



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ &
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ
ΑΠΟΔΟΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ Α. ΠΑΛΛΑΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ

Χανιά, 2007

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεωργιάκη Παύλο για την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε, καθώς και για τη διαρκή ενθάρρυνση και την εμπιστοσύνη που επέδειξε στην προσπάθειά μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Δουλάμη Αναστάσιο και το Λέκτορα κ. Νικολό Ιωάννη, οι οποίοι με τίμησαν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν ως μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Τέλος, ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που είναι πάντα δίπλα μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών. Στόχος της εργασίας είναι η αναλυτική παρουσίαση μεθόδων για τον προσδιορισμό των πλέον οικονομικών και ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών λαμβάνοντας υπόψιν την εξοικονόμηση της ενέργειας. Οι χρήστες των μετασχηματιστών έχουν ένα εργαλείο για τον συνυπολογισμό του κόστους των απωλειών και του κόστους προμήθειας των μετασχηματιστών.

Αρχικά η εργασία αυτή προσφέρει στους χρήστες των μετασχηματιστών τις αναγκαίες θεμελιώδεις αρχές που διέπουν τους μετασχηματιστές, τα συστατικά τους, τα χαρακτηριστικά τους και την λειτουργία τους. Επίσης περιλαμβάνει τις απώλειες των μετασχηματιστών (απώλειες φορτίου και απώλειες κενού φορτίου) και τις δυνατότητες περιορισμού τους.

Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού της αξίας των απωλειών και του κόστους του μετασχηματιστή. Η μελέτη περιλαμβάνει τη σχέση που συνδέει το κόστος του μετασχηματιστή με το κόστος των απωλειών.

Στο κεφάλαιο 5 αναπτύσσουμε τις μεθόδους για την αξιολόγηση των εναλλακτικών προσφορών μετασχηματιστών και για την ικανοποίηση της ανάγκης για εξοικονόμηση χρημάτων και ενέργειας. Παρέχονται τα βήματα που απαιτούνται για την επιλογή του πιο αποδοτικού από οικονομικής άποψης μετασχηματιστή σε όλη τη διάρκεια ζωής του.

Στη συνέχεια, η εργασία παρουσιάζει τις επιλογές της αντικατάστασης ενός μετασχηματιστή καθώς και το πότε θα πρέπει να γίνεται η αντικατάσταση αυτή. Τέλος, παρουσιάζει την προσπάθεια που γίνεται σήμερα για μείωση των απωλειών και για την κατασκευή ενεργειακά πιο αποδοτικών μετασχηματιστών.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μετασχηματιστές, απώλειες φορτίου, απώλειες κενού φορτίου, υπολογισμός απωλειών, κόστος απωλειών, οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών, αντικατάσταση μετασχηματιστή, μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

ABSTRACT

In the present thesis, economic evaluation of transformers is presented. The purpose of this thesis is to analytically present the various methods for evaluating the most cost effective and energy efficient transformers, taking into account the savings in energy over time. The transformer users have a tool in order to simultaneously evaluate the cost of losses and the transformer purchasing cost.

At first, this thesis provides the transformer users with the necessary fundamentals on transformer theory, components, characteristics and operation. Furthermore, it includes the losses in transformers (load losses and no load losses) and how to reduce them.

After that, we learn how to calculate the value of losses and transformer cost. The study includes the relationship between the transformer cost and the cost of losses.

At chapter 5, we develop the methods for evaluating the alternative transformer offers and for meeting the need to save money and energy. It provides the required steps for the selection of transformers that are cost effective over the life cycle of the transformer.

Furthermore, the present study concerns the options for replacing the transformer and how to determine whether we should replace or refurbish an existing transformer. Finally, it contains the latest advancement in the ongoing effort to improve the efficiency of transformers.

KEYWORDS

Transformers, load losses, no load losses, losses evaluation, cost of losses, economic evaluation of transformers, transformer replacement, energy efficient transformers.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1.	Η σημασία του υπολογισμού των απωλειών στους μετασχηματιστές	1
1.2.	Μέθοδοι οικονομικής αξιολόγησης	2
1.3.	Περιεχόμενα της εργασίας	3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

2.1.	Γενικά	5
2.1.1.	Τύποι μετασχηματιστών	5
2.1.1.1.	Μετασχηματιστές ισχύος	5
2.1.1.2.	Μετασχηματιστές διανομής	5
2.1.1.3.	Αυτομετασχηματιστές	6
2.1.2.	Δίκτυο ηλεκτρισμού – Επιχειρήσεις ηλεκτρισμού	6
2.2.	Η αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή	8
2.3.	Συστατικά του μετασχηματιστή	8
2.3.1.	Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	9
2.3.1.1.	Ισχύς	9
2.3.1.2.	Σύνθετη αντίσταση	9
2.3.1.3.	Ο λόγος μετασχηματισμού	9
2.3.1.4.	Επίπεδο μόνωσης	10
2.3.2.	Μηχανικά χαρακτηριστικά	10
2.3.2.1.	Πυρήνας	10
2.3.2.2.	Πηνίο	11
2.3.2.3.	Δοχείο	11
2.3.2.4.	Σύστημα ψύξης	11
2.3.2.5.	Μονωτήρας διέλευσης	13
2.3.2.6.	Μονωτικό μέσο	13
2.4.	Εξαρτήματα μετασχηματιστή	13
2.5.	Μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης	16
2.6.	Απόδοση μετασχηματιστή	17
2.7.	Βιβλιογραφία	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥΣ

3.1.	Απώλειες μετασχηματιστή	21
3.2.	Απώλειες κενού φορτίου	21
3.2.1.	Απώλειες υστέρησης	21
3.2.2.	Απώλειες δινορευμάτων	23
3.3.	Απώλειες φορτίου	24
3.3.1.	Απώλειες χαλκού	24
3.3.2.	Απώλειες δινορευμάτων αγωγού	25
3.4.	Βοηθητικές απώλειες	25
3.5.	Προσδιορισμός των απωλειών κενού φορτίου	26
3.6.	Προσδιορισμός των απωλειών φορτίου	26
3.7.	Μέθοδοι βελτίωσης απόδοσης μετασχηματιστών	27
3.7.1.	Βελτίωση απόδοσης μέσω της σχεδίασης	27
3.7.2.	Βελτίωση απόδοσης μέσω της κατασκευής	29
3.7.3.	Βελτίωση απόδοσης μέσω του βοηθητικού εξοπλισμού	30
3.7.4.	Βελτίωση απόδοσης μέσω του μεγέθους του	30
3.7.5.	Βελτίωση απόδοσης μέσω της λειτουργίας του	30

3.7.6.	Βελτίωση απόδοσης μέσω της συντήρησής του	30
3.7.7.	Βελτίωση απόδοσης με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης	31
3.8.	Βιβλιογραφία	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

4.1.	Η αξία των απωλειών	33
4.2.	Υπολογισμός του συντελεστή A σε μετασχηματιστές διανομής	33
4.3.	Υπολογισμός του συντελεστή A σε μετασχηματιστές ισχύος	37
4.4.	Υπολογισμός του συντελεστή B σε μετασχηματιστές διανομής και ισχύος	37
4.5.	Υπολογισμός της αξίας των απωλειών του βοηθητικού εξοπλισμού σε μετασχηματιστές ισχύος	39
4.6.	Η επίδραση του κόστους των απωλειών στον αγοραστή και στον κατασκευαστή	39
4.7.	Η αβεβαιότητα του κόστους της ενέργειας και παράγοντες που την επηρεάζουν	40
4.8.	Βιβλιογραφία	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

5.1.	Κόστος μετασχηματιστή	43
5.2.	Ο κύκλος ζωής του μετασχηματιστή	43
5.3.	Η χρονική αξία του χρήματος	45
5.4.	Η μέθοδος του ισοδύναμου κόστους επένδυσης	45
5.4.1.	Η μέθοδος του ισοδύναμου κόστους επένδυσης συμπεριλαμβάνοντας την παρούσα αξία των μελλοντικών απωλειών	48
5.5.	Η μέθοδος του ισοκατανεμημένου ετήσιου κόστους	52
5.5.1.	Η μέθοδος του ισοκατανεμημένου ετήσιου κόστους με γνωστό το φορτίο αιχμής ανά έτος	52
5.6.	Η μέθοδος της παρούσας αξίας σε ισοκατανεμημένα ετήσια κόστη	54
5.7.	Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών μέσω των απωλειών φορτίου και των απωλειών κενού φορτίου	54
5.7.1.	Απευθείας σύγκριση δυο μετασχηματιστών με τη χρήση του συντελεστή A	56
5.8.	Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών με την βοήθεια του εσωτερικού βαθμού απόδοσης	57
5.9.	Η αποτίμηση των βοηθητικών απωλειών σε μετασχηματιστές υποσταθμών	60
5.10.	Band of Equivalent	60
5.11.	Η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας	61
5.12.	Οικονομική αποτίμηση των απωλειών στο περιβάλλον	62
5.13.	Οικονομική αποτίμηση της αξιοπιστίας του μετασχηματιστή	63
5.14.	Βιβλιογραφία	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

6.1.	Η επιλογή της αντικατάστασης ενός μετασχηματιστή	67
6.2.	Επιλογές αντικατάστασης	69
6.2.1.	Νέα περιέλιξη	69
6.2.2.	Νέα μόνωση	70
6.2.3.	Ανακαίνιση των εξαρτημάτων	71
6.3.	Νέος μετασχηματιστής	71
6.4.	Συντήρηση	72
6.4.1.	Έλεγχος λαδιού	72
6.4.2.	Έλεγχος μόνωσης τυλίγματος	74
6.5.	Μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας	74
6.6.	Βιβλιογραφία	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

7.1.	Σχεδιασμός αγωγών	77
7.2.	Η χρήση χάλυβα πυριτίου στον πυρήνα	78
7.3.	Η χρήση άμορφου σιδήρου στον πυρήνα	79
7.4.	Μετασχηματιστές με συντελεστή K	83
7.5.	Βιβλιογραφία	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1.	Συμπεράσματα της εργασίας	87
------	---------------------------	----

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Εξετάζεται τόσο το οικονομικό όσο και το περιβαλλοντικό όφελος από τη χρήση των μετασχηματιστών αυτών. Εξετάζεται το κόστος των απωλειών σε σύγκριση με την τιμή αγοράς τους ώστε να μπορούμε να προσδιορίσουμε κατά πόσο μας συμφέρει ή όχι η χρήση των μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

1.1. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Οι ηλεκτρικές εταιρίες βελτιώνουν την αποδοτικότητα των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας τις απώλειες. Οι βιομηχανικοί και οι εμπορικοί χρήστες της ηλεκτρικής ενέργειας επίσης βελτιώνουν την αποδοτικότητα των δικτύων διανομής τους, μειώνοντας τις απώλειες.

Οι απώλειες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: σε απώλειες κενού φορτίου και σε απώλειες φορτίου. Οι απώλειες κενού φορτίου συμβαίνουν συνεχώς και είναι ανεξάρτητες από το φορτίο, ενώ οι απώλειες φορτίου εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται σε έναν μετασχηματιστή. Οι απώλειες εμφανίζονται σε ένα μετασχηματιστή με τη μορφή θερμότητας. Η θερμότητα μειώνει τη διάρκεια ζωής του και επίσης τη μεταφορική του ισχύ.

Η διάρκεια ζωής στους μετασχηματιστές συνήθως κυμαίνεται από 25 έως 35 χρόνια. Οι απώλειες συνοδεύουν ένα μετασχηματιστή σε όλη τη διάρκεια της ζωής του και μάλιστα αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. Η εκτίμησή τους αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την απόφαση της αντικατάστασης ή της ανακαίνισης ενός μετασχηματιστή.

Από την άλλη πλευρά η ακριβής εκτίμηση των απωλειών ενδιαφέρει και τους κατασκευαστές, καθώς,

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

Η ακριβής πρόβλεψη των απωλειών είναι αντικείμενο συνεχούς μελέτης και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία.

Η αντικατάσταση των μετασχηματιστών από μετασχηματιστές με υψηλότερη ενεργειακή απόδοση αποτελεί το ζητούμενο για πολλούς χρήστες. Η σύγκριση δεν πρέπει να γίνεται με κριτήριο μόνο το οικονομικό όφελος αλλά και με κριτήριο το περιβαλλοντικό όφελος. Η μείωση των εκπομπών CO₂ είναι αναγκαία για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη μας. Οι εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με τη χρήση της

ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται ότι είναι για την Ελλάδα 0,85 kg CO₂ ανά kWh χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Από το 2005 και σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο, για κάθε επιπρόσθετο τόνο εκπομπής από το όριο που έχει θέσει η κυβέρνηση για την εκάστοτε επιχείρηση, υπάρχει πρόστιμο 40 Ευρώ. Την περίοδο 2008 - 2012 το πρόστιμο αυτό θα φτάσει τα 100 Ευρώ για κάθε επιπλέον τόνο.

Η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών δεν απαιτεί τη γνώση του τρόπου με τον οποίο έχουν σχεδιαστεί, ούτε και των μεθόδων παραγωγής με τις οποίες έχουν κατασκευαστεί. Εκείνο που είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο χρήστης είναι ο τρόπος με τον οποίο θα πρέπει να επιλέξει τον περισσότερο οικονομικό και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικό μετασχηματιστή.

1.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Από τη δεκαετία του 1970, το αυξημένο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει τις ηλεκτρικές εταιρίες να απαιτούν από τους κατασκευαστές μετασχηματιστών να παράγουν περισσότερο αποδοτικούς μετασχηματιστές, αν και μερικές μικρές ηλεκτρικές εταιρίες καθώς και βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες μετασχηματιστών συνεχίζουν να χρησιμοποιούν φθηνότερους μη αποδοτικούς μετασχηματιστές.

Σήμερα η βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών παρέχει στους αγοραστές ένα πλήθος επιλογών αποδοτικών μετασχηματιστών. Η εργασία περιλαμβάνει αρκετές μεθόδους για την οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών και τα κριτήρια που πρέπει να συνυπολογίζουμε για την σωστή επιλογή τους. Η εξοικονόμηση χρημάτων και ενέργειας από τη σύγκριση των εναλλακτικών προτάσεων αποτελεί το ζητούμενο της εργασίας αυτής. Γνωρίζοντας το κόστος σε όλη τη διάρκεια ζωής του, ο αγοραστής μπορεί να προσδιορίσει πια αγορά είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα για αυτόν.

Η κατανόηση των οικονομικών παραμέτρων του μετασχηματιστή είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση του κόστους του μετασχηματιστή ως προς την απόδοσή του. Όπως σε κάθε οικονομική ανάλυση έτσι και για το μετασχηματιστή πρέπει να αξιολογηθεί το χρηματικό κόστος σε όλη τη διάρκεια ζωής του. Οι περισσότεροι βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες δεν αξιολογούν το κόστος των απωλειών. Ο λόγος είναι ότι προμηθεύονται μετασχηματιστές σε μικρές ποσότητες και επιπλέον δεν τους αγοράζουν απευθείας από τους κατασκευαστές αλλά μέσω αντιπροσώπων.

Η εργασία περιλαμβάνει μεθόδους, σύμφωνα με τις οποίες οι αγοραστές μπορούν με απλά βήματα να εκτιμήσουν το κόστος των απωλειών και να το συγκρίνουν με το αρχικό κόστος αγοράς. Στη συνέχεια μπορούν να συγκρίνουν τα αποτελέσματά τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από άλλους μετασχηματιστές, έτσι ώστε να αποφασίσουν τον πιο κατάλληλο για αυτούς μετασχηματιστή. Επίσης περιλαμβάνονται και πιο σύνθετες μέθοδοι που απευθύνονται σε πιο εξειδικευμένους χρήστες μετασχηματιστών και τους παρέχουν τα απαραίτητα εργαλεία για τον προσδιορισμό της βέλτιστης επιλογής. Όλες οι μέθοδοι που προτείνονται έχουν ως κοινό παρανομαστή το ελάχιστο κόστος κατοχής (TOC). Αυτό συμβαίνει διότι μας ενδιαφέρει η σύγκριση να γίνεται σε κοινή βάση παραμέτρων. Τέλος η αβεβαιότητα αλλά και η δυσκολία εκτέλεσης μιας μεθόδου είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τον αγοραστή για το ποια τελικά μέθοδο θα εφαρμόσει.

Η οικονομική αξιολόγηση σε ένα μετασχηματιστή συνδέεται άμεσα και με την οικονομική αποτίμηση των απωλειών στο περιβάλλον αλλά και με την αξιοπιστία του μετασχηματιστή.

1.3. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα κεφάλαια της εργασίας έχουν την ακόλουθη δομή:

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται οι τύποι των μετασχηματιστών και τα συστατικά τους. Αναφέρουμε την αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή καθώς και τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύονται οι απώλειες των μετασχηματιστών και παρουσιάζονται μέθοδοι για την μείωσή τους, έτσι ώστε να έχουμε αύξηση της απόδοσης των μετασχηματιστών.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται αναφορά στο κόστος των απωλειών. Ο ακριβής προσδιορισμός του κόστους των απωλειών αποτελεί τη βασική παράμετρο της αξιολόγησής τους. Ο υπολογισμός τους πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις περιπτώσεις των απωλειών που λαμβάνουν χώρα σε έναν μετασχηματιστή και επίσης η αποτίμησή τους σχετίζεται ανάλογα με το χρήστη. Αν πρόκειται δηλαδή για βιομηχανικό και εμπορικό χρήστη ή για εταιρία παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρατίθεται η οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών. Εκτός από το θεωρητικό μέρος, αναπτύσσονται παραδείγματα για την πλήρη κατανόηση των μεθόδων αυτών. Η οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών δεν περιορίζεται μόνο στο κόστος των απωλειών αλλά περιλαμβάνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους και την αξιοπιστία τους. Επομένως ο αγοραστής έχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των κριτηρίων για την σωστή επιλογή της αγοράς ενός μετασχηματιστή.

Στο **Κεφάλαιο 6** περιγράφονται οι επιλογές της πλήρους αντικατάστασης ή της επισκευής ενός μετασχηματιστή. Επίσης, μέσω της συντήρησής του μας δίνονται οι απαραίτητες πληροφορίες τόσο για την απόδοσή του όσο και για την αξιοπιστία του.

Το **Κεφάλαιο 7** αναφέρεται στην εξέλιξη της τεχνολογίας στους μετασχηματιστές και στις τάσεις που διαμορφώνονται για ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη κατασκευής μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 8** παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και εφαρμογές των προηγούμενων κεφαλαίων.

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Οι μετασχηματιστές (Μ/Σ) είναι ηλεκτρικές μηχανές, οι οποίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε ηλεκτρική ενέργεια εξόδου με διαφορετικό επίπεδο τάσης, μικρότερο ή μεγαλύτερο της τάσης εισόδου, διατηρώντας ίδια τη συχνότητα. Ο μετασχηματιστής επιτρέπει τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας με τρόπο απλό και πολύ οικονομικό, αφού η απόδοση του είναι μεγαλύτερη από 95%.

Η παροχή ενέργειας στους καταναλωτές χωρίς τους μετασχηματιστές θα ήταν αδύνατη κι αυτό διότι η τάση στους ακροδέκτες μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ μεγάλη. Σκοπός του μετασχηματιστή είναι η προσαρμογή της ηλεκτρικής ενέργειας στην εκάστοτε τάση.

Επίσης στις γραμμές μεταφοράς υπάρχουν απώλειες που είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος. Επομένως θα πρέπει το ρεύμα να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, έτσι ώστε οι απώλειες να είναι ελάχιστες. Η επίτευξη του στόχου αυτού γίνεται με ανύψωση της τάσης έτσι ώστε να μεταφερθεί η επιθυμητή ισχύς.

2.1.1. Τύποι Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με:

- (α) τη χρήση,
- (β) την ψύξη,
- (γ) το μονωτικό υλικό,
- (δ) την κατασκευή του πυρήνα.

Υπάρχουν ποικίλοι τύποι μετασχηματιστών. Οι τρεις κυριότεροι τύποι είναι οι μετασχηματιστές ισχύος, οι μετασχηματιστές διανομής και οι αυτομετασχηματιστές.

2.1.1.1. Μετασχηματιστές ισχύος

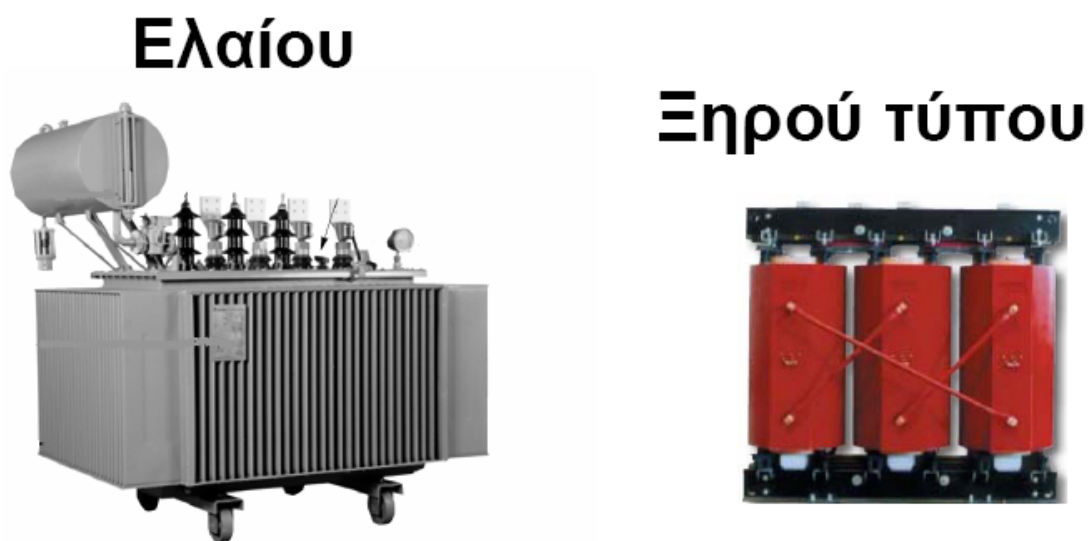
Χρησιμοποιούνται στους σταθμούς παραγωγής για την ανύψωση της τάσης και στους υποσταθμούς (Υ/Σ) μεταφοράς, είτε για την ανύψωση ή για τον υποβιβασμό της τάσης μέχρι τη μέση τάση (ΜΤ). Συχνότητα λειτουργίας τους είναι συνήθως η συχνότητα των 50 Hz. Οι μετασχηματιστές ισχύος που τοποθετούνται σε υποσταθμούς αναφέρονται και ως μετασχηματιστές υποσταθμών. Η ισχύς τους είναι συνήθως από 2 MVA και πάνω, [2.1].

2.1.1.2. Μετασχηματιστές διανομής

Οι μετασχηματιστές διανομής είναι κυρίως δυο τύπων: υγρού τύπου (συνήθως λαδιού) και ξηρού τύπου. Χρησιμοποιούνται στα δίκτυα διανομής για να μεταφέρουν ενέργεια από το δίκτυο μέσης τάσης (ΜΤ) στο δίκτυο χαμηλής τάσης (ΧΤ) των καταναλωτών. Η ισχύς τους είναι συνήθως από 50 kVA έως 1600 kVA.

Οι μετασχηματιστές λαδιού διακρίνονται σε μετασχηματιστές με ορυκτό λάδι και σε μετασχηματιστές με συνθετικό λάδι. Στους μετασχηματιστές με ορυκτό λάδι το μονωτικό μέσο είναι προϊόν κλασματικής απόσταξης πετρελαίου, ναφθениκής ή παραφινικής ή ενδιάμεσης βάσης. Ενώ στους μετασχηματιστές με συνθετικό λάδι, το μονωτικό μέσο είναι συνθετικό (σιλικονούχο) λάδι.

Στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου η ψύξη γίνεται με φυσική κυκλοφορία του αέρα και τα τυλίγματα είναι μονωμένα συνήθως με υλικά κλάσης H ή F. Τα υλικά κλάσης H είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν, σε κανονικές συνθήκες, σε θερμοκρασίες έως 180 °C και τα υλικά κλάσης F σε θερμοκρασίες έως 155 °C. Στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου ανήκουν και οι μετασχηματιστές ρητίνης, όπου τα τυλίγματα είναι μονωμένα συνήθως με υλικά κλάσης F και είναι χυτευμένα σε εποξική ρητίνη, [2.1]. Στο Σχήμα 2.1 εμφανίζονται δυο τύποι μετασχηματιστών διανομής, ελαίου και ξηρού τύπου.



Σχήμα 2.1: Τύποι μετασχηματιστών διανομής ελαίου και ξηρού τύπου.

2.1.1.3. Αυτομετασχηματιστές

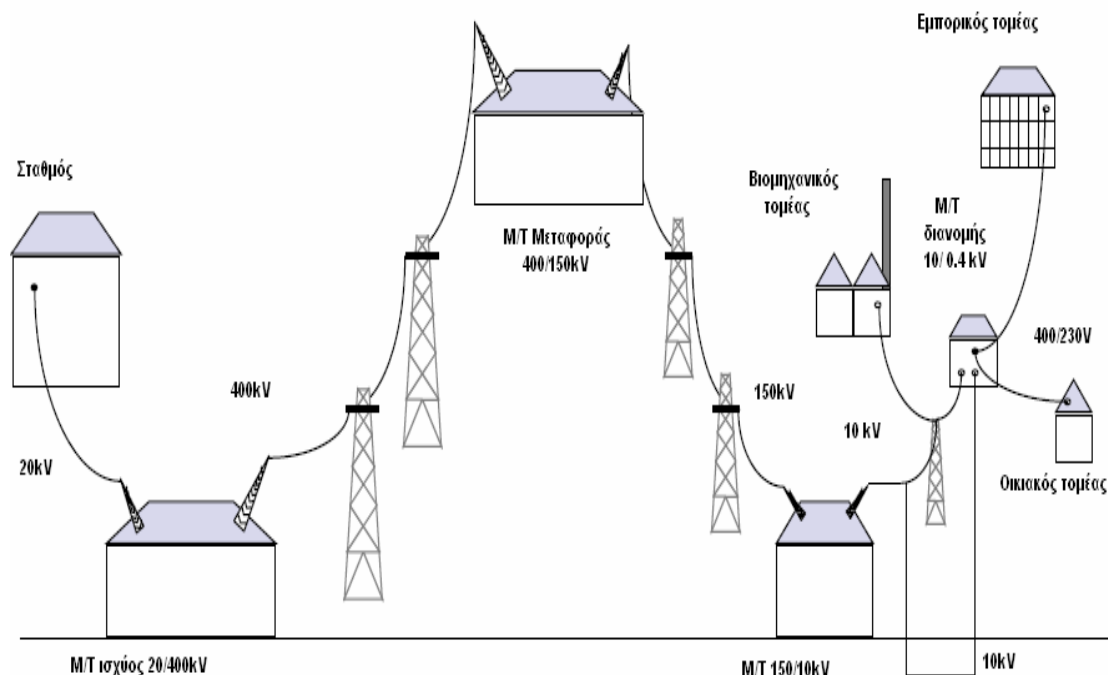
Οι αυτομετασχηματιστές χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή τάσεων εντός σχετικά μικρών ορίων, για να εξουδετερώνουν διακυμάνσεις των τάσεων στα δίκτυα, για τη σύνδεση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διαφόρων τάσεων, για την εκκίνηση κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος (ΕΡ), κτλ. Στους αυτομετασχηματιστές έχουμε μόνο ένα τυλίγμα με μια ενδιάμεση λήψη, που μπορεί να είναι κινητή ή σταθερή.

2.1.2. Δίκτυο ηλεκτρισμού – Επιχειρήσεις ηλεκτρισμού

Οι μετασχηματιστές μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια που παίρνουν σε μια ηλεκτρική ενέργεια άλλης τάσεως. Είναι απαραίτητοι σε ένα δίκτυο ηλεκτρισμού. Μετά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής, η ηλεκτρική ενέργεια χρειάζεται να μεταφερθεί στην περιοχή, όπου πρόκειται να καταναλωθεί. Η μεταφορά αυτή είναι πιο αποδοτική σε υψηλές τιμές τάσεως και για αυτό το λόγο η παραγόμενη ενέργεια από 10 kV – 30 kV, μετατρέπεται σε τιμές τάσης 220 kV – 400 kV, ή σε ακόμα μεγαλύτερες τιμές.

Η πλειοψηφία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων λειτουργεί σε χαμηλές τιμές τάσεων και επομένως είναι αναγκαίο να μετατραπεί σε τιμές κοντά στο επίπεδο χρήσης. Το πρώτο βήμα είναι η μετατροπή της τάσης σε τιμές 30 kV – 150 kV. Είναι συχνά το επίπεδο αυτό στο οποίο η ενέργεια παρέχεται στους βιομηχανικούς καταναλωτές. Οι εταιρίες διανομής στη συνέχεια μετατρέπουν επιπλέον την τάση σε πιο χαμηλά επίπεδα που αφορά τους κύριους καταναλωτές χαμηλής τάσης, [2.2].

Με αυτό τον τρόπο, η ηλεκτρική ενέργεια περνά κατά μέσο όρο από τέσσερα στάδια μετατροπής μέχρι να καταναλωθεί. Ένα μεγάλο πλήθος από μετασχηματιστές διαφόρων κατηγοριών και μεγεθών χρειάζονται για τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα δίκτυο. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη ενός ευρωπαϊκού δικτύου ενέργειας.



Σχήμα 2.2: Τυπική διάταξη ευρωπαϊκού δικτύου ενέργειας.

Οι δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού παράγουν και διανέμουν πάνω από το 90% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ). Υπάρχουν περίπου 2000 δημόσιες ηλεκτρικές επιχειρήσεις στην ΕΕ. Από την άλλη πλευρά, οι μη δημόσιες ηλεκτρικές επιχειρήσεις είτε παράγουν μόνες τους την απαιτούμενη ενέργεια είτε αγοράζουν ενέργεια (σε υψηλές τιμές τάσεις) από δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας και την διαχειρίζονται μέσα από δικά τους δίκτυα διανομής. Εκτιμάται ότι η ιδιωτική παραγωγή ενέργειας στο άμεσο μέλλον θα φτάσει το 20% της συνολικής παραγωγής, [2.2].

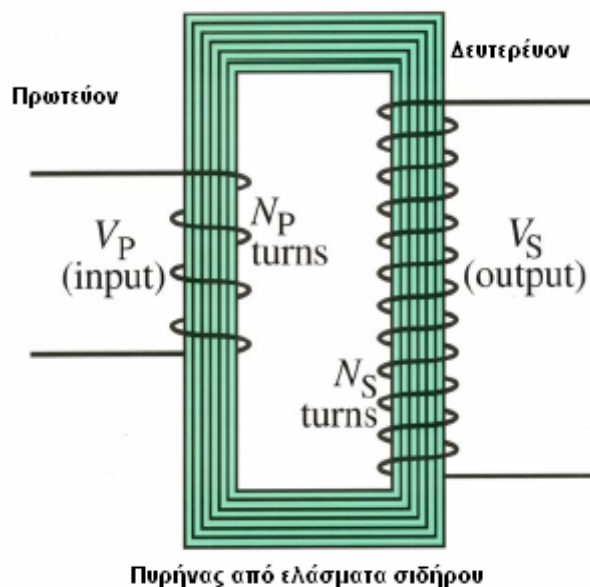
Υπολογίζεται ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ είναι περίπου 600 GW, ενώ η κατανάλωση είναι περίπου 2.700 TWh το χρόνο. Η Γαλλία και η Γερμανία είναι οι δυο χώρες που παράγουν τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας, αφού εκτιμάται ότι και οι δυο μαζί παράγουν περίπου το 35% της συνολικής παραγωγής. Τέλος εκτιμάται ότι η κατανάλωση στην Ελλάδα είναι περίπου 58 TWh. Τα παραπάνω στοιχεία αναφέρονται για την ΕΕ των 15 μελών κρατών.

