



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σήμανση Ενεργειακής Απόδοσης Μετασχηματιστών
Διανομής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιώργος Σ. Παναγιώτου

**Επιβλέπων: Φραγκίσκος Τοπαλής
Καθηγητής ΕΜΠ**

Αθήνα, Μάρτιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σήμανση Ενεργειακής Απόδοσης Μετασχηματιστών
Διανομής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιώργος Σ. Παναγιώτου

Επιβλέπων: Φραγκίσκος Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Φ. Τοπαλής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Σταθόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2010

.....
Γιώργος Σ. Παναγιώτου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Γιώργος Σ. Παναγιώτου, 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 μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναγράφεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στον πατέρα μου,
που μας έδειξε τους όμορφους,
κάποιες φορές κακοτράχαλους
δρόμους της ζωής
και δεν σταμάτησε ούτε μια στιγμή
να τους φωτίζει

Περίληψη

Η εξοικονόμηση ενέργειας από την προώθηση μετασχηματιστών διανομής υψηλής απόδοσης θα συμβάλει καθοριστικά στην επίτευξη των στόχων της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής και θα αποφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη.

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. Τα ευρωπαϊκά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν περίπου 4,5 εκατομμύρια μετασχηματιστές διανομής, που ανήκουν σε εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, βιομηχανίες και επιχειρήσεις.

Στους μετασχηματιστές διανομής χάνεται περίπου το 2% της συνολικά παραγόμενης ενέργειας. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η πλειονότητα των μετασχηματιστών διανομής ακόμη είναι παλιάς τεχνολογίας. Η μέση απόδοση λειτουργίας των μετασχηματιστών διανομής είναι 98,38%, ενώ οι συνολικές απώλειές τους στα 27 κράτη-μέλη το 2004 ήταν περίπου 33,4 TWh ανά έτος. Αν στο εξής αγοράζονταν μόνο οι πιο αποδοτικοί μετασχηματιστές που είναι διαθέσιμοι σήμερα, σε 15 χρόνια θα μπορούσε να επιτευχθεί μείωση των απωλειών των μετασχηματιστών διανομής κατά 11,6TWh ανά έτος, με τους σημερινούς ρυθμούς αντικατάστασης.

Οι μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης, με πυρήνα από άμορφο σίδηρο είναι πλέον αρκετά οικονομικοί. Η εφαρρογή κατάλληλων μέτρων και πολιτικών θα περιορίσει τα εμπόδια που συναντούν οι παράγοντες της αγοράς μετασχηματιστών διανομής και θα δώσει κίνητρα για την αγορά μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης συμβάλλοντας στην διεύρυσή τους στην ευρωπαϊκή αγορά.

Η σήμανση ενεργειακής απόδοσης προσφέρει μία συνοπτική εικόνα της ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών. Η καθιέρωσή της θα είναι πολύ χρήσιμη, ιδιαίτερα για τους ανθρώπους της βιομηχανίας, του εμπορίου αλλά και μικρών εταιρειών διανομής, οι οποίοι έχουν περιορισμένες τεχνικές γνώσεις των μετασχηματιστών διανομής και εμπλέκονται στην αγορά τους. Στην αναφορά του ευρωπαϊκού προγράμματος SEEDT παρουσιάζονται τρεις προτάσεις για τη σήμανση της ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται ένα μοντέλο ενεργειακής ταξινόμησης με βάση τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου, που λαμβάνει υπ' όψιν ολόκληρο το εύρος των τιμών φόρτισης ενός μετασχηματιστή διανομής. Για τον υπολογισμό της ετικέτας ενεργειακής απόδοσης υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος ενός συνδυασμού αντιπροσωπευτικών τιμών φόρτισης με βάση το προφίλ φορτίου των κύριων τύπων καταναλωτών: του οικιακού, του βιομηχανικού και του εμπορικού. Το προτεινόμενο στην εργασία μοντέλο είναι πιο «ευαίσθητο» στις απώλειες φορτίου και οδηγεί σε πιο ακριβή ετικέτα ενεργειακής απόδοσης από τα αντίστοιχα μοντέλα του SEEDT.

Λέξεις κλειδιά

Μετασχηματιστές διανομής, απώλειες φορτίου, απώλειες κενού φορτίου, ενεργειακή απόδοση, μετασχηματιστές άμορφου πυρήνα, σήμανση ενεργειακής απόδοσης, ετικέτα ενεργειακής απόδοσης, SEEDT

Abstract

Energy saving through the promotion of energy-efficient electricity distribution transformers can contribute effectively to the implementation of the EU policy related to energy targets and result to significant environmental and economic benefits.

Distribution transformers convert electrical energy supplied at medium voltage level (typically from 10 kV to maximum 36 kV) to electrical energy at voltage levels most appropriate for residential, commercial and partly industrial loads. European electricity distribution networks include about 4,5 million distribution transformers owned by electricity distribution companies, industry and commerce.

It is estimated that up to 2% of the total power generated is lost in distribution transformers. The European distribution transformer fleet is still dominated by traditional technology. The distribution transformers average operating efficiency in EU-27 is 98,38%, while their total electricity losses were equal to 33,4 TWh/year in 2004. If the most energy-efficient transformers available today were to be bought from now on, with the current replacement rates, in 15 years the saving rate would be 11,6 TWh/year.

High efficiency transformers, with amorphous metal core have become relatively economical. The implementation of suitable policies and measures can remove obstacles set by the market's channels of distribution and offer incentives that will further support the use of energy-efficient distribution transformers in Europe.

Energy-efficiency labeling offers an obvious classification of distribution transformers energy efficiency. Its implementation can prove extremely useful, especially to the industry and commerce but also to small electricity distribution companies that act as technical decision makers but lack the information and knowledge required. Meanwhile, the European Project SEEDT Report introduces three alternative proposals for labeling of the distribution transformers.

In the present thesis, an energy-efficiency labeling model is proposed, based on no-load losses and load losses, taking into account the whole loading range of a distribution transformer. A weighted average of combinations of different loadings is calculated based on load profiles of main consumer types: household, industry and services. The proposed model is focusing on the sensitivity of load losses and comparing those proposed by SEEDT, provides a more accurate energy-efficiency label.

Key Words

Distribution transformers, load losses, no-load losses, energy efficiency, amorphous transformers, energy-efficiency labeling, energy-efficiency label, SEEDT

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή και υπεύθυνο της διπλωματικής μου κ. Φρ. Τοπαλή, ο οποίος με την άρτια επιστημονική του κατάρτιση, την ουσιαστική καθοδήγηση, τη διαρκή παρότρυνση και την κατανόηση που έδειξε, με στήριξε και με βοήθησε στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη και τη βοήθειά της και το Γ. Πλατάκη, για την ποικιλότροπη συμβολή του στην ολοκλήρωση της διπλωματικής.

Τέλος, πιστεύω ότι αυτές οι σελίδες δεν θα είχαν γραφτεί χωρίς την ουσιαστική παρουσία της Βούλας, της Μαίρης, του Νίκου, του Πάνου και της Βιολέτας, στους οποίους χρωστάω πολλά. Το να τους ευχαριστήσω από ετούτες εδώ τις γραμμές δεν αποτελεί τυπική διαδικασία. Υπήρξε ισχυρό κίνητρο για την ολοκλήρωση της διπλωματικής και μπορεί τώρα να εκφράσει σε έναν ελάχιστο βαθμό την ευγνωμοσύνη που νιώθω για αυτούς.

Γιώργος Σ. Παναγιώτου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	9
Εισαγωγή	12
1.1 Γενικά	12
1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	16
Μετασχηματιστές Διανομής	16
2.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	16
2.2 Μετασχηματιστές διανομής	18
2.2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας των Μετασχηματιστών διανομής	18
2.2.2 Ψύξη των Μετασχηματιστών διανομής	19
2.2.3 Απώλειες – απόδοση μετασχηματιστών	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	23
Υφιστάμενη Κατάσταση και Απώλειες των Μετασχηματιστών Διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση – Μέτρα και Πολιτικές για την Εξοικονόμηση Ενέργειας	23
3.1 Πληθυσμός των μετασχηματιστών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση	23
3.2 Απώλειες και απόδοση μετασχηματιστών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση	26
3.3 Χρονική εξέλιξη των απωλειών των μετασχηματιστών διανομής – Η περίπτωση της Πολωνίας	32
3.4 Δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας	35
3.5 Πολιτικές και μέτρα προώθησης των αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών διανομής	36
3.6 Περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις των προτεινόμενων πολιτικών και μέτρων	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	47
Τεχνολογία Μετασχηματιστών Διανομής	47
4.1 Θέματα σχεδίασης μετασχηματιστών	47
4.2 Σιδηρομαγνητικά υλικά μετασχηματιστών	48

4.3 Μετασχηματιστές με πυρήνα από άμορφο σίδηρο.....	51
4.4 Τυλίγματα των πηνίων των μετασχηματιστών διανομής	57
4.5 Υπεραγώγιμοι μετασχηματιστές	59
4.6 Μετασχηματιστές εξαγωνικού πυρήνα	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	62
Ευρωπαϊκά Πρότυπα - Σήμανση Ενεργειακής Απόδοσης των Τριφασικών Ελαιόψυκτων Μετασχηματιστών Διανομής.....	62
5.1 Ευρωπαϊκά Πρότυπα	62
5.1.1 HD 428.1 S1 [3]	62
5.1.2 EN 50464-1 [2].....	66
5.2 Σήμανση Ενεργειακής Απόδοσης.....	71
5.2.1 Γενικά.....	71
5.2.2 Πληροφορίες που θα πρέπει να έχει η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής.....	73
5.2.3 Η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής που προτείνεται στην αναφορά του SEEDT	74
5.2.4 Οι τρεις εναλλακτικές προτάσεις του SEEDT για την ετικέτα ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής.....	76
5.2.5 Προσδιορισμός των κλάσεων της ετικέτας των μετασχηματιστών διανομής	82
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	87
Το Προτεινόμενο Μοντέλο Ενεργειακής Ταξινόμησης.....	87
6.1 Εισαγωγή	87
6.2 Υπολογισμός της Μεταβλητής Label	89
6.3 Καθορισμός των Ορίων των Κλάσεων.....	94
6.4 Περιγραφή και Παρουσίαση των Κλάσεων	97
6.5 Η Ετικέτα Ενεργειακής Απόδοσης.....	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	103
Συμπεράσματα.....	103
Βιβλιογραφία.....	106

Είμαστε σαν νάνοι που κάθονται στους ώμους γιγάντων, συνεπώς μπορούμε να δούμε περισσότερα και μακρύτερα από αυτούς όχι εξαιτίας της καλύτερης όρασής μας, αλλά επειδή μας ανύψωσαν και μας κουβάλησαν άνθρωποι τεράστιου μεγέθους.

Φιλόσοφος Βερνάρδος της Σαρτρ, 1115 μ.Χ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι περιβαλλοντικές συνέπειες των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθιστούν τη διαχείριση της ενέργειας με αποδοτικό τρόπο πρωτεύοντα στόχο σε παγκόσμιο επίπεδο. Ο περιορισμός των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ότι μπορεί να έχει την πιο ουσιαστική και οικονομική συμβολή στην επίτευξη των ενεργειακών στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που συνοψίζονται στην μείωση της εξάρτησής της από ξένες πηγές ενέργειας, την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και την οικονομική μεγέθυνση [17].

Τα ευρωπαϊκά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν περισσότερα από τεσσεράμισι εκατομμύρια μετασχηματιστές διανομής, οι οποίοι ανήκουν στις εταιρείες διανομής, τη βιομηχανία και τον τριτογενή τομέα. Παρά την υψηλή τους απόδοση το ποσοστό της συνολικά παραγόμενης ενέργειας που χάνεται στους μετασχηματιστές διανομής εκτιμάται στο 2% και αποτελεί περίπου το ένα τρίτο των συνολικών απωλειών των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [5]. Το 2004 οι ετήσιες απώλειες των μετασχηματιστών διανομής στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 ανέρχονταν στις 33,4 TWh, χωρίς να περιλαμβάνονται οι απώλειες που οφείλονται στην άεργο ισχύ και τις αρμονικές. Ο μέσος συντελεστής απόδοσης λειτουργίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι 98,38%, καθώς η πλειονότητα των μετασχηματιστών διανομής είναι παλιάς τεχνολογίας.

Το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας από τη μετάβαση σε μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης παγκοσμίως υπολογίζεται ότι είναι τουλάχιστον 200 TWh ετησίως,

ποσότητα ενέργειας αντίστοιχη με την ηλεκτρική κατανάλωση της Μπενελούξ [15]. Το Ευρωπαϊκό δυναμικό της ετήσιας εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας στους μετασχηματιστές διανομής είναι περίπου 22 TWh για τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού, το οποίο αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση 9 Mt CO₂ το χρόνο και 5 TWh για τις βιομηχανίες και τον τριτογενή τομέα. Η ποσότητα αυτή είναι ισοδύναμη με την παραγωγή τριών από τα μεγαλύτερα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση γαιανθράκων ή με την κατανάλωση πέντε εκατομμυρίων σπιτιών [16]. Αν όλοι οι υφιστάμενοι μετασχηματιστές διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση αντικαθίσταντο από τους πιο αποδοτικούς ενεργειακά που είναι διαθέσιμοι σήμερα, θα εξοικονομούσαν ετησίως περίπου 18,5 TWh. Κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, ωστόσο με τους σημερινούς ρυθμούς αντικατάστασης και εγκατάστασης νέων μετασχηματιστών, αν αγοράζονταν μόνο αποδοτικοί ενεργειακά μετασχηματιστές, σε 15 χρόνια θα μπορούσε να επιτευχθεί ετήσια μείωση των απωλειών κατά 11,6 TWh.

Οι αποδοτικοί ενεργειακά μετασχηματιστές διανομής, όπως για παράδειγμα αυτοί που είναι κατασκευασμένοι από άμορφο σίδηρο, έχουν πιο υψηλή τιμή αγοράς από τους συμβατικούς. Όμως αν ληφθεί υπ' όψιν το κόστος του κύκλου ζωής, η επιλογή μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης είναι συνήθως η πιο οικονομική λύση. Ωστόσο δεν υπάρχουν τα κατάλληλα κίνητρα και μάλιστα συχνά οι εμπλεκόμενοι φορείς στην αγορά των μετασχηματιστών συναντούν εμπόδια και αντικίνητρα, που τους αποτρέπουν από την αγορά αποδοτικών μετασχηματιστών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η χρήση τους στην Ευρωπαϊκή Ένωση να παραμένει ακόμα σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα.

Προκειμένου να αρθούν τα εμπόδια και να δοθούν κίνητρα στους παράγοντες της αγοράς για την αγορά μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης, είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα και να εφαρμοστούν πολιτικές προώθησης των μετασχηματιστών αυτών στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα μέτρα και οι πολιτικές που απαιτούνται παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3 και θα είναι πιο αποτελεσματικά, αν εφαρμοστούν συνδυαστικά.

Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σε αντίθεση με πολλές άλλες χώρες, δεν υπάρχουν υποχρεωτικά πρότυπα για την ενεργειακή απόδοση των μετασχηματιστών. Οι απώλειες των μετασχηματιστών περιγράφονται στα πρότυπα HD 538 για μετασχηματιστές ξηρού τύπου και EN 50464, το οποίο αντικατέστησε το HD 428, για

μετασχηματιστές λαδιού. Η σήμανση ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής σε συνδυασμό με άλλα μέτρα, όπως η καθιέρωση ελαχίστου επιπέδου ενεργειακής απόδοσης, θα συμβάλει σε σημαντικό βαθμό στην προώθηση των μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης.

1.2 Στόχος της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ένα μοντέλο ενεργειακής ταξινόμησης και σήμανσης των μετασχηματιστών διανομής, στο οποίο ο προσδιορισμός της ετικέτας ενεργειακής απόδοσής τους γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν ολόκληρο το εύρος των πιθανών τιμών φόρτισης των μετασχηματιστών διανομής με στάθμιση των τιμών φόρτισης. Παρουσιάζονται αρχικά οι μετασχηματιστές διανομής, η υφιστάμενη κατάσταση των μετασχηματιστών διανομής και των απωλειών τους στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας από τη μείωση των απωλειών τους και οι νέες τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί στον τομέα των μετασχηματιστών. Στη συνέχεια περιγράφονται οι υπάρχουσες προτάσεις για τη σήμανση ενεργειακής απόδοσης και αναπτύσσεται το προτεινόμενο στην εργασία μοντέλο. Αναλυτικότερα η δομή της εργασίας είναι η εξής:

Στο κεφάλαιο 1 έγινε μια εισαγωγή στο θέμα των απωλειών των μετασχηματιστών διανομής και τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας από την προώθηση των μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης. Επιπλέον επισημάνθηκε η ανάγκη για τη λήψη μέτρων, που θα συμβάλουν σε αυτήν την προώθηση.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, με ιδιαίτερη έμφαση στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και οι μετασχηματιστές διανομής. Περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των μετασχηματιστών διανομής και οι μέθοδοι ψύξης τους, με βάση τις οποίες διαχωρίζονται σε ελαιόψυκτους και μετασχηματιστές ξηρού τύπου. Επιπλέον αναλύονται οι απώλειες κενού φορτίου, οι απώλειες φορτίου και οι υπόλοιποι τύποι απωλειών τους.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται ο πληθυσμός των μετασχηματιστών διανομής και οι απώλειές τους στην Ευρωπαϊκή Ένωση καθώς και οι δυνατότητες εξοικονόμησης

ενέργειας στους μετασχηματιστές διανομής με την χρήση αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών. Στη συνέχεια περιγράφονται μέτρα και πολιτικές για την προώθηση των αποδοτικών μετασχηματιστών και παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές και οι οικονομικές επιπτώσεις που θα επιφέρει η εφαρμογή αυτών των μέτρων και πολιτικών.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται θέματα σχεδίασης και κατασκευής των μετασχηματιστών διανομής και περιγράφεται η εξέλιξη που έχει σημειωθεί στην τεχνολογία των τεχνικών κατασκευής τους και των επιμέρους υλικών από τα οποία αποτελούνται. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μετασχηματιστές με πυρήνα από άμορφο σίδηρο. Τέλος γίνεται σύντομη αναφορά στους υπεραγωγίσιμους μετασχηματιστές και τους μετασχηματιστές εξαγωνικού πυρήνα.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αρχικά τα ευρωπαϊκά πρότυπα που περιγράφουν τις απώλειες των τριφασικών ελαιόψυκτων μετασχηματιστών διανομής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται η σήμανση ενεργειακής απόδοσης των τριφασικών ελαιόψυκτων μετασχηματιστών διανομής και οι τρεις προτάσεις του ευρωπαϊκού προγράμματος “Strategies for development and diffusion of Energy Efficient Distribution Transformers – SEEDT” για τον προσδιορισμό της ετικέτας ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών αυτών.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το προτεινόμενο από την παρούσα διπλωματική εργασία μοντέλο ενεργειακής ταξινόμησης. Περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού της μεταβλητής που καθορίζει την ενεργειακή κλάση του μετασχηματιστή και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου μοντέλου με τις προτάσεις του SEEDT και τα ισχύοντα ευρωπαϊκά πρότυπα.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μετασχηματιστές Διανομής

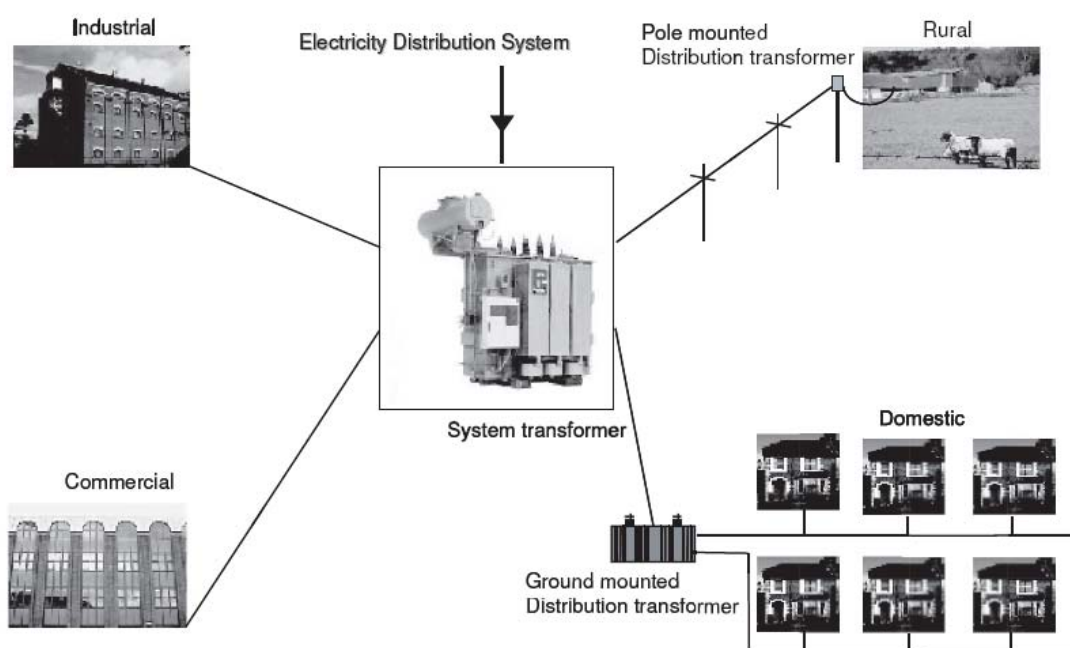
2.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

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, ενώ ενίοτε μεταξύ του συστήματος μεταφοράς και του συστήματος διανομής παρεμβάλλεται το σύστημα υπομεταφοράς. 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 [18, 21].

Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται, ανάλογα με την τάση, σε δίκτυα υψηλής τάσης (35-150kV), δίκτυα μέσης τάσης (1-35 kV) και δίκτυα χαμηλής τάσης (100-1000 V). Οι αναφερόμενες τάσεις είναι οι πολικές του τριφασικού συστήματος [18]. Οι μεγάλοι βιομηχανικοί πελάτες, όπως για παράδειγμα η βιομηχανία του χάλυβα, τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια στα 110-150kV. Μικρότεροι βιομηχανικοί πελάτες, μεγάλες επιχειρήσεις, νοσοκομεία, δημόσια κτήρια κτλ. τροφοδοτούνται με

μέση τάση, ήτοι 10 – 20kV. Τέλος, στους οικιακούς και μικρούς εμπορικούς πελάτες η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στα 400/230V [5].

Ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαμόρφωση τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Τα πλεονεκτήματα των εναερίων δικτύων είναι 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 μεταξύ 25 και 250 kVA [18, 21]. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται απλοποιημένα ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με το οποίο τροφοδοτούνται βιομηχανικοί, εμπορικοί, αγροτικοί και οικιακοί πελάτες με εναέριες ή υπόγειες γραμμές.



Σχήμα 2.1: Σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [15]

Οι απώλειες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από το επίπεδο της τάσης και ελαχιστοποιούνται με τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλή τάση. Για αυτόν το λόγο οι μετασχηματιστές, οι οποίοι αυξάνουν την τάση της παραγόμενης ενέργειας για τη μεταφορά της και μετά την υποβιβάζουν στο

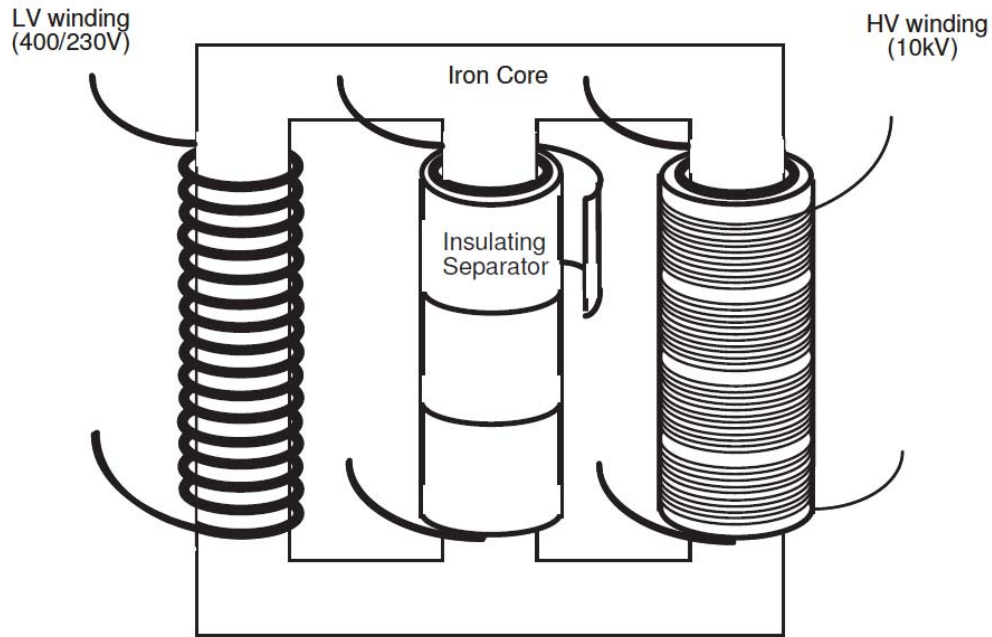
απαιτούμενο από τους χρήστες επίπεδο, είναι βασικό στοιχείο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Καθιστούν δυνατή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην πλέον οικονομική τάση γεννήτριας, τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στην πλέον οικονομική τάση μεταφοράς και την χρησιμοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας στην πλέον κατάλληλη τάση για κάθε καταναλωτική συσκευή [23].

2.2 Μετασχηματιστές διανομής

2.2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας των Μετασχηματιστών διανομής

Οι μικρότεροι μετασχηματιστές σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στους υποσταθμούς διανομής και τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια τους καταναλωτές, περιγράφονται ως μετασχηματιστές διανομής [5]. 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 [16].

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής διανομής αποτελείται από έναν πυρήνα σιδήρου με ένα σκέλος για κάθε μία από τις φάσεις (σχήμα 2.2). Γύρω από κάθε σκέλος βρίσκονται δύο τυλίγματα: ένα με μεγάλο αριθμό ελιγμάτων (N_1), που είναι συνδεδεμένο στη πλευρά της υψηλής τάσης και ένα με μικρό αριθμό ελιγμάτων (N_2), συνδεδεμένο στην πλευρά της χαμηλής τάσης. Τα τυλίγματα διαχωρίζονται από μονωτικό υλικό, όπως φαίνεται στο σχήμα. Όταν εφαρμόζεται μια εναλλασσόμενη τάση στους ακροδέκτες του ενός τυλίγματος, μια τάση με την ίδια συχνότητα παράγεται στους ακροδέκτες του άλλου. Ο λόγος των τάσεων ισούται με το λόγο των ελιγμάτων: $V_1/V_2 = N_1/N_2$ [15]. Συνεπώς, με κατάλληλη επιλογή του αριθμού ελιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι δυνατό να προκύψει οποιοσδήποτε επιθυμητός λόγος τάσεων [23].



Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα τριφασικού μετασχηματιστή διανομής [15]

2.2.2 Ψύξη των Μετασχηματιστών διανομής

Η θερμότητα η οποία παράγεται στους μετασχηματιστές πρέπει να απάγεται, για να μην αυξηθεί η θερμοκρασία τους πέρα από τα επιτρεπόμενα όρια. Ανάλογα με τη μέθοδο ψύξης που χρησιμοποιείται, οι μετασχηματιστές διακρίνονται στους μετασχηματιστές λαδιού, οι οποίοι είναι πιο αποδοτικοί και τους μετασχηματιστές ξηρού τύπου. 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 [13].

Οι μετασχηματιστές λαδιού είναι εμβαπτισμένοι σε λάδι, το οποίο ψύχει τα τυλίγματα και ταυτόχρονα λειτουργεί ως ηλεκτρική μόνωση. Παλιότερα το πολυχλωροδιφαινύλιο (PCB) εθεωρείτο ως ένα από τα πιο αξιόπιστα μονωτικά υγρά για μετασχηματιστές λόγω των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων και της πυραντοχής του. Ωστόσο 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 διοξίνες. Για αυτούς τους λόγους

σήμερα τα λάδια από πολυχλωροδιφαινύλια έχουν ως επί τω πλείστον αντικατασταθεί από ορυκτέλαια και συνθετικά λάδια.

