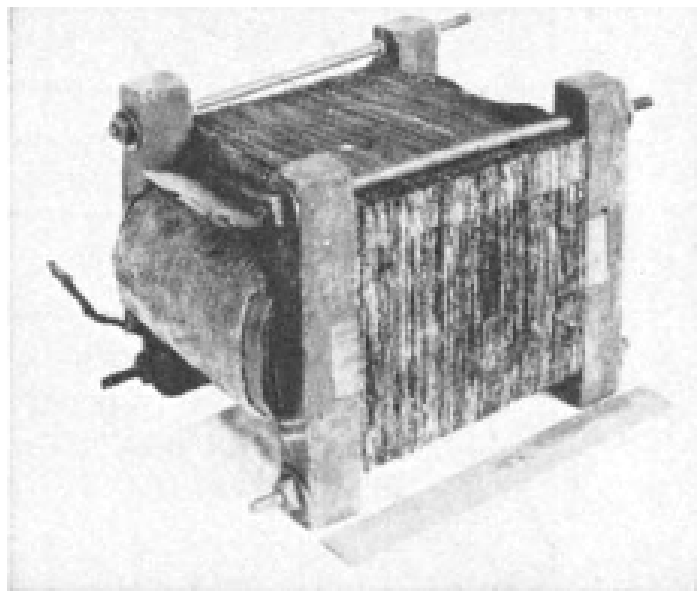
Οι απώλειες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από το επίπεδο της τάσης και ελαχιστοποιούνται με τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλή τάση. Οι μετασχηματιστές (Μ/Σ) αποτελούν ένα από τα κύρια δομικά στοιχεία κάθε ηλεκτρικού δικτύου και ο ρόλος τους είναι η αλλαγή του επιπέδου της τάσεως σε διάφορα στάδια του δικτύου. Εξάλλου η ευκολία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα επίπεδο τάσεως σε ένα άλλο χωρίς σημαντικές απώλειες, μέσω των μετασχηματιστών, αποτελεί μία από τις βασικότερες αιτίες επικράτησης του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ο ρόλος αυτός του μετασχηματιστή εξυπηρετεί σημαντικά τη μεταφορά και τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, μετά την παραγωγή της σε μεγάλους ηλεκτρικούς σταθμούς, η ενέργεια πρέπει να μεταφερθεί προς τα καταναλωτικά κέντρα. Αυτή η μεταφορά είναι πιο αποδοτική (μείωση απωλειών

¹ Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας είναι τυποποιημένη για την Ελλάδα και την Ευρώπη και γίνεται με εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα 50 Hz και τάση 220/380 V. Οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν μόνο τρεις αγωγούς και λειτουργούν με τάση 20 kV πολική, αν και υπάρχουν ακόμα γραμμές 22, 11, 15 και 6,6 kV. Οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, εκτός των τριών αγωγών φάσεων περιλαμβάνουν και αγωγό ουδέτερου. (Οι αναφερόμενες τάσεις είναι οι πολικές του τριφασικού συστήματος)

Joule) σε υψηλή ή υπερυψηλή τάση και για τον λόγο αυτό η ενέργεια, η οποία παράγεται στα 10-20 kV, μετατρέπεται από μετασχηματιστές σε τάσεις από 270 kV έως και 400 kV. Εφόσον η πλειοψηφία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων λειτουργεί σε χαμηλότερες τάσεις, η υψηλή τάση οφείλει να υποβιβαστεί πλησιέστερα στο επίπεδο χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρώτο βήμα είναι ο μετασχηματισμός της στα 20-150 kV. Αυτό είναι συνήθως το στάδιο στο οποίο οι εταιρείες παραγωγής ενέργειας πουλούν την ενέργεια στις τοπικές εταιρείες διανομής, στις χώρες όπου αυτές υπάρχουν. Επίσης, σε αυτό το επίπεδο τάσεως η ενέργεια θα προμηθευτεί στους μεγάλους βιομηχανικούς πελάτες. Οι εταιρείες διανομής εν συνεχεία υποβιβάζουν ακόμη περισσότερο την τάση, έως το κύριο επίπεδο τάσεως που χρειάζονται οι καταναλωτές.

Η διανομή είναι συνήθως μια λειτουργία διαφορετική από την παραγωγή και την μεταφορά, η οποία σχεδιάζεται και αναπτύσσεται χωριστά και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής και των καταναλωτών τους οποίους εξυπηρετεί. Κατά συνέπεια, ένας μεγάλος αριθμός μετασχηματιστών διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών και διαφορετικού μεγέθους απαιτούνται στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής, με μεγάλη ποικιλία στα επίπεδα των τάσεων. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές που είναι κατάλληλοι για τις υψηλές τάσεις ονομάζονται μετασχηματιστές συστήματος, (system transformers), ενώ η τελική μετατροπή στη βασική τάση των καταναλωτών γίνεται διαμέσου των μετασχηματιστών διανομής (distribution transformers).



Σχήμα 1.2: Ο πρώτος Μ/Σ διανομής του William Stanley² το 1885

² Ένας φυσικός της Ουέστινγκχαους, ο Ουίλιαμ Στάνλεϋ, δημιούργησε την πρώτη εμπορική υλοποίηση μετασχηματιστή το 1885, μετά την αγορά από τον Τζορτζ Ουέστινγκχαους των πατεντών

1.3 Χαρακτηριστικά των Μ/Σ διανομής

Οι μικρότεροι μετασχηματιστές σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στους υποσταθμούς διανομής και τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τους καταναλωτές, περιγράφονται όπως αναφέρθηκε, ως μετασχηματιστές διανομής. Ένας μετασχηματιστής διανομής – όπως κάθε τριφασικός μετασχηματιστής ισχύος - αποτελείται από έναν σιδερένιο πυρήνα με ένα μέλος για κάθε φάση. Γύρω από κάθε μέλος υπάρχουν δύο τυλίγματα: ένα με μεγάλο αριθμό στροφών συνδεδεμένο στην υψηλότερη τάση, και ένα με μικρότερο αριθμό στροφών συνδεδεμένο στη χαμηλή τάση. Τα τυλίγματα χωρίζονται με μονωτικό υλικό. Μια εναλλασσόμενη τάση που εφαρμόζεται στο ένα τύλιγμα, προκαλεί μια τάση ίδιας συχνότητας και στους ακροδέκτες του άλλου τυλίγματος, με αναλογία τάσης ίση με την αναλογία του αριθμού των σπειρωμάτων.

Παρακάτω γίνεται αναφορά των βασικών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός μετασχηματιστή διανομής :

Ονομαστική ισχύς : Σαν ονομαστική ισχύ ενός μετασχηματιστή ορίζεται το γινόμενο της ονομαστικής τάσης επί την ονομαστική ένταση επί το συντελεστή φάσεων. Για έναν τριφασικό μετασχηματιστή ο συντελεστής φάσεων είναι $\sqrt{3}$ και επομένως $P_n = U_n I_n \sqrt{3}$, όπου P_n η ονομαστική ισχύς, U_n η ονομαστική τάση και I_n το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή. Ως μονάδα μέτρησης της ονομαστικής ισχύος χρησιμοποιείται το VA.

Ανύψωση θερμοκρασίας : Ως ανύψωση θερμοκρασίας ορίζεται η μέγιστη ανύψωση θερμοκρασίας, όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί με την ονομαστική τάση πρωτεύοντος, ονομαστική ένταση δευτερεύοντος και ονομαστική συχνότητα. Η μέγιστη ανύψωση θερμοκρασίας τυλίγματος είναι ίση με 65 K, ενώ η μέγιστη ανύψωση θερμοκρασίας πάνω στρώματος λαδιού είναι ίση με 60 K.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος : Η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή υπολογίζεται για μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος 40° C, μέση ημερήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 30° C και μέση ετήσια θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 20° C. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος η ισχύς

των Γκολάρ και Γκιμπς (κυρίως τη συσκευή με ανοιχτό πυρήνα σιδήρου που αποκαλούσαν "δευτερεύουσα γεννήτρια", ιδέα που είχαν παρουσιάσει πρώτοι το 1882 στο Λονδίνο). 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" (transformer). Ο Ρώσος μηχανικός Μικαΐλ Ντόλιβο-Ντομπροβόλσκι ανέπτυξε τον πρώτο τριφασικό μετασχηματιστή το 1889.

του μετασχηματιστή μειώνεται κατά 15% περίπου ανά 10 °C ανύψωσης της θερμοκρασίας του αέρα του περιβάλλοντος.

Υψόμετρο εγκατάστασης : Η τιμή της ονομαστικής ισχύος του μετασχηματιστή ισχύει για υψόμετρο εγκατάστασης μέχρι 1000m. Για υψόμετρα μεγαλύτερα των 1000m η ισχύς μειώνεται κατά 3% ανά km.

Τάση βραχυκύκλωσης : Ως τάση βραχυκύκλωσης ορίζεται το ποσοστό εκείνο της ονομαστικής τάσης που πρέπει να επιβληθεί στο πρωτεύον του μετασχηματιστή όταν το δευτερεύον είναι βραχυκυκλωμένο, έτσι ώστε να διέρχεται το ονομαστικό ρεύμα από το πρωτεύον. Η τάση βραχυκύκλωσης είναι πολύ σημαντική, αφού αντιπροσωπεύει τη σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή³. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση βραχυκύκλωσης, τόσο μεγαλύτερη είναι η πτώση τάσης που δημιουργείται. Όσο μικρότερη η τάση βραχυκύκλωσης, τόσο μεγαλύτερο το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Με βάση την τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης καθορίζεται η πτώση τάσης λόγω φόρτισης του μετασχηματιστή, η κατανομή των φορτίων κατά τον παραλληλισμό των μετασχηματιστών και το ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

Ονομαστική τάση : Ονομαστική τάση εισόδου (πρωτεύοντος) είναι η τάση για την οποία έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί ο μετασχηματιστής, και καθορίζει τη βασική στάθμη μόνωσής του (BIL), όπως αυτή ορίζεται από τις διεθνείς προδιαγραφές (IEC 76). Αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του μετασχηματιστή διότι δείχνει την ικανότητά του να αντέχει τις υπερτάσεις που εμφανίζονται στο δίκτυο. **Ονομαστική τάση εξόδου (δευτερεύοντος)** είναι η τάση στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος χωρίς φορτίο και υπό ονομαστική τάση εισόδου και ονομαστική συχνότητα.

Ομάδα ζεύξης : Η ομάδα ζεύξης καθορίζει τη ζεύξη δύο τυλιγμάτων του μετασχηματιστή καθώς και τη θέση των φάσεων μεταξύ τους. Τα τρία πηνία πρωτεύοντος ή δευτερεύοντος μπορούν να συνδεθούν με διαφορετικούς τρόπους για να δώσουν έναν τριφασικό μετασχηματιστή. Οι συνδέσεις αυτές είναι : D – σύνδεση σε τρίγωνο, Y – σύνδεση σε αστέρα, Z – σύνδεση σε ζιγκ – ζαγκ, N – που σημαίνει ότι υπάρχει ουδέτερος στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον, για σύνδεση εκτός μετασχηματιστή. Η ζεύξη καθορίζει επίσης και τη διαφορά φάσης που υπάρχει μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος.

Συχνότητα : Η συχνότητα λειτουργίας των μετασχηματιστών είναι 50 Hz ή 60 Hz ανάλογα με τη συχνότητα του δικτύου. Παρατηρείται ότι, στην περίπτωση που η

³ Στο παρελθόν, θεωρείτο ατέλεια προερχόμενη από την αναπόφευκτη διαρροή. Σήμερα, αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για τον σχεδιαστή, έτσι ώστε να καθορίσει τα επίπεδα σφάλματος του συστήματος, και να επιτύχει το οικονομικότερο αποτέλεσμα για το συνδεδεμένο φορτίο.

μέγιστη μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή, το πλάτος της τάσης είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας της⁴.

Ρεύμα κενής λειτουργίας : Το ρεύμα κενής λειτουργίας αντιπροσωπεύει την τιμή του ρεύματος που απορροφά ο μετασχηματιστής όταν στο πρωτεύον εφαρμόζεται η ονομαστική τάση και στο δευτερεύον δεν υπάρχει φορτίο. Το ρεύμα κενής λειτουργίας εκφράζεται σαν ποσοστό της μέσης τιμής του ονομαστικού ρεύματος των τριών φάσεων.

Ρεύμα βραχυκύκλωσης : Το ρεύμα βραχυκύκλωσης διακρίνεται στην ένταση ασύμμετρου κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης και στην ένταση συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης. Η πρώτη τιμή κορυφής της έντασης του ασύμμετρου κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι ίση προς $\kappa\sqrt{2}$ φορές την ένταση του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης. Ο συντελεστής κ εξαρτάται από τη σχέση της επαγωγικής πτώσης τάσης U_x/U_T , όπου U_x είναι η πτώση τάσης σε άεργα στοιχεία (επαγωγικές αντιστάσεις) και U_T είναι η πτώση τάσης σε ενεργά στοιχεία (ωμικές αντιστάσεις). Η ένταση του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης εκφράζεται συναρτήσει της ονομαστικής έντασης. Με βραχυκυκλωμένη την έξοδο (δευτερεύον) και την ονομαστική ένταση στην είσοδο (πρωτεύον) ισχύει:

$$\frac{I_K}{I_n} = \frac{100}{U_K}$$
 Το ασύμμετρο κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης καταπονεί μηχανικά το μετασχηματιστή, ενώ το συμμετρικό θερμικά.

1.3.1 Απώλειες μετασχηματιστών

Οι απώλειες των μετασχηματιστών μπορούν να αναλυθούν σε δύο συνιστώσες, στις απώλειες κενού φορτίου και στις απώλειες φορτίου.

Οι απώλειες κενού φορτίου ή *απώλειες πυρήνα (no-load losses)* προκύπτουν από την ενέργεια η οποία απαιτείται προκειμένου να διατηρηθεί η διαρκώς μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή στον πυρήνα. Οι απώλειες κενού φορτίου *προκαλούνται από την υστέρηση και τα δινορεύματα στον πυρήνα*. Οι απώλειες αυτές υφίστανται

⁴ Αν για παράδειγμα, κάποιος μετασχηματιστής με ονομαστική συχνότητα 60 Hz λειτουργεί στα 50 Hz η τάση εισόδου θα πρέπει να είναι κι αυτή μειωμένη κατά το ένα έκτο της. Αν δε συμβαίνει αυτό η μέγιστη μαγνητική ροή θα είναι απαράδεκτα υψηλή. Αυτή η επιβαλλόμενη μείωση στην τάση εισόδου ονομάζεται υποβιβασμός (derating) της τάσης. Αντίστοιχα, όταν ένας μετασχηματιστής των 50 Hz λειτουργεί στα 60 Hz, είναι δυνατή η αύξηση του πλάτους της τάσης κατά 20%, αν φυσικά κάτι τέτοιο δεν υπερβαίνει τα όρια ασφαλείας της μόνωσής του.

οποτεδήποτε ο μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένος και είναι σταθερές, και ανεξάρτητες από το φορτίο του μετασχηματιστή.

Οι απώλειες φορτίου ή *απώλειες χαλκού (load losses)* είναι κυρίως απώλειες Joule στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες του τετραγώνου του φορτίου. Οι απώλειες φορτίου *εκλύονται υπό μορφή θερμότητας στο αγωγίμο υλικό, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα*. Αποτελούνται από τις απώλειες θερμότητας που οφείλονται στην αντίσταση των τυλιγμάτων και από τις απώλειες που προκαλούνται από τα δινορεύματα που επάγονται στους αγωγούς (επιδερμικό φαινόμενο) και τα τμήματα της κατασκευής (διαφεύγουσα απώλεια).

Τέλος, στους μετασχηματιστές προκαλούνται απώλειες εξαιτίας της άεργου ισχύος και των αρμονικών. Η άεργος συνιστώσα του ρεύματος παράγει απώλεια ισχύος, παρά το γεγονός ότι δεν συνεισφέρει στην ωφέλιμη ισχύ του φορτίου. Οι απώλειες είναι ανάλογες του $1/(\cos\phi)^2$. Συνεπώς πρέπει να αποφεύγεται ο χαμηλός συντελεστής ισχύος ($\cos\phi$), για να περιορίζονται οι απώλειες λόγω της άεργου ισχύος. Οι απώλειες ισχύος λόγω των δινορευμάτων είναι ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας. Συνεπώς η ύπαρξη αρμονικών μεγαλύτερων της συχνότητας των 50 Hz, οι οποίες οφείλονται στην ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων στο δίκτυο, προκαλεί επιπλέον απώλειες στον πυρήνα και τα τυλίγματα.

Οι απώλειες κενού φορτίου είναι από τις σημαντικότερες λειτουργικές παραμέτρους των μετασχηματιστών δεδομένου ότι ο μετασχηματιστής, είναι διαρκώς ενεργοποιημένος σε αντίθεση με τις απώλειες φορτίου οι οποίες συμβαίνουν μόνο όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί υπό φορτίο. Έτσι ενώ οι απώλειες κενού φορτίου είναι κλάσμα των απωλειών φορτίου στο ονομαστικό φορτίο, η ενέργεια η οποία καταναλώνεται στους πυρήνες των τυπικών μετασχηματιστών διανομής κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι 300% υψηλότερη από την ενέργεια που καταναλώνεται στα τυλίγματά τους. Αν ληφθεί υπ' όψη ότι η διάρκεια ζωής ενός τυπικού μετασχηματιστή διανομής είναι είκοσι με τριάντα χρόνια, το λειτουργικό κόστος των απωλειών ξεπερνάει κατά πολύ το αρχικό κόστος αγοράς του μετασχηματιστή. Συνοπτικά οι επιπτώσεις των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής είναι οι παρακάτω:

- Αύξηση του λειτουργικού κόστους του μετασχηματιστή.
- Εκπομπή αερίων θερμοκηπίου λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων προκειμένου να αντισταθμιστούν οι απώλειες κενού φορτίου των μετασχηματιστών του συστήματος.
- Σπατάλη ορυκτών καυσίμων και πρώτων υλών.

Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα, η μείωση των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής να έχει προσελκύσει τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών, κατασκευαστών μετασχηματιστών αλλά και ηλεκτρικών εταιριών καθώς αναμένεται να προκύψουν πολλά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Η μείωση των απωλειών κενού φορτίου και συνεπακόλουθα η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού και κατασκευαστικού κόστους των μετασχηματιστών μπορεί να επιτευχθεί μέσω μεθόδων πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου κατά τη φάση της σχεδίασης του μετασχηματιστή. Ο ακριβής υπολογισμός των απωλειών κενού φορτίου κατά τη φάση της σχεδίασης είναι πολύ σημαντικός καθώς συμβάλλει στη μείωση των περιθωρίων ασφαλείας για τις απώλειες κενού φορτίου, στην αποφυγή της πληρωμής ρητρών και στη μείωση του χρόνου παράδοσης του μετασχηματιστή.

1.3.2 Απόδοση μετασχηματιστών

Όσον αφορά στην **απόδοση** μπορούμε να πούμε ότι οι μετασχηματιστές διανομής είναι πολύ αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές με συντελεστή απόδοσης που φτάνει μέχρι τα επίπεδα του 97,5% με 99,4%. Η απόδοση ισχύος οποιασδήποτε ηλεκτρικής μηχανής ορίζεται ως ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος εξόδου προς την προσδιδόμενη ισχύ. Η απόδοση μπορεί να καθοριστεί με ταυτόχρονη μέτρηση των ισχύων εξόδου και εισόδου. Ειδικά για μεγάλες μηχανές μια τέτοια μέτρηση είναι δαπανηρή και δύσκολη. Επιπλέον όταν η απόδοση είναι υψηλή, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, εάν εκφραστεί μέσω των απωλειών. Έτσι, η απόδοση των μετασχηματιστών δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\eta = \frac{S \cos \phi}{S \cos \phi + \text{losses}}$$

, όπου S το φορτίο μετασχηματιστή σε VA, losses οι απώλειες

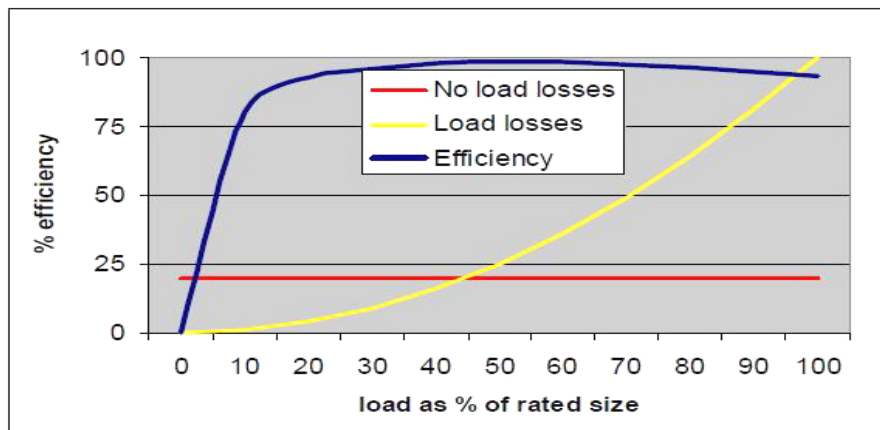
σε W και $\cos \phi$ ο συντελεστής ισχύος. Μείωση των απωλειών του μετασχηματιστή οδηγεί σε αύξηση της απόδοσής του. Οι απώλειες του μετασχηματιστή χωρίζονται σε απώλειες κενού φορτίου και απώλειες φορτίου. Οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές, ενώ οι απώλειες φορτίου είναι ανάλογες του φορτίου του μετασχηματιστή. Από τα παραπάνω προκύπτει η απόδοση του μετασχηματιστή και δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{S \cos \phi}{S \cos \phi + NLL + LL(S/S_B)^2}$$

, όπου NLL οι απώλειες κενού φορτίου, LL οι

απώλειες φορτίου και S_B η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή σε VA.

Η απόδοση λειτουργίας των μετασχηματιστών είναι μικρότερη, όταν δεν λειτουργούν στη μέγιστη απόδοση συνέχεια.



Σχήμα 1.3: Γραφικές παραστάσεις από τις οποίες προκύπτει ο βαθμός απόδοσης

Στο παραπάνω σχήμα 1.3 παρουσιάζονται οι απώλειες φορτίου, οι απώλειες κενού φορτίου και ο συντελεστής απόδοσης συναρτήσει του επιπέδου φόρτισης για έναν μετασχηματιστή. Το σημείο μέγιστης απόδοσης είναι το σημείο στο οποίο οι απώλειες φορτίου είναι ίσες με τις απώλειες κενού φορτίου και συνήθως βρίσκεται μεταξύ των τιμών φόρτισης 40% και 50%. Το μέγεθος ενός μετασχηματιστή επιδρά στις απώλειές του. Γενικά μεγαλύτερες μονάδες έχουν χαμηλότερες ονομαστικές απώλειες, και ιδιαίτερα χαμηλότερες απώλειες φορτίου.

1.4 Ιδιωτικοί και δημόσιοι Μ/Σ διανομής

Μία ταξινόμηση των Μ/Σ διανομής στην Ευρώπη είναι σε *δημόσιους* και *ιδιωτικούς* μετασχηματιστές. Οι ιδιωτικοί είναι υποσταθμοί οι οποίοι παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε ένα καταναλωτή, ο οποίος είναι πελάτης μέσης τάσης κι αυτός αναλαμβάνει τη μετατροπή της σε χαμηλή τάση για την τροφοδοσία των φορτίων του. Η ηλεκτρική εταιρία είναι υπεύθυνη μόνο για τη γραμμή μέσης τάσης που φτάνει στο μετασχηματιστή. Τέτοιοι υποσταθμοί χρησιμοποιούνται για λόγους οικονομίας διότι το τιμολόγιο μέσης τάσης είναι σημαντικά μειωμένο σε σχέση με το τιμολόγιο χαμηλής τάσης. Οι ιδιωτικοί Μ/Σ διανομής χωρίζονται επίσης στους: *εμπορικούς*⁵ και στους *βιομηχανικούς*. Υπάρχουν βασικές διαφορές ανάμεσα στους

⁵ Ο εμπορικός τομέας (commercial) περιλαμβάνει γραφεία, μαγαζιά, δημόσια κτίρια, όπως τα γραφεία του κράτους, νοσοκομεία, και σχολεία. Ένα μέρος από τους μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον τομέα είναι ξηρού τύπου, αφού συνήθως βρίσκονται μέσα σε κτίρια και πρέπει να υπακούν στους εθνικούς κανονισμούς της κάθε χώρας για τη δόμηση.

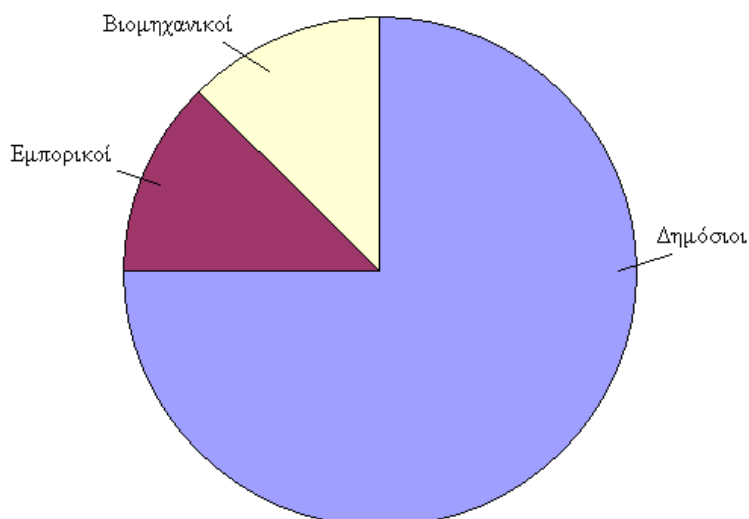
δημόσιους και εμπορικούς Μ/Σ διανομής (οι οποίοι έχουν γενικά όμοια χαρακτηριστικά) και τους Μ/Σ διανομής *ιδιωτικών βιομηχανικών* δικτύων:

- Οι βιομηχανικοί μετασχηματιστές έχουν μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ, η οποία κυμαίνεται συνήθως στα 1000-4000 kVA, ενώ η ισχύς των δημόσιων μετασχηματιστών κυμαίνεται από 15 έως 1000 kVA περίπου.
- Σε γενικές γραμμές, το μέσο φορτίο (φόρτιση) ενός βιομηχανικού Μ/Σ Διανομής είναι υψηλότερο σε σχέση με αυτό ενός μετασχηματιστή δημόσιου δικτύου διανομής (σχήμα 1.5).
- Στην βιομηχανία, οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου συνηθίζονται πολύ περισσότερο σε σχέση με τα δημόσια δίκτυα διανομής.
- Στην βιομηχανία, είναι συχνό φαινόμενο τα υψηλά επίπεδα αρμονικής παραμόρφωσης του φορτίου.
- Η ηλικία των μετασχηματιστών στην βιομηχανία είναι μικρότερη.
- Οι διακυμάνσεις φορτίου είναι μικρότερες στους βιομηχανικούς μετασχηματιστές.

Μια εκτίμηση για τους εγκατεστημένους μετασχηματιστές διανομής στη Δυτική Ευρώπη, ανάλογα με το είδος και την ιδιοκτησία, παρουσιάζεται στον πίνακα 1.1:

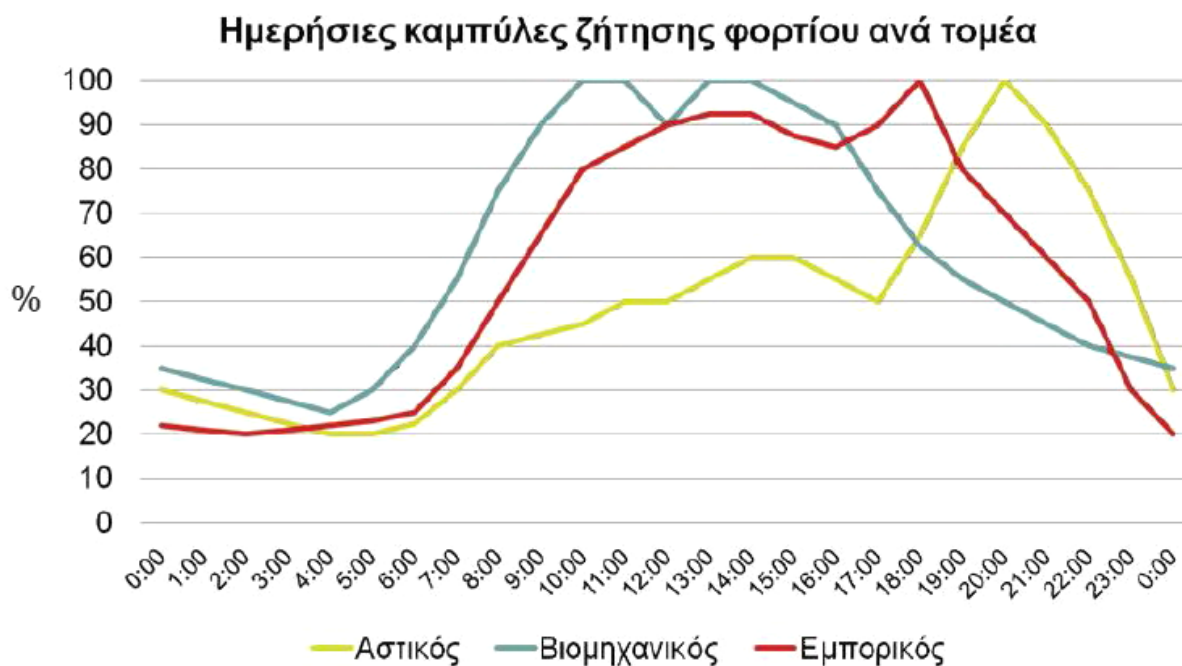
<i>Ιδιοκτήτης</i>	<i>Λαδιού < 250 kVA</i>	<i>Λαδιού > 250 kVA</i>	<i>Ξηρού τύπου</i>	<i>Σύνολο</i>
<i>Δημόσιοι</i>	1.900.000	1.100.000	---	3.000.000
<i>Εμπορικοί</i>	50.000	150.000	300.000	500.000
<i>Βιομηχανικοί</i>	50.000	350.000	100.000	500.000
<i>Σύνολο</i>	2.000.000	1.600.000	400.000	4.000.000

Πίνακας 1.1: Εγκατεστημένοι μετασχηματιστές διανομής στη Δ. Ευρώπη



Σχήμα 1.4: Η πύτα των μετασχηματιστών στη Δ. Ευρώπη, ανάλογα με την ιδιοκτησία

Όπως γίνεται αντιληπτό, από τα παραπάνω στοιχεία, οι μετασχηματιστές διανομής που ανήκουν στις δημόσιες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας αποτελούν τα 3/4 των συνολικά εγκαταστημένων μετασχηματιστών. Επίσης, παρατηρούμε ότι η πλειοψηφία των μετασχηματιστών είναι μετασχηματιστές λαδιού, ενώ οι ξηρού τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως για παροχές σε παλιά κτίσματα, όπου απαιτούνται μετασχηματιστές με λιγότερους κινδύνους για πυρκαγιά, αλλά και σε κτίρια όπου υπάρχει περιορισμός χώρου.



Σχήμα 1.5: Ημερήσιες καμπύλες ζήτησης ανά τομέα (αστικό, βιομηχανικό, εμπορικό)

1.5 Ευρωπαϊκά πρότυπα για Μ/Σ διανομής ισχύος έως 2500 kVA

Τα περισσότερα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών διανομής ορίζονται στα εθνικά και διεθνή πρότυπα. Γενικά, ο σκοπός αυτών των προτύπων είναι να διευκολυνθούν τόσο οι εγχώριες όσο και οι παγκόσμιες αγορές, καθώς επίσης και να βελτιωθεί η ποιότητα των προϊόντων και το περιβάλλον.

Για τους μετασχηματιστές διανομής που αγοράζονται στην ΕΕ, 3 επίπεδα προτύπων είναι εφαρμόσιμα:

- Παγκόσμια πρότυπα (ISO, IEC)
- Ευρωπαϊκά πρότυπα και κανονισμοί (EN, HD)
- Εθνικά πρότυπα (π.χ. NBN, BSI, NF, DIN, NEN, UNC, OTEL)

Το HD (Harmonization Documents) χρησιμοποιείται όπου υπάρχει ανάγκη για ένα Ευρωπαϊκό πρότυπο. Πρόκειται για μια συρραφή διαφορετικών εθνικών κανονισμών πάνω στο αντικείμενο. Το HD εναρμονίζει όσο το δυνατόν περισσότερες εθνικές διαφορές. Όταν ένα έγγραφο HD εκδίδεται, τα συγκρουόμενα εθνικά πρότυπα πρέπει να αποσυρθούν μέσα σε ένα προσδιορισμένο χρονικό διάστημα ή να τροποποιηθούν ώστε να γίνουν συμβατά με αυτό. Συνήθως, το HD είναι ο πρόγονος ενός Ευρωπαϊκού προτύπου (EN - European Standard), το οποίο και πρέπει να υιοθετηθεί από όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Έτσι, οι παραγγελίες αγοράς που αναφέρονται στα Εθνικά πρότυπα, είναι συμβατές και με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα EN και HD.

1.5.1 Το πρότυπο HD 428.1 S1

Το Έγγραφο Εναρμόνισης (*Harmonization Document*) HD 428.1 S1 εγκρίθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή για την Ηλεκτροτεχνική Προτυποποίηση (European Committee for Electrotechnical Standardization: CENELEC) το 1992 και αντικατέστησε το HD 428 S1 του 1983 και την τροποποίησή του A1 του 1990. Το HD 428.1 S1 καλύπτει μετασχηματιστές από 50 kVA έως 2500 kVA που προορίζονται για εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου συνεχή λειτουργία σε τριφασικά δίκτυα διανομής, σε συχνότητα 50 Hz, εμβαπτισμένους σε ορυκτό λάδι, με φυσική ψύξη και δύο τυλίγματα: ένα πρωτεύον με υψηλότερη επιτρεπόμενη τάση από 3,6 έως 24 kV κι ένα δευτερεύον τύλιγμα με υψηλότερη επιτρεπόμενη τάση που δεν υπερβαίνει τα 1,1 kV. Ο στόχος του HD 428.1 S1 ήταν να θέσει τις απαιτήσεις που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, τις διαστάσεις και τον σχεδιασμό της

προαναφερθείσας κατηγορίας μετασχηματιστών, εξασφαλίζοντας τη σύμφωνη με τα πρότυπα παραγωγή τους κι ενισχύοντας τη διακίνηση των μετασχηματιστών μεταξύ των χωρών της CENELEC.

Το HD 428.1 S1 αναφέρει ότι οι μετασχηματιστές θα πρέπει να πληρούν τις προδιαγραφές που καθορίζονται από τα Έγγραφα Εναρμόνισης της σειράς HD 398.

Οι πιο συνηθισμένες τιμές της ονομαστικής ισχύος των μετασχηματιστών είναι οι εξής: 50, 63, 100, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000 και 2500 kVA. Από αυτές προτιμώμενες είναι οι εξής: 50, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500 kVA. Τα Εθνικά Πρότυπα μπορούν να περιλαμβάνουν επιπλέον κάποιες από τις προαναφερθείσες μη-προτιμώμενες τιμές, συμπεριλαμβανομένης αυτής των 25 kVA.

Οι προτιμώμενες τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης σε θερμοκρασία αναφοράς 75 °C είναι :

- για Μ/Σ ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 630 kVA : 4%
- για Μ/Σ ονομαστικής ισχύος ίσης με 630 kVA : 4% ή 6%
- και για Μ/Σ ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης των 630 kVA : 6%

Για μετασχηματιστές οι οποίοι έχουν τιμές ονομαστικής ισχύος και τάσης βραχυκύκλωσης μεταξύ των προτεινόμενων, οι τιμές των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου δίνονται στους πίνακες 1.2 και 1.3 αντίστοιχα:

Ονομαστική Ισχύς kVA	Κλάση A P_k W	Κλάση B P_k W	Κλάση C P_k W	Τάση Βραχυκύκλωσης %
50	1100	1350	875	4
100	1750	2150	1475	
160	2350	3100	2000	
250	3250	4200	2750	
400	4600	6000	3850	
630	6500	8400	5400	
630	6750	8700	5600	6
1000	10500	13000	9500	
1600	17000	20000	14000	
2500	26500	32000	22000	

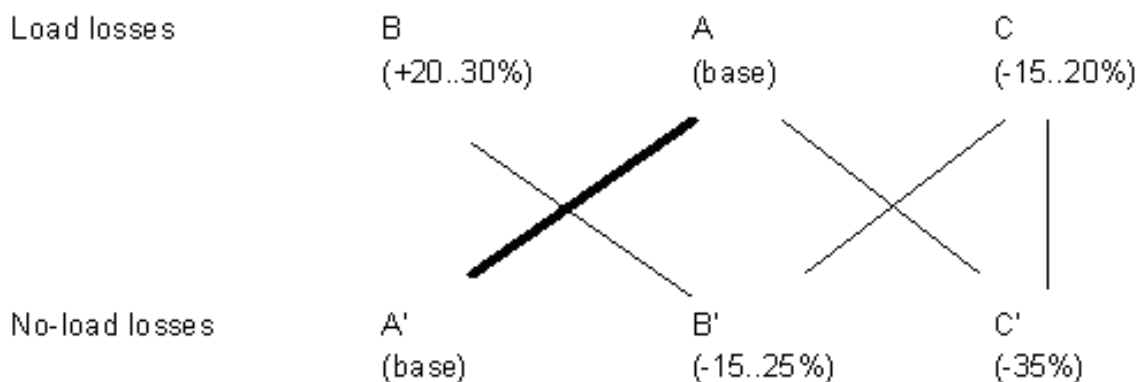
Πίνακας 1.2: Απώλειες Φορτίου P_k σύμφωνα με το HD 428.1 S1

Ονομαστική Ισχύς kVA	Κλάση A' P _o W	Κλάση B' P _o W	Κλάση C' P _o W	Τάση Βραχυκύκλωσης %
50	190	145	125	4
100	320	260	210	
160	460	375	300	
250	650	530	425	
400	930	750	610	
630	1300	1030	860	
630	1200	940	800	6
1000	1700	1400	1100	
1600	2600	2200	1700	
2500	3800	3200	2500	

Πίνακας 1.3: Απώλειες Κενού Φορτίου P_o σύμφωνα με το HD 428.1 S1

Αποκλίσεις του εύρους ±5% από τις αναγραφόμενες στους πίνακες τιμές των απωλειών είναι αποδεκτές στα εθνικά πρότυπα. Για την κλάση C η επιτρεπόμενη απόκλιση διευρύνεται σε ±7.5%, ενώ για αυτή την κλάση μόνο μπορούν να γίνουν αποδεκτές μεγαλύτερες αποκλίσεις (έως ±10%) ως προσωρινές εθνικές αποκλίσεις.

Τα προτιμώμενα από το HD 428.1 S1 ζεύγη τιμών είναι αυτά των ακόλουθων συνδυασμών κλάσεων : A – A', B – B', C – B', A - C', C – C'



Σχήμα 1.6: Οι 5 προτιμώμενοι συνδυασμοί του HD 428

Στα εθνικά πρότυπα ένας ή περισσότεροι από τους ανωτέρω συνδυασμούς απωλειών, συμπεριλαμβανομένων και των επιτρεπτών αποκλίσεων, επιτρέπονται.

Οι απώλειες των μετασχηματιστών με ονομαστική ισχύ που περιλαμβάνεται μεταξύ των μη-προτιμώμενων τιμών θα προκύψει με παρεμβολή.

Στο HD 428.1 S1 επιπλέον επισημαίνεται ότι, όταν οι τιμές των απωλειών που δίνονται στους παραπάνω πίνακες δεν αντιστοιχούν στην πραγματική εκτίμηση του ενεργειακού κόστους ή σε περίπτωση καθιερωμένης πρακτικής στην αγορά ή σε περίπτωση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, οι μετασχηματιστές μπορούν να ζητηθούν και κατά συνέπεια να προσφερθούν με απώλειες που διαφέρουν από τις καθοριζόμενες από αυτό. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να υπάρχει στην αίτηση ένας μαθηματικός τύπος κεφαλαιοποίησης των απωλειών, ο οποίος θα είναι της ακόλουθης μορφής:

$$C_C = C_T + A * P_o + B * P_k \quad (1.1)$$

Όπου:

C_C = το Κεφαλαιοποιημένο κόστος

C_T = η προσφερόμενη τιμή

A = η τιμή που υποδεικνύεται από τον αγοραστή, είναι εκφρασμένη σε νομισματική μονάδα ανά Watt (π.χ. €/W) και αντιστοιχεί στις απώλειες κενού φορτίου

P_o = οι εγγυημένες απώλειες κενού φορτίου σε Watt

B = η τιμή που υποδεικνύεται από τον αγοραστή, είναι εκφρασμένη σε νομισματική μονάδα ανά Watt (π.χ. €/W) και αντιστοιχεί στις απώλειες φορτίου

P_k = οι εγγυημένες απώλειες φορτίου σε Watt

Άλλοι όροι μπορούν να εισαχθούν στον παραπάνω τύπο από εθνικές επιτροπές ή από έναν αγοραστή, προκειμένου να ληφθούν υπ' όψιν άλλοι τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες.

1.5.2 Το πρότυπο EN 50464-1

Το Έγγραφο Εναρμόνισης HD 428.1 S1 και η τροποποίησή του, HD 428.1 S1/A1, αντικαταστάθηκαν από το Ευρωπαϊκό Πρότυπο (European Standard) EN 50464-1, το οποίο εγκρίθηκε από την CENELEC τον Σεπτέμβριο του 2006.

Το EN 50464-1 καλύπτει μετασχηματιστές από 50 kVA έως 2500 kVA που προορίζονται για εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου συνεχή λειτουργία σε τριφασικά

δίκτυα διανομής, σε συχνότητα 50 Hz, εμβαπτισμένους σε ορυκτό λάδι, με φυσική ψύξη και δύο τύλιγματα: ένα πρωτεύον με υψηλότερη επιτρεπόμενη τάση από 3,6 έως 36 kV κι ένα δευτερεύον τύλιγμα με υψηλότερη επιτρεπόμενη τάση που δεν υπερβαίνει τα 1,1 kV. Συνεπώς το EN 50464-1 διευρύνει το όριο της υψηλής τάσης πρωτεύοντος συμπεριλαμβάνοντας μετασχηματιστές με τάση 36 kV στο πρωτεύον τύλιγμα, ενώ τα Έγγραφα Εναρμόνισης που αντικατέστησε περιελάμβαναν μετασχηματιστές των οποίων το πρωτεύον τύλιγμα είχε τάση έως 24kV. Το EN 50464-1 θέτει τις απαιτήσεις που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, τις διαστάσεις και τον σχεδιασμό των τριφασικών μετασχηματιστών διανομής που είναι εμβαπτισμένοι σε ορυκτό λάδι.

Στο EN 50464-1 αναφέρεται ρητά ότι η εφαρμογή του προϋποθέτει την εφαρμογή των εγγράφων EN 50216, EN 50464-2, EN 60076 και IEC/TR 60616.

Όσον αφορά στην ονομαστική ισχύ των μετασχηματιστών, οι τιμές της οποίας είναι οι εξής: 50, 63, 100, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000 και 2500 kVA, προτιμούνται οι ακόλουθες τιμές: 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500 kVA

Οι προτιμώμενες τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης σε θερμοκρασία 75 °C διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την ονομαστική τάση του πρωτεύοντος τυλίγματος (U_m) του μετασχηματιστή και δίνονται στον πίνακα 1.4:

$U_m \leq 24kV$		$U_m = 36kV$	
Ονομαστική Ισχύς kVA	Τάση Βραχυκύκλωσης %	Ονομαστική Ισχύς kVA	Τάση Βραχυκύκλωσης %
50	4	50	4 ή 4,5
100		100	
160		160	
250		250	
315		400	
400		630	
500		800	
630	6	1000	6
630		1250	
800		1600	
1000		2000	
1250		2500	
1600			
2000			
2500			

Πίνακας 1.4: Τάση βραχυκύκλωσης σύμφωνα με το EN 50464-1

Για μετασχηματιστές οι οποίοι έχουν τιμές ονομαστικής ισχύος και τάσης βραχυκύκλωσης μεταξύ των προτεινόμενων, οι τιμές των απωλειών δίνονται για $U_m \leq 24$ kV στους πίνακες 1.5 (απώλειες φορτίου) και 1.6 (απώλειες κενού φορτίου). Οι θεωρούμενες απώλειες είναι σε θερμοκρασία 75°C .