2.2. Η ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1830 ο φυσικός Michael Faraday στην Αγγλία και ο Joseph Henry στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, έκαναν πολλά πρωτοποριακά πειράματα με μαγνητικώς επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Ο Michael Faraday ανακάλυψε ότι όταν μετακινούσε ένα μαγνήτη διαμέσου ενός πηνίου κατασκευασμένου από σύρμα χαλκού, προκαλούσε ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο πηνίο. Βρήκε ότι η τάση E_1 , που εφαρμόζεται στο πρωτεύον πηνίο, επιφέρει μια αντίστοιχη τάση E_2 στο δευτερεύον πηνίο, η οποία είναι ανάλογη με το λόγο των σπειρών των δυο πηνίων (N_1/N_2). Επίσης βρήκε ότι ο λόγος των ρευμάτων που ρέουν στα δυο πηνία I_1 και I_2 είναι αντιστρόφως ανάλογος με τον λόγο των σπειρών (N_1/N_2) στα δυο πηνία. Από αυτή την ανακάλυψη εξήγαγε την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.1)$$

Από αυτό το σκεπτικό γεννήθηκαν οι μετασχηματιστές. Ο μετασχηματιστής αποτελείται βασικά από ένα πυρήνα από σίδηρο ο οποίος σχηματίζεται από λεπτά ελάσματα. Γύρω από τον πυρήνα τυλίγονται το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα, που βρίσκεται σε μαγνητική σύζευξη μέσω του κοινού πυρήνα. Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η κυκλωματική δομή ενός μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.3: Κυκλωματική δομή ενός μετασχηματιστή.

2.3. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Τα συστατικά του μετασχηματιστή περιγράφουν τα χαρακτηριστικά ενός μετασχηματιστή καθώς και πώς αυτά επιδρούν στις απώλειες του. Μπορούν να κατανεμηθούν σε δυο κατηγορίες: σε ηλεκτρικά και σε μηχανικά συστατικά.

Υπάρχουν αρκετά ηλεκτρικά και μηχανικά συστατικά τα οποία επιδρούν στην κατανάλωση ενέργειας στον μετασχηματιστή. Τα ηλεκτρικά συστατικά περιλαμβάνουν την ισχύ (kVA), την αντίσταση, το λόγο μετασχηματισμού, και το βασικό επίπεδο μόνωσης. Τα

μηχανικά συστατικά περιλαμβάνουν τον πυρήνα, το πηνίο, το δοχείο, το μονωτήρα, το σύστημα ψύξης και το μονωτικό μέσο, [2.3].

2.3.1. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

2.3.1.1. Ισχύς

Η ισχύς ενός μετασχηματιστή προσδιορίζει το φυσικό του μέγεθος καθώς και τις απώλειες φορτίου του.

Ο μηχανικός που σχεδιάζει τον μετασχηματιστή καθορίζει την ισχύ του πολλαπλασιάζοντας την τάση εισόδου με το ρεύμα εισόδου ή την τάση εξόδου με το ρεύμα εξόδου. Το ρεύμα που ρέει στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο εξαρτάται από το φορτίο του μετασχηματιστή. Επομένως η μέγιστη ροή ρεύματος στα πηνία εξαρτάται από την ισχύ του.

Η ισχύς των μετασχηματιστών κυμαίνεται από 0.5 έως 3000 kVA για τους μετασχηματιστές διανομής και από 100 έως 500.000 kVA για τους μετασχηματιστές ισχύος. Η τιμή της ισχύος τους είναι το πρώτο πράγμα που αναφέρεται στην πινακίδα ενός μετασχηματιστή.

2.3.1.2. Σύνθετη αντίσταση

Σύνθετη αντίσταση είναι η αντίσταση που εμφανίζεται στη ροή του ρεύματος στο τύλιγμα του μετασχηματιστή. Αποτελείται από δυο συστατικά: την ωμική αντίσταση και την επαγωγική αντίσταση. Η ωμική αντίσταση ποικίλει σύμφωνα με τον τύπο και το μήκος του αγωγού. Είναι υπεύθυνη για τις απώλειες στον αγωγό. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται, πολλαπλασιάζοντας το τετράγωνο του ρεύματος με την αντίσταση του αγωγού (I^2R).

Το δεύτερο συστατικό είναι η επαγωγική αντίσταση, που είναι υπεύθυνη για την υστέρηση του ρεύματος έναντι της τάσης. Η τιμή της προσδιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του τυλίγματος καθώς και από το διάκενο μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος. Η σύνθετη αντίσταση δίδεται από τη σχέση (2.2):

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.2)$$

Z = Σύνθετη αντίσταση [Ω (ohms)]

R = Ωμική αντίσταση [Ω (ohms)]

X = Επαγωγική αντίσταση [Ω (ohms)]

Η σύνθετη αντίσταση ορίζεται στον πίνακα ενός μετασχηματιστή ως αναλογία επί τοις εκατό. Η επί τοις εκατό αυτή ποσοστιαία αναλογία πρέπει να μετατραπεί σε ohm πολλαπλασιάζοντας την με την εκτιμώμενη τάση.

2.3.1.3. Ο λόγος μετασχηματισμού

Ο λόγος μετασχηματισμού είναι ίσος με το πηλίκο του αριθμού των σπειρών στο πρωτεύον προς τον αριθμό των σπειρών στο δευτερεύον τύλιγμα. Με τη βοήθεια του λόγου αυτού μπορούμε να καθορίσουμε την τιμή της τάσης στην έξοδο ενός μετασχηματιστή. Η τιμή της τάσης στην έξοδο είναι μεγαλύτερη από την τιμή της τάσης στην είσοδο αν το δευτερεύον πηνίο έχει περισσότερες σπείρες από το πρωτεύον. Αντιστρόφως παίρνουμε μικρότερη τάση στην έξοδο αν το δευτερεύον τύλιγμα έχει λιγότερες σπείρες από ότι το πρωτεύον.

2.3.1.4. Επίπεδο μόνωσης

Οι μετασχηματιστές είναι σχεδιασμένοι να αντέχουν σε απότομες μεταβολές και αλλαγές στην τάση που δημιουργούνται στο σύστημα. Οι ειδικοί έχουν θέσει κάποιες σταθερές που πρέπει να έχουν οι μετασχηματιστές για να αντεπεξέρχονται σε αυτές τις απότομες αλλαγές. Οι σταθερές αυτές έχουν να κάνουν με το ποσό της μόνωσης, που απαιτείται σε έναν μετασχηματιστή και φέρουν την ονομασία επίπεδο μόνωσης. Το επίπεδο μόνωσης σχετίζεται με την απόσταση μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος καθώς και με το ποσό της μόνωσης στον αγωγό. Επιδρά στο μέγεθος και στο ποσό των απωλειών που συμβαίνουν σε έναν μετασχηματιστή. Το επίπεδο μόνωσης εκφράζεται σε kV.

2.3.2. Μηχανικά χαρακτηριστικά

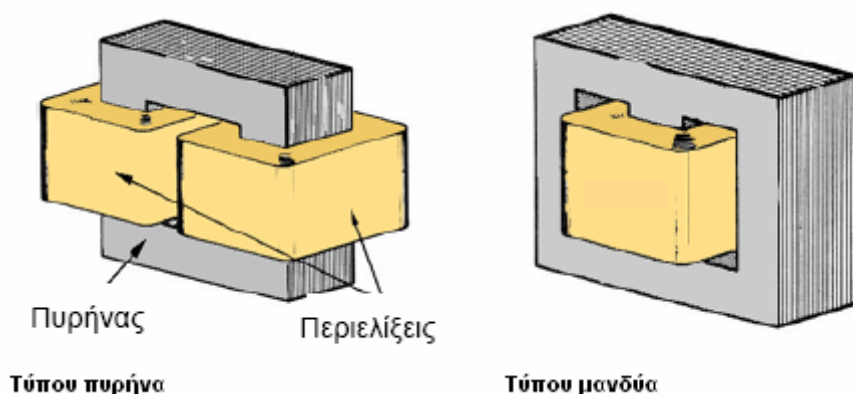
Τα μηχανικά χαρακτηριστικά σε έναν μετασχηματιστή μας παρέχουν σημαντικές πληροφορίες, που αφορούν την αποδοτική χρήση ενός μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δυο κύρια συστατικά: τον πυρήνα και το πηνίο. Ο πυρήνας είναι ο φορέας της εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής η οποία διαρρέει και τα δυο τυλίγματα και επάγει σε αυτά τάσεις. Το πηνίο είναι ο φορέας του ηλεκτρικού ρεύματος στον μετασχηματιστή.

2.3.2.1. Πυρήνας

Ο πυρήνας μπορεί να είναι κατασκευασμένος είτε από αέρα είτε από σίδηρο. Ο αέρας είναι πολύ αναποτελεσματικός για την μεταφορά της ηλεκτρομαγνητικής ροής. Η μοριακή δομή του σιδήρου, του επιτρέπει να είναι καλός αγωγός της ηλεκτρομαγνητικής ροής. Η αποδοτικότητα του σιδήρου βελτιώνεται όσο ο σίδηρος γίνεται μαλακότερος. Αυτό προκύπτει διότι η μοριακή δομή του σιδήρου μαγνητίζεται λιγότερο κατά την εφαρμογή του μαγνητικού πεδίου. Ο μαλακότερος σίδηρος απαιτεί λιγότερη ενέργεια για την μαγνήτιση και την απομαγνήτιση του.

Ο πυρήνας σιδήρου υπόκειται σε δυο τύπους απωλειών: στις απώλειες υστέρησης και στις απώλειες δινορευμάτων. Οι απώλειες υστέρησης οφείλονται στην τριβή που προκαλείται κατά την μοριακή αντίσταση του υλικού κατά την διαδικασία της μαγνήτισης και της απομαγνήτισης του. Οι απώλειες δινορευμάτων οφείλονται στα επαγωγικά ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στο υλικό του πυρήνα και η εικόνα τους μοιάζει με τις δίνες που δημιουργούνται στο νερό. Οι απώλειες του πυρήνα είναι σταθερές και πολλές φορές αναφέρονται και ως απώλειες κενού φορτίου, διότι συμβαίνουν στον πυρήνα του μετασχηματιστή ανεξάρτητα από το φορτίο στον μετασχηματιστή, [2.3].

Υπάρχουν δύο είδη πυρήνα: ο τύπου πυρήνα και ο τύπου μανδύα. Στον πρώτο τύπο, τα πηνία περιβάλλουν τον πυρήνα, ενώ στον δεύτερο τύπο τα πηνία τοποθετούνται στο μεσαίο στέλεχος και περιβάλλονται από τα δυο εξωτερικά στελέχη. Στο Σχήμα 2.4 εμφανίζονται τα δύο είδη πυρήνα.



Σχήμα 2.4: Δύο είδη πυρήνα, ο τύπου πυρήνα και ο τύπου μανδύα

2.3.2.2. Πηνίο

Τα πηνία σε έναν μετασχηματιστή διαιρούνται σε δυο κατηγορίες: στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο. Στο πρωτεύον πηνίο εφαρμόζουμε την τάση της πηγής, ενώ ανάλογα με την τάση που παίρνουμε στο δευτερεύον πηνίο έχουμε τους μετασχηματιστές υποβιβασμού της τάσης ή αντίθετα έχουμε τους μετασχηματιστές ανύψωσης της τάσης. Τα πηνία κατασκευάζονται συνήθως από χαλκό. Το μέγεθος τους καθορίζεται από την τιμή του ρεύματος και από την επιθυμητή ποσότητα των απωλειών.

Οι απώλειες σε ένα πηνίο συχνά αναφέρονται και ως απώλειες I^2R . Επίσης αναφέρονται και ως απώλειες φορτίου και εμφανίζονται και στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο. Οι απώλειες αυτές δεν είναι σταθερές και εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στον μετασχηματιστή.

2.3.2.3. Δοχείο

Το δοχείο του μετασχηματιστή μπορεί να είναι ορθογώνιο ή κυλινδρικό και το μέγεθος του καθώς και το βάρος του ποικίλει. Το σχήμα του εξαρτάται από το εσωτερικό σχήμα του πηνίου και του πυρήνα. Σε μετασχηματιστές ισχύος έχει συνήθως ορθογώνιο σχήμα και είναι αρκετά μεγάλο, ενώ σε μετασχηματιστές διανομής το σχήμα του είναι κυλινδρικό.

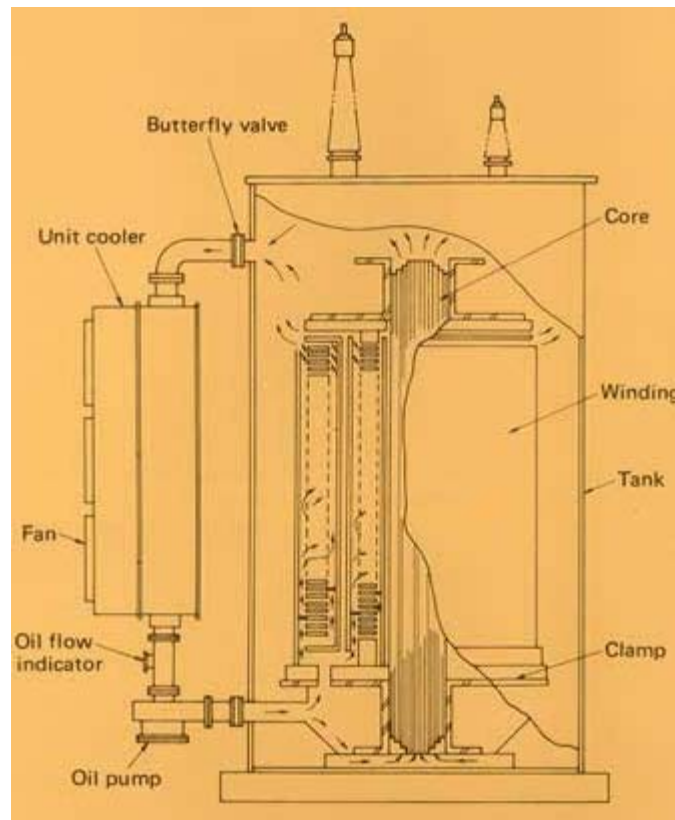
Το δοχείο περιέχει τον πυρήνα, το πηνίο και το μονωτικό μέσο του μετασχηματιστή. Μπορεί επίσης να περιέχει διατάξεις στήριξης, έτσι ώστε να αντιστέκεται στις μεγάλες δυνάμεις και πιέσεις, που μπορούν αναπτυχθούν κατά την διάρκεια βραχυκυκλώματος.

2.3.2.4. Σύστημα ψύξης

Η ύπαρξη υψηλής θερμοκρασίας σε έναν μετασχηματιστή επηρεάζει τη σωστή λειτουργία του. Επομένως είναι αναγκαίο να είναι σχεδιασμένοι με ένα σύστημα ψύξης που να αποβάλλει την θερμότητα αυτή. Συχνά στους μετασχηματιστές χρησιμοποιούν ψυκτικά σώματα για να διασκορπίζουν την θερμότητα, κάτι ανάλογο με τη χρησιμότητα του ψυγείου σε ένα αυτοκίνητο για να το διατηρεί συνεχώς κρύο. Μερικοί μετασχηματιστές χρησιμοποιούν αντλίες για να διατηρήσουν τη ροή του ψυκτικού μέσου. Οι μετασχηματιστές λαδιού χρησιμοποιούν ως μέσο ψύξης το λάδι, ενώ οι ξηρού τύπου χρησιμοποιούν τον αέρα.

Το σύστημα ψύξης αποτελείται από το μονωτικό υλικό που περιβάλλει τον πυρήνα και τα πηνία. Το μονωτικό μέσο μπορεί να είναι είτε κάποιο υγρό όπως είναι το λάδι είτε ο αέρας. Η θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω των απωλειών στον πυρήνα και στα πηνία

επιδρά στην αποδοτικότητα τους μετασχηματιστή. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την αντίσταση στον αγωγό και επιπλέον μπορεί να προκαλέσει την φθορά στην μόνωση του μέχρι σε σημείο αστοχίας του ίδιου του μετασχηματιστή. Ο μηχανικός κατασκευάζει τον μετασχηματιστή έτσι ώστε η θερμοκρασία του να μην υπερβαίνει τους 55 °C πάνω από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, [2.3]. Οι μετασχηματιστές ισχύος μπορούν να είναι εφοδιασμένοι με σύστημα ψύξης, που να περιλαμβάνει αντλίες για την κυκλοφορία του λαδιού στο εσωτερικό του μετασχηματιστή και επιπλέον αντλίες για να κυκλοφορούν το νερό εξωτερικά του μετασχηματιστή. Πολλοί μετασχηματιστές διανομής έχουν ψυκτικά σώματα όπου είτε έχουμε φυσική κυκλοφορία του ψυκτικού μέσου είτε έχουμε μέσω αντλιών την κυκλοφορία του λαδιού. Επίσης διαθέτουν και ανεμιστήρες για να ψύχουν το λάδι. Στο Σχήμα 2.5 εμφανίζουμε έναν μετασχηματιστή όπου ψύχεται με τη βοήθεια αντλιών, που διοχετεύουν το λάδι στο εσωτερικό του καθώς και εξωτερικούς ανεμιστήρες για την απαγωγή της θερμότητας από το λάδι.



Σχήμα 2.5: Σύστημα ψύξης με αντλία λαδιού και με εξωτερικούς ανεμιστήρες.

Συχνά οι μετασχηματιστές λειτουργούν σε τρεις βαθμίδες: OA/FA/FOA. Στην πρώτη περίπτωση ο μετασχηματιστής επιτυγχάνει μόνος του την αποβολή της θερμότητας, στην δεύτερη περίπτωση αποβάλλει την θερμότητα με την βοήθεια των ανεμιστήρων και η οποία είναι 133% πιο αποδοτική από την πρώτη περίπτωση και στην τρίτη περίπτωση χρησιμοποιεί και τις αντλίες και τους ανεμιστήρες με αποτέλεσμα να έχει 167% καλύτερη απόδοση σε σχέση με την πρώτη περίπτωση. Τόσο οι ανεμιστήρες όσο και οι αντλίες κατά την λειτουργία τους καταναλώνουν ενέργεια. Η κατανάλωση αυτή έχει επίπτωση στην απόδοση του μετασχηματιστή και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τους υπολογισμούς της αποδοτικότητας ενός μετασχηματιστή. Οι αντλίες και οι ανεμιστήρες λειτουργούν σε χαμηλή τιμή τάσης (110 V) και συχνά απαιτούν έναν μικρό μετασχηματιστή διανομής για να υποβιβάσει την τιμή της τάσης σε αυτό το επίπεδο. Η ενέργεια που καταναλώνει αυτός ο μικρός μετασχηματιστής πρέπει να περιλαμβάνεται στους υπολογισμούς για τη συνολική απόδοση του μεγαλύτερου μετασχηματιστή. Πολλοί μετασχηματιστές ισχύος διαθέτουν

δοχείο διαστολής στο πάνω μέρος τους. Κατά την μεταβολή της θερμοκρασίας του λαδιού του μετασχηματιστή και άρα του όγκου του λαδιού, το δοχείο διαστολής δέχεται αυτή την αυξομείωση του όγκου του λαδιού. Η ποσότητα του λαδιού που περιέχει το δοχείο διαστολής μετρίεται από το δείκτη στάθμης λαδιού, ο οποίος είναι ανθεκτικός σε υψηλή θερμοκρασία.

Η κωδικοποίηση της ψύξης των μετασχηματιστών γίνεται με χρήση 4 γραμμάτων: τα δύο πρώτα αφορούν στον τρόπο κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου εσωτερικά και τα δύο τελευταία στον τρόπο κυκλοφορίας του ψυκτικού μέσου εξωτερικά του μετασχηματιστή. Έτσι έχουμε:

- **ONAF:** Φυσική κυκλοφορία λαδιού, βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα.
- **OFAN:** Βεβιασμένη κυκλοφορία λαδιού, φυσική κυκλοφορία αέρα.
- **OFAF:** Βεβιασμένη κυκλοφορία λαδιού, βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα.
- **OFWF:** Βεβιασμένη κυκλοφορία λαδιού, βεβιασμένη κυκλοφορία νερού.

Συνδυασμοί όπως ONAN/ONAF, ONAN/OFAN ή ONAN/OFAF είναι δυνατοί.

2.3.2.5. Μονωτήρας διέλευσης

Οι μονωτήρες είναι σχεδιασμένοι για να συνδέουν το εσωτερικό και εξωτερικό μέρος του μετασχηματιστή με το σύστημα μεταφοράς και διανομής. Αποτελούνται από έναν αγωγό, που περιβάλλεται από κεραμικό κάλυμμα. Το κεραμικό κάλυμμα εμποδίζει την δημιουργία ηλεκτρικού τόξου με το δοχείο του μετασχηματιστή. Η τιμή της εφαρμοσμένης τάσης επηρεάζει το μήκος του μονωτήρα, ενώ η τιμή του ρεύματος επηρεάζει τη διάμετρο του εσωτερικού αγωγού του μονωτήρα. Η επιρροή τους στην απόδοση του μετασχηματιστή είναι ασήμαντη.

2.3.2.6. Μονωτικό μέσο

Υπάρχουν δύο τύποι μετασχηματιστών ανάλογα με το μονωτικό μέσο: οι λαδιού και οι ξηρού τύπου. Ο μετασχηματιστής ξηρού τύπου μπορεί να είναι μονωμένος είτε με αέρα είτε με εποξική ρητίνη. Οι ξηρού τύπου μετασχηματιστές είναι συνήθως μικροί μετασχηματιστές διανομής, οι οποίοι δεν αναπτύσσουν υψηλές θερμοκρασίες. Οι μεγαλύτεροι μετασχηματιστές διανομής και ισχύος απαιτούν κάποιο υγρό, όπως για παράδειγμα το λάδι για να ψυχθούν. Το υγρό που χρησιμοποιούμε στους μετασχηματιστές λαδιού πρέπει να είναι μη εύφλεκτο, έτσι ώστε να είναι ασφαλές. Οι μετασχηματιστές με μονωτικό μέσο πολυχλωριωμένο διφαινύλιο (PCB), βρέθηκαν να είναι τοξικοί για το περιβάλλον. Οι περισσότεροι από αυτούς σήμερα έχουν καταστραφεί και κανείς πλέον κατασκευαστής δε φτιάχνει σήμερα μετασχηματιστές με PCB.

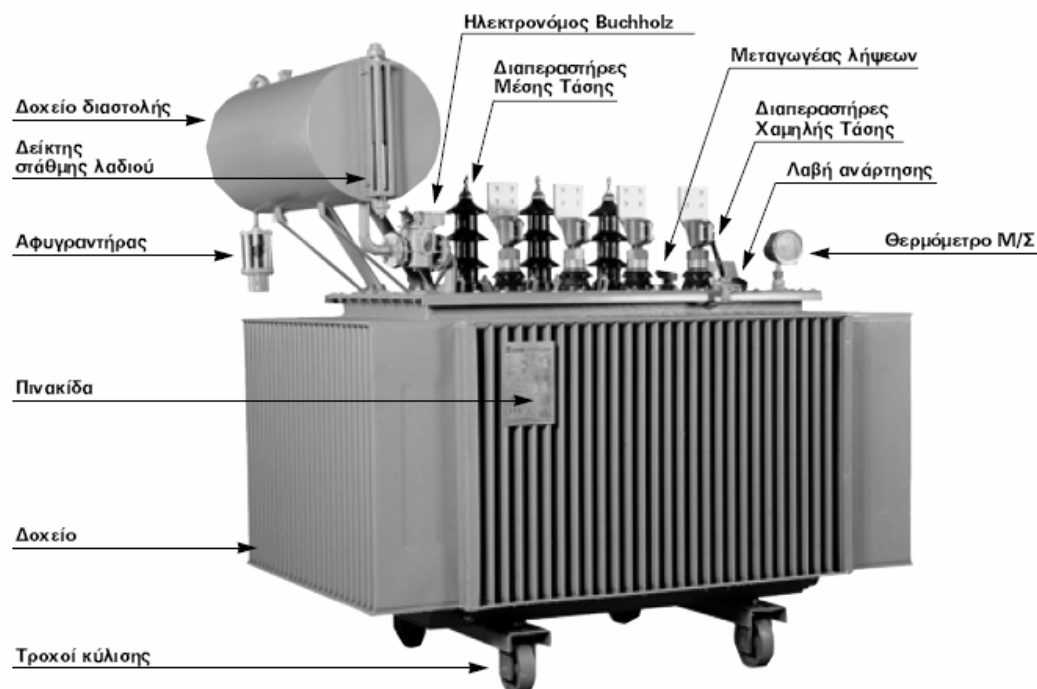
2.4. Εξαρτήματα μετασχηματιστή

- **Δοχείο μετασχηματιστή:** Το δοχείο του μετασχηματιστή αποτελείται από τον πυθμένα, τη στεφάνη και τα πλευρικά τοιχώματα. Τα πλευρικά τοιχώματα του δοχείου κατασκευάζονται από πτυχωτά πάνελα (ελάσματα) με στόχο την αύξηση της επιφάνειας ψύξης. Το δοχείο των μετασχηματιστών κλειστού τύπου (χωρίς δοχείο διαστολής) γεμίζει με λάδι και σφραγίζεται ερμητικά, [2.1]. Τα ελαστικά τοιχώματα του δοχείου δεν επιτρέπουν να δημιουργηθεί μεγάλη αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του, η οποία προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή. Στο δοχείο τοποθετούνται δύο αφαλοί γείωσης. Στον πυθμένα του δοχείου είναι συγκολλημένο το σύστημα κύλισης με τροχούς ή η βάση έδρασης.

- **Κάλυμμα μετασχηματιστή:** Πάνω στο κάλυμμα υπάρχουν δύο λαβές ανάρτησης, που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση και τη μεταφορά του μετασχηματιστή. Στο κάλυμμα τοποθετείται η θήκη θερμόμετρου και το θερμόμετρο δυο ηλεκτρικών επαφών. Επίσης στο κάλυμμα μπαίνει ένας αφαλός γείωσης. Στους μετασχηματιστές κλειστού τύπου τοποθετείται συνήθως ανακουφιστική βαλβίδα.
- **Λαβές ανάρτησης:** Οι λαβές ανάρτησης χρησιμεύουν για την ανύψωση και τη μεταφορά του μετασχηματιστή.
- **Τροχοί κύλισης:** Οι μετασχηματιστές που τοποθετούνται σε έναν ή δύο στύλους δεν έχουν τροχούς. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές εφοδιάζονται με τροχούς κύλισης, των οποίων η κατεύθυνση μπορεί να μεταβάλλεται κατά 90°.
- **Βαλβίδα εκκένωσης και δειγματοληψίας λαδιού:** Στο κάτω μέρος ενός πλευρικού τοιχώματος του δοχείου του μετασχηματιστή τοποθετείται η βαλβίδα εξαγωγής λαδιού, η οποία επιτρέπει τη δειγματοληψία για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού.
- **Σύνδεσμος γείωσης ουδετέρου:** Ο σύνδεσμος αυτός εξασφαλίζει τη γείωση του ουδετέρου κόμβου του τριφασικού τυλίγματος με το δοχείο του μετασχηματιστή.
- **Διαπεραστήρες:** Διαπεραστήρες ή μονωτήρες διέλευσης κατασκευάζονται συνήθως από πορσελάνη και συνδέουν τον μετασχηματιστή με το σύστημα διανομής ή μεταφοράς.
- **Μεταγωγέας λήψεων:** Η εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από τη θέση του μετασχηματιστή στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό χρησιμοποιείται ο μεταγωγέας λήψεων, έτσι ώστε με δεδομένη την εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον, να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή η τάση στο δευτερεύον. Ο μεταγωγέας λήψεων τοποθετείται στο δοχείο του μετασχηματιστή με το χειριστήριο του πάνω στο κάλυμμα. Ο χειρισμός του μεταγωγέα γίνεται μόνο όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται εκτός τάσης. Οι θέσεις των λήψεων αναγράφονται στην πινακίδα του μετασχηματιστή.
- **Μεταγωγέας τάσεων:** Ο μεταγωγέας τάσεων χρησιμοποιείται για την αλλαγή της τάσης λειτουργίας του μετασχηματιστή από μια τάση σε μια άλλη (π.χ. από 15kV σε 20 kV και αντίστροφα), ανάλογα με την τάση του δικτύου.
- **Θερμόμετρο μετασχηματιστή:** Το θερμικό στοιχείο του θερμομέτρου είναι τοποθετημένο στο πιο ψηλό στρώμα του λαδιού, έτσι ώστε να μετράει τη μέγιστη θερμοκρασία του λαδιού. Οι ηλεκτρικές επαφές του θερμομέτρου ρυθμίζονται στις επιθυμητές θερμοκρασίες και συνδέονται στο κύκλωμα προστασίας για συναγερμό (alarm) και για διακοπή (trip) του κυκλώματος, όταν γίνει υπέρβαση των αντίστοιχων ορίων των θερμοκρασιών αυτών.
- **Δοχείο διαστολής:** Το δοχείο διαστολής δέχεται την αυξομείωση του όγκου του λαδιού, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του λαδιού του μετασχηματιστή. Οι μετασχηματιστές με δοχείο διαστολής συνήθως διαθέτουν αφυγραντήρα και Buchholz.