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 τους περιβάλλοντος. Συναντώνται για παράδειγμα σε χαρτοβιομηχανίες, αποθήκες καυσίμων και εργοστάσια τροφίμων [20]. Στους μετασχηματιστές αυτούς το ψυκτικό μέσο είναι ο αέρας, ενώ χρησιμοποιούνται επιπλέον για ηλεκτρική μόνωση εποξειδική ρητίνη ή χαρτιά, διαποτισμένα με κατάλληλες ουσίες [15].

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. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ανεμιστήρας, ο οποίος τοποθετείται στο υψηλότερο σημείο του χώρου [22].

2.2.3 Απώλειες – απόδοση μετασχηματιστών

Οι βασικοί τύποι απωλειών των μετασχηματιστών είναι οι απώλειες κενού φορτίου και οι απώλειες φορτίου.

Οι απώλειες κενού φορτίου ή απώλειες πυρήνα (no-load losses) προκαλούνται από την υστέρηση και τα δινορρεύματα στον πυρήνα. Οι απώλειες αυτές υφίστανται οποτεδήποτε ο μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένος και είναι σταθερές, ανεξάρτητα από το φορτίο. Οι απώλειες υστέρησης προκαλούνται από την κυκλική μαγνήτιση του σιδηρομαγνητικού υλικού, το οποίο μαγνητίζεται και απομαγνητίζεται με την κυκλική μεταβολή της μαγνητεγερτικής δύναμης. Οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες προς το εμβαδόν του βρόχου υστερήσεως και εξαρτώνται από το υλικό κατασκευής του πυρήνα. Οι πυριτιούχοι χάλυβες έχουν πολύ χαμηλότερη υστέρηση από τους συμβατικούς, ενώ τα άμορφα μέταλλα έχουν ακόμη χαμηλότερη υστέρηση. Οι απώλειες υστέρησης είναι υπεύθυνες για ποσοστό 50% - 70% των απωλειών κενού φορτίου. Οι απώλειες από δινορρεύματα προκαλούνται διότι η εναλλασσόμενη μαγνητική ροή επάγει δινορρεύματα στα ελάσματα του πυρήνα και κατά συνέπεια

εκλύεται θερμότητα. Οι απώλειες από δινορρεύματα ευθύνονται περίπου για ποσοστό 30% - 50% των απωλειών κενού φορτίου και με τη μείωσή τους μπορεί να επιτευχθεί η μεγαλύτερη βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών. Η μείωση των απωλειών από δινορρεύματα μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή του πυρήνα από λεπτά ελάσματα, μονωμένα μεταξύ τους με λεπτό στρώμα επιχρίσματος, προκειμένου να μειωθούν τα δινορρεύματα. Εκτός από τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες από δινορρεύματα υπάρχουν στον πυρήνα και άλλες απώλειες, όπως για παράδειγμα απώλειες διηλεκτρικού, οι οποίες ευθύνονται για ποσοστό λιγότερο από 1% των συνολικών απωλειών πυρήνα.

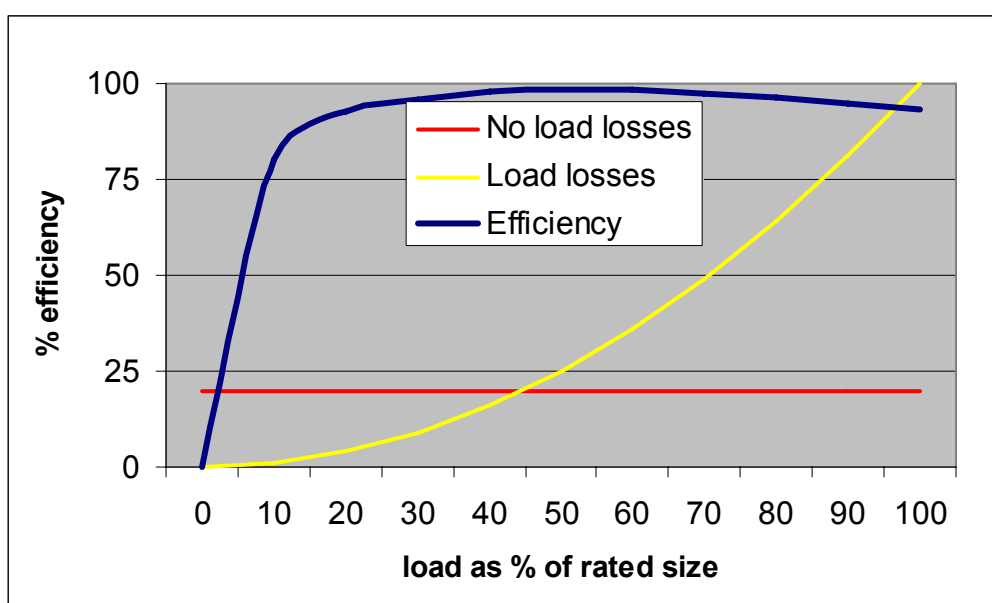
Οι απώλειες φορτίου ή απώλειες χαλκού (load losses) εκλύονται υπό μορφή θερμότητας στο αγωγίμο υλικό, όταν αυτό διαρρέεται από ρεύμα. Αποτελούνται από τις απώλειες θερμότητας που οφείλονται στην αντίσταση των τυλιγμάτων και από τις απώλειες που προκαλούνται από τα δινορρεύματα που επάγονται στους αγωγούς (επιδερμικό φαινόμενο) και τα τμήματα της κατασκευής (διαφεύγουσα απώλεια). Οι απώλειες φορτίου είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος στα τυλίγματα και μπορούν να μειωθούν με αύξηση της διατομής των αγωγών ή με μείωση του μήκους των τυλιγμάτων. Με την κατασκευή των τυλιγμάτων με συνεχή αντιμετάθεση αγωγών (Continuously Transposed Conductor – CTC) επιτυγχάνεται αυξημένη διατομή του αγωγού, ενώ ταυτόχρονα εξομαλύνονται οι διαφορές της μαγνητικής ροής που εμφανίζονται στους συνενωμένους αγωγούς [13, 24].

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 [15].

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 δινορρευμάτων 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 [13].

Οι μετασχηματιστές διανομής είναι πολύ αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές με συντελεστή απόδοσης που φτάνει μέχρι τα επίπεδα του 97,5% με 99,4%. Η απόδοση λειτουργίας τους είναι μικρότερη, διότι δεν λειτουργούν στη μέγιστη απόδοση συνέχεια. Στο σχήμα 2.3 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% [17].



Σχήμα 2.3: Συντελεστής απόδοσης και απώλειες συναρτήσει του επιπέδου φόρτισης [17]

Το μέγεθος ενός μετασχηματιστή επιδρά στις απώλειές του. Γενικά μεγαλύτερες μονάδες έχουν χαμηλότερες ονομαστικές απώλειες, και, ιδιαίτερα, χαμηλότερες απώλειες φορτίου [13, 20].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Υφιστάμενη Κατάσταση και Απώλειες των Μετασχηματιστών Διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση – Μέτρα και Πολιτικές για την Εξοικονόμηση Ενέργειας

3.1 Πληθυσμός των μετασχηματιστών διανομής 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 και η πίεση από την αναρρύθμιση 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. [13] 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 [16].

Οι μετασχηματιστές, οι οποίοι τροφοδοτούν φορτία χαμηλής τάσης και ανήκουν σε ιδιώτες, συνήθως αναφέρονται ως βιομηχανικοί. Οι περισσότεροι βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες έχουν ειδικές απαιτήσεις είτε για καλύτερη πυρασφάλεια είτε ατομική ασφάλεια είτε τέλος για το χώρο που καταλαμβάνουν οι μετασχηματιστές. Όμως αντιμετωπίζουν 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 [19].

Ο συνολικός πληθυσμός των μετασχηματιστών διανομής του τομέα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 υπολογίζεται στις 3,7 εκατομμύρια μονάδες. Η μέση ονομαστική ισχύς των μετασχηματιστών αυτών είναι μεταξύ των 116 και 369 kVA ανάλογα με τη χώρα. 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. 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 400kVA. Ο αριθμός των βιομηχανικών μετασχηματιστών διανομής ξηρού τύπου υπολογίζεται ότι είναι μικρότερος από διακόσιες χιλιάδες μονάδες με μέση ονομαστική ισχύ πάνω από 800kVA, η οποία είναι μεγαλύτερη από το διπλάσιο της μέσης ονομαστικής ισχύος των βιομηχανικών μετασχηματιστών λαδιού [13].

Περισσότερο από τα δύο τρίτα των εγκατεστημένων μετασχηματιστών 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% εξ αυτών βρίσκονται στην κατηγορία χαμηλότερης ισχύος.

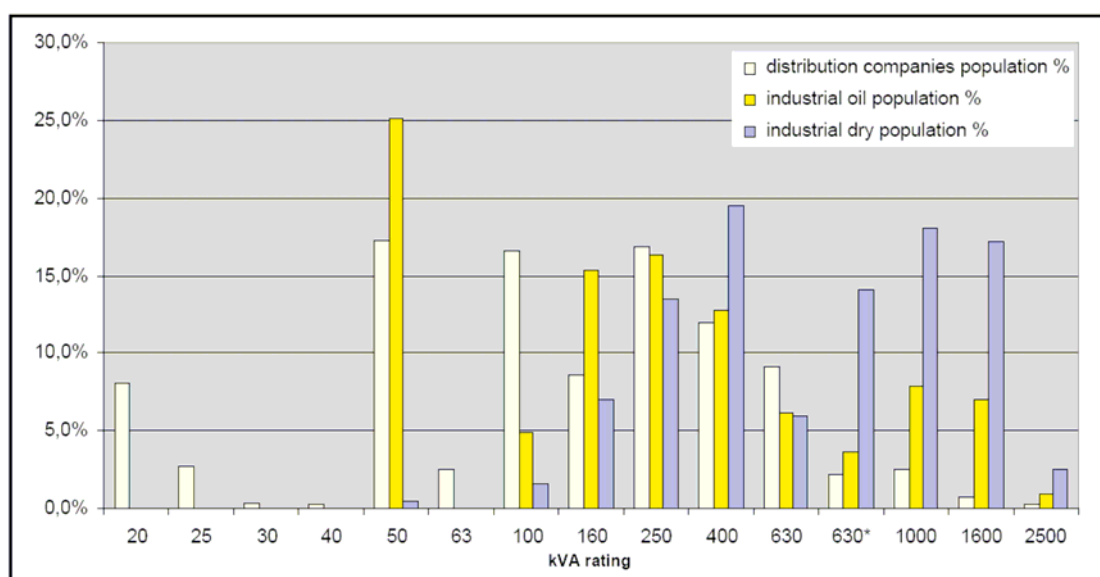
Ο πληθυσμός των μετασχηματιστών διανομής στην Ευρωπαϊκή ένωση των 27 κι η ετήσια αγορά, με βάση τους μετασχηματιστές που εγκαταστάθηκαν το 2004, δίνονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Πληθυσμοί των μετασχηματιστών διανομής και ετήσια αγορά (εγκατάσταση μετασχηματιστών το 2004) [13]

		Fleet EU-27		Market EU-27	
		pcs	MVA	pcs	MVA
Distribution sector oil*	< 400 kVA	2 688 000	313 000	56 000	7 000
	≥ 400 kVA & ≤ 630 kVA	861 000	441 000	23 000	12 000
	> 630 kVA	127 000	157 000	6 000	8 000
	Subtotal	3 676 000	911 000	85 000	27 000
Industry oil	< 400 kVA	493 000	66 000	24 000	3 000
	≥ 400 kVA & ≤ 630 kVA	181 000	90 000	8 000	4 000
	> 630 kVA	127 000	173 000	6 000	8 000
	Total industry oil	802 000	330 000	38 000	15 000
Industry dry	< 400 kVA	39 000	13 000	3 000	1 000
	≥ 400 kVA & ≤ 630 kVA	69 000	41 000	5 000	3 000
	> 630 kVA	66 000	90 000	8 000	11 000
	Total industry dry	174 000	144 000	16 000	14 000
Total		4 652 000	1 384 000	140 000	57 000

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

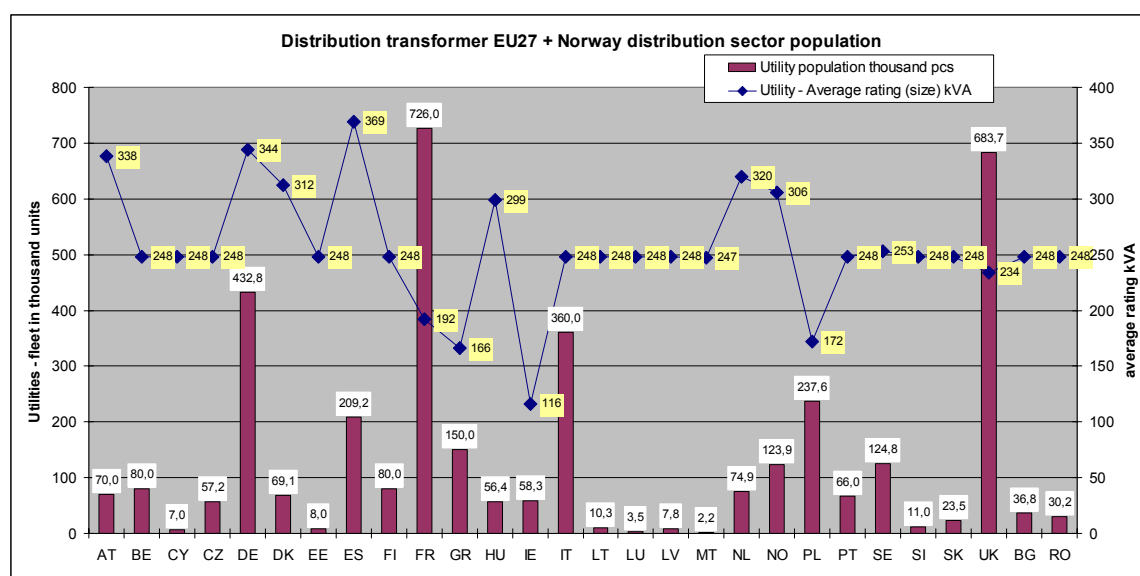
Το ποσοστό του πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής ανά κατηγορία ονομαστικής ισχύος για τους μετασχηματιστές του τομέα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και του βιομηχανικού τομέα δίνονται στο σχήμα 3.1, στο οποίο φαίνεται η διασπορά των ονομαστικών ισχύων των εγκατεστημένων μετασχηματιστών.



Σχήμα 3.1: Ποσοστό του πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής ανά τιμή ονομαστικής ισχύος [13]

Στον πίνακα 3.1 και στο σχήμα 3.1 φαίνεται 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.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση του πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση δίνονται στο σχήμα 3.2 οι πληθυσμοί των μετασχηματιστών του τομέα της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στις είκοσι επτά χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και τη Νορβηγία και οι ονομαστικές τους ισχύεις ανά χώρα.



Σχήμα 3.2: Μετασχηματιστές διανομής των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και μέση ονομαστική ισχύς τους στις χώρες της ΕΕ των 27 και τη Νορβηγία [17]

3.2 Απώλειες και απόδοση μετασχηματιστών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση

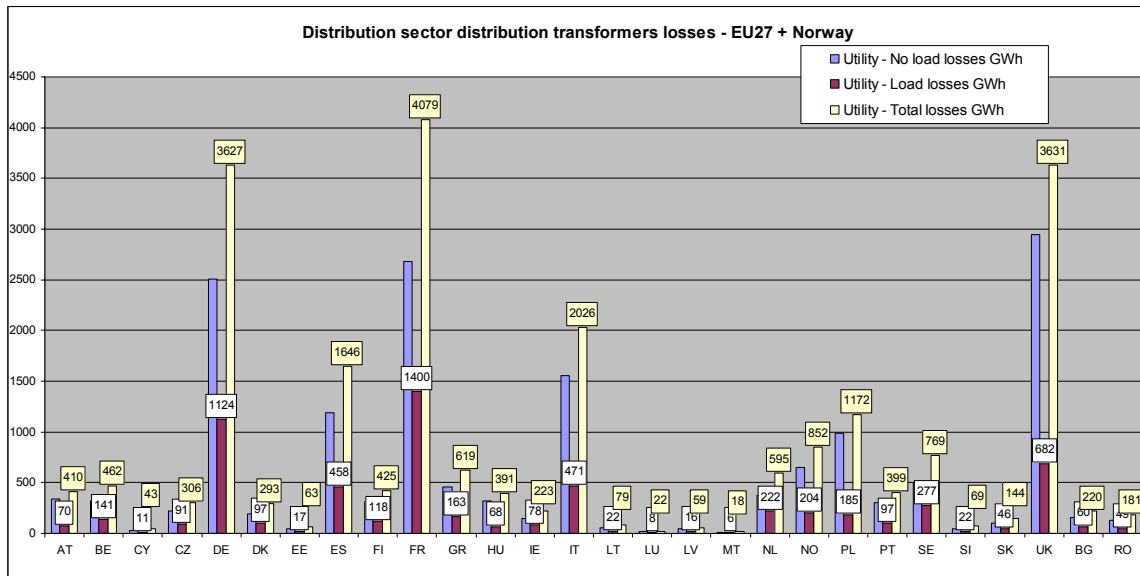
Οι συνολικές απώλειες στους μετασχηματιστές διανομής της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 υπολογίζονται σε περίπου 33,4 TWh το χρόνο. Αυτή η εκτίμηση δεν περιλαμβάνει τις απώλειες που οφείλονται στην άεργο ισχύ και τις αρμονικές, οι οποίες, με έναν μετριοπαθή υπολογισμό, ανέρχονται στις 5 TWh το χρόνο για όλες τις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και τους ιδιωτικούς μετασχηματιστές διανομής. Στον πίνακα 3.2 φαίνονται οι απώλειες των μετασχηματιστών διανομής

στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τους υπάρχοντες μετασχηματιστές (fleet) και για τους πρόσφατα εγκατεστημένους (market).

Πίνακας 3.2: Απώλειες των μετασχηματιστών διανομής στην ΕΕ των 27 [13]

	Transformer Fleet EU-27		Transformer Market EU-27	
		GWh/year		GWh/year
electricity distribution companies oil	ΣP_o fleet	15 970	ΣP_o market	350
	ΣP_k fleet	6000	ΣP_k market	170
	ΣP_k fleet / ΣP_{total}	27,3%	ΣP_k market / ΣP_{total}	33,0%
industry oil	ΣP_o fleet	5 540	ΣP_o market	260
	ΣP_k fleet	2 170	ΣP_k market	100
	ΣP_k fleet / ΣP_{total}	28,1%	ΣP_k market / ΣP_{total}	26,5%
industry dry	ΣP_o fleet	2 590	ΣP_o market	270
	ΣP_k fleet	1 130	ΣP_k market	120
	ΣP_k fleet / ΣP_{total}	30,4%	ΣP_k market / ΣP_{total}	30,9%
Total	Ptotal	33400	Ptotal	1 270
+ reactive power and harmonic losses		~ 5000		~ 200
Total	Ptotal	~ 38400	Ptotal	1 470

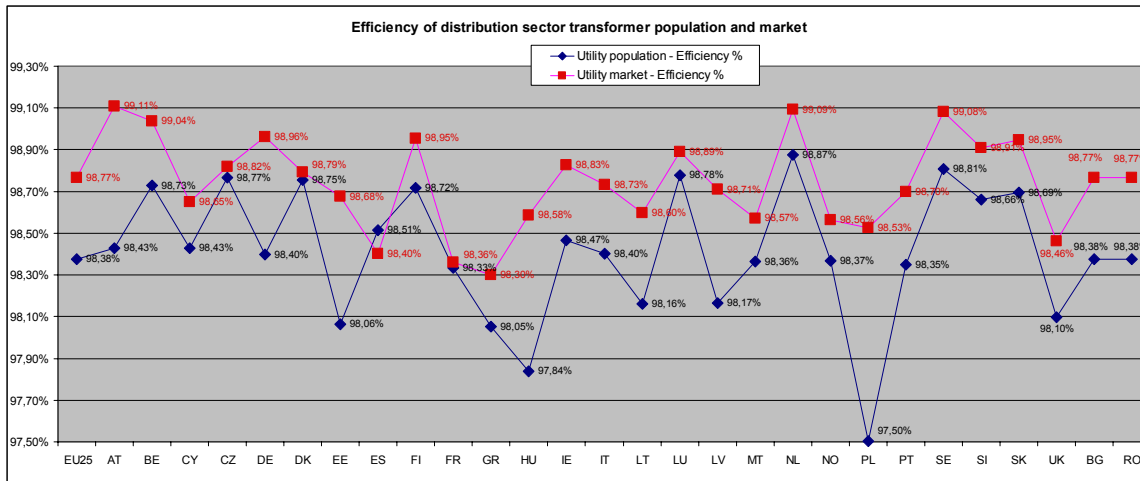
Όπως προκύπτει από τον πίνακα 3.2, οι απώλειες κενού φορτίου αποτελούν ποσοστό μεγαλύτερο του 70% των συνολικών απωλειών. Οι συνολικές απώλειες στους πρόσφατα εγκατεστημένους μετασχηματιστές υπολογίζονται σε 1,27 TWh το χρόνο ή 1,47 TWh το χρόνο συνυπολογίζοντας τις απώλειες αρμονικών και αέργου ισχύος. Οι μετασχηματιστές που αγοράστηκαν 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 προηγούμενη ενότητα, έχουν γενικά υψηλότερες ονομαστικές ισχύεις 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 3.3.



Σχήμα 3.3: Απώλειες μετασχηματιστών διανομής των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ των 27 και τη Νορβηγία [17]

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 [13]. 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 3.4. 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% [17].

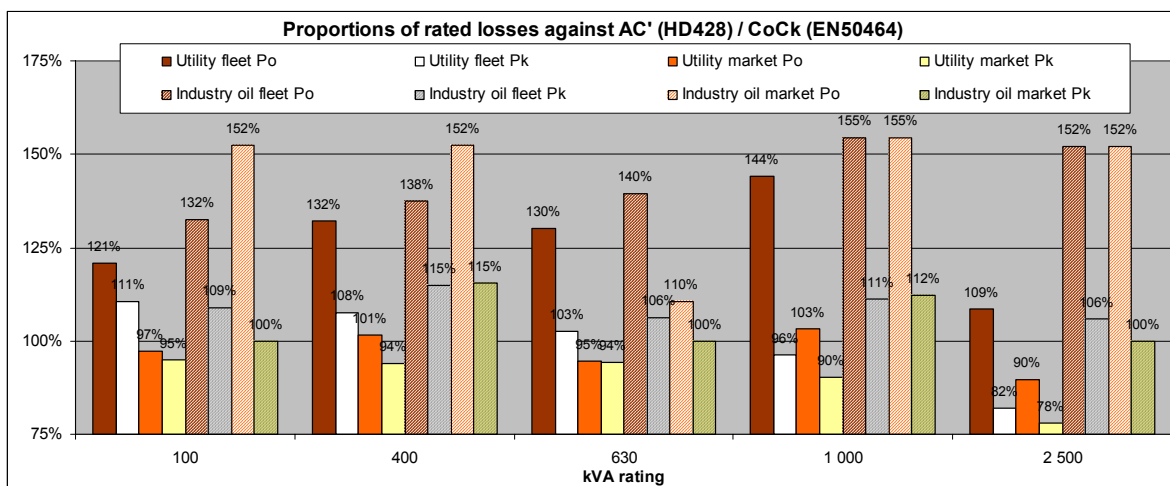


Σχήμα 3.4: Συντελεστής απόδοσης λειτουργίας μετασχηματιστών διανομής των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ των 27 και τη Νορβηγία [17]

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. Στην ΕΕ των 27 η μέση φόρτιση των μετασχηματιστών διανομής των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 18,9%, το φορτίο αιχμής είναι 0,53, η διάρκεια του φορτίου αιχμής 0,36 και ο χρόνος αιχμής των απωλειών είναι 0,2. Συγκριτικά, οι βιομηχανικοί μετασχηματιστές στην ΕΕ των 27 είναι κατά μέσο όρο φορτισμένοι στο 37,7% [17].

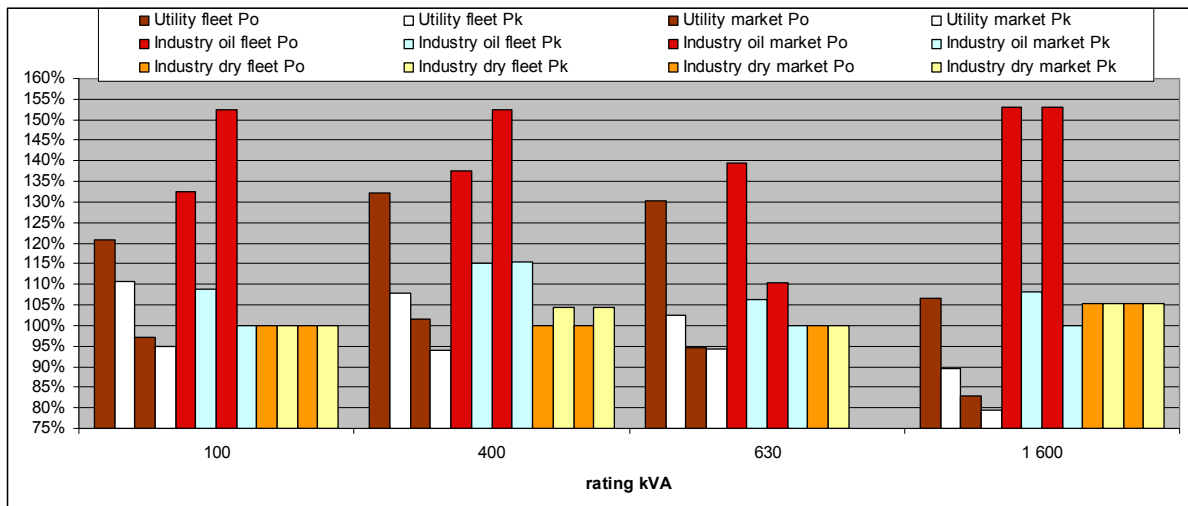
Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζονται τα επίπεδα των ονομαστικών απωλειών κενού φορτίου και των ονομαστικών απωλειών φορτίου των μετασχηματιστών διανομής λαδιού στον τομέα των εταιρειών και τον ιδιωτικό τομέα. Παρουσιάζεται ο λόγος των απωλειών αυτών προς τον συνδυασμό απωλειών των κλάσεων AC', σύμφωνα με το HD 428, ή το συνδυασμό απωλειών των κλάσεων $C_k C_o$ αντίστοιχα του νέου

προτύπου EN50464-1 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 ΒΑ' και ΑΑ', σύμφωνα με το HD 428, ενώ οι πρόσφατα αγορασμένοι μετασχηματιστές έχουν κατά μέσο όρο απώλειες ελαφρώς χαμηλότερες από το επίπεδο της κλάσης ΑC'.