Ονομαστική Ισχύς kVA	D _k W	C _k W	B _k W	A _k W	Τάση Βραχυκύκλωσης %
50	1350	1100	875	750	4
100	2150	1750	1475	1250	
160	3100	2350	2000	1700	
250	4200	3250	2750	2350	
315	5000	3900	3250	2800	
400	6000	4600	3850	3250	
500	7200	5500	4600	3900	
630	8400	6500	5400	4600	
630	8700	6750	5600	4800	6
800	10500	8400	7000	6000	
1000	13000	10500	9000	7600	
1250	16000	13500	11000	9500	
1600	20000	17000	14000	12000	
2000	26000	21000	18000	15000	
2500	32000	26500	22000	18500	

Πίνακας 1.5: Απώλειες Φορτίου P_k σύμφωνα με το EN 50464-1 για U_m ≤ 24kV

Ονομαστική Ισχύς kVA	E _o W	D _o W	C _o W	B _o W	A _o W	Τάση Βραχυκύκλωσης %
50	190	145	125	110	90	4
100	320	260	210	180	145	
160	460	375	300	260	210	
250	650	530	425	360	300	
315	770	630	520	440	360	
400	930	750	610	520	430	
500	1100	880	720	610	510	
630	1300	1030	860	730	600	
630	1200	940	800	680	560	6
800	1400	1150	930	800	650	
1000	1700	1400	1100	940	770	
1250	2100	1750	1350	1150	950	
1600	2600	2200	1700	1450	1200	
2000	3100	2700	2100	1800	1450	
2500	3500	3200	2500	2150	1750	

Πίνακας 1.6: Απώλειες Κενού Φορτίου P_o σύμφωνα με το EN 50464-1 για U_m ≤ 24kV

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Τεχνικά θέματα στους Μ/Σ διανομής

2.1 Θεμελιώδης αρχή λειτουργίας των Μ/Σ διανομής

Οι μετασχηματιστές διανομής είναι συσκευές οι οποίες μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια από το επίπεδο μέσης τάσης (συνήθως από 10 kV έως 36 kV) σε επίπεδα τάσης κατάλληλα για οικιακά, εμπορικά και εν μέρει βιομηχανικά φορτία. Ένας τριφασικός μετασχηματιστής διανομής αποτελείται από έναν πυρήνα σιδήρου με ένα σκέλος για κάθε μία από τις φάσεις. Γύρω από κάθε σκέλος βρίσκονται δύο τυλίγματα: ένα με μεγάλο αριθμό ελιγμάτων (N_p), που είναι συνδεδεμένο στη πλευρά της υψηλής τάσης και ένα με μικρό αριθμό ελιγμάτων (N_s), συνδεδεμένο στην πλευρά της χαμηλής τάσης. Τα τυλίγματα διαχωρίζονται από μονωτικό υλικό. Όταν εφαρμόζεται μια εναλλασσόμενη τάση στους ακροδέκτες του ενός τυλίγματος, μια τάση με την ίδια συχνότητα παράγεται στους ακροδέκτες του άλλου. Πιο αναλυτικά, το δυναμικό που επάγεται στα άκρα του δευτερεύοντος μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο της επαγωγής του Φαραντέϊ:

$$V_S = N_S \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

όπου V_S είναι η στιγμιαία τάση, N_S είναι ο αριθμός των περιελίξεων 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.

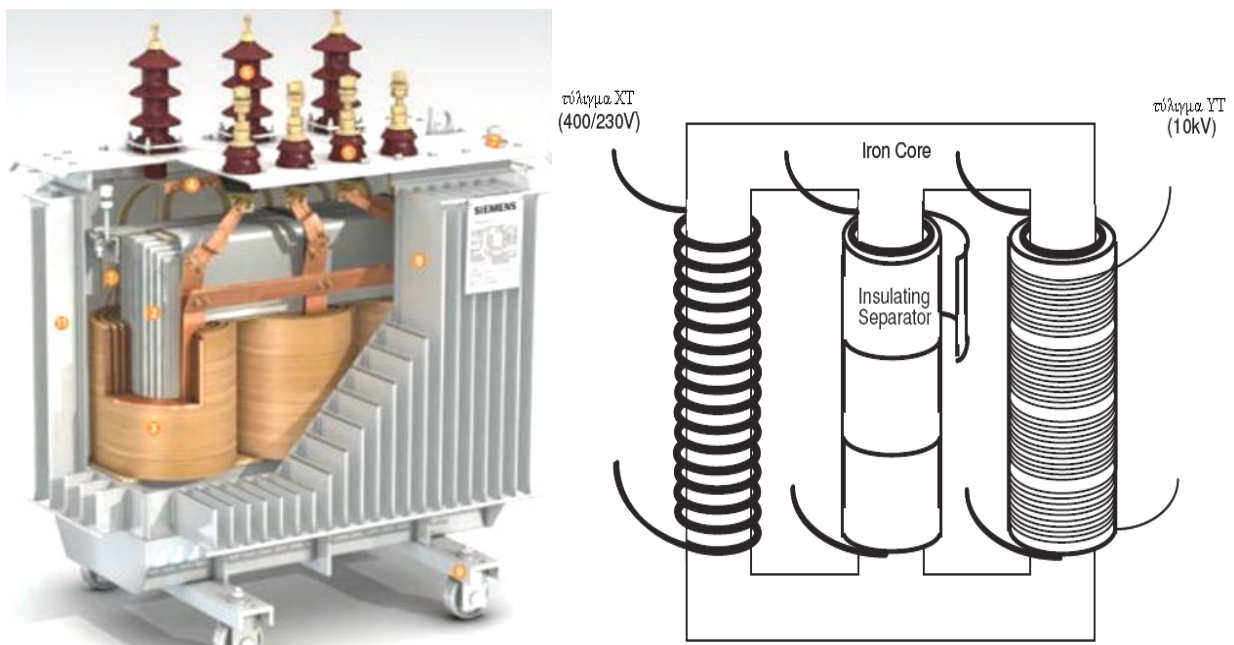
Καθώς σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή η ροή που περνά μέσα τόσο από το πρωτεύον όσο και από το δευτερεύον είναι ίδια, η στιγμιαία τάση στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος ισούται με:

$$V_P = N_P \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

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

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} \quad (2.3)$$

Όπου προκύπτει ότι ο λόγος των τάσεων ισούται με το λόγο των ελιγμάτων. Συνεπώς, με κατάλληλη επιλογή του αριθμού ελιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι δυνατό να προκύψει οποιοσδήποτε επιθυμητός λόγος τάσεων.

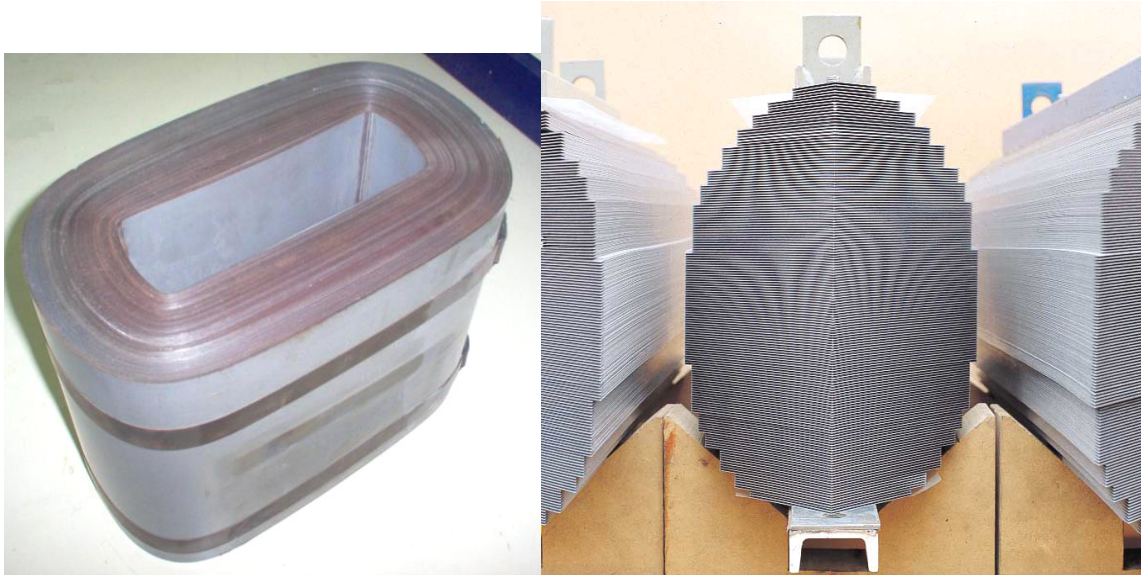


Σχήμα 2.1: Μ/Σ διανομής σε τομή όπου φαίνεται το ενεργό μέρος του (αριστερά) και το απλοποιημένο μοντέλο του (δεξιά)

2.2 Πυρήνας και τυλίγματα μετασχηματιστή

Στους μετασχηματιστές διανομής με ονομαστική φαινόμενη ισχύ από 25 kVA μέχρι 2500 kVA (καθώς και σε μικρούς ειδικούς Μ/Σ, αλλά γενικά σε Μ/Σ που ανταποκρίνονται στο εναρμονισμένο πρότυπο της CENELEC, HD 428 S1/92) χρησιμοποιείται συνήθως ο τυλιχτός τύπος πυρήνα (ή WES-core). Ένας τυπικός τυλιχτός πυρήνας αποτελείται από εκατοντάδες ελάσματα (φύλλα) σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας (σχήμα 2.2). Τα ελάσματα αυτά είναι κράμα σιδήρου, προσανατολισμένων κόκκων στη διεύθυνση της έλασης και

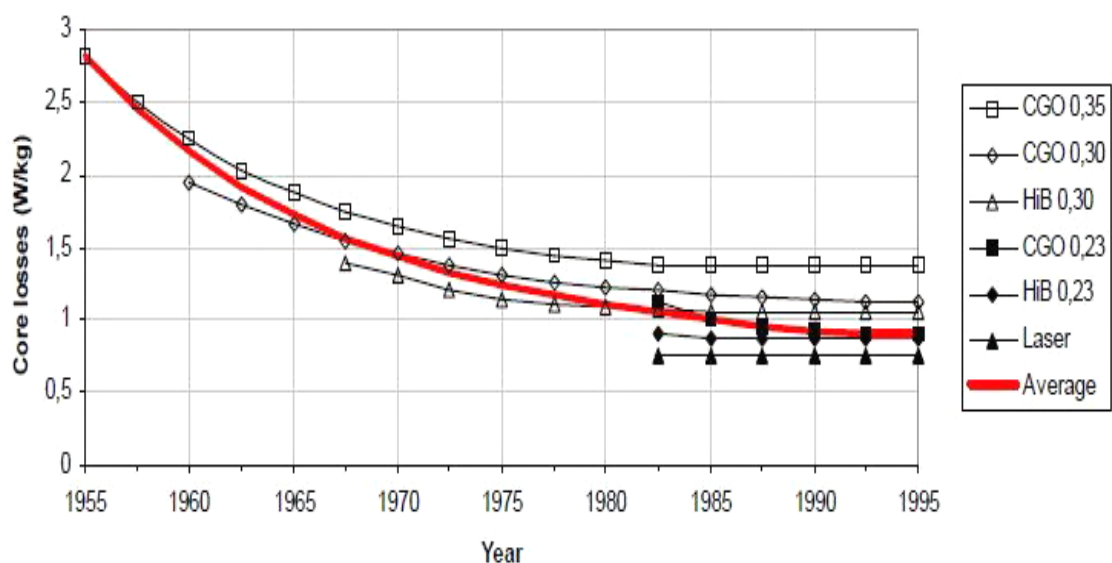
περιέχουν πυρίτιο μέχρι 4,5%. Ο βαθμός μείωσης των απωλειών αυξάνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε πυρίτιο. Ο βαθμός αυτός βρίσκει ένα όριο στο ποσοστό των 4,5% περιεκτικότητας σε πυρίτιο λόγω της αυξανόμενης σκλήρυνσης και ψαθυρότητας. Τα ελάσματα είναι συνήθως ψυχρής έλασης, αφού η θερμή έλαση τείνει να εγκαταλειφθεί τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 2.2: Τυπικός τυλιχτός πυρήνας Μ/Σ (αριστερά) και εγκάρσια τομή πυρήνα ωοειδούς σχήματος (δεξιά)

Το πάχος τους είναι σήμερα περίπου 0,23 mm και η ηλεκτρική τους αντίσταση είναι πολύ υψηλή ούτως ώστε να επιτυγχάνονται χαμηλές απώλειες από δινορεύματα. Επίσης, μονώνονται και από τις δύο πλευρές με μια λεπτή

Core losses



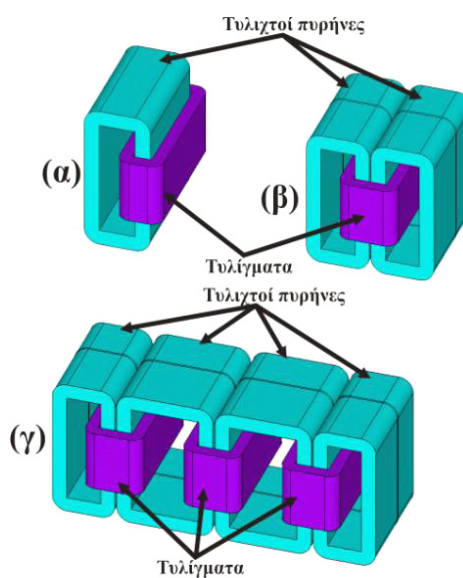
Σχήμα 2.3: Η εξέλιξη των απωλειών πυρήνα κατά έτος και τεχνολογία (THERMIE project, 1999)

στρώση εφυάλωσης (lack) λίγων μm , ώστε κατά τη στοίβαξη του πυρήνα να προκύψει πλήρωσή του, με σίδηρο κατ' όγκο περίπου 96%.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3, οι πυρήνες των μετασχηματιστών διανομής εξελίσσονται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο της τεχνολογίας με συνέπεια σήμερα, ο βαθμός μείωσης των απωλειών να έχει αυξηθεί σημαντικά. Υπάρχουν βέβαια, πάντα περιθώρια βελτίωσης τα οποία αναλύονται σε παρακάτω κεφάλαιο.

Τα τυλίγματα κατασκευάζονται από σύρματα μονωμένα. Για την κατασκευή ενός τυλίγματος, προσδιοριστικό στοιχείο είναι η τιμή της τάσης ανά σπείρα. Αυτή καθορίζει το σύνολο των σπειρών του τυλίγματος. Για διατομές συρμάτων μέχρι 3 τετραγωνικά χιλιοστά χρησιμοποιούνται συνήθως κυλινδρικά σύρματα ενώ για μεγαλύτερες διατομές χρησιμοποιούνται σύρματα ορθογωνικά ή τετράγωνα για εξοικονόμηση χώρου. Οι στρώσεις χωρίζονται μεταξύ τους με μονωτικό χαρτί ή άλλο κατάλληλο μονωτικό υλικό¹. Για μεγάλες εντάσεις και χαμηλές τάσεις χρησιμοποιούνται φύλλα χαλκού ή αλουμινίου και για υψηλές τάσεις χρησιμοποιούνται συνεστραμμένοι αγωγοί. Η τοποθέτηση και η στήριξη των σπειρών του τυλίγματος πρέπει να γίνεται κατά τρόπο ικανοποιητικό ώστε να αντέχουν στις ηλεκτροδυναμικές καταπονήσεις που εμφανίζονται σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Γενικά, υπάρχουν πολλοί τρόποι κατασκευής τυλιγμάτων ανάλογα με τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την εξασφάλιση εσωτερικής και εξωτερικής διηλεκτρικής αντοχής τους, τη συγκράτηση των δινορευμάτων σε χαμηλά επίπεδα, ικανοποιητικής ψύξης, αντοχής σε βραχυκυκλώματα, στοιχεία που εξαρτώνται από την τάση, την ένταση, την ισχύ, και την τάση βραχυκυκλώσεως του μετασχηματιστή.



¹ Οι διάμετροι των στρογγυλών αγωγών είναι τυποποιημένοι κατά IEC 317-0-1/1990, οι οποίες είναι ταυτόσημες με τις διαμέτρους κατά DIN 46435 του 1972, τύπος W180 (δηλαδή αντοχή του υλικού στους 180 °C), και μονώσεως με εφυάλωση (2L), λαμβάνονται όμως μόνο οι διακεκριμένες διάμετροι και οι διαστάσεις των επιπέδων κατά IEC 182-3 του 1972. Για τους στρογγυλούς αγωγούς προβλέπεται εφυάλωση, στους δε επίπεδους κυρίως χαρτί καλωδίων, πάχους 0,5 mm για τάσεις κάτω των 10 kV και 0,6 mm για τάσεις μέχρι 30 kV αλλά και εφυάλωση. Η μέγιστη διάμετρος που προβλέπεται για τους στρογγυλούς αγωγούς είναι 3 mm. Οι μέγιστες διαστάσεις των επιπέδων αγωγών είναι για μεν το πλάτος 20 mm για δε το πάχος 8 mm.

2.3 Οι απώλειες στους μετασχηματιστές

Ένας μετασχηματιστής συνήθως αποτελείται από ένα ζευγάρι τυλίγματα, το κύριο (HV) και το δευτερεύον (LV), τα οποία συνδέονται από ένα μαγνητικό κύκλωμα ή πυρήνα. Αυτή η εναλλασσόμενη ροή, που συνδέεται και με τα δύο πηνία, προκαλεί μια τάση σε καθένα από αυτά. Το ρεύμα που ρέει είναι το ρεύμα μαγνήτισης. Στον Μ/Σ παρατηρούνται:

2.3.1 Απώλειες κενού φορτίου

Ένας αφόρτιστος μετασχηματιστής υπό τάση έχει απώλειες. Το ρεύμα μαγνήτισης (το ρεύμα που θα ρεύσει όταν μια εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται σε ένα από τα τυλίγματα, συνήθως στο κύριο, και θα προκαλέσει μία εναλλασσόμενη μαγνητική ροή στον πυρήνα) απαιτείται για να λειτουργεί ο πυρήνας του μετασχηματιστή στην σωστή συχνότητα του συστήματος (50 ή 60 Hz). Για να επιτυγχάνεται αυτό καταναλώνεται ενέργεια. Αυτή η απώλεια είναι γνωστή σαν απώλεια πυρήνα, απώλεια κενού φορτίου ή απώλεια σιδήρου.

Επειδή οι απώλειες πυρήνα εμφανίζονται όταν και όσο ο μετασχηματιστής είναι σε λειτουργία, αντιπροσωπεύουν μια σταθερή και επομένως σημαντική απώλεια ενέργειας για το ηλεκτρικό σύστημα. Επιπλέον, οι εναλλασσόμενες ροές στον πυρήνα παράγουν επίσης εναλλασσόμενες δυνάμεις στον πυρήνα, και ως εκ τούτου θόρυβο.

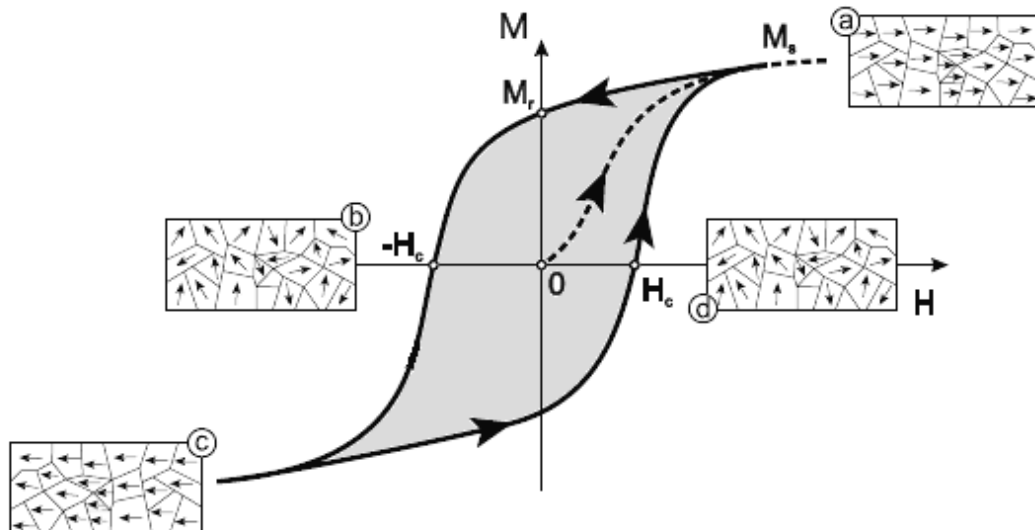
Οι απώλειες πυρήνα οφείλονται κατά κύριο λόγο στις:

- **απώλειες υστέρησης και στις**
- **απώλειες δινορευμάτων².**

² Εκτός από τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες από δινορεύματα υπάρχουν στον πυρήνα και άλλες απώλειες, όπως για παράδειγμα **απώλειες διηλεκτρικού**, οι οποίες ευθύνονται για ποσοστό λιγότερο από 1% των συνολικών απωλειών πυρήνα. Επίσης στους μετασχηματιστές των οποίων η ψύξη επιτυγχάνεται με βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα υπάρχουν επιπλέον οι **απώλειες ψύξης** (cooling losses), οι οποίες προκαλούνται από την ενεργειακή κατανάλωση του ανεμιστήρα. Όσο μεγαλύτερες είναι οι υπόλοιπες απώλειες, τόσο περισσότερη ψύξη χρειάζεται, άρα τόσο πιο μεγάλες είναι και οι απώλειες ψύξης. Οι απώλειες ψύξης κατά συνέπεια μπορούν να περιοριστούν λαμβάνοντας διάφορα μέτρα μείωσης των υπολοίπων τύπων απωλειών, προκειμένου η θερμοκρασία λειτουργίας να συγκρατείται σε χαμηλές τιμές.

Οι απώλειες υστέρησης είναι απώλειες στα ελάσματα του πυρήνα που προκαλούνται από την αντίσταση της μοριακής δομής του υλικού να μαγνητιστεί και να απομαγνητιστεί από ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και αποτελούν το 50 με 80% των συνολικών απωλειών κενού φορτίου. Αυτή η αντίσταση των μορίων προκαλεί τριβή, με αποτέλεσμα να έχουμε εμφάνιση θερμότητας.

Πιο αναλυτικά, όταν το μαγνητικό πεδίο B αυξάνει, τα σιδηρομαγνητικά υλικά φτάνουν κάποτε στο σημείο που όλες σχεδόν οι μαγνητικές τους ροπές είναι προσανατολισμένες παράλληλα με αυτό. Αυτή η κατάσταση ονομάζεται μαγνήτιση κόρου. Όσο το σύστημα βρίσκεται σε κόρο, κάθε παραπάνω αύξηση του εξωτερικού πεδίου δεν επιφέρει καμία αύξηση στη μαγνήτιση ή στο πρόσθετο πεδίο που αυτή δημιουργεί. Κατά συνέπεια, καθώς προσεγγίζεται ο κόρος, η μαγνήτιση M παύει να είναι ανάλογη του εξωτερικού πεδίου B (δηλαδή του πεδίου που δημιουργείται από τα εξωτερικά ρεύματα).



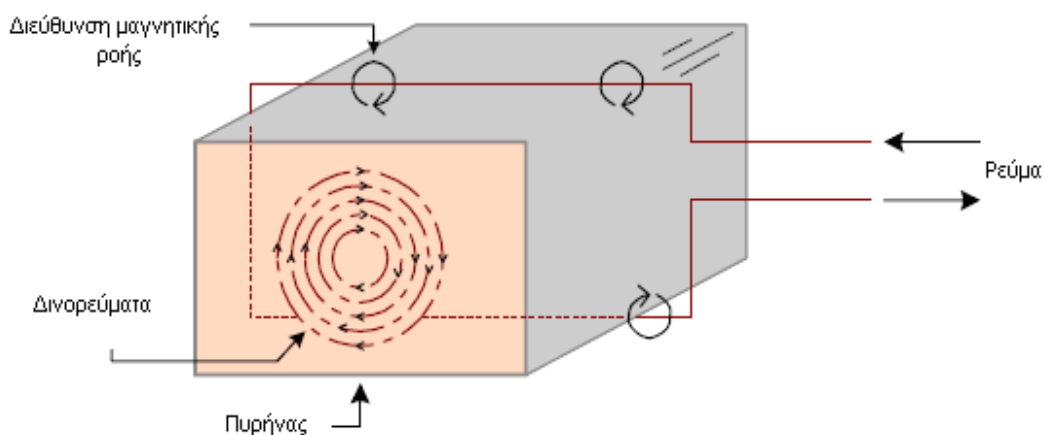
Σχήμα 2.4: Βρόχος υστέρησης

Στα περισσότερα σιδηρομαγνητικά υλικά η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση και το εξωτερικό πεδίο είναι διαφορετική όταν αυξάνει το πεδίο, από εκείνη όταν ελαττώνεται το πεδίο τείνουν δηλαδή να διατηρήσουν κάποιο επίπεδο μαγνήτισης όταν εφαρμόζεται σε αυτά κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το σχήμα 2.4 δείχνει την καμπύλη μαγνήτισης για ένα τέτοιο υλικό (η διακεκομμένη γραμμή). Έτσι, αν με το υλικό σε κατάσταση κόρου, το εξωτερικό πεδίο μηδενιστεί, η μαγνήτιση του δεν μηδενίζεται. Για να απαλλαγεί το υλικό από τη μαγνήτιση αυτή θα πρέπει να του εφαρμοστεί ένα μαγνητικό πεδίο προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η παραπάνω συμπεριφορά

ονομάζεται υστέρηση³ και οι καμπύλες του σχήματος 2.4 βρόχος υστέρησης. Ο βρόχος υστέρησης εκτελείται τόσες φορές στη μονάδα του χρόνου όσες ορίζει η συχνότητα του επιβαλλόμενου πεδίου. Τόσο η διαδικασία για τη μαγνήτιση, όσο και εκείνη για την απομαγνήτιση υλικού που παρουσιάζει υστέρηση, συνεπάγονται κατανάλωση ενέργειας με αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις να αυξάνει η θερμοκρασία του. Το ποσό αυτό της ενέργειας που χάνεται αποδεικνύεται ότι αντιστοιχεί στην σκιασμένη επιφάνεια της καμπύλης υστέρησης του σχήματος 2.4 και λέγεται «απώλειες υστέρησης». Η ελαχιστοποίηση των απωλειών υστέρησης, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής ενός υλικού που να έχει **ελάχιστο εμβαδό** βρόχου υστερήσεως.

Οι απώλειες δινορευμάτων ευθύνονται περίπου για ποσοστό 30% - 50% των απωλειών κενού φορτίου και είναι εξίσου σημαντικές με τις «απώλειες υστέρησης». Είναι ωμικές και οφείλονται στη διαδρομή επαγόμενων ρευμάτων μέσα από τον πυρήνα σιδήρου. Εξαρτώνται δε από το τετράγωνο της συχνότητας, το τετράγωνο του πάχους του υλικού και από την ειδική αντίστασή του.

Όπως γνωρίζουμε από τον νόμο της επαγωγής του *Faraday*, όταν μια αγώγιμη μάζα βρεθεί μέσα σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, τότε, εξαιτίας της χρονικά μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής που την διαπερνά, επάγεται σ' αυτήν τη μάζα μια ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Η επαγόμενη αυτή ΗΕΔ αναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της αγώγιμης μάζας να κινηθούν σε τυρβώδεις τροχιές, σχηματίζοντας κλειστούς βρόγχους ή δίνες, γ' αυτό και τα ρεύματα που δημιουργούνται ονομάζονται «δινόρευματα» (eddy currents).



Σχήμα 2.5: Δινόρευματα στον πυρήνα που παρουσιάζονται στη διατομή του.

³ Στην πραγματικότητα, υστέρηση λέγεται το φαινόμενο της εξάρτησης της μαγνητικής ροής από την «προϊστορία» της.

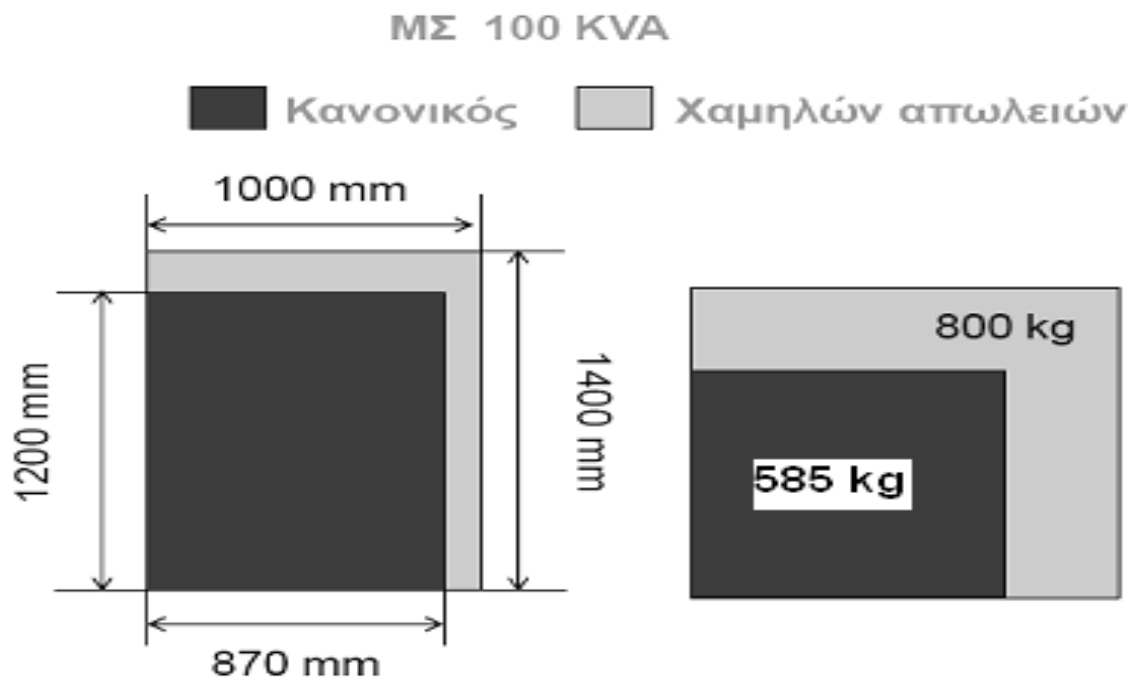
Η ροή των δινορευμάτων μέσα στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση ενέργειας ανάλογη του γινομένου $R \cdot I^2$, η οποία εκδηλώνεται υπό μορφή θερμότητας μέσα στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα (απώλειες Joule) και λέγονται «απώλειες δινορευμάτων⁴».

Είναι δυνατόν να επιτευχθεί μείωση των απωλειών κενού φορτίου με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

α) Αύξηση του μεγέθους του πυρήνα:

Εκτός από την σωστή επιλογή του υλικού του πυρήνα του μετασχηματιστή διανομής, ο τρόπος με τον οποίο αυτός σχεδιάζεται, κόβεται, κατασκευάζεται και συναρμολογείται, παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή αποδοτικότητα του.

Αυξάνοντας το μέγεθος του πυρήνα μειώνεται η πυκνότητα/ένταση του μαγνητικού πεδίου, και κατ' αυτόν τον τρόπο μειώνονται και οι απώλειες κενού φορτίου και αυξάνεται η αποδοτικότητα.



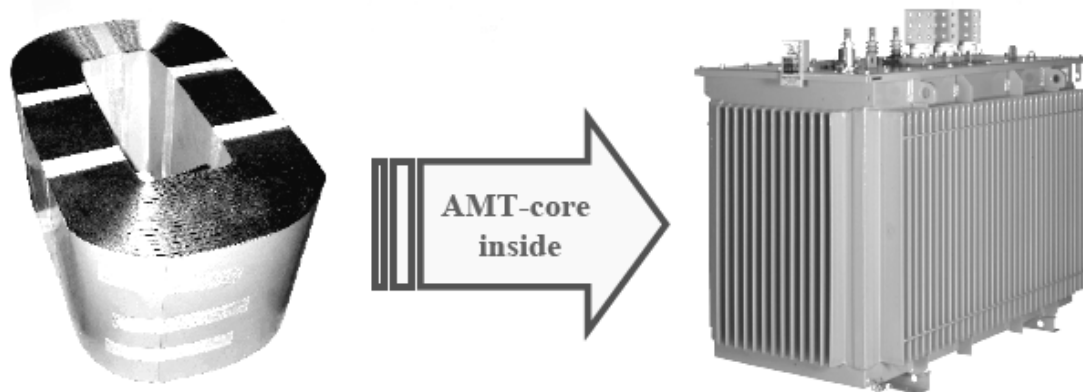
Σχήμα 2.6: Παράδειγμα μείωσης των απωλειών κενού φορτίου σε Μ/Σ 100 kVA

⁴ Εκτός από τις απώλειες δινορευμάτων στον πυρήνα έχουμε και τις **σποραδικές απώλειες δινορευμάτων**. Οι σποραδικές απώλειες είναι μικρές και δύσκολα υπολογίζονται. Οι απώλειες αυτές δημιουργούνται από το ρεύμα που κυκλοφορεί στα διάφορα συστατικά ενός πυρήνα, όπως είναι οι σφικτήρες, οι πύροι κι αλλά τεμάχια μετάλλου. Ακόμα κι όταν δεν υπάρχει φορτίο στον μετασχηματιστή, υπάρχουν $I^2 R$ απώλειες στο πρωτεύον τύλιγμα που προκαλούνται από το υπάρχον ρεύμα. Είναι το ρεύμα που είναι απαραίτητο για να μαγνητίζει ή να «διεγείρει» τον πυρήνα. Οι απώλειες αυτές είναι ελάχιστες και είναι συνήθως αμελητέες.

Τα μειονεκτήματα τα οποία εμφανίζει αυτή η μέθοδος είναι η αύξηση του βάρους και του κόστους του μετασχηματιστή. Ένα παράδειγμα Μ/Σ των 100 kVA με μειωμένες απώλειες λόγω αύξησης του μεγέθους του πυρήνα, φαίνεται στο σχήμα 2.6 παραπάνω.

β) Επιλογή σιδήρου υψηλής απόδοσης για τον πυρήνα:

Το 1900 επιλέγονταν σίδηρος θερμής εξέλασης, ώσπου σταδιακά αντικαταστάθηκε από σίδηρο ψυχρής εξέλασης. Περί το 1950 άρχισε να χρησιμοποιείται σίδηρος ψυχρής εξέλασης με περιεκτικότητα πυριτίου, η οποία αργότερα μειώθηκε (ο σίδηρος με περιεκτικότητα σε πυρίτιο μειώνει τις απώλειες υστέρησης διότι μειώνει την αντίσταση των μορίων στην απομαγνήτισή τους). Μετά το 1980 κάποιες νέες τεχνικές παρέμβασης στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου είχαν προκαλέσει την μείωση των απωλειών υστέρησης. Σήμερα γίνεται προσπάθεια να εξαπλωθεί η χρήση πυρήνων άμορφου σιδήρου ώστε να επιτευχθεί αύξηση της απόδοσης των μετασχηματιστών.



Σχήμα 2.7: Μ/Σ με πυρήνα άμορφου σιδήρου

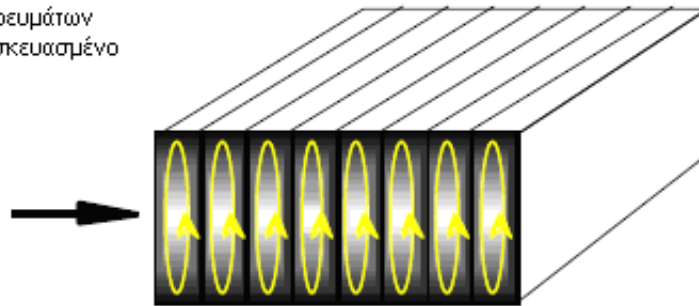
Οι μετασχηματιστές διανομής που χρησιμοποιούν άμορφο σίδηρο σαν υλικό για τον πυρήνα τους, μπορούν να έχουν έως και 70% χαμηλότερες απώλειες κενού φορτίου σε σχέση με τους συμβατικούς, και πετυχαίνουν απόδοση έως και 99.7% για μονάδες των 1000 kVA. Για την τεχνολογία και τη χρήση πυρήνων άμορφου σιδήρου γίνεται εκτενής αναφορά στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας.

γ) Βελτιστοποίηση σχεδίασης, τεχνικών κοπής, κατασκευής και σύνδεσης πυρήνα:

Η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την μείωση των δινορευμάτων του πυρήνα είναι η μείωση της ειδικής ηλεκτρικής

αγωγιμότητάς του. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την προσθήκη άλλων υλικών, όπως για παράδειγμα σιλικόνη, στο βασικό σιδηρομαγνητικό υλικό, τον σίδηρο. Όμως, η χρησιμοποίηση ενός κράματος σιδήρου με χαμηλή ειδική αγωγιμότητα δεν μπορεί από μόνη της σαν μέθοδος να μειώσει τα δινορεύματα σε ένα επιθυμητό επίπεδο. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται μια επιπρόσθετη μέθοδος που συνίσταται στο **σπάσιμο** του πυρήνα σε πολύ λεπτά φύλλα ή ελάσματα.

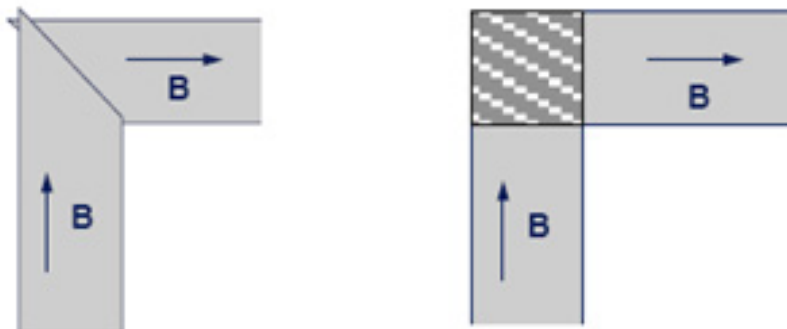
Μείωση των δινορευμάτων σε πυρήνα κατασκευασμένο από ελάσματα



Σχήμα 2.8: Μείωση δινορευμάτων με σπάσιμο του πυρήνα σε ελάσματα.

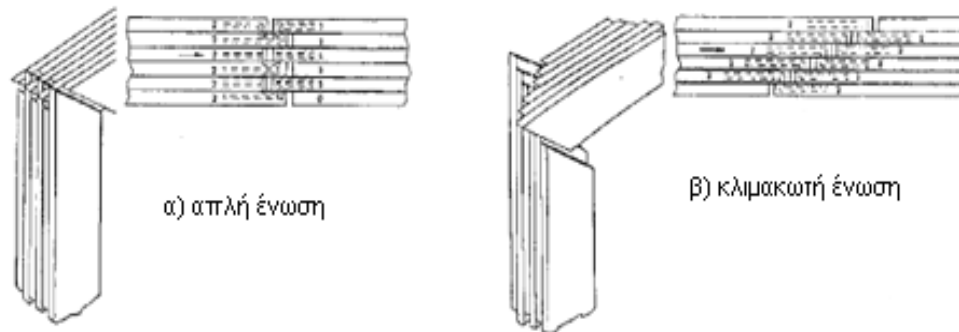
Η μεγάλη ηλεκτρική επιφανειακή αντίσταση του κάθε φύλλου, που οφείλεται είτε σε φυσική επίστρωση οξειδίου, ή σε μονωτικό βερνίκι, ουσιαστικά περιορίζει τα δινορεύματα σε κάθε φύλλο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8. Οι δρόμοι που είναι διαθέσιμοι για τα δινορεύματα είναι στενότεροι, έτσι η ΗΕΔ που επάγεται σε κάθε δρόμο είναι μικρότερη και τα δινορεύματα περιορίζονται δραματικά.

Η κοπή των ελασμάτων του πυρήνα γίνεται είτε σε γωνία 90° είτε σε γωνία 45° . Στην πρώτη περίπτωση, το κόστος κατασκευής είναι μικρότερο, αλλά ο Μ/Σ παρουσιάζει αυξημένες απώλειες. Αυτές μπορούν να ελαττωθούν αν αυξηθεί περαιτέρω η διατομή του πυρήνα. Στην δεύτερη περίπτωση, όταν η κοπή των ελασμάτων του πυρήνα γίνεται υπό γωνία 45° ενοείται η ροή της μαγνητικής ροής καθώς το κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου είναι προσανατολισμένο κατά τη μαγνητική ροή.



Σχήμα 2.9: Τεχνικές κοπής των ελασμάτων του πυρήνα

Η πλέξη των ελασμάτων του πυρήνα γίνεται είτε φύλλο προς φύλλο, είτε ομάδα καθ' ομάδα. Τα ελάσματα ή οι ομάδες διαπλέκονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι ενώσεις να μην συμπίπτουν μεταξύ τους. Η ένωση των ελασμάτων του πυρήνα μπορεί να είναι απλή ή κλιμακωτή. Στην απλή ένωση, οι διαδρομές της μαγνητικής ροής είναι ακανόνιστες στο διάκενο του αέρα, ενώ στην κλιμακωτή ένωση η μαγνητική ροή στο διάκενο είναι κανονική.



Σχήμα 2.10: Τρόποι ένωσης των ελασμάτων του πυρήνα

Στην ένωση των ελασμάτων πρέπει να επιδιώκεται διάκενο όσο το δυνατόν μικρότερο, διαφορετικά η μαγνητική αντίσταση του διακένου γίνεται πολύ μεγάλη, (λόγω της πολύ μικρής μαγνητικής διαπερατότητας του αέρα σε σχέση με αυτή του σιδήρου) και έτσι θα απαιτηθεί μεγαλύτερο διάρευμα, με συνέπεια την αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης.

2.3.2 Απώλειες φορτίου

Οι απώλειες φορτίου των μετασχηματιστών, είναι το μέρος εκείνο των απωλειών που παράγονται από το ρεύμα του φορτίου και μεταβάλλονται με το τετράγωνο του ρεύματος αυτού. Χωρίζονται δε σε 3 κατηγορίες :

- Απώλειες αντίστασης στα τυλίγματα των αγωγών (απώλειες χαλκού).
- Απώλειες δινορευμάτων (eddy currents) στα τυλίγματα των αγωγών.
- Απώλειες δινορευμάτων στα δομικά μέρη του μετασχηματιστή (δοχείο, τοιχώματα κ.τ.λ.)

Οι απώλειες αντίστασης συχνά αναφέρονται και ως απώλειες χαλκού επειδή συμβαίνουν στα τυλίγματα του μετασχηματιστή που είναι συνήθως από χαλκό. Λαμβάνουν χώρα τόσο στο πρωτεύον τύλιγμα όσο και στο δευτερεύον

και είναι αποτέλεσμα της αντίστασης R του χάλκινου αγωγού κατά την ροή του ρεύματος (ή των ηλεκτρονίων) μέσα στον αγωγό αυτό. Η κίνηση των ηλεκτρονίων επιφέρει την κίνηση των μορίων μέσα στον αγωγό με αποτέλεσμα να δημιουργείται τριβή και θερμότητα, ενώ η ενέργεια που καταναλώνεται από αυτή την κίνηση μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 2.4:

$$VA = (\text{volts}) * (\text{amperes}) = V * I \text{ ή } V * A = (R * I) * (I) \text{ ή } I^2 R \quad (2.4)$$

Οι απώλειες φορτίου είναι σημαντικές απώλειες σε μέγεθος και ισοδυναμούν ή είναι μεγαλύτερες από τις απώλειες κενού φορτίου.

Μπορούν να μειωθούν, μειώνοντας τον αριθμό των σπειρών των τυλιγμάτων, ή αυξάνοντας την διατομή του αγωγού της κάθε περιέλιξης, ή με συνδυασμό και των δύο. Με την κατασκευή των τυλιγμάτων με την τεχνική Continuously Transposed Conductor (CTC) επιτυγχάνεται αυξημένη διατομή του αγωγού, ενώ ταυτόχρονα εξομαλύνονται οι διαφορές της μαγνητικής ροής που εμφανίζονται στους συνενωμένους αγωγούς.

Οι απώλειες δινορευμάτων σε έναν αγωγό είναι παρόμοιες με εκείνες που συμβαίνουν στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Οφείλονται στη μαγνητική ροή που διαπερνά κάθετα τον αγωγό και προκαλεί τη ροή δινορευμάτων στο εσωτερικό του. Τα δινορεύματα προκαλούνται από το γεγονός ότι δεν συνδέεται όλη η ροή που παράγεται από το ένα τύλιγμα στο άλλο.

Πιο αναλυτικά, όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται υπό φορτίο, τότε προκαλείται ένα πρόσθετο πεδίο σκεδάσεως⁵ από τα ρεύματα φορτίου. Το πεδίο αυτό εξουδετερώνεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή, όχι όμως και στον χώρο των τυλιγμάτων και στον μεταξύ τους χώρο. Αυτό το πεδίο σκεδάσεως το εξαρτώμενο από το φορτίο, ονομάζεται **κύριο πεδίο σκεδάσεως**. Αυτό προκαλεί το μεγαλύτερο μέρος της άεργης πτώσης τάσης του μετασχηματιστή και τα δινορεύματα στα τυλίγματα. Επιπρόσθετα επηρεάζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης και συμμετέχει στις δυνάμεις βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή.

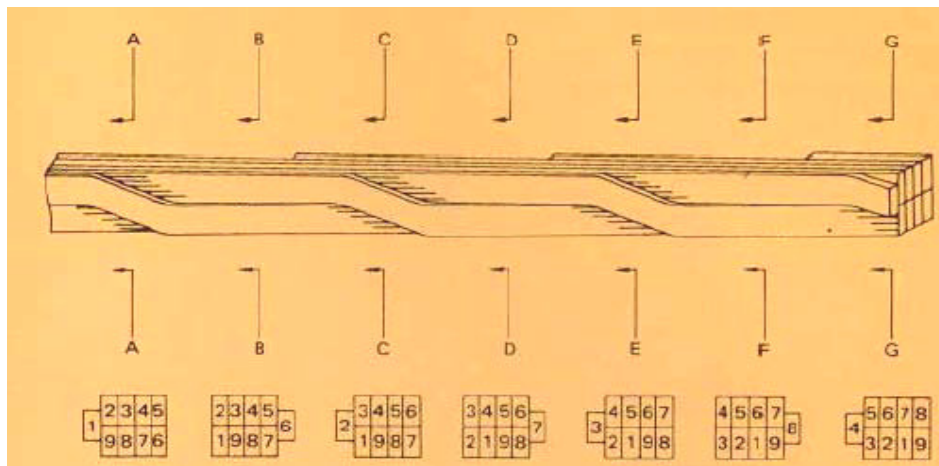
Η πορεία των δινορευμάτων στα τυλίγματα είναι σύνθετη. Το μέγεθος της ανεπιθύμητης σκέδασης εξαρτάται από τη γεωμετρία και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή. Το φαινόμενο της σκέδασης στα τυλίγματα του μετασχηματιστή έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ακατάπαυστων ακτινικών και αξονικών μεταβολών της ροής σε όλο τον χώρο

⁵ Πεδία σκεδάσεως νοούνται όλα τα πεδία, των οποίων οι μαγνητικές γραμμές δε διέρχονται από το σιδηροπυρήνα.

που διατίθεται. Αυτές προκαλούν τάσεις που οδηγούν το ρεύμα να ρέει κάθετα στις ροές και αυτό οδηγεί σε περαιτέρω απώλειες.