- **Ηλεκτρονόμος Buchholz:** Η προστασία των μετασχηματιστών λαδιού από εσωτερικά σφάλματα, τα οποία προκαλούν ανάπτυξη αερίων ή έντονη ροή λαδιού, γίνεται με τον ηλεκτρονόμο Buchholz, ο οποίος τοποθετείται μεταξύ του δοχείου του μετασχηματιστή και του δοχείου διαστολής. Στην περίπτωση σχηματισμού φυσαλίδων (σαν αποτέλεσμα εσωτερικής βλάβης) ή έλλειψης λαδιού, μετακινείται προς τα κάτω ο πρώτος πλωτήρας και ενεργοποιείται η επαφή συναγερμού, ενώ όταν τα αέρια που εκλύονται είναι αρκετά (δηλαδή η εσωτερική βλάβη είναι σημαντική) μετακινείται προς τα κάτω ο δεύτερος πλωτήρας και ενεργοποιείται η επαφή διακοπής. Ακόμη διακοπή έχουμε εάν δημιουργηθεί έντονη ροή λαδιού προς το δοχείο διαστολής μετά από βραχυκύκλωμα ή εσωτερική βλάβη. Επίσης, ο ηλεκτρονόμος Buchholz παρέχει προστασία από διαρροή λαδιού.
- **Αφρυγαντήρας:** Ο αφρυγαντήρας τοποθετείται πάνω στο δοχείο διαστολής. Μέσα από τον αφρυγαντήρα περνά ο αέρας προς και από το δοχείο διαστολής του μετασχηματιστή λόγω της συστολής και διαστολής του όγκου του λαδιού. Περιέχει κρυστάλλους SiO_2 (silicagel), οι οποίοι απορροφούν την υγρασία του αέρα. Η ένδειξη μπλε χρώματος σημαίνει ότι είναι πλήρως ξηρό, γαλάζιο χρώμα σημαίνει ότι είναι μερικώς υγρό, ενώ το ροζ χρώμα δηλώνει ότι είναι κορεσμένο από υγρασία. Το Silicagel απορροφά την υγρασία όσο το χρώμα του είναι μπλε. Όταν κορεστεί και αλλάξει χρώμα και γίνει ροζ, πρέπει είτε να ξηραθεί είτε να αντικατασταθεί. Η ξήρανση του επιτυγχάνεται θερμαίνοντας το στους 120°C έως 150°C μέχρι το χρώμα του να ξαναγίνει μπλε.
- **Πώμα πλήρωσης:** Από το πώμα πλήρωσης γίνεται η συμπλήρωση του μετασχηματιστή με μονωτικό λάδι.
- **Δείκτης στάθμης λαδιού:** Στους μετασχηματιστές κλειστού τύπου (χωρίς δοχείο διαστολής), ο δείκτης στάθμης λαδιού (ελαιοδείκτης) είναι τοποθετημένος στο πλευρικό τοίχωμα ή στο κάλυμμα του μετασχηματιστή. Σε μετασχηματιστές με δοχείο διαστολής τοποθετείται σε αυτό ένας ελαιοδείκτης σωληνωτού τύπου ή μαγνητικού τύπου.
- **Πινακίδα μετασχηματιστή:** Στην πινακίδα του μετασχηματιστή αναγράφονται όλα τα στοιχεία που ορίζουν οι διεθνείς προδιαγραφές: τύπος, ισχύς σε kVA, φάσεις, συχνότητα, τάση βραχυκύκλωσης, ζεύξη, είδος ψύξης, υλικό τυλιγμάτων, αριθμός σειράς, έτος κατασκευής, βάρος πυρήνα και τυλιγμάτων, βάρος λαδιού, ολικό βάρος, μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ανύψωση θερμοκρασίας τυλίγματος, ανύψωση θερμοκρασίας λαδιού, ονομαστική τάση πρωτεύοντος, ονομαστική τάση δευτερεύοντος, ονομαστική ένταση πρωτεύοντος, ονομαστική ένταση δευτερεύοντος, απώλειες κενού φορτίου, απώλειες φορτίου, θέσεις του μεταγωγέα λήψεων και θέσεις του μεταγωγέα τάσεων (εφόσον υπάρχει).
- **Αφαλός γείωσης δοχείου:** Στο δοχείο του μετασχηματιστή και πιο συγκεκριμένα κοντά στον πυθμένα, τοποθετούνται δυο αφαλοί γείωσης αντιδιαμετρικά μεταξύ τους, έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα γείωσης του δοχείου.

Στο Σχήμα 2.6 δείχνουμε έναν μετασχηματιστή διανομής λαδιού με τα εξαρτήματα του.



Σχήμα 2.6: Μετασχηματιστής διανομής λαδιού

2.5. Μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης

Οι ηλεκτρικές εταιρίες βελτιώνουν την αποδοτικότητα των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας τις απώλειες. Οι βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες της ηλεκτρικής ενέργειας, επίσης βελτιώνουν την αποδοτικότητα των δικτύων διανομής τους, μειώνοντας τις απώλειες. Η μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής γίνεται με τις παρακάτω επτά μεθόδους: (1) αντικατάσταση των μεγαλύτερων αγωγών που είναι σε λειτουργία, (2) αύξηση της τάσης του συστήματος, (3) βελτίωση του συντελεστή ισχύος του συστήματος με προσθήκη πυκνωτών διακλάδωσης, (4) προσθήκη γραμμών μεταφοράς ή αγωγών τροφοδοσίας, (5) προσθήκη ή εξισορρόπηση φάσεων, (6) χρήση ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών (χαμηλών απωλειών) και (7) επαναδιαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, [2.4].

Ενώ μερικές από τις παραπάνω παρεμβάσεις μπορούν να υλοποιηθούν ευκολότερα από κάποιες άλλες, η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών πραγματοποιείται εύκολα. Δεν χρειάζεται μεγάλη τεχνική εμπειρία, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σωστά οι μετασχηματιστές χαμηλών απωλειών. Η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών δεν απαιτεί τη γνώση του τρόπου με τον οποίο έχουν σχεδιαστεί, ούτε και των μεθόδων παραγωγής με τις οποίες έχουν κατασκευαστεί. Εκείνο που είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο χρήστης είναι ο τρόπος με τον οποίο θα πρέπει να επιλέξει τον περισσότερο οικονομικό και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικό μετασχηματιστή.

Τη δεκαετία του 1970, λόγω της παγκόσμιας κρίσης που ξέσπασε στον τομέα του πετρελαίου, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε σημαντικά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να οδηγήσει τις εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας να απαιτούν από τους κατασκευαστές μετασχηματιστών να παράγουν περισσότερο αποδοτικούς μετασχηματιστές. Οι απώλειες των μετασχηματιστών λαμβάνονται πλέον υπόψη διότι σημαντικά ποσά ενέργειας χάνονται. Από την άλλη πλευρά όμως πολλοί βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες

συνεχίζουν να μην αποτιμούν αυτές τις απώλειες και επομένως να χρησιμοποιούν φθηνότερους μη αποδοτικούς μετασχηματιστές. Τα τελευταία χρόνια οι κατασκευαστές ανταποκρίνονται όλο και περισσότερο στις απαιτήσεις των εταιριών ηλεκτρικής ενέργειας για περισσότερο αποδοτικούς μετασχηματιστές, ενώ το ίδιο δεν συμβαίνει για τους υπόλοιπους χρήστες που εμφανίζονται αδιάφοροι για πιο αποδοτικούς μετασχηματιστές.

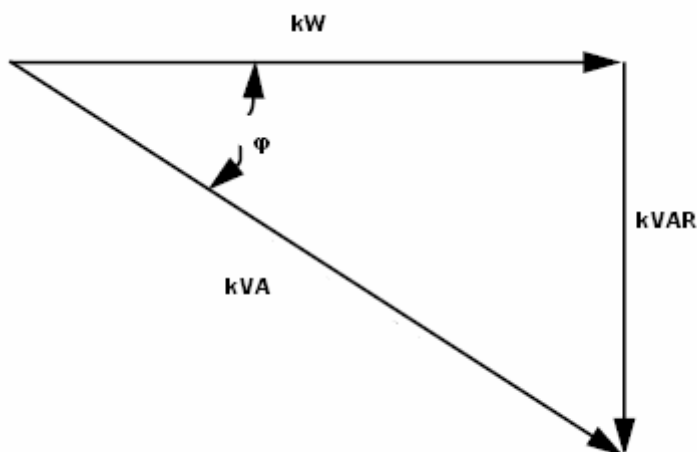
Οι μετασχηματιστές με χαμηλή απόδοση απαιτούν αυξημένη παραγωγή ενέργειας για να καλύψουν τις απώλειες τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζουν το περιβάλλον, διότι η σπατάλη ενέργειας προκαλεί αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και συνεπώς συμβάλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου αρνητικά. Από την άλλη πλευρά όμως οι μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης απαιτούν λιγότερη παραγωγή ενέργειας σε σχέση με τους μη αποδοτικούς, με αποτέλεσμα να μειώνουν την εκπομπή των αερίων στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με δεδομένα από το International Institute for Energy Conservation (IIEC) για την Ευρώπη, η εκπομπή αερίων CO₂ ανά kWh ανέρχεται σε 0.4 Kg. Από τη χρήση μετασχηματιστών διανομής υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης εκτιμάται ότι έως το 2010 θα έχουν εξοικονομηθεί 7.3TWh ενέργειας στην Ευρώπη. Το ποσό αυτό ισοδυναμεί με 2.9 εκατομμύρια τόνους CO₂. Επομένως είναι αναγκαία η χρήση μετασχηματιστών με μεγαλύτερη απόδοση, παρόλο που οι μετασχηματιστές σήμερα έχουν μια απόδοση πάνω από 97% - 98% στις περισσότερες περιπτώσεις.

2.6. Απόδοση μετασχηματιστή

Η απόδοση ισχύος σε οποιαδήποτε ηλεκτρική μηχανή ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ της εισόδου. Η ισχύς μετριέται σε watts (W) ή kilowatts (kW). Το ίδιο ισχύει και για τους μετασχηματιστές παρόλο που η ισχύς τους μετριέται σε kilovoltamperes (kVA). Η πινακίδα στον μετασχηματιστή αναφέρει την ισχύ του σε kVA, οπότε είναι αναγκαίο να μετατραπεί σε kW για να προσδιορίσουμε την απόδοση του. Η μετατροπή των kilovoltamperes σε kilowatts επιτυγχάνεται με τον εξής τύπο:

$$\text{Ισχύς μετασχηματιστή σε kW} = (\text{kVA}) (\cos\phi) \quad (2.3)$$

όπου $\cos\phi$ είναι ο συντελεστής ισχύος. Στο Σχήμα 2.7 έχουμε το τρίγωνο ισχύος όπου εμφανίζουμε την σχέση μεταξύ kilovoltamperes και kilowatts. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.7 το $\cos\phi$ ή συντελεστής ισχύος είναι kW / kVA.



Σχήμα 2.7: Τρίγωνο ισχύος

Επομένως η απόδοση σε έναν μετασχηματιστή μπορεί να αποδοθεί από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{Απόδοση} = \frac{\text{Ισχύς Εξόδου kVA}}{\text{Ισχύς Εισόδου kVA}} = \frac{S \cos \phi}{S \cos \phi + \text{απώλειες}} \quad (2.4)$$

όπου $S = \text{kVA}$ φορτίο μετασχηματιστή

απώλειες = απώλειες κενού φορτίου + απώλειες φορτίου $\times (S / S_B)^2$

$S_B = \text{kVA}$ ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή

Αν ο συντελεστής ισχύος ή $\cos \phi$ είναι μονάδα, τότε ο τύπος της απόδοσης του μετασχηματιστή έχει ως εξής:

$$\text{Απόδοση} = \frac{S}{S + \text{απώλειες κενού φορτίου} + \text{απώλειες φορτίου} \times (S/S_B)^2} \quad (2.5)$$

Από την εξίσωση (2.5) προκύπτει ότι η απόδοση του μετασχηματιστή αυξάνεται με μείωση των απωλειών του.

2.7. Βιβλιογραφία

- [2.1] Schneider Electric, “Τεχνικό Τετράδιο No.2 – Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ – Χρήση και Συντήρηση”.
- [2.2] European Copper Institute, “The Scope for Energy Saving in the EU Through the Use of Energy – Efficient Electricity Distribution Transformers”, December 1999. It can be downloaded from the URL address:
<http://www.leonardo-energy.org/drupal/files/Full%20project%20report%20-%20Thermie.pdf?download>
that has been accessed on December 2006.
- [2.3] Barry W. Kennedy, “Energy Efficient Transformers”, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [2.4] Π. Σ. Γεωργιάκης, Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, “Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών Διανομής”, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχος 1-2, 2000, σελ. 51-62.

ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥΣ

3.1. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Η μετατροπή ισχύος στους μετασχηματιστές πάντα συνοδεύεται από κάποιες απώλειες. Η απόδοση των σύγχρονων μετασχηματιστών υπερβαίνει το 95%. Οι απώλειες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: σε απώλειες κενού φορτίου και σε απώλειες φορτίου. Οι απώλειες κενού φορτίου λαμβάνουν χώρα στον πυρήνα του μετασχηματιστή κάθε στιγμή και είναι ανεξάρτητες από το φορτίο. Οι απώλειες φορτίου λαμβάνουν χώρα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή όταν αυτός βρίσκεται υπό φορτίο και μεταβάλλονται ανάλογα με το τετράγωνο του φορτίου.

3.2. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Οι απώλειες κενού φορτίου λαμβάνουν χώρα στο πυρήνα του μετασχηματιστή 24 ώρες το 24ωρο, 365 ημέρες το χρόνο, ανεξάρτητα του φορτίου του μετασχηματιστή. Λαμβάνουν χώρα ακόμα και όταν το δευτερεύον τύλιγμα δεν τροφοδοτεί κάποιο φορτίο (είναι ανοικτό κύκλωμα), αρκεί το πρωτεύον τύλιγμα να είναι υπό τάση (ο μετασχηματιστής να είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο).

Για την κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών χρησιμοποιούνται ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού, μονωμένα μεταξύ τους. Το σιδηρομαγνητικό υλικό αποτελείται συνήθως από κράμα πυριτίου και σιδήρου με προσανατολισμένους κόκκους. Ο σίδηρος χρησιμοποιείται επειδή έχει μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα.

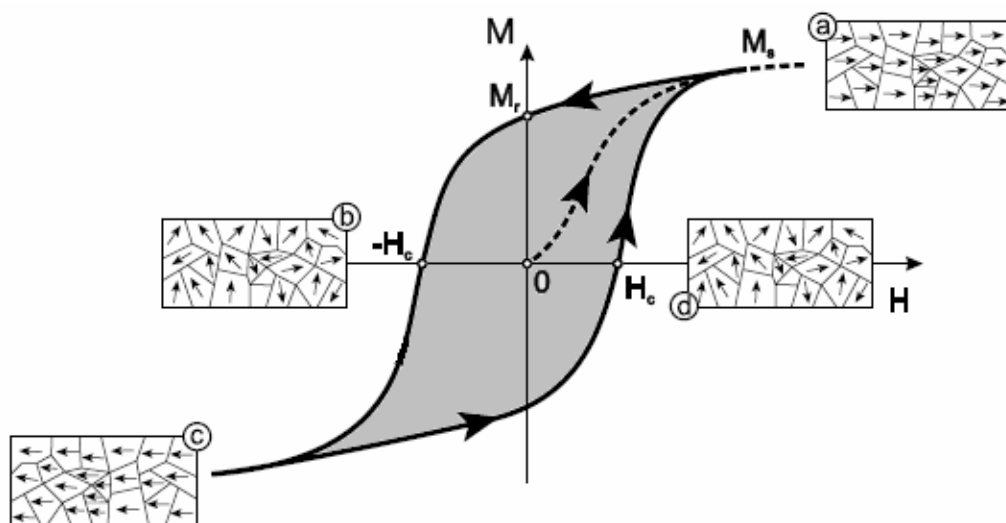
Οι απώλειες κενού φορτίου μπορούν να διαιρεθούν σε πέντε κατηγορίες: (α) απώλειες υστέρησης στα ελάσματα που αποτελούν τον πυρήνα, (β) απώλειες δινορευμάτων στα ελάσματα του πυρήνα, (γ) απώλειες I^2R από το ρεύμα κενού φορτίου, (δ) σποραδικές απώλειες δινορευμάτων στα διάφορα συστατικά στοιχεία του πυρήνα, όπως για παράδειγμα στους σφικτήρες του και τέλος (ε) διηλεκτρικές απώλειες, [3.1]. Οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες δινορευμάτων αποτελούν περίπου το 99% των απωλειών κενού φορτίου, ενώ οι σποραδικές απώλειες δινορευμάτων, διηλεκτρικές απώλειες και απώλειες I^2R είναι μικρές και συχνά θεωρούνται αμελητέες. Οι απώλειες υστέρησης καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών στις απώλειες κενού φορτίου.

3.2.1. Απώλειες υστέρησης

Οι απώλειες υστέρησης είναι απώλειες στα ελάσματα του πυρήνα που προκαλούνται από την αντίσταση της μοριακής δομής του υλικού να μαγνητιστεί και να απομαγνητιστεί από ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτή η αντίσταση των μορίων προκαλεί τριβή, με αποτέλεσμα να έχουμε εμφάνιση θερμότητας. Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν την τάση να διατηρήσουν κάποιο επίπεδο μαγνήτισης όταν εφαρμόζεται σε αυτά κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Όταν το μαγνητικό πεδίο B αυξάνει, τα σιδηρομαγνητικά υλικά φτάνουν κάποτε στο σημείο που όλες σχεδόν οι μαγνητικές τους ροπές είναι προσανατολισμένες παράλληλα με αυτό. Μια τέτοια κατάσταση ονομάζεται μαγνήτιση κόρου, [3.2]. Όσο το σύστημα βρίσκεται σε κόρο, κάθε παραπάνω αύξηση του εξωτερικού πεδίου δεν επιφέρει καμία αύξηση στη μαγνήτιση ή στο πρόσθετο πεδίο που αυτή δημιουργεί. Καθώς προσεγγίζεται ο κόρος η μαγνήτιση M παύει να είναι ανάλογη του εξωτερικού πεδίου B (δηλαδή του πεδίου που δημιουργείται από τα εξωτερικά ρεύματα).

Σε πολλά σιδηρομαγνητικά υλικά η σχέση ανάμεσα στη μαγνήτιση και το εξωτερικό πεδίο είναι διαφορετική όταν αυξάνει το πεδίο, από εκείνη όταν ελαττώνεται το πεδίο. Το σχήμα 3.1 δείχνει την καμπύλη μαγνήτισης για ένα τέτοιο υλικό. Αν, με το υλικό σε κατάσταση κόρου, το εξωτερικό πεδίο μηδενιστεί, η μαγνήτισή του δεν μηδενίζεται. Για να απαλλαγεί το υλικό από τη μαγνήτιση αυτή θα πρέπει να του εφαρμοστεί ένα μαγνητικό πεδίο προς την αντίθετη κατεύθυνση, [3.3].



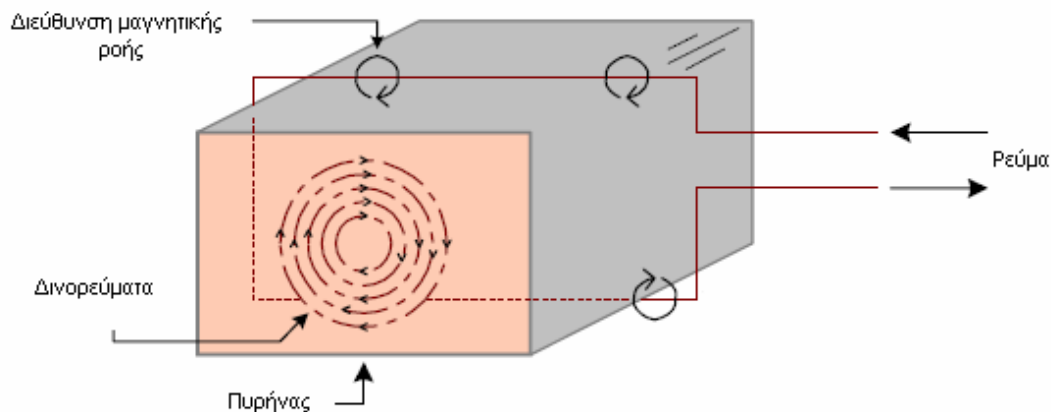
Σχήμα 3.1: Βρόχος υστέρησης.

Η παραπάνω συμπεριφορά ονομάζεται υστέρηση και οι καμπύλες του σχήματος 3.1 βρόχος υστέρησης. Τόσο η διαδικασία για τη μαγνήτιση, όσο και εκείνη για την απομαγνήτιση υλικού που παρουσιάζει υστέρηση, συνεπάγονται κατανάλωση ενέργειας με αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις να αυξάνει η θερμοκρασία του. Επειδή η υστέρηση συνοδεύεται από κατανάλωση ενέργειας, κατάλληλα υλικά για αυτές τις εφαρμογές είναι εκείνα στα οποία ο βρόχος υστέρησης είναι ο στενότερος δυνατός. Ο βρόχος υστέρησης εκτελείται τόσες φορές στη μονάδα του χρόνου όσες ορίζει η συχνότητα του επιβαλλόμενου πεδίου, ενώ το εμβαδόν του βρόχου είναι ευθέως ανάλογο των απωλειών υστέρησης, [3.4]. Πολύ συχνά χρησιμοποιείται μαλακός σίδηρος διότι διαθέτει υψηλή διαπερατότητα χωρίς η υστέρησή του να είναι ιδιαίτερα μεγάλη.

Οι απώλειες υστέρησης αποτελούν το 50 με 80% των συνολικών απωλειών κενού φορτίου. Η μείωση των απωλειών υστέρησης επιτυγχάνεται αλλάζοντας το μέγεθος ή τον τύπο του σιδήρου στον πυρήνα. Με την αύξηση του μεγέθους του πυρήνα μειώνεται το μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα να μειώνονται και οι απώλειες κενού φορτίου. Από τη άλλη πλευρά όμως αυτό οδηγεί σε αύξηση του κόστους του μετασχηματιστή, του βάρους και του όγκου του. Ο σίδηρος με περιεκτικότητα σε πυρίτιο μειώνει τις απώλειες υστέρησης διότι μειώνει την αντίσταση των μορίων στην απομαγνήτισή τους. Επίσης, κάποιες νέες τεχνικές παρέμβασης στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου τη δεκαετία του 1980 είχαν προκαλέσει την μείωση των απωλειών υστέρησης. Τέλος ο άμορφος σίδηρος λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των μορίων του, προκαλεί σημαντική μείωση των απωλειών υστέρησης.

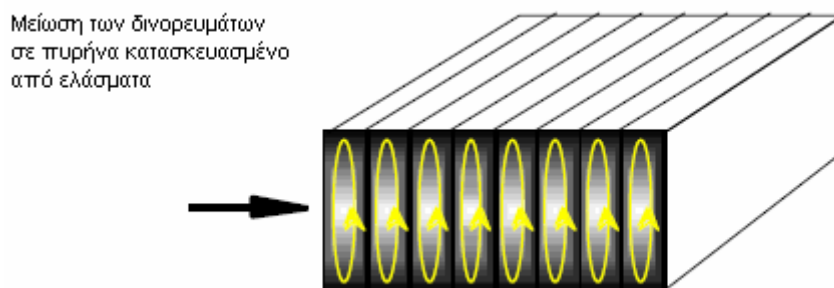
3.2.2. Απώλειες δινορευμάτων

Πολλές ηλεκτρικές συσκευές περιέχουν κομμάτια μετάλλων που είτε κινούνται σε μαγνητικά πεδία ή βρίσκονται μέσα σε μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία. Σε τέτοιες περιπτώσεις επάγονται ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στον όγκο του υλικού. Επειδή οι εικόνες ροής τους μοιάζουν με δίνες που δημιουργούνται σε ποτάμι, τα ονομάζουμε δινορεύματα. Στον μετασχηματιστή το εναλλασσόμενο ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο δημιουργεί εναλλασσόμενη ροή μέσα στον σιδηροπυρήνα του. Αυτή η συνεχώς μεταβαλλόμενη ροή προκαλεί μια επαγόμενη ΗΕΔ στο δευτερεύον πηνίο. Ο σιδηροπυρήνας όμως είναι αγωγός και μπορούμε να απεικονίσουμε οποιαδήποτε διατομή του, με κυκλώματα το ένα μέσα στο άλλο (Σχ. 3.2). Η ροή που διαπερνά κάθε ένα από αυτά τα κυκλώματα μεταβάλλεται συνεχώς, με αποτέλεσμα τα δινορεύματα να κυκλοφορούν σε όλο τον όγκο του σιδηροπυρήνα, [3.2]. Οι δρόμοι που ακολουθούν τα δινορεύματα σχηματίζουν επίπεδα κάθετα στη μαγνητική ροή. Αυτά τα δινορεύματα είναι ανεπιθύμητα, επειδή σπαταλούν ενέργεια με τη θέρμανση I^2R και επειδή προκαλούν αυτά τα ίδια αντιτιθέμενη ροή.



Σχήμα 3.2: Δινορεύματα στον πυρήνα που παρουσιάζονται στη διατομή του.

Τα δινορεύματα που δημιουργούνται στους μετασχηματιστές περιορίζονται σημαντικά με τη χρήση φυλλωτού πυρήνα, δηλαδή ενός σιδηροπυρήνα που αποτελείται από λεπτά φύλλα. Η μεγάλη ηλεκτρική επιφανειακή αντίσταση του κάθε φύλλου, που οφείλεται είτε σε φυσική επίστρωση οξειδίου, ή σε μονωτικό βερνίκι, ουσιαστικά περιορίζει τα δινορεύματα σε κάθε φύλλο, όπως εμφανίζεται στο σχήμα 3.3. Οι δρόμοι που είναι διαθέσιμοι για τα δινορεύματα είναι στενότεροι, η ΗΕΔ που επάγεται σε κάθε δρόμο είναι μικρότερη και τα δινορεύματα περιορίζονται δραματικά.



Σχήμα 3.3: Περιορισμός των δινορευμάτων με τη χρήση ελασμάτων στον πυρήνα.

Σε μικρούς μετασχηματιστές, όπου έχει μεγάλη σημασία να κρατηθούν οι απώλειες λόγω δινορευμάτων στο ελάχιστο, οι σιδηροπυρήνες κατασκευάζονται μερικές φορές από φερρίτες, που είναι σύνθετα οξειδία σιδήρου και άλλων μετάλλων, [3.2]. Αυτά τα υλικά είναι σιδηρομαγνητικά, αλλά έχουν πολύ μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από τον καθαρό σίδηρο.

Οι απώλειες δινορευμάτων αποτελούν το 20 με 50% των συνολικών απωλειών κενού φορτίου. Εκτός από τη χρήση λεπτών ελασμάτων για την κατασκευή του πυρήνα, η μόνωση μεταξύ των ελασμάτων, έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνει την απόδοση του μετασχηματιστή αλλά ταυτόχρονα αυξάνει το κόστος, το βάρος και τον όγκο του. Εκτός από τις απώλειες δινορευμάτων στον πυρήνα έχουμε και τις σποραδικές απώλειες δινορευμάτων.

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

3.3. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

Οι απώλειες φορτίου ποικίλουν σύμφωνα με το φορτίο σε έναν μετασχηματιστή. Αποτελούνται από τις απώλειες θερμότητας στον αγωγό, που προκαλούνται από το φορτίο στον αγωγό κι από τις απώλειες δινορευμάτων στον αγωγό, [3.1]. Οι απώλειες αυξάνονται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, διότι η αντίσταση στον αγωγό αυξάνεται με την θερμοκρασία. Είναι δύσκολο να καθορίσουμε τις απώλειες φορτίου, για το λόγο ότι είναι δύσκολο να γνωρίζουμε τη φόρτιση ενός μετασχηματιστή. Απαιτεί να γνωρίζουμε το μέγιστο φορτίο καθώς επίσης και τον συντελεστή φορτίου. Στη συνέχεια περιγράφουμε τις απώλειες φορτίου τόσο για μετασχηματιστές ισχύος όσο και για μετασχηματιστές διανομής. Οι κύριες απώλειες φορτίου είναι οι απώλειες I^2R ή οι απώλειες χαλκού.

3.3.1. Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες I^2R συχνά αναφέρονται και ως απώλειες χαλκού επειδή συμβαίνουν στα τύλιγματα του μετασχηματιστή που είναι συνήθως από χαλκό. Λαμβάνουν χώρα τόσο στο πρωτεύον τύλιγμα όσο και στο δευτερεύον τύλιγμα. Είναι αποτέλεσμα της αντίστασης του χάλκινου αγωγού κατά την ροή του ρεύματος ή των ηλεκτρονίων μέσα στον αγωγό. Η κίνηση των ηλεκτρονίων επιφέρει την κίνηση των μορίων μέσα στον αγωγό με αποτέλεσμα να δημιουργείται τριβή και θερμότητα, ενώ η ενέργεια που καταναλώνεται από αυτή την κίνηση μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (3.1). Είναι σημαντικές απώλειες σε μέγεθος και ισοδυναμούν ή είναι μεγαλύτερες από τις απώλειες κενού φορτίου.

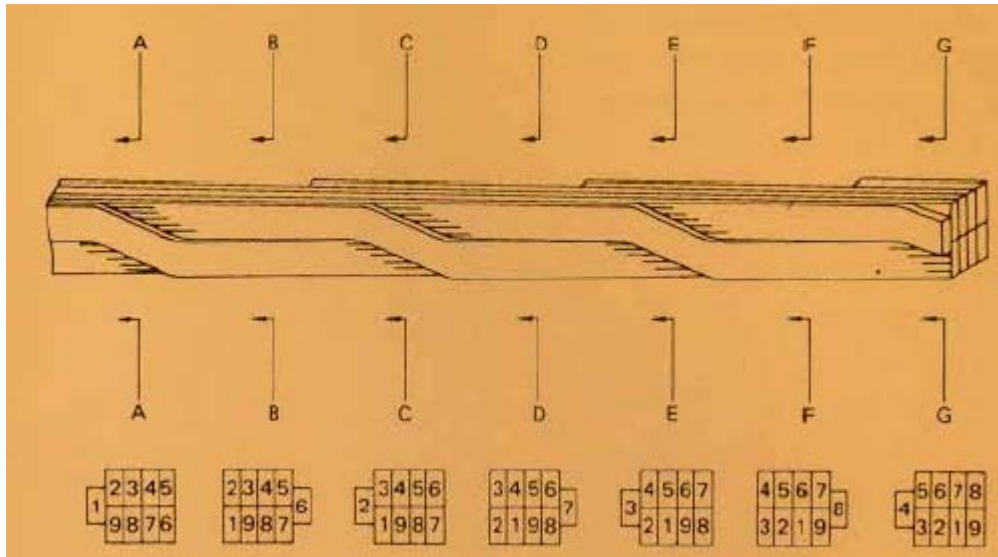
$$VA = (\text{volts}) (\text{amperes}) = V I \text{ ή } VA = (R I) (I) \text{ ή } I^2R \quad (3.1)$$

Το ρεύμα, I , που αποτελεί το ένα συστατικό των απωλειών I^2R δεν μπορεί να αλλαχθεί μέσω της σχεδίασης του μετασχηματιστή. Επομένως ο σχεδιαστής του μετασχηματιστή για να μειώσει τις απώλειες χαλκού και να πετύχει έναν μετασχηματιστή με καλύτερη απόδοση πρέπει να αλλάξει την αντίσταση, R , που είναι το δεύτερο τμήμα της εξίσωσης (3.1). Η αντίσταση μειώνεται χρησιμοποιώντας υλικά τα οποία έχουν μικρή αντίσταση ανά μονάδα επιφάνειας διατομής, χωρίς όμως να αυξάνουν σημαντικά το κόστος του μετασχηματιστή. Ο χαλκός έχει βρεθεί να είναι το καλύτερο υλικό για τους αγωγούς από άποψη κόστους, βάρους, μεγέθους και αντίστασης. Εκτός από την επιλογή της αλλαγής του υλικού υπάρχουν δύο ακόμη διαφορετικοί τρόποι για τον κατασκευαστή του μετασχηματιστή να μειώσει τις απώλειες I^2R . Ο ένας τρόπος είναι να αυξήσει το εμβαδόν της διατομής του

αγωγού και ο άλλος είναι να μειώσει το μήκος του αγωγού. Η μεγαλύτερη διατομή επιτρέπει τη ροή του ρεύματος διαμέσου του αγωγού να γίνεται με λιγότερη κίνηση των μορίων. Επίσης η αντίσταση στον αγωγό είναι ευθέως ανάλογη με το μήκος του αγωγού και επομένως η μείωση του μήκους του αγωγού, μειώνει την αντίσταση.