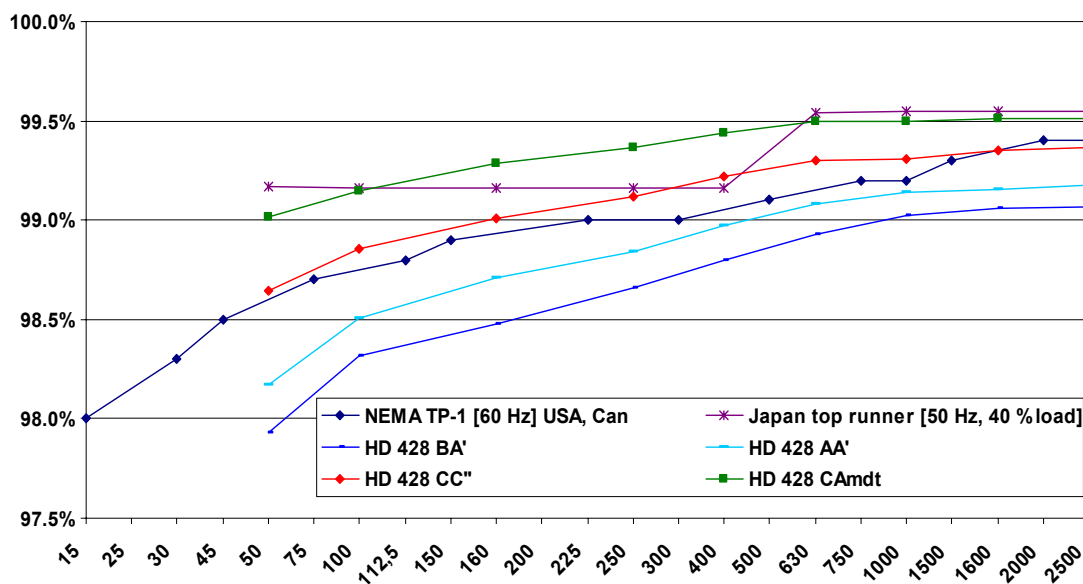
Σχήμα 3.5: Μέσοι όροι των λόγων των ονομαστικών απωλειών προς τις απώλειες αναφοράς των μετασχηματιστών διανομής λαδιού στην ΕΕ των 27 [17]

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η εικόνα των ονομαστικών απωλειών των μετασχηματιστών διανομής, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.6 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 και πάλι αυτήν που χρησιμοποιήθηκε και στο σχήμα 3.5, ήτοι τις απώλειες των κλάσεων ΑC', σύμφωνα με το HD 428 ή τις απώλειες των κλάσεων C_kC_o του νέου προτύπου EN50464-1.



Σχήμα 3.6: Μέσοι όροι των λόγων των ονομαστικών απωλειών προς τις απώλειες αναφοράς των μετασχηματιστών διανομής λαδιού και ξηρού τύπου στην ΕΕ των 27 [17]

Ο πιο αποδοτικός μετασχηματιστής που χρησιμοποιείται στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι ο CC' σύμφωνα με το HD, ή αντίστοιχα B_kC₀ σύμφωνα με το EN50464-1. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7, οι απώλειες του CC' 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 AC' και τον AA'. Στον βιομηχανικό και τον τριτογενή τομέα προτιμώνται ακόμη και οι ελάχιστα αποδοτικοί τύποι (BA'). Είναι 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.



Σχήμα 3.7: Σύγκριση διεθνών προτύπων [17]

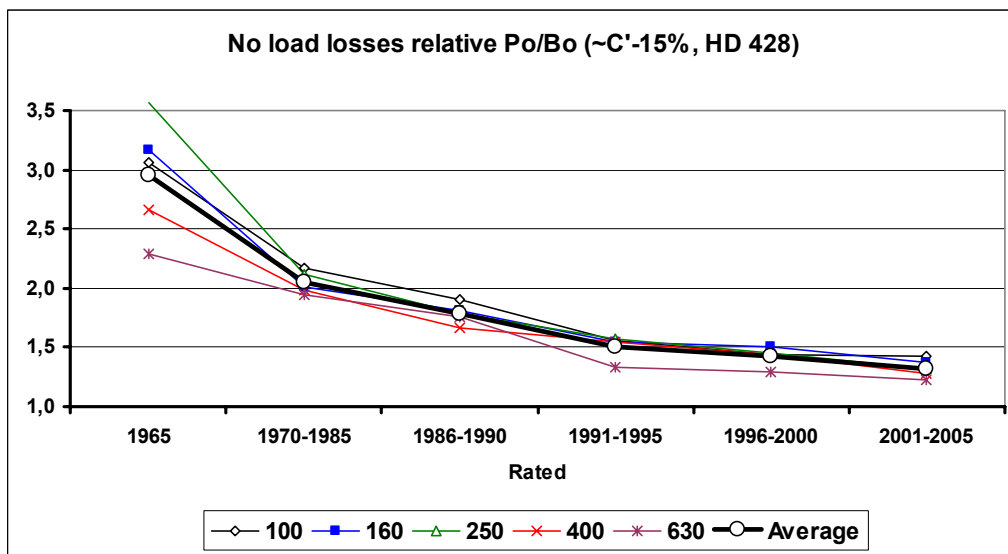
3.3 Χρονική εξέλιξη των απωλειών των μετασχηματιστών διανομής – Η περίπτωση της Πολωνίας

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται σημαντική προσπάθεια μείωσης των απωλειών κενού φορτίου. Πριν από λίγα χρόνια οι απώλειες κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής αποτελούσαν περίπου το 80% των συνολικών απωλειών.

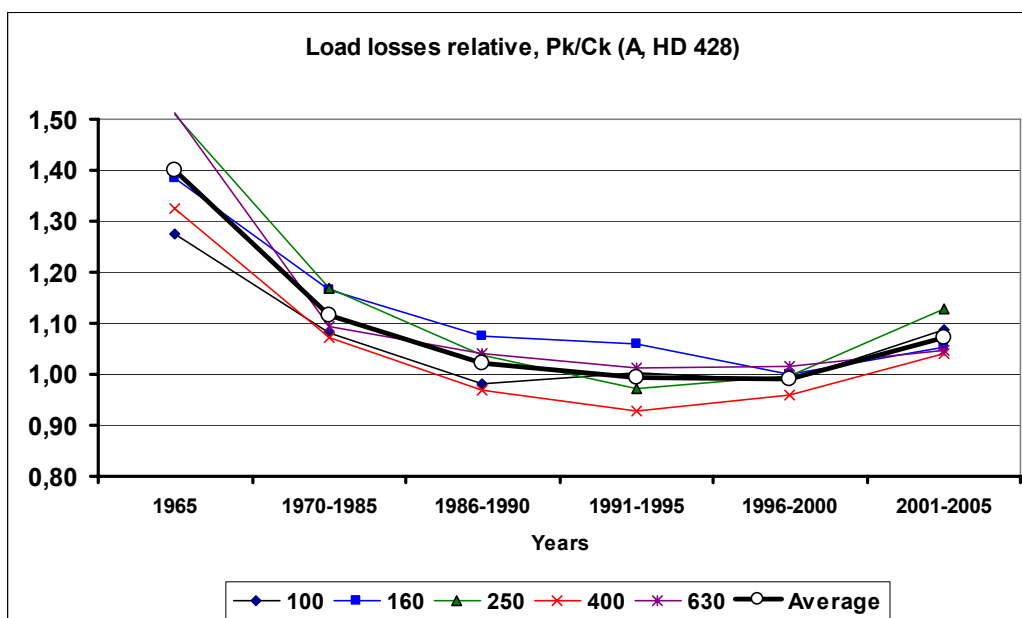
Στην Πολωνία η χρησιμοποίηση σταδιακά βελτιωμένων βαθμών μαγνητικού χάλυβα και τεχνολογίας κοπής η οποία μειώνει το πάχος των φύλλων οδήγησε σε μείωση των απωλειών κενού φορτίου κατά περισσότερο από 50% τα τελευταία σαράντα χρόνια, ενώ η μείωση αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη σε σχέση με την τιμή των απωλειών αυτών στα μισά του εικοστού αιώνα. Η εξέλιξη αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.8.

Οι απώλειες φορτίου δεν ακολούθησαν τον ίδιο ρυθμό μείωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9 και πάλι για την περίπτωση της Πολωνίας. Τα τελευταία πέντε χρόνια παρουσιάζουν σημαντική αύξηση, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι χρήστες προσέχουν περισσότερο τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου, οι οποίες ακόμη αποτελούν περισσότερο από τα δύο τρίτα των συνολικών απωλειών, ενώ ανέχονται σχετικά

υψηλότερες απώλειες φορτίου, προκειμένου να περιορίσουν και το κόστος της επένδυσης για τον μετασχηματιστή.

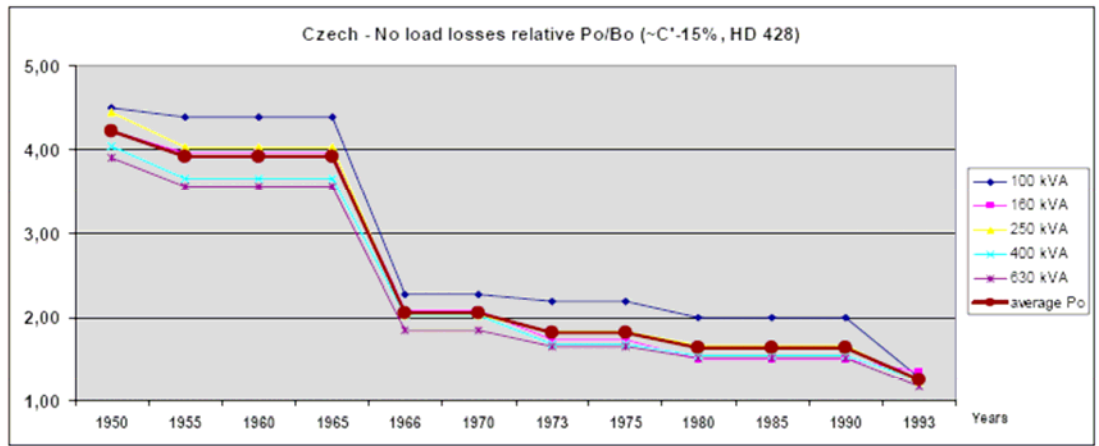


Σχήμα 3.8: Μείωση των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής στην Πολωνία - λόγος πραγματικών απωλειών προς τις απώλειες της κλάσης B_o του EN50464 (αντίστοιχα $C'-15\%$ του HD 428) [17]

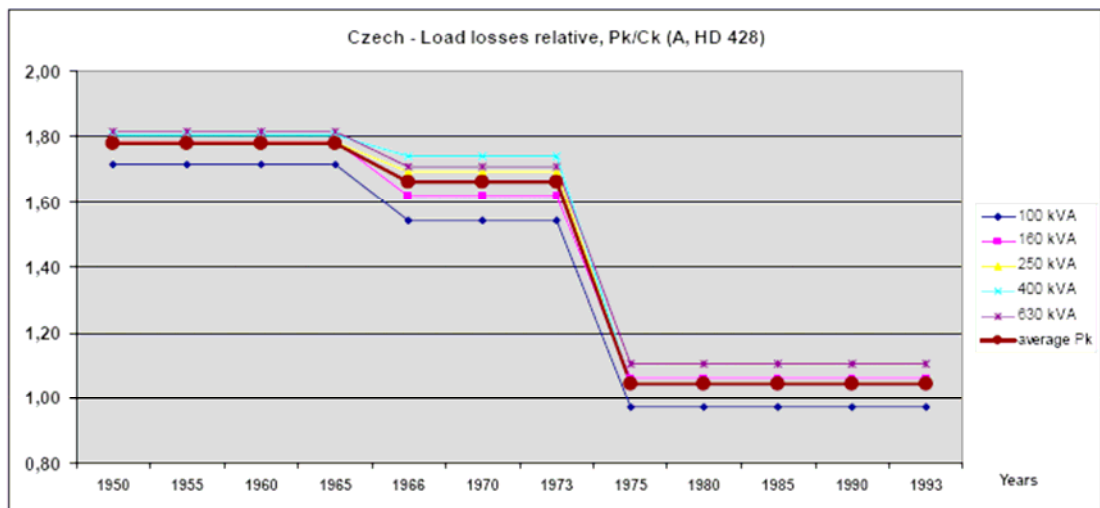


Σχήμα 3.9: Μείωση των απωλειών φορτίου των μετασχηματιστών διανομής στην Πολωνία - λόγος πραγματικών απωλειών προς τις απώλειες της κλάσης C_k του EN50464 (αντίστοιχα A του HD 428) [17]

Παρόμοια με την πορεία των απωλειών της Πολωνίας είναι κι εκείνη των απωλειών της Δημοκρατίας της Τσεχίας. Οι απώλειες κενού φορτίου κι οι απώλειες φορτίου της Δημοκρατίας της Τσεχίας παρουσιάζονται στα σχήματα 3.10 και 3.11 αντίστοιχα. Οι τιμές που των απωλειών για τις χρονιές πριν από το 1993, χρονιά ανεξαρτητοποίησης της Τσεχίας, αφορούν στην πρώην Τσεχοσλοβακία.



Σχήμα 3.10: Μείωση των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής στην Τσεχία - λόγος πραγματικών απωλειών προς τις απώλειες της κλάσης B_0 του EN50464 (αντίστοιχα $C'-15\%$ του HD 428) [16]

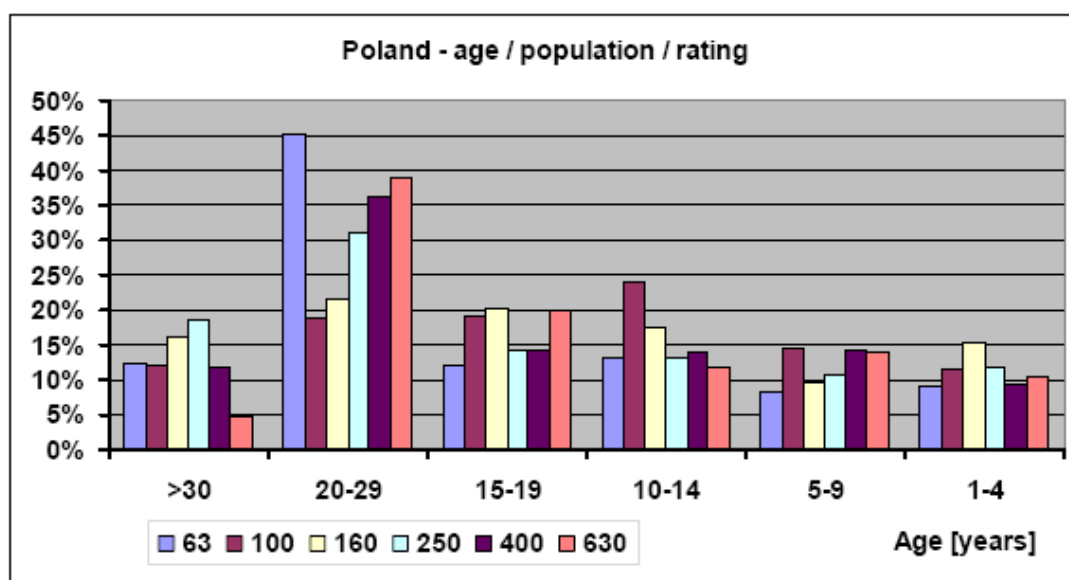


Σχήμα 3.11: Μείωση των απωλειών φορτίου των μετασχηματιστών διανομής στην Τσεχία - λόγος πραγματικών απωλειών προς τις απώλειες της κλάσης C_k του EN50464 (αντίστοιχα A του HD 428) [16]

3.4 Δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας

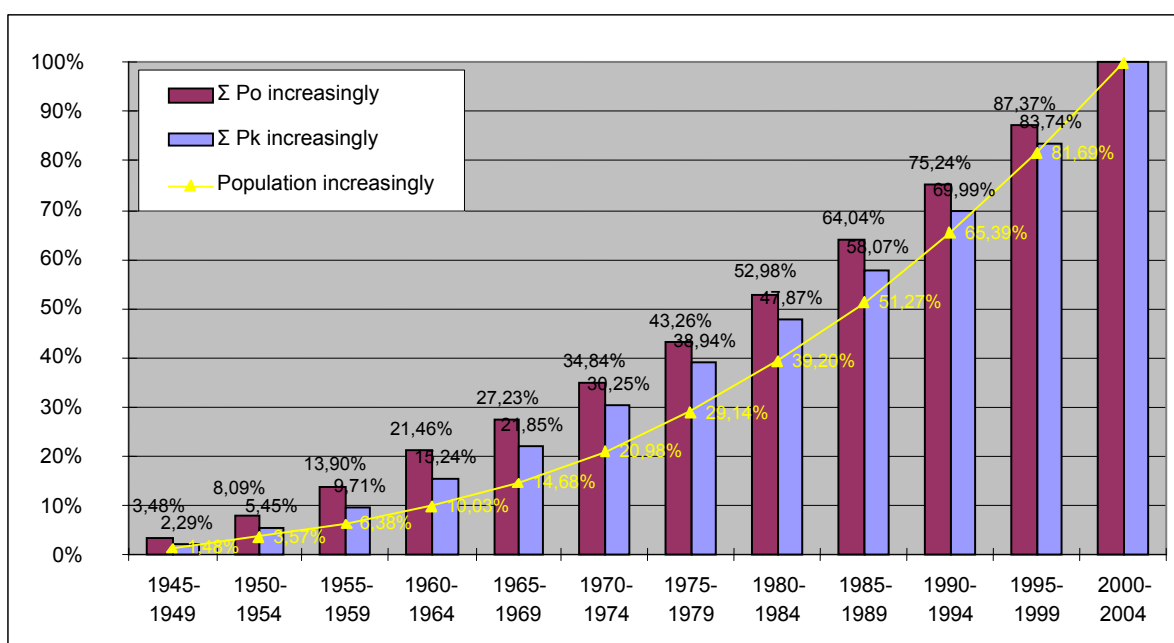
Με βάση τα στοιχεία για την Πολωνία και την Δημοκρατία της Τσεχίας και το ηλικιακό προφίλ των μετασχηματιστών διανομής της Πολωνίας, στην αναφορά “Project Report” του project της ευρωπαϊκής IEEE “Strategies for development and diffusion of energy-efficient distribution transformers” (SEEDT) [17] παρουσιάζεται ένα μοντέλο ηλικίας-απωλειών. Παρά το γεγονός ότι το μοντέλο βασίστηκε σε δύο χώρες του πρώην ανατολικού μπλοκ, αντανακλά την πραγματική κατάσταση στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 27, διότι αυτές οι δύο χώρες έχουν καλή παράδοση στον τομέα κατασκευής μετασχηματιστών, ενώ τα επίπεδα των απωλειών τους και τα ηλικιακά χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών διανομής τους ανταποκρίνονται επαρκώς στους μέσους όρους της ΕΕ των 27. Επιπλέον τα στοιχεία για τις ηλικίες των μετασχηματιστών της Πολωνίας χρησιμοποιήθηκαν για διασταύρωση στοιχείων των μετασχηματιστών με ηλικία μεγαλύτερη των 30 ετών. Η ομάδα του project θεώρησε ετήσια αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος σε MVA κατά 2% και ελαφρώς αυξανόμενο ρυθμό αντικατάστασης των παλιών μετασχηματιστών.

Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται η διασπορά των ηλικιών του πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής της Πολωνίας.



Σχήμα 3.12: Ηλικιακό προφίλ του πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής της Πολωνίας [16]

Τα αποτελέσματα του μοντέλου ηλικίας-απωλειών παρουσιάζονται αθροιστικά στο σχήμα 3.13, στο οποίο αποτυπώνονται τα περιθώρια μείωσης των απωλειών κενού φορτίου και των απωλειών φορτίου στην ΕΕ, η οποία θα επιτευχθεί με αντικατάσταση των παλιότερων μετασχηματιστών με τις χαμηλότερες αποδόσεις. Για παράδειγμα η αντικατάσταση του 10% των παλιότερων μετασχηματιστών διανομής σημαίνει αντικατάσταση των μετασχηματιστών που ευθύνονται για το 21,5% περίπου των συνολικών απωλειών κενού φορτίου και το 15,2% περίπου των συνολικών απωλειών φορτίου. Ομοίως η αντικατάσταση του 20% των παλιότερων μετασχηματιστών σημαίνει απόσυρση των μετασχηματιστών που ευθύνονται για το 35% περίπου των συνολικών απωλειών κενού φορτίου και το 30% περίπου των συνολικών απωλειών φορτίου.



Σχήμα 3.13: Αθροιστική απεικόνιση της ηλικιακής διασποράς των απωλειών των μετασχηματιστών των εταιρειών διανομής της ΕΕ των 27 [17]

3.5 Πολιτικές και μέτρα προώθησης των αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών διανομής

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις σε τεχνικά ζητήματα αλλά και στην διάρθρωση. Όσον αφορά στη

σημασία που δίνεται στις απώλειες κατά την αγορά μετασχηματιστών διανομής, ορισμένες εταιρείες τις λαμβάνουν υπ' όψιν εκτιμώντας το κόστος κύκλου ζωής των μετασχηματιστών, ενώ κάποιες άλλες εξακολουθούν να αγοράζουν με βάση τις παραδοσιακές συνήθειες επιλογής μετασχηματιστών, που δεν οδηγούν σε λύσεις ελαχίστου κόστους. Οι κατασκευαστές μετασχηματιστών προσαρμόζονται στις πρακτικές των εταιρειών διανομής.

Οι βασικοί φορείς που επηρεάζουν άμεσα τις αποφάσεις αγοράς μετασχηματιστών διανομής είναι οι εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και οι τελικοί χρήστες στη βιομηχανία και τον τριτογενή τομέα. Επίσης σημαντική επιρροή στη λήψη αποφάσεων αγοράς μετασχηματιστών διανομής ασκούν οι εταιρείες μηχανικών, οι εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και οι σύμβουλοι στους οποίους απευθύνονται οι εταιρείες κατά τον προγραμματισμό και την πραγματοποίηση της αγοράς ενός μετασχηματιστή. Όλοι αυτοί οι εμπλεκόμενοι στην αγορά των μετασχηματιστών φορείς συναντούν σημαντικά εμπόδια όσον αφορά στον σχεδιασμό, τον προγραμματισμό, τις πωλήσεις και την αγορά αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών διανομής και δεν έχουν καμία υποστήριξη, προκειμένου να πραγματοποιήσουν τους στόχους ενεργειακής απόδοσης.

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα εμπόδια αυτά, να αρθούν τα αντικίνητρα που υπάρχουν και να επιτευχθεί η επιθυμητή μείωση των απωλειών των μετασχηματιστών διανομής πρέπει να ληφθούν μέτρα, τα οποία θα προωθούν την αγορά και την χρήση αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών. Με βάση την υφιστάμενη δομή των εθνικών μέτρων και πολιτικών στην Ευρώπη, καθώς και των εμποδίων που συναντούν οι εμπλεκόμενοι στην αγορά μετασχηματιστών διανομής φορείς, στην αναφορά “Project Report” του SEEDT προτείνεται η ακόλουθη λίστα μέτρων, που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν, προκειμένου να προωθηθεί η ενεργειακή απόδοση των μετασχηματιστών διανομής:

- Ρυθμιστικός μηχανισμός
- Κίνητρα από σχέδια υποχρεώσεων ή πιστοποιητικών
- Άλλα οικονομικά ή δημοσιονομικά κίνητρα
- Σήμανση ενεργειακής απόδοσης – χρήση ετικέτας ενεργειακής απόδοσης

- Εθελοντικό ή υποχρεωτικό επίπεδο ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης
- Ενημέρωση και δημιουργία κινήτρων
- Ενεργειακές συμβουλές και έλεγχος
- Εργαλεία λογισμικού για τους αγοραστές
- Συνεργασία στις προμήθειες
- Υποστήριξη έρευνας και ανάπτυξης και πιλοτικά προγράμματα ή προγράμματα επίδειξης

Γενικά οι διαχειριστές των συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να καταγράφουν και να αναφέρουν τις απώλειες του δικτύου στις εθνικές ρυθμιστικές αρχές. Παρ' όλα αυτά ο βαθμός στον οποίο είναι λεπτομερείς αυτές οι αναφορές διαφέρει από χώρα σε χώρα, ενώ οι αναφορές των απωλειών δικτύου αντιμετωπίζονται διαφορετικά στα διάφορα ρυθμιστικά σχέδια.

Χρειάζονται αλλαγές στα υπάρχοντα ρυθμιστικά σχέδια, προκειμένου να αρθούν τα αντικίνητρα και να υπάρξουν κίνητρα για την αύξηση της χρήσης αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών από τις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη θα έπρεπε συστηματικά να δίνουν αναφορά για τις απώλειες των δικτύων διανομής, τον αριθμό, το μέγεθος και τις απώλειες των μετασχηματιστών διανομής καθώς επίσης και το κόστος απώλειας ενέργειας με έναν ενιαίο, μοναδικό και συγκρίσιμο τρόπο. Σε αυτήν την περίπτωση, για την περιγραφή της απόδοσης των μετασχηματιστών θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τα ισχύοντα πρότυπα EN 50464 και HD 538 ή οι κλάσεις της ετικέτας ενεργειακής απόδοσης που προτείνονται στα επόμενα κεφάλαια. Με βάση αυτές τις αναφορές θα έπρεπε να δημιουργηθεί ένα εθνικό και ευρωπαϊκό σύστημα αναφοράς, που θα επιτρέπει σύγκριση των απωλειών των μετασχηματιστών με ένα σύνολο τιμών αναφοράς. Αποκλίσεις από τον στόχο των απωλειών θα έπρεπε να επιβραβεύονται ή να τιμωρούνται, όπως συμβαίνει στη Μεγάλη Βρετανία. Αν δεν υπάρχει κάποιο σύστημα αναφοράς για τις απώλειες, άλλα οικονομικά κίνητρα για την αγορά αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών με χαμηλό κόστος κύκλου ζωής θα έπρεπε να υπάρχουν στο ρυθμιστικό σχέδιο, όπως για παράδειγμα καθιέρωση συγκεκριμένων ποσών ή μόνου ενεργειακής απόδοσης. Σε χώρες στις οποίες η

εφαρμογή ενός τέτοιου σχεδίου είναι αδύνατη για πολιτικούς ή άλλους λόγους, θα έπρεπε τουλάχιστον να αρθούν τα αντικίνητρα έναντι της επένδυσης σε αποδοτικούς ενεργειακά μετασχηματιστές διανομής. Επιπλέον σε αυτές τις χώρες θα μπορούσαν να περιληφθούν κάποιες ειδικές τιμές απωλειών στα υπάρχοντα σχέδια, με βάση τις οποίες θα γίνεται σύγκριση της οικονομικής απόδοσης των εταιρειών διανομής και θα επιβραβεύονται ή θα τιμωρούνται εκείνες οι εταιρείες που συμπεριφέρονται καλύτερα ή χειρότερα από τον μέσο όρο της αγοράς.

Η ανασχεδίαση των ρυθμιστικών μηχανισμών, εκτός από τη δημιουργία κινήτρων και την άρση των αντικινήτρων, τα οποία συνήθως επικεντρώνουν το ενδιαφέρον των ρυθμιστικών σχεδίων, θα πρέπει να περιλαμβάνει μέτρα που έχουν μακροπρόθεσμη επιρροή στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και μειώνουν το κόστος κύκλου ζωής των μετασχηματιστών. Επειδή τα υπάρχοντα ρυθμιστικά σχέδια διαφέρουν από χώρα σε χώρα, η εφαρμογή αλλαγών σε αυτά θα πρέπει να προσαρμόζεται στις θεμελιώδεις αρχές του σχεδίου κάθε χώρας. Οι αλλαγές στα ρυθμιστικά σχέδια είναι οι πιο σημαντικές για την πραγματοποίηση των ενεργειακών στόχων και την προώθηση των επενδύσεων στους μετασχηματιστές με τα χαμηλότερα κόστη κύκλου ζωής [13].

Σε κάποιες χώρες υπάρχουν σχέδια, τα οποία υποχρεώνουν τους φορείς της αγοράς (συγκεκριμένα τις εταιρείες διανομής ή τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας) να επιτύχουν συγκεκριμένη ποσότητα εξοικονομούμενης ενέργειας στην πλευρά των πελατών τους. Σε ορισμένες χώρες όπως στο Ηνωμένο Βασίλειο, αυτές οι υποχρεώσεις μπορούν να εμπορευματοποιηθούν. Επιπλέον σε ορισμένα υπάρχοντα σχέδια, όπως αυτά της Γαλλίας και της Ιταλίας, υπάρχουν «λευκά πιστοποιητικά» των εξοικονομούμενων ποσοτήτων ενέργειας, που είναι εμπορεύσιμα. Το σχέδιο δράσης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής πρότεινε τον προσδιορισμό, μέσα στο 2008, του βαθμού στον οποίο θα έπρεπε να παρουσιαστεί ένα «Σχέδιο Λευκού Πιστοποιητικού» για την Ευρωπαϊκή Ένωση, το οποίο θα συμπλήρωνε το σχέδιο εμπορίας εκπομπών και πιθανά σχέδια πράσινων πιστοποιητικών.