Το μέγεθος των ρευμάτων αυτών **μπορεί να μειωθεί** αυξάνοντας την αντίσταση του αγωγού, διαμέσου του οποίου αυτά ρέουν, και αυτό μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας το συνολικό εμβαδόν διατομής των τυλιγμάτων, ή υποδιαιρώντας τον αγωγό σε μικρότερους, οι οποίοι θα έχουν επιφανειακή μόνωση, ώστε να μην επικοινωνούν αγώγιμα μεταξύ τους⁶.

Πάντως, μια αύξηση της διατομής των τυλιγμάτων του αγωγού, θα αύξανε και τις απώλειες Joule. Ενώ, αντίθετα, μια μείωση της διατομής των τυλιγμάτων, θα οδηγούσε σε αύξηση των απωλειών λόγω δινορευμάτων. Έτσι, πιο σωστή μέθοδος φαίνεται να είναι αυτή με τους πολλούς λεπτούς αγωγούς τυλιγμένους παράλληλα.



Σχήμα 2.11: Αγωγός σε ελικοειδή μορφή για μείωση των απωλειών

Επίσης, η επιπρόσθετη μόνωση που είναι απαραίτητη, προκαλεί πρόβλημα χώρου. Είναι προφανές ότι σε έναν μετασχηματιστή με χαμηλές απώλειες Joule, τα δινορευμάτα αποτελούν μικρότερο πρόβλημα από ότι σε ένα μετασχηματιστή με υψηλές απώλειες Joule. Πολύ μεγάλες ροές ρευμάτων (>1 kA) που παράγονται στις αντιστάσεις των αγωγών των τυλιγμάτων, (και λόγω του κυρίου πεδίου σκέδασης) μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση των απωλειών δινορευμάτων, αφού σε τέτοιες περιπτώσεις έχουμε ανάπτυξη δινορευμάτων ακόμα και στα τοιχώματα του δοχείου του μετασχηματιστή.

Γενικά, πρέπει να σημειωθεί ότι τα υλικά για τα τυλίγματα δεν έχουν βελτιωθεί τόσο πολύ όσο αυτά για τον πυρήνα. Παρόλα αυτά, η συνεχής εξέλαση εν ψυχρώ που έχει υιοθετηθεί για την παραγωγή ελασμάτων, μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο καλή ποιότητα. Η διαδικασία περιέλιξης των αγωγίμων πηνίων και η προσαρμογή τους στον συναρμολογημένο πυρήνα παίζει μεγάλο

⁶ Κατά τον ίδιο τρόπο που επιτυγχάνεται η μείωση των απωλειών από δινορευμάτα στον πυρήνα, μέσω της δημιουργίας ενός πυρήνα από λεπτά ελάσματα υψηλής ειδικής αντίστασης

ρόλο στην αποδοτικότητα του μετασχηματιστή, και αποτελεί μια δύσκολη εργασία, που πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό. Η μηχανική περιέλιξη, κάτω από την επίβλεψη ενός χειριστή, χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο, ειδικά για μικρότερα μεγέθη.

Τέλος, μια ακόμα ενδιαφέρουσα τεχνολογία, από άποψη αποτελεσματικότητας, είναι ο μετασχηματιστής με υπεραγωγίμα τυλίγματα, που ψύχεται με άζωτο. Ένας αριθμός τέτοιων μετασχηματιστών έχει παραχθεί. Για την τεχνολογία των υπεραγωγίμων μετασχηματιστών γίνεται εκτενής αναφορά στο πέμπτο κεφάλαιο.

2.3.3 Επιπρόσθετες απώλειες λόγω αρμονικών

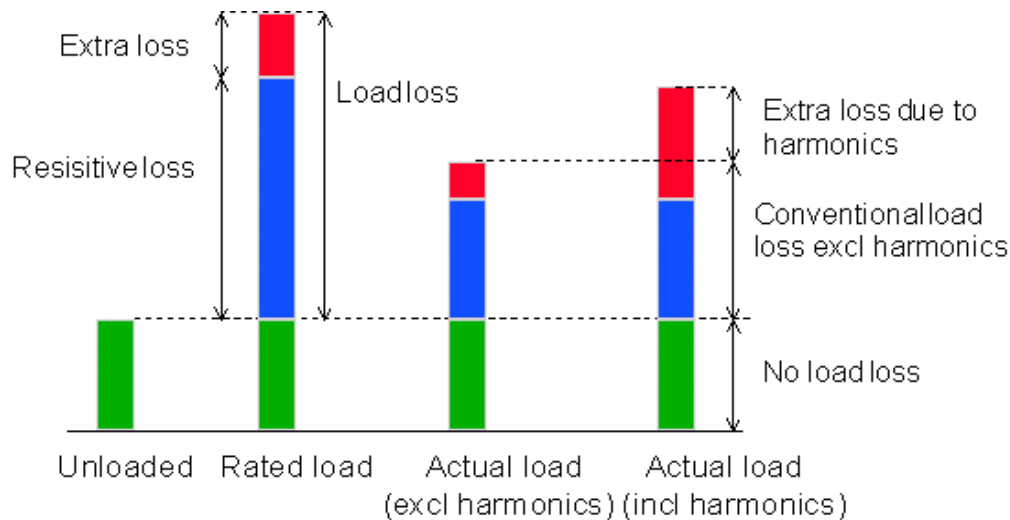
Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει ένας αυξανόμενος προβληματισμός για την αρμονική παραμόρφωση και τα αποτελέσματά της στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συγκεκριμένα δίκτυα είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν στη βασική συχνότητα των 50 Hz. Σχεδόν όλες οι βιομηχανίες, όμως, έχουν μη γραμμικές απώλειες. Τα μη γραμμικά φορτία στις βιομηχανίες αποτελούν μια σημαντική διαφορά μεταξύ των περιπτώσεων των μετασχηματιστών διανομής που είναι εγκατεστημένοι στις βιομηχανίες και αυτών που είναι εγκατεστημένοι στις δημόσιες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Τα φορτία αυτά παράγουν υψηλά επίπεδα αρμονικών ρευμάτων, δηλαδή ρευμάτων με συχνότητα πολλαπλάσια της βασικής. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, οι απώλειες φορτίου είναι κυρίως απώλειες αντίστασης (I^2R) και απώλειες δινορευμάτων. Εξαιτίας των αρμονικών, όχι μόνο οι απώλειες δινορευμάτων, αλλά και οι απώλειες αντίστασης αυξάνονται. Εξ ορισμού, όμως, η αύξηση απωλειών λόγω των αρμονικών συνήθως ονομάζεται “**extra losses**”.

Τα τυπικά μη γραμμικά φορτία περιλαμβάνουν:

- Ηλεκτρονικούς Υπολογιστές
- Συστήματα UPS, για την αδιάλειπτη παροχή ρεύματος
- Variable Speed Drives (VSDs), για την ακριβή ρύθμιση των στροφών των κινητήρων
- Εναλλάκτες (Inverters)

Τα αρμονικά ρεύματα οδηγούν σε υψηλότερες απώλειες στους μετασχηματιστές και συνεπώς σε μια υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Οι επιπρόσθετες απώλειες εξαρτώνται από το φάσμα των αρμονικών του ρεύματος του φορτίου.

Τα υψηλότερης συχνότητας στοιχεία του ρεύματος του φορτίου, προκαλούν τις εν λόγω απώλειες, επειδή οι αρμονικές δεν διαπερνούν πλήρως τον αγωγό, αλλά ταξιδεύουν στην περιφέρειά του. Αυτό ονομάζεται *επιδερμικό φαινόμενο* (skin effect)⁷. Όταν παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό, η ωφέλιμη περιοχή διατομής του αγωγού μειώνεται, ενώ παράλληλα αυξάνονται η αντίσταση και οι απώλειες I^2R , οι οποίες αυξάνουν τη θερμοκρασία του αγωγού και όλων των στοιχείων που συνδέονται με αυτόν.



Σχήμα 2.12: Επιπρόσθετες απώλειες (extra losses) εξαιτίας των αρμονικών.

Όπως αναφέρθηκε, τα αρμονικά ρεύματα αυξάνουν και τις απώλειες δινορευμάτων στους μετασχηματιστές. Οι απώλειες αυτές μας ενδιαφέρουν περισσότερο όταν έχουμε αρμονικές, αφού αυξάνονται με το τετράγωνο της συχνότητας. Οι απώλειες κενού φορτίου επηρεάζονται από τις αρμονικές μόνο σε επίπεδο συνεισφοράς σε τάση και όχι σε ρεύμα. Συνεπώς, η αύξηση των απωλειών κενού φορτίου εξαιτίας των αρμονικών είναι συνήθως ασήμαντη. Αντίθετα, τα αρμονικά ρεύματα επηρεάζουν κατά πολύ τις απώλειες φορτίου.

⁷ Ως γνωστόν η ικανότητα μεταφοράς ρεύματος ενός καλωδίου μειώνεται όταν το ρεύμα που μεταφέρεται περιέχει ανώτερες αρμονικές. Αυτή η μείωση οφείλεται στις αυξημένες θερμικές απώλειες που εμφανίζουν τα καλώδια όταν διαρρέονται από ρεύματα υψηλότερων συχνοτήτων, καθώς σε αυτές τις συχνότητες οι ωμικές αντιστάσεις των καλωδίων είναι μεγαλύτερες λόγω του επιδερμικού φαινομένου και του φαινομένου γειτνίασης που εξαρτώνται από τη συχνότητα.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν δημοσιευμένες αρκετές εργασίες στις οποίες υπολογίζεται η ικανότητα μεταφοράς ρεύματος που περιέχει ανώτερες αρμονικές για συγκεκριμένους τύπους καλωδίων. Στο σύνολο των εργασιών, ο υπολογισμός της ικανότητας μεταφοράς γίνεται μέσω του υπολογισμού ενός συντελεστή απομείωσης (derating factor), ο οποίος εκφράζει τη μείωση της ικανότητας μεταφοράς λόγω της ύπαρξης των αρμονικών και εξαρτάται εκτός από τη συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και από την αρμονική υπογραφή.

Εκτός από τις πολλαπλάσιες της 3^{n5} αρμονικής⁸, ένας μετασχηματιστής που τροφοδοτεί έναν μετατροπέα (converter) ή έναν inverter μπορεί να έχει πρόβλημα και με τις υπόλοιπες αρμονικές. Οι τυπικές αρμονικές (h) σε μια ημιαγώγιμη γέφυρα μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση 2.5:

$$h = (p * k) \pm 1 \quad (2.5)$$

όπου p είναι ο αριθμός παλμών της γέφυρας⁹ και είναι ακέραιος 1,2 ... , n.

Εξαιτίας των αρμονικών ρευμάτων στο φορτίο των μετασχηματιστών στις βιομηχανίες και σε αυτούς με υψηλότερη φόρτιση, μπορεί να δικαιολογηθεί η μικρότερη διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών αυτών αφού οι αρμονικές είναι υπεύθυνες για τις μεγαλύτερες απώλειες φορτίου και συνεπώς για την υψηλότερη θερμοκρασία στους μετασχηματιστές (η οποία και οδηγεί στη μείωση της διάρκειας ζωής τους).

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλούνται από αρμονικές υπάρχουν μέθοδοι τέτοιες ώστε να μειώσουν, να εξαλείψουν ή να μην επιτρέψουν τη διείσδυση των αρμονικών στο δίκτυο. Η τοποθέτηση φίλτρων αποτελεί μια λύση για την αντιμετώπιση των αρμονικών. Τα φίλτρα μπορεί να είναι ενεργά ή παθητικά. Τα ενεργά φίλτρα είναι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και μπορεί να συνδέονται παράλληλα ή σε σειρά με το φορτίο. Τα παθητικά φίλτρα είναι συνδυασμός πυκνωτών και πηνίων. Μια άλλη μέθοδος είναι η χρησιμοποίηση κατάλληλων τεχνικών παλμοδότησης των μετατροπέων, όπως είναι για παράδειγμα η τεχνική Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών.

Οι **μετασχηματιστές με συντελεστή K** είναι μια πρόσφατη εξέλιξη και η κατασκευή τους αποτελεί μια λύση στο πρόβλημα των αρμονικών. Οι μετασχηματιστές αυτοί δεν είναι αναγκαίο να είναι πιο αποδοτικοί από τους μετασχηματιστές χωρίς συντελεστή K. Ο συντελεστής αυτός είναι μια σταθερά και λαμβάνει υπόψη την επίδραση των αρμονικών¹⁰. Οι μετασχηματιστές με

⁸ Η 3^{n1} αρμονική της τάσης είναι πάντα παρούσα στους μετασχηματιστές λόγω της μη γραμμικότητας του πυρήνα τους. Οι αρμονικές που είναι πολλαπλάσιες της 3^{n5} αρμονικής (3^{n1} , 9^{n1} , 15^{n1} κ.τ.λ.) είναι η σημαντικότερη αιτία θέρμανσης, αφού τα φασικά ρεύματα προστίθενται στον ουδέτερο αγωγό. Το μέγεθος του ρεύματος που παράγουν οι αρμονικές αυτές μπορεί να πλησιάσει το διπλάσιο του φασικού ρεύματος. Αυτό προκαλεί την υπερθέρμανση του ουδέτερου αγωγού, και αυτό επειδή ο ουδέτερος αγωγός στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδιάζεται για τη διέλευση ίδιας έντασης ρεύματος με αυτό των φασικών αγωγών.

⁹ Για γέφυρες 6 παλμών οι τυπικές αρμονικές είναι : 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 κ.τ.λ.

Για γέφυρες 12 παλμών οι τυπικές αρμονικές είναι : 11, 13, 23, 25 κ.τ.λ.

¹⁰ Μια τιμή του συντελεστή K κοντά στο 13 ή μικρότερη κρίνεται αρκετά ικανοποιητική.

συντελεστή K το αναγράφουν στην πινακίδα τους και ο υπολογισμός του γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$K = \frac{\sum (I_h * h)^2}{\sum (h)^2} \quad (2.6)$$

όπου I_h είναι το ρεύμα υπό την επίδραση των αρμονικών και h είναι η τιμή της αρμονικής.

Ο μετασχηματιστής με συντελεστή K είναι ειδικά σχεδιασμένος με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να αντεπεξέρχεται στην αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας των αρμονικών. Έχει ιδιαίτερη μόνωση στους αγωγούς του, για να αντιμετωπίζει το επιδερμικό φαινόμενο ή διαθέτει μεγαλύτερο ουδέτερο αγωγό στο δευτερεύον τύλιγμα για να αντεπεξέρχεται στη αύξηση του ρεύματος λόγω της 3^{ης} αρμονικής. Τέλος, διαθέτει αρκετά καλή μόνωση στα ελάσματα του πυρήνα του για να ελαττώσει τις απώλειες λόγω δινορευμάτων.

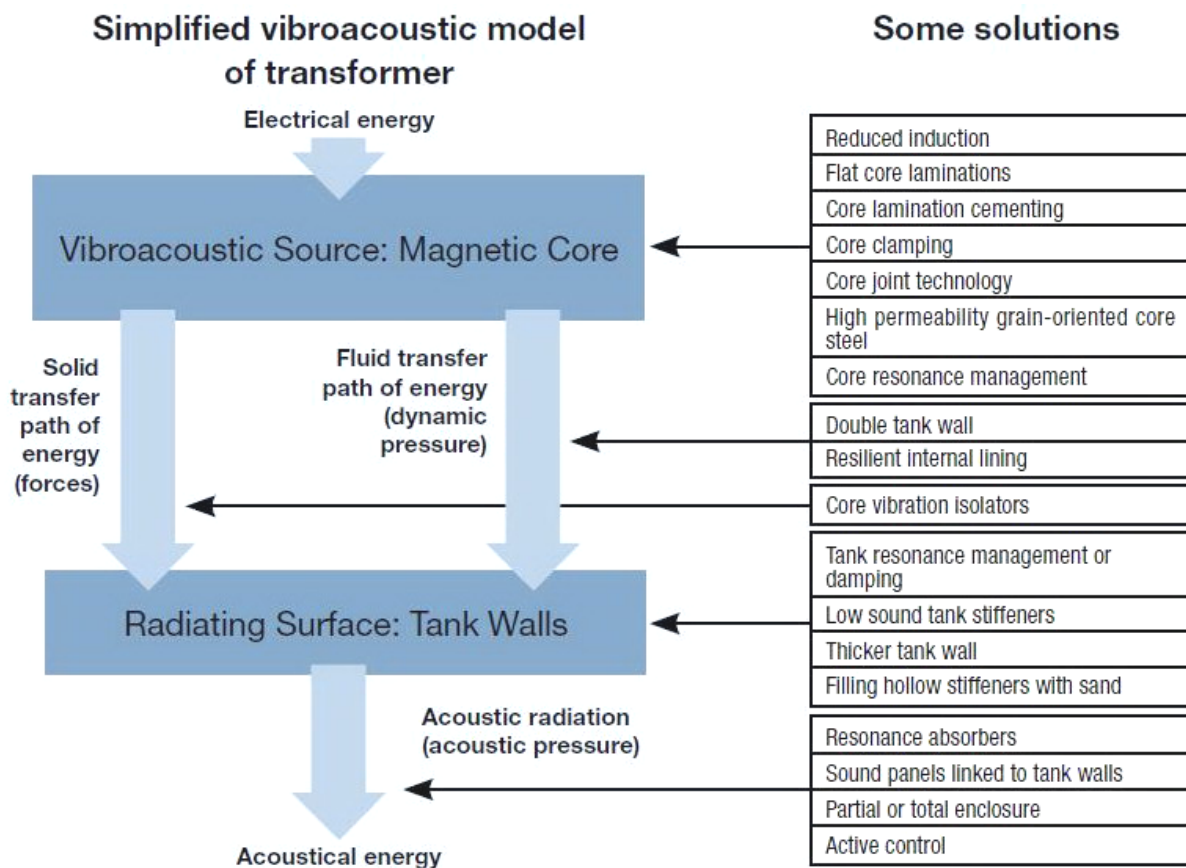
2.4 Θόρυβος στους Μ/Σ διανομής

Η πρωτογενής πηγή για τη δημιουργία θορύβου στους μετασχηματιστές είναι οι ταλαντώσεις του πυρήνα τους, ως συνέπεια της μεταβολής του μήκους των ελασμάτων τους, λόγω μαγνητοσυστολής¹¹ (ή μαγνητικής συναίρεσης). Οι ταλαντώσεις αυτές μεταβιβάζονται μέσω του λαδιού στο δοχείο του μετασχηματιστή και από εκεί ακτινοβολούνται ακουστικά στο περιβάλλον. Όπως επιβεβαιώνεται από μετρήσεις για την ίδια μαγνητική επαγωγή, ίδια ποιότητα ελασμάτων και επομένως ίδια ειδική διέγερση μαγνητοσυστολής, προκύπτει ότι η ισχύς του θορύβου του μετασχηματιστή είναι μια συνεχής συνάρτηση του βάρους του πυρήνα και επομένως της ισχύος του. Γενικά, ένας μετασχηματιστής με χαμηλές απώλειες κενού φορτίου παρουσιάζει χαμηλό θόρυβο.

Έχουν γίνει επανειλημμένες προσπάθειες για τη μείωση του θορύβου υποβιβάζοντας τη μαγνητοσυστολή των ελασμάτων. Ένα σημαντικό βήμα

¹¹ Όταν το ρεύμα αντιστρέφει την πολικότητά του 50 φορές το δευτερόλεπτο, ο σιδερένιος πυρήνας του μετασχηματιστή παθαίνει μαγνητοσυστολή (Magnetostriction) δύο φορές σε κάθε κύκλο του ρεύματος. Με άλλα λόγια, 100 φορές το δευτερόλεπτο, τα επαγόμενα πεδία κάνουν τον πυρήνα να μεταβάλλει το μέγεθός του ελαφρά, - ένας πυρήνας μεγέθους ενός μέτρου διαστέλλεται ή συστέλλεται μόνο κατά ένα μικρόμετρο - αλλά έστω και αυτή η μικρή διαστολή είναι ικανή να παράγει ένα βόμβο συχνότητας 100 Hz.

προς αυτή την κατεύθυνση έγινε με την εισαγωγή ελασμάτων προσανατολισμένων κόκκων και προκαθορισμένης κατευθύνσεως, τα οποία χρησιμοποιούνται και σήμερα, ενώ χρησιμοποιούνται και οι πυρήνες από άμορφο σίδηρο, χωρίς όμως ικανοποιητικά αποτελέσματα από πλευράς θορύβου. Νέες έρευνες έδειξαν ότι η διάκριση των ελασμάτων του πυρήνα από ακουστικής άποψης μπορεί να βελτιωθεί, εάν στη θέση της μαγνητοσυστολής, δηλαδή της μεταβολής του μήκους $\epsilon = \Delta l/l$, προσδιοριστεί η ταχύτητα ταλαντώσεων $v = d\epsilon/dt$ σε επίπεδα δοκίμια αλλά και σε δοκίμια ελάσματος που έχουν καμθεί.



Σχήμα 2.13: Μετάδοση και τρόποι μείωσης του θορύβου στους μετασχηματιστές

Για τη μείωση της στάθμης θορύβου στους μετασχηματιστές διανομής (και στους μετασχηματιστές συστήματος¹²), έγινε ικανοποιητική πρόοδος τα τελευταία χρόνια με τη χρήση διαφόρων μεθόδων, όπως φαίνεται στο σχήμα

¹² Στους μετασχηματιστές συστήματος μειώνεται η μαγνητική επαγωγή για να επιτευχθεί μείωση της στάθμης του θορύβου. Το βάρος του πυρήνα όμως μεταβάλλεται περίπου αντιστρόφως ανάλογα με τη μαγνητική επαγωγή. Αυτή η ακριβή λύση συνιστάται μόνο όταν οι απώλειες και ο θόρυβος αξιολογούνται σε υψηλό βαθμό και έχουν εξαντληθεί όλες οι άλλες λύσεις. Στους μετασχηματιστές αυτούς, επίσης τα ψυκτικά σώματα τοποθετούνται μακριά από το δοχείο για την αποφυγή μετάβασης των ταλαντώσεων σ' αυτά και άρα ενίσχυση της έντασης του θορύβου.

2.13 αλλά κυρίως με τη χρήση βελτιωμένων μεθόδων στοίβαξης και σύσφιξης του πυρήνα και με κατάλληλη επιλογή του ύψους της τιμής της επαγωγής. Χρησιμοποιούνται επίσης διατάξεις τοποθέτησης του ενεργού μέρους έτσι ώστε το δοχείο να απομονώνεται από ταλαντώσεις ή τοποθετούνται στο δοχείο τοιχώματα απόσβεσης θορύβου, κυρίως από πλάκες με ελάχιστη απορροφητικότητα του ήχου.

2.5 Ψύξη των Μετασχηματιστών διανομής

Σύμφωνα με τα πρότυπα ANSI και IEEE, προκειμένου οι μετασχηματιστές διανομής να έχουν φυσιολογική λειτουργία, και κατ' επέκταση φυσιολογική διάρκεια ζωής, πρέπει να έχουν μέση ανύψωση θερμοκρασίας στα τυλίγματα, τέτοια που να μην ξεπερνάει του 65 °C ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Δηλαδή η διαφορά της θερμοκρασίας περιβάλλοντος από τη μετρούμενη θερμοκρασία στον Μ/Σ δεν πρέπει να είναι πάνω από το όριο που τίθεται. Παλιότερα μοντέλα που πρακτικά χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα, έχουν σαν όριο τη θερμοκρασία των 55 °C.

Η θερμότητα λοιπόν, η οποία παράγεται στους μετασχηματιστές πρέπει να απάγεται με κάποια μέθοδο ψύξης, για την αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων. Ανάλογα με τη μέθοδο ψύξης που χρησιμοποιείται, οι μετασχηματιστές διακρίνονται στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου και στους μετασχηματιστές λαδιού (οι οποίοι είναι και πιο αποδοτικοί). Οι ελαιόψυκτοι μετασχηματιστές είναι οι πιο συνηθισμένοι και αποτελούν το 80% του



συνολικού πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής στη βιομηχανία και το 99% του συνολικού πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής των εταιρειών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

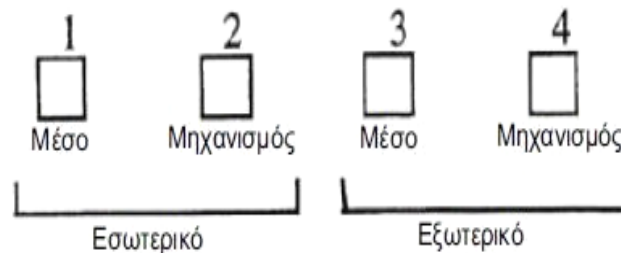
Οι μετασχηματιστές λαδιού είναι εμβαπτισμένοι σε λάδι, το οποίο ψύχει τα τυλίγματα και ταυτόχρονα λειτουργεί ως ηλεκτρική μόνωση. Τα τυλίγματα και ο πυρήνας αποτελούν

τις κύριες πηγές θερμότητας, αν και υπάρχουν εσωτερικά μεταλλικά μέρη που θερμαίνονται εξίσου. Είναι απαραίτητη η ύπαρξη αγωγών και περασμάτων

κοντά στις πηγές θερμότητας ώστε να επιτρέπεται η ροή του ψυκτικού μέσου και να απάγεται έτσι η παραγόμενη θερμότητα.

Η φυσική κυκλοφορία του λαδιού μέσα σε έναν μετασχηματιστή και συνεπώς η μεταφορά θερμότητας αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως *φαινόμενο θερμοσίφωνα*, αφού θυμίζει τη λειτουργία του κλασικού θερμοσίφωνα. Η θερμότητα μεταφέρεται στο ντεπόζιτο του λαδιού του μετασχηματιστή και τελικά απάγεται στο περιβάλλον. Επίσης, έχουν επικρατήσει και ειδικές διατάξεις απαγωγής θερμότητας που τοποθετούνται στην επιφάνεια των μετασχηματιστών και μπορεί να είναι είτε σωλήνες όπου ρέει το λάδι, είτε εξέχουσες μεταλλικές λωρίδες οι οποίες οπτικά θυμίζουν σώμα καλοριφέρ. Με αυτές τις τεχνικές αποφεύγεται ουσιαστικά η ανάγκη για περισσότερο μονωτικό λάδι και συνεπώς δεν είναι υποχρεωτική η αύξηση του μεγέθους του ντεπόζιτου του λαδιού.

Σύμφωνα με πρότυπο του IEEE οι μετασχηματιστές διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ψύξης τους και η κάθε κατηγορία περιγράφεται με τέσσερα γράμματα. Η γενική μέθοδος που γίνεται η περιγραφή αυτή φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.14: Η σειρά των τεσσάρων γραμμάτων κατά το πρότυπο κατηγοριοποίησης ψύξης.

Στο σχήμα 2.14 παρατηρούμε ότι τα γράμματα αφορούν το ψυκτικό μέσο (λάδι, ή ότι άλλο) και το μηχανισμό που γίνεται η απαγωγή θερμότητας, που μπορεί να είναι με *φυσική ροή* (απλή κυκλοφορία του μέσου) ή *εξαναγκασμένη ροή* (κυκλοφορία με χρήση αντλιών ή άλλων διατάξεων). Ακόμα, στο ίδιο σχήμα βλέπουμε ότι τα δυο πρώτα γράμματα αφορούν το εσωτερικό του μετασχηματιστή και τα δυο τελευταία το εξωτερικό του.

Αυτός ο απλός τρόπος ταξινόμησης των μετασχηματιστών χρησιμοποιείται ευρύτατα σε ΗΠΑ και Ευρώπη και αποτελεί μια αρκετά καλή μέθοδο, αφού με τέσσερα γράμματα λαμβάνουμε σημαντικές πληροφορίες για το σύστημα ψύξης ενός Μ/Σ.

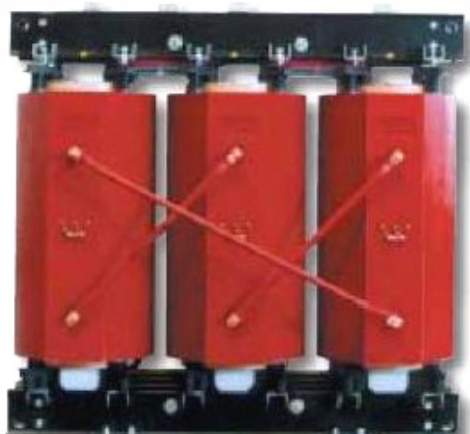
Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα γράμματα που χρησιμοποιούνται και τι συμβολίζουν αυτά:

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

Σχήμα 2.15: Τα γράμματα που χρησιμοποιούνται στην ψύξη και ο συμβολισμός τους.

Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις στις οποίες η χρήση των μετασχηματιστών λαδιού θεωρείται επισφαλής λόγω κινδύνου πυρκαγιάς ή όταν υπάρχουν απαιτήσεις για αποφυγή μόλυνσης του περιβάλλοντος.

Συναντώνται για παράδειγμα σε χαρτοβιομηχανίες, αποθήκες καυσίμων και εργοστάσια τροφίμων. Στους μετασχηματιστές αυτούς το ψυκτικό μέσο είναι ο αέρας, ενώ χρησιμοποιούνται επιπλέον για ηλεκτρική μόνωση εποξική ρητίνη



ή χαρτιά, διαποτισμένα με κατάλληλες ουσίες. Αν ένας μετασχηματιστής ξηρού τύπου είναι εγκατεστημένος σε κλειστό χώρο, η θερμότητα που αποδίδει στο περιβάλλον πρέπει να απάγεται είτε με φυσική κυκλοφορία αέρα είτε, όταν αυτή δεν επαρκεί, με βεβαιασμένη κίνηση αέρα.

Παρόλο το γεγονός όμως, ότι κάθε μετασχηματιστής έχει επαρκές και σύμφωνα με τα πρότυπα σύστημα ψύξης, μερικά ευαίσθητα μέρη του δεν παύουν να επιδέχονται θερμική γήρανση με την πάροδο του χρόνου.

2.5.1 Ψυκτικά υγρά

Αν ένα σφάλμα οδηγήσει ένα μετασχηματιστή διανομής σε καταστροφή υπάρχει μεγάλος κίνδυνος πυρκαγιάς. Πρέπει λοιπόν να ληφθεί μέριμνα κατά την εγκατάστασή του έτσι ώστε σε περίπτωση διαρροής λαδιού, το λάδι να διοχετευθεί σε ειδική αποχέτευση ώστε να μην συντηρηθεί η πυρκαγιά. Μια παλιότερη επιλογή ήταν η χρήση μη αναφλέξιμων μονωτικών-ψυκτικών υγρών. Το πολυχλωροδιφαινύλιο (PCB) και τα υγρά τα οποία το είχαν ως βάση στη σύνθεσή τους, θεωρούνταν από τα πιο αξιόπιστα μονωτικά υγρά για μετασχηματιστές λόγω των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων και της πυραντοχής τους¹³.



Σχήμα 2.16: Ρύπανση από κατεστραμμένο Μ/Σ διανομής.

Ωστόσο το PCB διασπάται δύσκολα και συσσωρεύεται στην τροφική αλυσίδα, με αποτέλεσμα να αποτελεί απειλή για τη δημόσια υγεία. Επιπλέον η καύση του προκαλεί εκπομπή αερίων που μπορεί να περιέχουν τοξικές ουσίες. Τα συνθετικά αυτά υγρά θεωρήθηκαν ως επικίνδυνες τοξικές απειλές (δηλαδή ανήκουν στους Έμμονους Οργανικούς Ρύπους - Persistent Organic Pollutants) από τη συνθήκη της Στοκχόλμης του 2001 (υπογεγραμμένη από 176 χώρες,

¹³ Από τις αρχές της δεκαετίας του '50 κατασκευάστηκαν μετασχηματιστές με πλήρωση Askarel ή όπως αλλιώς λέγεται PCBs (Poly-Chlorinated-Biphenyls), με τις εμπορικές ονομασίες Clophen (κλοφέν), Pyralen κλπ. γιατί το συμβατικό λάδι διασπάται σε εύφλεκτα αέρια, όταν προκληθεί εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Το Askarel, σε αντίθεση με το λάδι, δε διασπάται σε αέρια. Επομένως δε δημιουργείται υπερπίεση, η οποία θα οδηγούσε σε διάρρηξη του δοχείου του μετασχηματιστή, σε ανάφλεξη των αερίων και στη συνέχεια σε έκρηξη. Το Askarel όμως, όπως αποδείχτηκε είναι άκρως τοξικό και επικίνδυνο για την υγεία. Σχεδόν σε όλες τις χώρες του κόσμου χρησιμοποιήθηκαν μετασχηματιστές με πλήρωση Askarel, κυρίως σε μετασχηματιστές διανομής που τοποθετούνται σε εσωτερικούς χώρους (κατοικίες, εργοστάσια κ.λπ.).

μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα) και τα περισσότερα κράτη επέβαλαν ένα πρόγραμμα για την αφαίρεση όλων των μετασχηματιστών που χρησιμοποιούν PCB, γι αυτό δε χρησιμοποιείται πλέον. Σήμερα, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο ορυκτό ή συνθετικό (σιλικονούχο) λάδι.

2.6 Θερμική γήρανση των μετασχηματιστών

Η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των μετασχηματιστών, είναι γενικά μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που μπορεί να έχουν οι μηχανικοί, καθώς επιφέρει οικονομικά και τεχνικά οφέλη.

Οι μετασχηματιστές διανομής ειδικότερα, μπορούν να διανέμουν την ισχύ λειτουργίας τους χωρίς να παρουσιάζεται αύξηση των θερμοκρασιακών ορίων υπό τις παρακάτω συνθήκες:

- Η τάση στο δευτερεύον να μην ξεπερνά το 105% της ονομαστικής τάσης λειτουργίας.
- Ο συντελεστής φορτίου ($\cos\phi$) είναι $\geq 0,8$
- Η συχνότητα λειτουργίας να μην είναι κάτω του 95% της ονομαστικής (50 ή 60 Hz)

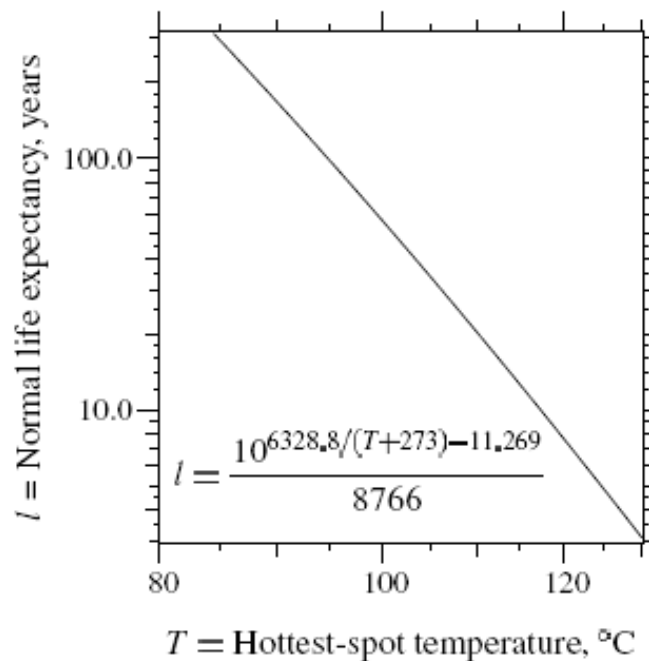
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία των τυλιγμάτων που ονομάζεται **hot spot**¹⁴ η οποία και δεν πρέπει να ξεπερνάει τους 80 °C ως προς το περιβάλλον. Έτσι, π.χ. για θερμοκρασία περιβάλλοντος 30 °C, θα έχουμε μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, hot spot 110 °C. Το hot spot είναι στοιχείο που πρέπει να λάβει σοβαρά υπόψη του ο μελετητής και ο κατασκευαστής του μετασχηματιστή, για να αποφευχθούν τοπικές υπερθερμάνσεις που θα οδηγήσουν σε πρόωρη γήρανση των μονωτικών υλικών στο σημείο αυτό, θα επιφέρουν δυσλειτουργία στο μετασχηματιστή και τελικά την καταστροφή του¹⁵. Αυτός ο κίνδυνος μπορεί είτε να παρουσιαστεί σε σύντομο χρονικό διάστημα, είτε να προέρχεται από αθροιστική φθορά

¹⁴ Βασισμένοι στο πρότυπο IEC 60354 για τους μετασχηματιστές λαδιού και στο πρότυπο IEC 60905 για τους μετασχηματιστές ξηρού τύπου, είναι δυνατό να υπολογιστεί η απώλεια ζωής ενός μετασχηματιστή εξαιτίας της θερμοκρασίας. Τα υπολογιστικά μοντέλα που παρέχονται σε αυτά τα πρότυπα είναι βασισμένα **στο πιο ζεστό σημείο των τυλιγμάτων. Αυτό το σημείο ονομάζεται “hot spot”**, και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση μιας σχετικής τιμής του ρυθμού της θερμικής γήρανσης του μετασχηματιστή.

¹⁵ Στην πραγματικότητα, η ζωή ενός μετασχηματιστή δεν εξαρτάται ΜΟΝΟ από το “hot spot” στα τυλίγματα. Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από έκτακτα περιστατικά, όπως οι υπερτάσεις, τα βραχυκυκλώματα, οι υπερφορτίσεις έκτακτης ανάγκης, κτλ.

χρόνων στον μετασχηματιστή. Η θερμοκρασία αυτού του σημείου δεν μπορεί να μετρηθεί και η μέτρησή του με θερμοστοιχεία γενικά αποφεύγεται για διηλεκτρικούς λόγους. Αν το hot spot από την κατασκευή του μετασχηματιστή έχει υψηλή θερμοκρασία, πρέπει να προβλεφθούν πρόσθετοι δίαυλοι ψύξης απ' ότι απαιτούνται για τον υπολογισμό της προδιαγραφόμενης υπερύψωσης μέσης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων, ή να χρησιμοποιηθεί μικρότερη πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα.

Γίνεται συνεπώς κατανοητό, ότι η καλή λειτουργία και η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή διανομής (και γενικά κάθε μετασχηματιστή) είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη θερμοκρασία του. Στο σχήμα 2.17 φαίνεται η γραφική παράσταση της διάρκειας ζωής ενός μετασχηματιστή σε έτη, συναρτήσεως της μέγιστης αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας σε °C, καθώς επίσης και η μαθηματική σχέση που συνδυάζει τα δύο μεγέθη από την οποία προκύπτει το γράφημα:



Σχήμα 2.17: Γραφική παράσταση της διάρκειας ζωής ενός Μ/Σ διανομής ως προς τη μέγιστη θερμοκρασία του.

Στο σχήμα παρατηρούμε ότι για μέγιστη θερμοκρασία 110 °C (δηλ για θερμοκρασία περιβάλλοντος 30 °C και 80 °C hot spot, που είναι το ενδεικνυόμενο όριο), έχουμε διάρκεια ζωής περίπου ίση με 20 χρόνια.

Λόγω όμως των εποχιακών και των ημερήσιων μεταβολών στο φορτίο που εξυπηρετούν οι μετασχηματιστές διανομής, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι κατά κύριο λόγο αρκετά χαμηλές, ώστε η διάρκεια ζωής

των μετασχηματιστών να περιορίζεται σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα. Αποδεικνύεται γενικά ότι ένας μέσος μετασχηματιστής ελαίου που λειτουργεί με το 50% του ονομαστικού RMS φορτίου έχει διάρκεια ζωής περίπου 30 χρόνια, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 5,8 °C επιφέρει μείωση στα 23,7 χρόνια (μείωση της τάξης του 21%).

Για οικονομικοτεχνικούς λόγους οι μετασχηματιστές διανομής κατασκευάζονται έτσι ώστε να μπορούν να λειτουργούν σε σημαντικές υπερφορτώσεις για σύντομες περιόδους του έτους. Όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι χαμηλή υπάρχει η δυνατότητα μεγαλύτερης υπερφόρτωσης των μετασχηματιστών. Έτσι λοιπόν σε περιοχές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη αιχμή φορτίου τη χειμερινή περίοδο, μπορούμε να έχουμε μικρότερους μετασχηματιστές, απ' ό,τι θα είχαμε αν η ίδια μέγιστη αιχμή παρουσιαζόταν τη θερινή περίοδο. Στα πρότυπα που χρησιμοποιούνται για τα θερμοκρασιακά όρια στους μετασχηματιστές η θερμοκρασία περιβάλλοντος λαμβάνεται ίση με 30 °C.

Για τους μετασχηματιστές λαδιού σχεδιασμένους σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076, ο σχετικός ρυθμός γήρανσης λαμβάνεται ίσος με την μονάδα για μια θερμοκρασία θερμού σημείου (hot spot) 98° C, που αντιστοιχεί σε λειτουργία με θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C και αύξηση του θερμού σημείου κατά 78° C. Η σχετική γήρανση V, σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του hot spot (θ_h) θα είναι:

$$V = (\text{ageing rate at } \theta_h / \text{ageing rate at } 98^\circ \text{ C}) = 2^{(\theta_h - 98) / 6} \quad (2.7)$$

Από τη σχέση 2.7 προκύπτει ότι για τους μετασχηματιστές λαδιού **η σχετική γήρανση διπλασιάζεται** κάθε φορά που έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 6° C πάνω από τη θερμοκρασία του θερμού σημείου (hot spot). Αν το φορτίο και η θερμοκρασία περιβάλλοντος παραμείνουν σταθερά για ένα διάστημα, η σχετική απώλεια ζωής (L) θα είναι:

$$L = V * t \quad (2.8)$$

όπου t είναι το διάστημα αυτό. Μια τιμή μεγαλύτερη του 1 σημαίνει ότι ο μετασχηματιστής γερνά ταχύτερα από το κανονικό.

Για τους μετασχηματιστές ξηρού τύπου σχεδιασμένους σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60726, η διάρκεια ζωής εξαιτίας των θερμικών φαινομένων υπολογίζεται για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C επίσης. Η παράμετρος θ_h (θερμοκρασία hot spot τυλίγματος) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της

μείωσης του χρόνου ζωής υπό κανονικές συνθήκες. Για τους μετασχηματιστές αυτούς η 2.7 γίνεται:

$$V = (\text{ageing rate at } \theta_h / \text{ageing rate at } 98^\circ \text{ C}) = 2^{(\theta_h - 98)/10} \quad (2.9)$$

και έτσι προκύπτει ότι για τους μετασχηματιστές ξηρού τύπου, ο σχετικός ρυθμός γήρανσης διπλασιάζεται για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C πάνω από τη θερμοκρασία του hot spot.

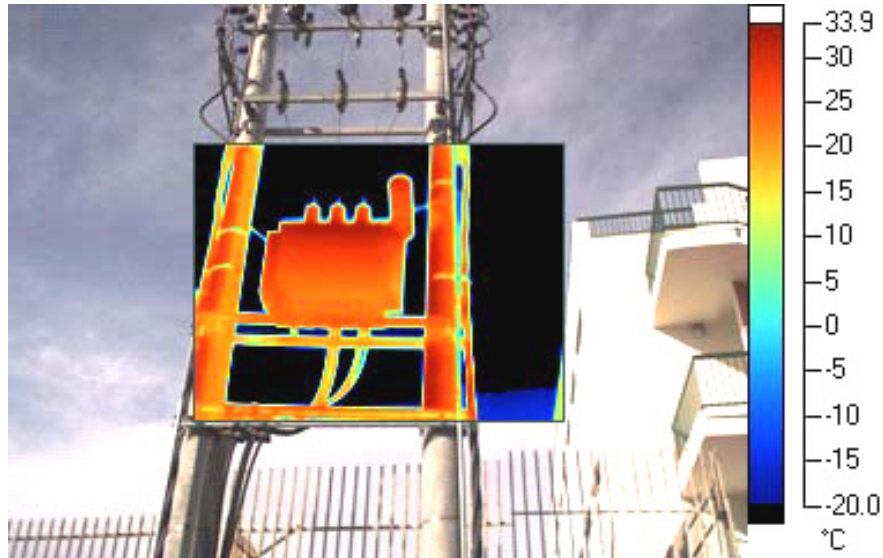
2.6.1 Πρόληψη με θερμογραφία υπερύθρων

Η Θερμογραφία υπερύθρων εξελίσσεται στο πλέον αξιόπιστο διαγνωστικό εργαλείο, που χρησιμοποιείται στην προβλεπτική συντήρηση (predictive maintenance) του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Συντελεί στην αύξηση της διάρκειας ζωής των πάγιων εγκαταστάσεων της ηλεκτροπαραγωγής. Με αυτή τη μέθοδο μπορεί να ελεγχθεί γρήγορα και αποτελεσματικά, εξοπλισμός εσωτερικού χώρου (όπως μετασχηματιστές, πίνακες υποδιανομών, διακόπτες, ασφαλειοδιακόπτες, ρελέ, ακροδέκτες, πηνία, κινητήρες κ.λπ.), αλλά και εξωτερικού χώρου (όπως υποσταθμοί, μηχανισμοί παρεμβολής, μετασχηματιστές, εναέρια δίκτυα κ.λπ.).