3.3.2. Απώλειες δινορευμάτων αγωγού

Οι απώλειες δινορευμάτων σε έναν αγωγό είναι παρόμοιες με εκείνες που συμβαίνουν στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Οφείλονται στη μαγνητική ροή που διαπερνά κάθετα τον αγωγό και προκαλεί τη ροή δινορευμάτων στο εσωτερικό του. Η μείωση τους επιτυγχάνεται μετατοπίζοντας εναλλάξ τους αγωγούς όπως εμφανίζεται στο σχήμα 3.4



Σχήμα 3.4: Αγωγός σε ελικοειδή μορφή για μείωση των απωλειών.

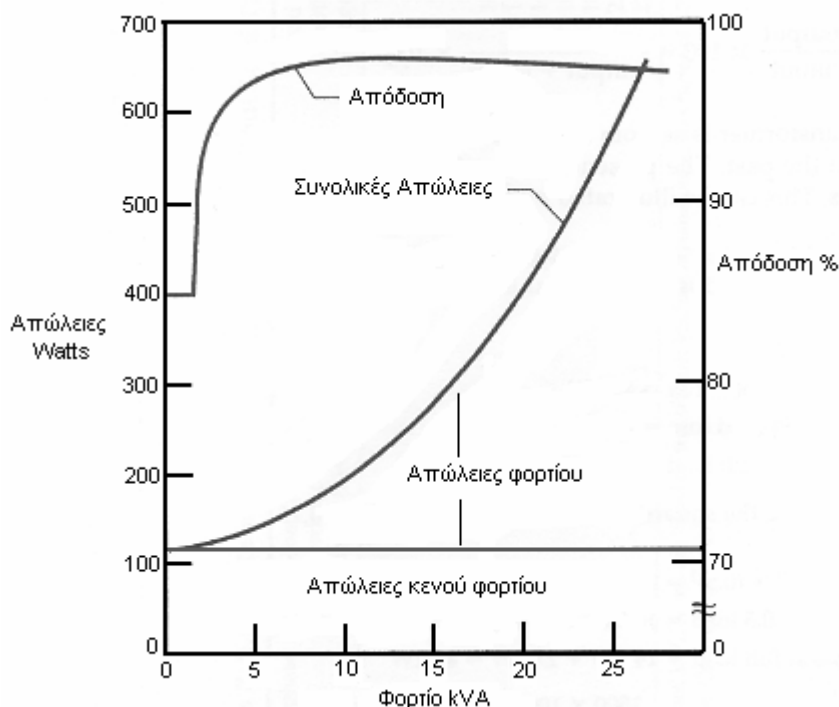
3.4. ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Οι βοηθητικές απώλειες προέρχονται από τον εξοπλισμό του συστήματος ψύξης, όπως είναι οι ανεμιστήρες και οι αντλίες, που επιδρούν στο φορτίο ενός μετασχηματιστή. Η κατανάλωση ενέργειας του βοηθητικού εξοπλισμού εξαρτάται από την ιπποδύναμη των ανεμιστήρων και των αντλιών καθώς και από το χρόνο χρήσης αυτού του συστήματος. Ο χρόνος χρήσης με τη σειρά του καθορίζεται από το φορτίο του μετασχηματιστή. Αυτό καθορίζεται από το φορτίο αιχμής. Συνήθως η λειτουργία των ανεμιστήρων και των αντλιών συμβαίνει όταν το φορτίο φτάσει στο 133% και στο 167% αντίστοιχα του ονομαστικού φορτίου λειτουργίας του μετασχηματιστή που αναγράφεται στην πινακίδα του, [3.1]. Μερικοί μετασχηματιστές είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν οι ανεμιστήρες τους και οι αντλίες τους συνεχόμενα. Αυτοί αναφέρονται ως FOA μετασχηματιστές.

Οι απώλειες κενού φορτίου και οι απώλειες φορτίου είναι κοινές για όλους τους τύπους των μετασχηματιστών, είτε πρόκειται για μετασχηματιστές ισχύος είτε πρόκειται για μετασχηματιστές διανομής. Οι βοηθητικές απώλειες όμως είναι συνήθως συνδεδεμένες μόνο με τους μετασχηματιστές ισχύος και αυτή είναι μια κύρια διάφορα των μετασχηματιστών ισχύος και διανομής, όπου πρέπει να συμπεριλαμβάνουμε τις απώλειες αυτές όταν υπολογίζουμε τις απώλειες σε έναν μετασχηματιστή ισχύος.

3.5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Ο προσδιορισμός των απωλειών κενού φορτίου είναι συνήθως πολύ απλός και ακριβής. Οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές 24 ώρες την ημέρα, 365 μέρες τον χρόνο. Μπορούν να προσδιοριστούν από τις μετρήσεις του κατασκευαστή σε κενό φορτίο. Εξαρτώνται από την ισχύ του μετασχηματιστή (kVA), την τάση και τη σχεδίασή του. Θα πρέπει να εκτιμώνται διαφορετικά από τις απώλειες φορτίου, διότι έχουν διαφορετική οικονομική αξία. Συνήθως αξίζουν περισσότερο επειδή είναι σταθερές και δεν μεταβάλλονται με το χρόνο. Στο σχήμα 3.5 εμφανίζονται οι απώλειες κενού φορτίου να είναι σταθερές σε σχέση με τις απώλειες φορτίου, [3.1].



Σχήμα 3.5: Απώλειες σε σχέση με το φορτίο.

3.6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

Ο προσδιορισμός των απωλειών φορτίου είναι πιο σύνθετος από ότι είναι ο προσδιορισμός των απωλειών κενού φορτίου, διότι μεταβάλλονται σύμφωνα με το φορτίο στη διάρκεια του χρόνου. Αυτό εμφανίζεται και στο σχήμα 3.5. Το ότι οι απώλειες φορτίου μεταβάλλονται με το χρόνο, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε το φορτίο του συστήματος, το οποίο δίνεται μέσω του φορτίου αιχμής. Επομένως θα πρέπει να μετασχηματίσουμε το φορτίο αιχμής σε φορτίο σε όλο το χρόνο. Αυτός ο μετασχηματισμός επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το συντελεστή φορτίου.

Ο συντελεστής φορτίου είναι ένας σημαντικός επομένως συντελεστής για τον προσδιορισμό των απωλειών φορτίου σε μετασχηματιστές ισχύος και διανομής. Ο συντελεστής φορτίου ορίζεται ως ο λόγος του μέσου φορτίου σε kilowatts προς το φορτίο αιχμής σε kilowatts, όπως εμφανίζεται στην εξίσωση (3.2):

$$\text{Συντελεστής φορτίου} = \frac{\text{Μέσο φορτίο σε kW}}{\text{Φορτίο αιχμής σε kW}} \quad (3.2)$$

Εφόσον ο συντελεστής φορτίου είναι πλέον προσδιορισμένος, τότε μέσω του συντελεστή απωλειών στην εξίσωση (3.3) μπορούμε να προσδιορίζουμε τις απώλειες φορτίου:

$$\text{Συντελεστής απωλειών} = 0.15 \times \text{συντ. φορτίου} + 0.85 \times \text{συντ. φορτίου}^2 \quad (3.3)$$

Η παραπάνω σχέση είναι εμπειρική σχέση και μπορεί να διαφέρει από σύστημα σε σύστημα. Στη συνέχεια για να προσδιορίσουμε τις απώλειες για αντίστοιχη φόρτιση σε έναν μετασχηματιστή, πρέπει να υπολογίσουμε τον συντελεστή δυναμικότητας. Αυτό γίνεται με τη χρήση της εξίσωσης (3.4):

$$\text{Συντελεστής δυναμικότητας (CF)} = \frac{\text{φορτίο αιχμής μετασχηματιστή}}{\text{φορτίο λειτουργίας μετασχηματιστή}} \quad (3.4)$$

Το φορτίο αιχμής σε έναν μετασχηματιστή δεν είναι πάντα εύκολο να προσδιοριστεί. Μπορεί να προσδιοριστεί από την ανάλυση ροής του φορτίου. Επομένως μια τέτοια ανάλυση μπορεί να είναι διαθέσιμη για ένα μετασχηματιστή ισχύος, αλλά δεν είναι πάντα διαθέσιμη για έναν μετασχηματιστή διανομής. Συχνά σε έναν μετασχηματιστή διανομής, η αιχμή του φορτίου του μπορεί να διαφέρει από την αιχμή του φορτίου του τροφοδότη του. Για αυτό το λόγο το μέγιστο φορτίο σε έναν μετασχηματιστή μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ευθύνης:

$$\text{Συντελεστής ευθύνης} = \frac{\text{φορτίο αιχμής τροφοδότη}}{\text{φορτίο αιχμής μετασχηματιστή}} \quad (3.5)$$

Τέλος ο προσδιορισμός των απωλειών φορτίου σε kilowatthours γίνεται από την εξίσωση (3.6):

$$\text{kWh} = \text{συντ. απωλειών} \times \text{CF}^2 \times \text{απώλειες σε kW} \times 8760 \text{ h/yr} \quad (3.6)$$

Οι απώλειες σε kW που αναφέρουμε στην εξίσωση (3.6) είναι οι απώλειες φορτίου που προσδιορίζει ο σχεδιαστής και αναφέρονται στην πινακίδα του μετασχηματιστή.

3.7. ΜΕΘΟΟΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Η απόδοση των μετασχηματιστών βελτιώνεται μέσω της μείωσης των απωλειών στον μετασχηματιστή. Οι απώλειες μπορούν να μειωθούν με μεταβολή της σχεδίασης, της κατασκευής, της λειτουργίας και της συντήρησης του μετασχηματιστή καθώς και με εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος βελτίωσης της απόδοσης του μετασχηματιστή είναι μέσω της μεταβολής της σχεδίασής του.

3.7.1. Βελτίωση απόδοσης μέσω της σχεδίασης

Η ιδεατή σχεδίαση μετασχηματιστή στοχεύει να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου. Για τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου συνήθως επιλέγεται η μείωση της μαγνητικής επαγωγής, που σημαίνει περισσότερες σπείρες, με συνέπεια να αυξάνονται οι απώλειες φορτίου. Παρόμοια, αν μειωθεί η πυκνότητα του ρεύματος, θα μειωθούν οι απώλειες φορτίου, όμως στην περίπτωση αυτή απαιτείται περισσότερο μαγνητικό υλικό, οπότε αυξάνονται οι απώλειες κενού φορτίου. Η σχεδίαση με μειωμένες απώλειες είναι ένας συμβιβασμός από τη μια μεριά με την κατανομή των απωλειών στον πυρήνα και στα πηνία και από την άλλη μεριά με το βάρος, το μέγεθος, τον όγκο, την τάση βραχυκύκλωσης, τη μόνωση και το κόστος του μετασχηματιστή [3.5].

Οι απώλειες στον πυρήνα και στο πηνίο, συνδέονται μεταξύ τους και μέσω της θερμότητας που παράγουν και μέσω του φυσικού χώρου που καταλαμβάνουν τα συστατικά τους. Οι μετασχηματιστές είναι σχεδιασμένοι για σταθερή θερμοκρασία ανύψωσης, ως αποτέλεσμα της θερμότητας που παράγεται από τις απώλειες του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, [3.6]. Το όριο ανύψωσης της θερμοκρασίας είναι ένα σχεδιαστικό όριο και καθορίζεται μέσω σταθερών τιμών. Αν η τιμή της θερμοκρασίας υπερβεί αυτό το όριο, τότε λόγω αστοχίας του μονωτικού μέσου οδηγούμαστε σε μείωση της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή.

Εκτός όμως από τον πυρήνα και το πηνίο, ένας μετασχηματιστής διαθέτει κι άλλα στοιχεία τα οποία επιδρούν στη σχεδίασή του, όπως για παράδειγμα το μονωτικό μέσο ή το δοχείο. Η σχεδίαση του μετασχηματιστή είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει την επιλογή του κατάλληλου υλικού και την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας, [3.6].

Οι σύγχρονες τεχνικές σχεδίασης με τη βοήθεια Η/Υ επιτρέπουν πολλές μεταβολές στις μεταβλητές σχεδίασης με αποτέλεσμα την επιλογή της βέλτιστης τεχνικοοικονομικά λύσης, [3.5]. Στον πίνακα 3.1 φαίνεται πως η μεταβολή της σχεδίασης του πυρήνα και των τυλιγμάτων μπορεί να μειώσει τις απώλειες κενού φορτίου καθώς επίσης και πως αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν το κόστος του μετασχηματιστή.

		Απώλειες Κενού	Απώλειες Φορτίου	Κόστος
Μείωση απωλειών κενού φορτίου				
A.	Χρήση υλικού πυρήνα χαμηλότερων απωλειών	Χαμηλότερες	Αμετάβλητες	Υψηλότερο
B1.	Μείωση μαγνητικής ροής με αύξησης της εγκάρσιας διατομής του πυρήνα	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Υψηλότερο
B2.	Μείωση μαγνητικής ροής με μείωση της τάσης ανά σπείρα	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Υψηλότερο
Γ.	Μείωση του μήκους διαδρομής της ροής με μείωση της εγκάρσιας διατομής του αγωγού	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Χαμηλότερο
Μείωση απωλειών φορτίου				
A.	Χρήση αγωγού χαμηλότερων απωλειών	Αμετάβλητες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο
B.	Μείωση πυκνότητας ρεύματος με αύξηση της εγκάρσιας διατομής του αγωγού	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Υψηλότερο
Γ1.	Μείωση του μήκους διαδρομής του ρεύματος με μείωση της εγκάρσιας διατομής του πυρήνα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο
Γ2.	Μείωση του μήκους διαδρομής του ρεύματος με αύξηση της τάσης ανά σπείρα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο

Πίνακας 3.1: Εναλλακτικές τεχνικές μείωσης απωλειών.

Στον πίνακα 3.1 εμφανίζονται συγκεντρωτικά οι εναλλακτικές λύσεις που έχει ο σχεδιαστής, έτσι ώστε να επιτύχει έναν μετασχηματιστή με μεγαλύτερη απόδοση. Για τις περισσότερες από αυτές τις εναλλακτικές προσεγγίσεις είναι εμφανής η ισορροπία μεταξύ των απωλειών κενού φορτίου, των απωλειών φορτίου και του κόστους.

3.7.2. Βελτίωση απόδοσης μέσω της κατασκευής

Οι τεχνικές κατασκευής των μετασχηματιστών μέσω εναλλακτικών μαγνητικών υλικών και διαμορφώσεων του πυρήνα μειώνουν τις απώλειες κενού φορτίου. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, ψυχρής εξέλασης, με προσανατολισμένους κόκκους. Για επιπλέον μειώσεις των απωλειών κενού φορτίου χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο χαραγμένο με laser, στον οποίο οι κόκκοι είναι προσανατολισμένοι κατά την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Αυτό μειώνει τις απώλειες υστέρησης μέσω της μείωσης της αντίστασης του σιδήρου κατά την διαδικασία της μαγνήτισης και της απομαγνήτισης του. Οπωσδήποτε, αυτή η μέθοδος είναι ακριβή και επιλέγεται μόνο όταν ο χρηστής του μετασχηματιστή δίνει μεγάλη βαρύτητα στις απώλειες.

Χρησιμοποιώντας λεπτότερα ελάσματα σιδήρου, ο κατασκευαστής του μετασχηματιστή μειώνει σημαντικά τις απώλειες δινορευμάτων. Αυτή είναι μια διαδικασία αρκετά επίπονη και δαπανηρή, αφού κάποιοι μεγάλοι μετασχηματιστές απαιτούν για την συναρμολόγηση του πυρήνα τους περισσότερα από 50.000 φύλλα σιδήρου.

Η χρήση άμορφου σιδήρου ως υλικού κατασκευής του πυρήνα οδηγεί σε μείωση των απωλειών κενού φορτίου από 75% έως 80% σε σχέση με τον μετασχηματιστή με συμβατικό πυριτιούχο σίδηρο. Τα μόρια στον άμορφο σίδηρο έχουν τυχαίο προσανατολισμό σε σύγκριση με τα προσανατολισμένα μόρια στη δομή του πυριτιούχου σιδήρου. Όταν ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται σε έναν πυρήνα κατασκευασμένο από άμορφο σίδηρο, απορροφά λιγότερη ενέργεια στη μαγνήτιση και στην απομαγνήτιση του από ότι σε ένα πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνει τις απώλειες υστέρησης σημαντικά. Τα λεπτότερα ελάσματα σε ένα πυρήνα από άμορφο σίδηρο μειώνουν τις απώλειες δινορευμάτων διότι μειώνεται η αντίσταση μεταξύ των ελασμάτων. Επίσης ο πυρήνας από άμορφο σίδηρο είναι μεγαλύτερος και βαρύτερος από ένα πυρήνα που είναι κατασκευασμένος από πυριτιούχο σίδηρο. Ο πυριτιούχος σίδηρος, που είναι χαραγμένος με laser, είναι ακριβότερος από το συμβατικό, ενώ πολύ πιο ακριβός είναι ο άμορφος σίδηρος. Για το λόγο αυτό οι δύο αυτές επιλογές μαγνητικού υλικού ακολουθούνται, όταν δίνεται μεγάλη βαρύτητα στο κόστος των απωλειών.

Το αλουμίνιο και ο χαλκός είναι τα δυο υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στα τυλίγματα των μετασχηματιστών διανομής. Όταν τα δύο αυτά υλικά εφαρμόζονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, ο χαλκός εμφανίζεται να έχει καλύτερη αγωγιμότητα και 40% μειωμένες ωμικές απώλειες από ότι το αλουμίνιο, [3.6]. Σε σύγκριση με το χαλκό, το αλουμίνιο μπορεί να μορφοποιηθεί ευκολότερα και είναι πιο φθινό. Ο αγωγός από αλουμίνιο εμφανίζεται να έχει τις ίδιες απώλειες φορτίου με εκείνες που έχει ο αγωγός από χαλκό. Ωστόσο το μειονέκτημα του αλουμινίου είναι ότι παρουσιάζει αυξημένες απώλειες πυρήνα σε σχέση με το χαλκό. Στους μετασχηματιστές διανομής, σε κάποιες σχεδιάσεις ακολουθείται η τακτική να χρησιμοποιείται χαλκός για το πηνίο υψηλής τάσης και αλουμίνιο για το πηνίο χαμηλής τάσης. Η χρήση αλουμινίου στο τυλίγμα χαμηλής τάσης μειώνει τις απώλειες από δινορεύματα. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε ότι υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα στο κόστος του υλικού και στις απώλειες.

3.7.3. Βελτίωση απόδοσης μέσω του βοηθητικού εξοπλισμού

Οι απώλειες από το βοηθητικό εξοπλισμό μπορούν να μειωθούν μέσω της μείωσης του χρόνου λειτουργίας του βοηθητικού εξοπλισμού. Ο έλεγχος του χρόνου λειτουργίας γίνεται με τη χρήση θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται κοντά στα τυλίγματα του μετασχηματιστή για να ανιχνεύουν τη θερμοκρασία τους. Όταν η τιμή της θερμοκρασίας υπερβαίνει τα προκαθορισμένα όρια, τα θερμοστοιχεία στέλνουν σήμα δια μέσου ενός πομπού και ενός δεκτή στους ανεμιστήρες και στις αντλίες για να λειτουργήσουν και να επέλθει η θερμοκρασία ξανά σε ανεκτά επίπεδα. Η εσωτερική αυτή θερμοκρασία συνήθως επιλέγεται να μην ξεπερνά τους 65 °C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, [3.1].

3.7.4. Βελτίωση απόδοσης μέσω του μεγέθους του

Το μέγεθος του μετασχηματιστή, δηλαδή η ονομαστική ικανότητά του, επηρεάζει την απόδοση του, [3.7]. Ένας μετασχηματιστής με το κατάλληλο μέγεθος διατηρεί τις απώλειες φορτίου στο ελάχιστο. Ένας μετασχηματιστής με μεγαλύτερη ονομαστική ικανότητα από την απαιτούμενη μπορεί να έχει υψηλές απώλειες κενού φορτίου, ενώ ένας μετασχηματιστής με μικρότερη ονομαστική ικανότητα μπορεί να έχει υψηλές απώλειες φορτίου. Το κατάλληλο μέγεθος ενός μετασχηματιστή εξαρτάται από την οικονομική αξία και το μέγεθος τόσο των απωλειών φορτίου όσο και των απωλειών κενού φορτίου.

Οι συνολικές απώλειες όμως δεν είναι σταθερές στη διάρκεια του χρόνου και εξαρτώνται από το φορτίο στο μετασχηματιστή. Η ονομαστική ικανότητα του μετασχηματιστή δεν θα πρέπει να επιλέγεται μόνο με κριτήρια που αφορούν το παρόν αλλά και το μέλλον. Θα πρέπει να εκτιμήσουμε το μελλοντικό φορτίο λειτουργίας του μετασχηματιστή στη διάρκεια του χρόνου ζωής του και επομένως τις μελλοντικές του απώλειες. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες μέσω της καταλληλότερης επιλογής αποδοτικού μετασχηματιστή με βάση τα κριτήρια που αναφέραμε, [3.8].

3.7.5. Βελτίωση απόδοσης μέσω της λειτουργίας του

Η λειτουργία του μετασχηματιστή μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή του. Ο μετασχηματιστής ισχύος με μεταγωγέα τάσεων μπορεί να λειτουργεί με τέτοιο τρόπο που να ελαχιστοποιεί τις απώλειες στο σύστημα διανομής και μεταφοράς. Λειτουργώντας με τον μεταγωγέα τάσεων στην μέγιστη τάση λειτουργίας, το σύστημα διανομής και μεταφοράς λειτουργεί με τη μέγιστη τάση και με τις χαμηλότερες απώλειες, παρόλο που ο μετασχηματιστής ισχύος με μεταγωγέα τάσεων έχει ελαφρώς υψηλότερες απώλειες φορτίου και κενού φορτίου από ότι ένας μετασχηματιστής χωρίς μεταγωγέα τάσεων, [3.1].

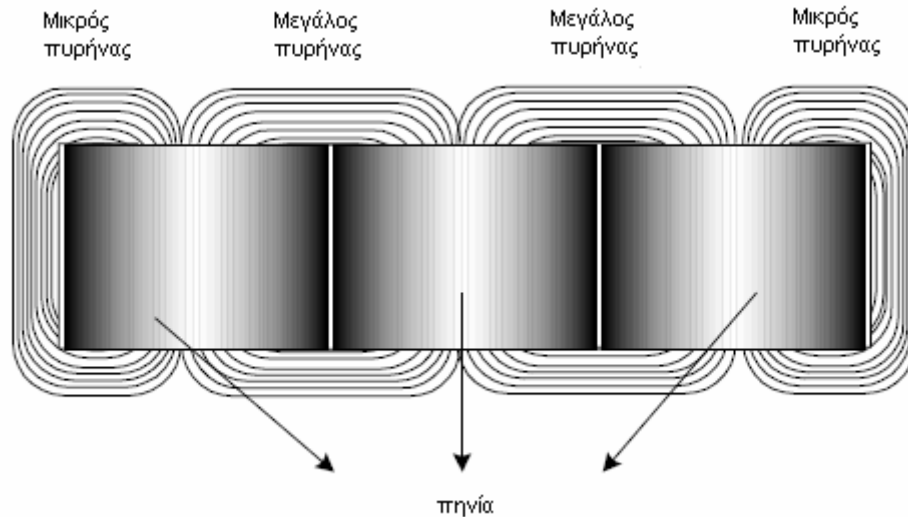
Ένας τρόπος μείωσης των απωλειών είναι μέσω της λειτουργίας των μετασχηματιστών με τρόπο ώστε να υπάρχει ισορροπία στη φόρτισή τους, διότι οι συνολικές απώλειες είναι χαμηλότερες, όταν το φορτίο μοιράζεται στους μετασχηματιστές σύμφωνα με την ονομαστική τους ικανότητα.

3.7.6. Βελτίωση απόδοσης μέσω της συντήρησής του

Η συντήρηση του μετασχηματιστή περιλαμβάνει επιθεώρηση και έλεγχο, ανακαίνιση και απόσυρση. Πολλοί λίγοι χρηστές συντηρούν τους μετασχηματιστές, προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια. Η συντήρηση συνήθως συνδέεται με την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Αν ένας χρηστής μπορεί με τρόπο οικονομικό να αντικαταστήσει ένα λιγότερο αποδοτικό με έναν περισσότερο αποδοτικό μετασχηματιστή, τότε θα εξοικονομεί ένα σημαντικό ποσό ενέργειας, [3.5].

3.7.7. Βελτίωση απόδοσης με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης

Οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης έχουν πρόσφατα εφαρμοστεί για τη βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών μέσω της μείωσης των απωλειών κενού φορτίου, [3.9]. Με τη χρήση των δένδρων απόφασης προσδιορίζονται οι πιο σημαντικές παράμετροι, που επιδρούν στις απώλειες κενού φορτίου, [3.10]. Τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζονται για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, χρησιμοποιώντας ως είσοδο τις τιμές των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί από τα δέντρα απόφασης, [3.11].



Σχήμα 3.6: Ενεργό μέρος μετασχηματιστή.

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής τύπου τυλιχτού πυρήνα αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς ατομικούς πυρήνες όπως εμφανίζεται στο σχήμα 3.6. Όταν πρόκειται να κατασκευαστεί μια παρτίδα, έστω 50 μετασχηματιστών (ίδια μελέτη και ίδιος τύπος μετασχηματιστή), τότε πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα της ομαδοποίησης των πυρήνων, δηλαδή να συνδυαστούν οι 200 ατομικοί πυρήνες με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, έτσι ώστε να προκύψουν 50 μετασχηματιστές με τις χαμηλότερες δυνατές απώλειες. Επειδή ο αριθμός των συνδυασμών αυτών είναι αρκετά μεγάλος για έναν τυπικό αριθμό πυρήνων, χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι έτσι ώστε να υπολογιστεί μέσα σε μερικές ανακυκλώσεις η βέλτιστη διάταξη των ατομικών πυρήνων, [3.5]. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προκαλέσει μείωση των απωλειών κενού φορτίου της τάξεως του 3% ή και πολλές φορές ακόμα μεγαλύτερη για μια τυπική παρτίδα 50 μετασχηματιστών.

3.8. Βιβλιογραφία

- [3.1] Barry W. Kennedy, “Energy Efficient Transformers”, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [3.2] Hugh D. Young, “Ηλεκτρομαγνητισμός Οπτική Σύγχρονη Φυσική”, Τόμος Β, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1994.
- [3.3] Chalmers University of Technology, EM4: Magnetic Hysteresis, April 2003. It can be downloaded from the URL address:
http://www.fy.chalmers.se/edu/lab/labpm/em4_magnetic_hysteresis.pdf
that has been accessed on July 2006.
- [3.4] Α. Τσιβγούλη, “Μελέτη απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών ισχύος με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων”, Διπλωματική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2006.
- [3.5] Π. Σ. Γεωργιλάκης, Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, “Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών Διανομής”, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχος 1-2, 2000, σελ. 51-62.
- [3.6] Energy Efficiency and Renewable Energy, Chapter 4: Screening Analysis, July 2004. It can be downloaded from the URL address:
http://www.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/commercial/pdfs/dist_trans_chp_4.pdf
that has been accessed on January 2007.
- [3.7] Α. Κάρτας και Δ. Τσανάκα, “Εξέταση της Δυνατότητας Υπερφόρτισης Μετασχηματιστών Λαδιού”, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, τομ. 17, τεύχος 1-2, 1997, σελ 69-80.
- [3.8] Kinectrics Inc, “Distribution System Energy losses at Hydro One”, July 2005. It can be downloaded from the URL address:
http://www.hydroonenetworks.com/en/regulatory/2006_distribution_rate_application/downloads/DXRateFiling/ExhibitA/Exhibit%20A%20-%20Tab%2015%20-%20Schedule%202.pdf
that has been accessed on October 2006
- [3.9] P.S. Georgilakis, N.D. Hatziaargyriou and D.G. Paparigas, “AI Helps Reduce Transformer Iron Losses”, IEEE Computer Applications in Power, vol 12, no4, October 1999, pp. 41-46.
- [3.10] N. D. Hatziaargyriou, P. S. Georgilakis, D. S. Spiliopoulos and J. A. Bakopoulos, “Quality Improvement of Individual Cores of Distribution Transformers Using Decision Trees”, Int. Journal of Engineering Intelligent Systems, vol23, no 1-3, December 1998, pp. 15-29.
- [3.11] Π. Σ. Γεωργιλάκης, “Συμβολή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στη μείωση των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών διανομής”, διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.

ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

4.1. Η ΑΞΙΑ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Η αξία των απωλειών είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόφαση για την αγορά ενός μετασχηματιστή. Αν ο αγοραστής θεωρήσει ότι η αξία των απωλειών είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του στην αγορά ενός μετασχηματιστή, τότε θα αγοράσει έναν μετασχηματιστή με υψηλή ενεργειακή απόδοση. Αντίθετα αν θεωρήσει πως η αξία των απωλειών δεν είναι σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του αυτή, τότε θα επιλέξει έναν λιγότερο αποδοτικό μετασχηματιστή.

Γιατί αναφερόμαστε σε αξία των απωλειών και όχι σε κόστος των απωλειών; Η αξία των απωλειών είναι κάτι υποκειμενικό και οφείλεται στην κρίση του κάθε αγοραστή να αποτιμήσει ο ίδιος τις απώλειες. Μπορεί κάποιος αγοραστής να θεωρήσει ως αξία των απωλειών το πραγματικό κόστος των απωλειών ή μπορεί να θεωρήσει ότι η αξία των απωλειών σχετίζεται επιπρόσθετα με τη μόλυνση του περιβάλλοντος. Μια ηλεκτρική εταιρία αποτιμά διαφορετικά τις απώλειες από ότι ένας εμπορικός ή βιομηχανικός χρήστης. Η ηλεκτρική εταιρεία παράγει, μεταφέρει και διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια. Επομένως, πρέπει να υπολογίζει το κόστος κάλυψης των απωλειών κατά τη φάση της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος των απωλειών πρέπει να υπολογίζεται με ακρίβεια. Πολλοί παράγοντες όμως επιδρούν στον υπολογισμό του κόστους των απωλειών, όπως ο πληθωρισμός, η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή, η αξία των απωλειών κενού φορτίου, η αξία των απωλειών φορτίου, η αξία του χρήματος, κ.α., [4.1]. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό πως η αποτίμηση των απωλειών είναι διαφορετική για μια ηλεκτρική εταιρία και διαφορετική για έναν βιομηχανικό ή εμπορικό χρήστη.

4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Α ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου, ή συντελεστής A , παραμένει σταθερός σε όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Η τιμή του προσδιορίζεται από την παραγωγική ικανότητα και την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών, [4.2]. Δεν έχει σχέση με τη φόρτιση, η οποία μπορεί να αλλάζει καθημερινά σε ένα μετασχηματιστή. Η δυσκολία είναι να προσδιοριστεί μια ενιαία τιμή του συντελεστή A για τα 30 χρόνια ζωής του μετασχηματιστή. Οι ηλεκτρικές εταιρίες προσπαθούν να υπολογίσουν την τιμή του συντελεστή A προβλέποντας τη μελλοντική μεταβολή του κόστους παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το ειδικό κόστος των απωλειών κενού φορτίου, ή συντελεστής A , υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.1):

$$A = \frac{SC + (EC * 8760)}{FC} * \frac{1}{1000} \text{ σε €/W} \quad (4.1)$$

όπου SC είναι το ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος σε (€/kW-yr), EC είναι το ετήσιο κόστος της ενέργειας σε (€/kWh), 8760 είναι οι ώρες λειτουργίας του μετασχηματιστή ανά έτος και FC είναι ο συντελεστής του ετήσιου κόστους του μετασχηματιστή. Διαιρούμε με το 1000 για να μετατρέψουμε τα kilowatts σε watts.