Η εισαγωγή ενός υποχρεωτικού επιπέδου ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης για τους μετασχηματιστές διανομής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, θα οδηγήσει στην απόσυρση των μετασχηματιστών με την χειρότερη απόδοση από την αγορά, ενώ θα διευκολύνει τους αγοραστές, που δεν χρησιμοποιούν εξεζητημένα εργαλεία υπολογισμού του

κόστους κύκλου ζωής των μετασχηματιστών, να κάνουν την ορθότερη και πιο οικονομική μακροπρόθεσμα επιλογή μετασχηματιστή. Αυτό θα είναι χρήσιμο για πολλές μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις στους τομείς του ηλεκτρισμού, της βιομηχανίας και του εμπορίου καθώς και για τους συμβούλους και τους μάνατζερ, οι οποίοι δεν έχουν επαρκείς τεχνικές γνώσεις στους μετασχηματιστές και ακολουθούν τις παραδοσιακές μεθόδους επιλογής μετασχηματιστών κατά την αγορά τους, χωρίς να λαμβάνουν υπ' όψιν την απόδοση των μετασχηματιστών που επιλέγουν και το κόστος κύκλου ζωής τους. Ένα υποχρεωτικό επίπεδο ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης προϋποθέτει ότι η ρύθμιση της διανομής ηλεκτρισμού αναγνωρίζει και λαμβάνει υπ' όψιν τα υψηλότερα κόστη επένδυσης που απαιτούνται για τους πιο αποδοτικούς μετασχηματιστές και η εφαρμογή του θα βοηθούσε την Ευρώπη να φτάσει τα επίπεδα των ΗΠΑ και της Ασίας, όσον αφορά στην απόδοση των μετασχηματιστών διανομής.

Οι προμηθευτές μετασχηματιστών διανομής ήδη προσφέρουν συχνά λεπτομερείς τεχνικές προδιαγραφές στους πελάτες τους. Παρ' όλα αυτά οι πληροφορίες που προσφέρουν σε πινακίδες, οι οποίες βρίσκονται στους μετασχηματιστές, καθώς και οι προδιαγραφές που δίνονται σε καταλόγους, συνήθως κατόπιν αιτήσεως του αγοραστή, διαφέρουν μεταξύ των προμηθευτών καθώς και από χώρα σε χώρα. Γι' αυτόν το λόγο, προκειμένου να αυξηθεί η διαφάνεια, θα έπρεπε να υπάρχει η απαίτηση να αναγράφονται οι απώλειες φορτίου κι οι απώλειες κενού φορτίου στην πινακίδα κάθε μετασχηματιστή που πωλείται στην Ευρώπη, ήτοι η κατηγορία απωλειών στην οποία υπάγεται ο μετασχηματιστής με βάση το ισχύον πρότυπο καθώς και οι τιμές των απωλειών που μετρώνται κατά τη διαδικασία δοκιμών του. Η αναγραφή των δεδομένων αυτών στις πινακίδες όμως δεν είναι εύκολα κατατοπιστική. Η χρήση μιας ετικέτας ενεργειακής απόδοσης αποτελεί πολύ καλύτερη λύση, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ των μετασχηματιστών και δίνει μια προφανή ταξινόμηση της απόδοσής τους. Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται αναλυτικά η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης και παρουσιάζονται οι προτάσεις του SEEDT για τον καθορισμό της, ενώ στο κεφάλαιο 6 προτείνεται ένα επιπλέον μοντέλο ενεργειακής ταξινόμησης.

Τα προγράμματα ενημέρωσης, οι ενεργειακές συμβουλές, τα εργαλεία λογισμικού, με τα οποία μπορεί ένας αγοραστής να συγκρίνει δύο μετασχηματιστές και να επιλέξει εκείνον με το μικρότερο κόστος κύκλου ζωής, θα διευκολύνουν τους εμπλεκόμενους

στην αγορά μετασχηματιστών διανομής και ιδιαίτερα εκείνους που έχουν έλλειμμα τεχνικών γνώσεων ή ρέπουν προς την χρήση παραδοσιακών μεθόδων επιλογής μετασχηματιστών, στην αγορά αποδοτικών μετασχηματιστών.

Τέλος η ενίσχυση προγραμμάτων έρευνας και ανάπτυξης μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη πιο αποδοτικούς μετασχηματιστές και να μειώσει το κόστος κατασκευής των αποδοτικών μετασχηματιστών, ενώ η επιχορήγηση πιλοτικών προγραμμάτων παρουσίασης και προώθησης των αποδοτικών μετασχηματιστών θα επηρεάσει τους αγοραστές και θα ωθήσει τους κατασκευαστές στην κατασκευή αποδοτικών μετασχηματιστών, την οποία μέχρι σήμερα αποφεύγουν για οικονομικούς κυρίως λόγους.

Σε σύγκριση με τα δυναμικά εξοικονομούμενης ενέργειας σε άλλες περιοχές, τα δυναμικά των μετασχηματιστών διανομής δείχνουν μικρά. Παρ' όλα αυτά όμως, κάθε συνεισφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας και την αναχαίτιση ή έστω τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής είναι απαραίτητη, ιδιαίτερα όταν είναι και οικονομική. Εφόσον σε πολλές περιπτώσεις η αγορά αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών διανομής είναι οικονομική, είναι σκόπιμο τα μέτρα και οι πολιτικές, που περιγράφηκαν στην παρούσα ενότητα, να εφαρμοστούν.

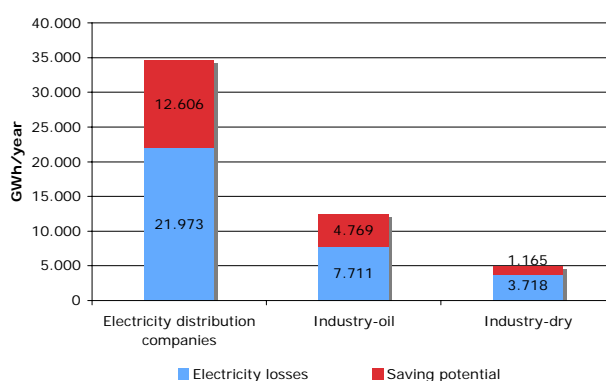
3.6 Περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις των προτεινόμενων πολιτικών και μέτρων

Σε αντίθεση με πολλές χώρες εκτός Ευρώπης, στις οποίες οι μη αποδοτικοί μετασχηματιστές έχουν αποσυρθεί μετά την εφαρμογή υποχρεωτικών προτύπων, στην Ευρώπη δεν υπάρχουν υποχρεωτικά πρότυπα ή άλλα μέτρα που να υποστηρίζουν αποτελεσματικά την χρήση ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών διανομής. Τα δύο κύρια πρότυπα που περιγράφουν τις απώλειες στους μετασχηματιστές είναι το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 50464-1 για μετασχηματιστές λαδιού (το οποίο αντικατέστησε το HD 428) και το Εναρμονισμένο Έγγραφο HD538 για μετασχηματιστές ξηρού τύπου (ή τα αντίστοιχα εθνικά του, π.χ. DIN κ.τ.λ.) [13].

Αν εφαρμοστεί μια δέσμη μέτρων και πολιτικών, όπως αυτή που προτείνεται από την ομάδα του SEEDT project, θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν σημαντικές ποσότητες

ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας την τεχνολογία που είναι διαθέσιμη σήμερα και θεωρώντας κανονικούς χρόνους ζωής και κανονικό ρυθμό αντικατάστασης των μετασχηματιστών.

Το συνολικό τεχνικό δυναμικό εξοικονομούμενης ενέργειας είναι περίπου 18,5 TWh το χρόνο, αν όλοι οι μετασχηματιστές λαδιού αντικατασταθούν από μονάδες με συνδυασμό απωλειών A_0B_k , σύμφωνα με το EN 50464-1 και οι ξηρού τύπου από μονάδες με απώλειες κενού φορτίου, σύμφωνα με το HD 538, μειωμένες κατά 40% και απώλειες φορτίου, σύμφωνα με το HD 538-1, μειωμένες κατά 10% [17]. Στην πράξη όμως δεν είναι δυνατόν να αντικατασταθεί το σύνολο του υφιστάμενου πληθυσμού των μετασχηματιστών. Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζονται τα δυναμικά εξοικονομούμενης ενέργειας στους μετασχηματιστές λαδιού και σε εκείνους ξηρού τύπου.



Σχήμα 3.14: Στατικό/ τεχνικό δυναμικό εξοικονομούμενης ενέργειας στους μετασχηματιστές διανομής το 2008

Πιο ρεαλιστική είναι η διατήρηση του υφιστάμενου πληθυσμού των μετασχηματιστών διανομής και η χρησιμοποίηση στο εξής πιο αποδοτικών τύπων μετασχηματιστών για την αντικατάσταση των παλιών, που φτάνουν στο τέλος του χρόνου ζωής τους και την εγκατάσταση νέων για την επέκταση του δικτύου ή για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης. Η ομάδα του SEEDT project υπολόγισε το δυναμικό εξοικονομούμενης ενέργειας για τέσσερα διαφορετικά σενάρια. Τα σενάρια αυτά βασίστηκαν στην εγκατάσταση στο εξής των πιο αποδοτικών μετασχηματιστών που υπάρχουν στην ευρωπαϊκή αγορά και παγκοσμίως. Οι τιμές των απωλειών των προτεινόμενων τύπων προσδιορίζονται με βάση την ενεργειακή κατηγοριοποίηση

των προτύπων EN50464-1 και HD 538-1 για μετασχηματιστές λαδιού και ξηρού τύπου αντίστοιχα. Τα σενάρια αυτά είναι τα εξής:

- 1ο σενάριο: Αντικατάσταση των μετασχηματιστών λαδιού με μονάδες τύπου A_0B_k , σύμφωνα με το EN50464-1 και των μονάδων ξηρού τύπου με απώλειες σύμφωνα με το HD 538-1.
- 2ο σενάριο: Αντικατάσταση των μετασχηματιστών λαδιού με μονάδες τύπου A_0A_k , σύμφωνα με το EN50464-1 και των μετασχηματιστών ξηρού τύπου με μονάδες με απώλειες, σύμφωνα με το HD 538-1, μειωμένες κατά 10%.
- 3ο σενάριο: Αντικατάσταση των μετασχηματιστών λαδιού με μονάδες με απώλειες κενού φορτίου της κλάσης A_0 μειωμένες κατά 49% και απώλειες φορτίου της κλάσης B_k , μειωμένες κατά 8%, σύμφωνα με το EN50464-1 και αντικατάσταση των μετασχηματιστών ξηρού τύπου με μονάδες με απώλειες σύμφωνα με το HD 538-1, μειωμένες κατά 20%.
- 4ο σενάριο: Αντικατάσταση των μετασχηματιστών λαδιού με μονάδες με απώλειες κενού φορτίου της κλάσης A_0 , μειωμένες κατά 49% και απώλειες φορτίου της κλάσης B_k , σύμφωνα με το EN50464-1 και αντικατάσταση των μετασχηματιστών ξηρού τύπου με μονάδες με απώλειες κενού φορτίου σύμφωνα με το HD 538-1, μειωμένες κατά 40% και απώλειες φορτίου σύμφωνα με το HD 538-1, μειωμένες κατά 10%.

Οι υπολογισμοί έγιναν για ενδεχόμενη εφαρμογή των πολιτικών και μέτρων για τα έτη 2010 – 2025. Θεωρήθηκε ότι οι μετασχηματιστές αντικαταστάθηκαν στο τέλος της ζωής τους με τον ρυθμό αντικατάστασής τους να παραμένει σταθερός. Οι χρόνοι ζωής των μετασχηματιστών διανομής θεωρήθηκαν ίσοι με 40 χρόνια για τους μετασχηματιστές λαδιού των εταιρειών διανομής, 25 χρόνια για τους μετασχηματιστές λαδιού στην βιομηχανία και τον τριτογενή τομέα και 30 χρόνια για τους βιομηχανικούς μετασχηματιστές ξηρού τύπου.

Επιπλέον εξετάστηκαν δύο σενάρια βάσης ως προς την ανάπτυξη του ευρωπαϊκού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σενάρια αυτά είναι τα εξής:

- PRIMES-TRENDS: Συνηθισμένη ανάπτυξη του ευρωπαϊκού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με περαιτέρω αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

- PRIMES EE/RES: Ανάπτυξη του ευρωπαϊκού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με σημαντική αύξηση σε ενεργειακή απόδοση και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Και τα δύο σενάρια θεωρούν τη συμπεριφορά της αγοράς κατά το έτος 2004 όσον αφορά στην προμήθεια των μετασχηματιστών.

Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζεται το δυναμικό εξοικονομούμενης ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί στο τέλος της περιόδου από το 2010 έως το 2025, εάν αγοράζεται ένας ενεργειακά αποδοτικός μετασχηματιστής κάθε φορά που αντικαθίσταται ένας παλιός ή απαιτείται η εγκατάσταση ενός καινούργιου, για κάθε έναν από τους οκτώ συνδυασμούς σεναρίων που προκύπτουν. Όπως φαίνεται στον πίνακα, μέχρι 12 TWh ετησίως μπορούν να εξοικονομηθούν μέχρι το 2015 ανάλογα με το επιλεγμένο σενάριο.

Πίνακας 3.3: Δυναμικά εξοικονομούμενης ενέργειας το 2025 στην ΕΕ των 27 σε GWh/έτος [17]

General development of electricity system	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
PRIMES Trends	6.167	7.438	10.569	11.631
PRIMES EE/RES	5.015	5.761	7.915	8.163

Οι αντίστοιχες μειώσεις σε εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) το έτος 2025 παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4 για κάθε έναν από τους οκτώ συνδυασμούς σεναρίων και, όπως φαίνεται στον πίνακα, μπορούν να ξεπεράσουν τα τρία εκατομμύρια τόνους ανάλογα με το επιλεγμένο σενάριο.

Με την τεχνολογία που είναι διαθέσιμη σήμερα, τα σενάρια 3 και 4, τα οποία οδηγούν στην μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και αντίστοιχη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο με τη χρήση μετασχηματιστών άμορφου πυρήνα. Ενώ όμως η διείσδυσή τους στην ευρωπαϊκή αγορά θα οδηγούσε στα υψηλότερα δυνατά κέρδη ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας, από οικονομικής σκοπιάς δεν είναι πάντα ανταγωνιστικοί

και υπάρχουν κάποια όρια όσον αφορά στην εγκατάστασή τους στους υπάρχοντες υποσταθμούς διανομής.

Πίνακας 3.4: Μειώσεις εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα το 2025 στην ΕΕ των 27 σε εκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα ανά έτος [17]

General development of electricity system	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
PRIMES Trends	1,7	2,2	3,2	3,5
PRIMES EE/RES	1,5	1,7	2,4	2,7

Σχεδόν το μισό δυναμικό εξοικονομούμενης ενέργειας μπορεί να προέλθει από τις εταιρείες διανομής. Για τον λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό ένα ρυθμιστικό πλαίσιο, το οποίο θα δώσει κίνητρα και θα άρει τα αντικίνητρα για την προώθηση των μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, ενώ επιπλέον μέτρα, όπως ενημέρωση και εκπαίδευση, θα συνεισφέρουν στην προώθησή τους.

Συνολικά, αν η ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθούσε το σενάριο “PRIMES-Trends”, μέχρι το έτος 2025 θα εξοικονομούνταν ετησίως στις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 4.400 GWh χωρίς αλλαγές στον ρυθμό αντικατάστασης μετασχηματιστών διανομής ή 8.600 GWh με αντικατάσταση όλων των υφιστάμενων μετασχηματιστών, ενώ μέχρι το 2050 θα εξοικονομούνταν ετησίως 11.700 GWh με κανονικό ρυθμό αντικατάστασης των μετασχηματιστών και ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας τα έτη 2025-2050 παρόμοιο με εκείνον των ετών 2010-2025. Αν η ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθούσε το σενάριο “PRIMES-EE/RES”, θα εξοικονομούνταν αντίστοιχα 2.600, 6.800 και 7.000 GWh/έτος για τις αντίστοιχες ανωτέρω περιπτώσεις [17].

Τα μεγαλύτερα περιθώρια μείωσης των απωλειών των μετασχηματιστών διανομής και, κατ’ επέκταση, εξοικονόμησης ενέργειας εντοπίζονται στη Γαλλία, το Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γερμανία και, ακολούθως, στην Ιταλία και την Ισπανία. Συνεπώς αλλαγές στα ρυθμιστικά πλαίσια και λήψη επιπλέον μέτρων είναι πολύ σημαντικές στις περιπτώσεις των χωρών αυτών.

Τη δεύτερη σημαντικότερη ομάδα στόχο, στην οποία πρέπει να εφαρμοστούν μέτρα και πολιτικές για την προώθηση αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών διανομής, αποτελούν εκείνοι, οι οποίοι επηρεάζουν τις αποφάσεις που σχετίζονται με την αγορά μετασχηματιστών λαδιού στη βιομηχανία και τον τριτογενή τομέα. Τα δυναμικά εξοικονομούμενης ενέργειας σε αυτό το σύνολο είναι σχεδόν το ίδιο υψηλά με εκείνα των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο “PRIMES-Trends” και υψηλότερα από εκείνα των εταιρειών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο “PRIMES-EE/RES”, με βάση το οποίο μπορούν να εξοικονομούνται μέχρι 4.118 GWh ετησίως μέχρι το 2025 με σταθερό ρυθμό αντικατάστασης. Επιπλέον τα καθαρά οικονομικά κέρδη της επένδυσης σε αποδοτικούς ενεργειακά μετασχηματιστές είναι τα υψηλότερα λόγω των υψηλότερων τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας, που πρέπει να λαμβάνουν υπ’ όψιν αυτές οι ως επί το πλείστον μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις.

Συνολικά οι ετήσιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μπορούν να μειωθούν μέχρι και κατά 3,5 εκατομμύρια τόνους ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ eq) έως το 2025. Επιπλέον με τη χρήση αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών διανομής μπορούν να εξοικονομούνται έως το 2025 μέχρι 300 εκατομμύρια ευρώ περίπου ετησίως αναλόγως του σεναρίου ενεργειακής απόδοσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Τεχνολογία Μετασχηματιστών Διανομής

4.1 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 επαγωγή, η πυκνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα και η ισορροπία σιδήρου-χαλκού.

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 [4, 5]. 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 πυκνότητα 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.

Η ισορροπία 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 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.

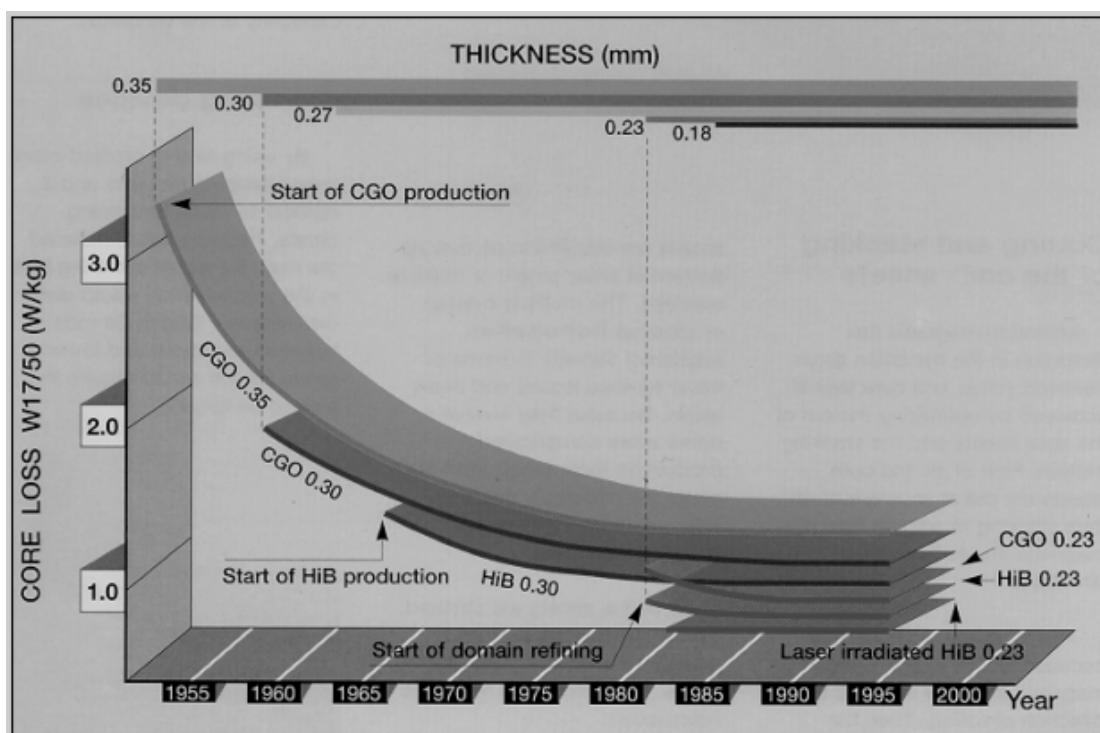
Οι σχεδιαστές μετασχηματιστών έχουν σήμερα στη διάθεσή τους μια ποικιλία διαθέσιμων σιδηρομαγνητικών υλικών για την κατασκευή του πυρήνα, ενώ έχουν το περιθώριο επιλογής των τεχνικών, τις οποίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν για την κατασκευή του πυρήνα, των τυλιγμάτων, της μόνωσης και άλλων μερών του μετασχηματιστή, 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].

4.2 Σιδηρομαγνητικά υλικά μετασχηματιστών

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες μείωσης των απωλειών κενού φορτίου ή απωλειών πυρήνα, οι οποίες, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 3, ευθύνονται ακόμη για περισσότερο από τα δύο τρίτα των συνολικών απωλειών των μετασχηματιστών διανομής. Ο τύπος του σιδηρομαγνητικού υλικού ή αλλιώς ο τύπος

του χάλυβα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα καθορίζει 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 4.1.



Σχήμα 4.1: Εξέλιξη απωλειών σιδήρου [5]

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 (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 EN10707, το οποίο αντανάκλα το διεθνές IEC 60404, περιγράφει ένα 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 [5].

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), οι οποίοι άρχισαν να κυκλοφορούν περίπου δέκα χρόνια μετά τους χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους. Κατασκευάζονται με πάχη από 0,23 έως 0,30 mm.

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, 0,2 έως 0,3 mm, ενώ μπορούν να φτάσουν έως και 1 mm, με αποτέλεσμα να μειωθούν σημαντικά οι απώλειες κενού φορτίου [13]. Επίσης τεχνολογικά επιτεύγματα σε άλλους τομείς, όπως την ελασματοποίηση, την επίστρωση και την καθαρότητα των υλικών επέφεραν επιπλέον βελτίωση της απόδοσης του πυρήνα [5].

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 αντανάκλαται στην ευρωπαϊκή αγορά, καθώς στην Ευρωπαϊκή Ένωση η χρήση τους παραμένει περιορισμένη [13]. Στην ενότητα 4.3 περιγράφονται αναλυτικά οι μετασχηματιστές άμορφου σιδήρου και η τεχνική κατασκευής τους.

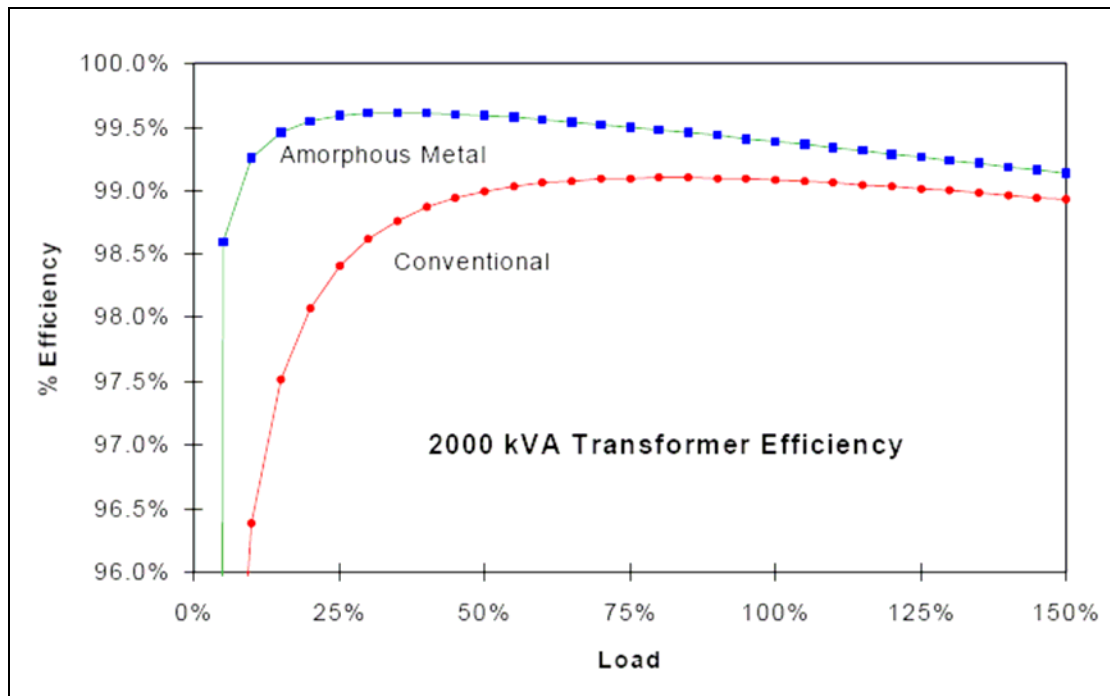


*Σχήμα 4.2: Τριφασικός μετασχηματιστής διανομής άμορφου πυρήνα,
400kVA, 15.400/420V, 50Hz [14]*

4.3 Μετασχηματιστές με πυρήνα από άμορφο σίδηρο

Οι μετασχηματιστές άμορφου πυρήνα βελτιώνουν την απόδοση των δικτύων διανομής, καθώς έχουν μειωμένες απώλειες από 65 έως 90% σε σχέση με τους συμβατικούς μετασχηματιστές με πυριτιούχο σίδηρο [13, 19]. Η εξοικονόμηση ενέργειας οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετασχηματιστές αυτοί έχουν απώλειες κενού φορτίου που είναι περίπου το 1/5 με 1/4 των αντίστοιχων απωλειών των παραδοσιακών μετασχηματιστών. Το ρεύμα μαγνητίσεως είναι αισθητά μειωμένο, ενώ η στάθμη θορύβου παραμένει σχεδόν η ίδια με τους παραπάνω μετασχηματιστές [22]. Η τεχνολογία άμορφου πυρήνα ενδείκνυται για μετασχηματιστές με χαμηλή φόρτιση, όπως για παράδειγμα μετασχηματιστές διανομής αγροτικών περιοχών, διότι η επίδραση των αρμονικών στις απώλειες κενού φορτίου μειώνεται.

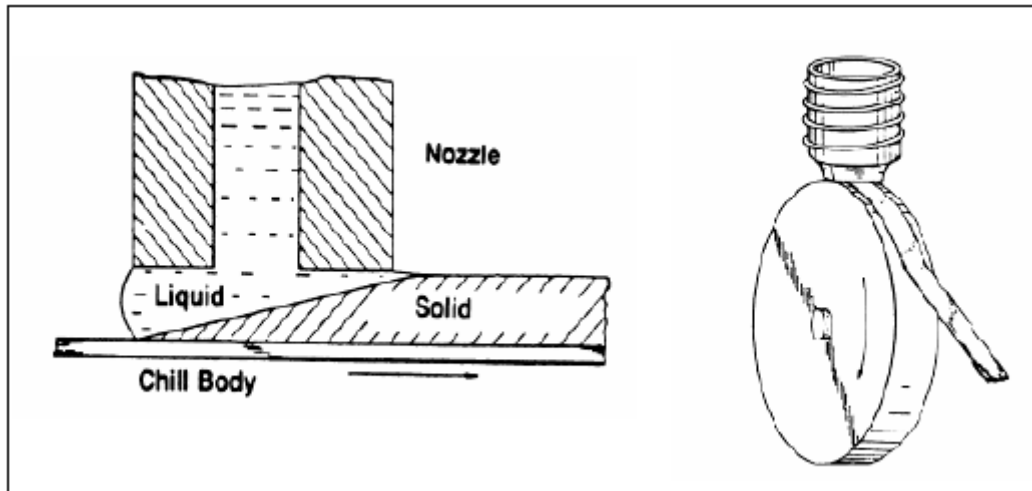
Στο σχήμα 4.3 συγκρίνονται οι αποδόσεις ενός συμβατικού μετασχηματιστή και ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο μέταλλο. Η ονομαστική ισχύς και των δύο είναι 2000 kVA και, όπως φαίνεται στο σχήμα, υπάρχει σαφής βελτίωση της απόδοσης στον μετασχηματιστή άμορφου πυρήνα.