Κάθε τμήμα του εξοπλισμού, που μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια, πριν υποστεί βλάβη, παρουσιάζει συνεχώς αυξανόμενη θερμοκρασία, που δεν είναι ορατή από το ανθρώπινο μάτι. Μέσω της θερμογραφίας υπερύθρων ανιχνεύονται τα σημεία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, που πρόκειται να δημιουργηθεί βλάβη, τα οποία δεν ανιχνεύονται με άλλο τρόπο, και έτσι μπορούμε προγραμματίζοντας να προβούμε έγκαιρα σε διορθωτικές ενέργειες πριν το τελικό στάδιο της βλάβης και την ολοκληρωτική καταστροφή του εξοπλισμού. Από ένα θερμογράφημα μπορούμε να δούμε, όχι μόνο την κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια ενός σώματος αλλά να προσδιορίσουμε και να εκτιμήσουμε τη σοβαρότητα των προβλημάτων θερμότητας. Επίσης, από το θερμογράφημα, επεξεργαζόμενο με το κατάλληλο λογισμικό H/Y, μπορούν να εξαχθούν σημαντικά ποσοτικά και ποιοτικά συμπεράσματα, καθώς και γραφικές απεικονίσεις

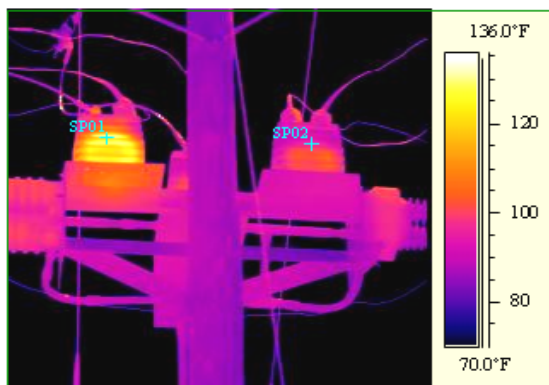
Στους μετασχηματιστές η υπέρυθη επιθεώρηση βοηθάει να εντοπίσουμε θερμά σημεία (hotspots) στα τυλίγματα και πιθανά σφάλματα σε μια τριφασική παροχή αφού όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η θερμοκρασία του hotspot δεν μπορεί να μετρηθεί και η μέτρησή του με θερμοστοιχεία αποφεύγεται για

διηλεκτρικούς λόγους. Με τον εντοπισμό του προβλήματος μπορεί να προγραμματιστεί την αντικατάσταση του μετασχηματιστή που παρουσιάζει το hotspot, λόγω ενός πιθανού εσωτερικού σφάλματος. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπουμε την απρόβλεπτη διακοπή λειτουργίας του δικτύου λόγω βλάβης. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται το θερμόγραμμα και η εικόνα ενός υπερθερμασμένου μετασχηματιστή διανομής.



Σχήμα 2.18: Θερμογραφία εναέριου Μ/Σ διανομής ισχύος 400 kVA

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της θερμογραφίας υπερύθρων, είναι ότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται, ενώ ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός είναι υπό φορτίο (πλήρη λειτουργία), χωρίς το διαγνωστικό όργανο (κάμερα υπερύθρων) να έλθει σε επαφή με τον εξοπλισμό. Μπορούμε λοιπόν, εύκολα και άμεσα, να ελέγξουμε τμηματικά όλο τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό υπό φορτίο, από ασφαλή απόσταση και με ασφαλή τρόπο να κάνουμε την διάγνωση μέσω του θερμογραφήματος. Από τον έλεγχο αυτό θα προκύψει ότι πρέπει να επισκευαστούν μόνο αυτά τα σημεία του εξοπλισμού που υπάρχει πιθανότητα μελλοντικής βλάβης.



Σχήμα 2.19: Θερμόγραμμα και φωτογραφία Μ/Σ ρεύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Εξοικονόμηση Ενέργειας

Οικολογικά και οικονομικά οφέλη

3.1 Περιβαλλοντικά θέματα και Σ.Η.Ε.

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες φαίνεται ότι έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία παγκοσμίως, η μείωση των εκπομπών των αερίων ρύπων, κυρίως του CO₂, τόσο για περιβαλλοντικούς λόγους όσο και για λόγους οικονομίας. Επιπλέον, ιδιαίτερη αξία αποκτά η ανάπτυξη και εισαγωγή νέων τεχνολογιών προς την κατεύθυνση αυτή. Ένας βασικός τομέας στον οποίο μπορεί να συντελεστεί μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου είναι η ηλεκτροπαραγωγή. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, είναι η εγκατάσταση σταθμών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.) ενώ ένας εναλλακτικός τρόπος, είναι η *εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας*¹.

Κάθε κιλοβατώρα (kWh) έχει ένα «εξωτερικό» κόστος, και πιο συγκεκριμένα αυτό που σχετίζεται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις επιπτώσεις στην υγεία, το οποίο δεν αντικατοπτρίζεται πλήρως από την τιμή του ηλεκτρικού. Αυτές οι επιβαρύνσεις στο περιβάλλον και την υγεία, προέρχονται από διάφορες εκπομπές αερίων που δημιουργούνται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Οι ρυπαντικές αυτές ουσίες έχουν ευρείας κλίμακας επιπτώσεις και για τον λόγο αυτό αποτελούν πρωταρχικό μέλημα για τις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες. Μάλιστα, έχει συσταθεί διεθνής οργανισμός με στόχο την μείωση των αερίων ρυπαντικών ουσιών, ο οποίος χρηματοδοτείται από τα Ηνωμένα Έθνη. Επίσης, προς την κατεύθυνση αυτή στρέφονται και τα κράτη που έχουν προσυπογράψει το Πρωτόκολλο του Κιότο, στο οποίο γίνεται αναφορά στην ενότητα 3.1.2.

Σύμφωνα με τον επόμενο πίνακα, το μέσο εξωτερικό κόστος για την παγκόσμια παραγωγή μπορεί να εκτιμηθεί στα 5 αμερικανικά Σεντ ανά κιλοβατώρα (Cents/kWh). Εξοικονόμηση π.χ. της τάξης των 200 TWh ανά έτος αντιπροσωπεύει, σε χρηματικό αντίτιμο, μείωση 10 δισεκατομμυρίων δολαρίων στο περιβαλλοντικό κόστος.

¹ Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες του ενεργειακού τομέα προκαλούν το 78% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου της παγκόσμιας κοινότητας.

Fuel	External cost [17] US\$ / kWh	Part of generation [18] %	Contribution US\$ / kWh
Coal	8.3	39	3.2
Oil	11.6	8	0.9
Gas	3.8	17	0.6
Nuclear	1.0	17	0.2
Hydro	0.3	17	0.1
Renewable	0.3 – 2.9	2	0.0
Total		100	5.0

Πίνακας 3.1: Το εξωτερικό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για την παγκόσμια παραγωγή, βασισμένο σε 63 μελέτες

3.1.1 Κλιματική αλλαγή

Το φαινόμενο της σταδιακής ανόδου της θερμοκρασίας της γης ονομάζεται κλιματική αλλαγή. Παρότι υπάρχουν κάποιες αβεβαιότητες, έχουν γίνει ορισμένες προβλέψεις για τις πιθανές συνέπειες που θα έχει το φαινόμενο του θερμοκηπίου². Κάποιες από αυτές είναι η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών συνθηκών, η μείωση του όγκου των παγετώνων, η αύξηση της στάθμης της θάλασσας, η ξηρασία, η μείωση των αποθεμάτων νερού, η διάδοση σοβαρών επιδημιών και αρκετές άλλες που θα επιδράσουν αρνητικά τόσο στον άνθρωπο όσο και στην χλωρίδα και την πανίδα γενικότερα. Επομένως, είναι φανερό ότι η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, λόγω των σταθερά αυξανόμενων εκπομπών αέριων ρύπων (Τα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οι χλωροφθοράνθρακες (CFC's), το μεθάνιο (CH₄), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και το όζον (O₃)), μπορεί κάλλιστα να οδηγήσει σε μια βαθιά μεταβολή των όρων για την ύπαρξη της ζωής στη γη. Για τον λόγο αυτό η

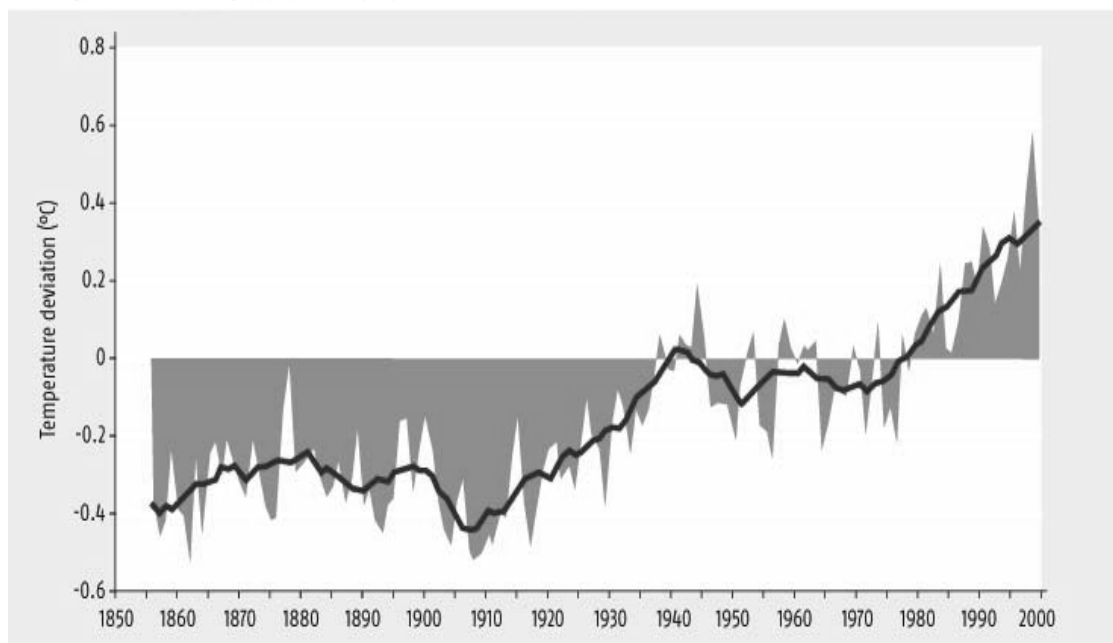
² Το Φαινόμενο του Θερμοκηπίου είναι το ατμοσφαιρικό φαινόμενο που κρατάει την γη θερμή και κατοικήσιμη. Σε απόσταση 25km από την επιφάνεια της γης υπάρχει ένα λεπτό στρώμα από αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το υποξείδιο του αζώτου και το όζον, το οποίο δρα όπως το γυαλί ενός θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα, ενώ επιτρέπει την είσοδο της θερμότητας που μεταφέρει η υπεριώδης ακτίνα του ήλιου, εμποδίζει την έξοδο της θερμότητας προς το διάστημα. Έτσι, η επιφάνεια της γης κρατά ένα ποσό θερμότητας και διατηρεί σταθερή την μέση θερμοκρασία της στους 15 βαθμούς Κελσίου περίπου. Με αυτή την θερμοκρασία μπορεί να διατηρείται η ζωή πάνω στην επιφάνειά της. Χωρίς το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η μέση θερμοκρασία του πλανήτη θα ήταν κατά 35°C χαμηλότερη. Να σημειωθεί βέβαια ότι ο κίνδυνος για τον πλανήτη δεν προκύπτει από το φαινόμενο του θερμοκηπίου καθ' εαυτό, αλλά από την πιθανή ενίσχυσή του.

κλιματική αλλαγή δικαίως θεωρείται σήμερα ένα από τα κυριότερα οικολογικά προβλήματα.

THE WORLD IS GETTING WARMER

Temperature plotted as the deviation from the 1960 to 1990 average

● Yearly deviation ● 10-year smoothed trend



Σχήμα 3.1: Διακύμανση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας (1850-2000)

3.1.2 Το Πρωτόκολλο του Κιότο

Η συνειδητοποίηση της διεθνούς κοινότητας ότι απαιτείται να χαραχτεί μέσα στο διεθνές σύστημα κανόνων ξεχωριστή πολιτική για την προστασία του περιβάλλοντος, ήρθε σταδιακά έπειτα από την καθολική διαπίστωση ότι οι περιβαλλοντικές καταστροφές δεν γνωρίζουν σύνορα, αλλά προσλαμβάνουν παγκόσμιες διαστάσεις. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη να καθοριστούν νομικά πλαίσια και να καθοριστεί κοινή πολιτική για την προστασία της ατμόσφαιρας και του κλίματος. Η κορυφαία ίσως προσπάθεια της διεθνούς κοινότητας προς αυτή την κατεύθυνση, έγινε με την σύνταξη του Πρωτοκόλλου του Κιότο, το οποίο παρά τις όποιες αδυναμίες του, ήταν πραγματικά μια καλή αρχή, βάζοντας τα θεμέλια της διεθνούς προσπάθειας για το κλίμα.

Τον Δεκέμβριο του 1997 η Τρίτη Διάσκεψη των μερών στο Κιότο της Ιαπωνίας, υιοθέτησε μετά από σκληρές και ιδιαίτερες περίπλοκες νομικά και τεχνικά διαπραγματεύσεις το Πρωτόκολλο του Κιότο, το πρώτο και

μοναδικό μέχρι σήμερα Πρωτόκολλο στη Σύμβαση Πλαίσιο για την Κλιματική Αλλαγή. Μέσα από αυτό για πρώτη φορά τίθενται νομικά δεσμευτικοί στόχοι και ποσοστά μείωσης των εκπομπών των κυριότερων αερίων του θερμοκηπίου. Μέτα από επίμονες διαπραγματεύσεις η Τρίτη Διάσκεψη κατέληξε σε διαφοροποιημένους εθνικούς στόχους μειώσεων των εκπομπών μόνο για τα αναπτυγμένα κράτη, υπό τον συλλογικό στόχο του -5% (το 2001, μετά από πιέσεις, γίνεται αποδεκτή η μεταβολή του παγκόσμιου ποσοτικού στόχου μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από -5% σε -2% περίπου) σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, για την περίοδο δέσμευσης 2008-2012.

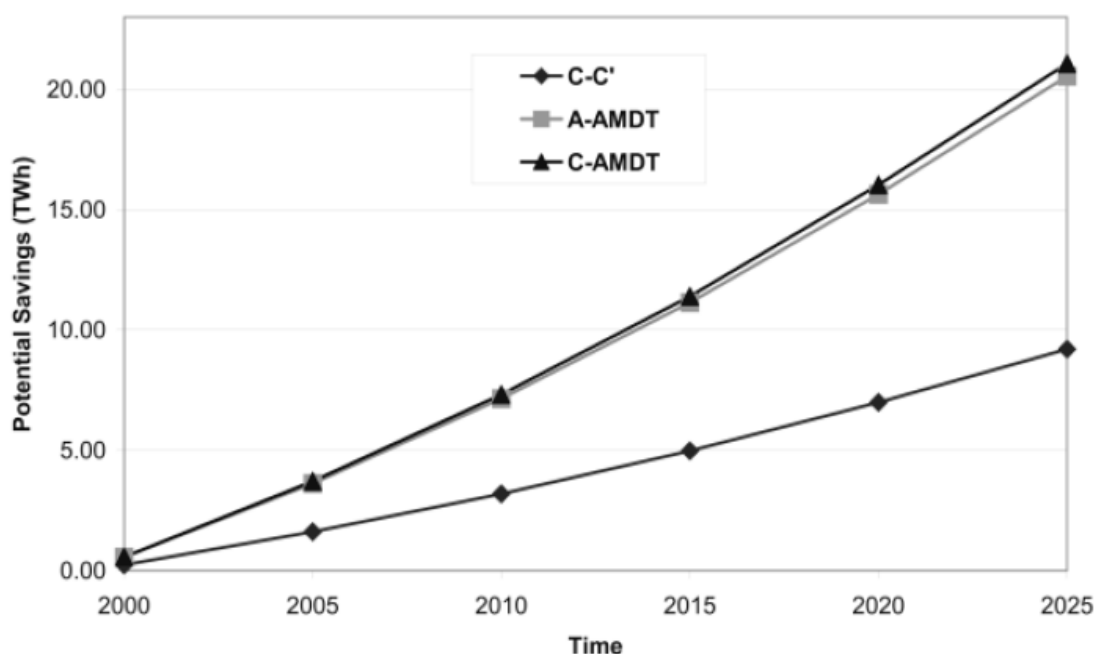
Ο απώτερος σκοπός της διεθνούς κλιματικής πολιτικής, που προωθείται μέσω του πρωτοκόλλου, είναι η σταδιακή μείωση και στην συνέχεια σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε επίπεδο που αποτρέπει την επικίνδυνη ανθρωπογενή παρεμβολή στο κλιματικό σύστημα. Ως απαραίτητη προϋπόθεση και ρύθμιση για την έναρξη ισχύος του Πρωτοκόλλου είναι η επικύρωσή του από βιομηχανικά κράτη τα οποία θα πρέπει να αντιπροσωπεύουν τουλάχιστον το 55% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου το άνθρακα κατά το έτος βάσης (1990). Στα αναπτυγμένα κράτη πρέπει να εγκαινιαστούν αυστηρές πολιτικές ώστε να ανταποκριθούν στις δεσμεύσεις³. Αυτές δύναται να συνδυαστούν και να εξομαλυνθούν οικονομικά κατά την φάση της εφαρμογής με μία σειρά μηχανισμών ευελιξίας, τους οποίους προβλέπει και θεσμοθετεί το Πρωτόκολλο, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως οικονομικώς αποδοτικά εργαλεία διεθνούς συνεργασίας για την επίτευξη του συλλογικού στόχου. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι η από Κοινού Υλοποίηση, ο Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης και η Εμπορία Εκπομπών.

Όσον αφορά τις αδυναμίες του Πρωτοκόλλου, αξίζει να τονισθεί ότι σε κάποια σημεία του δεν θεμελιώνονται ουσιαστικές υποχρεώσεις και τα κράτη μάλλον προτρέπονται παρά δεσμεύονται. Βασικότερο μειονέκτημα είναι ότι δεν προσδιορίζεται μια συγκεκριμένη προθεσμία με καταληκτική ημερομηνία. Το μόνο στο οποίο υποχρεώνει τα μέρη είναι να έχουν επιτύχει έως κάποιο έτος μία ευδιάκριτη πρόοδο σε ότι αφορά τους εθνικούς ποσοτικούς στόχους τους. Όμως δεν προβλέπονται συνέπειες σε περίπτωση αποτυχίας. Επιπρόσθετα, δεν υπάρχουν αυστηρά εργαλεία ελέγχου της προόδου των εθνικών κλιματικών πολιτικών.

³ Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι τον Μάρτιο του 2001, οι ΗΠΑ αποχώρησαν από τις διεθνείς διαπραγματεύσεις για το πρωτόκολλο του Κιότο. Μια αποχώρηση με ουσιαστικό και συμβολικό χαρακτήρα αφού είναι η πρώτη χώρα σε εκπομπές ρύπων παγκοσμίως (36,1% των παγκόσμιων εκπομπών κατά το έτος βάσης - 1990)

3.2 Η εξοικονόμηση ενέργειας στην Ε.Ε.

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί έναν από τους βασικούς στόχους της ενεργειακής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των δικτύων κατά την τελική χρήση θα συμβάλει επίσης στη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, στον περιορισμό των εκπομπών CO₂ και άλλων αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και συνεπώς στην πρόληψη των επικινδύνων μεταβολών του κλίματος. Το Έκτο Κοινοτικό Πρόγραμμα Δράσης για το Περιβάλλον (Απόφαση αριθ. 1600/2002/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου) προβλέπει περαιτέρω μειώσεις στα ανώτατα όρια τιμών εκπομπών, για να επιτευχθεί ο μακροπρόθεσμος στόχος της Σύμβασης-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή, που συνίσταται στη σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε επίπεδο το οποίο θα απέτρεπε την επικίνδυνη ανθρωπογενή παρέμβαση στο κλίμα.



Σχήμα 3.2: Δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στην Ε.Ε. αν είχαν εγκατασταθεί μετασχηματιστές διανομής χαμηλών απωλειών από το 2000

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά την τελική χρήση θα καταστήσει δυνατή την εκμετάλλευση του εξοικονομούμενου ενεργειακού κόστους με οικονομικά αποτελεσματικό τρόπο. Τα μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης οδηγούν σε εξοικονόμηση ενέργειας, βοηθώντας έτσι την Κοινότητα να μειώσει την εξάρτησή της από τις εισαγωγές ενέργειας. Επιπλέον, η στροφή προς τεχνολογίες με καλύτερη ενεργειακή απόδοση ενισχύει την καινοτομία

και την ανταγωνιστικότητα της Κοινότητας, όπως υπογραμμίζεται στη Στρατηγική της Λισσαβόνας. Η απελευθέρωση σε επίπεδο τελικών πελατών, των ευρωπαϊκών λιανεμπορικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου, άνθρακα, θέρμανσης (ακόμα και τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης), έχουν σχεδόν παντού επιφέρει βελτίωση της απόδοσης και χαμηλότερο κόστος στην παραγωγή, τη μετατροπή και τη διανομή της ενέργειας.

Το 2006 δημιουργήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση το πρόγραμμα “*Strategies for Development and Diffusion of Energy Efficient Distribution Transformers (SEEDT)*” το οποίο χρηματοδοτείται από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα “*Intelligent Energy – Europe (SAVE)*” και του οποίου στόχος είναι η προώθηση των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών διανομής. Η εκτέλεση του άρχισε την 1^η Ιανουαρίου 2006 και οι δράσεις του περιλαμβάνουν προτάσεις για ενεργειακή κατηγοριοποίηση των Μ/Σ διανομής (labelling), υποχρεωτικά πρότυπα ή εθελοντικές συμφωνίες όπως η ανάπτυξη διαφορετικών μηχανισμών διάχυσης τεχνολογιών στην κατεύθυνση των χρηστών Μ/Σ διανομής όπως οι εταιρείες ηλεκτρισμού, η βιομηχανία, τα κτίρια του τριτογενούς τομέα και οι διαχειριστές κτιρίων.

Οι δράσεις του SEEDT στοχεύουν επίσης στην αντιμετώπιση των εμποδίων για τη διάδοση Μ/Σ διανομής χαμηλών απωλειών. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικά από τα εμπόδια που έγινε προσπάθεια να αντιμετωπισθούν:

- Η έλλειψη ενημέρωσης και ενδιαφέροντος από την πλειοψηφία των ηλεκτρικών εταιρειών, βιομηχανιών και κτιρίων του τριτογενούς τομέα σχετικά με τις τεχνολογίες ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων
- Η έλλειψη πληροφοριών σχετικά με το πραγματικό κόστος και τα οφέλη από την εγκατάσταση και χρήση των ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων
- Το υψηλό κόστος των μετασχηματιστών χαμηλών απωλειών

Οι πρόσφατα ιδιωτικοποιημένες ηλεκτρικές εταιρείες δείχνουν μικρό ενδιαφέρον για προβλήματα με βάθος χρόνου. Συνήθως επιδιώκουν σύντομους χρόνους απόσβεσης των επενδύσεών τους σε σύγκριση με τις πρώην κρατικές εταιρείες των οποίων έχουν καταλάβει τη θέση τους. Γενικώς, οι εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν τις επενδύσεις παγίων.

3.3 Θέματα οικονομίας/κόστους στους Μ/Σ διανομής

Η αγορά ενός μετασχηματιστή, ο οποίος καλύπτει τις προδιαγραφές για μία συγκεκριμένη εφαρμογή, αποτελεί μία διαδικασία ιδιαίτερα σύνθετη, όπου πρέπει να συνεκτιμηθεί ένας αριθμός αρκετών παραγόντων. Οι κύριοι παράγοντες είναι το **κόστος αγοράς**, οι **απώλειες**, το κόστος εγκατάστασης, η συντήρηση του Μ/Σ, το κόστος επισκευών κατά την διάρκεια της ζωής του και το κόστος παροπλισμού του. Από όλους αυτούς, οι δύο πρώτοι αποτελούν τους καθοριστικότερους για την σύγκριση διαφορετικών μετασχηματιστών, καθώς οι υπόλοιποι σπανίως λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του καταλληλότερου Μ/Σ. Στις σύγχρονες εταιρείες ηλεκτρισμού και κατά κύριο λόγο στις ιδιωτικές, επικρατεί η τάση, η αγορά να γίνεται με αποκλειστικό κριτήριο το χαμηλότερο κόστος αγοράς, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ενεργειακή απόδοση του Μ/Σ. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της έλλειψης διαθέσιμων κεφαλαίων για την αγορά ακριβότερου Μ/Σ, της αδυναμίας θεώρησης του προβλήματος μακροπρόθεσμα, και της έλλειψης ενημέρωσης για τα οικονομικά οφέλη που επιφέρει ένας Μ/Σ υψηλότερης απόδοσης. Τόσο οι δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού όσο και ο ιδιωτικός τομέας, είναι δύσκολο να επηρεαστούν υπέρ της χρήσης αποδοτικότερων μετασχηματιστών, καθώς η αγορά των Μ/Σ είναι υπερβολικά ανταγωνιστική. Έτσι, οι προσπάθειες για βελτίωση της απόδοσής τους είχαν περιορισμένη επιτυχία κατά το παρελθόν.

Παρόλα αυτά, γίνεται προσπάθεια ώστε η επιλογή ενός Μ/Σ να μην βασίζεται μόνο στην τιμή του, καθότι οι φθηνότεροι μετασχηματιστές παρουσιάζουν συνήθως και τις μεγαλύτερες απώλειες. Με δεδομένο ότι οι Μ/Σ έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, αυτές οι επιπλέον απώλειες μπορεί να αθροιστούν σε ένα αξιοσημείωτο ποσό με την πάροδο των χρόνων, το οποίο να υπερβαίνει κατά πολύ την αρχική τιμή. Με άλλα λόγια είναι πιθανό η αγορά ενός ακριβότερου αλλά αποδοτικότερου Μ/Σ, να αποδειχτεί πιο συμφέρουσα επένδυση μακροπρόθεσμα, συγκριτικά με έναν φθηνότερο. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το συνολικό κόστος κατά την διάρκεια ζωής του Μ/Σ, γνωστό ως *Συνολικό Κόστος Κτήσης*, το οποίο συνυπολογίζει και το κόστος των απωλειών, πέραν του κόστους αγοράς.

Επειδή η τιμή αγοράς πληρώνεται την στιγμή που αποκτάται ο μετασχηματιστής (άπαξ), ενώ το κόστος των απωλειών κατά την διάρκεια της ζωής του, όλα τα κόστη θα πρέπει να αναχθούν στο έτος αγοράς. Επομένως, για να εκτιμηθεί το συνολικό κόστος των απωλειών, θα πρέπει να υπολογιστεί η Καθαρή Παρούσα Αξία τους στον χρόνο αγοράς. Τελικά,

υπολογίζεται το *Συνολικό Κεφαλαιοποιημένο Κόστος Κτήσης* του μετασχηματιστή. Για τον υπολογισμό του, χρησιμοποιείται η σχέση 1.1 για την οποία έχει γίνει αναφορά στην ενότητα 1.5.1.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι, καθώς κάποια μεγέθη που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του κόστους των απωλειών - όπως το προφίλ φορτίου σε βάθος χρόνου και η μελλοντική εξέλιξη της τιμής της kWh - δεν μπορούν να είναι γνωστά με ακρίβεια, το συνολικό κόστος μπορεί μόνο να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση. Επιπλέον, το κεφαλαιοποιημένο κόστος εκτιμάται συνήθως από την ίδια την εταιρεία ή τον υποψήφιο αγοραστή γενικότερα, με αποτέλεσμα αυτό να διαφοροποιείται για την ίδια εφαρμογή, αναλόγως με τους τύπους που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του κόστους από την κάθε εταιρεία. Συνήθως, η διαφοροποίηση έγκειται στην επιλογή ή τον τρόπο υπολογισμού των τιμών των Α και Β. Ενώ η βασική εξίσωση 1.1 για τον υπολογισμό του συνολικού κεφαλαιοποιημένου κόστους κτήσης είναι σχετικά απλή, **η επιλογή των Α και Β είναι αρκετά πολύπλοκη** και εξαιρετικής σημασίας διαδικασία, καθώς αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την αποτίμηση του κόστους των απωλειών.

3.3.1 Τεχνοοικονομική ανάλυση της μείωσης των απωλειών

Οι πίνακες 3.2, 3.3 και 3.4 που ακολουθούν⁴, δείχνουν ότι η ενεργειακή απόδοση των μετασχηματιστών διανομής κυμαίνεται από 94,71% για έναν μικρό (100 kVA) Α-Α' μετασχηματιστή, έως 99,45% για έναν Μ/Σ διανομής με πυρήνα άμορφου σιδήρου (C-AMDT). Το όνομα του τελευταίου προκύπτει από το γεγονός ότι το επίπεδο των απωλειών φορτίου του Μ/Σ αυτού ανήκει στην κατηγορία C, βάσει του προτύπου HD 428 (βλέπε σχήμα 1.6), ενώ οι απώλειες κενού φορτίου είναι πολύ χαμηλές λόγω του πυρήνα άμορφου σιδήρου (AMDT). Αυτός αποτελεί τον αποδοτικότερο διαθέσιμο τύπο Μ/Σ διανομής. Η συνηθέστερη αλλαγή στην βιομηχανία είναι μια στροφή από την κατηγορία Α-Α' στην C-C'.

⁴ Οι τρεις παραπάνω πίνακες βασίζονται στις συνθήκες αγοράς του Βελγίου κατά το έτος 1999. Οι τιμές μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την αγορά και το έτος.

Κατηγορία απωλειών	Απόδοση (%)	Εξοικονόμηση ενέργειας (kWh/έτος)	Απόσβεση	IRR (%-25έτη)
A-A'	94,71	-	-	
C-C'	96,46	996	5,0	20
A-AMDT	98,71	2.277	7,7	12
C-AMDT	98,77	2.310	8,6	11

Πίνακας 3.2: Εξοικονόμηση ενέργειας και απόδοση της επένδυσης, για Μ/Σ 100 kVA υψηλής απόδοσης

Κατηγορία απωλειών	Απόδοση (%)	Εξοικονόμηση ενέργειας (kWh/έτος)	Απόσβεση	IRR (%-25έτη)
A-A'	98,04	-	-	
C-C'	98,64	3.143	2,8	36
A-AMDT	99,35	6.833	5,7	17
C-AMDT	99,40	7.085	6,6	15

Πίνακας 3.3: Εξοικονόμηση ενέργειας και απόδοση της επένδυσης, για Μ/Σ 400 kVA υψηλής απόδοσης

Κατηγορία απωλειών	Απόδοση (%)	Εξοικονόμηση ενέργειας (kWh/έτος)	Απόσβεση	IRR (%-25έτη)
A-A'	98,51	-	-	
C-C'	98,99	9.759	1,4	71
A-AMDT	99,38	19.447	5,5	18
C-AMDT	99,45	20.972	5,5	18

Πίνακας 3.4: Εξοικονόμηση ενέργειας και απόδοση της επένδυσης, για Μ/Σ 1600 kVA υψηλής απόδοσης

Κατά μέσο όρο, οι απώλειες σε έναν Μ/Σ διανομής είναι ίσες με το 1,5–2% της μεταφερόμενης ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μετασχηματιστές λειτουργούν αδιάκοπα, μπορεί να εμφανιστούν σημαντικά μεγαλύτερες απώλειες. Επιλέγοντας την κατάλληλη τεχνολογία, αυτές μπορεί να μειωθούν έως και κατά 80%.

Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες, η περίοδος απόσβεσης για την επένδυση σε μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης είναι σχετικά μικρή, συγκριτικά με την

μακρά διάρκεια ζωής τους (25–30 έτη). Για την αντικατάσταση π.χ. ενός βιομηχανικού Μ/Σ 1600 kVA της κατηγορίας Α–Α', από έναν της κατηγορίας C–C', ο χρόνος απόσβεσης δεν θα υπερβαίνει τα 1,4 έτη.

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης⁵ (Internal Rate of Return) για επενδύσεις σε αποδοτικούς μετασχηματιστές είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερος από 10%, φτάνοντας κάποιες φορές μέχρι και 70%. Αν λάβουμε υπόψη το χαμηλό ρίσκο της επένδυσης και τον βαθμό απόδοσης του κεφαλαίου, θα διαπιστώσουμε ότι οι αποδοτικοί μετασχηματιστές είναι ιδιαίτερα ελκυστικοί τόσο για τις εταιρείες διανομής όσο και για την βιομηχανία. Ωστόσο, στην περίπτωση των εταιρειών διανομής δεν υπάρχουν προς το παρόν αρκετά κίνητρα για τέτοια επένδυση, διότι το κόστος των απωλειών μπορεί να μεταφερθεί στους καταναλωτές, άρα η εταιρεία είναι πιθανό να μην επωφεληθεί από την στροφή σε Μ/Σ υψηλότερης απόδοσης.

3.4 Δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στους Μ/Σ διανομής

3.4.1 Απώλειες του ηλεκτρικού δικτύου

Οι απώλειες του δικτύου είναι σημαντικές για αρκετούς λόγους. Αντιπροσωπεύουν ένα κόστος της τάξης των 61 δισεκατομμυρίων δολαρίων, επιπρόσθετο στο κόστος του ηλεκτρισμού παγκοσμίως. Επιπλέον, παραπάνω από 700 εκατομμύρια τόνοι εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σχετίζονται με τις απώλειες αυτές. Όπως αναφέρθηκε σε παραπάνω ενότητες, γίνονται μεγάλες προσπάθειες τόσο από τα κράτη όσο και από τις ηλεκτρικές εταιρείες και τις βιομηχανίες, να μειωθούν οι απώλειες ενέργειας και βασικό ρόλο σε αυτό παίζει η βελτίωση της υπάρχουσας τεχνολογίας και τεχνογνωσίας στα ηλεκτρικά δίκτυα. Αξίζει να αναφερθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό (περίπου 70%) των απωλειών λαμβάνει χώρα στο σύστημα διανομής ενός ηλεκτρικού δικτύου. Επίσης, μεγάλο ποσοστό (περίπου 33%) λαμβάνει χώρα στους μετασχηματιστές. Καταλήγουμε επομένως στο συμπέρασμα ότι η εξοικονόμηση ενέργειας στους μετασχηματιστές διανομής

⁵ Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης αποτελεί κριτήριο αξιολόγησης της αποδοτικότητας μιας επένδυσης. Είναι το επιτόκιο που εισπράττεται για μια επένδυση η οποία αποτελείται από πληρωμές και εισπράξεις που πραγματοποιούνται σε τακτά διαστήματα. Με άλλα λόγια, είναι το επιτόκιο το οποίο όταν χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας, την εξισώνει με το μηδέν

είναι ένα ζήτημα εξέχουσας σημασίας. Για την ακρίβεια αυτοί αποτελούν το δεύτερο μεγαλύτερο συστατικό του δικτύου διανομής σε απώλειες.

Οι απώλειες του ηλεκτρικού δικτύου παγκοσμίως εκτιμώνται στις 1279 TWh ή στο 9,2% της χρήσης του ηλεκτρισμού, σύμφωνα και με τον πίνακα 3.5. Ποικίλλουν από χώρα σε χώρα και είναι ίσες με το 3,7% έως 26,7% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, που σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλο περιθώριο εξοικονόμησης. Σε παγκόσμια κλίμακα, το δυναμικό εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας από την στροφή σε μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης, υπολογίζεται στις 200 TWh. Υπάρχει μάλιστα η εκτίμηση ότι ακόμη και αυτός ο υπολογισμός είναι συντηρητικός για τους εξής λόγους:

- οι υπολογισμοί βασίζονται στην παρούσα κατάσταση και η πιθανή αύξηση του φορτίου ή η επέκταση του δικτύου δεν έχει ακόμη ληφθεί υπόψη (εκτός από τις μελέτες για τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Κίνα).
- λόγω της ισχυρής τάσης που παρατηρείται προς τους μετασχηματιστές με το χαμηλότερο κόστος αγοράς, οι απώλειες τείνουν να αυξηθούν.
- δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι επιπρόσθετες απώλειες από μη γραμμικά φορτία.

Η βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής στα ηλεκτρικά δίκτυα παγκοσμίως είναι εφικτή, καθώς αυτοί είναι σχετικά εύκολο να αντικατασταθούν, η απόδοσή τους μπορεί εύκολα να μετρηθεί και υπάρχει πλέον ώριμη τεχνολογία για την μείωση των απωλειών τους κατά 80% και περισσότερο. Επιπλέον, η βελτίωση της απόδοσης εκτιμάται ότι θα επιφέρει σημαντικά καθαρά κέρδη για την παγκόσμια οικονομία.

Παρότι ένα ορισμένο επίπεδο απωλειών είναι αναπόφευκτο, υπάρχει μία διακύμανση των απωλειών από 7% έως 27%. Αυτή η διαφοροποίηση δεν εξηγείται μόνο από το μέγεθος της χώρας, του δικτύου ή του πληθυσμού. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι υπάρχει περιθώριο βελτίωσης ή με άλλα λόγια μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας. Είναι εμφανές στο σχήμα 3.6 ότι οι απώλειες μεταφοράς και διανομής στα δίκτυα επιλεγμένων αναπτυγμένων χωρών, έχουν μειωθεί σταδιακά κατά τις τελευταίες δεκαετίες.

Χώρα	Κατανάλωση ηλεκτρισμού (TWh)	Απώλειες δικτύου (TWh)	Απώλειες δικτύου (%)
Ευρώπη	3 046	222	
Δυτική Ευρώπη	2 540	185	7,3
Ρωσία	1 135	133	11,7
Βόρεια Αμερική	4 293	305	7,1
Λατινική Αμερική	721	131	
Βραζιλία	336	61	18,3
Ασία	3 913	381	
Ιαπωνία	964	98	9,1
Ωκεανία	219	21	9,5
Κίνα	1 312	94	7,2
Ινδία	497	133	26,7
Αφρική/ Μέση Ανατολή	826	83	10,0
Σύνολο	13 934	1 279	9,2

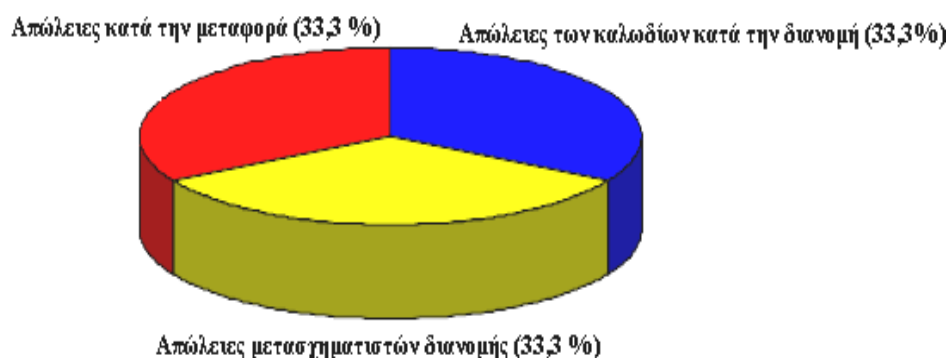
Πίνακας 3.5: Απώλειες του ηλεκτρικού δικτύου παγκοσμίως, 2005.

Χώρα	1980	1990	1999	2000
Φιλανδία	6,2	4,8	3,6	3,7
Ολλανδία	4,7	4,2	4,2	4,2
Βέλγιο	6,5	6,0	5,5	4,8
Γερμανία	5,3	5,2	5,0	5,1
Ιταλία	10,4	7,5	7,1	7,0
Δανία	9,3	8,8	5,9	7,1
Ηνωμένες Πολιτείες	10,5	10,5	7,1	7,1
Ελβετία	9,1	7,0	7,5	7,4
Γαλλία	6,9	9,0	8,0	7,8
Αυστρία	7,9	6,9	7,9	7,8
Σουηδία	9,8	7,6	8,4	9,1
Αυστραλία	11,6	8,4	9,2	9,1
Ηνωμένο Βασίλειο	9,2	8,9	9,2	9,4
Πορτογαλία	13,3	9,8	10,0	9,4
Νορβηγία	9,5	7,1	8,2	9,8
Ιρλανδία	12,8	10,9	9,6	9,9
Καναδάς	10,6	8,2	9,2	9,9
Ισπανία	11,1	11,1	11,2	10,6
Νέα Ζηλανδία	14,4	13,3	13,1	11,5
Μέσος όρος	9,5	9,1	7,5	7,5

Πίνακας 3.6: Απώλειες σε ποσοστό % στα δίκτυα επιλεγμένων χωρών κατά τις τελευταίες δεκαετίες

3.4.2 Απώλειες των Μ/Σ Διανομής

Εκτιμάται ότι προσεγγιστικά το ένα τρίτο των απωλειών συμβαίνει στους μετασχηματιστές και τα δύο τρίτα στο υπόλοιπο σύστημα (ηλεκτρικές γραμμές κ.ά.). Επίσης, περίπου το 70% των απωλειών λαμβάνει χώρα στο σύστημα διανομής.



Σχήμα 3.3: Απώλειες ηλεκτρικών δικτύων (%)

Άξια αναφοράς είναι και τα επόμενα τρία στοιχεία:

- Οι Μ/Σ διανομής αντιπροσωπεύουν το δεύτερο μεγαλύτερο, βάσει απωλειών, μέρος του δικτύου.
- Η αντικατάσταση ή αναβάθμιση των μετασχηματιστών είναι ευκολότερη σε σχέση με την αλλαγή καλωδίων ή γραμμών.
- Οι μετασχηματιστές έχουν μεγάλη προοπτική μείωσης των απωλειών τους, καθώς υπάρχουν τεχνολογίες ικανές να μειώσουν τις απώλειες αυτές σε ποσοστό της τάξεως του 80%.

Συνολικές απώλειες 285 TWh συμβαίνουν σε 6 οικονομίες για τις οποίες οι απώλειες των μετασχηματιστών έχουν μελετηθεί.

Χώρα	Ετήσιες απώλειες στους μετασχηματιστές (TWh)	Ετήσιο δυναμικό εξοικονόμησης (TWh)	Ετήσια μείωση σε εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (εκατομμύρια τόνοι CO ₂)
Ε.Ε. – 25	55	22	9
Η.Π.Α.	141	84	60
Αυστραλία	6	3+	3
Ινδία	6	3	3
Κίνα	33	18	13
Ιαπωνία	44	31	12
Σύνολο	285	161	100

Πίνακας 3.7: Απώλειες των Μ/Σ διανομής σε 6 ισχυρές οικονομίες, 2005

Αυτές οι 6 οικονομίες αντιπροσωπεύουν το 70% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος, με δίκτυα των οποίων η αποδοτικότητα ξεπερνά τον παγκόσμιο μέσο όρο. Το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας από την χρησιμοποίηση μετασχηματιστών υψηλότερης απόδοσης στις 6 αυτές οικονομίες, μπορεί να εκτιμηθεί στις 161 TWh ανά έτος.

3.4.3 Δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας από τους Μ/Σ διανομής στην Ελλάδα

Οι επόμενοι πίνακες παρουσιάζουν εκτιμήσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας από τους Μ/Σ διανομής της Δ.Ε.Η. καθώς και από αυτούς των ιδιωτών, με την υπόθεση ότι κάθε νέος Μ/Σ διανομής θα είναι χαμηλών απωλειών τύπου C-C' ή με πυρήνα άμορφου σιδήρου (υψηλό κόστος).

Ονομαστική ισχύς	Μείωση απωλειών ανά έτος (MWh)	Μείωση εκπομπών CO ₂ ανά έτος (τόνοι)
50	1275	1275
100	1930	1520
160	2200	1885
250	1905	1640
400	1000	836
630	1435	1216
1000	225	194
Σύνολο	9970	8566

Πίνακας 3.8: Ετήσια εκτίμηση του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας σε Μ/Σ διανομής ιδιοκτησίας Δ.Ε.Η. , με τους νέους Μ/Σ διανομής να είναι τύπου C-C'

Από τον παραπάνω πίνακα και από τους πίνακες 3.9, 3.10 και 3.11, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι **α)** με επιλογή του τύπου C-C' για τους νέους μετασχηματιστές διανομής, θα επιτευχθεί στο σύνολο της χώρας μείωση των απωλειών ανά έτος 20 GWh και μείωση των εκπομπών CO₂ ανά έτος 17.000 tn και **β)** με επιλογή τεχνολογίας άμορφου σιδήρου για τους νέους μετασχηματιστές διανομής, θα επιτευχθεί στο σύνολο της χώρας μείωση των απωλειών ανά έτος 37 GWh και μείωση των εκπομπών CO₂ ανά έτος 31.500 tn.

Ονομαστική ισχύς	Μείωση απωλειών ανά έτος (MWh)	Μείωση εκπομπών CO ₂ ανά έτος (τόνοι)
50	2920	2550
100	4495	3800
160	5000	4205
250	4785	4100
400	2580	2204
630	3730	3192
1000	480	408
Σύνολο	23990	20459

Πίνακας 3.9: Ετήσια εκτίμηση του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας σε M/Σ διανομής ιδιοκτησίας Δ.Ε.Η. με νέους AMDT's

Ονομαστική ισχύς	Μείωση απωλειών ανά έτος (MWh)	Μείωση εκπομπών CO ₂ ανά έτος (τόνοι)
250	221,5	189
400	1815	1551
630	4272	3640
1000	2960	2520
1600	775,5	660
Σύνολο	10044	8560

Πίνακας 3.10: Ετήσια εκτίμηση του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας σε M/Σ διανομής ιδιωτών, με τους νέους M/Σ διανομής να είναι τύπου C-C'

Ονομαστική ισχύς	Μείωση απωλειών ανά έτος (MWh)	Μείωση εκπομπών CO ₂ ανά έτος (τόνοι)
250	293,5	249
400	2407,5	2046
630	5395	4576
1000	3680	3122
1600	1343	1142
Σύνολο	13119	11135

Πίνακας 3.11: Ετήσια εκτίμηση του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας σε M/Σ διανομής ιδιωτών, με νέους AMDT's

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Υφιστάμενη κατάσταση των Μ/Σ διανομής σε Ε.Ε. και Ελλάδα

4.1 Η κατάσταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Τα ευρωπαϊκά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν περισσότερα από τεσσεράμισι εκατομμύρια μετασχηματιστές διανομής. Η ετήσια αγορά, η οποία περιλαμβάνει νέες επενδύσεις και αντικατάσταση υπαρχόντων μετασχηματιστών, υπολογίζεται περίπου στο 3% του υπάρχοντος αποθέματος. Καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη της αγοράς είναι:

- η αλλαγή στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας,
- η αύξηση της διεσπαρμένης παραγωγής,
- η εξέλιξη των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και των υλικών
- η πίεση από την αναρρύθμιση των στόχων των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μετασχηματιστές διανομής που ανήκουν στις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούνται από αυτές ευθύνονται για την τροφοδοσία περίπου του 66% του ηλεκτρισμού χαμηλής τάσης στους τελικούς καταναλωτές και αντιπροσωπεύουν περίπου το 80% του πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής. Πρακτικά οι εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτούν σχεδόν το σύνολο των νοικοκυριών και του εμπορικού τομέα και το 50% των υπόλοιπων καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης. Ο τομέας των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού είναι πιο ομογενής και γι' αυτό το λόγο πιο πρόσφορος για εφαρμογή μέτρων πολιτικής και ρυθμιστικού σχεδίου.