Το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος του συστήματος (SC) αντιπροσωπεύει το ετήσιο κόστος της επιπρόσθετης παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, το οποίο είναι αναγκαίο για την παροχή 1 kW αιχμής φορτίου στο μετασχηματιστή διανομής. Οι τιμές του ποικίλουν σύμφωνα με τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Για τον προσδιορισμό της αξίας του ετήσιου κόστους της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος, η ηλεκτρική εταιρία χρειάζεται να γνωρίζει το κόστος της επιπρόσθετης παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Πρώτα, προσδιορίζεται το κόστος αντικατάστασης σε κάθε ένα τμήμα του συστήματος (παραγωγής, μεταφοράς και διανομής). Σε κάθε τμήμα έχουμε και μια αντίστοιχη τιμή του φορτίου αιχμής, η οποία αναφέρεται στο παρόν. Στη συνέχεια διαιρούμε το κόστος του κάθε τμήματος του συστήματος με το αντίστοιχο φορτίο αιχμής. Η τιμή που προκύπτει πρέπει να πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή ετήσιου κόστους επένδυσης για να μετατραπεί σε ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος σε όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Τέλος προσθέτουμε το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος του κάθε τμήματος για να προκύψει το ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος. Στο ακόλουθο παράδειγμα δείχνουμε πως μπορούμε να προσδιορίσουμε το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος.

Παράδειγμα: Παρουσιάζουμε στον πίνακα 4.1 το κόστος αντικατάστασης για κάθε ένα τμήμα του συστήματος και στον πίνακα 4.2 το φορτίο αιχμής που αντιστοιχεί σε αυτά τα τμήματα.

Πίνακας 4.1: Κόστος αντικατάστασης για κάθε ένα τμήμα του συστήματος

Κόστος αντικατάστασης	€
Διανομής	300.000.000
Μεταφοράς	260.000.000
Παραγωγής	1.200.000.000

Πίνακας 4.2: Φορτίο αιχμής του κάθε τμήματος

Φορτίο αιχμής	MW
Διανομής	1300
Μεταφοράς	1700
Παραγωγής	1800

Στη συνέχεια διαιρούμε το κόστος αντικατάστασης του κάθε τμήματος με το αντίστοιχο φορτίο αιχμής. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζουμε τον ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος, αφού πολλαπλασιάζουμε πρώτα τα παραπάνω αποτελέσματα με τον ετήσιο συντελεστή κόστους (FC).

Πίνακας 4.3: Ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος ανά kW

	€/kW	FC	Ετήσιο κόστος €/kW
Διανομής	231	0.150	34.65
Μεταφοράς	153	0.145	22.19
Παραγωγής	667	0.143	95.38
Ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος			152.22

Το ετήσιο κόστος της ενέργειας (EC) περιλαμβάνει κάθε κόστος που είναι ανάλογο με την ενέργεια εξόδου των γεννητριών των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως περιλαμβάνει το κόστος προμήθειας του καυσίμου, το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης του καυσίμου, το κόστος μετατροπής του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια καθώς και το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του σταθμού παραγωγής, [4.2].

Το κόστος της ενέργειας μεταβάλλεται σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του μετασχηματιστή και επομένως είναι αναγκαίο να έχουμε ένα ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος της ενέργειας. Αρχικά θα πρέπει να υπολογίσουμε μέσα από την κλιμακωτή αύξηση του ετήσιου κόστους της ενέργειας, που έχουμε σε κάθε χρόνο λειτουργίας του μετασχηματιστή, τον συντελεστή της παρούσας αξίας ($PWIS$) του κόστους της ενέργειας σε όλα τα χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή με καθορισμένες τιμές πληθωρισμού και επιτοκίου. Στη συνέχεια πολλαπλασιάζουμε τον συντελεστή απόσβεσης κεφαλαίου (CRF) με τον συντελεστή της παρούσας αξίας του κόστους της ενέργειας και λαμβάνουμε τον κλιμακωτό συντελεστή (EF). Τέλος, πολλαπλασιάζοντας τον κλιμακωτό συντελεστή με το κόστος της ενέργειας του πρώτου έτους λειτουργίας του μετασχηματιστή, προκύπτει το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος της ενέργειας. Ο όρος κλιμακωτός συντελεστής δεν είναι ο ακριβής όρος, διότι είναι ένας σταθερός συντελεστής για τα n χρόνια ζωής του μετασχηματιστή, απλά τον χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε πως από μια κλιμακωτή μεταβολή (αυξητική), που έχουμε στο κόστος της ενέργειας κάθε χρόνο προκύπτει τελικά το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος της ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του μετασχηματιστή. Ο κλιμακωτός συντελεστής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$EF = \left[\frac{1 - \left(\frac{1+\alpha}{1+i} \right)^n}{i - \alpha} \right] CRF \quad \text{για } \alpha \neq i \quad (4.2)$$

και

$$EF = \left[\frac{n}{1+i} \right] CRF \quad \text{για } \alpha = i$$

όπου α είναι ο πληθωρισμός, i είναι το επιτόκιο προεξοφλήσεως, n είναι ο κύκλος ζωής του μετασχηματιστή σε χρόνια και CRF είναι ο συντελεστής απόσβεσης, οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.3):

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.3)$$

Τέλος το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος της ενέργειας, που είναι το τελικό ζητούμενο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος} = EF * \text{κόστος ενέργειας τον πρώτο χρόνο} \quad (4.4)$$

Συχνά όμως η τιμή του πληθωρισμού δεν είναι ομοιόμορφη και επομένως θα πρέπει να υπολογίζουμε το κόστος της ενέργειας κάθε χρόνο ξεχωριστά σε όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Ο συντελεστής ετήσιου κόστους αναφέρεται στα πάγια έξοδα που έχουμε κάθε χρόνο και εκφράζεται ως ποσοστό (%) επί της επένδυσης, [4.1]. Επομένως αν πολλαπλασιάσουμε τον συντελεστή ετήσιου κόστους με την τιμή της επένδυσης του μετασχηματιστή, μπορούμε να υπολογίσουμε το ετήσιο κόστος του. Τα πάγια έξοδα που έχουμε κάθε χρόνο αναφέρονται ως προς τους φόρους, τις αποσβέσεις του κεφαλαίου, τα ασφάλιστρα και υπολογίζονται πάντα με ένα σταθερό επιτόκιο προεξοφλήσεως, [4.3]. Ο υπολογισμός του συντελεστή του ετήσιου κόστους είναι μια σύνθετη διαδικασία και παρουσιάζεται στο παρακάτω παράδειγμα:

Παράδειγμα: Υποθέτουμε κάποιες τιμές για τις βασικές παραμέτρους που αναφέρονται στον πίνακα 4.4 και που είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό του συντελεστή ετήσιου κόστους.

Πίνακας 4.4: Τιμές των παραμέτρων

Παράμετροι	Τιμές
Δείκτης δανειακής επιβάρυνσης (B)	50%
Επιτόκιο δανεισμού ανά έτος (b)	8%
Ποσοστό προνομιούχων μετοχών (E)	14.5%
Κόστος προνομιούχων μετοχών ανά έτος (e)	9.5%
Ποσοστό κοινών μετοχών (M)	35.5%
Κόστος κοινών μετοχών ανά έτος (m)	13%
Φορολογικός συντελεστής (t)	50%
Φόροι και ασφάλιστρα	3%
Διάρκεια ζωής (N)	30 χρόνια

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το επιτόκιο προεξοφλήσεως μέσω της εξίσωσης (4.5):

$$I = (B*b) + (E*e) + (M*m) = 0.1 \quad (4.5)$$

Έστω ότι το επιτόκιο προεξοφλήσεως είναι 10% ή 0.1.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τις αποσβέσεις με τη βοήθεια της εξίσωσης (4.6):

$$D = \frac{I}{(1+I)^N - 1} = 0.0061 \quad (4.6)$$

Από την εξίσωση (4.6) παρατηρούμε ότι οι αποσβέσεις εξαρτώνται μόνο από την τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου και από τα χρόνια ζωής του μετασχηματιστή. Στο παράδειγμά μας, η τιμή τους είναι 0.61% ή 0.0061.

Ο ισοκατανεμημένος ετήσιος φόρος εισοδήματος, που σχετίζεται με τον φορολογικό συντελεστή, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (4.7):

$$T = \frac{t}{(1-t)} \left[I + D + d - \frac{1}{N} \right] \left[1 - \frac{B*b}{1} \right] = 0.047 \quad (4.7)$$

Ο ετήσιος φόρος εισοδήματος είναι 4.7% ή 0.047. Στην εξίσωση (4.7) όμως παρατηρούμε να υπάρχει και ο όρος d , που δεν αναφέρεται πουθενά στον πίνακα 4.4 ως παράμετρος. Κάθε μετασχηματιστής έχει μια διάρκεια ζωής που δεν είναι ακριβώς η ίδια για όλους τους μετασχηματιστές. Ο όρος d εκφράζει τη διασπορά σε σχέση με το μέσο όρο ζωής των μετασχηματιστών και δίνεται από κατάλληλες καμπύλες. Στο παράδειγμά μας χρησιμοποιήσαμε την τιμή 0.0056 ή 0.56%.

Ο συντελεστής ετήσιου κόστους προκύπτει από το άθροισμα των παγίων εξόδων που υπολογίσαμε παραπάνω και επιπλέον από τους φόρους και τα ασφάλιστρα που υποθέσαμε στον πίνακα 4.4 που είναι 3%. Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζουμε πως προκύπτει ο συντελεστής ετήσιου κόστους.

Πίνακας 4.6: Προσδιορισμός του συντελεστή ετήσιου κόστους

Πάγια έξοδα	% της επένδυσης
Επιτόκιο προεξοφλήσεως	10.00 %
Αποσβέσεις	0.61 %
Διασπορά σε σχέση με το μ.ο. ζωής	0.56 %
Φόρος εισοδήματος	4.70 %
Φόροι και ασφάλιστρα	3.00 %
Συντελεστής ετήσιου κόστους	18.87 %

Ο συντελεστής ετήσιου κόστους είναι σταθερός για όλα τα χρόνια ζωής του μετασχηματιστή.

4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ A ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

Στην περίπτωση των μετασχηματιστών ισχύος, ο προσδιορισμός της αξίας των απωλειών κενού φορτίου είναι σχεδόν ο ίδιος με τους μετασχηματιστές διανομής. Η διαφορά είναι ότι στους μετασχηματιστές ισχύος πρέπει να υπολογιστεί ο συντελεστής AF . Η χρήση του συντελεστή AF οφείλεται στο ότι ο μετασχηματιστής για κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα είναι εκτός λειτουργίας για την απαιτούμενη συντήρησή του. Η εξίσωση (4.1) μας δείχνει ότι ο μετασχηματιστής λειτουργεί 8760 ώρες το χρόνο. Πολλαπλασιάζοντας τις 8760 ώρες με τον συντελεστή AF υπολογίζουμε πόσες ώρες μέσα σε ένα έτος ο μετασχηματιστής είναι πραγματικά εντός λειτουργίας. Μία τυπική τιμή του συντελεστή αυτού είναι $AF = 0.98$. Ο υπολογισμός του ειδικού κόστους των απωλειών κενού φορτίου (συντελεστής A) γίνεται μέσω της εξίσωσης (4.8):

$$A = \frac{SC + (EC * AF * 8760)}{FC} \quad \text{σε €/kW} \quad (4.8)$$

Παρατηρούμε σε αυτή την περίπτωση ότι η αξία των απωλειών κενού φορτίου εκφράζεται σε €/kW, ενώ στην εξίσωση (4.1) η αξία των απωλειών κενού φορτίου εκφράζεται σε €/W. Αυτό συμβαίνει διότι οι απώλειες στους μετασχηματιστές ισχύος είναι πολύ μεγαλύτερες από τις απώλειες των μετασχηματιστών διανομής. Επομένως δεν είναι απαραίτητο να διαιρούμε το κόστος των απωλειών με το 1000.

4.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ B ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΙΣΧΥΟΣ

Το ειδικό κόστος των απωλειών φορτίου, ή συντελεστής B , τόσο σε μετασχηματιστές διανομής όσο και σε μετασχηματιστές ισχύος, δίνεται από την εξίσωση (4.9):

$$B = \frac{SC * RF + 8760 * EC * LF}{FC} * \frac{(PL)^2}{1000} \quad \text{σε €/W} \quad (4.9)$$

όπου RF είναι ο συντελεστής ευθύνης (μέτρο της ανομοιομορφίας του φορτίου του μετασχηματιστή), LF είναι ο ετήσιος συντελεστής απωλειών και PL είναι η ετήσια ισοδύναμη ομοιόμορφη αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή. Επίσης θα πρέπει να αναφέρουμε πως στους μετασχηματιστές ισχύος δεν χρειάζεται να πολλαπλασιάσουμε με 1/1000, για τον ίδιο λόγο που έχουμε αναφέρει και παραπάνω στον υπολογισμό του συντελεστή A για τους μετασχηματιστές ισχύος.

Ο συντελεστής ευθύνης (RF) μειώνει την απαιτούμενη παραγωγική ικανότητα του συστήματος για τις απώλειες φορτίου, επειδή οι μέγιστες απώλειες του μετασχηματιστή δεν συμβαίνουν απαραίτητα τη στιγμή της αιχμής φορτίου, [4.2]. Η εξίσωση (4.10) περιγράφει πως υπολογίζεται ο συντελεστής ευθύνης:

$$RF = \sqrt{\frac{TL_{SPL}}{TL_{TPL}}} \quad (4.10)$$

όπου TL_{SPL} είναι το φορτίο του μετασχηματιστή τη στιγμή της αιχμής φορτίου του συστήματος και TL_{TPL} είναι η αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή.

Ο ετήσιος συντελεστής απωλειών (LF) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ετήσιων απωλειών των μετασχηματιστών διανομής. Ο συντέλεσης απωλειών συνήθως προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση:

$$LF = 0.15 * I_f + 0.85 * (I_f)^2 \quad (4.11)$$

όπου I_f είναι ο ετήσιος συντελεστής φορτίου, ο οποίος είναι ίσος με τον λόγο της ενέργειας που καταναλώνεται λόγω της φόρτισης των μετασχηματιστών προς την ενέργεια που θα καταναλωνόταν, αν οι μετασχηματιστές ήταν συνεχώς φορτισμένοι με το μέγιστο φορτίο.

Η ετήσια ισοδύναμη ομοιόμορφη αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή (PL) είναι η ανηγμένη αιχμή φορτίου που τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής. Ο προσδιορισμός της γίνεται ως εξής: (α) υπολογίζουμε την αρχική αιχμή φορτίου για τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του, (β) εκτιμούμε τον ετήσιο ρυθμό αύξησης της αιχμής φορτίου και (γ) ορίζουμε μια μέγιστη αιχμή φορτίου, όπου πέρα από την οποία ο μετασχηματιστής πρέπει να αντικατασταθεί, [4.4]. Ο προσδιορισμός της ετήσιας ισοδύναμης ομοιόμορφης αιχμής φορτίου γίνεται με χρήση της εξίσωσης (4.12):

$$PL = \left(\left\{ \sum_{j=1}^n \left[b(1+g)^{(j-1)} \right]^2 SPPWF \right\} CRF \right)^{1/2} \quad (4.12)$$

όπου n είναι τα χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή μέχρι την αντικατάστασή του, i είναι το επιτόκιο, b είναι η αρχική αιχμή φορτίου για τον πρώτο χρόνο, g είναι ο εκτιμώμενος ρυθμός αύξησης της αιχμής φορτίου, $SPPWF$ είναι ο συντελεστής παρούσας αξίας και CRF είναι ο συντελεστής απόσβεσης, ο οποίος μας δίνει ουσιαστικά την ισοδύναμη ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου που θέλουμε να υπολογίσουμε στα n χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή.

4.5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΞΙΑΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΤΟΥ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η αξία των απωλειών στο βοηθητικό εξοπλισμό υπολογίζεται παρόμοια όπως και στην περίπτωση υπολογισμού του συντελεστή A στις απώλειες κενού φορτίου. Η διαφορά είναι ότι ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την ψύξη του μετασχηματιστή δεν λειτουργεί συνεχόμενα όλο τον χρόνο. Η αξία των απωλειών στο βοηθητικό εξοπλισμό, D , μπορεί να προσδιοριστεί με τη βοήθεια ενός συντελεστή, που είναι ο λόγος των ωρών που ο βοηθητικός εξοπλισμός λειτουργεί προς το συνολικό αριθμό ωρών λειτουργίας του μετασχηματιστή μέσα σε ένα χρόνο. Η επόμενη εξίσωση δείχνει πως γίνεται αυτός ο υπολογισμός:

$$D = \frac{SC + (EC * \text{ώρες λειτουργίας εξοπλ.} / \text{συνολικές ώρες λειτουργίας M/T})}{FC} \quad (4.13)$$

Η μονάδα μέτρησης του D είναι €/kW. Επίσης θα πρέπει να αναφέρουμε ότι εφαρμόζουμε ξεχωριστά κάθε φορά την εξίσωση (4.13) ανάλογα με τις ώρες λειτουργίας των ανεμιστήρων και των αντλιών.

4.6. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΟΝ ΑΓΟΡΑΣΤΗ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗ

Τόσο το κόστος του μετασχηματιστή όσο και το κόστος των απωλειών επηρεάζουν την απόφαση του αγοραστή για την αγορά μετασχηματιστή. Ο αγοραστής ενσωματώνει τους συντελεστές A και B στο τελικό κόστος κατοχής. Το κριτήριο του τελικού κόστους κατοχής δίνεται από τη σχέση:

$$TOC = C + D + A * NLL + B * LL \quad (4.14)$$

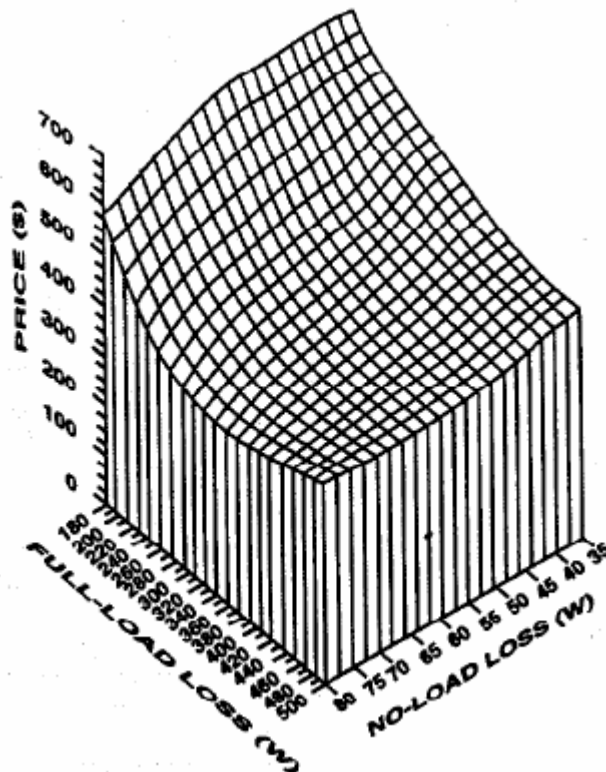
όπου C (€) είναι το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, NLL (W) είναι οι απώλειες κενού φορτίου, LL (W) είναι οι απώλειες φορτίου και D (€) είναι το κόστος απωλειών από τον εξοπλισμό ψύξης όταν πρόκειται για μετασχηματιστή ισχύος με ανάλογο εξοπλισμό.

Από την άλλη πλευρά, ο κατασκευαστής συνυπολογίζει τις τιμές των συντελεστών A και B με τα διάφορα κόστη του μετασχηματιστή (υλικά, εργατικά, γενικά βιομηχανικά έξοδα), προκειμένου να υπολογίσει τη βέλτιστη τεχνικοοικονομικά σχεδίαση, [4.2]. Επομένως, οι τιμές των συντελεστών A και B γίνονται μέρος της προδιαγραφής του μετασχηματιστή. Η προδιαγραφή επίσης περιλαμβάνει τη δυνατότητα υπερφόρτισης, την ικανότητα μόνωσης, την αντοχή στο βραχυκύκλωμα, τη συνδεσμολογία, τις συνθήκες λειτουργίας κ.ο.κ.

Συνήθως οι μετασχηματιστές με το μεγαλύτερο κόστος αγοράς είναι και οι πιο αποδοτικοί μετασχηματιστές. Αυτό όμως δε σημαίνει πως αυτοί οι μετασχηματιστές αποτελούν για έναν αγοραστή την πιο συμφέρουσα από οικονομικής άποψης επιλογή. Το κόστος των απωλειών κενού φορτίου ανά watt καθώς και το κόστος των απωλειών φορτίου ανά watt, είναι ένα κριτήριο που επιδρά στην επιλογή της βέλτιστης από οικονομικής άποψης επιλογή. Επομένως η αυξημένη απόδοση σε έναν μετασχηματιστή και το αυξημένο κόστος απόκτησής του, αντισταθμίζονται μέσω της αύξησης του κόστους των απωλειών κενού φορτίου και φορτίου, [4.1].

Οι απώλειες κενού φορτίου και φορτίου επιδρούν στο κόστος του μετασχηματιστή διανομής, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 4.1. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, το κόστος του μετασχηματιστή μεταβάλλεται σε σχέση με τις απώλειες κενού φορτίου και φορτίου. Ο σχεδιαστής του μετασχηματιστή πρέπει να ικανοποιήσει τις

απαιτήσεις του αγοραστή και ταυτόχρονα πρέπει να αντιμετωπίσει τους παράγοντες εκείνους που επηρεάζουν τις προδιαγραφές του μετασχηματιστή που σχεδιάζει. Για παράδειγμα, η ποσότητα του πυρήνα που προσδιορίζει τις απώλειες κενού φορτίου, επηρεάζει την ποσότητα του χαλκού, που επιδρά στις απώλειες φορτίου και αντιστρόφως. Επομένως οι απώλειες κενού φορτίου και φορτίου επιδρούν στον όγκο, στο βάρος και στη ποσότητα ενός υλικού μέσα σε έναν μετασχηματιστή και κατά συνέπεια στο κόστος του μετασχηματιστή.



Σχήμα 4.1: Επίδραση των απωλειών στο κόστος ενός μετασχηματιστή διανομής.

Αυξάνοντας τον αριθμό των σπειρών σε ένα πηνίο, οι απώλειες κενού φορτίου μειώνονται ανάλογα. Αύξηση των σπειρών σημαίνει αύξηση του μήκους του αγωγού στο πηνίο και επομένως αύξηση της ωμικής αντίστασής του. Αυτό όμως επιφέρει αύξηση στις απώλειες φορτίου. Ο θόρυβος που δημιουργείται σε έναν μετασχηματιστή οφείλεται στη μαγνητοσυστολή (συστολή και στη διαστολή) των ελασμάτων πυρήνα του, όταν βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Αύξηση της επιφάνειας του πυρήνα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου και του θορύβου. Αυτό όμως απαιτεί και αύξηση του κόστους του μετασχηματιστή. Επομένως ο αγοραστής ενός μετασχηματιστή είναι χρήσιμο να κατανοεί τη σχέση μεταξύ των απωλειών και του κόστους από την πλευρά του κατασκευαστή και τη προσπάθειά του να επιτύχει όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες με ένα ανταγωνιστικό κόστος.

4.7. Η ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΤΗΝ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ

Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας ήταν σχετικά σταθερό τη δεκαετία του 1960 και στις αρχές του 1970. Κατά τη διάρκεια της ενεργειακής κρίσης που ξέσπασε στη δεκαετία του 1970, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για τους βιομηχανικούς και για τους εμπορικούς χρήστες αυξανόταν κατά 11% με 12% κάθε χρόνο, [4.1]. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αβεβαιότητα του κόστους της ενέργειας είναι:

1. Τα παγκόσμια αποθέματα και η ζήτηση
2. Η εγχώρια τιμή και διαθεσιμότητα
3. Το μέγεθος των πηγών
4. Η κυβερνητική πολιτική
5. Η απελευθέρωση της αγοράς
6. Η αύξηση του ανταγωνισμού
7. Η αυξημένη χρήση του ηλεκτρισμού

Είναι κατανοητό πως όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι σταθερό αλλά αναπτύσσεται μέσα σε ένα αβέβαιο και ασταθές περιβάλλον, αυτό επηρεάζει και την απόφασή μας ως προς την επιλογή του μετασχηματιστή. Όταν παρατηρούμε ότι το κόστος της ενέργειας αυξάνεται κάθε χρόνο, τότε είναι λογικό να συμπεριλάβουμε στους υπολογισμούς μας το κόστος των απωλειών στη διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή, κάνοντας μια μελλοντική εκτίμηση του κόστους της ενέργειας. Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι ένας μετασχηματιστής έχει κατά μέσο όρο διάρκεια ζωής 25 με 30 χρόνια. Επομένως γίνεται άμεσα αντιληπτή η σπουδαιότητα της εκτίμησης του κόστους της ενέργειας μετά από 10 και 20 χρόνια. Το ίδιο βέβαια συμβαίνει και από την πλευρά του κατασκευαστή, που φτιάχνοντας έναν περισσότερο αποδοτικό μετασχηματιστή μπορεί να τον πουλήσει σε μια τιμή ανάλογη της εξοικονόμησης της ενέργειας που θα πετύχει κατά τη λειτουργία του και επομένως του χρηματικού ποσού που ο αγοραστής θα εξοικονομήσει.

4.8. Βιβλιογραφία

- [4.1] Barry W. Kennedy, “Energy Efficient Transformers”, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [4.2] Π. Σ. Γεωργιάκης, Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, “Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών Διανομής”, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχος 1-2, 2000, σελ. 51-62.
- [4.3] D. L. Nickel, H. R. Braunstein, “Distribution Transformer Loss Evaluation: II – Load Characteristics and System Cost Parameters”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, No2, February 1981.
- [4.4] A. M. Bozarth, D. A. Duckett and W. J. Ros, “Guide for Evaluation of Distribution Transformers”, Schenectady, N.Y.:CE, 1994.
- [4.5] Oak Ridge National Laboratory, “Determination Analysis of Energy Conservation Standards for Distribution Transformers”, July 1996. It can be downloaded from the URL address:
<http://www-cta.ornl.gov/cta/Publications/Reports/ORNL-6847.pdf>
that has been accessed on January 2007.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

5.1. ΚΟΣΤΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Το κόστος του μετασχηματιστή, όπως αναλύσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι μια σύνθετη έννοια και περιλαμβάνει το κόστος αγοράς ενός μετασχηματιστή και τις απώλειές του. Είναι απαραίτητο να σταθμίζουμε το κόστος του μετασχηματιστή με τα οφέλη που έχουμε από την απόδοσή του. Επίσης, είναι αναγκαίο να αποτιμούμε την αξία του χρήματος σε όλη τη διάρκεια της ζωής του μετασχηματιστή. Η υψηλή απόδοσή του έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε λιγότερες απώλειες, που συμβαίνουν σε όλο τον κύκλο ζωής του μετασχηματιστή και πρέπει να τις συγκρίνουμε με το αρχικό κόστος αγοράς του. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι αποτίμησης του κόστους ενός μετασχηματιστή, [5.1]:

1. Ισοδύναμο κόστος επένδυσης
2. Ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος
3. Μέθοδος της παρούσας αξίας.

Κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους πρέπει να εφαρμόζεται τόσο στο αρχικό κόστος αγοράς ενός μετασχηματιστή όσο και στο κόστος των απωλειών κενού φορτίου και φορτίου. Επομένως θα πρέπει να εφαρμόζονται στην εξίσωση (4.14), που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο και αφορά το τελικό κόστος κατοχής (*TOC*). Τα αποτελέσματα που θα προκύπτουν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για την επιλογή του πιο αποδοτικού από οικονομικής άποψης μετασχηματιστή. Ορισμένοι αγοραστές προτιμούν να εφαρμόζουν εκτός από τις παραπάνω μεθόδους, είτε την μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας είτε την *band of equivalent method (BOE)*.

Ο αγοραστής γενικά επιθυμεί να εφαρμόζει μια μέθοδο, που θα τον διευκολύνει να αποφασίσει για την αγορά ενός μετασχηματιστή, με τη μικρότερη δυσκολία και που θα είναι πιο εύκολη στη χρήση της. Αυτό διευκολύνει τον κατασκευαστή να σχεδιάσει ένα μετασχηματιστή που να καλύπτει τις απαιτήσεις του αγοραστή. Τέλος, η επιλογή κάποιας από τις παραπάνω μεθόδους έγκειται στην προσωπική προτίμηση του κάθε αγοραστή και στην πολιτική της κάθε εταιρείας.

5.2. Ο ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

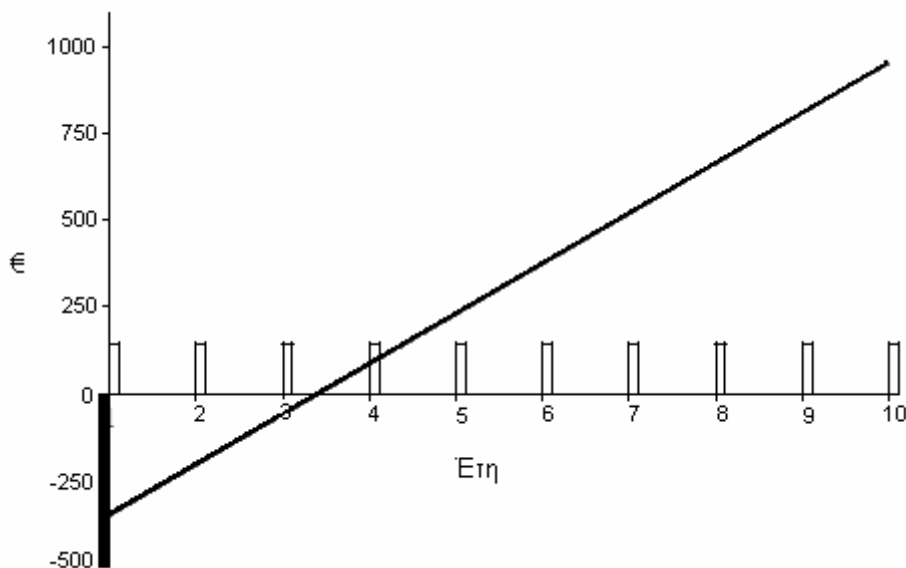
Το κόστος του μετασχηματιστή συνδέεται με τον κύκλο ζωής του, αφού στην εξίσωση του τελικού κόστους κατοχής (*TOC*) υπολογίζουμε εκτός από το κόστος αγοράς και το κόστος των απωλειών που έχει σε όλα τα χρόνια της λειτουργίας του. Ο κύκλος ζωής του μετασχηματιστή είναι το αναμενόμενο χρονικό διάστημα που ένας μετασχηματιστής λειτουργεί μέχρι να αποτύχει, ή είναι το αναμενόμενο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την αρχή της λειτουργίας του μέχρι την αντικατάστασή του.

Οι περισσότερες δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού και ορισμένοι βιομηχανικοί και εμπορικοί κάτοχοι μετασχηματιστών, χρησιμοποιούν το αναμενόμενο χρονικό διάστημα ζωής του μετασχηματιστή για να υπολογίσουν τις απώλειες. Όμως, αν κάποιος μετασχηματιστής

αντικατασταθεί πριν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του, λόγω βλάβης, υπερφόρτισης ή υψηλών απωλειών, τότε ο χρόνος αντικατάστασης θα πρέπει να ενσωματωθεί στον υπολογισμό για την οικονομική αξιολόγησή του.