Σχήμα 4.3: Σύγκριση των απωλειών ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο μέταλλο κι ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο [6]

Σε αντίθεση με τα συνηθισμένα κράματα, τα άμορφα κράματα δεν έχουν κρυσταλλική δομή και διαφέρουν από τα συμβατικά κρυσταλλικά κράματα ως προς τις μαγνητικές και μηχανικές τους ιδιότητες (όπως σκληρότητα και αντοχή) [16].

Ο άμορφος σίδηρος παρασκευάζεται με ταχεία ψύξη τηγμένου μετάλλου 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 4.4 παρουσιάζεται μια μέθοδος κατασκευής άμορφου μετάλλου. Όπως φαίνεται στο σχήμα, το ρευστό μέταλλο χύνεται διαμέσου μίας σχισμής σ' ένα γρήγορα κινούμενο ψυγμένο υπόστρωμα, 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 [5, 13, 22].



Σχήμα 4.4: Χύτευση άμορφου μετάλλου [13]

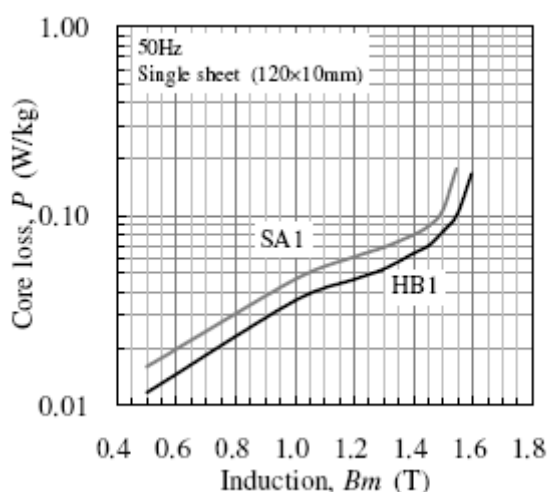
Η εταιρεία Metglas κατασκεύασε το υλικό του άμορφου σιδήρου και ξόδεψε περισσότερα από είκοσι πέντε χρόνια και μεγάλα χρηματικά ποσά στην έρευνα προκειμένου να πετύχει οικονομική κατασκευή άμορφων κραμάτων. Ο ενοποιημένος όμιλος Hitachi/Metglas είναι ο μεγαλύτερος προμηθευτής άμορφης τεχνολογίας στους μετασχηματιστές διανομής παγκοσμίως [16]. Η Metglas βελτίωσε τη διαδικασία κατασκευής πλατιών λωρίδων μαγνητικού υλικού, με αποτέλεσμα να εισχωρήσει περισσότερο μαγνητικό υλικό στον πυρήνα [5].



Σχήμα 4.5: Μετασχηματιστής άμορφου πυρήνα από μέσα [13]

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το εσωτερικό ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο σίδηρο, ονομαστικής ισχύος 1,6MVA, ο οποίος κατασκευάστηκε το 1998, για να χρησιμοποιηθεί σε ένα εργοστάσιο στην Ιρλανδία. Οι απώλειες φορτίου του μετασχηματιστή αυτού είναι 18,2 kW και οι απώλειες κενού φορτίου 384W, κατά 80% χαμηλότερες από τις τυπικές απώλειες ενός συμβατικού μετασχηματιστή αυτού του μεγέθους.

Ένα άμορφο υλικό βασισμένο σε 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 είναι ίση με 1,57 T. Οι απώλειες πυρήνα συναρτήσεως της μαγνητικής επαγωγής B_m για τα HB1 και SA1 παρουσιάζονται στο σχήμα 4.6. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι απώλειες πυρήνα του HB1 είναι χαμηλότερες από εκείνες του SA1 σε ολόκληρο το εύρος τιμών της B_m . 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. [11]



Σχήμα 4.6: Απώλειες πυρήνα συναρτήσεως της μαγνητικής επαγωγής των υλικών HB1 και SA1

[11]

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.

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 οι 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. Οι μετασχηματιστές διανομής με πυρήνα από άμορφο μέταλλο 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 [7, 13].

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 στο σχήμα 4.7.

Harmonics	1	3	5	7	9	11	13	15	17
Content (%)	100	1	20	10	1	9	6	1	5

Transformer Losses without Harmonic Distortion

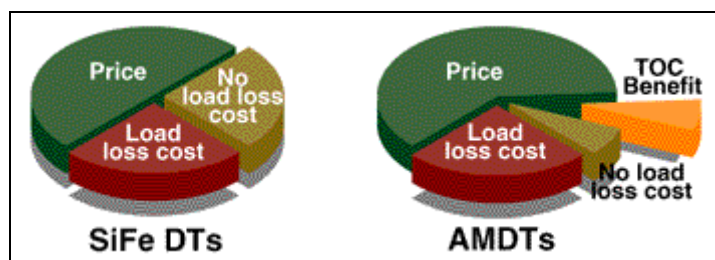
Loss (W)	Amorphous Metal	Silicon Steel
Hysteresis	99	155
Eddy Current	33	311
Total Core Loss	132	466
Coil Loss	966	1,084
Loading Level (%)	55	58
Total Transformer Loss	1,098	1,550

Transformer Losses with Harmonic Distortion of Table A

Loss (W)	Amorphous Metal	Silicon Steel
Hysteresis	99	155
Eddy Current	74	698
Total Core Loss	173	853
Coil Loss	1,553	1,671
Loading Level (%)	55	58
Total Transformer Loss	1,726	2,524

Σχήμα 4.7: Σύγκριση της επίδρασης των αρμονικών στις απώλειες μεταξύ ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο μέταλλο κι ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο [16]

Από πλευράς κόστους κατασκευής οι μετασχηματιστές άμορφου πυρήνα έχουν ελαφρώς υψηλότερες ή σχεδόν τις ίδιες τιμές με τους συμβατικούς μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης. 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 4.8 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 4.8: Σύγκριση του κόστους κύκλου ζωής μεταξύ ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από άμορφο μέταλλο κι ενός μετασχηματιστή με πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο [16]

4.4 Τυλίγματα των πηνίων των μετασχηματιστών διανομής

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.

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 στη λωρίδα, τα οποία ήταν αναπόφευκτα παλιότερα, δημιουργούσαν αδύναμα σημεία στα πηνία που κατασκευάζονταν.

Ο χαλκός και το αλουμίνιο 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.

Για την παραγωγή των λωρίδων των αγωγών χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια διαδικασίες συνεχούς ψυχρής έλασης, οι οποίες προσφέρουν μεγαλύτερη διαθεσιμότητα και πιο σταθερή ποιότητα από εκείνες των λωρίδων που κατασκευάζονταν στο παρελθόν.

Οι δυνατότητες εξέλιξης στον τομέα των τυλιγμάτων περιλαμβάνουν την κατασκευή των αγωγών με τέτοιο τρόπο, ώστε να βελτιωθεί η μηχανική αντοχή του κατασκευασμένου πηνίου και η συμπαγής κατασκευή των πηνίων.

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 δινορρεύματα και επιτρέπει καλύτερη πυκνότητα συσκευασίας του τυλίγματος. Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται ένας τέτοιος αγωγός και στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται ένας μετασχηματιστής του οποίου τα τυλίγματα είναι κατασκευασμένα με αυτήν την τεχνική.



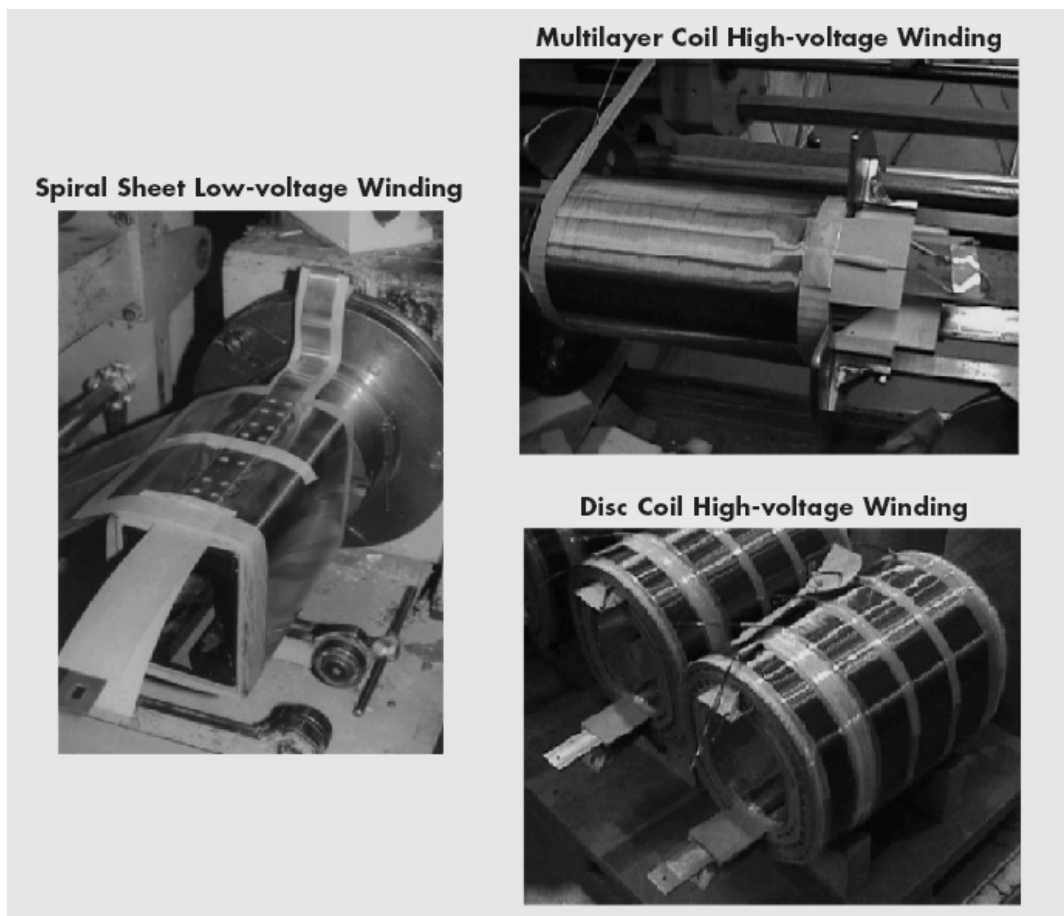
Σχήμα 4.9: Συνεχής αντιμετάθεση αγωγών [13]



Σχήμα 4.10: Εφαρμογή της συνεχούς αντιμετάθεσης αγωγών σε έναν μεγάλο μετασχηματιστή [9]

Μία λύση για τη δραστική μείωση των απωλειών στα τυλίγματα, η οποία θα οδηγήσει σε επιπλέον αύξηση της απόδοσης των μετασχηματιστών, είναι η αντικατάσταση του υφιστάμενου υλικού των αγωγών με άργυρο, 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. Οι κύριοι τύποι πηνίων που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές διανομής είναι τα τυλίγματα ελικοειδούς φύλλου, τα πολυστρωματικά πηνία, και τα δισκοειδή πηνία και παρουσιάζονται στο σχήμα 4.11. Ο πρώτος τύπος χρησιμοποιείται στα τυλίγματα χαμηλής τάσης, ενώ οι άλλοι δύο στα τυλίγματα υψηλής τάσης των μετασχηματιστών διανομής.



Σχήμα 4.11: Τύποι τυλιγμάτων [5]

4.5 Υπεραγώγιμοι μετασχηματιστές

Στους υπεραγώγιμους μετασχηματιστές τα τυλίγματα είναι κατασκευασμένα από υψηλής θερμοκρασίας υπεραγώγιμα υλικά (High Temperature Superconducting

materials – HTS) και ψύχονται με υγρό άζωτο περίπου στους $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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%.

Επιπλέον οι υπεραγώγιμοι μετασχηματιστές έχουν μικρότερο βάρος και μέγεθος, 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 λύση.

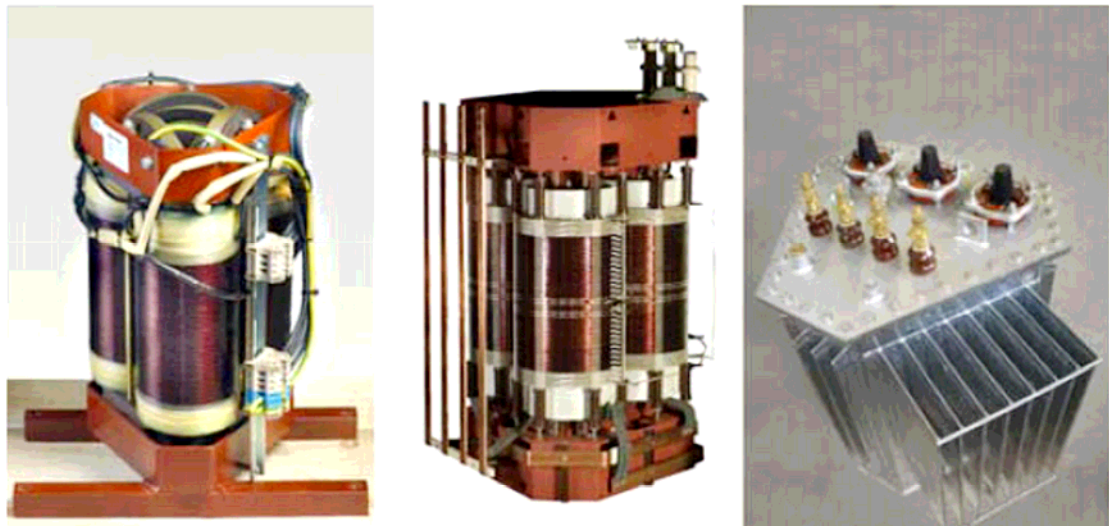
Η τιμή των υπεραγώγιμων μετασχηματιστών είναι το 150% με 200% της τιμής των συμβατικών μετασχηματιστών. Κατά συνέπεια, δεν ενδείκνυται ακόμη για μαζική χρήση. Η χρήση τους σε ευρεία κλίμακα θα γίνει πιο δελεαστική, όταν βελτιωθούν τα ψυκτικά συστήματα, μειωθεί το κόστος παραγωγής υγρού αζώτου και βελτιωθούν οι τεχνικές κατασκευής υπεραγώγιμων αγωγών υψηλής θερμοκρασίας σε μεγάλα μήκη. Προς το παρόν οι υπεραγώγιμοι μετασχηματιστές είναι κατάλληλοι για εφαρμογές, στις οποίες οι απώλειες φορτίου ευθύνονται για υψηλό ποσοστό των συνολικών απωλειών.

Πρόσφατα το κινέζικο “Institute of Electrical Engineering” παρουσίασε έναν τριφασικό μετασχηματιστή διανομής, 630 kVA με λόγο τάσεων 10 kV προς 400 V. Ο μετασχηματιστής αυτός έχει έναν πυρήνα από άμορφο κράμα, που χρησιμοποιείται για περαιτέρω μείωση των ηλεκτρικών απωλειών από εκείνη που επιτυγχάνεται μόνο από τους υπεραγώγιμους αγωγούς [13, 17].

4.6 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 4.12 παρουσιάζονται οι μετασχηματιστές εξαγωνικού πυρήνα της σουηδικής εταιρείας Hexaformer.



Σχήμα 4.12: Μετασχηματιστές εξαγωνικού πυρήνα της Hexaformer [16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ευρωπαϊκά Πρότυπα - Σήμανση Ενεργειακής Απόδοσης των Τριφασικών Ελαιόψυκτων Μετασχηματιστών Διανομής

5.1 Ευρωπαϊκά Πρότυπα

Το ισχύον Ευρωπαϊκό Πρότυπο, με βάση το οποίο κατατάσσονται οι τριφασικοί μετασχηματιστές διανομής λαδιού σε κατηγορίες, ανάλογα με τις απώλειές τους είναι το EN 50464-1. Πριν από αυτό ίσχυε το Έγγραφο Εναρμόνισης HD 428.1 S1. Τα πρότυπα αυτά αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

5.1.1 HD 428.1 S1 [3]

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 μετασχηματιστές ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 630 kVA : 4%
- για μετασχηματιστές ονομαστικής ισχύος ίσης με 630 kVA : 4% ή 6%
- και για μετασχηματιστές 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 5.1 και 5.2 αντίστοιχα:

Πίνακας 5.1: Απώλειες Φορτίου P_k σύμφωνα με το HD 428.1 S1

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 5.2: Απώλειες Κενού Φορτίου P_0 σύμφωνα με το HD 428.1 S1

Ονομαστική Ισχύς kVA	Κλάση A' P_0 W	Κλάση B' P_0 W	Κλάση C' P_0 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	

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

Τα προτιμώμενα από το HD 428.1 S1 ζεύγη τιμών είναι αυτά των ακόλουθων συνδυασμών κλάσεων :

$$A - A', B - B', C - B', A - C', C - C'$$

Στα εθνικά πρότυπα ένας ή περισσότεροι από τους ανωτέρω συνδυασμούς απωλειών, που δίνονται από τους πίνακες 5.1 και 5.2, 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:

$$C_C = C_T + AP_o + BP_k$$

όπου C_C = Κεφαλαιοποιημένο κόστος

C_T = Προσφερόμενη τιμή

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

P_o = Εγγυημένες απώλειες κενού φορτίου σε Watt

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

P_k = 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.

Στο HD 428.1 S1, στον πίνακα που περιέχει τις κλάσεις A', B' και C', καθορίζονται και στάθμες ηχητικής ισχύος για τους μετασχηματιστές, οι οποίες είναι οι μέγιστες επιτρεπτές χωρίς ανοχή σε αποκλίσεις. Οι τιμές που δίνονται για τη στάθμη ηχητικής ισχύος, τα υπόλοιπα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (ονομαστική τάση τυλιγμάτων, συνδέσεις κ.τ.λ.) καθώς και τα άλλα στοιχεία των μετασχηματιστών που καθορίζονται από το HD 428.1 S1 παραλείπονται, καθώς δεν εμπίπτουν στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [3].

5.1.2 EN 50464-1 [2]

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 5.3:

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 5.4 (απώλειες φορτίου) και 5.5 (απώλειες κενού φορτίου) και για $U_m = 36$ kV στους πίνακες 5.6 (απώλειες φορτίου) και 5.7 (απώλειες κενού φορτίου). Οι θεωρούμενες απώλειες είναι σε θερμοκρασία 75 °C.

Πίνακας 5.3: Τάση βραχυκύκλωσης σύμφωνα με το EN 50464-1

$U_m \leq 24kV$		$U_m = 36kV$	
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		1000	
630	6	1250	6
800		1600	
1000		2000	
1250		2500	
1600			
2000			
2500			
2500			

Πίνακας 5.4: Απώλειες Φορτίου P_k σύμφωνα με το EN 50464-1 για $U_m \leq 24kV$

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	
2500					

Πίνακας 5.5: Απώλειες Κενού Φορτίου P_0 σύμφωνα με το EN 50464-1 για $U_m \leq 24kV$

Ονομαστική Ισχύς kVA	E_0 W	D_0 W	C_0 W	B_0 W	A_0 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	6
630	1200	940	800	680	560	
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 5.6: Απώλειες Φορτίου P_{k36} σύμφωνα με το EN 50464-1 για $U_m = 36kV$

Ονομαστική Ισχύς kVA	C_{k36} W	B_{k36} W	A_{k36} W	Τάση Βραχυκύκλωσης %
50	1450	1250	1050	4 ή 4,5
100	2350	1950	1650	
160	3350	2550	2150	
250	4250	3500	3000	
400	6200	4900	4150	
630	8800	6500	5500	
800	10500	8400	7000	6
1000	13000	10500	8900	
1250	16000	13500	11500	
1600	19200	17000	14500	
2000	24000	21000	18000	
2500	29400	26500	22500	

Πίνακας 5.7: Απώλειες Κενού Φορτίου P_{o36} σύμφωνα με το EN 50464-1 για $U_m = 36kV$

Ονομαστική Ισχύς kVA	C_{o36} W	B_{o36} W	A_{o36} W	Τάση Βραχυκύκλωσης %
50	230	190	160	4 η 4,5
100	380	320	270	
160	520	460	390	
250	780	650	550	
400	1120	930	790	
630	1450	1300	1100	
800	1700	1500	1300	6
1000	2000	1700	1450	
1250	2400	2100	1750	
1600	2800	2600	2200	
2000	3400	3150	2700	
2500	4100	3800	3200	

Οι τιμές της στήλης A στους παραπάνω πίνακες αντιστοιχούν στις χαμηλότερες απώλειες μετασχηματιστών, πρακτική που χρησιμοποιείται συχνά στην Ευρωπαϊκή Ένωση για την κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών συσκευών.

Όπως και στο HD 428.1 S1, οι τιμές των απωλειών κενού φορτίου και η στάθμη ηχητικής ισχύος για τους μετασχηματιστές δίνονται στους ίδιους πίνακες. Οι τιμές που δίνονται για την στάθμη ηχητικής ισχύος, τα υπόλοιπα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (ονομαστική τάση τυλιγμάτων, συνδέσεις κ.τ.λ.) καθώς και τα άλλα στοιχεία των μετασχηματιστών που καθορίζονται από το EN 50464-1 παραλείπονται, καθώς δεν εμπίπτουν στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και μπορούν να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία [2].

Προκειμένου να επιλεγούν οι σωστές απώλειες φορτίου και κενού φορτίου ή όταν οι 99τιμές των απωλειών που δίνονται στους πίνακες 4 έως 7 δεν αντιστοιχούν στην πραγματική εκτίμηση του ενεργειακού κόστους, οι μετασχηματιστές μπορούν να ζητηθούν και να προσφερθούν με απώλειες που διαφέρουν από τις αναγραφόμενες στους παραπάνω πίνακες, έτσι ώστε να ικανοποιήσουν ειδικές απαιτήσεις. Σε αυτή την περίπτωση είναι σκόπιμο να υπολογιστεί το κεφαλαιοποιημένο κόστος (C_C), το οποίο είναι το άθροισμα του κόστους αγοράς (C_T) του μετασχηματιστή και του ενεργειακού κόστους (λόγω των απωλειών φορτίου και των απωλειών κενού

φορτίου) και υπολογίζεται με τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο, ο οποίος υπήρχε και στο HD 428.1 S1:

$$C_C = C_T + AP_o + BP_k$$

όπου C_C = Κεφαλαιοποιημένο κόστος

C_T = Κόστος αγοράς του μετασχηματιστή

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

P_o = Εγγυημένες απώλειες κενού φορτίου σε Watt

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

P_k = Εγγυημένες απώλειες φορτίου σε Watt

Τέλος στο EN 50464-1 δίνεται ένας μαθηματικός τύπος με τον οποίο μπορεί να υπολογιστεί συμβατικά ο βαθμός απόδοσης ενός μετασχηματιστή ισχύος μέσω των εγγυημένων ή των μετρημένων απωλειών. Ο τύπος αυτός είναι ο εξής:

$$\eta = 100 \cdot \left(1 - \frac{\alpha^2 P_{cc} + P_o}{\alpha \cdot S + \alpha^2 \cdot P_{cc} + P_o} \right) (\%)$$

όπου:

P_{cc} = Απώλειες φορτίου σε ονομαστικό ρεύμα και θερμοκρασία αναφοράς

P_o = Απώλειες κενού φορτίου σε ονομαστική τάση και συχνότητα

S = Ονομαστική Ισχύς

α = Συντελεστής Φόρτισης (ανά μονάδα)

5.2 Σήμανση Ενεργειακής Απόδοσης

5.2.1 Γενικά

Οι ετικέτες ενεργειακής απόδοσης είναι ενημερωτικές ετικέτες, ενίοτε υποχρεωτικές, που επικολλώνται σε προϊόντα που κατασκευάζονται και δίνουν μία περιγραφή της ενεργειακής τους συμπεριφοράς. Διακρίνονται σε ετικέτες έγκρισης και σε ετικέτες σύγκρισης. Οι πρώτες είναι βασικά σφραγίδες έγκρισης, οι οποίες δίνονται σύμφωνα με καθορισμένα κριτήρια. Οι ετικέτες σύγκρισης κατατάσσουν τα προϊόντα σε κλάσεις με κριτήριο την ενεργειακή τους απόδοση (με τη μορφή κατανάλωσης ενέργειας, απόδοσης ή ενεργειακού κόστους) [16]. Κάθε κλάση αντιπροσωπεύεται από ένα γράμμα του λατινικού αλφάβητου από Α έως G, με την κλάση «Α» να περιλαμβάνει τα προϊόντα με την καλύτερη απόδοση, την κλάση «B» τα προϊόντα με μικρότερη απόδοση και ούτω καθεξής μέχρι την κλάση «G», στην οποία κατατάσσονται τα προϊόντα με τις χειρότερες αποδόσεις.

Γενικά η ενεργειακή απόδοση ενός προϊόντος θα πρέπει να δίνεται για την πραγματική χρήση του. Εκφράζεται ανά μονάδα υπηρεσίας που προσφέρει και όχι για ολόκληρο το προϊόν, ούτως ώστε να συγκρίνεται η ενέργεια που καταναλώνεται για την ίδια ακριβώς χρήση. Πρέπει συνεπώς να δίνεται για καθορισμένη λειτουργία/χρήση του προϊόντος και, εφόσον είναι δυνατό, για την πιο συχνή χρήση του, η οποία μπορεί να προσδιοριστεί κατόπιν μελέτης. Για παράδειγμα στα πλυντήρια ρούχων προσδιορίζεται η ενεργειακή απόδοση από την ενέργεια που πρέπει να καταναλωθεί για να πλυθεί ένα κιλό ρούχα σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφεται η διαφορά της καταναλισκόμενης ενέργειας που οφείλεται στη διαφορά του μεγέθους των πλυντηρίων. Στα ψυγεία η ενεργειακή απόδοση προσδιορίζεται από την ενέργεια που καταναλώνεται, προκειμένου να διατηρηθεί ένα κιλό φαγητό σε μια επιθυμητή θερμοκρασία, έτσι ώστε το μέγεθος του ψυγείου να μην επηρεάζει την τιμή που υπολογίζεται.

Επιπλέον, εφόσον καθοριστεί η τυπική χρήση των προϊόντων πρέπει να χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη τους, όπως για παράδειγμα τις διαστάσεις τους. Τα ψυγεία, για παράδειγμα, ανάλογα με το μέγεθός τους εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες. Ένα μικρό ψυγείο εξυπηρετεί ένα άτομο που ζει

μόνο του ενώ ένα μεγάλο ψυγείο χρησιμοποιείται από οικογένειες, που αποτελούνται από τρία ή περισσότερα άτομα. Για το λόγο αυτό η ενεργειακή κατηγοριοποίηση των ψυγείων γίνεται με βάση το μέγεθός τους και στην ετικέτα ενεργειακής απόδοσής τους αναγράφεται η συνολική χωρητικότητα του όγκου που ψύχεται. Για ένα εύρος μεγεθών καθορίζεται η ενεργειακή απόδοση των ψυγείων, με βάση την οποία ταξινομούνται στις κλάσεις G έως A.

Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατόν στην ετικέτα ενεργειακής απόδοσης να περιλαμβάνονται περισσότερα από ένα γράμματα που αντιστοιχούν σε περισσότερες παραμέτρους. Για παράδειγμα στα πλυντήρια ρούχων συμπεριλαμβάνεται η ενεργειακή απόδοση του στεγνώματος των ρούχων.