Οι μετασχηματιστές, οι οποίοι τροφοδοτούν φορτία χαμηλής τάσης και ανήκουν σε ιδιώτες, συνήθως αναφέρονται ως ιδιωτικοί (ή βιομηχανικοί). Οι περισσότεροι βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες έχουν ειδικές απαιτήσεις είτε για καλύτερη πυρασφάλεια είτε για ατομική ασφάλεια είτε τέλος για το

χώρο που καταλαμβάνουν οι μετασχηματιστές. Αντιμετωπίζουν όμως, την ενεργειακή απόδοση των μετασχηματιστών ως ήσσονος σημασίας μέγεθος, διότι τους αγοράζουν σε μικρές ποσότητες και μέσω προμηθευτών, χωρίς να έρχονται σε απευθείας επαφή με τους κατασκευαστές.

Ο συνολικός πληθυσμός των μετασχηματιστών διανομής του τομέα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 υπολογίζεται στις 4,6 εκατομμύρια μονάδες. Η μέση ονομαστική ισχύς των μετασχηματιστών αυτών είναι μεταξύ 116 με 369 kVA ανάλογα με τη χώρα¹. Ο πληθυσμός των ιδιωτικών ή βιομηχανικών μετασχηματιστών διανομής λαδιού που είναι εγκατεστημένοι στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 27 υπολογίζεται στις οκτακόσιες χιλιάδες μονάδες κι έχουν μέση ονομαστική ισχύ περίπου 400 kVA. Ο αριθμός των βιομηχανικών μετασχηματιστών διανομής ξηρού τύπου υπολογίζεται ότι είναι μικρότερος από διακόσιες χιλιάδες μονάδες με μέση ονομαστική ισχύ πάνω από 800 kVA, ισχύς η οποία είναι μεγαλύτερη από το διπλάσιο της μέσης ονομαστικής ισχύος των βιομηχανικών μετασχηματιστών λαδιού.

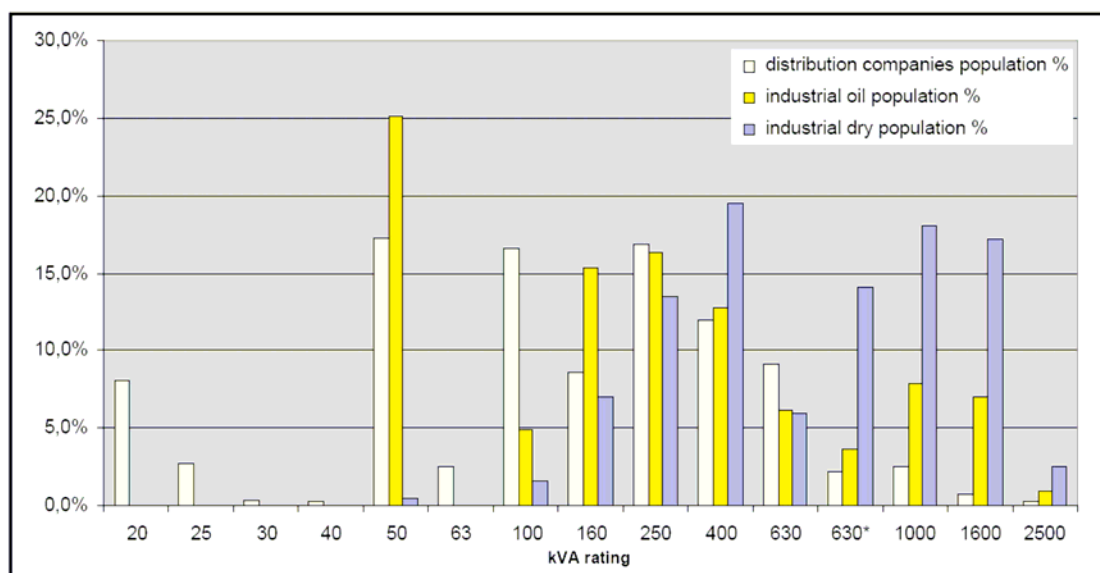
Περισσότερο από τα δύο τρίτα των εγκατεστημένων μετασχηματιστών διανομής έχουν ονομαστική ισχύ κάτω από 400 kVA, με την πλειονότητα να έχει 250 kVA κι ένα μικρό ποσοστό 315 kVA. Οι πρόσφατα αγορασμένοι μετασχηματιστές έχουν υψηλότερη ονομαστική ισχύ, ενώ λιγότερο από το 50% απ' αυτούς βρίσκονται στην κατηγορία χαμηλότερης ισχύος.

Ο πληθυσμός των μετασχηματιστών διανομής στην Ευρωπαϊκή ένωση των 27 κι η ετήσια αγορά, με βάση τους μετασχηματιστές που εγκαταστάθηκαν το 2004, δίνονται στον πίνακα 4.1. Το δε ποσοστό του πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής ανά κατηγορία ονομαστικής ισχύος για τους μετασχηματιστές του τομέα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και του βιομηχανικού τομέα δίνονται στο σχήμα 4.1, στο οποίο φαίνεται η διασπορά των ονομαστικών ισχύων των εγκατεστημένων μετασχηματιστών. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται επίσης καθαρά ότι οι μετασχηματιστές με μικρότερη ονομαστική ισχύ κυριαρχούν στον τομέα της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στον βιομηχανικό τομέα και, ιδιαίτερα, στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου μεγαλύτερες μονάδες είναι πιο συνηθισμένες.

¹ Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν περίπου το 1% του συνόλου των μετασχηματιστών διανομής. Για το λόγο αυτό δεν συμπεριλαμβάνονται στους πίνακες του πληθυσμού των μετασχηματιστών στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

	Fleet EU-27				Market EU-27				
	pcs	%	MVA	%	pcs	%	MVA	%	
Distribution sector oil*	< 400 kVA	2688143	73	312936	34	56122	66	7014	26
	≥ 400 kVA & ≤ 630 kVA	860802	23	440831	48	23370	27	12354	45
	> 630 kVA	127369	3	156749	17	5993	7	7968	29
	Total distribution oil	3676315	79	910515	66	85486	61	27336	48
Industry oil	< 400 kVA	493497	62	66272	20	23501	62	3144	20
	≥ 400 kVA & ≤ 630 kVA	180847	23	90484	27	8458	22	4251	28
	> 630 kVA	127497	16	172813	52	6051	16	8058	52
	Total industry oil	801840	17	329569	24	38011	27	15452	27
Industry dry	< 400 kVA	39447	23	12752	9	2628	16	533	4
	≥ 400 kVA & ≤ 630 kVA	68885	40	40977	28	5476	34	2940	20
	> 630 kVA	65685	38	90174	63	8028	50	11005	76
	Total industry dry	174017	4	143904	10	16132	12	14478	25
Total	4652172		1383988		139628		57266		

Πίνακας 4.1: Πληθυσμοί των μετασηματιστών διανομής και ετήσια αγορά²
(εγκατάσταση Μ/Σ το 2004)

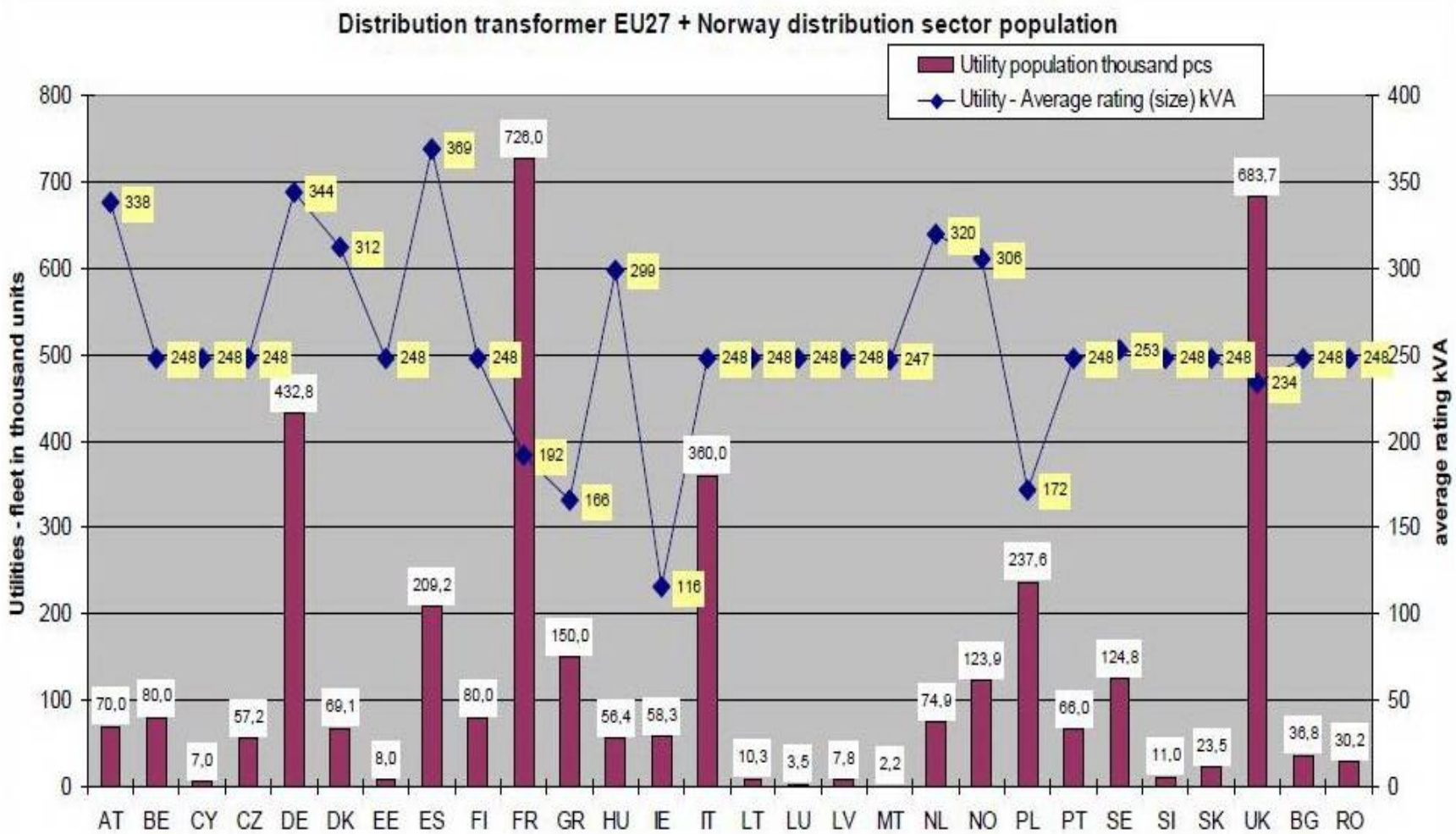


Σχήμα 4.1: Ποσοστό του πληθυσμού των μετασηματιστών διανομής ανά τιμή ονομαστικής ισχύος

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση του πληθυσμού των μετασηματιστών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση δίνονται στον σχήμα 4.2 οι πληθυσμοί των μετασηματιστών του τομέα της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στις είκοσι επτά χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τη Νορβηγία και οι ονομαστικές τους ισχύεις ανά χώρα.

² Ο πληθυσμός των μετασηματιστών ξηρού τύπου του τομέα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται σε οριακά χαμηλό επίπεδο (περίπου 1% του συνόλου των μετασηματιστών των εταιρειών διανομής)

Σχήμα 4.2: Μετασχηματιστές διανομής των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και μέση ονομαστική ισχύς τους στις χώρες της ΕΕ των 27 και τη Νορβηγία



4.2 Απώλειες και απόδοση Μ/Σ διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Οι συνολικές απώλειες στους μετασχηματιστές διανομής της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 υπολογίζονται σε περίπου 33,4 TWh το χρόνο³. Στον παρακάτω πίνακα 4.2 φαίνονται οι απώλειες των μετασχηματιστών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τους υπάρχοντες (fleet) και για τους πρόσφατα εγκατεστημένους (market) μετασχηματιστές διανομής.

	<i>Transformer Fleet EU-27</i>		<i>Transformer Market EU-27</i>	
		GWh/year		GWh/year
Distribution companies oil	ΣP ₀ fleet	15973	ΣP ₀ market	348
	ΣP _k fleet	6000	ΣP _k market	172
	ΣP _k fleet / ΣP total	27,3%	ΣP _k market / Σ Ptotal	33,0%
Industry oil	ΣP ₀ fleet	5544	ΣP ₀ market	264
	ΣP _k fleet	2167	ΣP _k market	95
	ΣP _k fleet / ΣPtotal	28,1%	ΣP _k market / Σ Ptotal	26,5%
Industry dry	ΣP ₀ fleet	2589	ΣP ₀ market	269
	ΣP _k fleet	1129	ΣP _k market	120
	ΣP _k fleet / ΣP total	30,4%	ΣP _k market / Σ Ptotal	30,9%
Total	P total	33402	P total	1269
+ Reactive power & harmonic losses		ca. 5010		ca. 190
Total	P total	ca. 38412	P total	ca. 1459

Πίνακας 4.2: Απώλειες των μετασχηματιστών διανομής στην ΕΕ των 27

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 4.2 παραπάνω, οι απώλειες κενού φορτίου P₀ αποτελούν ποσοστό μεγαλύτερο του 70% των συνολικών απωλειών. Οι συνολικές απώλειες στους πρόσφατα εγκατεστημένους μετασχηματιστές υπολογίζονται σε 1,27 TWh το χρόνο (ή 1,47 TWh το χρόνο συνυπολογίζοντας τις απώλειες αρμονικών και άεργου ισχύος). Οι μετασχηματιστές δε, που αγοράστηκαν πρόσφατα από εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ευθύνονται για περισσότερες από 500 GWh το χρόνο από τις απώλειες ενέργειας.

Παρά το γεγονός ότι οι μετασχηματιστές των εταιρειών διανομής έχουν χαμηλότερες ονομαστικές απώλειες από τους βιομηχανικούς, οι συνολικές τους αποδόσεις κινούνται στα ίδια επίπεδα διότι οι μετασχηματιστές της βιομηχανίας, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.4, έχουν γενικά υψηλότερες

³ Αυτή η εκτίμηση δεν περιλαμβάνει τις απώλειες που οφείλονται στην άεργο ισχύ και τις αρμονικές, οι οποίες, με έναν αισιόδοξο υπολογισμό, ανέρχονται στις 5 TWh το χρόνο για όλες τις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και τους ιδιωτικούς μετασχηματιστές διανομής.

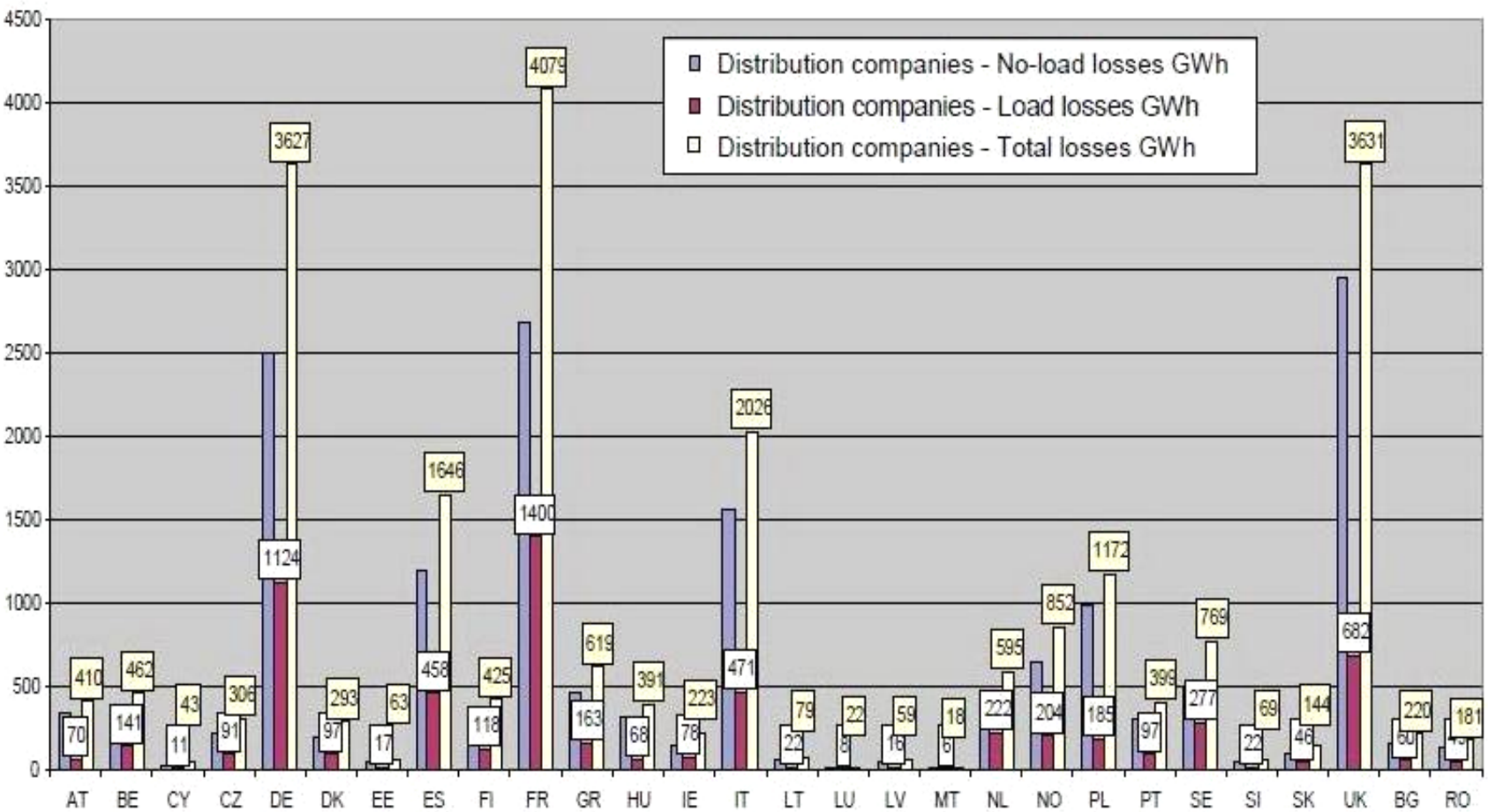
ονομαστικές ισχείς και λειτουργούν σε υψηλότερο συντελεστή φόρτισης σε σύγκριση με τους μετασχηματιστές των εταιρειών διανομής. Οι απώλειες κενού φορτίου, οι απώλειες φορτίου κι οι συνολικές απώλειες των μετασχηματιστών διανομής στις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 και της Νορβηγίας παρουσιάζονται ανά χώρα στο σχήμα 4.3 πιο κάτω.

Ο λόγος των απωλειών κενού φορτίου προς τις απώλειες φορτίου (NLL/LL) είναι περίπου ίσος με 3, γεγονός που οφείλεται στα χαρακτηριστικά του φορτίου των μετασχηματιστών διανομής. Σε μεγαλύτερους μετασχηματιστές, όπως αυτούς που χρησιμοποιούνται στα σημεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την ανύψωση της τάσης, οι απώλειες κενού φορτίου είναι σημαντικά μικρότερες από τις απώλειες φορτίου, κι ο ανωτέρω λόγος μπορεί να πάρει τιμές μέχρι και 0,2 με 0,3. *Η μείωση των απωλειών κενού φορτίου, ιδιαίτερα στους μικρούς, ελαφρά φορτισμένους μετασχηματιστές, θα συνεισφέρει σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.*

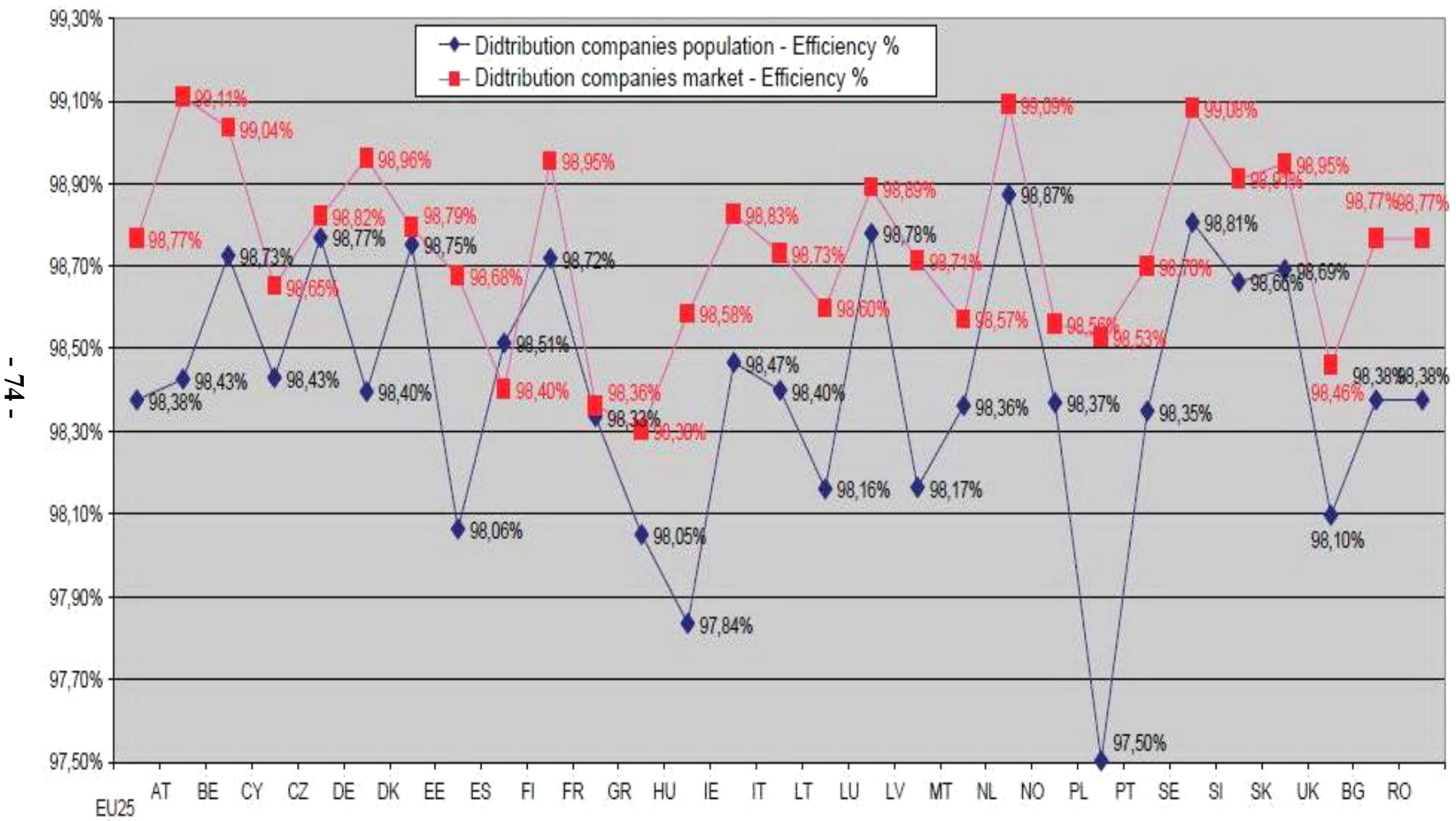
Ο συντελεστής απόδοσης κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών διανομής στις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 και της Νορβηγίας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6. Όπως φαίνεται και στο σχήμα αυτό, στο οποίο περιλαμβάνονται οι υπάρχοντες μετασχηματιστές καθώς κι εκείνοι που αγοράστηκαν τον τελευταίο χρόνο, η πλειονότητα των μετασχηματιστών των εταιρειών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση **είναι παλιάς τεχνολογίας**, με τη διείσδυση των μετασχηματιστών με χαμηλές απώλειες να είναι ακόμη περιορισμένη. Η μέση τιμή του συντελεστή απόδοσης λειτουργίας στην Ευρώπη είναι **98,38%**.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο συντελεστής φόρτισης επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την απόδοση των μετασχηματιστών. Σε ορισμένες χώρες, όπως για παράδειγμα την Πολωνία, ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο λόγω του υπερβολικού αριθμού των μετασχηματιστών (μέση φόρτιση 14,5%). Πιθανόν, κάποιοι από αυτούς τους μετασχηματιστές να μην είναι πραγματικά ενεργοποιημένοι και να έχουν αποσυρθεί αλλά παραμένουν ακόμη στους καταλόγους. Μια άλλη υπόθεση είναι ότι οι εταιρείες διανομής, προκειμένου να εξασφαλίσουν την επάρκεια του συστήματος, διατηρούν κάποια εφεδρική ισχύ για περιπτώσεις ανάγκης. Ίσως ακόμη οι εταιρείες να αποφεύγουν τις υψηλές φορτίσεις των μετασχηματιστών αυτών, διότι οι τεχνικές προδιαγραφές κι η κατάστασή τους εγείρουν περιορισμούς, όπως για παράδειγμα η περιορισμένη ικανότητα μόνωσης του μονωτικού λαδιού.

Σχήμα 4.3: Απώλειες μετασχηματιστών διανομής των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ των 27 και τη Νορβηγία

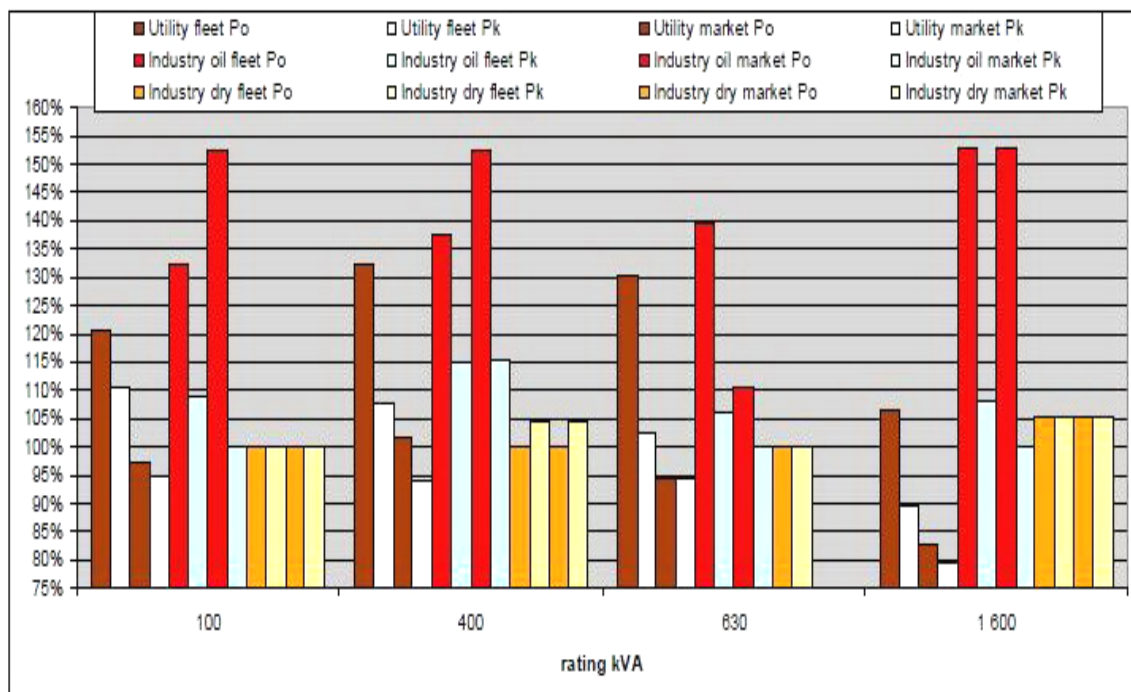


Σχήμα 4.4: Συντελεστής απόδοσης λειτουργίας Μ/Σ διανομής των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ των 27 και τη Νοβηργία



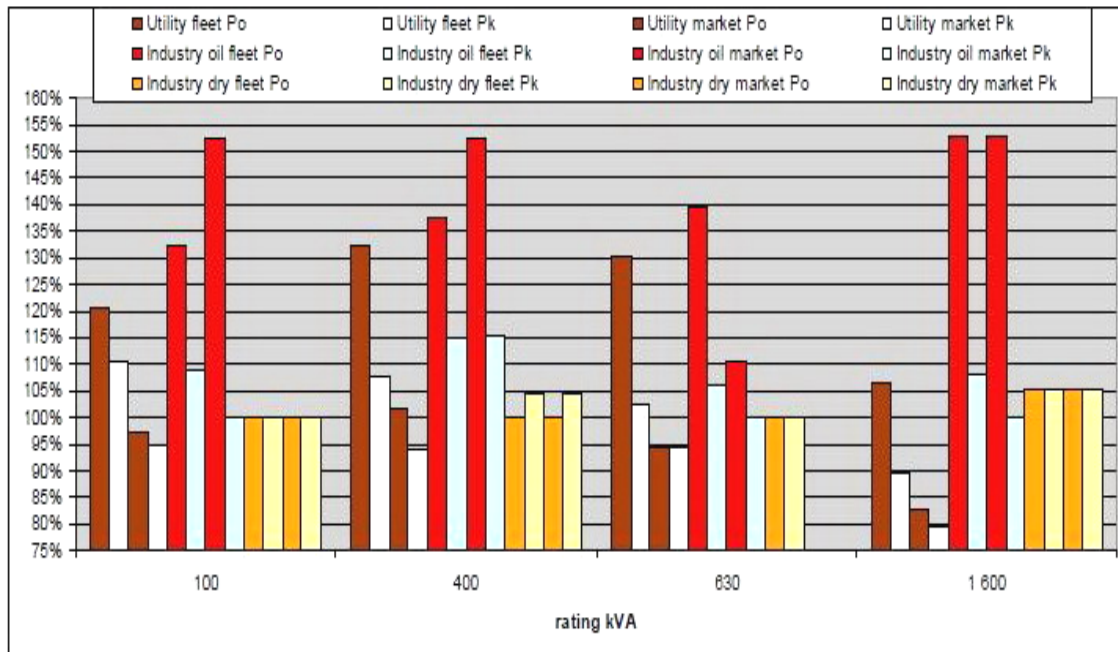
Στην ΕΕ των 27 η μέση φόρτιση των μετασχηματιστών διανομής των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 18,9%. Συγκριτικά, οι βιομηχανικοί μετασχηματιστές στην ΕΕ των 27 είναι κατά μέσο όρο φορτισμένοι στο 37,7%.

Στο ακόλουθο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται τα επίπεδα των ονομαστικών απωλειών κενού φορτίου και των ονομαστικών απωλειών φορτίου των μετασχηματιστών διανομής λαδιού στον τομέα των εταιρειών και τον ιδιωτικό τομέα. Παρουσιάζεται ο λόγος των απωλειών αυτών προς τον συνδυασμό απωλειών των κλάσεων A-C', σύμφωνα με το HD 428, ή το συνδυασμό απωλειών των κλάσεων C_k C_o αντίστοιχα του νέου προτύπου EN 50464-1 για τις πιο συνηθισμένες ονομαστικές ισχύεις. Όπως φαίνεται στο σχήμα οι ιδιωτικοί μετασχηματιστές έχουν υψηλότερες ονομαστικές απώλειες. Η προσπάθεια να μειωθούν οι ονομαστικές απώλειες είναι περισσότερο εμφανής στους μεγαλύτερους μετασχηματιστές, ενώ για μικρότερους μετασχηματιστές διακρίνεται η προσπάθεια να μειωθούν οι απώλειες κενού φορτίου. Οι μέσες ονομαστικές απώλειες των μετασχηματιστών διανομής της ΕΕ είναι μεταξύ των κλάσεων B-A' και A-A', σύμφωνα με το HD 428, ενώ οι πρόσφατα αγορασμένοι μετασχηματιστές έχουν κατά μέσο όρο απώλειες ελαφρώς χαμηλότερες από το επίπεδο της κλάσης AC'.



Σχήμα 4.5: Μέσοι όροι των λόγων των ονομαστικών απωλειών προς τις απώλειες αναφοράς των μετασχηματιστών διανομής λαδιού στην ΕΕ των 27

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η εικόνα των ονομαστικών απωλειών των μετασχηματιστών διανομής, παρουσιάζονται στο σχήμα 4.6 οι ονομαστικές απώλειες των μετασχηματιστών λαδιού και των μετασχηματιστών ξηρού τύπου για τέσσερις τυπικές τιμές ονομαστικής ισχύος. Οι απώλειες είναι εκφρασμένες σε ποσοστό επί τοις εκατό με τιμή αναφοράς τις απώλειες των κλάσεων A-C', σύμφωνα με το HD 428 ή τις απώλειες των κλάσεων C_k C_o του νέου προτύπου EN 50464-1.



Σχήμα 4.6: Μέσοι όροι των λόγων των ονομαστικών απωλειών προς τις απώλειες αναφοράς των μετασχηματιστών διανομής λαδιού και ξηρού τύπου στην ΕΕ των 27

Ο πιο αποδοτικός μετασχηματιστής που χρησιμοποιείται στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι ο C-C' σύμφωνα με το HD, ή αντίστοιχα B_k C_o σύμφωνα με το EN50464-1. Οι απώλειες του C-C' είναι κάτω από τα όρια του ιαπωνικού υποχρεωτικού προτύπου και οριακά πάνω από τα πρότυπα των ΗΠΑ και του Καναδά. Εντούτοις μόνο λίγες εταιρείες διανομής χρησιμοποιούν τέτοιου τύπου μετασχηματιστή, ενώ άλλες επιλέγουν λιγότερο αποδοτικούς τύπους, όπως για παράδειγμα τον A-C' και τον A-A'. Στον βιομηχανικό και τον τριτογενή τομέα προτιμώνται ακόμη και οι ελάχιστα αποδοτικοί τύποι (B-A').

Είναι λοιπόν προφανές ότι υπάρχουν σημαντικά περιθώρια μείωσης των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής και, κατά συνέπεια, εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας με τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη που αυτή συνεπάγεται.

4.3 Η Ελληνική πραγματικότητα

Στη ΔΕΗ (Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού) ανήκουν οι περισσότεροι μετασχηματιστές διανομής στην Ελλάδα, όπως άλλωστε συμβαίνει και με τις αντίστοιχες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού στην υπόλοιπη Ευρώπη. Η ισχύς των μετασχηματιστών διανομής της ΔΕΗ είναι σαφώς μικρότερη από τους βιομηχανικούς μετασχηματιστές, εφόσον οι ανάγκες είναι πιο περιορισμένες.

Στα τέλη της δεκαετίας του '70, μετά τις πετρελαϊκές κρίσεις, στη ΔΕΗ έγιναν σκέψεις για μείωση των απωλειών του δικτύου, κυρίως των απωλειών κενού φορτίου. Τα κυριότερα στοιχεία του δικτύου στα οποία θα μπορούσε να γίνει επέμβαση ήταν οι Μ/Σ διανομής. Στις αρχές της δεκαετίας του '90 οι συνολικές απώλειες κενής λειτουργίας των δικτύων της ΔΕΗ ανέρχονταν σε 40 MW, ο δε συνολικός αριθμός των εγκατεστημένων Μ/Σ διανομής, ισχύος από 25 έως 1000 kVA σε 100.000, συνολικής ισχύος 14.500 MVA περίπου. Στους υπολογισμούς που έγιναν τότε, αφού ελήφθησαν υπόψιν τόσο το κόστος των απωλειών σε δρχ./kWh, όσο και το κόστος και της απαιτούμενης για την κάλυψή τους εγκατεστημένης ισχύος, βρέθηκε ότι συμφέρει η επιλογή Μ/Σ μειωμένων απωλειών κενού φορτίου. Ο χρόνος απόσβεσης του επιπλέον αρχικού κεφαλαίου ήταν σχετικά μικρός.

Η ΔΕΗ προμηθεύεται Μ/Σ μειωμένων απωλειών σιδήρου ήδη από το 1984, και μέσα σε 10 χρόνια αποτελούσαν το 55% των εγκατεστημένων Μ/Σ διανομής. Το υψηλό αυτό ποσοστό οφείλεται και στο γεγονός ότι πολλοί Μ/Σ, περίπου το 10% , σχέσεων 15/0,4 kV και 6.6/0.415 kV αποσύρθηκαν λόγω της μετατροπής του δικτύου σε 20/0,4 kV (αφού βέβαια είχαν συμπληρώσει τουλάχιστον εικοσιπέντε λειτουργίας στο δίκτυο). Σήμερα στην Ελλάδα υπάρχουν εγκατεστημένοι περίπου 155.000 μετασχηματιστές διανομής. Από αυτούς, οι 140.000 ανήκουν στην ΔΕΗ και οι υπόλοιποι 15.000 ανήκουν σε ιδιώτες και προορίζονται για βιομηχανική ή εμπορική χρήση. Κάθε χρόνο, για λόγους αντικατάστασης παλιών μετασχηματιστών ή για την ικανοποίηση νέων φορτίων, η ΔΕΗ εγκαθιστά περίπου 7.300 νέους μετασχηματιστές διανομής⁴, ενώ εγκαθίστανται και 630 νέοι μετασχηματιστές για βιομηχανική ή εμπορική χρήση. Τα στοιχεία αυτά αφορούν αποκλειστικά τους μετασχηματιστές

⁴ Η εταιρία Schneider Electric έχει συμβάλει καθοριστικά στον εκσυγχρονισμό των μετασχηματιστών που χρησιμοποιεί η ΔΕΗ στα δίκτυά της αφού είναι γεγονός ότι το 50% των εγκατεστημένων μετασχηματιστών στην Ελλάδα είναι ΕΛΒΗΜ. Τα τελευταία χρόνια η ΔΕΗ πέτυχε να μειώσει σημαντικά τις απώλειες στο δίκτυο διανομής της, προμηθευόμενη μετασχηματιστές χαμηλών απωλειών, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας προς όφελος της ελληνικής οικονομίας και του Έλληνα καταναλωτή.

διανομής τύπου λαδιού, όπου αποτελούν και την πλειοψηφία των μετασχηματιστών διανομής τόσο στην Ελλάδα, όσο και στον διεθνή χώρο.

Η εγκατεστημένη ισχύς των δημόσιων μετασχηματιστών διανομής στην Ελλάδα κυμαίνεται μεταξύ των 15–1000 kVA. Η φόρτιση τους είναι σαφώς μικρότερη από τους βιομηχανικούς μετασχηματιστές διανομής και κυμαίνεται κατά μέσο όρο μεταξύ 10% και 15%, ανάλογα και με την ισχύ των μετασχηματιστών (μικρότερη φόρτιση σε εκείνους που έχουν μικρότερη ισχύ). Επίσης, τα επίπεδα των αρμονικών είναι πολύ χαμηλότερα. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι ο πληθυσμός των δημόσιων μετασχηματιστών διανομής είναι σαφώς γηραιότερος σε σύγκριση με αυτόν της βιομηχανίας και συνεπώς υπάρχουν μεγαλύτερες δυνατότητες αντικατάστασής τους, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση σημαντικού ποσού ενέργειας. Στους πίνακες 4.3 και 4.4 γίνεται πιο αναλυτική παρουσίαση των στοιχείων αυτών:

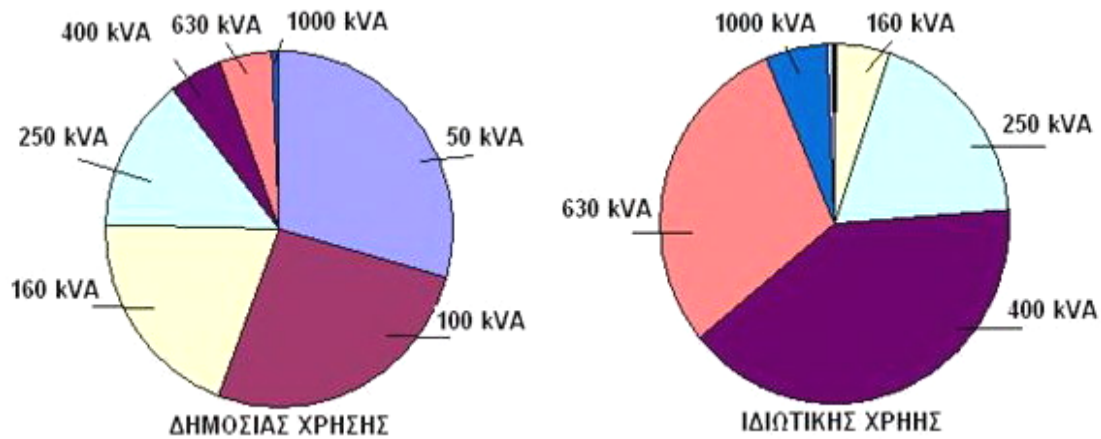
Όνομαστική Ισχύς (kVA)	Δημόσιας χρήσης	Ιδιωτικής Χρήσης
50	41000	4
100	36500	46
160	27500	750
250	20000	2810
400	7000	6100
630	7000	4500
1000	650	900
1600	---	75
2500	---	1
Συνολικός Αριθμός :	139650	15186

Πίνακας 4.3: Εγκατεστημένοι μετασχηματιστές διανομής στην Ελλάδα

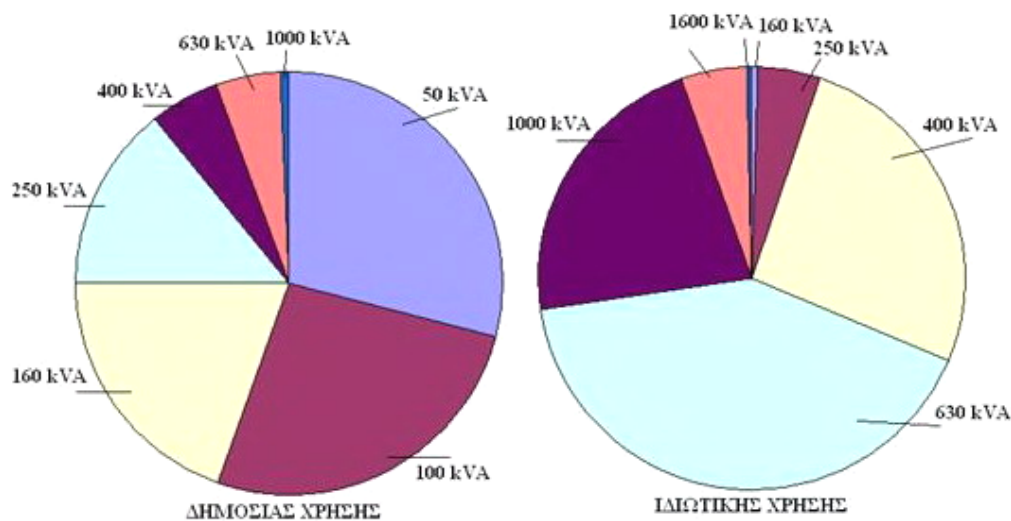
Όνομαστική Ισχύς (kVA)	Δημόσιας χρήσης	Ιδιωτικής Χρήσης
50	2125	-
100	1900	-
160	1450	4
250	1025	30
400	380	165
630	380	260
1000	34	140
1600	-	33
2500	-	1
Συνολικός Αριθμός :	7294	633

Πίνακας 4.4: Νέοι μετασχηματιστές διανομής, ανά έτος

Στα σχήματα 4.7 και 4.8 παρακάτω, οπτικοποιούνται τα στοιχεία που δίνονται στους παραπάνω πίνακες, παρουσιάζοντας την πίτα των μετασχηματιστών διανομής για την Ελλάδα, ανάλογα με την ονομαστική ισχύ και τη χρήση, τόσο των ήδη εγκατεστημένων, όσο και των νέων:



Σχήμα 4.7: Η πίτες των εγκατεστημένων μετασχηματιστών διανομής



Σχήμα 4.8: Η πίτες των νέων μετασχηματιστών διανομής

Οι περισσότεροι από τους ήδη εγκατεστημένους μετασχηματιστές διανομής έχουν υψηλές απώλειες, αφού έχει προτιμηθεί η αρχικά χαμηλή τιμή αντί της αποδοτικότητας, ενώ πολλοί από αυτούς (κυρίως αυτοί που έχουν δημόσια χρήση) είναι και αρκετά γερασμένοι.

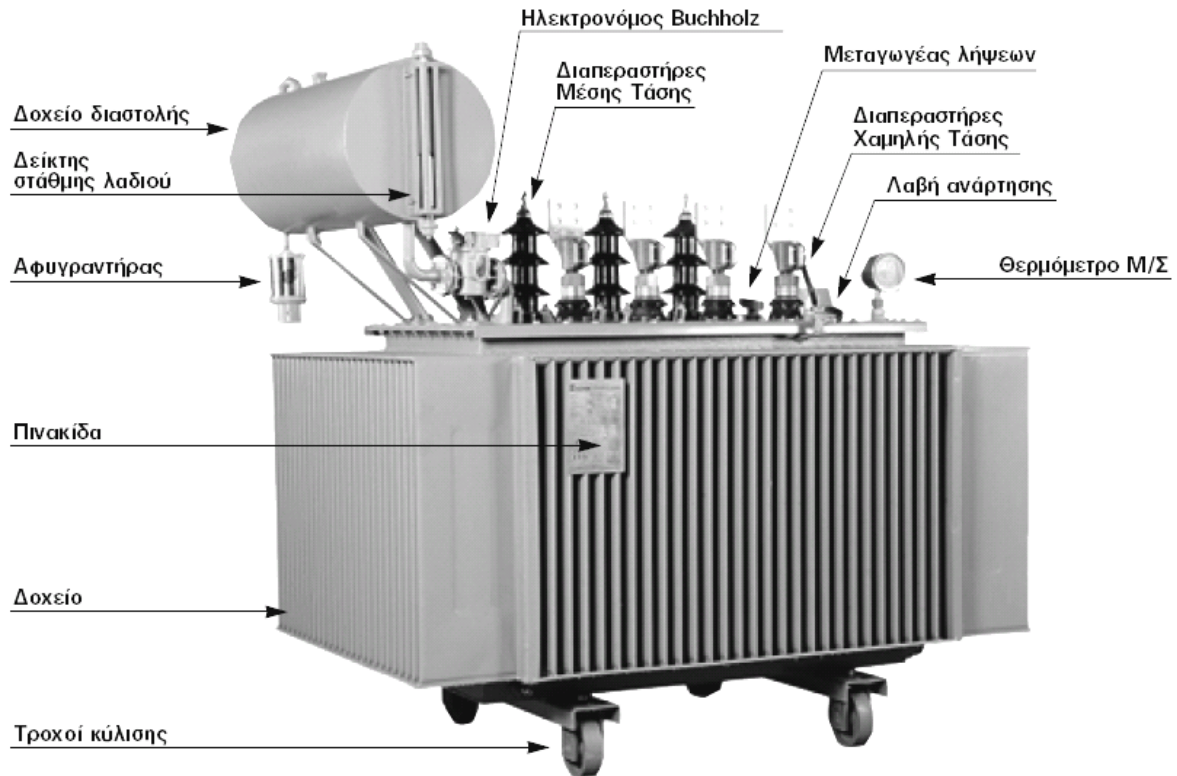
Η αντικατάσταση του συνόλου των μετασχηματιστών διανομής από νέους αποδοτικότερους είναι πρακτικά ανέφικτη και οικονομικά ασύμφορη. Όμως, οι νέοι μετασχηματιστές που εγκαθίστανται επιβάλλεται να είναι ενεργειακά αποδοτικοί, αφού το όφελος θα είναι διπλό. Η χρήση αποδοτικών μετασχηματιστών από τη μία πλευρά θα περιορίσουν την κατανάλωση ενέργειας και θα αποφύγουν τις επιπλέον εκπομπές αερίων ρύπων που ενδέχεται να καλούνται να τις πληρώνουν, λόγω του πρωτόκολλου του Κιότο, και από την άλλη θα υπάρχει και οικονομικό όφελος για τους αγοραστές των μετασχηματιστών αυτών.