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επιδρούν στον κύκλο ζωής του μετασχηματιστή. Οτιδήποτε επηρεάζει την ικανότητα του μονωτικού μέσου εσωτερικά του, μειώνει την διάρκεια ζωής του. Η υγρασία, η υπερφόρτιση, η κακή ποιότητα λαδιού και οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες είναι ορισμένοι από τους συντελεστές που επηρεάζουν τις μονωτικές ιδιότητες ενός μετασχηματιστή. Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ο κύριος παράγοντας μείωσης της διάρκειας ζωής τους. Οι περισσότεροι μετασχηματιστές είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν για 20 χρόνια σύμφωνα με τα στοιχεία που αναγράφονται στην πινακίδα τους. Αν ένας μετασχηματιστής λειτουργεί με φορτίο μικρότερο από την τιμή που αναγράφεται στην πινακίδα του, τότε έχει διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 20 χρόνια. Ενώ, αν λειτουργεί για μεγάλες χρονικές περιόδους με φορτίο μεγαλύτερο από το αναγραφόμενο στην πινακίδα του, τότε η διάρκεια ζωής του είναι λιγότερη από 20 χρόνια.

Οι μετασχηματιστές μπορούν να αντικατασταθούν πριν από τα 20 χρόνια λειτουργίας τους ή πριν από τον αναμενόμενο κύκλο ζωής τους. Μπορούν να αντικατασταθούν, λόγω βλάβης από υπερφόρτιση ή από ζημιά που προκλήθηκε από τις συνθήκες λειτουργίας τους. Επίσης, μπορούν να αντικατασταθούν από μετασχηματιστές που έχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Η αύξηση του κόστους της ενέργειας μπορεί να μας οδηγήσει στη αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή με έναν νεότερο και πιο αποδοτικό. Στόχος μας είναι να συγκρίνουμε την εξοικονόμηση της ενέργειας και επομένως του κέρδους που θα έχουμε από ένα νέο μετασχηματιστή σε σχέση το κόστος αγοράς του. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως αν αγοράσουμε έναν μετασχηματιστή με υψηλή ενεργειακή απόδοση, για παράδειγμα έναν μονοφασικό μετασχηματιστή 400 kVA και γνωρίζουμε ότι έχουμε μια σταθερή ζήτηση, τότε όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1 θα έχουμε κάνει απόσβεση της αγοράς του μετασχηματιστή στα πρώτα τρία χρόνια της λειτουργίας του [5.2]. Το κόστος των απωλειών έχει υπολογιστεί με το δεδομένο ότι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0.045€/kWh. Για μια περίοδο 10 ετών το καθαρό κέρδος από αυτή την επένδυσή μας θα είναι σχεδόν 1000€.



Σχήμα 5.1: Η αγορά ενός μονοφασικού μετασχηματιστή 400 kVA υψηλής ενεργειακής απόδοσης δημιουργεί κέρδη μετά το τρίτο έτος της επένδυσης.

Η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή διαφέρει από χρήστη σε χρήστη, είτε αυτός ο μετασχηματιστής φτάνει στο τέλος της ζωής του από βλάβη είτε από αντικατάσταση. Ο

κύκλος ζωής κατά μέσο όρο για ένα μετασχηματιστή διανομής για τις δημόσιες ηλεκτρικές επιχειρήσεις ανέρχεται σε 31,95 χρόνια. Επομένως τα 30 χρόνια ζωής ενός μετασχηματιστή είναι μια καλή υπόθεση, [5.1].

5.3. Η ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΧΡΗΜΑΤΟΣ

Κάθε μια από τις μεθόδους αποτίμησης του κόστους του μετασχηματιστή περιλαμβάνει τη χρονική αξία του χρήματος. Η έννοια χρονική αξία του χρήματος, σημαίνει ότι τα χρήματα αυξάνουν την αξία τους στη διάρκεια του χρόνου. Η αξία τους εξαρτάται από το επιτόκιο της επένδυσης. Αν τα χρήματα είναι τοποθετημένα σε τράπεζα, τότε μπορούμε να εκτιμήσουμε την αξία τους με ένα επιτόκιο για παράδειγμα 5% κάθε χρόνο, ενώ αν είναι τοποθετημένα σε μετοχές ή σε αμοιβαία κεφάλαια τότε μπορούμε να εκτιμήσουμε την αξία τους με ένα επιτόκιο 10% ή 20% κάθε χρόνο. Κάθε άτομο ή εταιρία έχει μια προσδοκία για τη μελλοντική αξία του χρήματος. Το να αγνοηθεί την αξία του χρήματος στη διάρκεια του χρόνου δεν είναι σωστό. Τόσο το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή όσο και το κόστος των απωλειών έχουν κάποια χρονική αξία.

5.4. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Η μέθοδος του ισοδύναμου κόστους επένδυσης είναι η πιο γνωστή μέθοδος οικονομικής αξιολόγησης. Η μέθοδος αυτή παίρνει τη σχέση του συνολικού κόστους κτήσης και προσθέτει τους διάφορους παράγοντες χωρίς επιπρόσθετες τροποποιήσεις:

$$TOC = BP + cost_NLL + cost_LL \quad (5.1)$$

όπου $cost_NLL$ και $cost_LL$ είναι το κόστος των απωλειών κενού φορτίου και το κόστος των απωλειών φορτίου, αντίστοιχα, τα οποία υπολογίζονται ως εξής:

$$cost_NLL = A * (1 + LM) * NLL \quad (5.2)$$

$$cost_LL = B * (1 + LM) * LL \quad (5.3)$$

όπου LM είναι ο πολλαπλασιαστής απωλειών, ο οποίος εκφράζει την επίδραση των απωλειών μεταφοράς και διανομής στον εξοπλισμό της παραγωγής.

Στη συνέχεια κάνουμε εφαρμογή της μεθόδου ισοδύναμου κόστους επένδυσης μέσω του παραδείγματος 5.1.

Παράδειγμα 5.1: Έστω ότι ένας αγοραστής θέλει να αγοράσει ένα μονοφασικό μετασχηματιστή λαδιού 75 kVA και έχει να επιλέξει ανάμεσα σε 5 διαφορετικούς κατασκευαστές. Στον πίνακα 5.1 δείχνουμε τις προσφορές.

Πίνακας 5.1: Προσφορές μετασχηματιστών.

Προμηθευτής	Τιμή πώλησης (€)	Απώλειες κενού (W)	Απώλειες φορτίου (W)
Κατασκευαστής 1	395	95	415
Κατασκευαστής 2	380	115	395
Κατασκευαστής 3	415	100	375
Κατασκευαστής 4	425	105	360
Κατασκευαστής 5	385	110	405

Η διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών είναι 30 χρόνια, το επιτόκιο λαμβάνεται 10% και ο συντελεστής ετήσιου κόστους επένδυσης είναι 18%. Το κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος είναι € 99,8/kW-yr, το κόστος της ενέργειας είναι € 0,0301/kWh, οι ώρες ετήσιας λειτουργίας είναι 8.760, ο συντελεστής ευθύνης 90%, ο συντελεστής απωλειών μετασχηματιστή 19,6%, η ισοδύναμη ομοιόμορφη αιχμή φορτίου 114,23% και ο πολλαπλασιαστής απωλειών 10%.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου είναι:

$$A = \frac{SC + EC * HPY}{FCR * 1000} = \frac{99,8 + 0,0301 * 8.760}{0,17 * 1.000} = 2,14 \text{ €/W} \quad (5.4)$$

και ο συντελεστής απωλειών φορτίου είναι:

$$B = \frac{(SC * RF + EC * LF * HPY) * PL^2}{FCR * 1.000} = \frac{(99,8 * 0,9 + 0,031 * 0,196 * 8.760) * 1,1423^2}{0,17 * 1.000} = 1,09 \text{ €/W} \quad (5.5)$$

Στον πίνακα 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης με βάση το συνολικό κόστος κατοχής, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του ισοδύναμου κόστους επένδυσης.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα αξιολόγησης με βάση το συνολικό κόστος κατοχής.

Προμηθευτής	BP (€)	NLL (W)	LL(W)	cost NLL (€)	cost LL (€)	TOC (€)
Κατασκευαστής 3	415	100	375	235	450	1100
Κατασκευαστής 4	425	105	360	247	432	1104
Κατασκευαστής 1	395	95	415	224	498	1117
Κατασκευαστής 2	380	115	395	271	474	1125
Κατασκευαστής 5	385	110	405	259	486	1130

Στον πίνακα 5.2 οι προσφορές είναι ταξινομημένες από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο συνολικό κόστος κατοχής. Διαπιστώνουμε ότι η πλέον συμφέρουσα προσφορά είναι αυτή του κατασκευαστή 3.

Το επόμενο βήμα είναι να διεξαχθεί μια συγκριτική ανάλυση ανάμεσα στις εναλλακτικές προσφορές μετασχηματιστών. Για να γίνει κάτι τέτοιο, απαιτείται η επιλογή ενός βασικού κατασκευαστή, με τον οποίο θα συγκριθούν οι υπόλοιποι κατασκευαστές. Έστω ότι επιλέγεται ο κατασκευαστής 5 ως βασικός.

Η απόδοση σε φορτίο 50% για τον κατασκευαστή 3 υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{S * \cos \phi}{S * \cos \phi + NLL + LL (S / S_B)^2} = \frac{37.500 * 1,0}{37.500 * 1,0 + 100 + 375 * (37.500 / 75.000)^2} = 0,9949 \quad (5.6)$$

Οι απώλειες ισχύος (W) με δεδομένο συντελεστή φορτίου 40% καθώς και οι ετήσιες απώλειες ενέργειας (kWh/yr) ενός μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3 υπολογίζονται ως εξής:

$$Wattage_losses = NLL + (l_f)^2 * LL = 100 + 0,4^2 * 375 = 160 \text{ W} \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} Energy_losses &= (Wattage_losses / 1.000) * HPY = \\ &= (160 / 1.000) * 8.760 = 1.402 \text{ kWh/yr} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Το ετήσιο κόστος των απωλειών ενέργειας (€/yr) ενός μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3 υπολογίζεται ως εξής:

$$Energy_cost = Energy_losses * EC = 1.402 * 0,0301 = 42,2 \text{ €/yr} \quad (5.9)$$

Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας (€/yr), που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση του επιλεγμένου μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 3, αντί του μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 5, υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} Energy_savings &= (Energy_losses_5 - Energy_losses_3) * EC = \\ &= (1.531 - 1.402) * 0,0301 = 3,8829 \text{ €/yr} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Στον πίνακα 5.3 εμφανίζουμε τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της προσφοράς για ένα μετασχηματιστή.

Πίνακας 5.3: Αξιολόγηση προσφοράς ενός μετασχηματιστή διανομής

Προμηθευτής	Απόδοση σε φορτίο 50%	Τιμή (€)	Διάφορα Τιμής (€)	Απώλειες ισχύος (W)	Απώλειες ενέργειας (kWh/yr)	Κόστος ενέργειας (€/yr)	Εξοικονόμηση ενέργειας (€/yr)
Κατασκευαστής 5	0,9944	385	0	174,8	1.531	46,08	-
Κατασκευαστής 3	0,9949	415	30	160	1.402	42,20	3,88
Κατασκευαστής 4	0,9948	425	40	162,6	1.424	42,86	3,22
Κατασκευαστής 1	0,9947	395	10	161,4	1.414	42,56	3,52
Κατασκευαστής 2	0,9943	380	-5	178,2	1.561	46,99	-0,90

Συγκρίνοντας τα κόστη και τα πλεονεκτήματα του μετασχηματιστή 3 ως προς το βασικό μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 5 διαπιστώνεται ότι παρόλο που κοστίζει 30€ περισσότερο, ο μετασχηματιστής του κατασκευαστή 3 οδηγεί σε 3,88€ ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας και στη διάρκεια των 30 ετών ζωής του θα έχουμε σε εξοικονόμηση 116,4€. Το παραπάνω συμπέρασμα γίνεται πιο σημαντικό αν υποθέσουμε πως μια ηλεκτρική εταιρεία θέλει να προμηθευτεί 100 ή περισσότερους όμοιους μετασχηματιστές. Σε αυτή την περίπτωση των 100 μετασχηματιστών, η εταιρεία εξοικονομεί κάθε χρόνο 388€ και σε 30 χρόνια ζωής των μετασχηματιστών εξοικονομεί 11.640€.

5.4.1. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΑΞΙΑ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Στη μέθοδο του ισοδύναμου κόστους επένδυσης προσθέτουμε το κόστος αγοράς με τις απώλειες κενού φορτίου και φορτίου χωρίς επιπρόσθετες τροποποιήσεις. Σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζουμε την εξίσωση (5.1) με τη διαφορά ότι ανάγουμε την αξία των απωλειών σε όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, σε παρούσα αξία, [5.3]. Επομένως έχουμε μια νέα εξίσωση που περιέχει την παρούσα αξία των απωλειών:

$$TOC = BP + PV_{NLL} + PV_{LL} \quad (5.11)$$

όπου PV_{NLL} είναι η παρούσα αξία των απωλειών κενού φορτίου και PV_{LL} είναι η παρούσα αξία των απωλειών φορτίου.

Οι συνολικές απώλειες είναι το αποτέλεσμα των απωλειών κενού φορτίου (NLL) και των απωλειών φορτίου (LL). Στην ακόλουθη εξίσωση φαίνεται πως υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες, όπου με L συμβολίζουμε τον συντελεστή φορτίου:

$$TL_L = NLL + LL * L^2 \quad (5.12)$$

Στη συνέχεια με EP συμβολίζουμε την τιμή της ηλεκτρικής (€/kWh) και με HPY τις ώρες λειτουργίας του μετασχηματιστή ανά έτος. Επομένως το ετήσιο κόστος των συνολικών απωλειών δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{TL} = TL_L * EP * HPY * 10^{-3} \quad \text{ή} \quad C_{TL} = (NLL + LL * L^2) * EP * HPY * 10^{-3} \quad (5.13)$$

Έπειτα υπολογίζουμε το ετήσιο κόστος των απωλειών κενού φορτίου και το ετήσιο κόστος των απωλειών φορτίου όπως δίνονται αντίστοιχα στις εξισώσεις (5.14) και (5.15).

$$C_{NLL} = NLL * EP * HPY * 10^{-3} \quad (5.14)$$

και

$$C_{LL} = LL * L^2 * EP * HPY * 10^{-3} \quad (5.15)$$

Ο κάτοχος του μετασχηματιστή πληρώνει το κόστος των συνολικών απωλειών C_{TL} για κάθε έτος από τα N συνολικά έτη ζωής του μετασχηματιστή. Αν d είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο, τότε η παρούσα αξία PV_{TL} των τελικών απωλειών για κάθε ένα από τα N έτη υπολογίζεται ως εξής:

$$PV_{TL} = \frac{C_{TL}}{(1+d)} + \frac{C_{TL}}{(1+d)^2} + \dots + \frac{C_{TL}}{(1+d)^N} \Rightarrow PV_{TL} = C_{TL} * PV_m \quad (5.16)$$

όπου PV_m είναι ο συντελεστής της παρούσας αξίας και υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$PV_m = \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+d)^i} = \frac{1 - 1/(1+d)^N}{1 - 1/(1+d)} \quad \text{ή} \quad PV_m = \frac{(1+d)^N - 1}{d * (1+d)^{N-1}} \quad (5.17)$$

Στις επόμενες σχέσεις δείχνουμε πως υπολογίζεται η παρούσα αξία των απωλειών κενού φορτίου και η παρούσα αξία των απωλειών φορτίου.

$$PV_{NLL} = C_{NLL} * PV_m \quad (5.18)$$

και

$$PV_{LL} = C_{LL} * PV_m \quad (5.19)$$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (5.18) και (5.19), η εξίσωση (5.11) μπορεί να αντικατασταθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$TOC = BP + C_{NLL} * PV_m + C_{LL} * PV_m \quad (5.20)$$

Μια ισοδύναμη και πιο απλή σχέση του ισοδύναμου κόστους επένδυσης (TOC) είναι η επόμενη εξίσωση:

$$TOC = BP + A * NLL + B * LL \quad (5.21)$$

όπου BP (€) είναι το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, NLL (W) είναι οι απώλειες κενού φορτίου, LL (W) είναι οι απώλειες φορτίου, A (€/W) είναι ο συντελεστής κενού φορτίου και B (€/W) είναι ο συντελεστής φορτίου. Ο υπολογισμός των συντελεστών A και B γίνεται σύμφωνα με τις επόμενες εξισώσεις:

$$A = PV_m * EP * HPY * 10^{-3} \quad (5.22)$$

και

$$B = A * L^2 \quad (5.23)$$

Το κριτήριό μας για την οικονομική αξιολόγηση και σε αυτή τη μέθοδο πρέπει να είναι το μικρότερο κόστος επένδυσης (TOC) και όχι ο μετασχηματιστής που έχει το μικρότερο κόστος αγοράς. Επομένως, αν έχουμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε m μετασχηματιστές, τότε για κάθε έναν μετασχηματιστή θα πρέπει να υπολογίσουμε το ισοδύναμο κόστος επένδυσης TOC_i , $i=1...m$, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.21).

Στη συνέχεια δείχνουμε πως υπολογίζονται οι ετήσιες απώλειες σε ενέργεια (EL) μέσω της εξίσωσης (5.24):

$$EL = TL_L * HPY * 10^{-3} \quad (\text{kWh/yr}) \quad (5.24)$$

Η οικονομική εξοικονόμηση (ES_{ij}) που θα έχουμε ανά έτος αν χρησιμοποιήσουμε τον μετασχηματιστή j αντί του μετασχηματιστή i δείχνεται στην επόμενη εξίσωση:

$$ES_{ij} = (EL_i - EL_j) * EP \quad (\text{€/yr}) \quad (5.25)$$

Τέλος, ο χρόνος αποπληρωμής χρησιμοποιώντας τον μετασχηματιστή j αντί του i δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$SP_{ij} = \frac{BP_i - BP_j}{ES_{ij}} \quad (\text{έτη}) \quad (5.26)$$

Παράδειγμα 5.2: Κάποιος αγοραστής έχει να επιλέξει ανάμεσα σε 5 τριφασικούς μετασχηματιστές 1000 kVA με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4. Υποθέτουμε ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0,05 €/kWh, το προεξοφλητικό επιτόκιο (d) είναι 8%, ο συντελεστής ισχύος ($\cos\phi$) 0,9, ο συντελεστής φορτίου (L) 0,5 και η διάρκεια ζωής (N) είναι 30 χρόνια με 8.760 ώρες λειτουργίας κάθε χρόνο.

Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών.

Προμηθευτής	BP (€)	NLL (W)	LL (W)
Κατασκευαστής 1	10.500	1.100	13.000
Κατασκευαστής 2	10.200	1.400	13.000
Κατασκευαστής 3	11.100	1.700	9.500
Κατασκευαστής 4	10.700	1.700	10.500
Κατασκευαστής 5	11.000	1.500	10.500

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.17), και για δεδομένο $d=8\%$ βρίσκουμε ότι ο συντελεστής παρούσας αξίας είναι $PV_m=12,16$. Στη συνέχεια από τις εξισώσεις (5.22) και (5.23) υπολογίζουμε τους συντελεστές A και B . Η τιμή του συντελεστή A είναι 5,33 €/W και η τιμή του συντελεστή B είναι 1,33 €/W. Στον πίνακα 5.5 δείχνουμε για κάθε μετασχηματιστή ξεχωριστά τις απώλειες σε ενέργεια, το κόστος των απωλειών καθώς το ισοδύναμο κόστος κτήσης (TOC).

Πίνακας 5.5: Υπολογισμός απωλειών, κόστος απωλειών και TOC.

Προμηθευτής	Απόδοση (η , %)	Απώλειες ενέργειας (W)	Ετήσιες απώλειες (kWh/year)	Κόστος NLL (€)	Κόστος LL (€)
Κατασκευαστής 1	99,04	4.350	38.106	5.859	17.310
Κατασκευαστής 2	98,98	4.650	40.734	7.457	17.310
Κατασκευαστής 3	99,10	4.075	35.697	9.054	12.649
Κατασκευαστής 4	99,05	4325	37.887	9.054	13.981
Κατασκευαστής 5	99,09	4.125	36.135	7.989	13.981

Προμηθευτής	Συνολικό κόστος απωλειών (€/yr)	Παρούσα αξία συν. κόστος (€)	TOC (€)	Ταξινόμηση BP	Ταξινόμηση TOC
Κατασκευαστής 1	1.905	23.165	33.665	2	3
Κατασκευαστής 2	2.037	24.770	34.970	1	5
Κατασκευαστής 3	1.785	21.706	32.806	5	1
Κατασκευαστής 4	1.894	23.031	33.731	3	4
Κατασκευαστής 5	1.807	21.973	32.973	4	2

Από την ανάλυση των στοιχείων του πίνακα 5.5 παρατηρούμε πως σύμφωνα με την μέθοδο του ισοδύναμου κόστους επένδυσης, με τη χρήση του συντελεστή της παρούσας αξίας, ο πιο φθηνός για αγορά μετασχηματιστής, που προέρχεται από τον κατασκευαστή 2, δεν αποτελεί την καλύτερη επιλογή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα βλέπουμε ότι στην ταξινόμηση σύμφωνα με το TOC είναι στην τελευταία θέση. Αντίθετα, ο μετασχηματιστής που προέρχεται από τον κατασκευαστή 3, που έχει το μεγαλύτερο κόστος αγοράς (BP), αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή.

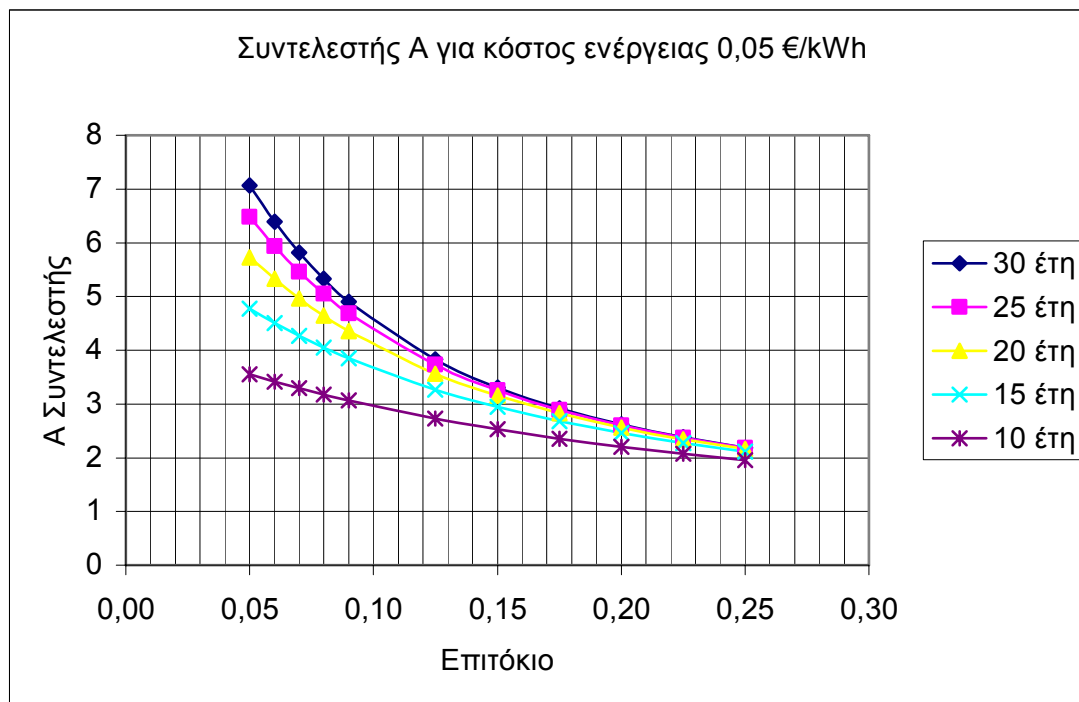
Στο παράδειγμα που μόλις αναφέραμε ο υπολογισμός των απωλειών κενού φορτίου έγινε με τη χρήση της εξίσωσης (5.22), για δεδομένη τιμή κόστους ενέργειας, για 30 χρόνια ζωής του μετασχηματιστή και για συγκεκριμένο συντελεστή παρούσας αξίας. Μπορούμε όμως με τη βοήθεια ενός γραφήματος να βρίσκουμε άμεσα τον συντελεστή A για οποιαδήποτε τιμή επιτοκίου και για διάφορα έτη ζωής του μετασχηματιστή, [5.5]. Στη

συνέχεια αναπτύσσουμε έναν πίνακα όπου δείχνουμε την τιμή του συντελεστή της παρούσας αξίας για διάφορα έτη και για διάφορες τιμές επιτοκίου.

Πίνακας 5.6: Συντελεστής παρούσας αξίας.

Επιτόκιο	Έτη				
	30	25	20	15	10
5%	16,14	14,80	13,09	10,90	8,11
6%	14,59	13,55	12,16	10,29	7,80
7%	13,28	12,47	11,34	9,75	7,52
8%	12,16	11,53	10,60	9,24	7,25
9%	11,20	10,71	9,95	8,79	7,00
12,5%	8,74	8,53	8,15	7,46	6,23
15%	7,55	7,43	7,20	6,72	5,77
17,5%	6,66	6,60	6,45	6,12	5,38
20%	5,97	5,94	5,84	5,61	5,03
22,5%	5,43	5,41	5,35	5,19	4,73
25%	4,99	4,98	4,94	4,82	4,46

Έπειτα, με τη βοήθεια του πίνακα 5.6, υπολογίζουμε το συντελεστή A από την εξίσωση (5.22), για τιμή ηλεκτρικής ενέργειας 0,05 €/kWh, για διάφορα έτη και για διάφορες τιμές επιτοκίου και τέλος φτιάχνουμε το γράφημα του σχήματος 5.2.



Σχήμα 5.2: Συντελεστής A για κόστος ηλεκτρικής ενέργειας 0,05 €/kWh.

Σύμφωνα με το παραπάνω γράφημα έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε το συντελεστή A για διάφορες τιμές κόστους ενέργειας, πολλαπλασιάζοντας την τιμή που διαβάζουμε από το γράφημα με το λόγο: κόστος ηλεκτρικής ενέργειας / 0,05.

Για παράδειγμα αν θέλουμε να υπολογίσουμε το συντελεστή A για επιτόκιο 6%, για κόστος ενέργειας 0,06 €/kWh και για 25 χρόνια ζωής του μετασχηματιστή, τότε πολλαπλασιάζουμε την τιμή του συντελεστή A που βρίσκουμε από το γράφημα, δηλαδή την

τιμή 6 με το λόγο 0,06/0,05, που μας δίνει $A=7,2$. Το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει αν, αντί για το γράφημα, χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (5.22).

5.5. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΙΣΟΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ ΕΤΗΣΙΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Η μέθοδος του ισοκατανεμημένου ετήσιου κόστους περιλαμβάνει τη μετατροπή κάθε συστατικού της εξίσωσης του συνολικού κόστους επένδυσης σε ισοκατανεμημένα ετήσια κόστη σε όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Επομένως κάθε συστατικό για να μετατραπεί σε ετήσιο ισοκατανεμημένο κόστος πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το συντελεστή ετήσιου κόστους (FCR). Αυτό σημαίνει ότι το αρχικό κόστος κτήσης, οι απώλειες κενού φορτίου και οι απώλειες φορτίου πρέπει να πολλαπλασιαστούν με αυτό το συντελεστή, [5.1]. Έτσι το συνολικό κόστος επένδυσης δίνεται πλέον από την ακόλουθη εξίσωση:

$$TOC = FCR * (BP + cost_NLL + cost_LL) \quad (5.27)$$

όπου BP (€) είναι το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, $cost_NLL$ (€) είναι το κόστος των απωλειών κενού φορτίου και $cost_LL$ (€) είναι το κόστος των απωλειών φορτίου.

Η οικονομική αξιολόγηση πρέπει να γίνεται με τον ίδιο συντελεστή ετήσιου κόστους για κάθε προμηθευτή. Όπως και στην προηγούμενη μέθοδο, έτσι και εδώ η πιο αποδοτική από οικονομικής άποψης επιλογή γίνεται σύμφωνα με το μετασχηματιστή που εμφανίζεται να έχει το μικρότερο συνολικό κόστος επένδυσης.

5.5.1. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΟΥ ΙΣΟΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ ΕΤΗΣΙΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΜΕ ΓΝΩΣΤΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΑΙΧΜΗΣ ΑΝΑ ΕΤΟΣ

Είναι γνωστό ότι το φορτίο σε ένα μετασχηματιστή διανομής δεν είναι σταθερό σε όλα τα χρόνια ζωής του μετασχηματιστή αλλά εξαρτάται από το ρυθμό αύξησης του φορτίου. Αφού το φορτίο είναι διαφορετικό κάθε χρόνο, τότε τόσο οι απώλειες φορτίου και όσο και το κόστος των απωλειών φορτίου θα διαφέρουν κάθε χρόνο. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούμε ένα ισοδύναμο ετήσιο φορτίο αιχμής (PEQ), το οποίο ουσιαστικά αντικαθιστά το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος απωλειών φορτίου, [5.4]. Το κόστος αγοράς και οι απώλειες κενού φορτίου σε αυτή τη μέθοδο έχουν μετατραπεί σε ισοκατανεμημένα ετήσια κόστη. Η εξίσωση που μας δίνει το ετήσιο κόστος επένδυσης είναι η ακόλουθη:

$$AC = TIC + K + KI \quad (5.28)$$

TIC είναι το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος αγοράς, δηλαδή το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή πολλαπλασιασμένο με το συντελεστή ετήσιου κόστους (FCR), K είναι οι ισοκατανεμημένες ετήσιες απώλειες κενού φορτίου και KI είναι οι απώλειες φορτίου που εξαρτώνται από το φορτίο του κάθε έτους που εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή.

Το ισοδύναμο ετήσιο φορτίο αιχμής υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$(PEQ)^2 = \frac{\sum_{Y=1}^N P(Y)^2 * SPPWF(I, Y)}{USPWF(I, N)} \quad (5.29)$$

όπου $P(Y)$ είναι το ετήσιο φορτίο αιχμής για το έτος Y , N είναι τα χρόνια ζωής του μετασχηματιστή, I το επιτόκιο, $SPPWF$ είναι ο συντελεστής παρούσας αξίας μιας δόσης, δηλαδή μας δίνει την παρούσα τιμή μιας μελλοντικής τιμής του φορτίου αιχμής και $USPWF$ είναι ο συντελεστής παρούσας αξίας ίσων δόσεων, όπου ουσιαστικά μέσα από το άθροισμα

των ετήσιων τιμών του φορτίου αιχμής εξάγουμε μια ισοκατανεμημένη ετήσια αιχμή φορτίου για όλα τα χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή.