Κάτι που πρέπει να σημειωθεί είναι το γεγονός ότι οι ετικέτες ενεργειακής απόδοσης δεν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το ποιο προϊόν ενδείκνυται για να καλύψει τις ανάγκες κάποιου ατόμου. Για παράδειγμα στα πλυντήρια δεν αναγράφεται η συσκευή που θα καλύψει τις ανάγκες μιας τετραμελούς οικογένειας [10].

Παρά το γεγονός ότι στην περίπτωση των μετασχηματιστών διανομής μια τέτοιου είδους ετικέτα ίσως είναι λιγότερο χρήσιμη, για τις περισσότερο ειδικευμένες εταιρείες ενέργειας ή βιομηχανίες, θα είναι σίγουρα πολύ χρήσιμη σε μικρές εταιρείες διανομής, στις μικρές βιομηχανίες και στον τομέα του εμπορίου, διότι δίνουν σύντομες και διαφωτιστικές πληροφορίες, η κατανόηση των οποίων δεν απαιτεί βαθιά γνώση των μετασχηματιστών. Επιπλέον θα ενθαρρύνει τους κατασκευαστές να παράγουν και να προσφέρουν περισσότερο αποδοτικούς ενεργειακά μετασχηματιστές. Εν γένει η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης μετασχηματιστών διανομής θα απευθύνεται σε εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μικρές, μεσαίες και μεγάλες βιομηχανίες και εταιρείες, εταιρείες μηχανικών, εταιρείες συμβούλων κι εταιρείες παροχής ενέργειας. Δεν είναι απαραίτητο να είναι υποχρεωτική από την αρχή, αντίθετα μπορεί να είναι προαιρετική στα πρώτα στάδια εφαρμογής της, όπως συμβαίνει και στη βιομηχανία των κυκλοφορητών [1].

Η προώθηση της ετικέτας ενεργειακής απόδοσης θα ενισχυθεί αν συνοδευτεί από μία καμπάνια ενημέρωσης σχετικά με τους αποδοτικούς ενεργειακά μετασχηματιστές και επιμόρφωσης των αγοραστών και των υπαλλήλων τους στην επιλογή των βέλτιστων λύσεων ελάχιστου κόστους. Σε κάθε περίπτωση η ετικέτα πρέπει να τοποθετείται στα σημεία των πωλήσεων των μετασχηματιστών, στους καταλόγους και σε οποιοδήποτε

έντυπο, το οποίο είναι πιθανόν να διαβάσει κάποιος που ενδιαφέρεται να αγοράσει έναν μετασχηματιστή.

5.2.2 Πληροφορίες που θα πρέπει να έχει η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής

Μια ετικέτα ενεργειακής απόδοσης ενός μετασχηματιστή διανομής θα πρέπει να αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος θα προσδιορίζει τον τύπο του μοντέλου του μετασχηματιστή και θα περιλαμβάνει το όνομα του κατασκευαστή, το όνομα της μάρκας, το μοντέλο του μετασχηματιστή και την ονομαστική του ισχύ, η οποία είναι το βασικό στοιχείο που προσδιορίζει ένα μετασχηματιστή διανομής. Το δεύτερο μέρος θα δίνει πληροφορίες για την ενεργειακή απόδοση του μετασχηματιστή και θα επιτρέπει τη σύγκρισή της με εκείνες άλλων μετασχηματιστών με την ίδια χρήση.

Στους μετασχηματιστές διανομής η ονομαστική ισχύς είναι το στοιχείο που καθορίζει τη χρήση τους. Συνεπώς για ένα σύνολο τιμών ονομαστικής ισχύος κατατάσσονται σε κλάσεις (G έως A) ανάλογα με τις απώλειες φορτίου και τις απώλειες κενού φορτίου τους.

Η μελλοντική εξέλιξη των αποδόσεων των μετασχηματιστών διανομής πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά τον καθορισμό των κλάσεων στις οποίες θα κατατάσσονται οι μετασχηματιστές. Στα ψυγεία, για τα οποία ήδη έχει καθιερωθεί ετικέτα ενεργειακής απόδοσης, δεν υπήρξε τέτοια πρόβλεψη, με αποτέλεσμα μετά από κάποιο χρονικό διάστημα οι υπάρχουσες κλάσεις να κορεστούν, καθώς οι ενεργειακές αποδόσεις των ψυγείων ήταν πολύ υψηλές και τα τοποθετούσαν μεταξύ των κλάσεων A και B. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα δημιουργήθηκαν επιπλέον κλάσεις A+ και A++, οι οποίες όμως προκαλούν σύγχυση στο ευρύ κοινό. Κατά συνέπεια πρέπει μία ή δύο κλάσεις να μείνουν κενές, προκειμένου να καλύψουν τους μετασχηματιστές μεγαλύτερων αποδόσεων που θα κατασκευαστούν στα επόμενα χρόνια.

5.2.3 Η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής που προτείνεται στην αναφορά του SEEDT

Στην αναφορά “Policies and Measures Fostering Energy-Efficient Distribution Transformers” του προγράμματος (project) της ευρωπαϊκής IEEE “Strategies for development and diffusion of energy-efficient distribution transformers – SEEDT” [10], προτείνεται ο καθορισμός μιας ετικέτας ενεργειακής απόδοσης για τις διαφορετικές τιμές ονομαστικής ισχύος των μετασχηματιστών διανομής. Διατηρείται το υπάρχον σύνολο των τιμών ονομαστικής ισχύος, το οποίο περιλαμβάνει τις εξής τιμές: 20, 25, 30, 40, 50, 63, 100, 160, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000 και 2500 kVA. Μετασχηματιστές με ονομαστική ισχύ κάτω από 50 kVA δεν αναλύονται στα ευρωπαϊκά πρότυπα, περιλαμβάνονται όμως στα αμερικάνικα. Σε περίπτωση που η ονομαστική τιμή του μετασχηματιστή διανομής δεν υπάρχει μεταξύ των παραπάνω τιμών, οι απώλειες κενού φορτίου κι οι απώλειες φορτίου θα υπολογιστούν με γραμμική παρεμβολή των δύο γειτονικών τιμών, της μεγαλύτερης και της μικρότερης.

Η διαδικασία καλύπτει μετασχηματιστές από 20 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 36 kV κι ένα δευτερεύον τύλιγμα με υψηλότερη επιτρεπόμενη τάση που δεν υπερβαίνει τα 1,1 kV. Το «παλιό» HD 428 καθόριζε απώλειες μόνο ονομαστική τιμή τάσης πρωτεύοντος τυλίγματος έως 24 kV. Η πλειονότητα των μετασχηματιστών περιλαμβάνονται σε αυτήν την κατηγορία. Το EN 50464-1 περιλαμβάνει υψηλότερο επίπεδο απωλειών για μετασχηματιστές που έχουν 36 kV ονομαστικό επίπεδο τάσης πρωτεύοντος. Οι μετασχηματιστές αυτοί σχεδιάζονται σε υψηλότερα επίπεδα ονομαστικών απωλειών, προκειμένου να συγκρατηθεί το κόστος κατασκευής σε λογικά επίπεδα. Η απλοποιημένη λύση για να ληφθεί υπ’ όψιν το γεγονός αυτό είναι να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένος συντελεστής, οποίος θ φέρνει το επίπεδο των απωλειών των 36kV στο επίπεδο των απωλειών των 24 kV. Η ομάδα του SEEDT δεν ανέλυσε περαιτέρω το ζήτημα αυτό και υιοθέτησε τους συντελεστές 0,8 για τις απώλειες φορτίου και 0,6 για τις απώλειες κενού φορτίου, που καθορίζονται στο EN 50464. Οι ισοδύναμες απώλειες φορτίου και κενού φορτίου υπολογίζονται από τις

ονομαστικές τιμές των αντίστοιχων απωλειών στα 36kV και τον συντελεστή. Εναλλακτικά οι απώλειες για $U \leq 24 \text{ kV}$ και $U = 36 \text{ kV}$ μπορούν να καθοριστούν χωριστά.

Βασισμένη στην ευρωπαϊκή μελέτη απογραφής των μετασχηματιστών διανομής και στην ανάλυση του κόστους κύκλου ζωής η ομάδα του SEEDT οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι η καθιέρωση μιας ετικέτας ενεργειακής απόδοσης για μετασχηματιστές ξηρού τύπου είναι πολύ μικρότερης σημασίας. Όταν μελετήθηκε από την ομάδα του SEEDT η κατάσταση των μετασχηματιστών διανομής, οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου κάλυπταν περίπου 25% της ισχύος (14 από τα 56 GVA) των μετασχηματιστών διανομής που είχαν αγοραστεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση πρόσφατα ενώ ο αριθμός τους αντιστοιχούσε μόλις στο 11,5 % του συνολικού αριθμού των μετασχηματιστών που είχαν αγοραστεί (15.700 από 137.000). Επιπροσθέτως είναι ήδη αρκετά αποδοτικοί, για παράδειγμα συγκρινόμενοι με το καναδικό πρότυπο ελάχιστης απόδοσης μετασχηματιστών ξηρού τύπου και μπορεί να επιτευχθεί πολύ περιορισμένη επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τους μετασχηματιστές λαδιού. Τέλος, οι λύσεις για εξοικονόμηση σε αυτούς δεν είναι πάντα οικονομικές.

Οι θεωρούμενες απώλειες είναι σε θερμοκρασία 75 °C. Η τάση βραχυκύκλωσης καθορίζεται από το πρότυπο EN 50464, συνεπώς οι απώλειες φορτίου και κενού φορτίου προσδιορίζονται για τάση βραχυκύκλωσης ίση με 4% για τιμές ονομαστικής ισχύος μικρότερες από 630 kVA και 6% για τιμές μεγαλύτερες από 630 kVA . Για ονομαστική ισχύ ίση με 630 kVA προσδιορίζονται δύο επίπεδα απωλειών φορτίου και κενού φορτίου, για τάσεις βραχυκύκλωσης 4% και 6%.

Η διεξαγωγή των μετρήσεων απωλειών φορτίου και κενού φορτίου θα πρέπει σύμφωνα με την ομάδα του SEEDT να ακολουθεί το “CENELEC EN 60076-1 Power Transformers Part 1: General”, ενώ προτείνεται μηδενικό όριο ανοχής για τα δύο είδη απωλειών.

Η ετικέτα θα πρέπει να δίνει πληροφορίες για τον βαθμό απόδοσης του μετασχηματιστή ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

όπου

η : ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή

P_{out} : η τάση εξόδου του

P_{in} : η τάση εισόδου του

Για τους μετασχηματιστές διανομής η κατανάλωση ενέργειας δεν χρησιμοποιείται στην πράξη και δεν ενδιαφέρει τους κατασκευαστές και τις εταιρείες διανομής. Το μέγεθος που ενδιαφέρει τις εταιρείες είναι οι απώλειες του μετασχηματιστή, οι οποίες διακρίνονται σε απώλειες φορτίου (Load Losses – LL) και (No-Load Losses – NLL) και εκφράζονται σε Watt (W). Για τον υπολογισμό των απωλειών φορτίου ο συντελεστής φόρτισης του μετασχηματιστή πρέπει να είναι γνωστός ή να υπολογιστεί.

5.2.4 Οι τρεις εναλλακτικές προτάσεις του SEEDT για την ετικέτα ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής

Σύμφωνα με τα τρέχοντα πρότυπα η κατηγορία απωλειών στην οποία υπάγεται ένας μετασχηματιστής συμβολίζεται με δύο γράμματα που αντιπροσωπεύουν την κατηγορία των απωλειών κενού φορτίου και την κατηγορία των απωλειών φορτίου αντίστοιχα. Για παράδειγμα, σύμφωνα με το πρότυπο EN 50464, ένας μετασχηματιστής 630 kVA και τάσης βραχυκύκλωσης ίσης με 4% που χαρακτηρίζεται ως A_0C_k έχει απώλειες κενού φορτίου που αντιστοιχούν στην κατηγορία A_0 , με $P_{o,max} = 600W$ και απώλειες φορτίου που αντιστοιχούν στην κατηγορία C_k , με $P_{k,max} = 6.500 W$. Αντίθετα οι ετικέτες ενεργειακής απόδοσης άλλων προϊόντων, π.χ. αυτές των ψυγείων ή των λαμπτήρων, περιλαμβάνουν ένα γράμμα. Στην πορεία του έργου SEEDT μελετήθηκαν τρεις εναλλακτικές ενδείξεις:

- ένα γράμμα
- δύο γράμματα ή
- ένα γράμμα με μία επιπλέον ένδειξη (π.χ. «+», «0» ή «-») ή μία αριθμητική τιμή

Παρά το γεγονός ότι η χρήση δύο γραμμμάτων θα μπορούσε να θεωρηθεί πιο ακριβής, τελικά προτιμήθηκε η ετικέτα με ένα γράμμα, η οποία, μπορεί να γίνει πιο εύκολα

κατανοητή κι από ανθρώπους της βιομηχανίας ή του εμπορίου που δεν έχουν πολλές τεχνικές γνώσεις στους μετασχηματιστές διανομής.

Μια ετικέτα ενός γράμματος θα πρέπει να χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό των απωλειών κενού φορτίου και των απωλειών φορτίου σε κάποιο συγκεκριμένο συντελεστή φόρτισης ή σε όλο το εύρος των πιθανών συντελεστών φόρτισης.

Η ομάδα του SEEDT ανέπτυξε τρεις προτάσεις για τον προσδιορισμό της ετικέτας, οι οποίες περιγράφονται εν συντομία στην συνέχεια. Και οι τρεις προτάσεις βασίζονται στο πρότυπο EN 50464.

Πρόταση 1 – Μια ετικέτα απωλειών κενού φορτίου (NLL label)

Αυτή η ετικέτα λαμβάνει υπ' όψιν μόνο τις απώλειες κενού φορτίου. Η σκέψη για μια τέτοια ετικέτα προήλθε από το γεγονός ότι οι απώλειες κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής ευθύνονται για το 73% των απωλειών των επιχειρήσεων ηλεκτρισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης και το 71,5% των υπόλοιπων απωλειών στους μετασχηματιστές διανομής.

Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα επιπλέον σύμβολο, «+», «0» ή «-», το οποίο θα προσδιορίζει το επίπεδο των απωλειών φορτίου. Ένας μετασχηματιστής με σήμανση «B+» θα έχει χαμηλότερες απώλειες φορτίου από έναν με σήμανση «B-», ο οποίος θα είναι λιγότερο αποδοτικός. Επιπλέον, με εξαίρεση τις κλάσεις A και B η ένδειξη «0» θα σημαίνει ότι ο λόγος των απωλειών φορτίου προς τις απώλειες κενού φορτίου (LL/NLL) θα κυμαίνεται μεταξύ 8 και 12 και θα αντιστοιχεί σε μέγιστη απόδοση¹ για φόρτιση μεταξύ 28,9% και 35,5%. Η ένδειξη «+» θα αντιπροσωπεύει ένα μετασχηματιστή με λόγο LL/NLL με τιμή μικρότερη από 6, ο οποίος επιτυγχάνει τη μέγιστη απόδοση με συντελεστή φόρτισης μεγαλύτερο από 40% περίπου (και ενδείκνυται για περιοχές με κατά βάση υψηλότερη φόρτιση). Η ένδειξη «-» θα υποδηλώνει μετασχηματιστή, για τον οποίον θα ισχύει $LL/NLL > 10$ και ισοδυναμεί με μέγιστη απόδοση σε συντελεστή φόρτισης μικρότερο του 32% (κατάλληλο για μετασχηματιστές με χαμηλή φόρτιση). Οι απώλειες κενού φορτίου για τις κλάσεις A

¹ Η μέγιστη απόδοση ενός μετασχηματιστή επιτυγχάνεται όταν οι απώλειες φορτίου κι οι απώλειες κενού φορτίου είναι ίσες: $LL = NLL$

και Β θα αντιστοιχούν σε εκείνες των μετασχηματιστών με πυρήνα από άμορφο σίδηρο. Ο λόγος LL/NLL θα είναι πολύ υψηλότερος για τις δύο αυτές κλάσεις σε σχέση με τις υπόλοιπες από C και κάτω. Στην περίπτωση λοιπόν των κλάσεων Α και Β το «+» θα υποδηλώνει λόγο μικρότερο του 12, το «-» θα υποδηλώνει λόγο μεγαλύτερο από 20 και το «0» θα υποδηλώνει λόγο μεταξύ 12 και 20.

Εναλλακτικά στην πρόταση 1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αριθμός, ο οποίος θα συνοδεύει το γράμμα που καθορίζει την κλάση, θα βρίσκεται σε παρενθέσεις και θα δείχνει σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) την φόρτιση για την οποία η απόδοση του μετασχηματιστή γίνεται μέγιστη. Για παράδειγμα Β(20) ή Β (40). Στον πίνακα 5.8 παρουσιάζονται οι κλάσεις της πρότασης 1. Όπως και στις προτάσεις 2 και 3 που ακολουθούν, ακολουθείται η συνηθισμένη χρήση ετικετών ενεργειακής απόδοσης στην Ευρώπη με κλάσεις που ονομάζονται με τα γράμματα “Α” έως “F”, ενώ η κλάση Α ορίζεται σαν κενή κλάση σήμερα, προκειμένου να προληφθεί η τεχνολογική πρόοδος που θα οδηγήσει σε μετασχηματιστές με υψηλότερο βαθμό απόδοσης.

Πίνακας 5.8: Κλάσεις της ετικέτας της Πρότασης 1

Ετικέτα	Ορισμός	
	Απώλειες Κενού Φορτίου NLL (αναφ. EN 50464)	Απώλειες Φορτίου LL (είτε % της φόρτισης για επίτευξη μέγιστης απόδοσης, δηλαδή όταν LL = NLL, είτε βλέπετε παρακάτω)
A	Κενή κλάση σήμερα	
B	$NLL \leq 0,45 \cdot C_0$	LL/NLL < 12: “+” 12 ≤ LL/NLL ≤ 20: “0” LL/NLL > 20: “-“
C	$0,45 \cdot C_0 < NLL \leq 0,72 \cdot C_0$	LL/NLL < 6: “+” 6 ≤ LL/NLL ≤ 10: “0” LL/NLL > 10: “-“
D	$0,72 \cdot C_0 < NLL \leq 0,88 \cdot C_0$	
E	$0,88 \cdot C_0 < NLL \leq 1,00 \cdot C_0$	
F	$1,00 \cdot C_0 < NLL \leq 1,25 \cdot C_0$	
G	$NLL > 1,25 \cdot C_0$	

Σημείωση: C₀ είναι η κλάση απωλειών κενού φορτίου C₀ όπως ορίζεται από το EN 50464

Πρόταση 2 – Μια ετικέτα βασισμένη σε απλό συνδυασμό των απωλειών κενού φορτίου και των απωλειών φορτίου (απλοποιημένη ονομασία: NLL+LL label)

Αυτή η ετικέτα βασίζεται σε ένα συνδυασμό των απωλειών κενού φορτίου και των απωλειών φορτίου σε φόρτιση ίση με 40% και προκύπτει από μία πολύ απλή σχέση. Η ομάδα του SEEDT δοκίμασε διάφορες σχέσεις, όπως για παράδειγμα:

$$TL = NLL + LL \cdot (0,4)^2$$

όπου TL οι συνολικές απώλειες (Total Losses), από την οποία προκύπτει η ακόλουθη σχέση για την ετικέτα:

$$\text{label} = NLL + 0,16 \cdot LL$$

Συνήθως η απόδοση στα διεθνή πρότυπα υπολογίζεται για φόρτιση ίση με 50%. Όμως το 40% της φόρτισης είναι πιο κοντά στην τυπική μέση φόρτιση στην Ευρωπαϊκή Ένωση, που είναι ίση με 19%. Επιπλέον το 40% είναι τιμή αναφοράς στο “Japanese Top runner scheme” και αντιπροσωπεύει την φόρτιση για την οποία η απόδοση ενός μετασχηματιστή είναι πιο συχνά κοντά στην υψηλότερη τιμή της (NLL = LL).

Εναλλακτικά αντί να χρησιμοποιηθεί μία μόνο τιμή φόρτισης, θα μπορούσε να υπολογιστεί η μέση τιμή με σταθμισμένους συντελεστές ενός συνδυασμού διαφορετικών φορτίσεων, για παράδειγμα για 25%, 50%, 75% και 100%, όπως έχει γίνει για την ετικέτα των κυκλοφορητών [1].

Οι κλάσεις της πρότασης 2 παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9: Κλάσεις της ετικέτας της Πρότασης 2

Ετικέτα	Ορισμός
A	Κενή κλάση σήμερα
B	$\frac{NLL + 0,16LL}{REF} \leq 0,75$
C	$0,75 < \frac{NLL + 0,16LL}{REF} \leq 0,85$
D	$0,85 < \frac{NLL + 0,16LL}{REF} \leq 0,95$
E	$0,95 < \frac{NLL + 0,16LL}{REF} \leq 1,05$
F	$1,05 < \frac{NLL + 0,16LL}{REF} \leq 1,2$
G	$\frac{NLL + 0,16LL}{REF} > 1,2$

- Σημειώσεις: 1. REF είναι οι απώλειες σε Watt που υπολογίζονται από την σχέση $REF = C_o + 0,16 \cdot B_k$
 2. C_o είναι η κλάση απωλειών κενού φορτίου C_o όπως ορίζεται από το EN 50464
 3. B_k είναι η κλάση απωλειών φορτίου B_k όπως ορίζεται από το EN 50464 ($C_o B_k = CC'$ του HD 428)

Πρόταση 3 – Μια ετικέτα βασισμένη σε έναν ακριβή συνδυασμό των απωλειών κενού φορτίου και των απωλειών φορτίου (precise NLL+LL label)

Σε αυτήν την πρόταση λαμβάνονται υπ' όψιν όλες οι πιθανές τιμές φόρτισης, ενώ στο τέλος προκύπτει μια απλή σχέση που περιλαμβάνει τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου.

Η καθαρή ισχύς του μετασχηματιστή (απαλλαγμένη από τις απώλειες) θα ήταν:

$$P = Sx - A - Bx^2$$

όπου

P : η καθαρή ισχύς

S : η ονομαστική ισχύς

X : η φόρτιση (εκφρασμένη σαν ποσοστό επί τοις εκατό της ονομαστικής ισχύος)

A : οι απώλειες κενού φορτίου

B : οι απώλειες φορτίου

Το ολοκλήρωμα της καθαρής ενέργειας από $x = 0$ έως 1 δίνει:

$$\max = \int_0^1 P(x) dx = \frac{1}{2} Sx^2 - Ax - \frac{1}{3} Bx^3$$

Το ανωτέρω ολοκλήρωμα περιέχει το άθροισμα των αποδόσεων όλων τιμών φόρτισης από 0 έως 1 και μπορεί τελικά να εκφραστεί με την παρακάτω σχέση, η οποία δίνει την τιμή της ετικέτας:

$$\text{Label} = \text{NLL} + \frac{1}{3}\text{LL}$$

Οι κλάσεις της πρότασης 3 παρουσιάζονται στον πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10: Κλάσεις της ετικέτας της Πρότασης 3

Ετικέτα	Ορισμός
A	Κενή κλάση σήμερα
B	$\frac{\text{NLL} + 0,333\text{LL}}{\text{REF}} \leq 0,82$
C	$0,82 < \frac{\text{NLL} + 0,333\text{LL}}{\text{REF}} \leq 0,92$
D	$0,92 < \frac{\text{NLL} + 0,333\text{LL}}{\text{REF}} \leq 1,02$
E	$1,02 < \frac{\text{NLL} + 0,333\text{LL}}{\text{REF}} \leq 1,12$
F	$1,12 < \frac{\text{NLL} + 0,333\text{LL}}{\text{REF}} \leq 1,22$
G	$\frac{\text{NLL} + 0,333\text{LL}}{\text{REF}} > 1,22$

- Σημειώσεις:
1. REF είναι οι απώλειες σε Watt που υπολογίζονται από την σχέση $\text{REF} = C_0 + 0,333 \cdot B_k$
 2. C_0 είναι η κλάση απωλειών κενού φορτίου C_0 όπως ορίζεται από το EN 50464
 3. B_k είναι η κλάση απωλειών φορτίου B_k όπως ορίζεται από το EN 50464

Τελικά η ομάδα του SEEDT προτίμησε την πρόταση 2. Η λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν την επιλογή είναι δύο. Πρώτον, το γεγονός ότι είναι πιο ρεαλιστική σε σχέση

με την πρόταση 3, ως προς τους συντελεστές φόρτισης που υπάρχουν στην πράξη, παρά το γεγονός ότι ένα χαμηλότερο επίπεδο φόρτισης, για παράδειγμα 20%, θα ήταν ακόμα πιο ρεαλιστικό. Δεύτερον, το γεγονός ότι η φόρτιση 40%, που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της ετικέτας, ταιριάζει στα επίπεδα φόρτισης που χρησιμοποιούνται στα αμερικάνικα και τα ασιατικά σχέδια και είναι διεθνώς πιο αποδεκτά. Επιπλέον, θα μπορούσε να επιτευχθεί μεγαλύτερη συνοχή των διαφορετικών διεθνών μεθόδων.

Στην Ευρώπη θα πρέπει αυτόν τον καιρό να εστιαστεί η προσοχή περισσότερο στις απώλειες κενού φορτίου, ακόμα κι αν μπορεί να παρατηρηθεί μια τάση προς ελαφρώς υψηλότερες φορτίσεις. Για το λόγο αυτό θα μπορούσε να προτιμηθεί κι η πρόταση 1, η οποία τελικά απορρίφθηκε, επειδή τα επιπρόσθετα σύμβολα κάνουν την ετικέτα πιο δυσνόητη για τους αγοραστές.

Γενικά στην πράξη η ετικέτα είναι μια πρώτη βοήθεια, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση ελάχιστου κόστους, αλλά ένας λεπτομερής υπολογισμός είναι απαραίτητος (για παράδειγμα με τη χρήση του εργαλείου TLCalc του SEEDT). Ο υπολογισμός θα πρέπει να γίνει, διότι για κάποιες φορτίσεις ένας συνδυασμός LL και NLL μπορεί να είναι η βέλτιστη λύση, ενώ για άλλες φορτίσεις μπορεί να ενδείκνυται κάποιος άλλος συνδυασμός. Η ανάλυση της υπάρχουσας κατάστασης [16] έδειξε ότι οι φορτίσεις μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ αλλά και μέσα στις αγροτικές κι αστικές εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, στη μικρή ή τη μεγάλη βιομηχανία και στον τομέα του εμπορίου.