4.3.1 Οι Μ/Σ διανομής ελαίου της Schneider Electric-ΕΛΒΗΜ

Στην Ελλάδα, η πρόην εταιρία ΕΛΒΗΜ von Schneider Electric⁵ είναι η εταιρία η οποία παράγει και προμηθεύει τις επιχειρήσεις με μετασχηματιστές διανομής. Διαθέτει καθετοποιημένη παραγωγή στους μετασχηματιστές, από το σχεδιασμό έως και την κατασκευή των μεταλλικών μερών. Μεταξύ των πελατών της εταιρίας, εκτός της ΔΕΗ συγκαταλέγονται και πολλά από τα μεγαλύτερα ονόματα της ελληνικής βιομηχανίας. Είναι χαρακτηριστικό ότι ένας στους δύο εγκατεστημένους μετασχηματιστές στην Ελλάδα είναι ΕΛΒΗΜ. Τα τελευταία χρόνια η εταιρία έχει αναπτύξει έντονη εξαγωγική δραστηριότητα, εξάγοντας περίπου το 30% του συνόλου των μετασχηματιστών που παράγει σε περισσότερες από 25 χώρες σε ολόκληρο τον κόσμο: στην Ευρώπη, στη Μέση Ανατολή, στην Αφρική και στην Ασία.

Πλέον είναι η μόνη εταιρία στον ελληνικό χώρο που δραστηριοποιείται σε αυτόν τον χώρο και οι περισσότεροι εγκατεστημένοι μετασχηματιστές διανομής είναι δικοί της. Συνεπώς, θα ήταν σκόπιμο να παρουσιαστούν κάποια βασικά στοιχεία και ονοματικά μεγέθη των μετασχηματιστών της, εστιάζοντας στις απώλειες των τυπικών μετασχηματιστών που παράγει. Ένας τυπικός μετασχηματιστής διανομής λαδιού ΕΛΒΗΜ, με όλα τα εξαρτήματα που τον απαρτίζουν, φαίνεται στο σχήμα 4.9.

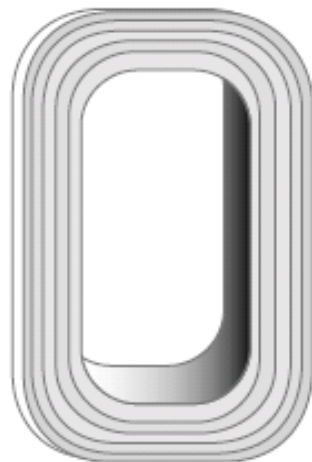
⁵ Η εταιρία Schneider Electric έχει παγκοσμίως 72.200 εργαζομένους, παρουσία σε 130 χώρες, 190 βιομηχανικές εγκαταστάσεις και 13.000 σημεία πώλησης. Στην Ελλάδα, έχει μία δυναμική υπόσταση με 208 ανθρώπους, 3 κέντρα εξυπηρέτησης πελατών στην Αθήνα, τη Θεσσαλονίκη και στην Πάτρα, εργοστάσιο παραγωγής Μετασχηματιστών διανομής ελαίου στα Οινόφυτα Βοιωτίας και 70 σημεία πώλησης - Διανομείς Ηλεκτρολογικού Υλικού σε όλη την Ελλάδα. Όλες οι δραστηριότητες της εταιρίας στηρίζονται στην τεχνογνωσία των εμπορικών της επωνυμιών: Merlin Gerin, Square D, Telemecanique και ΕΛΒΗΜ.



Σχήμα 4.9: Μετασχηματιστής διανομής λαδιού – ΕΛΒΗΜ

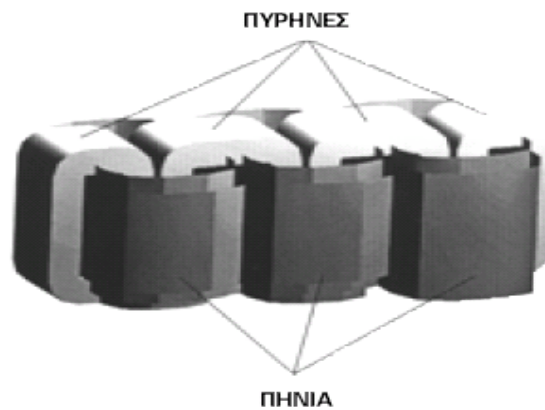
Κατασκευαστικά στοιχεία

Πυρήνες : Οι πυρήνες των μετασχηματιστών, που κατασκευάζονται στο εργοστάσιο της Σνάνιντερ Ελεκτρικ, είναι τεχνολογίας τυλιχτού πυρήνα (wound core) και κατασκευάζονται από μαγνητική λαμαρίνα χαμηλών απωλειών.



Σχήμα 4.10: Τυλιχτός Πυρήνας

Πηνία : Τα πηνία είναι ορθογωνικής διατομής. Σαν πηνίο χαμηλής τάσης χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο φύλλο χαλκού ή αγωγός ορθογωνικής διατομής. Σαν πηνίο μέσης τάσης χρησιμοποιείται σύρμα χαλκού ή αγωγός ορθογωνικής διατομής. Ο συνδυασμός αυτός μαζί με το μονωτικό υλικό μεταξύ των στρώσεων, στο οποίο υπάρχουν ρόμβοι εποξικής κόλλας, δίνουν μεγάλη αντοχή στην καταπόνηση λόγω βραχυκυκλώματος. Κατά την παραγωγική διαδικασία ξηραίνονται τα πηνία σε φούρνο 100° C με αποτέλεσμα τον πολυμερισμό της εποξικής κόλλας, δίνοντας ένα συμπαγές σύνολο.



Σχήμα 4.11: Τρισδιάστατη παρουσίαση του ενεργού μέρους (πυρήνες και πηνία) μετασχηματιστή διανομής της Schneider Electric

Ψυκτικό μέσο : Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται λάδι που πληρεί τις προδιαγραφές IEC 296. Η αρχική πλήρωση γίνεται σε θάλαμο υψηλού κενού (δίπλανο σχήμα), ώστε να εξασφαλισθεί η διείσδυση του λαδιού παντού και να εξαλειφθεί οποιαδήποτε παρουσία φυσαλίδας αέρα ή υγρασία που θα μπορούσε να προκαλέσει διηλεκτρική αστοχία του πηνίου. Μεταγενέστερες συμπληρώσεις επιτρέπονται χωρίς κενό, με την προϋπόθεση ότι η στάθμη του λαδιού δεν έχει αποκαλύψει το ενεργό μέρος και ότι το λάδι έχει υποστεί τη διαδικασία αφύγρανσής του.

Σε συμφωνία πάντα με το χρήστη του μετασχηματιστή, το λάδι μπορεί να προέρχεται από τη Σνεντέρ Ελεκτρική ή από άλλη εταιρία, αρκεί να είναι σύμφωνο με τη δοθείσα προδιαγραφή.



Κατασκευή

Για να κατασκευαστεί ένας τριφασικός μετασχηματιστής διανομής, τύπου τυλιχτού πυρήνα της εταιρείας Schneider Electric, 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 κοπή⁶ του 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 υποβάλλεται σε ανόπτηση⁷ προκειμένου ν' ανακτηθούν πλήρως οι ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητες του μαγνητικού υλικού.

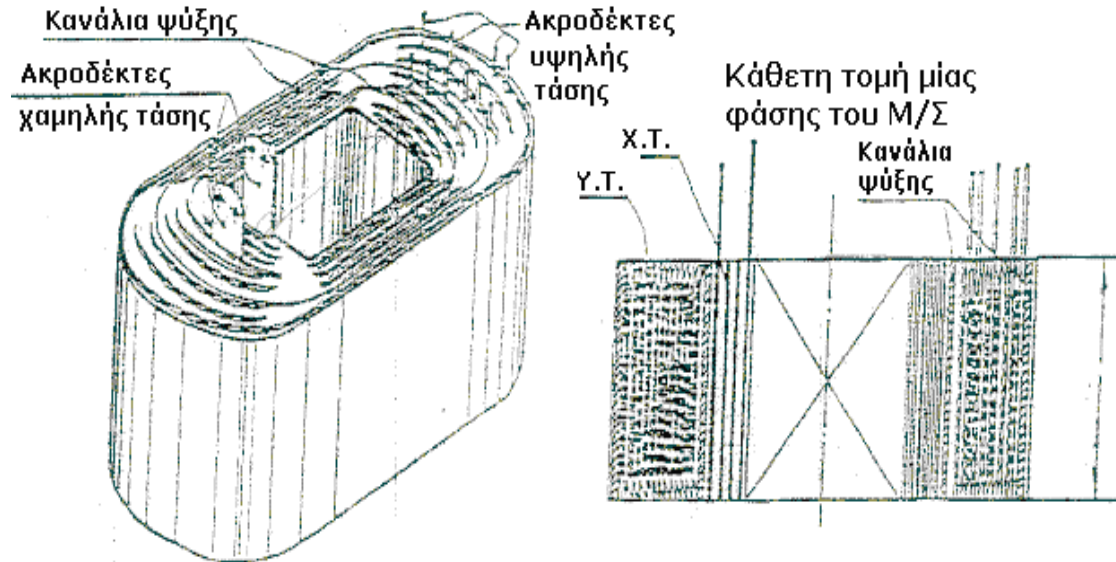
Το τύλιγμα της χαμηλής τάσης βρίσκεται πλησιέστερα στον πυρήνα. Για την κατασκευή του τυλίγματος της υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό. Η κατασκευή του τυλίγματος της χαμηλής τάσης είναι απλούστερη καθώς αποτελείται από στρώσεις φύλλου χαλκού, οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες. Μεταξύ του 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



⁶ Η κοπή των ελασμάτων γίνεται με πολύ αιχμηρά εργαλεία για να αποφεύγεται η δημιουργία γρεζιού. Αυτό βραχυκυκλώνει τα ελάσματα με συνέπεια την αύξηση των απωλειών. Γι αυτό χρησιμοποιούνται κοπτικά εργαλεία από διαμάντι.

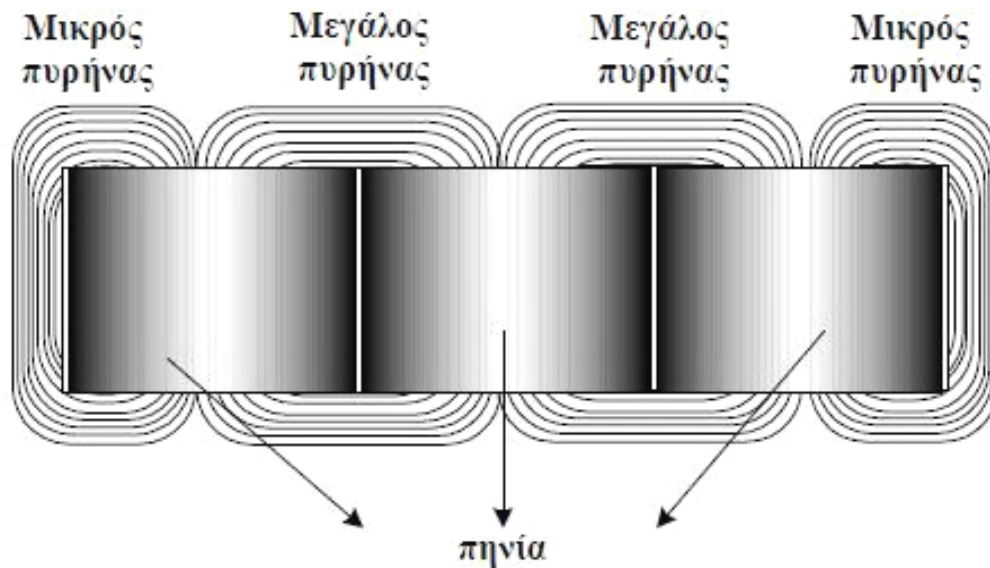
⁷ Θερμική κατεργασία στην οποία υποβάλλεται ένα μέταλλο ή κράμα, που έχει υποστεί κάποια κατεργασία, προκειμένου στη συνέχεια υποβαλλόμενο σε ψύξη βελτιωθεί η ευκαμψία του και γίνει λιγότερο εύθρυπτο. Κατά την ανόπτηση το υλικό θερμαίνεται μέσα σε ειδικό κλίβανο, ("κλίβανος ανόπτησης"), σε υψηλή θερμοκρασία (500–850°C) για κάποιο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια ψύχεται αργά για αρκετές ώρες, σε θερμοκρασία δωματίου έτσι ώστε να εξαλειφθούν οι υπολειπόμενες εσωτερικές τάσεις (καταπονήσεις). Συνηθέστερα ανόπτηση γίνεται σε υλικά αλουμινίου, προϊόντα και παραγωγή γυαλιού και ειδικότερα στη χαλυβουργία.

χαρτιού. Στο σχήμα 4.12 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.



Σχήμα 4.12: Φάση τριφασικού μετασχηματιστή διανομής της Schneider Electric (αριστερά) - κάθετη τομή (δεξιά).

Στο σχήμα 4.13 φαίνεται το συναρμολογημένο ενεργό μέρος ενός τριφασικού μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα.



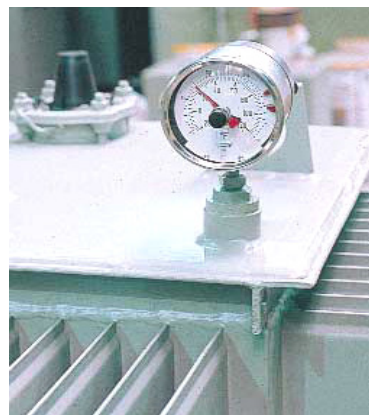
Σχήμα 4.13: Συναρμολογημένο ενεργό μέρος μετασχηματιστή

Εξαρτήματα

Δοχείο μετασχηματιστή : Το δοχείο του μετασχηματιστή αποτελείται από τον πυθμένα, τη στεφάνη και τα πλευρικά τοιχώματα. Τα πλευρικά τοιχώματα του δοχείου κατασκευάζονται από πτυχωτά ελάσματα με στόχο την αύξηση της επιφάνειας ψύξης. Το δοχείο των μετασχηματιστών κλειστού τύπου (χωρίς δοχείο διαστολής) γεμίζει με λάδι και σφραγίζεται ερμητικά. Τα ελαστικά τοιχώματα του δοχείου δεν επιτρέπουν να δημιουργηθεί μεγάλη αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του, η οποία προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Στο δοχείο τοποθετούνται δύο αφαλοί γείωσης αντιδιαμετρικά μεταξύ τους, έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα γείωσης του δοχείου. Στον πυθμένα του δοχείου είναι συγκολλημένο το σύστημα κύλισης με τροχούς ή η βάση έδρασης.

Κάλυμμα μετασχηματιστή : Πάνω στο κάλυμμα υπάρχουν δύο λαβές ανάρτησης που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση και τη μεταφορά του μετασχηματιστή. Στο κάλυμμα τοποθετείται η θήκη θερμομέτρου και το θερμομέτρο δύο ηλεκτρικών επαφών, εφόσον ζητηθούν. Επίσης, στο κάλυμμα μπαίνει ένας αφαλός γείωσης. Συνήθως στους μετασχηματιστές κλειστού τύπου τοποθετείται ανακουφιστική βαλβίδα στο κάλυμμα τους.

Θερμόμετρο μετασχηματιστή : Το θερμικό στοιχείο του θερμομέτρου είναι τοποθετημένο στο πιο ψηλό στρώμα του λαδιού, έτσι ώστε να μετράει τη μέγιστη θερμοκρασία του λαδιού. Οι ηλεκτρικές επαφές του θερμομέτρου ρυθμίζονται στις επιθυμητές θερμοκρασίες και συνδέονται στο κύκλωμα προστασίας για συναγερμό (alarm) και για διακοπή (trip) του κυκλώματος, όταν γίνει υπέρβαση των αντίστοιχων ορίων των θερμοκρασιών αυτών.

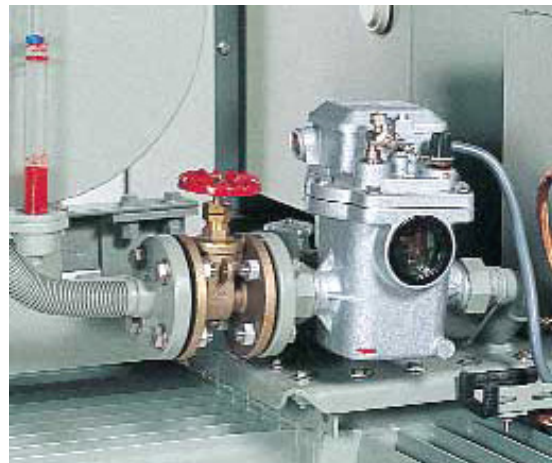


Μεταγωγέας λήψεων : Η εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από τη θέση του μετασχηματιστή στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό χρησιμοποιείται ο μεταγωγέας λήψεων, έτσι ώστε με δεδομένη την εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή η τάση στο δευτερεύον.

Μεταγωγέας τάσεων : Ο μεταγωγέας τάσεων χρησιμοποιείται για την αλλαγή της τάσης λειτουργίας του μετασχηματιστή από μια τάση σε μια άλλη, ανάλογα με την τάση του δικτύου, στην οποία είναι συνδεδεμένος ο μετασχηματιστής.

Δοχείο διαστολής : Κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας του λαδιού του μετασχηματιστή, και άρα του όγκου του λαδιού, το δοχείο διαστολής δέχεται αυτή την αυξομείωση του όγκου του λαδιού. Η ποσότητα του λαδιού που περιέχει το δοχείο διαστολής μετριέται από το δείκτη στάθμης λαδιού, ο οποίος είναι ανθεκτικός σε υψηλή θερμοκρασία και έχει δύο ενδεικτικά σημεία: το πρώτο δείχνει τη στάθμη στους -20°C και το δεύτερο τη στάθμη στους 20°C . Οι μετασχηματιστές με δοχείο διαστολής συνήθως διαθέτουν αφυγραντήρα και Buchholz.

Ηλεκτρονόμος Buchholz : Η προστασία των μετασχηματιστών λαδιού από εσωτερικά σφάλματα, τα οποία προκαλούν ανάπτυξη αερίων ή έντονη ροή λαδιού, γίνεται με τον ηλεκτρονόμο Buchholz, ο οποίος τοποθετείται μεταξύ του δοχείου του μετασχηματιστή και του δοχείου διαστολής. Στην περίπτωση σχηματισμού φυσαλίδων (σαν αποτέλεσμα εσωτερικής βλάβης) ή έλλειψης λαδιού, μετακινείται προς τα κάτω ο πρώτος πλωτήρας και ενεργοποιείται η επαφή συναγερμού, ενώ όταν τα αέρια που εκλύονται είναι αρκετά (δηλαδή όταν η εσωτερική βλάβη είναι σημαντική) μετακινείται προς τα κάτω ο δεύτερος πλωτήρας και ενεργοποιείται η επαφή διακοπής. Ακόμη διακοπή έχουμε εάν δημιουργηθεί έντονη ροή λαδιού προς το δοχείο διαστολής μετά από βραχυκύκλωμα ή εσωτερική βλάβη. Επίσης, ο ηλεκτρονόμος Buchholz παρέχει προστασία από διαρροή λαδιού.



Αφυγραντήρας : Ο αφυγραντήρας τοποθετείται πάνω στο δοχείο διαστολής. Μέσα από τον αφυγραντήρα περνά ο αέρας προς και από το δοχείο διαστολής του μετασχηματιστή λόγω της συστολής και διαστολής του όγκου του λαδιού. Περιέχει κρυστάλλους SiO_2 (Silicegal), οι οποίοι απορροφούν την υγρασία του αέρα. Το Silicegal μπορεί να είναι μπλε (πλήρως ξηρό), γαλάζιο (μερικώς υγρό) και ροζ (κορεσμένο από υγρασία). Όσο το χρώμα του είναι μπλε απορροφά την υγρασία. Όταν κορεστεί και αλλάζει χρώμα και γίνει ροζ, πρέπει να ξηρανθεί ή να αντικατασταθεί.



Βαλβίδα εκκένωσης/δειγματοληψίας λαδιού : Στο κάτω μέρος ενός πλευρικού τοιχώματος του δοχείου του μετασχηματιστή τοποθετείται η βαλβίδα εξαγωγής λαδιού, η οποία επιτρέπει τη δειγματοληψία για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού.

Σύνδεσμος γείωσης ουδετέρου : Ο σύνδεσμος αυτός εξασφαλίζει τη γείωση του ουδετέρου κόμβου του τριφασικού τυλίγματος με το δοχείο του μετασχηματιστή.

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα τυπικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών της ΕΛΒΗΜ, όπως αυτά δίνονται στο τεχνικό τετράδιο της εταιρίας για τους μετασχηματιστές διανομής λαδιού. Στον πίνακα 4.5, συνοψίζονται τα τυπικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των τριφασικών μετασχηματιστών διανομής λαδιού της ΕΛΒΗΜ, 250 έως 1600 kVA, 20/0.4 kV:

Όνομαστική ισχύς (kVA)	250	400	500	630	800	1000	1250	1600
Απώλειες κενού φορτίου (W)	610	850	1000	1200	1450	1750	2100	2550
Απώλειες φορτίου στα 20 kV (W)	4450	6450	7800	9300	11000	13500	16400	19800
Ρύθμιση τάσης $\cos\varphi = 1$	1,94	1,78	1,73	1,65	1,55	1,52	1,48	1,41
σε πλήρες φορτίο (%) $\cos\varphi = 0,8$	4,92	4,82	4,79	4,74	4,68	4,66	4,64	4,59
Τάση βραχυκύκλωσης (%)	6	6	6	6	6	6	6	6
Φορτίο $\cos\varphi = 1$	98,02	98,21	98,27	98,36	98,47	98,50	98,54	98,62
Απόδοση (%) 100 % $\cos\varphi = 0,8$	97,53	97,77	97,85	97,96	98,09	98,13	98,18	98,28
Φορτίο $\cos\varphi = 1$	98,37	98,53	98,58	98,66	98,74	98,77	98,81	98,87
75 % $\cos\varphi = 0,8$	97,97	98,17	98,24	98,33	98,43	98,47	98,51	98,59

Πίνακας 4.5: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά.

Τα δε τυπικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών χαμηλών απωλειών της ΕΛΒΗΜ παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα 4.6:

Όνομαστική ισχύς (kVA)	250	400	500	630	800	1000	1250	1600
Απώλειες κενού φορτίου (W)	425	610	750	860	940	1100	1350	1700
Απώλειες φορτίου στα 20 kV (W)	3250	4600	5500	6500	8700	10500	13300	17000
Ρύθμιση τάσης $\cos\phi = 1$	1,37	1,22	1,17	1,11	1,26	1,22	1,24	1,24
σε πλήρες φορτίο (%) $\cos\phi = 0,8$	3,33	3,25	3,22	3,17	4,49	4,47	4,48	4,48
Τάση βραχυκύκλωσης (%)	4	4	4	4	6	6	6	6
Φορτίο $\cos\phi = 1$	98,55	98,71	98,77	98,85	98,81	98,85	98,84	98,84
Απόδοση (%) 100 % $\cos\phi = 0,8$	98,20	98,40	98,46	98,56	98,52	98,57	98,56	98,56
Φορτίο $\cos\phi = 1$	98,81	98,95	98,99	99,05	99,04	99,07	99,07	99,07
75 % $\cos\phi = 0,8$	98,52	98,69	98,73	98,82	98,80	98,85	98,84	98,84

Πίνακας 4.6: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστών χαμηλών απωλειών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Τεχνολογίες Μ/Σ Διανομής Χαμηλών Απωλειών *Το παρόν και το μέλλον*

5.1 Θέματα σχεδίασης μετασχηματιστών

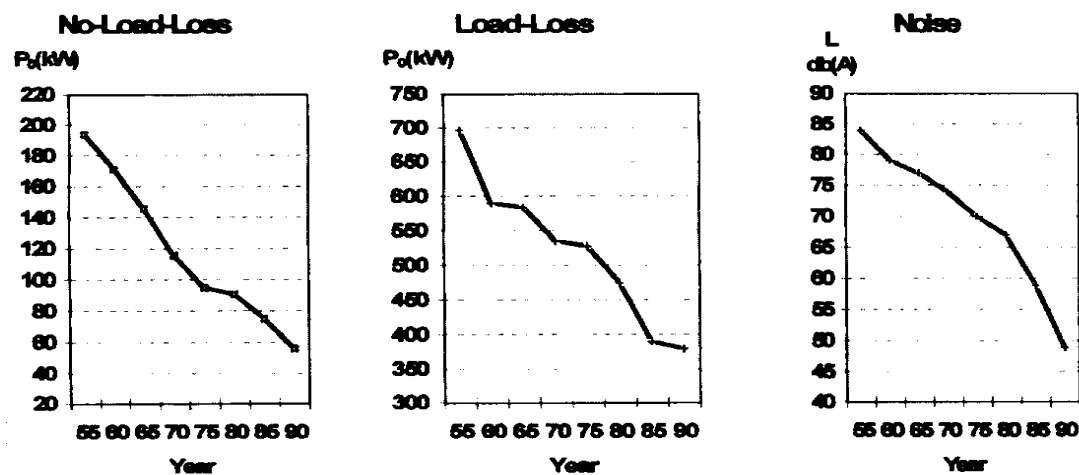
Οι μετασχηματιστές κατασκευάζονται σε σχετικά μικρές σε αριθμό παρτίδες λόγω των ιδιαίτερων απαιτήσεων που έχουν οι εκάστοτε αγοραστές. Η σχεδίαση των μετασχηματιστών είναι εξαιρετικά εξειδικευμένος τομέας και απαιτεί υψηλή τεχνική κατάρτιση και πείρα από το προσωπικό σχεδίασης. Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή είναι η μαγνητική επαγωγή¹, η πυκνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα και η αναλογία σιδήρου-χαλκού.

Κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό έχει τις δικές του απώλειες πυρήνα, οι οποίες εξαρτώνται από τη μαγνητική επαγωγή του. Μόλις ξεπεραστεί η τιμή της επαγωγής κορεσμού του υλικού, η μαγνητική ροή εγκαταλείπει τον πυρήνα και οι απώλειες κενού φορτίου γίνονται ανεξέλεγκτες. Κατά συνέπεια η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής πρέπει να είναι περιορισμένη σε τιμή αρκετά χαμηλότερη από την τιμή κορεσμού. Η ενεργειακή απόδοση ενός μετασχηματιστή μπορεί να βελτιωθεί είτε επιλέγοντας σιδηρομαγνητικά υλικά με χαμηλότερες απώλειες πυρήνα είτε μειώνοντας τη μαγνητική επαγωγή σε έναν συγκεκριμένο πυρήνα με αύξηση του μεγέθους του.

Η αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος στα τυλίγματα χαλκού μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας τη διατομή των αγωγών. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση, αλλά αυξάνεται το κόστος κατασκευής του μετασχηματιστή. Επειδή οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από την φόρτιση του μετασχηματιστή, είναι σκόπιμο να ληφθούν υπ' όψιν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αναμένεται να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει ο μετασχηματιστής στην πράξη.

¹ Η μαγνητική επαγωγή (ή πυκνότητα μαγνητικής ροής: flux density) \mathbf{B} , είναι ένα μέτρο της φόρτισης του πυρήνα σιδήρου και μετριέται σε Tesla (T) ή σε Wb/m^2

Η αναλογία μεταξύ των ποσοτήτων του σιδήρου, που θα χρησιμοποιηθεί στον πυρήνα και του χαλκού, που θα χρησιμοποιηθεί στα τυλίγματα, πρέπει να τυγχάνει ιδιαίτερης προσοχής, διότι επηρεάζει το κόστος κύκλου ζωής του μετασχηματιστή. Ένας «πλούσιος σε χαλκό» μετασχηματιστής έχει υψηλή απόδοση σε ένα μεγάλο εύρος ρευμάτων φόρτισης, ενώ ένας «πλούσιος σε σίδηρο» μετασχηματιστής έχει χαμηλότερη τιμή αγοράς και, επιπλέον, μπορεί να είναι πιο οικονομικός, εφόσον ο μετασχηματιστής θα λειτουργεί σε χαμηλή φόρτιση. Οι εμπορικές τιμές του χαλκού και του σιδήρου αλλάζουν διαρκώς και επηρεάζουν το συσχετισμό των ποσοτήτων των δύο αυτών υλικών που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή ενός μετασχηματιστή.



Σχήμα 5.1: Η συνεχής βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών ενός Μ/Σ διανομής 200 kVA με την πάροδο του χρόνου.

Οι σχεδιαστές μετασχηματιστών έχουν σήμερα στη διάθεσή τους μια ποικιλία διαθέσιμων σιδηρομαγνητικών υλικών για την κατασκευή του πυρήνα, ενώ έχουν το περιθώριο επιλογής των τεχνικών, τις οποίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν για την κατασκευή του πυρήνα, των τυλιγμάτων, της μόνωσης και άλλων μερών του μετασχηματιστή, προκειμένου να επιτύχουν τα επιθυμητά επίπεδα απωλειών και, γενικότερα, να βελτιστοποιήσουν τη σχεδίαση. Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιήσουν εναλλακτικά υλικά, όπως για παράδειγμα πηνία αλουμινίου.

Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί και σε άλλα μέρη των μετασχηματιστών διανομής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η ανάπτυξη πυρίμαχων ψυκτικών μέσων για την αντικατάσταση των πολυχλωροδιφαινυλίων (PCBs) και η χρήση χυτής ρητίνης ως εναλλακτικού μονωτικού υλικού στην κατασκευή πυρήνων ξηρού τύπου. Επιπλέον πιο εξελιγμένα μονωτικά χαρτιά και χαρτόνια είναι διαθέσιμα.

5.2 Πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου

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 απόδοσή τους,
- 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. Για την εύρεση των απωλειών κενού φορτίου η συμβατική διαδικασία που ακολουθείται σήμερα είναι ο διαχωρισμός των απωλειών σε τρεις συνιστώσες και ο υπολογισμός κάθε συνιστώσας από κατάλληλα μοντέλα. Οι απώλειες κενού φορτίου χωρίζονται στις εξής συνιστώσες:

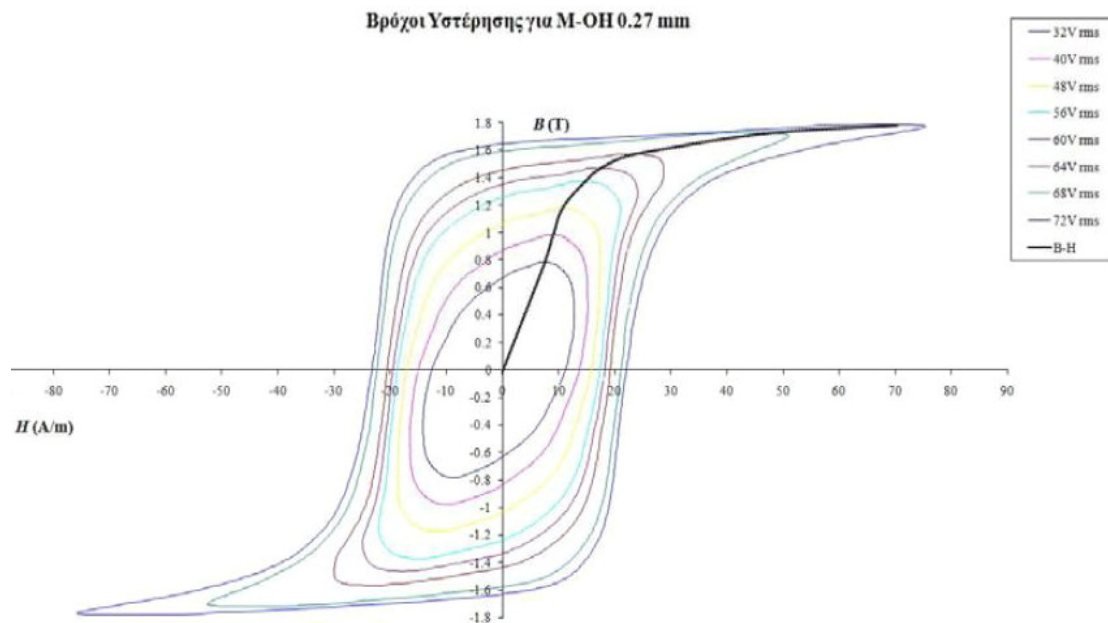
- Απώλειες κλασσικών δινορευμμάτων (classical eddy current losses)
- Απώλειες υστέρησης (hysteresis losses)
- Ανώμαλες απώλειες (anomalous or excess losses)

Οι απώλειες υστέρησης και οι ανώμαλες είναι πιο δύσκολο να υπολογιστούν καθώς δεν έχει αναπτυχθεί μέχρι σήμερα ένα ακριβές φυσικό μοντέλο. Τα μοντέλα που βρίσκουν συνήθως εφαρμογή είναι τα φαινομενολογικά μοντέλα, δηλαδή μαθηματικά μοντέλα (μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων, οριακών στοιχείων, κτλ.). Αν και έχουν δώσει χρήσιμα αποτελέσματα σε πολλές εφαρμογές, δεν έχουν ικανοποιητική ακρίβεια ή απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος και γι αυτό το λόγο δεν έχουν βρει ακόμη ευρεία εφαρμογή στη βιομηχανία.

Η συνήθης πρακτική στη βιομηχανία μετασχηματιστών για τον υπολογισμό απωλειών κενού φορτίου είναι η κατασκευή πειραματικών

καμπυλών, η οποία απαιτεί τη διεξαγωγή ενός μεγάλου αριθμού μετρήσεων, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των παραμέτρων που επηρεάζουν τις απώλειες κενού φορτίου. Η μέθοδος αυτή, παρουσιάζει πολύ καλή ακρίβεια στην περίπτωση τυποποιημένων μετασχηματιστών και σιδηρομαγνητικών υλικών για τα οποία υπάρχει επαρκής βιομηχανική εμπειρία. Στην περίπτωση όμως μη τυποποιημένων σχεδιάσεων ή στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται καινούριες μαγνητικές λαμαρίνες, η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει μεγάλα σφάλματα.

Στο παρακάτω σχήμα 5.2 απεικονίζονται οκτώ βρόχοι $B-H$ όπως προέκυψαν πειραματικά κατά τη δοκιμή κενού φορτίου ενός τυλιχτού πυρήνα και για τάσεις εισόδου με ενεργό τιμή από 32 V μέχρι 72 V. Συνδέοντας τα σημεία της τιμής κορυφής της μαγνητικής επαγωγής κάθε βρόχου $B-H$, προκύπτει η καμπύλη κανονικής μαγνήτισης η οποία χρησιμοποιείται ως είσοδος στη μη γραμμική μαγνητοστατική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

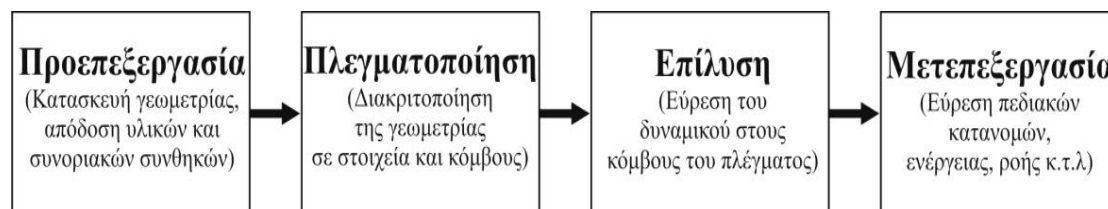


Σχήμα 5.2: Βρόχοι υστέρησης τυλιχτού πυρήνα κατά τη δοκιμή κενού φορτίου.

Παρόλα αυτά, η χρήση για κάθε μαγνητική λαμαρίνα, καμπυλών ειδικών απωλειών σε συνάρτηση με την τιμή κορυφής της μαγνητικής επαγωγής είναι ένα καλό πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό των απωλειών κενού φορτίου, καθώς οι συγκεκριμένες καμπύλες μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό που πρέπει να διερευνηθεί στο μέλλον, είναι η ανάπτυξη συστηματικών τεχνικών, για τον προσδιορισμό της τοπικής κατανομής της μαγνητικής επαγωγής, και για τον πειραματικό προσδιορισμό

των τοπικών ειδικών απωλειών, έτσι ώστε να αναπτυχθεί μία γενικευμένη μέθοδος για το υπολογισμό των απωλειών κενού φορτίου τυλιχτών πυρήνων ανεξάρτητα των γεωμετρικών παραμέτρων τους.

Πρόσφατα, στο πλαίσιο της συνόδου της Ελληνικής Επιτροπής CIGRE «Αθήνα 2009» παρουσιάστηκε μια ενδιαφέρουσα εργασία για τον υπολογισμό των απωλειών κενού φορτίου με πολύ καλή ακρίβεια και χαμηλό κόστος. Στην εργασία αυτή ο υπολογισμός των απωλειών κενού φορτίου επιτυγχάνεται με **συνδυασμό** της τοπικά προσδιορισμένης κατανομής της τιμής κορυφής της μαγνητικής επαγωγής (με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων² σε τέσσερα στάδια), με τις πειραματικά προσδιορισμένες τοπικές ειδικές απώλειες.

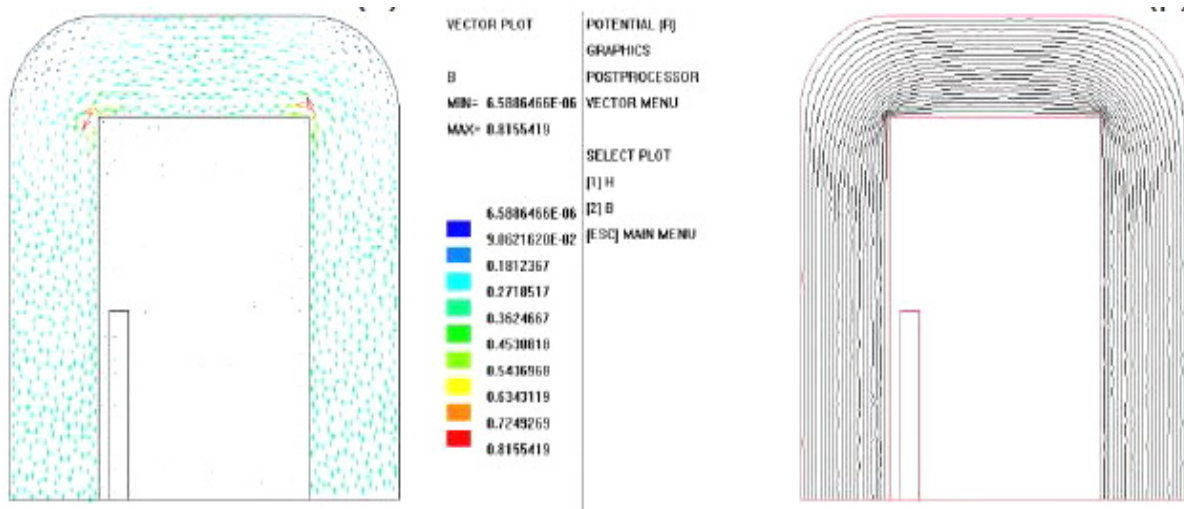


Σχήμα 5.3: Τα τέσσερα στάδια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Πιο συγκεκριμένα αναπτύχθηκε μια επαναληπτική μέθοδος με την οποία είναι δυνατή η εύρεση της κατανομής της τιμής κορυφής της μαγνητικής επαγωγής, μόνο με μαγνητοστατικές αναλύσεις³. Ένα πρόβλημα το οποίο έπρεπε να επιλυθεί ήταν η κατάλληλη αναπαράσταση του τυλιχτού πυρήνα (ένας τυλιχτός πυρήνας αποτελείται από εκατοντάδες σιδηρομαγνητικά ελάσματα).

² Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις αριθμητικές μεθόδους που έχουν επικρατήσει στην ανάλυση του πεδίου διατάξεων τρισδιάστατης γεωμετρίας που περιλαμβάνουν υλικά με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως οι μετασχηματιστές, και μπορεί πλέον να εφαρμοσθεί σε εύλογο χρόνο χρησιμοποιώντας κατάλληλο προσωπικό υπολογιστή. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων τα οποία περιγράφονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις (Μ.Δ.Ε.). Το εξεταζόμενο πεδίο αναπαρίσταται από ομάδα πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση του χώρου γίνεται είτε με τρίγωνα ή με τετράεδρα εάν το πρόβλημα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο αντίστοιχα. Έτσι, ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων με άγνωστες τιμές πεδίου στους κόμβους των κορυφών τους. Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος ανάγεται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων και οι τιμές πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων μπορούν να ανακτηθούν με τη χρήση των υπολογισμένων τιμών στους κόμβους των κορυφών τους.

³ Έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι επίλυσης μαγνητοστατικών προβλημάτων με τη χρήση βαθμωτού δυναμικού ως τώρα, ωστόσο απαιτούν κατά κανόνα τον υπολογισμό των πηγών με τη χρήση του νόμου Biot-Savart, υπολογισμός ο οποίος απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος.



Σχήμα 5.4: Η διανυσματική κατανομή της έντασης του μαγνητικού πεδίου (δεξιά) και της μαγνητικής επαγωγής (αριστερά).

Προκειμένου να υπολογιστεί με ακρίβεια η κατανομή πεδιακών μεγεθών με συμβατικές μεθόδους, θα έπρεπε να μοντελοποιηθούν όλα τα ελάσματα κι ο αέρας μεταξύ τους. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που θα προέκυπτε όμως με αυτόν τον τρόπο θα είχε πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος και η λύση του θα ήταν πολύ δύσκολη ή αδύνατη. Η τεχνική που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εν λόγω εργασίας ήταν να θεωρηθεί το υλικό του τυλιχτού πυρήνα ως συνεχές και να αντικατασταθεί από ένα φαινόμενο υλικό με συγκεκριμένες ιδιότητες. Για την αναπαράσταση του υλικού αναπτύχθηκε ένα ελλειπτικό ανισοτροπικό μοντέλο, κατάλληλο για μοντελοποίηση των σιδηρομαγνητικών ελασμάτων από τα οποία αποτελείται ο τυλιχτός πυρήνας⁴. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλή ακρίβεια στον υπολογισμό της τοπικής κατανομής της μαγνητική επαγωγής, αλλά και εξαιρετικά χαμηλό κόστος. Στο σχήμα 5.4 απεικονίζονται κάποια από τα αποτελέσματα από την εν λόγω μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, για ένα μονοφασικό Μ/Σ τυλιχτού πυρήνα, τύπου κελύφους. Με την παραπάνω τεχνική προκύπτει πολύ μικρό σφάλμα στην πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, ανεξάρτητα της γεωμετρίας των τυλιχτών πυρήνων και επιτυγχάνεται μικρό υπολογιστικό κόστος και μεγάλη ακρίβεια σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές, στις οποίες γίνεται χρήση αρμονικών ή μεταβατικών αναλύσεων. Συνεπώς η συγκεκριμένη μεθοδολογία θεωρείται κατάλληλη να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών.

⁴ Οι τοπικές ειδικές απώλειες προσδιορίστηκαν πειραματικά από ειδική εργαστηριακή διάταξη που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κάνοντας χρήση δοκιμαστικών πηνίων, κάρτας δειγματοληψίας και κατάλληλων υπολογιστικών τεχνικών.

5.3 Βελτίωση απόδοσης με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης

Οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης έχουν πρόσφατα εφαρμοστεί για τη βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών μέσω της μείωσης των απωλειών κενού φορτίου. Οι μέθοδοι αυτές στοχεύουν στο συνδυασμό της ακρίβειας της αριθμητικής μεθόδου (πεπερασμένων-οριακών στοιχείων) στην πρόβλεψη των χαρακτηριστικών κάθε σχεδίασης, με όσο το δυνατόν μικρότερη υπολογιστική επιβάρυνση. Η ακρίβεια της τεχνικής τεχνητής νοημοσύνης, (δηλαδή ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου για την επιλογή υλικού τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές) φτάνει το 96%, γεγονός που την αναδεικνύει ως μια μέθοδο πολύ αποδοτική, ειδικά για βιομηχανική χρήση. Πιο αναλυτικά, με τη χρήση των δένδρων απόφασης προσδιορίζονται οι πιο σημαντικές παράμετροι που επιδρούν στις απώλειες κενού φορτίου. Τα δέντρα απόφασης⁵ (decision trees) επιλέγουν αυτόματα τις πιο σημαντικές παραμέτρους εισόδου που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων, ενώ τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών με βάση όχι μόνο τις συνολικές υποψήφιες παραμέτρους εισόδου αλλά και τις επιλεγμένες παραμέτρους από τα δέντρα απόφασης. Συνεπώς, αποφεύγεται η ανάγκη από τον κατασκευαστή, να εξετάσει για κάθε σχεδίαση ενός μετασχηματιστή ποιό υλικό τυλιγμάτων είναι το οικονομικότερο, (χαλκός, αλουμίνιο, κτλ.) οπότε μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για τη βελτιστοποίησή της.