5.2.5 Προσδιορισμός των κλάσεων της ετικέτας των μετασχηματιστών διανομής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, προτείνεται να καθοριστεί η κλάση A ως κενή κλάση σήμερα, προκειμένου να καταχωρηθούν σε αυτή μετασχηματιστές που θα κατασκευαστούν στο μέλλον με μεγαλύτερη απόδοση. Ανάλογα με την απόδοση των μετασχηματιστών καθορίζονται οι επτά κλάσεις ενεργειακής απόδοσης ως εξής:

A : Πολύ προηγμένη τεχνολογία (κενή κλάση σήμερα)

B : Αρκετά προηγμένη τεχνολογία (μετασχηματιστές άμορφου πυρήνα, σήμερα)

C : Ενεργειακά προηγμένη τεχνολογία

D : Όχι εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία

E : Μέση παλούμενη τεχνολογία

F : Μέση χρησιμοποιούμενη τεχνολογία

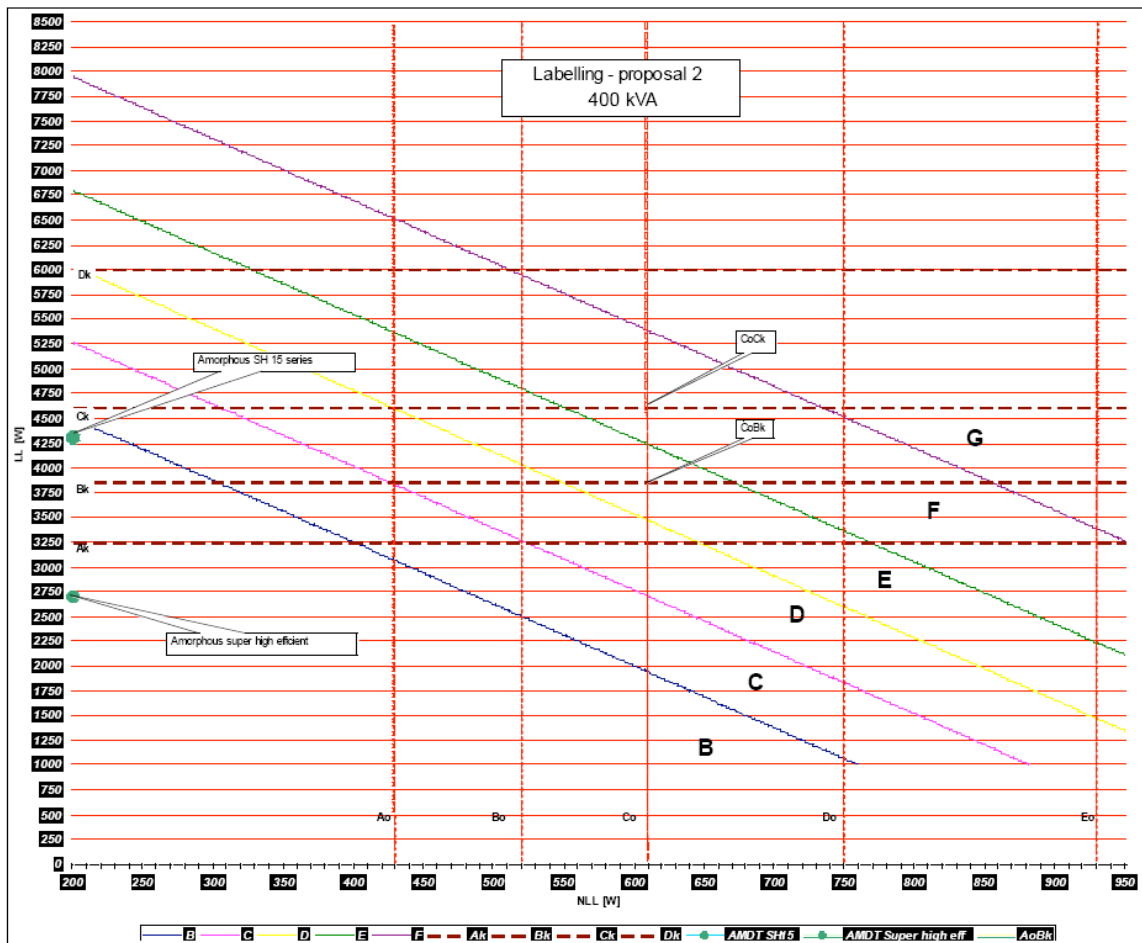
G : Η χειρότερη τεχνολογία σήμερα

Η ετικέτα που προτείνει η ομάδα του SEEDT φαίνεται στο σχήμα 5.1 κι αποτελείται από τα εξής τρία μέρη: πληροφορίες του προϊόντος, ενεργειακές πληροφορίες κι άλλες συμπληρωματικές πληροφορίες.

Identification of the product	
Manufacturer Type (oil immersed)	50 Hz, 3 phase, Primary voltage / secondary voltage [kV] Rated power [kVA]
Energy information	
Drawing of the classes A - VAT – very advanced technology B - MAT – more advanced technology C - EAT – energy advanced technology D - BAT – business as usual technology E - AST – average sold technology F - AUT – average technology used G – WOR – the worst technology today	Indication of the class of the product (by an arrow for instance)
Other complementary information Value of no load losses (in Watt) Value of load losses (in Watt)	

Σχήμα 5.1: Στοιχεία της ετικέτας των μετασχηματιστών διανομής που προτείνεται από το SEEDT

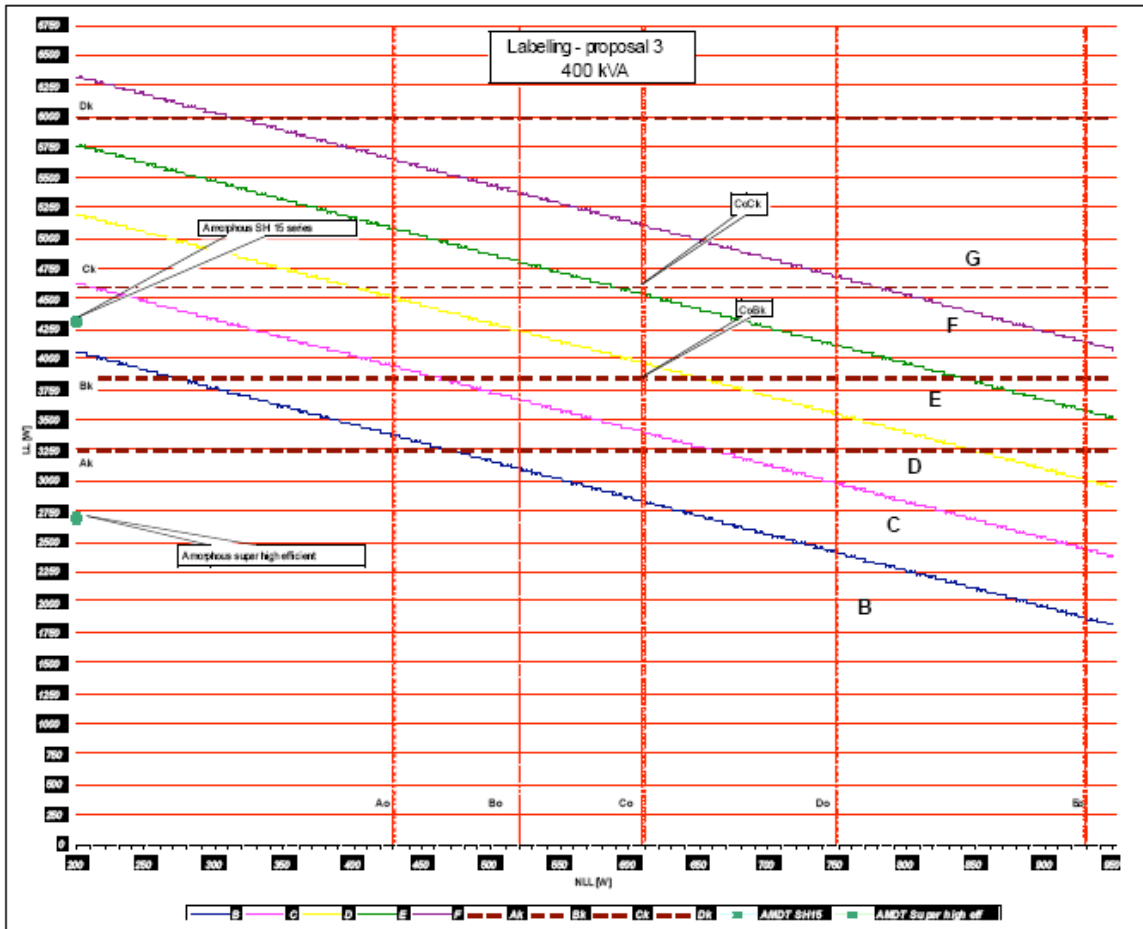
Οι προτάσεις 2 και 3 της ομάδα τους SEEDT απεικονίζονται γραφικά στα σχήματα 5.2 και 5.3 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2: Απεικόνιση της πρότασης 2 του SEEDT για μετασχηματιστή 400 kVA

Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.2 και 5.3, η πρόταση 2 συγκρινόμενη με την πρόταση 3 είναι λιγότερο ευαίσθητη στις απώλειες φορτίου, καθώς η διακύμανση των ετικετών κατά μήκος ενός επιπέδου απωλειών κενού φορτίου είναι μικρότερη.

Στον πίνακα 5.11, στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα όλων των προτάσεων καθώς και η κατηγοριοποίηση των απωλειών των μετασχηματιστών από τα υπάρχοντα πρότυπα.



Σχήμα 5.3: Απεικόνιση της πρότασης 3 του SEEDT για μετασχηματιστή 400 kVA

Πίνακας 5.11: Συνοπτική παρουσίαση των τριών ετικετών ταξινόμησης που προτάθηκαν από την ομάδα του SEEDT και σύγκριση με τα υπάρχοντα πρότυπα EN 50464 και HD 428

EN 50464	HD 428 or techspeak	Proposal 1	Proposal 2	Proposal 3
AMDTA _k		B+/B0	B	B
AMDTB _k	C-AMDT	B0	B	B
AMDTC _k	A-AMDT	B-	B	C/D*
AMDTD _k		B-	B/C	E
A ₀ A _k		C0	C	B
A ₀ B _k	CC'-30%	C0	C/D	C
A ₀ C _k		C-	D/E	E
A ₀ D _k		C-	F	G
B ₀ A _k		D0	C/D	C
B ₀ B _k		D0	D	D
B ₀ C _k		D0	E	E
B ₀ D _k		D-	F/G	G
C ₀ A _k		E+	D	C
C ₀ B _k	CC'	E0	E	D
C ₀ C _k	AC'	E0	F	F
C ₀ D _k	BC'	E0	G	G
D ₀ A _k		F+/G+	E	D
D ₀ B _k	CB'	F+/G+	F	E
D ₀ C _k	AB'	F0/G0	F/G	F
D ₀ D _k	BB'	F0/G0	G	G
E ₀ A _k		G+	F	E
E ₀ B _k	CA'	G+	G	F
E ₀ C _k	AA'	G+	G	G
E ₀ D _k	BA'	G0	G	G

Σημείωση*: “X/Y” (“C/D” κτλ.) σημαίνει ότι ο συνδυασμός των απωλειών είναι κοντά στο όριο ανάμεσα στις ετικέτες X και Y (π.χ. μεταξύ των C και D για “C/D”), δηλαδή για κάποια kVA μπορεί να είναι C και για κάποια άλλα D).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Το Προτεινόμενο Μοντέλο Ενεργειακής Ταξινόμησης

6.1 Εισαγωγή

Οι προτάσεις για τη δημιουργία ετικέτας ενεργειακής απόδοσης της ομάδας του SEEDT, οι οποίες αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είτε δεν λαμβάνουν υπ' όψιν τις απώλειες φορτίου, οπότε η ενεργειακή κλάση του μετασχηματιστή διανομής προκύπτει αποκλειστικά από τις απώλειες κενού φορτίου είτε οδηγούν σε μία ετικέτα βασισμένη σε έναν απλό συνδυασμό απωλειών κενού φορτίου και φορτίου λαμβάνοντας υπ' όψιν μόνο μία συγκεκριμένη τιμή της φόρτισης (loading), π.χ. 40%, είτε οδηγούν σε μία ετικέτα βασισμένη σε έναν συνδυασμό απωλειών φορτίου και κενού φορτίου λαμβάνοντας υπ' όψιν όλο το εύρος των πιθανών τιμών φόρτισης. Στην τελευταία περίπτωση η ετικέτα προκύπτει από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο που είναι αποτέλεσμα ολοκλήρωσης των συνολικών απωλειών σε όλο το εύρος των πιθανών τιμών φόρτισης (από 0 έως 1):

$$\text{Label} = \text{NLL} + 1/3\text{LL}$$

όπου Label: η μεταβλητή που εκφράζει τις συνολικές απώλειες

NLL: οι απώλειες κενού φορτίου

LL: οι απώλειες φορτίου

Η δεύτερη πρόταση, η οποία προτιμήθηκε τελικά από την ομάδα του SEEDT ως η πιο κατάλληλη για την ενεργειακή κατηγοριοποίηση των μετασχηματιστών διανομής, λαμβάνει υπ' όψιν της στον υπολογισμό των απωλειών φορτίου μόνο τις απώλειες που αντιστοιχούν σε φόρτιση ίση με 40% της ονομαστικής. Με αυτόν τον τρόπο

όμως περιορίζεται η επίδραση των απωλειών φορτίου στον καθορισμό της ετικέτας μόνο στην τιμή αυτή, η οποία διαφέρει εξάλλου από την μέση τιμή φόρτισης στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Η παρούσα διπλωματική εργασία προτείνει μία ετικέτα ενεργειακής απόδοσης, στον υπολογισμό της οποίας λαμβάνεται υπ' όψιν ολόκληρο το εύρος των πιθανών τιμών φόρτισης ενός μετασχηματιστή διανομής. Σε αντίθεση με την πρόταση 3 του SEEDT, στην οποία η σχέση με την οποία υπολογιζόταν η ετικέτα προέκυπτε από ολοκλήρωση σε όλο το εύρος των τιμών φόρτισης, εισάγονται συντελεστές στάθμισης για τις τιμές της φόρτισης που υπεισέρχονται στον υπολογισμό, προκειμένου να ληφθεί υπ' όψιν η πραγματική συμπεριφορά των μετασχηματιστών διανομής ως προς τη φόρτισή τους. Οι συντελεστές αυτοί προκύπτουν από στατιστικά στοιχεία που αφορούν στην ισχύουσα κατάσταση των μετασχηματιστών διανομής στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Από τις τιμές φόρτισης, τους συντελεστές στάθμισης και τις τιμές των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου ενός μετασχηματιστή υπολογίζεται, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα, η τιμή μιας μεταβλητής, που ονομάζεται Label, η οποία καθορίζει την ενεργειακή κλάση του μετασχηματιστή. Η ένδειξη της κατηγορίας των απωλειών του μετασχηματιστή γίνεται με ένα γράμμα, διότι, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι περισσότερο κατανοητή σε ένα ευρύ σύνολο ανθρώπων, οι οποίοι ενδεχομένως να ανατρέξουν στην ετικέτα ενεργειακής απόδοσης πριν προβούν στην αγορά ενός μετασχηματιστή διανομής. Η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης, που προτείνεται εδώ, καλύπτει την ίδια κατηγορία μετασχηματιστών διανομής με εκείνη που καλύπτεται από την πρόταση της ομάδας του SEEDT. Καλύπτει μετασχηματιστές ισχύος από 20 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 36 kV κι ένα δευτερεύον με υψηλότερη επιτρεπόμενη τάση που δεν υπερβαίνει τα 1,1 kV.

6.2 Υπολογισμός της Μεταβλητής Label

Προκειμένου να συμπεριληφθεί στον υπολογισμό της ετικέτας ενεργειακής απόδοσης όλο το σύνολο των τιμών φόρτισης από 0% έως 100% της ονομαστικής, αυτές ομαδοποιούνται σε τέσσερις κλάσεις, τα διαστήματα των οποίων είναι τα εξής: από 0% έως 25%, από 25% έως 50%, από 50% έως 75% και από 75% έως 100%. Για κάθε μία από τις τέσσερις αυτές κλάσεις προσδιορίζεται μία τιμή, ίση με τη μέγιστη τιμή της κλάσης, ήτοι 0,25, 0,5, 0,75 και 1 για την 1^η, 2, 3^η και 4^η κλάση αντίστοιχα, η οποία εισάγεται στους υπολογισμούς για την εξαγωγή της ετικέτας. Οι τέσσερις κλάσεις, τα διαστήματα τιμών τους και η αντιπροσωπευτική τιμή που αντιστοιχεί σε κάθε κλάση δίνονται στον πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Κλάσεις φόρτισης

Κλάσεις	Περιοχές Φόρτισης	Αντιπροσωπευτική Τιμή
1	$0 \leq \text{Loading} \leq 0,25$	0,25
2	$0,25 < \text{Loading} \leq 0,5$	0,5
3	$0,5 < \text{Loading} \leq 0,75$	0,75
4	$0,75 < \text{Loading} \leq 1$	1

Οι αντιπροσωπευτικές τιμές κάθε κλάσης φόρτισης πολλαπλασιάζονται με έναν συντελεστή στάθμισης, οποίος εκφράζει τη συχνότητα εμφάνισης κάθε κλάσης τιμών φόρτισης ενός μετασχηματιστή διανομής στην πράξη. Η τιμή της μεταβλητής Label, η οποία καθορίζει την ενεργειακή κλάση του μετασχηματιστή δίνεται από τη σχέση 1:

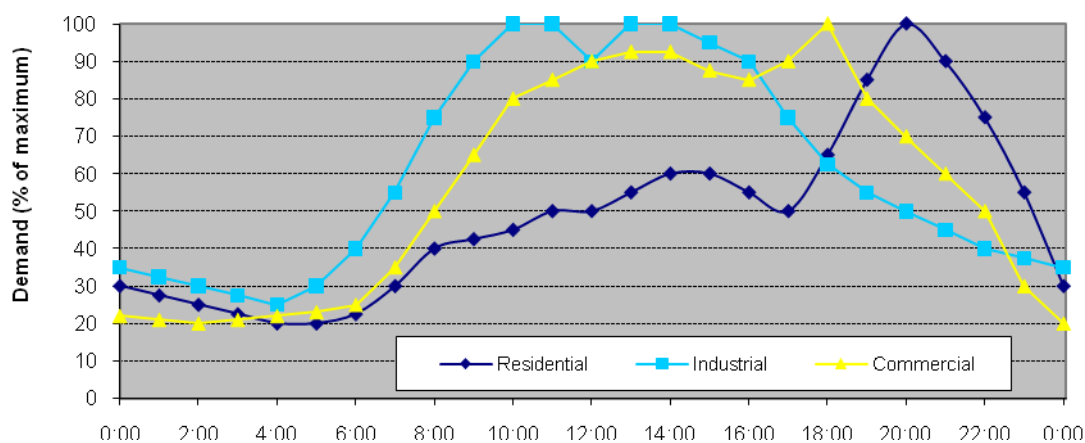
$$\text{Label} = \text{NLL} + \sum_{i=1}^4 x_i^2 \cdot \text{LL} \cdot \text{coef}_{x_i} \quad (1)$$

όπου i : η κλάση φόρτισης

x_i : η μέγιστη τιμή της κλάσης i

coef_{x_i} : ο συντελεστής στάθμισης της κλάσης i

Για τον υπολογισμό των συντελεστών στάθμισης χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες φορτίου των τριών σημαντικότερων τύπων καταναλωτών που συναντώνται. Οι ημερήσιες καμπύλες του οικιακού, του βιομηχανικού και του εμπορικού φορτίου φαίνονται στο σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου των τριών τύπων φορτίου των χαρακτηριστικών δικτύων χαμηλής τάσης [12]

Από τις καμπύλες αυτές προκύπτουν τα στοιχεία του πίνακα 6.2, στον οποίο φαίνονται οι συχνότητες εμφάνισης των διαφόρων τιμών φόρτισης ομαδοποιημένες κατά κλάση. Ο πίνακας περιλαμβάνει τη διάρκεια κάθε κλάσης σε ώρες μέσα σε μία ημέρα.

Πίνακας 6.2: Χρονική διάρκεια των κλάσεων φόρτισης μέσα σε μία ημέρα σε ώρες

Κλάση φόρτισης	Διάρκεια φόρτισης σε ώρες		
	Οικιακό	Βιομηχανικό	Εμπορικό
$0,75 < \text{Loading} \leq 1$	3	8	10
$0,5 < \text{Loading} \leq 0,75$	7	5	3
$0,25 < \text{Loading} \leq 0,5$	9	10	4
$0 \leq \text{Loading} \leq 0,25$	5	1	7

Από τα στοιχεία του πίνακα 6.2 εξάγονται οι συντελεστές στάθμισης της κάθε κλάσης. Στον υπολογισμό των συντελεστών αυτών λαμβάνεται υπ' όψιν η ενεργειακή κατανάλωση του καθενός από τους τρεις τύπους καταναλωτών. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat η ενεργειακή κατανάλωση στις διάφορες κατηγορίες καταναλωτών στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 25 κατά το έτος 2004 ήταν αυτές που φαίνονται στον πίνακα 6.3:

Πίνακας 6.3: Καταναλώσεις ενέργειας στις διάφορες κατηγορίες καταναλωτών [8]

Κατηγορία Καταναλωτή	Κατανάλωση ενέργειας (GWh)
Οικιακό	744.736
Βιομηχανικό	1.089.630
Αγροτικό	45.893
Υπηρεσίες	684.724
Άλλοι τομείς	13.949
Μεταφορές	71.072
Σύνολο	2.650.004

Οι διαθέσιμες καμπύλες φορτίου αφορούν στους οικιακούς, τους βιομηχανικούς καταναλωτές και τον τομέα των υπηρεσιών. Δεδομένου του γεγονότος ότι η ενέργεια που καταναλώνεται στις μεταφορές, στον αγροτικό τομέα και στους υπόλοιπους τομείς εκτός βιομηχανίας αποτελεί το 2,68%, το 1,73% και το 0,53% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας αντίστοιχα, μπορεί η ενέργεια που καταναλώνεται στους τομείς αυτούς να αμεληθεί κατά των υπολογισμών των συντελεστών στάθμισης χωρίς ποιοτική αλλοίωση του αποτελέσματος. Εξάλλου, η ποσότητα της ενέργειας που καταναλώθηκε σε κάθε κλάδο χρησιμοποιείται μόνον για την εξαγωγή των συντελεστών στάθμισης και δεν υπεισέρχεται στους υπολογισμούς αυτή καθαυτήν. Συνεπώς χρησιμοποιούνται οι καταναλισκόμενες ενέργειες του οικιακού, του βιομηχανικού τομέα και του τομέα των υπηρεσιών. Το άθροισμα των ενεργειών που καλύπτονται στους τρεις αυτούς τομείς είναι ίσο με :

$$E_{ολ} = E_{οικ} + E_{βιομ} + E_{υπηρ} \Leftrightarrow$$

$$E_{ολ} = 744.736 + 1.089.630 + 684.724 \Leftrightarrow$$

$$E_{ολ} = 2.519.090 \text{ GWh}$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι τρεις συντελεστές που αντιστοιχούν σε κάθε είδος φορτίου και παρουσιάζονται εδώ στρογγυλοποιημένοι στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο τους:

$$e_{οικ} = \frac{E_{οικ}}{E_{ολ}} = \frac{744.736}{2.519.090} = 0,30 \quad (2.1)$$

$$e_{βιομ} = \frac{E_{βιομ}}{E_{ολ}} = \frac{1.089.630}{2.519.090} = 0,43 \quad (2.2)$$

$$e_{εμπηρ} = \frac{E_{εμπηρ}}{E_{ολ}} = \frac{684.724}{2.519.090} = 0,27 \quad (2.3)$$

Η διάρκεια εμφάνισης των τιμών των φορτίσεων που περιλαμβάνει μια κλάση, η οποία στον πίνακα 6.2 έχει εκφραστεί σε ώρες, εκφράζεται στη συνέχεια σε ποσοστό επί τοις εκατό και προκύπτουν οι συντελεστές $f_{ωρ}$, οι οποίοι φαίνονται στον πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4: Χρονική διάρκεια των κλάσεων φόρτισης μέσα σε μία ημέρα σε ποσοστό επί τοις εκατό

Κλάση φόρτισης	Διάρκεια φόρτισης σε ποσοστό επί τοις εκατό (%)		
	Οικιακό	Βιομηχανικό	Εμπορικό
$0,75 < \text{Loading} \leq 1$	12,5	33,3	41,7
$0,5 < \text{Loading} \leq 0,75$	29,2	20,8	12,5
$0,25 < \text{Loading} \leq 0,5$	37,5	41,7	16,7
$0 \leq \text{Loading} \leq 0,25$	20,8	4,2	29,1

Το στοιχείο που βρίσκεται στην τελευταία γραμμή και την τελευταία στήλη του πίνακα παρουσιάζεται μετά τη στρογγυλοποίηση ίσο με 29,1, παρ' ότι η τιμή του,

όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς είναι ίση με 29,1667, προκειμένου το άθροισμα των στοιχείων της στήλης αυτής να ισούται με τη μονάδα, όπως ισχύει και στις προηγούμενες στήλες. Στους υπολογισμούς που έγιναν βεβαίως χρησιμοποιήθηκε η ακριβής αριθμητική τιμή όλων των στοιχείων.

Από τους παραπάνω συντελεστές προκύπτουν τελικά οι τιμές των συντελεστών στάθμισης για κάθε μία από τις τέσσερις κλάσεις φόρτισης, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned} \text{coef}_{\%i} &= t_{i,οικ} \cdot e_{οικ} + t_{i,βιομ} \cdot e_{βιομ} + t_{i,υπηρ} \cdot e_{υπηρ} \Leftrightarrow \\ \text{coef}_{\%i} &= \sum_{k=1}^3 t_{i,yk} \cdot e_{yk} \end{aligned} \quad (3)$$

όπου y_1, y_2 και y_3 : δείκτες που αναφέρονται στο οικιακό, το βιομηχανικό και το φορτίο του τομέα των υπηρεσιών αντίστοιχα

$t_{i,yk}$: τα στοιχεία του πίνακα 4

e_{yk} : οι συντελεστές οι οποίοι αντιστοιχούν σε κάθε είδος φορτίου y_k και

δίνονται από τις σχέσεις (2.1) έως (2.3)

Οι συντελεστές στάθμισης των τεσσάρων κλάσεων, οι οποίοι προκύπτουν από τις σχέσεις (3), φαίνονται στον πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5: Συντελεστές στάθμισης των τεσσάρων κλάσεων φόρτισης

Συντελεστές Στάθμισης	
coef _{100%}	0,29
coef _{75%}	0,21
coef _{50%}	0,34
coef _{25%}	0,16

Με τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών, τα οποία φαίνονται στον πίνακα 6.5, η σχέση (1) γίνεται:

$$Label = NLL + \sum_{i=1}^4 x_i^2 \cdot LL \cdot coef_{x_i} \Leftrightarrow$$

$$Label = NLL + 0,25^2 \cdot LL \cdot coef_{25\%} + 0,5^2 \cdot LL \cdot coef_{50\%} + 0,75^2 \cdot LL \cdot coef_{75\%} + 1^2 \cdot LL \cdot coef_{100\%} \Leftrightarrow$$

$$Label = NLL + 0,25^2 \cdot LL \cdot coef_{25\%} + 0,5^2 \cdot LL \cdot coef_{50\%} + 0,75^2 \cdot LL \cdot coef_{75\%} + LL \cdot coef_{100\%} \quad (4)$$

Η σχέση (4) δίνει την τιμή της μεταβλητής Label για οποιονδήποτε μετασχηματιστή, αν αντικατασταθούν οι μεταβλητές NLL και LL με τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου αντίστοιχα.