Όταν πρόκειται για παράδειγμα, να κατασκευαστεί μια παρτίδα, έστω 50 Μ/Σ (ίδια μελέτη και ίδιος τύπος μετασχηματιστή), τότε πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα της ομαδοποίησης των πυρήνων, δηλαδή να συνδυαστούν οι 200 ατομικοί πυρήνες (ένας τριφασικός Μ/Σ τύπου τυλιχτού πυρήνα αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς ατομικούς πυρήνες) με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, έτσι ώστε να προκύψουν 50 Μ/Σ με τις χαμηλότερες δυνατές απώλειες. Επειδή ο αριθμός των συνδυασμών αυτών είναι αρκετά μεγάλος για έναν τυπικό αριθμό πυρήνων, χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι έτσι ώστε να υπολογιστεί μέσα σε μερικές ανακυκλώσεις η βέλτιστη διάταξη των ατομικών πυρήνων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προκαλέσει μείωση των απωλειών κενού φορτίου της τάξεως του 3% ή και πολλές φορές ακόμα μεγαλύτερη για μια τυπική παρτίδα 50 Μ/Σ.

⁵ Η επαγωγή με δέντρα απόφασης είναι μια από τις απλούστερες και πιο πετυχημένες μορφές αλγορίθμων μάθησης. Ένα δέντρο απόφασης παίρνει ως είσοδο ένα αντικείμενο ή μια κατάσταση που περιγράφονται από ένα σύνολο ιδιοτήτων και επιστρέφει μια ναι ή όχι “απόφαση”.

5.4 Τυλίγματα των πηνίων των Μ/Σ διανομής

Η εξέλιξη στην κατασκευή και στο σχεδιασμό των αγωγών τα τελευταία 25 χρόνια, έχει επιφέρει σημαντικές μειώσεις στις απώλειες φορτίου. Τα υλικά των αγωγών που χρησιμοποιούνται στα τυλίγματα των πηνίων των μετασχηματιστών διατίθενται υπό μορφή σύρματος, στενής λωρίδας ή λεπτού ελάσματος. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει κάποια βήματα στην τεχνολογία των υλικών αυτών, τα οποία βελτίωσαν την αξιοπιστία των μετασχηματιστών.

Το αλουμίνιο και ο χαλκός είναι τα δυο βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στα τυλίγματα των μετασχηματιστών διανομής. Όταν τα δύο αυτά υλικά εφαρμόζονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ο χαλκός εμφανίζεται να έχει καλύτερη αγωγιμότητα και 40% μειωμένες ωμικές απώλειες από ότι το αλουμίνιο. Όμως το αλουμίνιο, σε σύγκριση με το χαλκό, μπορεί να μορφοποιηθεί ευκολότερα και είναι πιο φθηνό. Ωστόσο το μειονέκτημα του αλουμινίου είναι ότι παρουσιάζει αυξημένες απώλειες πυρήνα σε σχέση με το χαλκό. Στους μετασχηματιστές διανομής, σε κάποιες σχεδιάσεις ακολουθείται η τακτική να χρησιμοποιείται χαλκός για το πηνίο υψηλής τάσης και αλουμίνιο για το πηνίο χαμηλής τάσης. Η χρήση αλουμινίου στο τύλιγμα χαμηλής τάσης **μειώνει τις απώλειες από δινορεύματα**. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα στο κόστος του υλικού και στις απώλειες.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΧΑΛΚΟΣ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ
Αντοχή σε εφελκυσμό (lb / in ²).	55,000	25,000
Αντοχή σε εφελκυσμό για την ίδια αγωγιμότητα (λίβρες).	55,000	40,000
Βάρος για την ίδια αγωγιμότητα (λίβρες).	100	48
Διατομή για την ίδια αγωγιμότητα (CM).	100	160
Ειδική αντίσταση (W / εκ. ft).	10.6	17

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά χαλκού και αλουμινίου

Γενικά, οι αγωγοί χαλκού προτιμούνται αναλογικά με τους αγωγούς αλουμινίου, εξαιτίας της μικρότερης αντίστασης και ταυτόχρονα της υψηλότερης αντοχής σε ελατότητα που εμφανίζουν να έχουν. Και τα δύο υλικά είναι διαθέσιμα σήμερα σε μορφή φαρδιών φύλλων και λεπτών ελασμάτων με δυνατότητα διάθεσης σε μεγάλες διαστάσεις. Τα φύλλα έχουν αντικαταστήσει τις λωρίδες στην κατασκευή τυλιγμάτων χαμηλής τάσης των μετασχηματιστών διανομής.

Οι δυνατότητες εξέλιξης στον τομέα των τυλιγμάτων περιλαμβάνουν και την κατασκευή των αγωγών με τέτοιο τρόπο, ώστε να βελτιωθεί η μηχανική αντοχή του κατασκευασμένου πηνίου και η συμπαγής κατασκευή των πηνίων. Η διαθεσιμότητα συρμάτων και ράβδων χαλκού και αλουμινίου που παρασκευάζονται με τις διαδικασίες συνεχούς χύτευσης και έλασης (Continuous Casting and Rolling – CCR), σε συνδυασμό με μηχανοποιημένες τεχνικές χειρισμού, έδωσε τη δυνατότητα παρασκευής συρμάτων και λωρίδων σε πολύ μεγαλύτερα μήκη από εκείνα που ήταν διαθέσιμα στο παρελθόν. Η εξέλιξη αυτή αύξησε την αξιοπιστία των μετασχηματιστών, καθώς τα σημεία συγκόλλησης (μάτισης) στη λωρίδα, τα οποία ήταν αναπόφευκτα παλιότερα, δημιουργούσαν αδύναμα σημεία στα πηνία που κατασκευάζονταν. Έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διαθεσιμότητα και πιο σταθερή ποιότητα από εκείνες των λωρίδων που κατασκευάζονταν στο παρελθόν.

Σημαντική εξέλιξη στη σχεδίαση των αγωγών συντελέστηκε με την εισαγωγή αγωγών οι οποίοι κατασκευάζονται με συνεχή αντιμετάθεση των υπο-αγωγών από τους οποίους αποτελούνται (**Continuously Transposed Conductors**). Η χρήση των αγωγών αυτών μειώνει τα δινορρέυματα και επιτρέπει καλύτερη πυκνότητα συσκευασίας του τυλίγματος. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζεται ένας τέτοιος αγωγός και στο ίδιο σχήμα δεξιά παρουσιάζεται ένας μετασχηματιστής του οποίου τα τυλίγματα είναι κατασκευασμένα με την τεχνική αυτή.

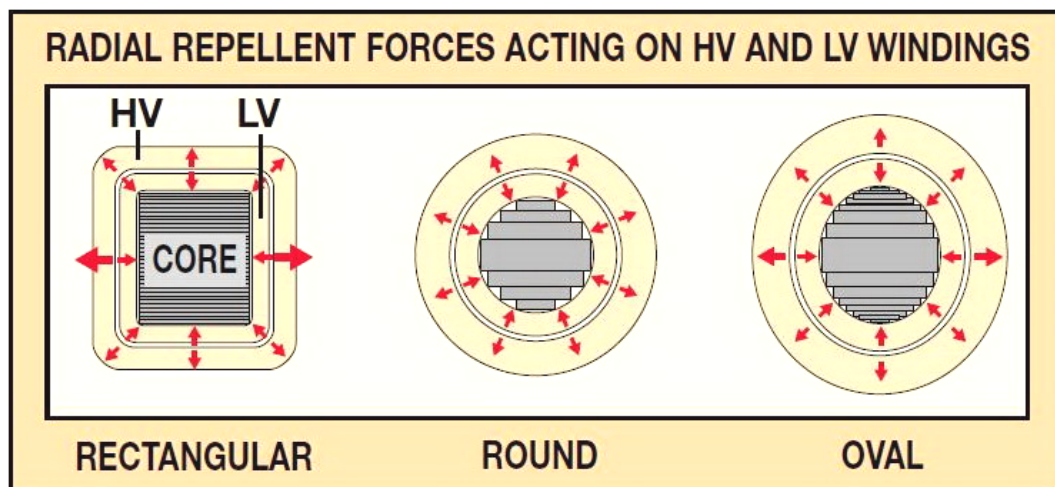


Σχήμα 5.5: Συνεχής αντιμετάθεση αγωγών (αριστερά) και εφαρμογή της συνεχούς αντιμετάθεσης αγωγών σε έναν μεγάλο μετασχηματιστή (δεξιά).

Μία λύση για τη δραστική μείωση των απωλειών στα τυλίγματα, η οποία θα οδηγήσει σε επιπλέον αύξηση της απόδοσης των μετασχηματιστών στο μέλλον, είναι η αντικατάσταση του υφιστάμενου υλικού των αγωγών με

άργυρο⁶, ο οποίος είναι ο καλύτερος ηλεκτρικός αγωγός. Η ιδέα αυτή, όπως και άλλες που μελετώνται, βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο έρευνας και προς το παρόν δεν μπορεί πρακτικά να εφαρμοστεί.

Οι διαδικασίες της τύλιξης των αγωγών για την κατασκευή του πηνίου και στη συνέχεια η προσαρμογή τους στον συναρμολογημένο πυρήνα επηρεάζει τη λειτουργία και την ενεργειακή απόδοση των μετασχηματιστών διανομής. Οι μηχανοποιημένες διαδικασίες τύλιξης χρησιμοποιούνται πλέον ως επί το πλείστον στην κατασκευή των πηνίων με συνέπεια οι περιελίξεις να αποκτούν αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις. Αυτή η μηχανική αντοχή έχει μεγάλη σημασία, δεδομένου ότι, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, οι περιελίξεις πρέπει να υποστούν μεγάλες ακτινικές αποθητικές δυνάμεις (σχήμα 5.6). Η μηχανική επίδραση των δυνάμεων αυτών είναι πολύ μικρή σε κυκλικά τυλίγματα (round windings), καθώς αυτά έχουν εγγενώς την ιδανική μορφή για να αντέχουν ακτινικές δυνάμεις, είναι όμως πολύ μεγαλύτερη σε ορθογώνιες περιελίξεις (rectangular windings). Για να συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της ορθογώνιας διατομής πυρήνα (απλός τρόπος παραγωγής) με τα οφέλη των κυκλικών πηνίων (μεγάλη αντοχή σε αξονικές δυνάμεις βραχυκυκλώματος), πολλές εταιρίες (π.χ. η βελγική Pauwels International) έχουν αναπτύξει πυρήνες και πηνία ωοειδούς (οβάλ) σχήματος.



Σχήμα 5.6: Ακτινικές δυνάμεις σε τρεις τύπους πηνίων Μ/Σ

Οι κύριοι τύποι πηνίων που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές διανομής είναι τα τυλίγματα ελικοειδούς φύλλου, τα πολυστρωματικά πηνία και

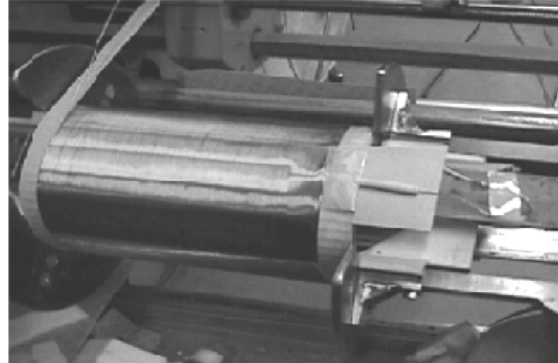
⁶ Ο άργυρος είναι πολύ όλκιμος και ελατός (ελάχιστα σκληρότερος από τον χρυσό). Έχει την υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από όλα τα μέταλλα, ακόμη και από τον χαλκό, αλλά το μεγαλύτερο κόστος και η τάση να θαμπώνει έχουν αποτρέψει την ευρεία χρήση του στη θέση του χαλκού ως αγωγού σε εφαρμογές.

τα δισκοειδή πηνία (σχήμα 5.7). Ο πρώτος τύπος χρησιμοποιείται στα τυλίγματα χαμηλής τάσης, ενώ οι άλλοι δύο στα τυλίγματα υψηλής τάσης των μετασχηματιστών διανομής.

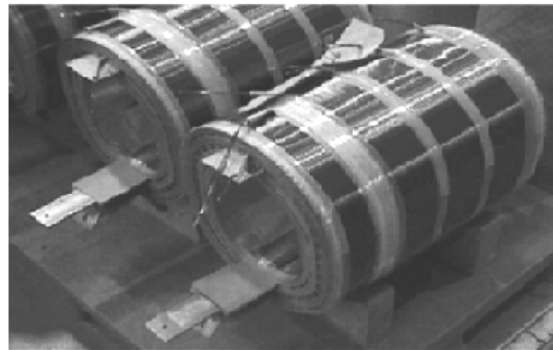
Spiral Sheet Low-voltage Winding



Multilayer Coil High-voltage Winding



Disc Coil High-voltage Winding



Σχήμα 5.7: Τύποι τυλιγμάτων.

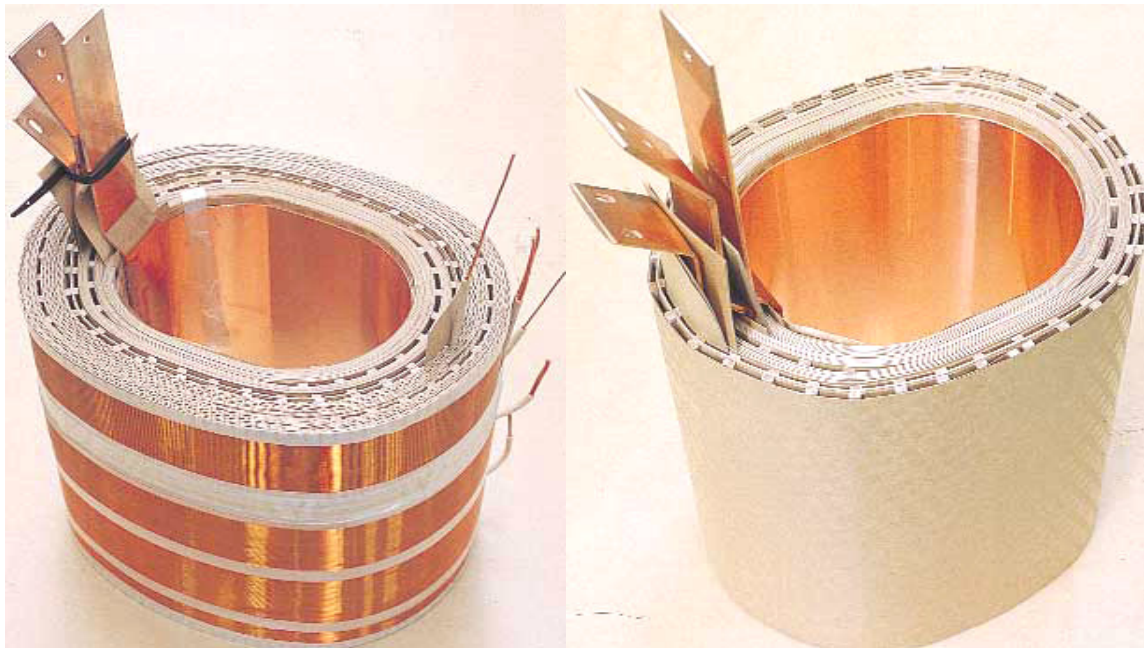
Η χρήση αγωγών τύπου ταινίας (*ribbon conductors*) στα τυλίγματα αποτελεί την πιο πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα του σχεδιασμού των αγωγών. Οι αγωγοί τύπου ταινίας μειώνουν τις απώλειες φορτίου, μέσω της μείωσης των απωλειών δινορευμάτων, και επίσης επιτρέπουν την τοποθέτηση περισσότερου χαλκού σε μικρότερο χώρο. Η μείωση των απωλειών δινορευμάτων επιτυγχάνεται από τη μείωση του εμβαδού της διατομής, που προκύπτει λόγω της χρήσης των αγωγών αυτού του τύπου. Μελέτες έχουν δείξει ότι για κάθε ποσοστιαία μείωση στις διαστάσεις της διατομής του αγωγού, υπάρχει μια αντίστοιχη **μείωση** των απωλειών λόγω δινορευμάτων ίση περίπου με 1,5% και επίσης μια **βελτίωση** του συντελεστή χώρου κατά 25%. Ο αγωγός τύπου ταινίας κατασκευάζεται από επτά επίπεδα τμήματα αγωγών κολλημένα το ένα δίπλα στο άλλο, ενώ η αξονική ψύξη των αγωγών κρίνεται απαραίτητη για τη διατήρηση της θερμοκρασίας τους μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Στον ακόλουθο πίνακα 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα από τη σύγκριση δυο μετασχηματιστών 25/33.3/41.6 MVA. Η διαφορά ανάμεσα στους δυο μετασχηματιστές έγκειται στην κατασκευή των τυλιγμάτων τους. Ο πρώτος μετασχηματιστής έχει τύλιγμα κατασκευασμένο από απλό αγωγό (συμβατικός), ενώ ο δεύτερος έχει τύλιγμα κατασκευασμένο από αγωγό τύπου ταινίας.

Χαρακτηριστικά Μετασχηματιστή	Συμβατικός	Εξελιγμένος	Βελτίωση
Βάρος πυρήνα και τυλιγματος (χιλιάδες lb)	197	186,2	5,5%
Απώλειες κενού φορτίου (kW)	21,5	19,3	10,4%
Απώλειες φορτίου (kW)	90,8	76,6	17,0%
Συνολικές απώλειες (kW)	112,3	95,9	14,6%

Πίνακας 5.2: Σύγκριση μεταξύ συμβατικού και εξελιγμένου μετασχηματιστή τύπου 25/33/41.6 MVA

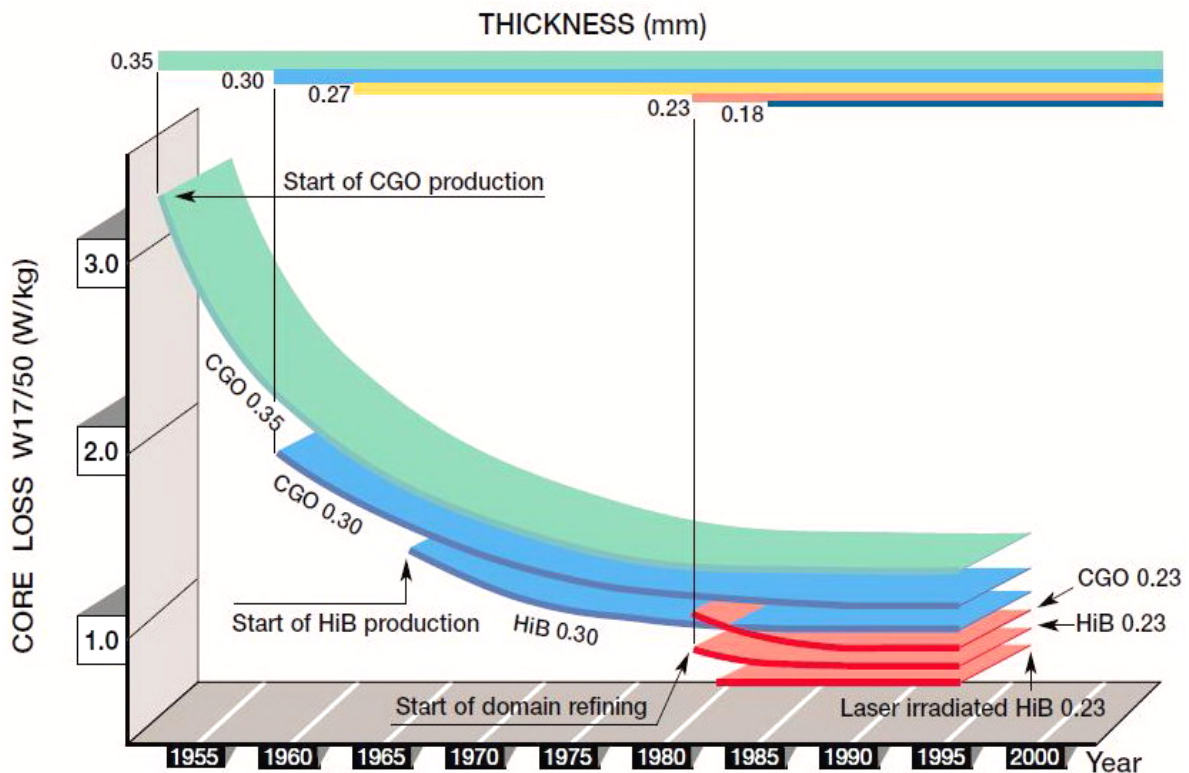
Ο αγωγός τύπου ταινίας εγκαταστάθηκε στο τύλιγμα που φέρει την υψηλή τάση 141 kV, ενώ το δεύτερο τύλιγμα 13 kV φέρει συμβατικό αγωγό. Η σύγκριση αφορά τις απώλειες κενού φορτίου, τις απώλειες φορτίου και το βάρος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι ο εξελιγμένος μετασχηματιστής έχει λιγότερες απώλειες κενού φορτίου πάνω από 10%, λιγότερες απώλειες φορτίου κατά 17% και μικρότερο βάρος κατά 5,5% σε σχέση με το συμβατικό μετασχηματιστή. Το μικρότερο βάρος οφείλεται στο ότι ο αγωγός τύπου ταινίας καταλαμβάνει περίπου 30% λιγότερο χώρο από τον απλό αγωγό.



Σχήμα 5.8: Τυλίγματα χαμηλής (δεξιά) και υψηλής τάσης (αριστερά) ωσειδούς περιέλιξης.

5.5 Σιδηρομαγνητικά υλικά μετασχηματιστών

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες μείωσης των απωλειών κενού φορτίου ή απωλειών πυρήνα, οι οποίες, όπως έχει αναφερθεί, ευθύνονται για περισσότερο από τα δύο τρίτα των συνολικών απωλειών των μετασχηματιστών διανομής. Οι περισσότερες έρευνες στοχεύουν στον τύπο του σιδηρομαγνητικού υλικού (ή αλλιώς στον τύπο του χάλυβα) που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα, ο οποίος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος των απωλειών πυρήνα. Για αυτόν το λόγο τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πυρήνα των μετασχηματιστών σταδιακά **βελτιωμένοι χάλυβες**, με χαμηλότερες απώλειες πυρήνα, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για μετασχηματιστές διανομής ή μεγαλύτερους μετασχηματιστές. Η εξέλιξη στους χάλυβες των μετασχηματιστών παρουσιάζεται στο σχήμα 5.9:



Σχήμα 5.9: Εξέλιξη απωλειών σιδήρου

Το βασικό υλικό κατασκευής ηλεκτρομαγνητικών πυρήνων από το 1900 περίπου ήταν ο πυριτιούχος χάλυβας θερμής έλασης με ποσοστό πυριτίου περίπου 3%. Τα επιμέρους φύλλα χωρίζονταν με μονωτικές στρώσεις συνδυάζοντας χαμηλές απώλειες υστέρησης και υψηλή αντίσταση. Σταδιακά αναπτύχθηκαν η ψυχρή έλαση και άλλες εξελιγμένες τεχνικές μόνωσης. Τη δεκαετία του '50 άρχισε να χρησιμοποιείται πυριτιούχος χάλυβας με

προσανατολισμένους κόκκους (Cold-Grain Oriented steel - CGO). Οι μαγνητικές του ιδιότητες είναι βελτιωμένες χάρη στην εξέλαση και την ανόπτηση, οι οποίες γίνονται έτσι ώστε οι κόκκοι να προσανατολίζονται κατά την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Οι συμβατικοί χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους κατασκευάζονται από πλάκες πυριτιούχου σιδήρου και έχουν στις δύο τους πλευρές επίστρωση ενός λεπτού στρώματος μονωτικού υλικού οξειδίου, για τη μείωση των δινορρευμάτων. Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 10707, (το οποίο αντανακλά το διεθνές IEC 60404) προβλέπει εύρος παχών από 0,23 έως 0,50 mm. Οι χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους αποτελούν το πιο διαδεδομένο υλικό για την κατασκευή μετασχηματιστών διανομής στην Ευρώπη, και το 1999 καταλάμβαναν το 70% της συνολικής κατανάλωσης χάλυβα.

Διάφορες τεχνικές επεξεργασίας και επίστρωσης σε συνδυασμό με μείωση της περιεκτικότητας σε πυρίτιο οδήγησαν στους χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους υψηλής διαπερατότητας (*high permeability grain-oriented steels, HiB*), οι οποίοι άρχισαν να κυκλοφορούν περίπου δέκα χρόνια μετά τους χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους. Κατασκευάζονται σε πάχη από 0,23 έως 0,30 mm. Στον πίνακα 5.3 φαίνεται η διαφορά των απωλειών που εμφανίζουν οι μετασχηματιστές με πυρήνα από απλό χάλυβα σε σχέση με τους μετασχηματιστές που έχουν κατασκευαστεί από χάλυβα πυριτίου χαμηλών απωλειών.

Απώλειες Κενού Φορτίου (W)		
Ισχύς (kVA)	Απλός Χάλυβας	Χάλυβας Χαμηλών Απωλειών
Μονοφασικοί		
10	60	30
25	100	50
50	210	105
75	260	130
100	320	160
Τριφασικοί		
75	370	185
150	540	270
300	950	475
500	1400	710
750	1750	875
1000	2400	1200
1500	3600	1800
2000	4000	2000
2500	4800	2400

Πίνακας 5.3: Σύγκριση απωλειών κενού φορτίου ανάμεσα σε μετασχηματιστές με πυρήνα από τυπικό χάλυβα και με πυρήνα από χάλυβα χαμηλών απωλειών.

Περαιτέρω μείωση των απωλειών μπορεί να επιτευχθεί με περιορισμό του πεδίου. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά με αναδιαμορφωμένες δομές (Domain refined steels) κατασκευάζονται με διαδικασίες χάραξης με λέιζερ και διατίθενται σε συνήθως με πάχος 0,23 mm. Οι τεχνικές χάραξης με λέιζερ οδήγησαν σε ελάσματα πολύ μικρού πάχους από 0,2 έως 0,3 mm, ενώ μπορούν να φτάσουν έως και 0,1 mm, με αποτέλεσμα να μειωθούν σημαντικά οι απώλειες κενού φορτίου. Επίσης τεχνολογικά επιτεύγματα σε άλλους τομείς, όπως την ελασματοποίηση, την επίστρωση και την καθαρότητα των υλικών επέφεραν επιπλέον βελτίωση της απόδοσης του πυρήνα.

Τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται μετασχηματιστές διανομής με πυρήνα από **άμορφο σίδηρο**. Ο άμορφος σίδηρος είναι εμπορικά διαθέσιμος από τις αρχές της δεκαετίας του '80. Έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μεγάλου αριθμού μετασχηματιστών διανομής στην Ιαπωνία κυρίως και στις ΗΠΑ. Οι μετασχηματιστές διανομής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο καταλαμβάνουν το 5% της παγκόσμιας αγοράς με τρία εκατομμύρια (3.000.000) μονοφασικές και μερικές εκατοντάδες χιλιάδες τριφασικές μονάδες, αλλά η εικόνα αυτή δεν αντανακλάται στην ευρωπαϊκή αγορά, καθώς στην Ευρωπαϊκή Ένωση η χρήση τους παραμένει περιορισμένη. Στην επόμενη ενότητα περιγράφονται εκτενέστερα οι μετασχηματιστές αυτού του τύπου.



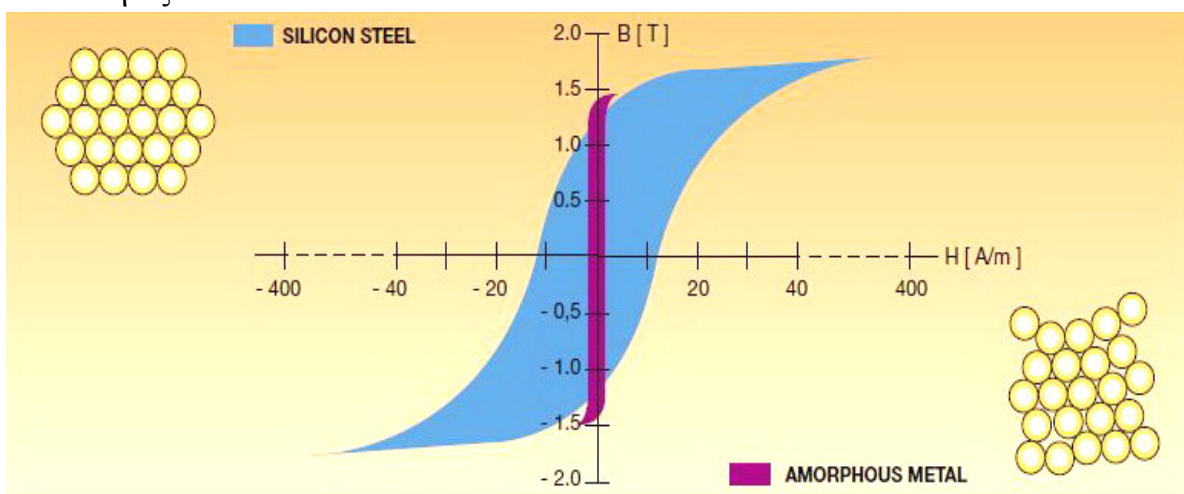
Σχήμα 5.10: Τριφασικός Μ/Σ διανομής άμορφου πυρήνα, 400kVA, 15,4/0,42kV, 50Hz

5.6 Μ/Σ διανομής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο (AMDT's)

Η εφαρμογή του άμορφου σιδήρου στους μετασχηματιστές έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου σε σχέση με τους μετασχηματιστές που χρησιμοποιούν πυριτιούχο χάλυβα χαμηλών απωλειών όμως οι μετασχηματιστές από άμορφο σίδηρο είναι συνήθως κατά 25% με 30% πιο ακριβοί από τους συμβατικούς μετασχηματιστές, που είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα πυριτίου χαμηλών απωλειών. Οι μετασχηματιστές άμορφου πυρήνα βελτιώνουν την απόδοση των δικτύων διανομής, καθώς έχουν κατά πολύ μειωμένες απώλειες (οι απώλειες κενού φορτίου είναι περίπου το 1/4 με 1/5 των αντίστοιχων απωλειών των συμβατικών μετασχηματιστών), και συμβάλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Το ρεύμα μαγνητίσεως τους είναι αισθητά μειωμένο, ενώ η στάθμη θορύβου τους παραμένει σχεδόν η ίδια με τους συμβατικούς μετασχηματιστές.

5.6.1 Ο άμορφος σίδηρος

Ο άμορφος σίδηρος είναι ένα κράμα, που αποτελείται από 92% σίδηρο, 5% πυρίτιο και 3% βάριο. Η δομή του άμορφου σιδήρου δεν είναι κρυσταλλική όπως φαίνεται δεξιά στο σχήμα 5.11, όπως στην περίπτωση του πυριτιούχου χάλυβα. Τα άτομα του πυριτιούχου χάλυβα είναι διευθετημένα σε μια καθορισμένη δομή, ενώ τα άτομα του άμορφου σιδήρου εμφανίζουν μια τυχαία κατανομή μη-κρυσταλλική. Λόγω αυτής της σύνθεσής τους παρουσιάζουν χαμηλές απώλειες υστέρησης και μοναδικές μαγνητικές ιδιότητες.



Σχήμα 5.11: Καμπύλες υστέρησης και εσωτερικές δομές πυριτιούχου χάλυβα και άμορφου μετάλλου

Η τυχαία μοριακή δομή που εμφανίζει να έχει ο άμορφος σίδηρος, δίνει τη δυνατότητα στα άτομά του να προσανατολίζονται σε οποιαδήποτε αλλαγή του μαγνητικού πεδίου. Επομένως κατά το μηδενισμό του πεδίου αυτού, τα άτομα επανέρχονται άμεσα στην αρχική τους κατάσταση. Ως αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητάς τους, έχουν **στενότερο βρόχο υστέρησης** και επομένως μικρότερες απώλειες υστέρησης από ότι ο πυριτιούχος χάλυβας.

5.6.2 Κατασκευαστές

Οι πρώτοι μετασχηματιστές οι οποίοι είχαν πυρήνα από άμορφο σίδηρο κατασκευάστηκαν από την General Electric και ήταν ισχύος 25 έως 50 kVA, μονοφασικοί. Η εταιρεία Metglas Products Division of the Allied Signal Corporation κατασκεύασε το υλικό του άμορφου σιδήρου και ξόδεψε περισσότερα από είκοσι πέντε χρόνια και μεγάλα χρηματικά ποσά στην έρευνα προκειμένου να πετύχει οικονομική κατασκευή άμορφων κραμάτων. Το 1997 οι εταιρίες Alstom και Schneider Electric κατασκεύασαν τριφασικούς μετασχηματιστές ισχύος από 100 έως 250 kVA, με πυρήνα από άμορφο σίδηρο. Οι απώλειες σιδήρου, για περίπου τις ίδιες διαστάσεις πυρήνα, άρα και περίπου το ίδιο ενεργό μέρος, είναι το **1/3** των απωλειών των συμβατικών μετασχηματιστών, κατηγορίας C' του HD 428.1 S1/92. Οι μετασχηματιστές αυτοί δοκιμάστηκαν με επιτυχία σε όλες τις διηλεκτρικές καταπονήσεις, αλλά και στην αυστηρή δοκιμή της δυναμικής καταπόνησης.

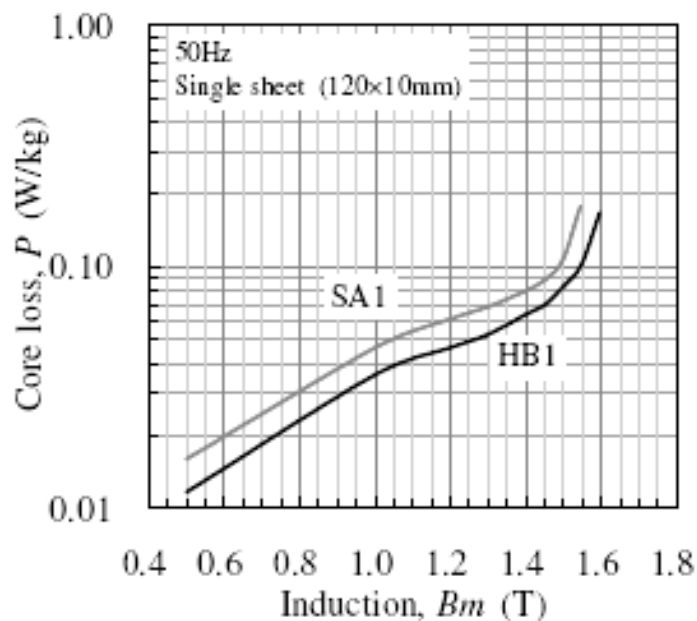


Σχήμα 5.12: Μετασχηματιστής άμορφου πυρήνα από μέσα⁷

⁷ Εσωτερικό ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο σίδηρο, ονομαστικής ισχύος 1,6 MVA, ο οποίος κατασκευάστηκε το 1998, για να χρησιμοποιηθεί σε εργοστάσιο στην Ιρλανδία. Οι απώλειες φορτίου του μετασχηματιστή αυτού είναι 18,2 kW και οι απώλειες

Σήμερα ο ενοποιημένος όμιλος *Hitachi/Metglas* είναι ο μεγαλύτερος προμηθευτής άμορφης τεχνολογίας στους μετασχηματιστές διανομής παγκοσμίως. Η Metglas βελτίωσε τη διαδικασία κατασκευής πλατειών λωρίδων μαγνητικού υλικού, με αποτέλεσμα να εισχωρήσει περισσότερο μαγνητικό υλικό στον πυρήνα. Ένα άμορφο υλικό βασισμένο στο σίδηρο, το SA1, χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα των μετασχηματιστών διανομής. Το μέγεθος του μετασχηματιστή διανομής άμορφου σιδήρου είναι μεγαλύτερο από αυτό ενός αντίστοιχου, με πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο με προσανατολισμένους κόκκους, διότι η μαγνητική επαγωγή κορεσμού, B_s για το SA1 είναι χαμηλότερη από εκείνη των πυριτιούχων χαλύβων.

Πρόσφατα η Metglas δημιούργησε ένα νέο άμορφο υλικό, το HB1, το οποίο αντισταθμίζει το έλλειμμα της μειωμένης επαγωγής κορεσμού. Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής κορεσμού του κράματος αυτού είναι 1,64 T και είναι υψηλότερη από εκείνη του SA1, που, που είναι ίση με 1,57 T. Οι απώλειες πυρήνα συναρτήσε της μαγνητικής επαγωγής B_m για τα HB1 και SA1 παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.13: Απώλειες πυρήνα συναρτήσε της μαγνητικής επαγωγής των υλικών HB1 και SA1

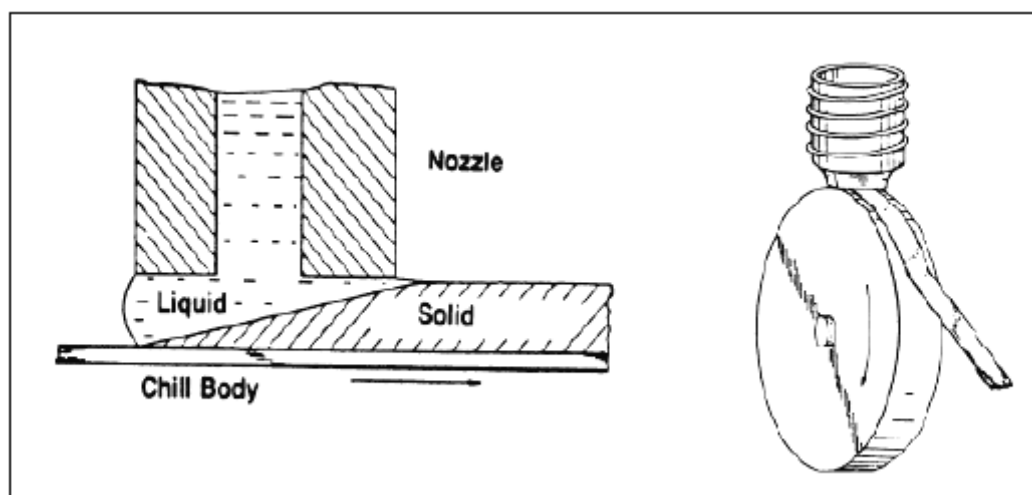
Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι απώλειες πυρήνα του HB1 είναι χαμηλότερες από εκείνες του SA1 σε ολόκληρο το εύρος τιμών της B_m .

κενού φορτίου 384W, κατά 80% χαμηλότερες από τις τυπικές απώλειες ενός συμβατικού μετασχηματιστή αυτού του μεγέθους.

Επιπλέον ένας μετασχηματιστής με πυρήνα από HB1 έχει χαμηλότερη στάθμη θορύβου και είναι μικρότερος σε μέγεθος κατά περίπου 10% από έναν με πυρήνα από SA1.

5.6.3 Τρόπος κατασκευής

Ο μετασχηματιστής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο μπορεί να κατασκευαστεί από πιο λεπτά ελάσματα από τον αντίστοιχο μετασχηματιστή που κατασκευάζεται από συμβατικό χάλυβα πυριτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχει λιγότερες απώλειες δινορευμάτων. Συνήθως το πάχος του ελάσματος από άμορφο σίδηρο είναι λιγότερο από 1 mm. Πολύ λεπτά ελάσματα παρέχουν το πλεονέκτημα της μικρής αντίστασης μεταξύ των ελασμάτων, άρα και μικρές απώλειες δινορευμάτων.

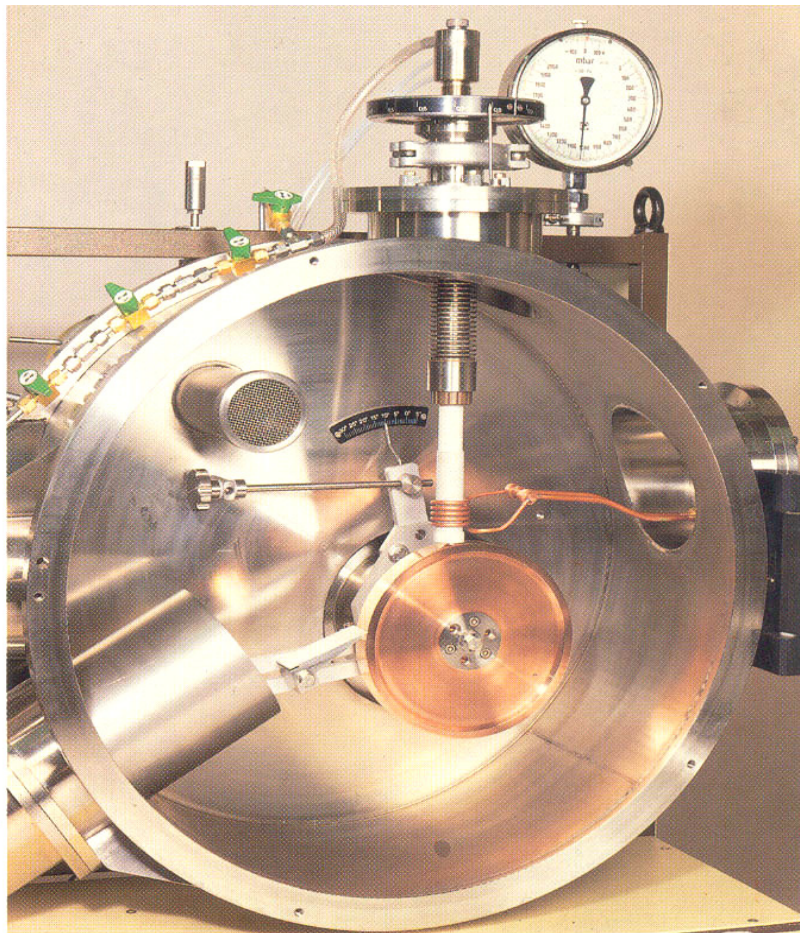


Σχήμα 5.14: Χύτευση άμορφου μετάλλου

Ο άμορφος σίδηρος παρασκευάζεται με ταχεία ψύξη τηγμένου μετάλλου (melt spinning⁸) πάνω σε μια πολύ λεπτή ταινία με μη κρυσταλλική δομή. Για να επιτευχθεί η άμορφη δομή, πρέπει η στερεοποίηση του μετάλλου να γίνει πολύ γρήγορα, έτσι ώστε να αποφευχθεί η κρυσταλλοποίηση. Ο απαιτούμενος ρυθμός ψύξης του τηγμένου μετάλλου είναι περίπου ένα εκατομμύριο βαθμοί Κελσίου το δευτερόλεπτο. Στο σχήμα 5.14 παρουσιάζεται

⁸ Η αρχή λειτουργίας του «melt spinning» στηρίζεται στην **απότομη ψύξη** τήγματος το οποίο προσπίπτει σε επιφάνεια χαλκού η οποία περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα. Η τεχνική χύτευσης ταινίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή άμορφων και ναοκρυσταλλικών υλικών σε μορφή υμενίων. Η αρχή της μεθόδου παρουσιάστηκε απ' τον Duwez το 1959. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε θάλαμο υψηλού κενού και υπάρχει η δυνατότητα εμφύσησης αερίου στο εσωτερικό.

μια μέθοδος κατασκευής άμορφου μετάλλου. Όπως φαίνεται στο σχήμα, το ρευστό μέταλλο χύνεται διαμέσου μίας σχισμής σ' ένα γρήγορα κινούμενο ψυγμένο υπόστρωμα⁹, το οποίο δεν έχει κρυσταλλική δομή. Η προκύπτουσα άμορφη δομή εξασφαλίζει ικανοποιητική μείωση των απωλειών σιδήρου των μετασχηματιστών άμορφου σιδήρου εν συγκρίσει με τους μετασχηματιστές με πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων. Ωστόσο το υλικό είναι περισσότερο εύθραυστο απ' ότι τα υλικά των συμβατικών πυρήνων πυριτίου και έχει υψηλότερο κόστος κατασκευής.



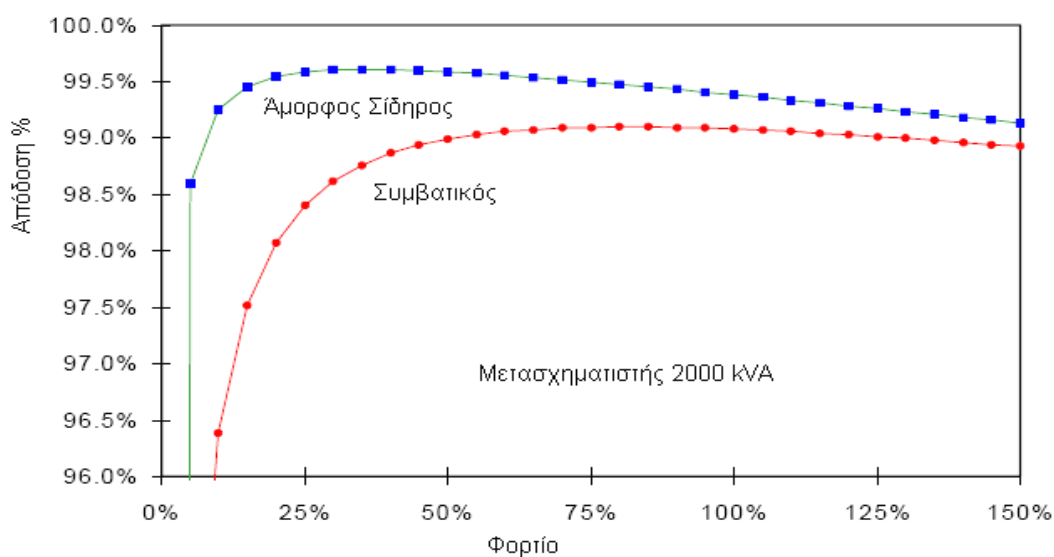
Σχήμα 5.15: Θάλαμος συσκευής «melt spinning», όπου διακρίνεται ο χάλκινος δίσκος, ο θάλαμος τήξης περιβαλλόμενος απ' το πηνίο της πηγής HF και το σωλήνα άντλησης του εσωτερικού αέρα.