6.3 Καθορισμός των Ορίων των Κλάσεων

Εφόσον υπολογιστεί η τιμή της μεταβλητής Label για κάποιον μετασχηματιστή από τη σχέση (4), διαιρείται με μία σταθερά αναφοράς REF. Το πηλίκο που προκύπτει καθορίζει την κλάση στην οποία κατατάσσεται ο εν λόγω μετασχηματιστής. Η σταθερά αναφοράς REF εκφράζει απώλειες ισχύος σε W και υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$REF = C_o + 0,25^2 \cdot B_k \cdot coef_{25\%} + 0,5^2 \cdot B_k \cdot coef_{50\%} + 0,75^2 \cdot B_k \cdot coef_{75\%} + B_k \cdot coef_{100\%} \quad (5)$$

όπου C_o : η κλάση C_o των απωλειών κενού φορτίου, όπως καθορίζεται από το

$$EN 50464 [\Delta]^2. C_o = 610W, \text{ για } M/\Sigma 400 \text{ kVA}$$

B_k : η κλάση B_k των απωλειών φορτίου, όπως καθορίζεται από το

² Ο συνδυασμός $B_k C_o$ κατά το EN50464 αντιστοιχεί στο συνδυασμό CC' του HD428 [3, 10]

EN 50464 [Δ]. $B_k = 3850W$, για M/Σ 400 kVA

Η τιμή της σταθεράς REF, που προκύπτει από την σχέση (5) για μετασχηματιστή 400 kVA είναι περίπου ίση με:

$$REF = 2561 W$$

Ανάλογα με την τιμή του πηλίκου $Label/REF$ προσδιορίζεται η κλάση του μετασχηματιστή σύμφωνα με τα όρια των κλάσεων. Έχει υιοθετηθεί η συνηθισμένη σε ετικέτες ενεργειακής απόδοσης πρακτική των κλάσεων με ονόματα από το “A” στο “G”. Για τον καθορισμό των ορίων εξετάστηκε ένα σύνολο ομάδων ορίων. Οι κλάσεις στις οποίες κατατάχθηκαν οι μετασχηματιστές 400 kVA όλων των δυνατών συνδυασμών απωλειών κενού φορτίου (NLL) και απωλειών φορτίου (LL) κατά το EN 50464, για ορισμένες από τις ομάδες ορίων που μελετήθηκαν, παρουσιάζονται ενδεικτικά στον πίνακα 6.6. Στη συνέχεια, στον πίνακα 6.7, δίνεται η συχνότητα εμφάνισης της κάθε κλάσης για την αντίστοιχη ομάδα ορίων του πίνακα 6.6. Στις περιπτώσεις στις οποίες ο συνδυασμός των απωλειών ενός μετασχηματιστή τον τοποθετεί κοντά στο όριο μεταξύ δύο κλάσεων X και Y (για κάποια kVA μπορεί να είναι X και για κάποια άλλα Y), αυτός καταχωρείται ως “X/Y” και θεωρείται, για τους υπολογισμούς του πίνακα 6.7 ότι εμφανίζεται 0,5 φορές στην κλάση X και 0,5 φορές στην κλάση Y. Επιπλέον, όπως και στην περίπτωση της μελέτης της ομάδας του SEEDT, εισάγονται οι υποθετικοί μετασχηματιστές $A_{MDT}A_k$, $A_{MDT}B_k$, $A_{MDT}C_k$ και $A_{MDT}D_k$, προκειμένου να υπάρξει μία εικόνα της κατάταξης των μετασχηματιστών οι οποίοι θα κατασκευαστούν στο μέλλον και θα έχουν λιγότερες απώλειες κενού φορτίου. Οι μετασχηματιστές αυτοί θεωρείται ότι έχουν απώλειες κενού φορτίου ίσες με $NLL=200W$, τιμή κοντά στο 50% του A_o (=430W) και απώλειες φορτίου ίσες με εκείνες των A_k , B_k , C_k και D_k αντίστοιχα, όπως αυτές ορίζονται από το EN50464.

Πίνακας 6.6: Κλάσεις Μ/Σ 400kVA με βάση 8 ομάδες ορίων

Ομάδες Ορίων Μ/Σ ΙΕ βάση το EN 50464	1η:0.82, 0.92, 1.02, 1.12, 1.22	2η:0.83, 0.93, 1.03, 1.13, 1.23	3η:0.84, 0.94, 1.04, 1.14, 1.24	4η:0.85, 0.95, 1.05, 1.15, 1.25	5η:0.86, 0.96, 1.06, 1.16, 1.26	6η:0.86, 0.95, 1.04, 1.13, 1.22	7η:0.87, 0.98, 1.10, 1.19, 1.29	8η:0.85, 0.93, 1.01, 1.09, 1.17
A _{MDT} A _k	B	B	B	B	B	B	B	B
A _{MDT} B _k	C	C	B/C	B	B	B	B	B
A _{MDT} C _k	D	D	D	D	D	D	D	D
A _{MDT} D _k	G	G	G	G	F/G	G	F	G
A _o A _k	B	B	B	B	B	B	B	B
A _o B _k	D	C/D	C	C	C	C	C	C/D
A _o C _k	E	E	E	E	E	E	D	E
A _o D _k	G	G	G	G	G	G	G	G
B _o A _k	C	C	B/C	B/C	B	B	B	B/C
B _o B _k	D	D	D	D	C/D	D	C	D
B _o C _k	E/F	E	E	E	E	E	E	F
B _o D _k	G	G	G	G	G	G	G	G
C _o A _k	C	C	C	C	C	C	C	C
C _o B _k	D	D	D	D	D	D	D	D
C _o C _k	F	F	E/F	E/F	F	F	E	F
C _o D _k	G	G	G	G	G	G	G	G
D _o A _k	D	C/D	C/D	C	C	C	C	C/D
D _o B _k	E	E	E	D/E	D/E	E	D	E
D _o C _k	F	F	F	F	F	F	F	G
D _o D _k	G	G	G	G	G	G	G	G
E _o A _k	D	D	D	D	D	D	D	D/E
E _o B _k	E/F	E/F	E	E	E	E/F	E	F
E _o C _k	G	G	G	G	G	G	F	G
E _o D _k	G	G	G	G	G	G	G	G

Πίνακας 6.7: Συχνότητα εμφάνισης της κάθε κλάσης με βάση τις ομάδες ορίων του πίνακα 6.6

Ομάδες Ορίων Ετικέτα	1η	2η	3η	4η	5η	6η	7η	8η
B	2	2	3	3,5	4	4	4	3,5
C	3	4	3,5	3,5	3,5	3	4	2,5
D	6	5	4,5	4,5	4	4	5	4,5
E	3	3,5	4,5	4	3,5	3,5	3	2,5
F	3	2,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3	3
G	7	7	7	7	6,5	7	5	8
Σύνολο	24	24	24	24	24	24	24	24

Μεταξύ των ομάδων που φαίνονται στους ανωτέρω πίνακες καθώς και άλλων ομάδων τελικά επιλέχθηκαν τα όρια της ομάδας 7. Η επιλογή έγινε με βάση δύο κριτήρια. Πρώτον, οι γραμμές που αναπαριστούν τις κλάσεις θα πρέπει να διαχωρίζουν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη σαφήνεια τους διαφορετικούς συνδυασμούς απωλειών. Δεύτερον, εφόσον είναι δυνατόν, θα πρέπει να υπάρχουν σε κάθε κλάση το πολύ δύο επίπεδα απωλειών κενού φορτίου (NLL) για δεδομένες απώλειες φορτίου (LL) ή το πολύ δύο επίπεδα απωλειών φορτίου (LL) για δεδομένες απώλειες κενού φορτίου (NLL), ούτως ώστε να μπορεί η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης να λειτουργήσει έμπρακτα σαν εργαλείο διαφοροποίησης. Το δεύτερο κριτήριο δεν πληρείται στους μετασχηματιστές με απώλειες φορτίου, οι οποίες κατατάσσονται στην κατηγορία D_k σύμφωνα με το EN 50464. Η συντριπτική πλειονότητα των μετασχηματιστών αυτών κατατάσσεται στην κλάση G, η οποία περιλαμβάνει μετασχηματιστές με τις μικρότερες αποδόσεις ή, ισοδύναμα, τις μεγαλύτερες απώλειες ισχύος.

6.4 Περιγραφή και Παρουσίαση των Κλάσεων

Τα όρια που επιλέχθηκαν τελικά φαίνονται στον πίνακα 6.8 μαζί με τις κλάσεις που ορίζουν. Στην τρίτη στήλη αυτού του πίνακα περιγράφεται εν συντομία το επίπεδο της τεχνολογίας των μετασχηματιστών κάθε κλάσης.

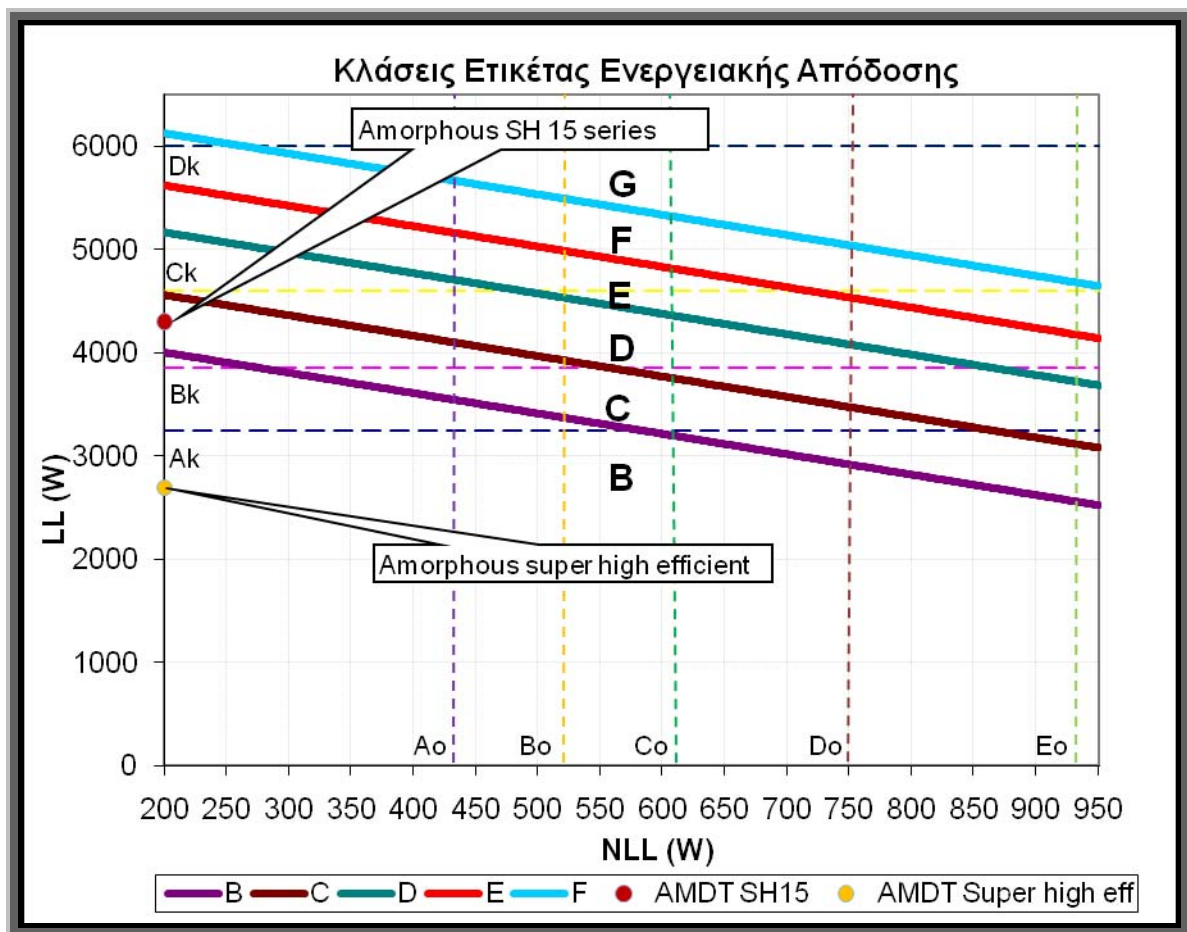
Πίνακας 6.8: Κλάσεις ενεργειακής κατηγοριοποίησης

Ετικέτα	Όρια κλάσεων	Επίπεδο τεχνολογίας των μετασχηματιστών
A	Κενή κλάση σήμερα	Πολύ προηγμένη τεχνολογία
B	$\frac{Label}{REF} \leq 0,87$	Αρκετά προηγμένη τεχνολογία (Μ/Σ με πυρήνα άμορφου σιδήρου)
C	$0,87 < \frac{Label}{REF} \leq 0,98$	Ενεργειακά προηγμένη τεχνολογία
D	$0,98 < \frac{Label}{REF} \leq 1,10$	Όχι εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία
E	$1,10 < \frac{Label}{REF} \leq 1,19$	Μέση παλούμενη τεχνολογία
F	$1,19 < \frac{Label}{REF} \leq 1,29$	Μέση χρησιμοποιούμενη τεχνολογία
G	$\frac{Label}{REF} > 1,29$	Η χειρότερη τεχνολογία σήμερα

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μελλοντική εξέλιξη των τεχνολογιών και, κατ' επέκταση, των αποδόσεων των μετασχηματιστών διανομής καθώς και το πώς οι βελτιωμένες αποδόσεις των νέων μετασχηματιστών θα αποτυπώνονται στην ετικέτα ενεργειακής κατηγοριοποίησης πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά την καθιέρωση μιας μεθόδου ενεργειακής κατηγοριοποίησης. Στην παρούσα μέθοδο, όπως και στο πρότυπο που πρότεινε η ομάδα του SEEDT project, μία κλάση (A) αφήνεται κενή, προκειμένου να εξυπηρετήσει το σκοπό αυτό, δηλαδή να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για τους νέους μετασχηματιστές με ακόμη πιο βελτιωμένες αποδόσεις. Η κλάση B περιλαμβάνει τους πιο αποδοτικούς μετασχηματιστές που υπάρχουν σήμερα, ο πυρήνας των οποίων είναι κατασκευασμένος από άμορφο σίδηρο. Οι υπόλοιπες κλάσεις περιλαμβάνουν τους υπόλοιπους μετασχηματιστές που πωλούνται ή χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι μετασχηματιστές με τις μεγαλύτερες απώλειες τοποθετούνται στις τελευταίες κλάσεις, δηλαδή σε εκείνες που είναι κοντά στην κλάση G, η οποία περιλαμβάνει

τους χειρότερους ως προς τις απώλειες ισχύος μετασχηματιστές που υπάρχουν σήμερα.

Στο σχήμα 6.2 απεικονίζεται το μοντέλο ενεργειακής ταξινόμησης που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία και στον πίνακα 6.9 παρουσιάζεται η κατάταξη των μετασχηματιστών διανομής με βάση τα ισχύοντα πρότυπα κατηγοριοποίησης, τις τρεις προτάσεις του SEEDT και την πρόταση που αναλύεται στην παρούσα εργασία για τον καθορισμό της ετικέτας ενεργειακής απόδοσης.



Σχήμα 6.2: Γραφική Απεικόνιση του Μοντέλου Ενεργειακής Ταξινόμησης για Μ/Σ 400 kVA

Όπως φαίνεται στον πίνακα 6.9, η πρόταση που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία είναι περισσότερο «ευαίσθητη» από την πρόταση 2 και, σε μικρό βαθμό, από την πρόταση 3 στις απώλειες φορτίου, ήτοι η μεταβολή των ετικετών για μία δεδομένη τιμή απωλειών κενού φορτίου είναι μεγαλύτερη στην πρότασή μας από εκείνη των προτάσεων 2 και 3 του SEEDT. Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι πιο ακριβής ως προς την ενεργειακή ταξινόμηση εν συγκρίσει με τις προτάσεις του SEEDT. Κατά συνέπεια θα διευκολύνει ακόμη

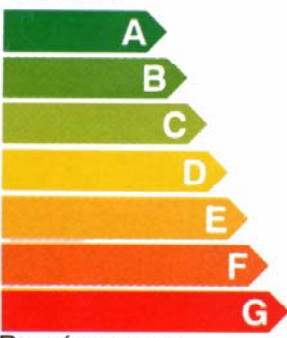



περισσότερο από τις άλλες μεθόδους ενεργειακής ταξινόμησης τους υποψηφίους αγοραστές μετασηματιστών διανομής. Η καθιέρωσή της σε συνδυασμό με λήψη μιας σειράς μέτρων, όπως η εισαγωγή ενός υποχρεωτικού επιπέδου ελάχιστης ενεργειακής απόδοσης θα δώσει σημαντική ώθηση στην αγορά μετασηματιστών υψηλής απόδοσης.

Πίνακας 6.9: Σύγκριση Προτάσεων Ετικέτας Ενεργειακής Απόδοσης

EN 50464	HD 428 ή techspeak	Πρόταση 1	Πρόταση 2	Πρόταση 3	Νέα Πρόταση
A _{MDT} A _k		B+/B0	B	B	B
A _{MDT} B _k	C-AMDT	B0	B	B	B
A _{MDT} C _k	A-AMDT	B-	B	C/D	D
A _{MDT} D _k		B-	B/C	E	F
A _o A _k		C0	C	B	B
A _o B _k	CC' -30%	C0	C/D	C	C
A _o C _k		C-	D/E	E	D
A _o D _k		C-	F	G	G
B _o A _k		D0	C/D	C	B
B _o B _k		D0	D	D	C
B _o C _k		D0	E	E	E
B _o D _k		D-	F/G	G	G
C _o A _k		E+	D	C	C
C _o B _k	CC'	E0	E	D	D
C _o C _k	AC'	E0	F	F	E
C _o D _k	BC'	E0	G	G	G
D _o A _k		F+/G+	E	D	C
D _o B _k	CB'	F+/G+	F	E	D
D _o C _k	AB'	F0/G0	F/G	F	F
D _o D _k	BB'	F0/G0	G	G	G
E _o A _k		G+	F	E	D
E _o B _k	CA'	G+	G	F	E
E _o C _k	AA'	G+	G	G	F
E _o D _k	BA'	G0	G	G	G

6.5 Η Ετικέτα Ενεργειακής Απόδοσης

Η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής θα πρέπει να περιλαμβάνει ένα μέρος στο οποίο θα καθορίζεται το όνομα του κατασκευαστή, το όνομα της μάρκας, το μοντέλο καθώς και η ονομαστική ισχύς, η οποία είναι καθοριστικό μέγεθος για έναν μετασχηματιστή και ένα μέρος στο οποίο θα φαίνεται η ενεργειακή απόδοση του μετασχηματιστή με ένα από τα γράμματα A έως G. Στην ετικέτα μπορούν ακόμη να δοθούν πληροφορίες για άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή, εκτός από την ενεργειακή απόδοση, όπως συμβαίνει σε άλλα προϊόντα, για παράδειγμα στα πλυντήρια, στην ετικέτα των οποίων αναγράφεται το επίπεδο του θορύβου. Στην ετικέτα των μετασχηματιστών διανομής μπορεί να συμπεριληφθεί μία ένδειξη για την στάθμη ηχητικής ισχύος (sound power level: L_{WA}), σε dB(A), που είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος, ιδιαίτερα για μετασχηματιστές που βρίσκονται σε οικιστικές περιοχές. Συνήθως όμως επαρκείς πληροφορίες για την στάθμη ηχητικής ισχύος περιέχονται στους καταλόγους του μετασχηματιστή ή, επιπλέον, αναγράφονται με σαφήνεια στην μεταλλική πινακίδα που φέρει, όπως συμβαίνει με τις διαστάσεις του ή το βάρος του που είναι επίσης καθοριστικά μεγέθη για την επιλογή ενός μετασχηματιστή. Μια ετικέτα ενεργειακής απόδοσης φαίνεται στο σχήμα 6.3.

Energie	
Fabricant Modèle	MARQUE
Économe  <p>Peu économe</p>	
Consommation d'énergie kWh/an <small>Sur la base du résultat obtenu pour 24h dans des conditions d'essai normalisées</small> <small>La consommation réelle dépend des conditions d'utilisation et de la localisation de l'appareil</small>	350
Capacité de denrées fraîches Capacité de denrées congelées	200 100 
Bruit (dB(A) par picowatt) <small>Une fiche d'information détaillée figure dans la brochure</small> <small>Norme EN 153 mai 1999 Directive II 90/269 CEE relative à l'étiquetage des réfrigérateurs</small>	

Σχήμα 6.3: Ετικέτα Ενεργειακής Απόδοσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

Οι μετασχηματιστές διανομής παρά τον υψηλό συντελεστή απόδοσής τους ευθύνονται για απώλειες ίσες περίπου με το 2% της συνολικά παραγόμενης ενέργειας. Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης των 27 το 2004 οι απώλειες των μετασχηματιστών διανομής ήταν 33,4 TWh. Ο περιορισμός των απωλειών αυτών με τη χρήση αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών θα αποφέρει πολύ σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Με τους σημερινούς ρυθμούς αντικατάστασης των παλιών μετασχηματιστών, αν στο εξής αγοράζονται μόνο μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης, σε 15 χρόνια η ετήσια μείωση των απωλειών σε σχέση με τα σημερινά δεδομένα θα φτάσει τις 11,6 TWh.

Οι διαθέσιμοι σήμερα μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης με πυρήνα από άμορφο σίδηρο, είναι πλέον αρκετά οικονομικοί. Αν ληφθεί υπ' όψιν το κόστος κύκλου ζωής, οι μετασχηματιστές αυτοί αποδεικνύονται πιο οικονομικοί από τους συμβατικούς λόγω της εξοικονομούμενης ενέργειας κατά τη λειτουργία τους, που συνεπάγεται μείωση του κόστους λειτουργίας τους. Παρά το γεγονός αυτό, η χρήση τους στην Ευρωπαϊκή Ένωση παραμένει εξαιρετικά περιορισμένη σε αντίθεση με πολλές χώρες εκτός Ευρώπης.

Ένα σύνολο μέτρων και πολιτικών πρέπει να υιοθετηθούν σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, προκειμένου να προωθηθεί η χρήση των αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών. Τα μέτρα αυτά, που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 3, θα αποδώσουν περισσότερο αν εφαρμοστούν συνδυαστικά.

Η σήμανση ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής θα συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην προώθηση των μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης. Στην αγορά

των μετασχηματιστών διανομής εμπλέκονται μηχανικοί, σύμβουλοι, μάνατζερ και άλλοι, οι οποίοι συχνά έχουν περιορισμένες τεχνικές γνώσεις στους μετασχηματιστές διανομής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, όταν αγοράζεται ένας μετασχηματιστής πολλές φορές να παραμελείται το ζήτημα των απωλειών και να γίνεται η επιλογή ακολουθώντας τις παραδοσιακές συνήθειες. Η σήμανση ενεργειακής απόδοσης θα δώσει βοήθεια όσους έχουν έλλειμμα τεχνικών γνώσεων, να διαμορφώσουν μια εικόνα για την ενεργειακή απόδοση του μετασχηματιστή και μάλιστα με μεγάλη ευκολία. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν θα είναι πολύ χρήσιμη και για τη μερίδα των εμπλεκόμενων στην αγορά των μετασχηματιστών με τεχνική κατάρτιση. Συνεπώς η σήμανση ενεργειακής απόδοσης θα συμβάλει στην αύξηση του ποσοστού των αγοραστών που προτιμούν αποδοτικούς μετασχηματιστές και θα προωθήσει την διείσδυσή τους στην Ευρωπαϊκή αγορά.

Με την προτεινόμενη στο κεφάλαιο 6 μεθοδολογία προσδιορίζεται η ετικέτα ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών διανομής λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες τις πιθανές τιμές φόρτισης ενός μετασχηματιστή. Προκειμένου οι τιμές της φόρτισης, που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία υπολογισμού της μεταβλητής που προσδιορίζει την ετικέτα, να αποδίδουν όσο το δυνατόν περισσότερο την πραγματική εικόνα των μετασχηματιστών, χρησιμοποιούνται συντελεστές στάθμισης, που βασίζονται στο πραγματικό προφίλ φορτίου των τριών βασικών τύπων καταναλωτών (βιομηχανία, οικιακός και εμπορικός τομέας).

Η ετικέτα που προκύπτει από τη μεθοδολογία του κεφαλαίου 6 είναι πιο ακριβής από τις προτάσεις του SEEDT, διότι η τιμή της μεταβλητής που καθορίζει την ετικέτα και κατ'επέκταση η ετικέτα επηρεάζονται περισσότερο σε αυτήν τη μεθοδολογία από τις απώλειες φορτίου. Έτσι, για δεδομένες απώλειες κενού φορτίου η μεταβολή της ετικέτας για τις διάφορες τιμές απωλειών φορτίου είναι πιο έντονη εν συγκρίσει με τις άλλες προτάσεις. Το γεγονός αυτό την καθιστά πιο αξιόπιστη μεθοδολογία ενεργειακής ταξινόμησης. Παρά το γεγονός ότι οι απώλειες κενού φορτίου ευθύνονται για τα δύο τρίτα των συνολικών απωλειών στους μετασχηματιστές διανομής, οι απώλειες φορτίου παραμένουν σημαντικές και πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την αγορά ενός μετασχηματιστή. Επιπλέον, χάρη στους συντελεστές στάθμισης που χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία του κεφαλαίου 6, στους υπολογισμούς υπεισέρχονται οι απώλειες φορτίου με αρκετά καλή προσέγγιση της πραγματικής τους εικόνας.

Τέλος, η μεθοδολογία που προτείνεται στο κεφάλαιο 6 μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την Επιτροπή (Commission) της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία επεξεργάζεται την ένταξη των μετασχηματιστών διανομής στην κοινοτική οδηγία “Ecodesign Directive”. Η οδηγία αυτή θέτει μία σειρά από κανόνες που διέπουν την ενεργειακή συμπεριφορά των συσκευών που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια. Ήδη περιλαμβάνεται σε αυτήν η σήμανση ηλεκτρικών οικιακών συσκευών. Η σήμανση των μετασχηματιστών διανομής, η οποία θα περιληφθεί στην Ecodesign Directive μπορεί να στηριχτεί στο μοντέλο ενεργειακής ταξινόμησης και προσδιορισμού της ετικέτας ενεργειακής απόδοσης που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική.

Βιβλιογραφία

- [1] Bidstrup N., “Classification of circulators”, Report by Working Group 13 in Europump, 2003.
- [2] Cenelec, EN 50464-1, “Three-phase oil immersed distribution transformers 50Hz”, 2005.
- [3] Cenelec, HD 428 S1, “Three-phase oil immersed distribution transformers 50Hz”, Part 1, 1992 with later changes.
- [4] Chapman S. J., «Ηλεκτρικές Μηχανές AC – DC», 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2003.
- [5] European Copper Institute, “The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers”, 1999.
- [6] Hasegawa R., “Present status of amorphous soft magnetic alloys”, J. Magnetism and Magnetic Materials, 215-216, 240-245, 2000
- [7] Hasegawa R., Pruess D.C., “Impact of Amorphous Metal Based Transformers on Efficiency and Quality of Electric Power Distribution, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, BC, Canada, Vol. 3, pp. 1820-1823, 2001.
- [8] <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>
- [9] <http://www.copper.org/homepage.html>
- [10] Irrek W., Topalis F., Targosz R., Rialhe A., Frau J., “Policies and Measures Fostering Energy-Efficient Distribution Transformers”, Report (Deliverable No. 6) from the EU-IEE project “Strategies for development and diffusion of energy-efficient distribution transformers-SEEDT”, Wuppertal, June 2008.
- [11] Ogawa Y., Naoe M., Yoshizawa Y., R. Hasegawa, “Magnetic properties of high B_s Fe-based amorphous material”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, volume 304, issue 2, September 2006, p. e675-e677.

- [12] Papathanassiou S., Hatziaargyriou N., Strunz K., “A Benchmark Low Voltage Microgrid Network”, Proc. CIGRE Symposium “Power Systems with Dispersed Generation”, Athens, Greece, April 2005.
- [13] Polish Copper Promotion Centre and European Copper Institute, “Selecting Energy Efficient Distribution Transformers, A Guide for Achieving Least-Cost Solutions”, June 2008.
- [14] SEEDT, WP 4 Report (Deliverable D9), “Analysis of potential for energy savings”, June 2008.
- [15] Targosz R. et al, “The potential for global energy savings from high efficiency distribution transformers”, European Copper Institute, February 2005.
- [16] Targosz R., Topalis F., “Analysis of existing situation of energy efficient transformers – technical and non technical solutions”, Report (Deliverable No. 1) from the EU-IEE project “Strategies for development and diffusion of energy-efficient distribution transformers-SEEDT”, 2008
- [17] Topalis F., Irrek W., Targosz R., “Strategies for development and diffusion of energy-efficient distribution transformers”, Project Report, July 2008.
- [18] Βουρνάς Κ., Κονταξής Γ., «Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2001
- [19] Γεωργιλάκης Π., Χατζηαργυρίου Ν., «Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών διανομής», Τεχνικά Χρονικά ΙΙΙ, 20(1-2), 51-62,2000.
- [20] Ντοκόπουλος Π., «Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 2005.
- [21] Παπαδόπουλος Μ. Π., «Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Ι», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1994
- [22] Ραϊτίσιος Π. Ε., «Μελέτη Μετασχηματιστών», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα 2000.
- [23] Τεγόπουλος Ι. Α., «Ηλεκτρικάί μηχαναί, Μέρος Α’, Ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενεργείας», Β’ Έκδοση, Αθήνα 1976.

[24] Τεγόπουλος Ι. Α., «Ηλεκτρικές μηχανές, Μέρος Β', Μόνιμη κατάσταση», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.