⁹ Η επαφή με τον περιστρεφόμενο δίσκο-υπόστρωμα γίνεται σε πολύ μικρό χρόνο μετά την εξώθηση και δημιουργείται στιγμιοτυπικά ένα χωρίο τηγμένου μετάλλου το οποίο αμέσως προχωρά προς την κατεύθυνση του δίσκου. Σχεδόν αμέσως επιτυγχάνεται σταθερή ροή και το υμένιο που δημιουργείται απ' την ταχύτητα του δίσκου προχωρά με συνέχεια. Ο δίσκος περιστρέφεται με ταχύτητα 50 m/s και το υλικό κατασκευής του είναι χαλκός με προσμίξεις σε ποσοστό μικρότερο του 1%. Ο χαλκός επιλέγεται κατά κόρον ως επιφάνεια στερεοποίησης διότι παρά τις μειωμένες μηχανικές αντοχές έχει πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα (385 J/kgK).

Με την πάροδο του χρόνου και συνεχείς έρευνες, η Metglas και άλλοι κατασκευαστές άμορφου σιδήρου, έχουν κατορθώσει να δημιουργήσουν άμορφα κράματα απαλλαγμένα από μειονεκτήματα, που χαρακτήριζαν τους πρώτους άμορφους σιδήρους που κατασκευάστηκαν, όπως για παράδειγμα την ευθραυστότητα και άλλες δυσκολίες που παρουσιάζονταν κατά την κατασκευή του πυρήνα.

5.6.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ο συνδυασμός των λιγότερων απωλειών δινορευμάτων και υστέρησης στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή από τη χρήση άμορφου σιδήρου, επιφέρει μια συνολική μείωση των απωλειών στον πυρήνα πάνω από το 65% με 90%, σε σχέση με τους μετασχηματιστές από πυριτιούχο χάλυβα. Επίσης αν αναλογιστούμε ότι οι απώλειες αυτές αναφέρονται στις απώλειες κενού φορτίου που συμβαίνουν 24 ώρες την ημέρα και 365 ημέρες το χρόνο, τότε η εξοικονόμησή τους είναι συγκρίσιμη και εξισορροπούν την αύξηση του κόστους αγοράς που έχουν οι μετασχηματιστές από άμορφο σίδηρο. Εάν η χρήση άμορφου σιδήρου συνδυαστεί και με το βέλτιστο σχεδιασμό των πηνίων, τότε πρακτικά επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση των απωλειών στους μετασχηματιστές και συνεπώς αυτοί οι μετασχηματιστές είναι ενεργειακά πιο αποδοτικοί από τους συμβατικούς. Ένας μετασχηματιστής με ισχύ 75 kVA και με πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα, για παράδειγμα, έχει απώλειες πυρήνα 185 W, ενώ ο αντίστοιχος μετασχηματιστής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο έχει απώλειες 67 W.



Σχήμα 5.16: Σύγκριση των απωλειών ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο μέταλλο κι ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο

Στο σχήμα 5.16 συγκρίνονται οι αποδόσεις ενός συμβατικού μετασχηματιστή και ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο μέταλλο σε ποικίλες τιμές φορτίου. Η ονομαστική ισχύς και των δύο είναι 2000 kVA και, όπως φαίνεται στο σχήμα, υπάρχει σαφής βελτίωση της απόδοσης στον μετασχηματιστή άμορφου πυρήνα. Στον δε πίνακα 5.4 φαίνονται οι απώλειες κενού φορτίου ανάμεσα στον άμορφο σίδηρο και στο χάλυβα χαμηλών απωλειών.

Ισχύς (kVA)	Απώλειες Κενού Φορτίου (W)	
	Χάλυβας Χαμηλών Απωλειών	Άμορφος Σίδηρος
Μονοφασικοί		
10	30	11
25	50	20
50	105	32
75	130	39
100	160	54
Τριφασικοί		
75	185	67
150	270	107
300	475	185
500	710	260
750	875	310
1000	1200	420
1500	1800	555
2000	2000	750
2500	2400	850

Πίνακας 5.4: Σύγκριση απωλειών κενού φορτίου ανάμεσα σε μετασχηματιστές με πυρήνα από χάλυβα χαμηλών απωλειών και με πυρήνα από άμορφο σίδηρο

Η πρόσφατα εκτεταμένη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος στους προσωπικούς υπολογιστές, τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, τα κλιματιστικά και άλλους τομείς, καθώς και τα μη γραμμικά φορτία, όπως κάποιοι κινητήρες, έχουν οδηγήσει σε αυξανόμενη παραμόρφωση της ημιτονοειδούς κυματομορφής της τάσης στο δίκτυο. Οι γραμμές του δικτύου περιέχουν ένα σημαντικό αριθμό ανώτερων αρμονικών της συχνότητας του δικτύου. Οι **αρμονικές** αυτές αυξάνουν τις απώλειες πυρήνα, καθώς αυξάνονται και οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες δινορρευμάτων, ιδιαίτερα στους συμβατικούς μετασχηματιστές με πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο. Η τεχνολογία άμορφου πυρήνα ενδείκνυται για μετασχηματιστές με χαμηλή φόρτιση, όπως για παράδειγμα μετασχηματιστές διανομής αγροτικών

περιοχών, αφού η επίδραση των αρμονικών στις απώλειες κενού φορτίου μειώνεται (έχουν χαμηλές απώλειες σε υψηλότερες συχνότητες), γεγονός που οφείλεται στις βελτιωμένες τεχνικές κατασκευής τους, οι οποίες επιτρέπουν την κατασκευή πολύ λεπτών λωρίδων του άμορφου μετάλλου και στην άμορφη φύση του υλικού, η οποία του προσδίδει μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση και χαμηλή ενεργειακά αντιστροφή της μαγνητικής ροής.

Η σύγκριση της επίδρασης των αρμονικών στις απώλειες μεταξύ ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο μέταλλο κι ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα 5.5 και 5.6.

Απώλειες (W)	Άμορφο Μέταλλο	Σίδηρος με πυρίτιο
Υστέρηση	99	155
Δινορεύματα	33	311
Συνολικές απώλειες πυρήνα	132	466
Απώλειες χαλκού	966	1.084
Επίπεδο φόρτισης (%)	55	58
Συνολικές απώλειες Μ/Σ	1.098	1.550

Πίνακας 5.5: Απώλειες Μ/Σ χωρίς συνυπολογισμό αρμονικών

Απώλειες (W)	Άμορφο Μέταλλο	Σίδηρος με πυρίτιο
Υστέρηση	99	155
Δινορεύματα	74	698
Συνολικές απώλειες πυρήνα	173	853
Απώλειες χαλκού	1.553	1.671
Επίπεδο φόρτισης (%)	55	58
Συνολικές απώλειες Μ/Σ	1.726	2.524

Πίνακας 5.6: Απώλειες Μ/Σ με συνυπολογισμό αρμονικών

Το κύριο μειονέκτημα του άμορφου σιδήρου είναι ο μικρός συντελεστής χώρου που έχει, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερο υλικό για την κατασκευή του πυρήνα ενός μετασχηματιστή από ότι θα χρειαζόταν από πυριτιούχο χάλυβα. Αυτό συνεπάγεται με την σειρά του βαρύτερο και μεγαλύτερο μετασχηματιστή σε σχέση με έναν αντίστοιχο συμβατικό μετασχηματιστή από πυρήνα χάλυβα χαμηλών απωλειών. Η εξέλιξη αυτή αντιτίθεται με την προσδοκία των αγοραστών για ελαφρύτερους και μικρότερους μετασχηματιστές, διότι θα υπάρχει δυσκολία εγκατάστασής τους

κατά της διαδικασία αντικατάστασης ενός παλιού από έναν νέο μετασχηματιστή. Στον παρακάτω πίνακα 5.7 φαίνεται η διαφορά βάρους ανάμεσα σε πυρήνα από άμορφο σίδηρο και σε πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα χαμηλών απωλειών.

Ισχύς (kVA)	Βάρος (Kg)	
	Χάλυβας Χαμηλών Απωλειών	Άμορφος Σίδηρος
Μονοφασικοί		
10	136	144
15	146	191
25	184	200
50	322	326
75	372	450
100	455	512
Τριφασικοί		
75	906	920
150	1314	1300
300	1631	1975
500	2220	2759

Πίνακας 5.7: Σύγκριση βάρους πυρήνων μετασχηματιστών από άμορφο σίδηρο με πυρήνες από χάλυβα χαμηλών απωλειών.

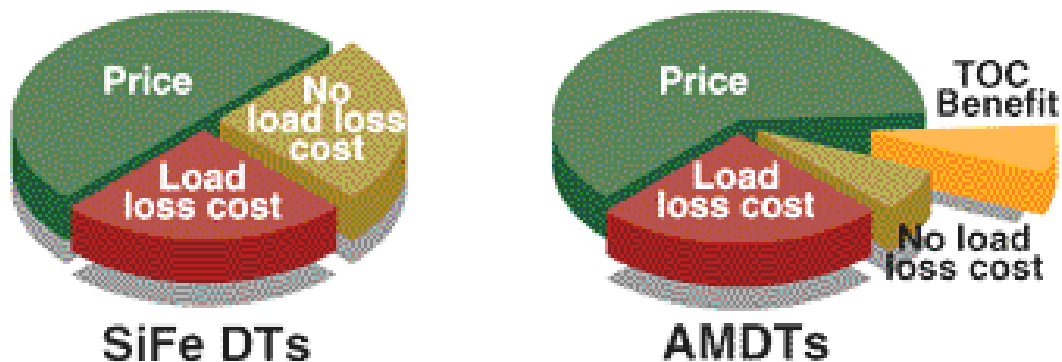
5.6.5 Κόστος

Από πλευράς κόστους οι μετασχηματιστές από άμορφο σίδηρο είναι κατά 25% με 30% πιο ακριβοί από τους συμβατικούς μετασχηματιστές, που είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα πυριτίου χαμηλών απωλειών¹⁰. Το υψηλό αυτό κόστος προσπαθούν οι ειδικοί να το μειώσουν είτε με την παραγωγή όλο και περισσότερων μετασχηματιστών με πυρήνα από άμορφο σίδηρο είτε αναπτύσσοντας νέες τεχνικές για την παραγωγή άμορφου σιδήρου. Συχνά ο αγοραστής έρχεται αντιμέτωπος με το δίλημμα της αγοράς ενός νέου μετασχηματιστή από άμορφο σίδηρο ή ενός συμβατικού μετασχηματιστή, με κριτήριο το οικονομικό συμφέρον του. Η οικονομική αξιολόγηση μέσω του συνολικού κόστους επένδυσης ενός μετασχηματιστή είναι η προσέγγιση που αρκετές εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμόζουν για να εκτιμήσουν αν είναι

¹⁰ Με την πάροδο του χρόνου και με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα κόστη (κατασκευής, αγοράς, κτλ.) πέφτουν βαθμιαία. Είναι γεγονός ότι σήμερα οι μετασχηματιστές από άμορφο σίδηρο είναι κατά 25% με 30% πιο ακριβοί από τους συμβατικούς μετασχηματιστές, όμως το αντίστοιχο ποσοστό πριν από 10 περίπου χρόνια ήταν 80%.

δικαιολογημένη η υψηλή τιμή ενός μετασχηματιστή σε σχέση με τις απώλειες του ή αν είναι τελικά οικονομικά πιο αποδοτικό να αγοράσουν ένα συμβατικό μετασχηματιστή. Αποδεικνύεται όμως ότι αν λάβει κανείς υπ' όψιν το κόστος κύκλου ζωής (Total Owning Cost – TOC) ενός μετασχηματιστή άμορφου πυρήνα, τότε θα διαπιστώσει ότι, παρά την αρχικά υψηλή τιμή αγοράς του, στη συνολική διάρκεια της ζωής του **αποφέρει εξοικονόμηση χρημάτων**. Το κόστος κύκλου ζωής ενσωματώνει εκτός από το αρχικό κόστος αγοράς και το κόστος από τις απώλειες ενέργειας σε όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, το οποίο είναι εξίσου σημαντικό με την αρχική τιμή.

Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζονται διαγραμματικά τα κόστη κύκλου ζωής ενός συμβατικού μετασχηματιστή από πυριτιούχο σίδηρο και ενός μετασχηματιστή άμορφου σιδήρου. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο μετασχηματιστής άμορφου πυρήνα έχει υψηλότερη τιμή αγοράς από τον συμβατικό, αλλά συνολικά οδηγεί σε εξοικονόμηση χρημάτων σε ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του έναντι του συμβατικού (TOC Benefit), λόγω του αρκετά μικρότερου κόστους απωλειών κενού φορτίου.



Σχήμα 5.17: Σύγκριση του κόστους κύκλου ζωής μεταξύ ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο μέταλλο κι ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο

Πιο αναλυτικά, στον παρακάτω πίνακα 5.8 εμφανίζεται ένα απλό αριθμητικό παράδειγμα, όπου συγκρίνουμε δυο μετασχηματιστές, εφαρμόζοντας την εξίσωση 1.1 που αναφέρεται στο ισοδύναμο κόστος επένδυσης.

Στην 1.1 αντικαθιστούμε σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 5.8:

$$\text{Για τον AMDT: } C_c = C_T + A * P_o + B * P_k$$

$$\Rightarrow C_c = 11500 + (230 * 5,5) + (3192 * 1,5) = 17553 \$$$

$$\text{ομοίως για τον SiFeDT προκύπτει } C_c = 18084,5 \$$$

Μετασχηματιστής Διανομής 60 Hz, 500 kVA, 15/0.48 kV	Πυρήνας Άμορφου Σιδήρου	Πυρήνας Πυριτιούχου Χάλυβα
Απώλειες κενού φορτίου (W)	230	610
Συντελεστής κόστους απωλειών κενού φορτίου (\$/W)	\$5,5	\$5,5
Απώλειες φορτίου (W)	3.192	3.153
Συντελεστής κόστους απωλειών φορτίου (\$/W)	\$1,50	\$1,50
Απόδοση (%)	99,6	99,4
Κόστος αγοράς – άπαξ (\$)	\$11.500	\$10.000
Κόστος απωλειών κενού φορτίου (\$)	\$1.265	\$3.335
Κόστος απωλειών φορτίου (\$)	\$4.788	\$4.730
Συνολικό κόστος κατοχής (\$)	\$17.553	\$18.084,5

Πίνακας 5.8: Οικονομική αξιολόγηση και σύγκριση μετασχηματιστών με πυρήνα από άμορφο σίδηρο και με πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα με βάση το ισοδύναμο κόστος επένδυσης.

Ο πίνακας 5.8 δείχνει ότι παρόλο που ο μετασχηματιστής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο είναι πιο ακριβός κατά 15%, τελικά έχει μικρότερο συνολικό κόστος επένδυσης (αγοράς) κατά 3%, σε σχέση με ένα συμβατικό μετασχηματιστή με πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα. Επίσης εκτός από λιγότερες απώλειες εμφανίζεται να έχει και καλύτερη απόδοση, με αποτέλεσμα λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι μελέτες που είχαν διεξαχθεί τη δεκαετία του 1990, προέβλεπαν σημαντικές μειώσεις των εκπομπών αερίων στο περιβάλλον από τη χρήση μετασχηματιστών με πυρήνα από άμορφο σίδηρο. Τόσο τα **ενεργειακά οφέλη** όσο οι **μειώσεις των αερίων** αναφέρονται στον πίνακα 5.9.

Κέρδος	Αμερική	Ευρώπη	Ιαπωνία	Κίνα	Ινδία
Εξοικονόμηση ενέργειας (δισεκατ. kWh)	40	25	11	9	2
CO ₂ (εκατομμύρια. τόνους)	35	20	10	12	3
NO _x (χιλιάδες τόνους)	110	70	30	90	22
SO ₂ (χιλιάδες τόνους)	260	160	75	210	52

Πίνακας 5.9: Οφέλη από τη χρήση μετασχηματιστών από άμορφο σίδηρο

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν σημαντικά εμπόδια τόσο στην Ευρώπη, ειδικά, όσο και σε χώρες παγκοσμίως, όπου έχουν μια ήδη

εδραιωμένη ή αναδύομενη ικανότητα για παραγωγή συμβατικών μετασχηματιστών. Η κατασκευή του πυρήνα άμορφου σιδήρου θα απαιτούσε μια σημαντική επένδυση και μια αναδιάρθρωση της παρούσας βιομηχανίας. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η κατασκευή και η επισκευή μετασχηματιστών διανομής γίνεται τοπικά σχεδόν σε όλα τα Ευρωπαϊκά κράτη και αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό τμήμα του βιομηχανικού-ηλεκτρολογικού τομέα της κάθε χώρας, καθώς και της τοπικής απασχόλησης.

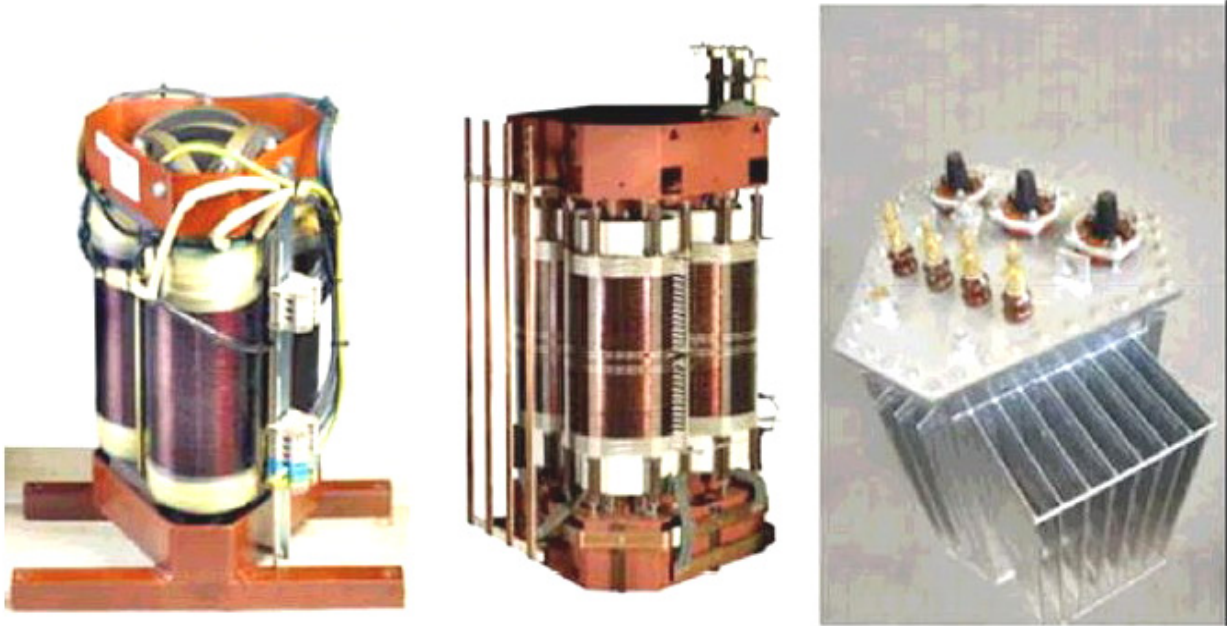
Η χρήση άμορφου σιδήρου θα οδηγούσε πολλές περιοχές στην υψηλή εξάρτηση από εισαγόμενα προϊόντα. Πολλές χαλυβουργικές επιχειρήσεις θα κλείσουν και η χώρα θα χάσει την εκμετάλλευση των εγχώριων πόρων. Συνεπώς, οι επιχειρήσεις ηλεκτρισμού της κάθε χώρας θα πρέπει να μελετήσουν διεξοδικά και πολύπλευρα τη χρησιμοποίηση ή μη μετασχηματιστών άμορφου σιδήρου.

5.7 Μετασχηματιστές εξαγωνικού πυρήνα

Οι πρώτοι μετασχηματιστές εξαγωνικού πυρήνα εμφανίστηκαν πριν από περίπου 100 χρόνια. Οι περισσότεροι κατασκευαστές μετασχηματιστών δεν κατασκευάζουν μετασχηματιστές τέτοιου τύπου, διότι είναι **πολύ πολύπλοκοι για μαζική παραγωγή**. Είναι αρκετά δημοφιλείς στη Σουηδία, στις υπόλοιπες σκανδιναβικές χώρες καθώς και στην Ισπανία σε σημαντικό βαθμό.

Οι μετασχηματιστές με εξαγωνικό πυρήνα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς. Έχουν απώλειες κενού φορτίου μειωμένες έως και κατά 50% και κατά συνέπεια μικρότερες απαιτήσεις σε ψύξη. Τα συνολικά κόστη λειτουργίας μπορούν να μειωθούν έως και κατά 50%, ενώ είναι **ελαφρύτεροι και πιο μικροί σε μέγεθος**.

Ξεκινούν ομαλά και το ρεύμα εκκίνησης είναι συγκριτικά ασθενές, με αποτέλεσμα συχνά να μπορεί να αμεληθεί κατά τη διαστασιολόγηση των ασφαλειών και γενικά της εγκατάστασης. Επιπλέον τα τρία πηνία λειτουργούν κάτω από ιδανικές συνθήκες προσφέροντας στις φάσεις ένα συμμετρικό χαρακτήρα, η τρίτη αρμονική είναι αμελητέα, το ρεύμα μαγνήτισης μειώνεται και προκαλούν ελάχιστα αισθητό θόρυβο. Τέλος οι μετασχηματιστές εξαγωνικού πυρήνα αναμένεται να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Στο σχήμα 5.16 παρουσιάζονται οι μετασχηματιστές εξαγωνικού πυρήνα της σουηδικής εταιρείας Hexaformer.

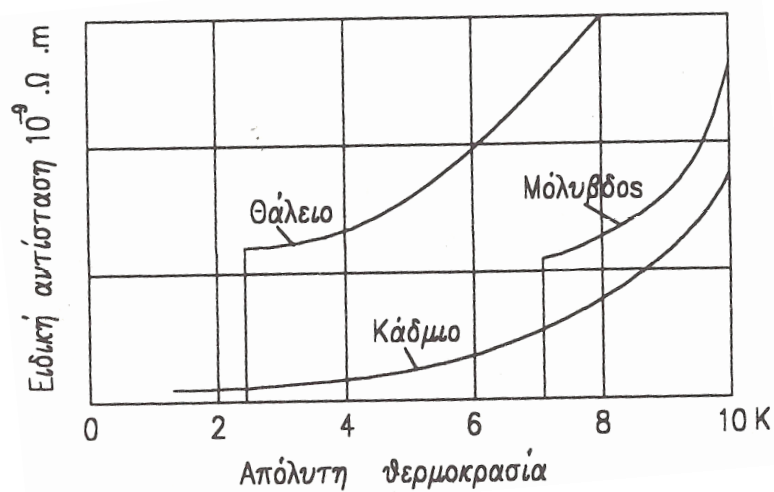


Σχήμα 5.18: Μετασχηματιστές εξαγωνικού πυρήνα της Hexaformer

5.8 Υπεραγώγιμα υλικά και μετασχηματιστές

5.8.1 Υλικά και υπεραγωγιμότητα

Στα μέταλλα όταν αυξάνεται η θερμοκρασία τους αυξάνεται και ως γνωστόν η αντίστασή τους. Αντίθετα, όταν μειώνεται η θερμοκρασία τους μειώνεται και η αντίστασή τους ασυμπτωτικά. Θα περίμενε κανείς κάποια στιγμή να οδηγηθεί σε κάποια υπολειπόμενη αντίσταση ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία. Όμως

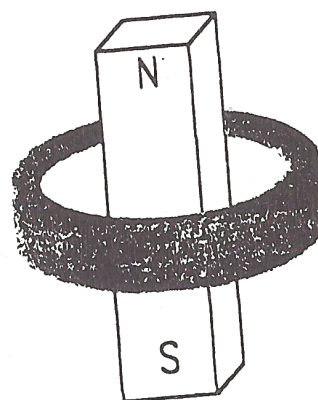


πειραματικά προέκυψε μια ιδιότητα των μετάλλων, η οποία ονομάστηκε υπεραγωγιμότητα¹¹.

Αυτή η υπεραγωγιμότητα χαρακτηρίζεται από δύο γνωρίσματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους:

- Κάτω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, η οποία ονομάζεται σημείο άλματος, μπορεί να ρέει ρεύμα χωρίς να υπάρχει τάση στα άκρα του αγωγού.
- Κάτω από το σημείο άλματος στο εσωτερικό τέτοιων αγωγών, οι οποίοι ονομάζονται υπεραγωγοί, δεν μπορεί να υπάρχει μαγνητικό πεδίο (και αν υπήρχε, εξαφανίζεται) και το υλικό γίνεται μαγνητικά ουδέτερο.

Εάν σε μια διάταξη από ένα μόνιμο μαγνήτη σχήματος ράβδου, την οποία περιβάλλει ένας δακτύλιος μολύβδου (διπλανό σχήμα), ψυχθεί ο δακτύλιος κάτω από το σημείο άλματος και αφαιρεθεί ο μαγνήτης, τότε η επαγόμενη ώθηση τάσεως, προκαλεί στο δακτύλιο ένα ρεύμα, το οποίο περιφέρεται ασταμάτητα στο δακτύλιο χωρίς απώλειες. Τώρα ο δακτύλιος συμπεριφέρεται ως μόνιμος μαγνήτης και εκτρέπει τη βελόνη της πυξίδας.



Η χαμηλή θερμοκρασία ψύξεως των υπεραγωγίων μετάλλων μπορεί εύκολα να επιτευχθεί με εξάτμιση υγρού υδρογόνου ή αζώτου σε μειωμένη πίεση. Υπάρχουν πολλά στοιχεία που έχουν υπεραγώγιμη ιδιότητα. Τέτοια είναι ο ψευδάργυρος, ο κασσίτερος, το κάδμιο, ο υδράργυρος, το αλουμίνιο, το θάλλιο, το ουράνιο, το τιτάνιο, ο μόλυβδος, το θόριο, το βανάδιο, το νιόβιο, το ταντάλιο, το ρουθίνιο, το όσμιο, κτλ. Επίσης είναι γνωστά σήμερα πάνω από 100 υπεραγώγιμα κράματα, μερικά από τα οποία έχουν στοιχεία, τα οποία μόνα τους δεν έχουν υπεραγώγιμη ιδιότητα. Όλα αυτά τα στοιχεία και τα κράματα που ήταν γνωστά μέχρι το 1986 είχαν σημείο άλματος κοντά στο μηδέν της απόλυτης θερμοκρασίας ($-273\text{ }^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$)

Το 1986 ανακαλύφθηκε μια σειρά νέων υλικών, τα οποία αποκτούσαν υπεραγώγιμες ιδιότητες σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 35 K ($-273 + 35 = -$

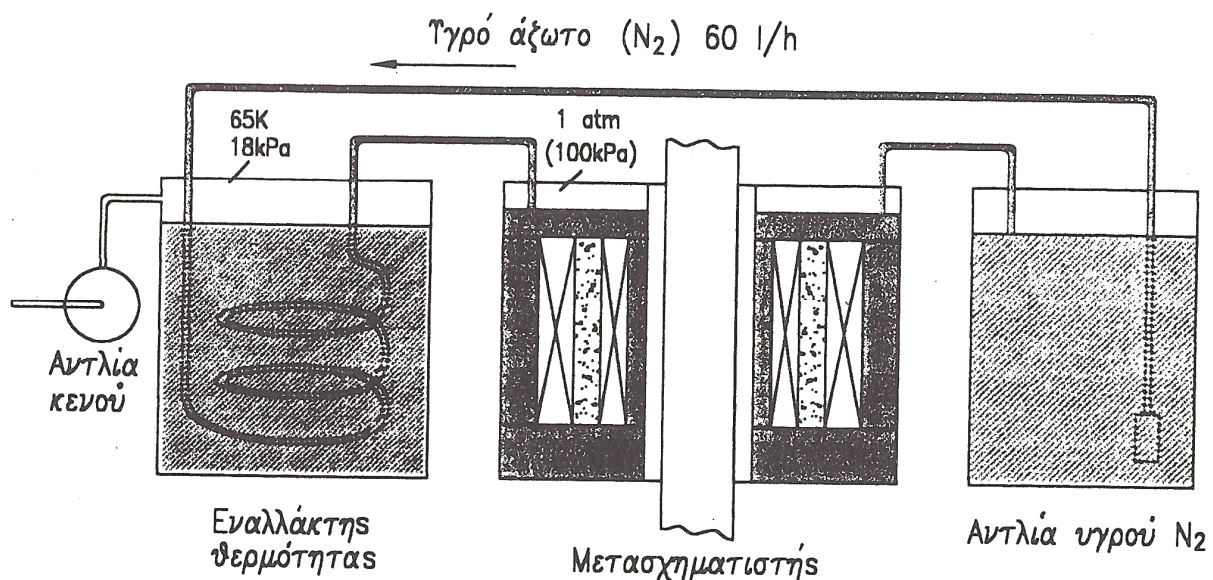
¹¹ Η πρώτη παρατήρηση υπεραγωγιμότητας σε άμορφο μέταλλο ήταν έργο των Buckel και Hilsch (1956), οι οποίοι ανακάλυψαν πως το άμορφο Bi εμφανίζει υπεραγωγιμότητα με θερμοκρασία μετάβασης $T_c = 6\text{ K}$.

38 °C). Τον ίδιο χρόνο αναφέρθηκε μια όμοια κεραμική σύνθεση, η οποία γινόταν υπεραγώγιμη στους 91 K, ένα σημαντικό βήμα μπροστά, διότι αυτά τα οξειδία του χαλκού μπορούν να ψυχθούν με υγρό άζωτο, το οποίο διατίθεται αμέσως, και χωρίς πολλά έξοδα και το ποίο βράζει στους 77 K (= -196 °C). Το νέο αυτό υλικό ονομάστηκε υπεραγωγός υψηλής θερμοκρασίας HTS (*High Temperature Superconductor*).

Σήμερα έχουν καταχωρηθεί πάνω από 110 συνθέσεις υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας, μερικές από τις οποίες έγιναν υπεραγώγιμες σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 135 K (= -138 °C). Οι δύο τύποι υπεραγωγών με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για βιομηχανικές εφαρμογές είναι το οξείδιο του υτρίου βαρίου χαλκού YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) και το οξείδιο Βισμούθιου-Στροντίου-Ασβεστίου-Χαλκού BSCCO (Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide).

5.8.2 Κατασκευή υπεραγώγιμων μετασχηματιστών

Τα τυλίγματα αφού τυλιχτούν τοποθετούνται ομοκεντρικά, εμποτίζονται με εποξεική ρητίνη, ώστε να γίνουν ένα σώμα και τοποθετούνται σε ένα κρυστάτη. Μετά περιβάλλονται με υγρό άζωτο για την ψύξη και τη μόνωσή τους, το οποίο σήμερα είναι από τα ασφαλέστερα και φτηνότερα κρυογενικά υλικά και διατίθεται στην αγορά σε μια περιοχή 20 έως 77 K.



Σχήμα 5.20: Διάταξη τυλιγμάτων χαμηλών απωλειών και κρυογενικό σύστημα ενός μετασχηματιστή 500 kVA.

Στους υπεραγώγιμους μετασχηματιστές τα τυλίγματα είναι κατασκευασμένα από υψηλής θερμοκρασίας υπεραγώγιμα υλικά (High Temperature Superconducting materials – HTS) και ψύχονται με υγρό άζωτο περίπου στους -200°C . Η αντίστασή τους είναι σχεδόν αμελητέα, με αποτέλεσμα οι απώλειες φορτίου, ακόμη και μετά την πρόσθεση των απωλειών από την διαδικασία ψύξης με άζωτο, να μπορούν να μειωθούν κατά 50%.

Το άζωτο μπορεί να ψυχθεί ή να αποσυμπυκνωθεί μέσα στον μετασχηματιστή σε κλειστό κύκλωμα ή επιτρέπει τον βρασμό μακριά απ' αυτόν σε ένα ανοικτό κύκλωμα. Αυτός είναι ο φθηνότερος τρόπος ψύξεως, αλλά απαιτεί περίπου 100 επαναπληρώσεις ενός αποθηκευτικού δοχείου κοντά στον Μ/Σ σε μια περίοδο 30 ετών. Η λειτουργία κλειστού κυκλώματος με γυροψύκτες θα κάνει την κρυογενική ουσιαστικά αόρατη για το χρήστη. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται τα τελευταία 20 χρόνια στην ιατρική.

5.8.3 Εφαρμογή στους μετασχηματιστές

Οι εφαρμογές των υπεραγωγών σε ενεργειακά συστήματα είναι προφανείς. Δίνουν ελαφρύτερες, μικρότερες και αποδοτικότερες κατασκευές λόγω των υψηλότερων πυκνοτήτων ρεύματος και των χαμηλότερων ωμικών απωλειών, ενώ είναι πιο ανθεκτικοί σε υπερφορτίσεις εν συγκρίσει με τους συμβατικούς μετασχηματιστές. Σε εφαρμογές, στις οποίες το βάρος του μετασχηματιστή είναι κρίσιμο, όπως για παράδειγμα στα σιδηροδρομικά οχήματα, μπορεί η χρήση των μετασχηματιστών αυτών να αποτελέσει την καλύτερη λύση¹².

Ετσι αναμένεται να οδηγηθούμε σε:

- Μείωση των απωλειών σε σχέση με τους παραδοσιακούς μετασχηματιστές, εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση του λειτουργικού κόστους
- Μείωση των διαστάσεων και του βάρους κατά 50% λόγω της υψηλότερης ικανότητας των συρμάτων των υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας

¹² Υπολογίζεται πως μέχρι το 2020 η παγκόσμια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας θα ξοδέψει για υπεραγωγούς πάνω από 50 δισεκατομμύρια δολάρια. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες, οι μετασχηματιστές και τα τρένα μαγνητικής αιώρησης είναι μερικά από τα πεδία εφαρμογής των υπεραγώγιμων υλικών.

- Απαίτηση λιγότερης ποσότητας αγωγού και σιδήρου πυρήνα, διότι τα τυλίγματα υπεραγωγών έχουν υψηλότερη ικανότητα (πυκνότητα ρεύματος απ' ότι τα τυλίγματα χαλκού
- Χρήση περιβαλλοντικά φιλικού και άκαυστου υγρού αζώτου ως ψυκτικού και διηλεκτρικού μέσου, και έτσι θα αποκλειστούν πολλοί κίνδυνοι που συνδέονται με το συμβατικό μετασχηματιστή.

Το 1993 κατασκευάστηκε από την ABB ένας μονοφασικός μετασχηματιστής 330 kVA, τάσεως 6/0,4 kV, 56,7 A και 832 A και τάση βραχυκύκλωσης 11,5%. Για τα τυλίγματα χρησιμοποιήθηκε αγωγός τιτανίου-νιοβίου (Ti-Nb). Το κράμα αυτό γίνεται υπεραγωγός στη θερμοκρασία των -263 °C. Ο μετασχηματιστής ψύχθηκε με υγρό ήλιο στους -269 οC και το σύρμα που χρησιμοποιήθηκε είχε διάμετρο 0,25 mm.

Το 1997 οι εταιρίες ABB, American Superconductor Corp ASC και Edf σε συνεργασία έκαναν μια σημαντική πρόοδο στην εξέλιξη της τεχνολογίας: Κατασκεύασαν ένα τριφασικό μετασχηματιστή 630 kVA τάσεως 18,7/0,42 kV. Χρησιμοποιήθηκε υπεραγωγός BSCCO-2223, και τα τυλίγματα ψύχθηκαν με υγρό άζωτο.

Πρόσφατα το κινέζικο «*Institute of Electrical Engineering*» παρουσίασε έναν τριφασικό μετασχηματιστή διανομής χαμηλών απωλειών, 630 kVA με λόγο τάσεων 10/0,4 kV. Ο μετασχηματιστής αυτός έχει έναν πυρήνα από άμορφο κράμα, που χρησιμοποιείται για περαιτέρω μείωση των ηλεκτρικών απωλειών από εκείνη που επιτυγχάνεται μόνο από τους υπεραγωγίμους αγωγούς.

Η τιμή των υπεραγωγίμων μετασχηματιστών είναι το 150% με 200% της τιμής των συμβατικών μετασχηματιστών. Κατά συνέπεια, δεν ενδείκνυνται ακόμη για μαζική χρήση. Η χρήση τους σε ευρεία κλίμακα θα γίνει πιο δελεαστική, όταν βελτιωθούν τα ψυκτικά συστήματα, μειωθεί το κόστος παραγωγής υγρού αζώτου και βελτιωθούν οι τεχνικές κατασκευής υπεραγωγίμων αγωγών υψηλής θερμοκρασίας σε μεγάλη κλίμακα. Προς το παρόν οι υπεραγωγίμοι μετασχηματιστές είναι κατάλληλοι για εφαρμογές, στις οποίες οι απώλειες φορτίου ευθύνονται σε πολύ υψηλό ποσοστό για τις συνολικές απώλειες του Μ/Σ.

GENERAL ELECTRIC

3 PHASE CLASS 0 A

CAUTION—BEFORE OPERATING READ INSTRUCTIONS GEI-79025

65°C RISE 60 HERTZ

K
V
A

HV

LV

MFG
DATE

⊙ BASIC IMPULSE LEVEL

HV WINDING KV

LV WINDING KV

WEIGHTS IN POUNDS

INTERIOR

TANK

LIQUID

TOTAL

OL GAL

IMPEDANCE 85°C
RATED VOLTS

VOLTS	TAP
14400	1
14100	2
13800	3
13500	4
13200	5

AT RATED KVA

HICKORY, NC MADE IN USA

DISTRIBUTION TRANSFORMER

CONTAINS NON-PCB OIL AT TIME OF MANUFACTURE—CERTIFICATION AVAILABLE

NOTES:
1. FOR MATERIAL AND NOTES USE A244K00P71
2. 03 MUST BE MAINTAINED FROM EDGE OF BAND TO
EDGE OF PLATE.

TITLE NAMEPLATE

FIRST MADE FOR D19D

3501

A6481E76P00

TYPE-REV

BASE

10-25-82

ROUTING

1A,RED

HICKORY

3501

A6481E76P00

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- A study on possibilities of the popularization of the amorphous industrial/utility distribution transformers, Hitachi, PROPHET in TEAMT 2004, October 2004.
- Average global temperature 1850-2000. <http://www.giss.nasa.gov>
- Characterization of European Transformer Populations and the scope for energy savings, European Copper Institute, Dec. 2001.
- Climate Variability and Change: The Natural Greenhouse Effect.
<http://www.niwascience.co.nz>
- Distribution System Energy losses at Hydro One, Kinectrics Inc, July 2005.
http://www.hydroonenetworks.com/en/regulatory/2006_distribution_rate_application/downloads/DXRateFiling/ExhibitA/Exhibit%20A%20-%20Tab%2015%20-%20Schedule%202.pdf
- Electricity distribution losses-a consultant document. Technical report, Office of Gas and Electricity Markets, 2003.
- EM4: Magnetic Hysteresis, Chalmers University of Technology, April 2003.
http://www.fy.chalmers.se/edu/lab/labpm/em4_magnetic_hysteresis.pdf
- Energy Efficiency & Renewable Energy, Chapter 4: Screening Analysis, July 2004.
http://www.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/commercial/pdfs/dist_trans_chp_4.pdf
- Energy Efficient Distribution Transformers in Spain: new trends, J.Frau, J.Gutierrez, 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna May 2007.
- Energy Efficient Transformers, Barry W. Kennedy, McGraw-Hill, New York, 1998.
- Global energy savings potential from high efficiency distribution transformers, PROPHET, Leonardo Energy, October 7, 2004.
- <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>
- Leonardo ENERGY, resources on distribution transformers.
<http://www.leonardo-energy.org>

- Quality Improvement of Individual Cores of Distribution Transformers Using Decision Trees , N.D.Hatziargyriou, P.S.Georgilakis, D.S.Spiliopoulos and J.A.Bakopoulos, Int. Journal of Engineering Intelligent Systems, vol23, no 1-3, December 1998, pp. 15-29.
- Recent progress in energy efficient transformers and core materials, A.J.Moses, Ευρωπαϊκό Συμπόσιο με θέμα «Τεχνολογικά και οικονομικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση μετασχηματιστών διανομής με μειωμένες απώλειες», THERMIE, Αθήνα 1994.
- SEEDT, Strategies for development and diffusion of Energy Efficient Distribution Transformers. <http://www.seedt.ntua.gr>
- The Greenhouse Effect and the Carbon Cycle. <http://unfccc.int>
- The potential for global energy savings potential from high efficiency distribution transformers, Leonardo Energy, February 2005.
- The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers, European Copper Institute, 1999.
- Three-phase oil immersed distribution transformers 50Hz, Cenelec, EN 50464-1, 2005.
- Transformers make less noise, περιοδικό Think T&D, χειμώνας 2008-2009, σελ. 21-22 http://www.aveva-td.com/home_tdomain/liblocal/docs/Think%20TD/Think_TD4_art2.pdf
- Ανάλυση μετασχηματιστών ισχύος και υπολογισμός απωλειών κενού φορτίου, ΕΜΠ, Αντώνιος Κλαδάς, Φώτης Κότσιρας, Αθήνα 2005.
- Βελτίωσης της μεθοδολογίας σχεδίασης–πρόβλεψης χαρακτηριστικών μετασχηματιστών ισχύος χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου και πειραματική επιβεβαίωση, Π.Γεωργιλάκης, Μ.Τσίλη, Α.Κλαδάς, Α.Σουφλάρης, Γ.Μπακόπουλος, Δ.Παπαρήγας, Κ.Αναστασίου, Ελληνική επιτροπή της διεθνούς οργάνωσης μεγάλων ηλεκτρικών δικτύων υψηλής τάσης, CIGRE, Σύνοδος «Αθήνα 2003».
- Δυναμική εξομοίωση τριφασικού μετασχηματιστή τύπου πυρήνα με συνδεσμολογία τρίγωνο-αστέρας, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ιωάννης Μήλιας-Αργεΐτης, Τριαντάφυλλος Κατσαρός, Πάτρα 2010.

- Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξής, ΕΜΠ, Αθήνα 2001.
- Έλαια μετασχηματιστών: γιατί η ΔΕΗ δεν χρησιμοποίησε ποτέ μετασχηματιστές με Clorphen, Περιοδικό «Τεχνική Επιθεώρηση», Παύλος Ραϊτσίος, 2006.
- Εξοικονόμηση ενέργειας στους μετασχηματιστές διανομής, ΕΜΠ, Φραγκίσκος Τοπαλής, Κ.Μπουρούσης.
- Εξοικονόμηση ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα μέσω μετασχηματιστών διανομής χαμηλών απωλειών, Θ.Κεφάλας, Μ.Τσίλη, Α.Κλαδάς, Ε.Αμοιραλής, Π.Γεωργιλάκης, Γ.Λοΐζος, Α.Σουφλάρης, Ελληνική επιτροπή της διεθνούς οργάνωσης μεγάλων ηλεκτρικών δικτύων υψηλής τάσης, CIGRE, Σύνοδος «Αθήνα 2009».
- Εξοικονόμηση ενέργειας στα Σ.Η.Ε. αναπτύσσοντας προηγμένα μοντέλα εκτίμησης, κόστους κατασκευής και λειτουργίας μετασχηματιστών, Περιοδικό «Τεχνικά Χρονικά» τ. Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου 2010, σελ. 73-87.
- Εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Γεωργιλάκης Παύλος, Δημήτρης Πάλλας, Χανιά 2007.
- Επίδραση της επισκευής μετασχηματιστών διανομής στις απώλειές τους, Π.Ραϊτσίος, Κ.Μαριόλης, Π.Ιωάννου, Ευρωπαϊκό Συμπόσιο με θέμα «Τεχνολογικά και οικονομικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση μετασχηματιστών διανομής με μειωμένες απώλειες», THERMIE, Αθήνα 1994.
- Η εξοικονόμηση ενέργειας στο πλαίσιο της ενεργειακής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Φώτιος Καραγιάννης, Ημερίδα με θέμα: Εξοικονόμηση ενέργειας, Ακαδημία Αθηνών-ΕΜΠ, Αθήνα 2006.
- Η θερμογραφία υπερύθρων ως διαγνωστικό μέσω στην προβλεπτική συντήριση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, Περιοδικό «Τεχνικά Χρονικά» τ. Μαρτίου-Απριλίου 2005, σελ 1-18, Φώτης Τσουκαλής.
- Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών, Ντοκόπουλος Π., Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 2005.
- Ηλεκτρικές Μηχανές AC–DC, Chapman S. J., 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2003.

- Μελέτη Μετασχηματιστών, Ραΐτσιος Π. Ε., Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα 2000.
- Μετρήσεις της θερμοκρασίας εναερίων υποσταθμών διανομής με χρήση θερμικής απεικόνισης, ΕΜΠ, Περικλής Μπούρκας, Νικόλαος Στεργίου, Ηλίας Νικολάου, Αθήνα 2009.
- Παρασκευή άμορφων μεταλλικών υμενίων μέσω ταχείας ψύξης απ' την υγρή φάση, Πανεπιστήμιο Πατρών, Κ.Πολίτης, Κατσιώρχης Αριστείδης, Πάτρα 2005.
- Σήμανση ενεργειακής απόδοσης μετασχηματιστών διανομής, ΕΜΠ, Φραγκίσκος Τοπαλής, Γιώργος Παναγιώτου, Αθήνα 2010.
- Συμβολή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στη μείωση των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών διανομής, Παύλος Γεωργιλάκης, ΕΜΠ, Αθήνα 2000.
- Τεχνικό Τετράδιο Νο 2 – Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ – Χρήση και Συντήρηση, Schneider Electric.