Το κόστος των απωλειών φορτίου για κάθε έτος θα είναι:

$$\text{ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ} = K1 * P(Y)^2 \quad (5.30)$$

Αν στη συνέχεια υπολογίσουμε το συνολικό κόστος απωλειών φορτίου για όλα τα έτη και τα ανάγουμε σε παρούσα αξία, τότε προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$TK1 = K1 \left[P(1)^2 * SPPWF(I, 1) + \dots + P(N)^2 * SPPWF(I, N) \right] \quad (5.31)$$

Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή παρούσας αξίας ($USPWF(I, N)$), υπολογίζουμε την ισοκατανεμημένη ή ισοδύναμη ομοιόμορφη αιχμή φορτίου για κάθε έτος, σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$\begin{aligned} \frac{K1}{USPWF(I, N)} * \left[P(1)^2 * SPPWF(I, 1) + \dots + P(N)^2 * SPPWF(I, N) \right] = \\ = K1 * (PEQ)^2 \end{aligned} \quad (5.32)$$

Επομένως το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος επένδυσης θα είναι:

$$TLAC = TIC + K + K1 * (PEQ)^2 \quad (5.33)$$

Σε ορισμένες περιπτώσεις η ετήσια αιχμή φορτίου μπορεί να μας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P(Y) = IP(1 + GR)^{Y-1} \quad (5.34)$$

όπου IP είναι το αρχικό φορτίο αιχμής του μετασχηματιστή για το πρώτο έτος και GR είναι ο ετήσιος ρυθμός αύξησης του φορτίου αιχμής.

Το ισοδύναμο φορτίο αιχμής σε αυτή την περίπτωση προκύπτει από την επόμενη σχέση:

$$\begin{aligned} (PEQO)^2 = \left[\frac{(IP)^2}{(1+I)} + \frac{(IP)^2 (1+GR)^2}{(1+I)^2} + \frac{(IP)^2 (1+GR)^4}{(1+I)^3} + \right. \\ \left. + \dots + \frac{(IP)^2 (1+GR)^{2(N-1)}}{(1+I)^N} \right] \left[\frac{I(1+I)^N}{(1+I)^N - 1} \right] \end{aligned} \quad (5.35)$$

Οι όροι της εξίσωσης (5.35) είναι όροι γεωμετρικής προόδου και επομένως η παραπάνω εξίσωση μπορεί να μετατραπεί στην εξής σχέση:

$$(PEQO)^2 = (IP)^2 \left[\frac{(1+GR)^{2N} - (1+I)^N}{(1+GR)^2 - (1+I)} \right] \left[\frac{I}{(1+I)^N - 1} \right] \quad (5.36)$$

5.6. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΑΞΙΑΣ ΣΕ ΙΣΟΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΕΤΗΣΙΑ ΚΟΣΤΗ

Η μέθοδος της παρούσας αξίας σε ισοκατανεμημένα ετήσια κόστη απαιτεί όλοι οι όροι της εξίσωσης του κόστους επένδυσης να αναφέρονται στο παρόν. Ο κύκλος ζωής του μετασχηματιστή και ο συντελεστής ετήσιου κόστους επένδυσης παραμένουν σταθεροί σε αυτή τη μέθοδο.

Στη μέθοδο της παρούσας αξίας, η εξίσωση από τη μέθοδο ισοκατανεμημένου ετήσιου κόστους πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή της παρούσας αξίας (*USPW*). Έτσι μετατρέπονται τα ισοκατανεμημένα ετήσια κόστη αγοράς, απωλειών κενού φορτίου και απωλειών φορτίου σε παρούσα αξία. Η εξίσωση που περιγράφει την μέθοδο της παρούσας αξίας είναι η ακόλουθη:

$$TOC = USPW * FCR * (BP + cost_NLL + cost_LL) \quad (5.37)$$

Αφού όλοι οι όροι της εξίσωσης πολλαπλασιάζονται με το συντελεστή της παρούσας αξίας, τα αποτελέσματα που θα προκύπτουν από την οικονομική αξιολόγηση σε αυτή τη μέθοδο θα πρέπει να είναι τα ίδια με αυτά που προκύπτουν από τη μέθοδο του ισοδύναμου κόστους επένδυσης και από την μέθοδο του ισοκατανεμημένου ετήσιου κόστους. Ο συντελεστής της παρούσας αξίας συνήθως προσδιορίζεται από πίνακες, επιλέγοντας ένα αποδεκτό επιτόκιο και μια διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

5.7. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η σωστή ισορροπία μεταξύ του κόστους αγοράς ενός μετασχηματιστή και των μελλοντικών του απωλειών, αποτελεί το σωστό κριτήριο για την επιλογή ενός μετασχηματιστή. Στη μέθοδο αυτή, η οικονομική αξιολόγηση επιτυγχάνεται με τη σύγκριση των απωλειών κενού φορτίου και φορτίου σε διάφορες τιμές φορτίου μεταξύ των μετασχηματιστών που θέλουμε να επιλέξουμε. Η διαφορά με τις προηγούμενες μεθόδους είναι ότι δεν κάνουμε σύγκριση και ταξινόμηση σε σχέση με το συνολικό κόστος κατοχής. Μας ενδιαφέρει να βρούμε πόσο επηρεάζει το κόστος των απωλειών το αρχικό κόστος αγοράς και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά μας με ένα συγκεκριμένο μετασχηματιστή που έχουμε επιλέξει για αυτή τη σύγκριση. Επομένως θεωρούμε ως σημείο αναφοράς το συγκεκριμένο μετασχηματιστή και συγκρίνουμε το κόστος των απωλειών του υπό εξέταση μετασχηματιστή με αυτόν, καθώς επίσης και τη διαφορά που εμφανίζουν στο κόστος αγοράς τους, [5.5]. Τέλος, στη μέθοδο αυτή ανάγουμε το κόστος των απωλειών στο παρόν μέσω του συντελεστή της παρούσας αξίας.

Οι απώλειες δίνονται από τη ακόλουθη εξίσωση:

$$T = N + Lx^2 \quad (5.38)$$

όπου T (W) είναι οι συνολικές απώλειες, N (W) είναι οι απώλειες κενού φορτίου, L (W) οι απώλειες φορτίου και x είναι ο συντελεστής φορτίου.

Η διαφορά των συνολικών απωλειών δίνεται από την εξίσωση (5.39) ενώ η μετατροπή τους σε παρούσα αξία γίνεται με χρήση του συντελεστή παρούσας αξίας, που δίνεται από τον πίνακα 5.6.

$$q = (N1 - N2) + (L1 - L2)x^2 \quad (5.39)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε ένα παράδειγμα όπου δείχνουμε το κόστος των απωλειών και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την απόσβεση της επένδυσης. Επειδή οι απώλειες φορτίου εξαρτώνται από το συντελεστή φορτίου, θα εξετάσουμε τις απώλειες στους μετασχηματιστές και συνεπώς το κόστος τους για διάφορες τιμές φορτίου.

Παράδειγμα 5.3: Έστω ότι έχουμε δυο μετασχηματιστές. Ένα μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 1 και ένα δεύτερο μετασχηματιστή, ενεργειακά πιο αποδοτικό από τον πρώτο, από τον κατασκευαστή 2, με ισχύ 1500kVA ο καθένας και με τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στον πίνακα 5.7. Η διάρκεια ζωής και των δυο μετασχηματιστών είναι 30 έτη και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας υποθέτουμε ότι είναι 0,05 €/kWh. Επίσης θεωρούμε ότι το επιτόκιο είναι 7%.

Πίνακας 5.7: Χαρακτηριστικά μετασχηματιστών

Προμηθευτής	Ισχύς (kVA)	Απώλειες κενού φορτίου (W)	Απώλειες φορτίου (W)	Κόστος κτήσης (€)
Κατασκευαστής 1	1.500	5.000	11.700	30.000
Κατασκευαστής 2	1.500	4.000	7.300	35.000

Στο επόμενο στάδιο κατασκευάζουμε τους πίνακες 5.8 και 5.9, όπου υπολογίζουμε τις απώλειες και το κόστος των απωλειών των δυο μετασχηματιστών ξεχωριστά. Από τον πίνακα 5.6 βρίσκουμε ότι για επιτόκιο 7% και για 30 χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή, ο συντελεστής παρούσας αξίας είναι 13,28.

Πίνακας 5.8: Απώλειες και κόστος απωλειών για τον μετασχηματιστή του κατασκευαστή 1.

Κατασκευαστής 1				
Συντ. φορτίου (x)	Απώλειες Ισχύος (W)	Απώλειες ενέργειας (kWh/yr)	Κόστος απωλειών (€/yr)	Παρούσα αξία (€)
1,3	24.773	217.011	10.851	144.101
1,2	21.848	191.388	9.569	127.076
1,1	19.157	167.815	8.391	111.432
1,0	16.700	146.292	7.315	97.143
0,9	14.477	126.819	6.341	84.208
0,8	12.488	109.395	5.470	72.642
0,7	10.733	94.021	4.701	62.429
0,6	9.212	80.697	4.035	53.585
0,5	7.925	69.423	3.471	46.095

Πίνακας 5.9: Απώλειες και κόστος απωλειών για τον μετασχηματιστή του κατασκευαστή 2.

Κατασκευαστής 2				
Συντ. φορτίου (x)	Απώλειες Ισχύος (W)	Απώλειες ενέργειας (kWh/yr)	Κόστος απωλειών (€/yr)	Παρούσα αξία (€)
1,3	16.337	143.112	7.156	95.032
1,2	14.512	127.125	6.356	84.408
1,1	12.833	112.417	5.621	74.647
1,0	11.300	98.988	4.949	65.723
0,9	9.913	86.838	4.342	57.662
0,8	8.672	75.967	3.798	50.437
0,7	7.577	66.375	3.319	44.076
0,6	6.628	58.061	2.903	38.552
0,5	5.825	51.027	2.551	33.877

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την εξοικονόμηση σε απώλειες ενέργειας και συνεπώς σε κόστος που έχουμε αν επιλέξουμε τον μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 2. Επίσης υπολογίζουμε το χρόνο (σε έτη) για την απόσβεση του προσθέτου ποσού που δίνουμε για την αγορά του.

Πίνακας 5.10: Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστος με την επιλογή του μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 2 αντί του κατασκευαστή 1.

Συντ. φορτίου (x)	Απώλειες Ισχύος (W)	Απώλειες ενέργειας (kWh/yr)	Κόστος απωλειών (€/yr)	Απόσβεση (έτη)	Παρούσα αξία (€)
1,3	8.436	73.899	3.695	1,35	49.070
1,2	7.336	64.263	3.213	1,56	42.669
1,1	6.324	55.398	2.770	1,81	36.786
1,0	5.400	47.304	2.366	2,11	31.420
0,9	4.564	40.431	1.999	2,50	26.547
0,8	3.816	33.428	1.672	2,99	22.204
0,7	3.156	27.646	1.382	3,62	18.353
0,6	2.584	22.636	1.132	4,42	15.033
0,5	2.100	18.396	920	5,44	12.218

Ο χρόνος απόσβεσης στον παραπάνω πίνακα υπολογίζεται αν διαιρέσουμε το κόστος των απωλειών (€/yr) με τη διαφορά του κόστους αγοράς (€) των δυο μετασχηματιστών. Επίσης παρατηρούμε ότι αν ο συντελεστής φόρτισης στο μετασχηματιστή είναι για παράδειγμα 0,9, τότε ο χρόνος απόσβεσης είναι 2,5 χρόνια. Άρα οι απώλειες συνδέονται με το αρχικό κόστος αγοράς και πρέπει να επηρεάζουν την απόφασή μας για την αγορά ενός μετασχηματιστή.

5.7.1. ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΥΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ A

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά απλή και στηρίζεται στην παραδοχή ότι το χρονικό διάστημα απόσβεσης του συνολικού κόστους επένδυσης μεταξύ ενός απλού μετασχηματιστή και ενός μετασχηματιστή υψηλής ενεργειακής απόδοσης, πρέπει να είναι από τρία έως πέντε χρόνια. Επίσης θεωρούμε ότι το επιτόκιο σε αυτό το διάστημα είναι μηδενικό.

Με τη μέθοδο αυτή αν γνωρίζουμε το αρχικό κόστος αγοράς ενός βασικού μετασχηματιστή, το συνολικό κόστος απωλειών του και το συνολικό κόστος απωλειών ενός μετασχηματιστή με υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, σε σχέση με το βασικό μετασχηματιστή, τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε το κόστος αγοράς που μας συμφέρει για την αγορά του πιο αποδοτικού μετασχηματιστή, [5.5]. Το επόμενο παράδειγμα αναφέρεται σε ακριβώς αυτό το σκεπτικό.

Παράδειγμα 5.4: Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα βασικό μετασχηματιστή που έχει αρχική τιμή κόστους 1.000 € με συνολικές απώλειες 100 W και ένα μετασχηματιστή υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης σε σχέση με το βασικό, που έχει συνολικές απώλειες 50W. Επίσης, υποθέτουμε ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0,05 €/kWh.

Με την παραδοχή ότι δεν έχουμε επιτόκιο, η τιμή του PV είναι 3. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.22) υπολογίζουμε την τιμή του A .

$$A = 3 * 8,76 * 0,05 = 1,3095 \text{ €/W}$$

Επομένως το κόστος των απωλειών για τα τρία χρόνια θα είναι: $100 \cdot 1,3095 = 131,4$ €. Το συνολικό κόστος κατοχής θα είναι $TOC1 = 131,4 + 1000 = 1131,4$ €

Το κόστος των απωλειών για τον πιο αποδοτικό μετασχηματιστή θα είναι: $50 \cdot 1,3095 = 65,7€$

Αν το κόστος κατοχής του δεύτερου μετασχηματιστή υπερβαίνει τα 1.065,7€ τότε δε μας συμφέρει να τον αγοράσουμε και πρέπει να επιλέξουμε το βασικό μετασχηματιστή. Αν όμως το κόστος κατοχής είναι μικρότερο από αυτή την τιμή, τότε πρέπει να επιλέξουμε τον πιο αποδοτικό μετασχηματιστή. Γενικά η γνώση των συντελεστών A , B επιτρέπει στον αγοραστή να μπορεί να προσδιορίσει το κόστος κατοχής που αποτελεί για αυτόν τη βέλτιστη επιλογή.

Ο συντελεστής B εξαρτάται από το φορτίο. Μπορούμε όμως να χρησιμοποιήσουμε μόνο τον συντελεστή A , αν οι υπολογισμοί έχουν γίνει ως προς τις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή, [5.5]. Αυτό φαίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$CTL = A * NLL + B * LL = A * NLL + A * x^2 * LL = A * (NLL + x^2 * LL) \quad (5.40)$$

όπου CTL είναι το κόστος των συνολικών απωλειών και ο όρος $(NLL + x^2 * LL)$ μας δίνει τις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή.

5.8. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Το συνολικό κόστος κατοχής του μετασχηματιστή επηρεάζεται από τις συνολικές απώλειές του και επομένως από το συνολικό κόστος των απωλειών του. Στον πίνακα 5.11 φαίνεται ότι η διακύμανση του κόστους των απωλειών μεταβάλει και την πιο συμφέρουσα επιλογή μετασχηματιστή, [5.6]. Το συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω είναι ότι ο πιο ακριβός μετασχηματιστής και κατά συνέπεια ο πιο αποδοτικός, δεν αποτελεί πάντα την καλύτερη επιλογή.

Στον πίνακα 5.11, το συνολικό κόστος κατοχής του μετασχηματιστή ορίζεται ως το άθροισμα του κόστους αγοράς του και του συνολικού κόστους των απωλειών του. Το κόστος των απωλειών κενού φορτίου και των απωλειών φορτίου, επιλέγονται να είναι ισοδύναμα. Επίσης θεωρούμε έναν σταθερό μετασχηματιστή (F) ως προς τον οποίον αναφέρονται τα συνολικά κόστη κτήσης (%) των υπό εξέταση μετασχηματιστών.

Πίνακας 5.11: Συνολικό κόστος κατοχής για διάφορες τιμές κόστους των απωλειών.

Μετασχηματιστής			Αποτίμηση απωλειών (€/W)				
Κατ/στης	Τιμή	Απώλειες	€ 0,5	€ 1,0	€ 2,0	€ 3,0	€ 5,0
A	144,89%	64,17%	118,88%	105,54%	91,99%	85,12%	78,20%
B	140,89%	65,24%	116,51%	104,01%	91,30%	84,87%	78,38%
C	123,34%	71,47%	106,62%	98,06%	89,34%	84,93%	80,49%
D	113,83%	78,22%	102,35%	96,47%	90,49%	87,46%	43,41%
E	104,36%	89,77%	99,66%	97,25%	94,80%	93,56%	92,31%
F	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 5.11, ο μετασχηματιστής από κάθε κατασκευαστή εμφανίζεται να έχει το μικρότερο συνολικό κόστος κατοχής για μια συγκεκριμένη τιμή αποτίμησης των απωλειών. Για παράδειγμα, ο μετασχηματιστής από τον κατασκευαστή B εμφανίζεται να έχει ένα αρχικό κόστος αγοράς 40,89% υψηλότερο από τον σταθερό (F), αλλά τελικά έχει συνολικό κόστος κατοχής 15,13% μικρότερο από αυτόν, όταν το κόστος των απωλειών είναι 3 € ανά Watt.

Η επένδυση σε ένα μετασχηματιστή υψηλής ενεργειακής απόδοσης είναι αποδοτική, όταν το χρηματικό όφελος που έχουμε από την εξοικονόμηση της ενέργειας στο μέλλον, υπερβαίνει, κατά ένα επιθυμητό ποσοστό, το επιπλέον κόστος που πληρώσαμε αρχικά. Η οικονομική αξιολόγηση σε αυτή την περίπτωση στηρίζεται στον εσωτερικό βαθμό απόδοσης (*IRR*) της επένδυσης.

Η μέθοδος του εσωτερικού ρυθμού απόδοσης κατά την εφαρμογή της οικονομικής ανάλυσης μιας ενδεχόμενης επένδυσης μας επιτρέπει να βρούμε το επιτόκιο που είναι ισοδύναμο με τις επιστροφές των χρημάτων (€), που αναμένουμε από αυτήν την επένδυση. Η επιστροφή των χρημάτων στη μέθοδο αυτή είναι το ποσό των χρημάτων που εξοικονομούμε από την αποφυγή του κόστους των επιπλέον απωλειών, που θα έχουμε σε μια διάρκεια χρήσης ενός απλού μετασχηματιστή, για παράδειγμα 20 έτη. Γενικά επιθυμούμε ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσής μας να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος για να τον συγκρίνουμε με το κέρδος που θα είχαμε κατά την επένδυση των χρημάτων μας σε άλλες επιλογές. Αντίθετα, αν γνωρίζουμε τον εσωτερικό βαθμό επένδυσης και τις ετήσιες χρηματοροές, μπορούμε να υπολογίσουμε το αρχικό κόστος της επένδυσης. Ο τύπος που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό του εσωτερικού βαθμού απόδοσης είναι παρόμοιος με τον τύπο που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας και δίνεται στην εξίσωση (5.41):

$$0 = -CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} \quad (5.41)$$

όπου CF_x είναι οι χρηματοροές στο έτος x , n είναι ο αριθμός των περιόδων και r είναι ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης.

Στο παράδειγμα που ακολουθεί συγκρίνουμε δύο μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης με διαφορετικό κόστος αγοράς και διαφορετικές τιμές απωλειών, σε σχέση με ένα βασικό μετασχηματιστή, προσδιορίζοντας κάθε φορά τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης. Τέλος θεωρούμε ότι τόσο το κόστος των απωλειών κενού φορτίου ανά Watt όσο και το κόστος των απωλειών φορτίου ανά Watt είναι ισοδύναμο.

Παράδειγμα 5.5: Έστω ότι έχουμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε τρεις μετασχηματιστές από διαφορετικούς κατασκευαστές, που ο καθένας έχει ισχύ 2000 kVA. Ο συντελεστής ισχύος είναι ίδιος και για τους τρεις και είναι 0,75. Ο μετασχηματιστής από τον κατασκευαστή A είναι ο βασικός μετασχηματιστής ως προς τον οποίο γίνονται οι συγκρίσεις. Το κόστος της ενέργειας θεωρούμε ότι είναι 0,035 €/kWh, ενώ ο χρόνος λειτουργίας ανά έτος για κάθε μετασχηματιστή είναι 8760 ώρες. Στον πίνακα 5.12 παρουσιάζουμε τα χαρακτηριστικά για κάθε μετασχηματιστή.

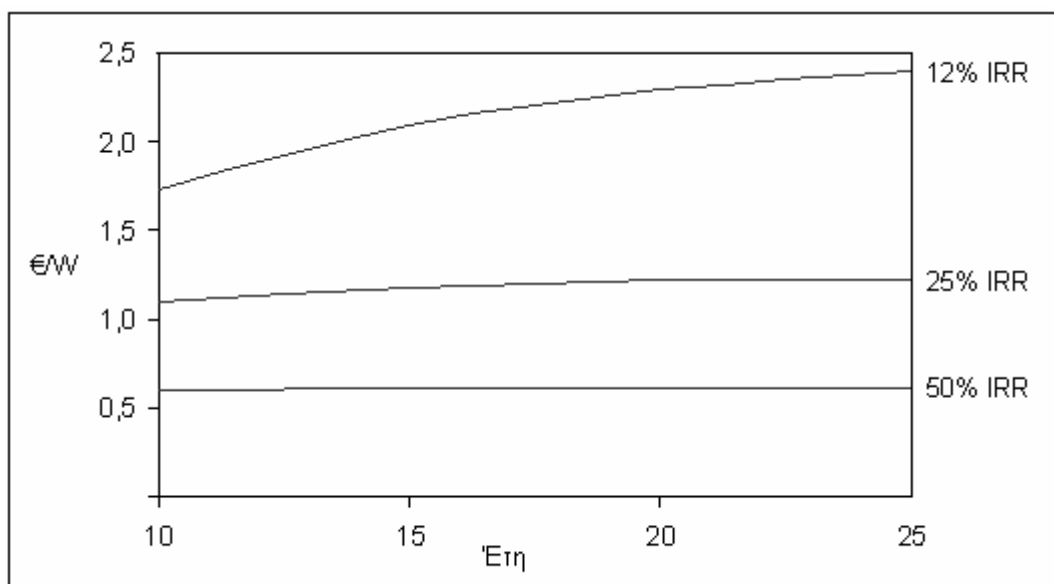
Πίνακας 5.12: Χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών.

Προμηθευτής	NLL (kW)	LL (kW)	Μειωμένες απώλειες ως προς τον A (%)	Ετήσιες απώλειες (kW)	Διαφορά κόστους ως προς τον A (€)
Κατ/στης Α	3,95	25,85	-	18,49	-
Κατ/στης Β	2,45	21,20	20	14,38	2150
Κατ/στης C	2,45	15,45	40	11,14	5400

Στη συνέχεια, για διάφορες τιμές του εσωτερικού βαθμού απόδοσης και για δεδομένες χρηματικές ροές που έχουμε από την αποφυγή του κόστους των απωλειών, μπορούμε να υπολογίσουμε από την εξίσωση (5.41) το ισοδύναμο κόστος της επένδυσης, αν επιλέξουμε ένα μετασχηματιστή υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Έστω ότι το κόστος της ενέργειας είναι 0,035 €/kWh, που σημαίνει ότι για 8760 ώρες λειτουργίας ανά έτος, το ετήσιο

κόστος είναι 0,3066 €/W. Επομένως, αν επενδύσουμε σε ένα μετασχηματιστή με λιγότερες απώλειες από το μετασχηματιστή του κατασκευαστή Α, τότε θα έχουμε εξοικονομήσει κέρδος από την αποφυγή των απωλειών ίσο με 0,3066 € ανά Watt κάθε χρόνο. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να αποφασίσουμε αν το επιπρόσθετο αρχικό κόστος για την αγορά ενός ενεργειακά αποδοτικού μετασχηματιστή, όπως για παράδειγμα του κατασκευαστή Β ή του κατασκευαστή C, δικαιολογεί την αναμενόμενη απόδοση της επένδυσής μας, μέσα από την εξοικονόμηση των απωλειών.

Στο σχήμα 5.3 δείχνουμε τη σχέση ανάμεσα στον εσωτερικό βαθμό απόδοσης μιας επένδυσης και στο δικαιολογημένο κόστος που απαιτείται για αυτή την επένδυση σύμφωνα με το συγκεκριμένο κόστος της ενέργειας που είναι 0,035€/kWh και για διάφορα έτη λειτουργίας του μετασχηματιστή. Επομένως, μπορούμε αν γνωρίζουμε το επιπρόσθετο κόστος αγοράς ενός ενεργειακά αποδοτικού μετασχηματιστή να υπολογίσουμε τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσης. Ή αντίθετα, αν γνωρίζουμε τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης της επένδυσής μας, να μπορούμε να υπολογίσουμε το δικαιολογημένο επιπρόσθετο κόστος αγοράς ενός μετασχηματιστή.



Σχήμα 5.3: Σύνδεση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης με το δικαιολογημένο κόστος της επένδυσης €/W, με τιμή κόστους της ενέργειας ίση με 0,035 €/kWh.

Η διαφορά των απωλειών μεταξύ του μετασχηματιστή του κατασκευαστή Α και του μετασχηματιστή του κατασκευαστή Β είναι 4110 Watts. Αν υποθέσουμε ότι η διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών είναι τα 20 έτη και θεωρήσουμε ότι ο εσωτερικός βαθμός της απόδοσης είναι 25%, τότε σύμφωνα με το σχήμα 5.3 το δικαιολογημένο κόστος είναι περίπου 1,1 €/W. Συνεπώς το δικαιολογημένο συνολικό κόστος είναι 4521€. Το ποσό αυτό είναι πολύ μεγαλύτερο από τη διαφορά κόστους των δυο αυτών μετασχηματιστών, που είναι 2150€. Επομένως ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης θα είναι μεγαλύτερος από 25%. Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή μιας τέτοιας επένδυσης κρίνεται συμφέρουσα και δικαιολογημένη.

Συγκρίνοντας το μετασχηματιστή του κατασκευαστή Α με αυτόν του κατασκευαστή C, βρίσκουμε ότι η διαφορά των απωλειών τους είναι 7350 Watts. Το συνολικό δικαιολογημένο κόστος σε αυτή την περίπτωση είναι 8085€ και επομένως μεγαλύτερο από τη διαφορά του κόστους αγοράς μεταξύ των δυο αυτών μετασχηματιστών, που είναι 5400€. Άρα το IRR θα είναι ξανά μεγαλύτερο από 25%.

Η χρήση του γραφήματος του σχήματος 5.3 ισχύει και στις περιπτώσεις που έχουμε διαφορετικό κόστος ενέργειας και διαφορετικές ετήσιες ώρες λειτουργίας των μετασχηματιστών από αυτές που υποθέσαμε στο παράδειγμά μας αρχικά. Το συνολικό δικαιολογημένο κόστος σε αυτή την περίπτωση βρίσκεται πολλαπλασιάζοντας το συνολικό δικαιολογημένο κόστος όπως έχουμε προσδιορίσει προηγουμένως, με το λόγο των νέων ετήσιων ωρών λειτουργίας του μετασχηματιστή προς τις 8760 ώρες και με το λόγο του νέου κόστους της ενέργειας προς το αρχικό κόστος της ενέργειας που είχαμε θεωρήσει και ήταν 0,035 €/kWh.

Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού του IRR είναι να διαιρέσουμε τη διαφορά κόστους αγοράς μεταξύ των δυο μετασχηματιστών με τη διαφορά των απωλειών τους. Αν για παράδειγμα έχουμε το μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή Α και αυτό από τον κατασκευαστή Β, τότε διαιρούμε τη διαφορά κόστους αγοράς τους, που είναι 2150 με τη διαφορά των απωλειών τους που είναι 4110 Watts. Η τιμή που προκύπτει είναι 0,52 €/W, όπου σύμφωνα με το σχήμα 5.3 μας δίνει εσωτερικό ρυθμό απόδοσης ίσο με 45% περίπου. Επομένως, και με αυτό τον τρόπο μπορούμε να βρούμε αν μια επένδυση είναι αποδοτική και ουσιαστικά να προσδιορίσουμε το επιτόκιο που αναμένουμε από την επένδυσή μας.

5.9. Η ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΥΠΟΣΤΑΘΜΩΝ

Η αποτίμηση των βοηθητικών απωλειών αφορά μόνο τους μετασχηματιστές ισχύος και μπορεί να γίνει με τρόπο παρόμοιο με αυτό του προσδιορισμού του κόστους των απωλειών φορτίου. Η μόνη διαφορά είναι ότι ο βοηθητικός εξοπλισμός λειτουργεί σε διάφορες βαθμίδες ανάλογα με το μέσο ψύξης. Σε ορισμένες περιπτώσεις η προτιμώμενη μέθοδος για την αποτίμηση των απωλειών αυτών, είναι η μέθοδος του ισοδύναμου κόστους. Αν μας ενδιαφέρει στη συνέχεια να υπολογίσουμε το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος, τότε πολλαπλασιάζουμε το ισοδύναμο κόστος των βοηθητικών απωλειών με το συντελεστή ετήσιου κόστους (*FCR*). Τέλος σε περίπτωση που η προτιμώμενη μέθοδος είναι αυτή της παρούσας αξίας, με τη χρήση του συντελεστή παρούσας αξίας (*USPW*) μετατρέπουμε το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος σε παρούσα αξία.

Οποιαδήποτε μέθοδο και αν επιλέξουμε για την αποτίμηση των βοηθητικών απωλειών, το κόστος που προκύπτει θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση του συνολικού κόστους επένδυσης (*TOC*), όπως δείχνεται στην ακόλουθη σχέση:

$$TOC = BP + cost_NLL + cost_LL + cost_AL \quad (5.42)$$

όπου *BP* (€) είναι το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, *cost_NLL* (€) είναι το κόστος των απωλειών κενού φορτίου, *cost_LL* (€) είναι το κόστος των απωλειών φορτίου και *cost_AL* (€) είναι το κόστος των βοηθητικών απωλειών.

5.10. BAND OF EQUIVALENT

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όταν ο αγοραστής έχει να επιλέξει ανάμεσα σε μετασχηματιστές, που το συνολικό κόστος επένδυσής τους δεν διαφέρει αρκετά. Συνήθως η διαφορά τους κυμαίνεται από 1% έως 3%. Στην περίπτωση αυτή ο αγοραστής επιλέγει το μετασχηματιστή που εμφανίζεται να έχει το μικρότερο κόστος αγοράς. Αυτό οφείλεται στην αβεβαιότητα που περιέχει ο υπολογισμός του συνολικού κόστους επένδυσης.

Ο αγοραστής πάντα βρίσκεται αντιμέτωπος με την αβεβαιότητα ως προς την αξιοπιστία των τιμών που υπολογίζονται στο συνολικό κόστος επένδυσης. Η αβεβαιότητα

αυτή ενισχύεται από την έλλειψη σταθερότητας του κόστους της ενέργειας, τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, τον προσδιορισμό των μελλοντικών απωλειών του, την παραγωγική ικανότητα του συστήματος, το φορτίο του μετασχηματιστή, τον προσδιορισμό του επιτοκίου, τον πληθωρισμό και την αξιοπιστία των συντελεστών που μπορούν να επηρεάσουν τον υπολογισμό του συνολικού κόστους της επένδυσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αρκετοί αγοραστές αντί να βασίζονται στην απόλυτη τιμή που προκύπτει από τον συνολικό κόστος κτήσης του μετασχηματιστή, να προτιμούν να χρησιμοποιούν την μέθοδο band of equivalent.

Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής έχει δυο κύρια μειονεκτήματα. Πρώτον η επιλογή του μετασχηματιστή με το μικρότερο κόστος αγοράς έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε περισσότερες απώλειες, αφού συνήθως επιλέγουμε ένα λιγότερο αποδοτικό μετασχηματιστή και δεύτερον ούτε αυτή η μέθοδος αντιμετωπίζει την αβεβαιότητα.

5.11. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η διαφορά με τις προηγούμενες μεθόδους είναι ότι στη μέθοδο της ανάλυσης ευαισθησίας μπορούμε να προσδιορίσουμε πόσο επηρεάζει το συνολικό κόστος επένδυσης η αβεβαιότητα. Με τη βοήθεια της μεθόδου αυτής υπολογίζουμε τη μεταβολή του συνολικού κόστους επένδυσης όταν ταυτόχρονα συμβαίνει κάποια μικρή μεταβολή σε ένα συντελεστή της εξίσωσής του. Οι συντελεστές που μπορούν να μεταβληθούν είναι ο συντελεστής ετήσιου κόστους, ο πληθωρισμός, το επιτόκιο, το κόστος της ενέργειας, το φορτίο του μετασχηματιστή και οι απώλειες κενού φορτίου και φορτίου.

Αρχικά δημιουργούμε την εξίσωση του συνολικού κόστους επένδυσης. Στη συνέχεια επιφέρουμε κάποια μεταβολή σε ένα συντελεστή της εξίσωσης, ενώ ταυτόχρονα διατηρούμε τους υπόλοιπους σταθερούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε αλλαγή του συνολικού κόστους επένδυσης. Σε αρκετές περιπτώσεις για να έχουμε αλλαγή κατά 1% του συνολικού κόστους, η μεταβολή στο συντελεστή ίσως πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη. Έπειτα οι αλλαγές αυτές μπορούν να απεικονιστούν σε ένα γράφημα. Στο επόμενο παράδειγμα δείχνουμε πως η αλλαγή της τιμής του κόστους της ενέργειας επιδρά στο συνολικό κόστος κατοχής και επομένως στη σύγκριση και στην επιλογή ανάμεσα σε δύο μετασχηματιστές.

Παράδειγμα 5.6: Από το παράδειγμα 5.2 επιλέγουμε το μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 2 που είχε το μικρότερο αρχικό κόστος κτήσης και τον μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 3 που είχε το μικρότερο συνολικό κόστος κατοχής. Στους πίνακες 5.13 και 5.14 παρουσιάζουμε τις αλλαγές στο κόστος των απωλειών και στο συνολικό κόστος επένδυσης των δυο αυτών μετασχηματιστών όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (EP) μεταβάλλεται σταδιακά από 0,05 €/kWh σε 0,1 €/kWh. Ο συντελεστής παρούσας αξίας είναι 12,16 και η διάρκεια λειτουργίας είναι 8760 ώρες ανά έτος.

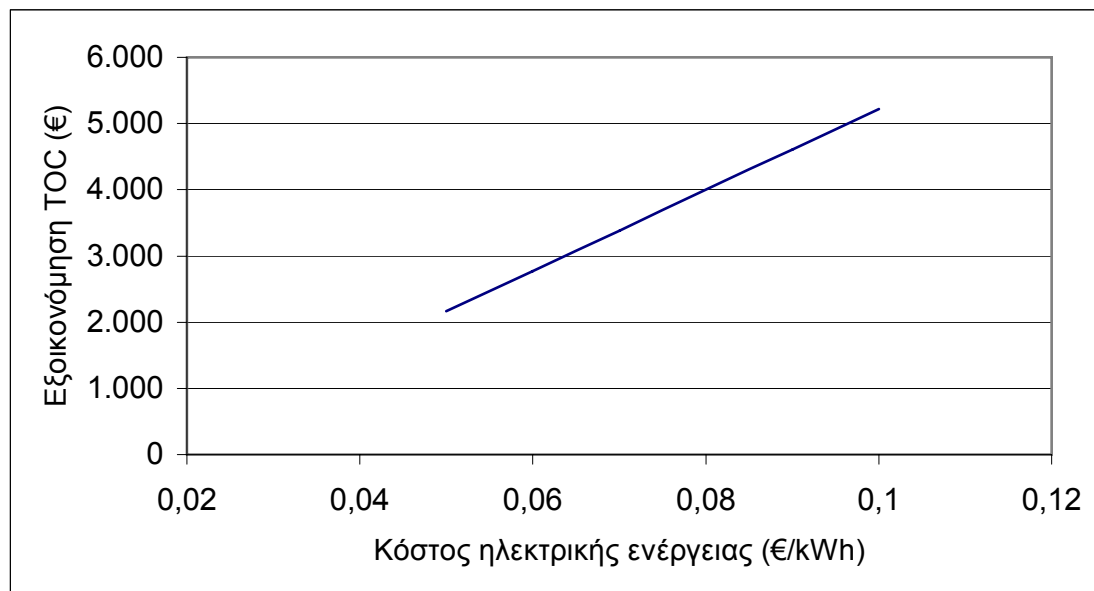
Πίνακας 5.13: Χαρακτηριστικές τιμές μετασχηματιστή του κατασκευαστή 2 για διάφορες τιμές κόστους της ενέργειας.

Κατασκευαστής 2					
EP (€/kWh)	BP (€)	Απώλειες ενέργειας (W)	Συνολικό κόστος απωλειών (€/yr)	Παρούσα αξία συνολικό κόστος (€)	TOC (€)
0,05	10.200	4.650	2.037	24.770	34.970
0,06	10.200	4.650	2.444	29.719	39.919
0,07	10.200	4.650	2.851	34.668	44.868
0,08	10.200	4.650	3.259	39.629	49.829
0,09	10.200	4.650	3.666	44.579	54.779
0,10	10.200	4.650	4.073	49.528	59.728

Πίνακας 5.14: Χαρακτηριστικές τιμές μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3 για διάφορες τιμές κόστους της ενέργειας.

Κατασκευαστής 3					
EP (€/kWh)	BP (€)	Απώλειες ενέργειας (W)	Συνολικό κόστος απωλειών (€/yr)	Παρούσα αξία συνολικό κόστος (€)	TOC (€)
0,05	11.100	4.075	1.785	21.706	32.806
0,06	11.100	4.075	2.142	26.047	37.147
0,07	11.100	4.075	2.499	30.388	41.488
0,08	11.100	4.075	2.856	34.729	45.829
0,09	11.100	4.075	3.213	39.070	50.170
0,10	11.100	4.075	3.570	43.411	54.511

Στη συνέχεια, στο σχήμα 5.4 δείχνουμε την εξοικονόμηση του συνολικού κόστους επένδυσης που έχουμε αν χρησιμοποιήσουμε το μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 3 αντί του μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 2, σε σχέση με τη μεταβολή του κόστους της ενέργειας από 0,05 €/kWh σε 0,1 €/kWh. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας προκαλεί και ανάλογη αύξηση στην εξοικονόμηση του συνολικού κόστους της επένδυσης.



Σχήμα 5.4: Γράφημα ανάλυσης ευαισθησίας εξοικονόμησης TOC από την επιλογή του μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3 αντί του κατασκευαστή 2.

Το γράφημα μας δείχνει πόσο επηρεάζει η μεταβολή του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας το συνολικό κόστος κατοχής. Επομένως, μπορούμε να διακρίνουμε πόσο η αλλαγή των συντελεστών της εξίσωσης του συνολικού κόστους κατοχής επιδρά στο συνολικό κόστος επένδυσης και κατά συνέπεια στον αγοραστή για την επιλογή ενός μετασχηματιστή.

5.12. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Η προστασία του περιβάλλοντος είναι μια ακόμη παράμετρος, που μπορεί να επηρεάσει την απόφαση του αγοραστή για τη σωστή επιλογή ενός μετασχηματιστή. Οι μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης έχουν μειωμένες απώλειες και επομένως

απαιτούν μικρότερη παραγωγή ενέργειας για να τις καλύψουν. Η μικρότερη παραγωγή έχει ως αποτέλεσμα λιγότερες εκπομπές αερίων.

Για την αποτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων στο περιβάλλον από τις απώλειες στους μετασχηματιστές, εισάγουμε τον συντελεστή E . Για παράδειγμα, αν έχουμε ένα μετασχηματιστή με ισχύ 25 kVA, απώλειες κενού φορτίου 30 Watts, συντελεστή ετήσιου κόστους 17% και υποθέσουμε ότι το κόστος παραγωγής για την κάλυψη αυτών των απωλειών είναι 0,02 €/kWh, τότε ο συντελεστής E θα είναι:

$$(30 * 8760 * 0,02 * 10^{-3}) / 0,17 = 30,92 \text{ €}$$

Το επιπλέον αυτό κόστος θα πρέπει να προστίθεται στο συνολικό κόστος κατοχής.

Ακόμη και αν το περιβαλλοντικό κόστος από τις απώλειες του μετασχηματιστή δεν είναι ένα άμεσο κόστος για το χρήστη του μετασχηματιστή, είναι όμως σίγουρα ένα κόστος στη κοινωνία. Εξαρτάται από το πόσο ευαισθητοποιημένος είναι ο χρήστης σε περιβαλλοντικά θέματα για την αποτίμηση του κόστους αυτού. Ο συντελεστής E , ουσιαστικά ποσοτικοποιεί σε χρηματικές μονάδες το περιβαλλοντικό κόστος. Το κόστος αυτό καθορίζεται ανάλογα με τον τύπο των αερίων που εκπέμπονται κατά τη διαδικασία της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

5.13. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Όλο και περισσότερες δημόσιες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού συμπεριλαμβάνουν το κόστος της αξιοπιστίας μαζί με το κόστος των απωλειών, για τη σωστή επιλογή της αγοράς ενός μετασχηματιστή. Έχουν αναπτύξει πλήθος μεθοδολογιών για την αποτίμηση της αξιοπιστίας στους μετασχηματιστές. Γενικά έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι οι μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης είναι περισσότερο αξιόπιστοι. Επίσης, η αποτίμηση της αξιοπιστίας έχει αποτελέσει ένα επιπλέον κίνητρο στους κατασκευαστές, ώστε να φτιάχνουν πιο αξιόπιστους μετασχηματιστές. Τέλος το κόστος αστοχίας ενός μετασχηματιστή από ενδεχόμενη βλάβη του θα πρέπει να συνυπολογίζεται στο τελικό κόστος κατοχής.

Για να συμπεριληφθεί η αξιοπιστία στην εξίσωση του συνολικού κόστους επένδυσης, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μία βάση δεδομένων, που να περιέχει τον αριθμό των μετασχηματιστών που αγοράστηκαν και επίσης τον αριθμό των μετασχηματιστών που υπέστησαν βλάβη. Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνει ταξινόμηση ανάλογα με τον κατασκευαστή, την ημερομηνία κατασκευής τους, την περιγραφή και την ημερομηνία της βλάβης, τον σειριακό αριθμό, τον τύπο, το μέγεθος και την τάση.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του συνολικού ρυθμού βλάβης και του ρυθμού βλάβης ανά κατασκευαστή. Ο συνολικός ρυθμός βλάβης ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των βλαβών σε ένα χρόνο προς τον αριθμό των μετασχηματιστών που βρίσκονταν σε λειτουργία στην αρχή του χρόνου. Ο συνολικός ρυθμός βλάβης υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$HR = \frac{NF}{NO} \quad (5.43)$$

όπου HR είναι ο συνολικός ρυθμός βλάβης, NF είναι ο αριθμός των βλαβών σε ένα χρόνο και NO ο αριθμός των μετασχηματιστών σε λειτουργία στην αρχή του χρόνου.

Ο ρυθμός βλάβης ανά κατασκευαστή ορίζεται ως ο λόγος του συνολικού αριθμού των βλαβών προς τα συνολικά έτη λειτουργίας των μετασχηματιστών. Ο υπολογισμός του ρυθμού βλάβης ανά κατασκευαστή υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$FR = \frac{TF}{TY} \quad (5.44)$$

όπου FR είναι ο ρυθμός βλάβης, TF ο συνολικός αριθμός βλαβών και TY τα συνολικά έτη λειτουργίας των μετασχηματιστών.

Το κόστος που προκύπτει από τη βλάβη αποτελείται από τρία συστατικά: (α) το κόστος εργασίας για την αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή που έχει υποστεί βλάβη από ένα νέο ή επισκευασμένο μετασχηματιστή, (β) το κόστος κεφαλαίου που περιλαμβάνει τα έξοδα για την επισκευή ή την αντικατάσταση του μετασχηματιστή και (γ) την υπολειμματική αξία του μετασχηματιστή. Ο υπολογισμός του κόστους δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$FRC = FR * USPW * FCR * RP * IR + FR * LC * SPW * IR \quad (5.45)$$

όπου FRC είναι το κόστος βλάβης, FR ο ρυθμός βλάβης, $USPW$ είναι ο συντελεστής της παρούσας αξίας, FCR ο συντελεστής ετήσιου κόστους, RP είναι το κόστος της αντικατάστασης, IR είναι η τιμή του πληθωρισμού, LC είναι το κόστος εργασίας και SPW είναι ο συντελεστής παρούσας αξίας μοναδιαίου ποσού.

Στη συνέχεια, αφού προσδιορίσαμε το κόστος βλάβης, μπορούμε να το προσθέσουμε στην εξίσωση του συνολικού κόστους επένδυσης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$TOC = BP + cost_NLL + cost_LL + cost_FRC \quad (5.46)$$

όπου BP (€) είναι το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, $cost_NLL$ (€) είναι το κόστος των απωλειών κενού φορτίου, $cost_LL$ (€) είναι το κόστος των απωλειών φορτίου και $cost_FRC$ (€) είναι το κόστος βλάβης.

5.14. Βιβλιογραφία

- [5.1] Barry W. Kennedy, Energy Efficient Transformers, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [5.2] European Copper Institute, “The Scope for Energy Saving in the EU Through the Use of Energy – Efficient Electricity Distribution Transformers”, December 1999. It can be downloaded from the URL address:
<http://www.leonardo-energy.org/drupal/files/Full%20project%20report%20-%20Thermie.pdf?download>
that has been accessed on December 2006.
- [5.3] P. S. Georgilakis, “Decision Support System for Evaluating Transformer Investments in the Industrial Sector”, Journal of Materials Processing Technology 181 (2007)307-312.
- [5.4] D. L. Nickel and H. R. Braunstein, “Distribution Transformer Loss Evaluation: I – Proposed Techniques”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, No2, February 1981.
- [5.5] S. Y. Merritt, S. D. Chaitkin, “No-Load Versus Load Loss”, IEEE Industry Applications Magazine, Nov|Dec 2003.
- [5.6] N. K. Haggerty, T. P. Malone and Dr. J. Crouse, “Applying High Efficiency Transformers”, IEE Industry Applications Magazine, Nov|Dec 1998.

ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

6.1. Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΝΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

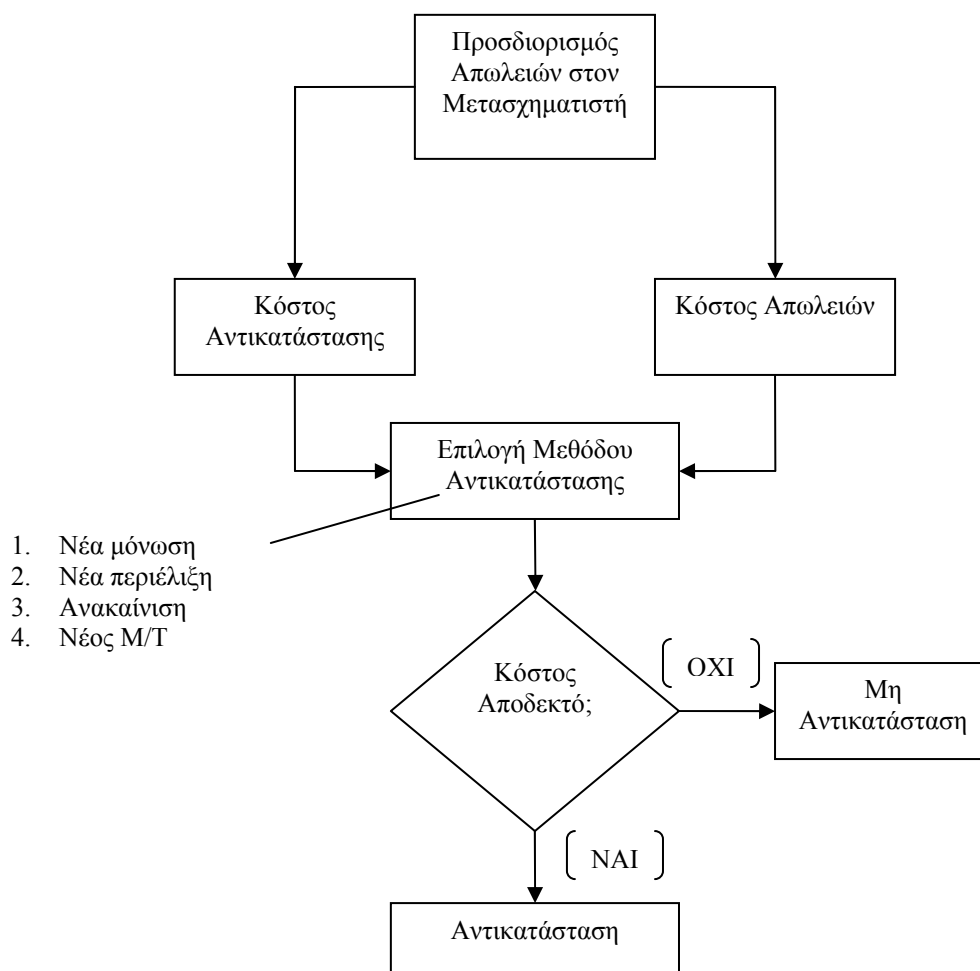
Η αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή μπορεί να γίνει λόγω βλάβης, αναβάθμισης του δικτύου διανομής ή της ανάγκης να αντικατασταθεί ο υπάρχον μετασχηματιστής με ένα νέο, περισσότερο ενεργειακά αποδοτικό μετασχηματιστή, [6.1]. Θα είχαμε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, αν μπορούσαμε να αντικαταστήσουμε όλους τους μετασχηματιστές με νέους μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό εξαιτίας του υπερβολικού κόστους της απαιτούμενης επένδυσης.

Με τον όρο αντικατάσταση εννοούμε είτε τις απαιτούμενες ενέργειες που κάνουμε για τη βελτίωση του ήδη υπάρχοντος μετασχηματιστή, είτε την απόσυρση και την αντικατάστασή του από ένα νέο μετασχηματιστή. Η αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή μπορεί να προκύψει από τον έλεγχο που γίνεται κατά τη διάρκεια της συντήρησής του ή σύμφωνα με το πρόγραμμα αντικατάστασής του. Υπάρχουν τέσσερις επιλογές σχετικά με την αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή, που είναι οι ακόλουθες:

1. Νέα μόνωση
2. Νέα περιέλιξη
3. Ανακαίνιση
4. Νέος μετασχηματιστής.

Κάθε μια από τις παραπάνω επιλογές πρέπει να αξιολογείται οικονομικά ξεχωριστά και στη συνέχεια να γίνεται σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών για την πιο συμφέρουσα επιλογή. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την οικονομική αξιολόγηση των τεσσάρων επιλογών πρέπει να εκφράζονται σε παρούσα αξία, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η σύγκρισή τους. Στο πρώτο στάδιο θα πρέπει να προσδιορίσουμε τη διάρκεια ζωής του υπάρχοντος μετασχηματιστή. Στο επόμενο στάδιο θα πρέπει να αποφασίσουμε αν θα αντικαταστήσουμε τον υπάρχον μετασχηματιστή τώρα ή αργότερα. Επίσης υποθέτουμε ότι όλοι οι μετασχηματιστές που υπόκεινται σε έλεγχο συντήρησης είναι υποψήφιοι προς αντικατάσταση. Τέλος, το κόστος εγκατάστασης ενός μετασχηματιστή για οποιαδήποτε από τις παραπάνω επιλογές είναι το ίδιο και δεν συμπεριλαμβάνεται στην οικονομική αξιολόγηση.

Η οικονομική αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών βασίζεται στην εξίσωση του συνολικού κόστους κατοχής. Η σωστή επιλογή της αντικατάστασης ενός μετασχηματιστή περιλαμβάνει δύο παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος εξετάζει το κόστος για αυτή την επένδυση έναντι της εξοικονόμησης της ενέργειας που πετυχαίνουμε και η δεύτερη παράμετρος σχετίζεται με την αύξηση της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή. Επομένως οι δυο κύριοι συντελεστές είναι το κόστος επισκευής ή αντικατάστασης του μετασχηματιστή από έναν νέο και ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του μετασχηματιστή, που υπολογίζεται προσεγγιστικά. Η μέθοδος της ανάλυσης ευαισθησίας ενδείκνυται για αυτή την περίπτωση, που και οι δυο συντελεστές δεν είναι σταθεροί. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζουμε ένα διάγραμμα ροής, όπου εμφανίζουμε τη διαδικασία κατά την οποία επιλέγουμε την αντικατάσταση ή όχι ενός μετασχηματιστή, [6.1].



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής αντικατάστασης ή μη ενός μετασχηματιστή.

Στις μέρες μας πολλές επιχειρήσεις ηλεκτρισμού έχουν αναπτύξει προγράμματα, που το κριτήριό τους για την αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή είναι η ηλικία του. Συνήθως το κριτήριο αυτό ποικίλει από 14 έως 35 χρόνια, με ένα μέσο όρο διάρκειας ζωής τα 25 χρόνια. Επίσης το κριτήριο αυτό είναι άμεσα συνδεδεμένο με τις απώλειες που συμβαίνουν σε έναν μετασχηματιστή και επομένως με το κόστος των απωλειών αυτών. Σημαντικά ποσά ενέργειας και χρημάτων μπορούν να εξοικονομηθούν κατά την αντικατάσταση ενός παλιού από έναν καινούριο και πιο ενεργειακά αποδοτικό μετασχηματιστή.

Από τον έλεγχο κατά τη διάρκεια της συντήρησης που πραγματοποιείται, μπορεί να προκύψει το δίλημμα της επισκευής ή της πλήρους αντικατάστασης του μετασχηματιστή. Αρκετές επιχειρήσεις ηλεκτρισμού κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης δίνουν στο προσωπικό τους συγκεκριμένες οδηγίες για το ποτέ μια μονάδα χρειάζεται να αποσυρθεί για επισκευή ή για πλήρη αντικατάσταση. Οι οδηγίες αυτές περιλαμβάνουν την οπτική επιθεώρηση για εμφανή προβλήματα, εξέταση για την ισχύ του μονωτικού μέσου, εξέταση του λαδιού για την ύπαρξη πολυχλωριωμένων διφαινυλίων (PCBS), μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού, μέτρηση της τάσης βραχυκύκλωσης, μέτρηση απωλειών φορτίου και μέτρηση ρεύματος μαγνήτισης και απωλειών κενού φορτίου.

Αν ο υπάρχον μετασχηματιστής χρειάζεται να αντικατασταθεί πλήρως από ένα νέο, τότε η αξία του (υπολειμματική αξία) πρέπει να συμπεριληφθεί στην εξίσωση του συνολικού κόστους κατοχής. Η αξία αυτή πρέπει να αφαιρείται από την αξία της νέας μονάδας. Επίσης

εξαρτάται από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο παλιός μετασχηματιστής και μπορεί είτε να πωληθεί είτε να ανακυκλωθεί. Στην επόμενη εξίσωση απεικονίζουμε το συνολικό κόστος κατοχής στην περίπτωση που αντικαθιστούμε πλήρως μια παλιά μονάδα με μια νέα:

$$TOC_{rep} = cost_rep + SV + cost_NLL_{rep} + cost_LL_{rep} \quad (6.1)$$

όπου TOC_{rep} είναι το συνολικό κόστος κατοχής, $cost_rep$ είναι το κόστος αντικατάστασης, SV είναι η υπολειμματική αξία της παλιάς μονάδας, $cost_NLL_{rep}$ και $cost_LL_{rep}$ είναι το κόστος απωλειών κενού φορτίου και φορτίου αντίστοιχα για τον νέο μετασχηματιστή.

Το συνολικό κόστος κατοχής από την αντικατάσταση που προκύπτει από την εξίσωση (6.1), πρέπει να συγκρίνεται με το τελικό κόστος κατοχής του υπάρχοντος μετασχηματιστή αν συνεχίσει να λειτουργεί. Το κόστος της αντικατάστασης εξαρτάται από το αν η παλιά μονάδα θα αντικατασταθεί πλήρως ή αν θα ανακαινισθεί. Στην περίπτωση που προτιμηθεί να επισκευασθεί, τότε στην εξίσωση (6.1) δεν εμφανίζεται ο όρος της υπολειμματικής αξίας. Έρευνες που έχουν γίνει, έχουν δείξει ότι περίπου στο 47% των ανακαινισμένων μετασχηματιστών (δηλαδή αυτών που έχουν υποστεί επισκευή) η επισκευή έχει γίνει στα δέκα πρώτα χρόνια της ζωής τους, στο 34% ανάμεσα στα δέκα και είκοσι χρόνια, στο 17% ανάμεσα στα είκοσι και τριάντα χρόνια και στο 2% η επισκευή έχει γίνει όταν έχουν ξεπεράσει τα 30 χρόνια ζωής, [6.2].

6.2. ΕΠΙΛΟΓΕΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Όταν ένας μετασχηματιστής αποσύρεται για έλεγχο κατά τη διάρκεια της συντήρησής του, η επιχείρηση ηλεκτρισμού πρέπει να αποφασίσει ποια επιλογή θα επιλέξει για την αντικατάστασή του, όταν αυτή είναι αναγκαία. Υπάρχουν τρεις παράγοντες που επηρεάζουν την απόφαση αυτή: η ηλικία, το μέγεθός του και η μελλοντική αύξηση του φορτίου. Αν είναι τόσο παλιός ή μικρός ο μετασχηματιστής, τότε δεν είναι κατάλληλη η επιλογή της ανακαίνισής του. Επιπρόσθετα, αν έχουμε προσδιορίσει ότι θα έχουμε αύξηση του φορτίου, τότε ένας νέος μεγαλύτερος μετασχηματιστής είναι η πιο ενδεδειγμένη λύση σε σχέση με το ήδη υπάρχον μετασχηματιστή. Επομένως κάθε μια επιλογή που αφορά την αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή πρέπει να εξετάζεται διαφορετικά.

6.2.1. ΝΕΑ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ

Η αντικατάσταση της περιέλιξης σε ένα πηνίο με μια νέα περιέλιξη, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή και τη μείωση των απωλειών του. Η επιλογή αυτή για την επισκευή ενός μετασχηματιστή αποτελεί περίπου το 2% του συνόλου των μετασχηματιστών που έχουν ανακαινιστεί, [6.2]. Αν ο πυρήνας σε έναν μετασχηματιστή δεν αντικατασταθεί, τότε οι απώλειες κενού φορτίου συνήθως αυξάνονται, λόγω της φθοράς που έχει υποστεί από τη χρήση του. Αν όμως αντικατασταθεί με χάλυβα λιγότερων απωλειών, οι απώλειες κενού φορτίου μειώνονται, ενώ παράλληλα μειώνονται και οι απώλειες φορτίου αν αντικαταστήσουμε την περιέλιξη με μεγαλύτερους αγωγούς ή στην περίπτωση που έχουμε αντικατάσταση των αγωγών από αλουμίνιο με αγωγούς από χαλκό.

Το κριτήριο για την επιλογή ανάμεσα στην επισκευή και στην πλήρη αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή είναι το κόστος. Το κόστος από την εγκατάσταση της νέας περιέλιξης θα πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερο από το κόστος της αγοράς ενός νέου μετασχηματιστή. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι μια μελέτη που έγινε για μετασχηματιστές με ισχύ 25 kVA έδειξε ότι το κόστος της επισκευής λόγω νέας περιέλιξης ανερχόταν στο 76% περίπου του μέσου όρου του κόστους της αγοράς ενός καινούριου μετασχηματιστή, [6.2]. Επομένως η επιλογή της επισκευής ενός μετασχηματιστή με αυτή τη μέθοδο δεν ενδείκνυται

σε περιπτώσεις που ο μετασχηματιστής είναι σχετικά παλιός. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από το γεγονός πως πολλά μέρη του μετασχηματιστή, όπως για παράδειγμα η μόνωση και ο πυρήνας, έχουν υποστεί κάποια φθορά λόγω της ηλικίας του. Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η εξοικονόμηση σε ενέργεια από την εγκατάσταση νέας περιέλιξης σε έναν μετασχηματιστή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι συνήθως δεν έχουμε και μείωση των απωλειών κενού φορτίου. Επομένως οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας δεν εφαρμόζουν συνήθως την μέθοδο αυτή για να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής σε ένα μετασχηματιστή.

6.2.2. ΝΕΑ ΜΟΝΩΣΗ

Η επιλογή της εγκατάστασης νέου μονωτικού υλικού σε ένα μετασχηματιστή έχει ως αποτέλεσμα να αυξήσει τη διάρκεια ζωής του και την ισχύ του. Αρκετές εταιρίες ηλεκτρισμού χρησιμοποιούν ένα νέο υλικό για τη μόνωση του μετασχηματιστή όταν αυτός έχει υποστεί βλάβη. Αυτό το νέο υλικό είναι το αραμίδιο.

Το αραμίδιο κατασκευάζεται από θερμοπλαστικό αρωματικό πολυαμίδιο και έχει την ικανότητα να αντέχει σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες από το συμβατικό υλικό της μόνωσης ενός μετασχηματιστή. Οι δυνατότητες της μόνωσης από συμβατικό υλικό είναι περιορισμένες σε μια μέση θερμοκρασία τυλίγματος 65 °C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (40 °C), ενώ η μόνωση από αραμίδιο έχει τη δυνατότητα να αντέχει σε θερμοκρασία 200 °C συνεχόμενα. Η ικανότητά του αυτή επιτρέπει στους αγωγούς να μπορούν να λειτουργούν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Η αύξηση της θερμοκρασίας συμβαίνει όταν ο αγωγός δέχεται μεγαλύτερο φορτίο. Επομένως η χρήση του αραμιδίου αυξάνει την ισχύ του μετασχηματιστή. Στον επόμενο πίνακα εμφανίζουμε τη διαφορά που έχει ένας τυπικός μετασχηματιστής ισχύος 12/20 MVA πριν και μετά την αναβάθμιση της μόνωσης του με υλικό από αραμίδιο, [6.3].

Πίνακας 6.1: Σύγκριση ανάμεσα σε έναν μετασχηματιστή ισχύος 12/20 MVA πριν και μετά την αναβάθμιση της μόνωσής του.

	Συμβατική Μόνωση		Μόνωση από Αραμίδιο	
	ONAN	ONAF	ONAN	ONAF
Σύστημα ψύξης				
Ισχύς MVA	12	20	18	30
Μέσος όρος θερμοκρασίας λαδιού (K)	38	28	55.7	45.4
Μέσος όρος θερμοκρασίας τυλίγματος (K)	50	55	71.5	81.1
Μέγιστη θερμοκρασία λαδιού (K)	44	37	64.5	60

Από τον πίνακα 6.1 παρατηρούμε ότι έχουμε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας όταν επιλέγουμε τη μέθοδο της επισκευής του ήδη υπάρχοντος μετασχηματιστή με χρήση αραμιδίου ως μονωτικού υλικού. Ταυτόχρονα έχουμε και αύξηση της ισχύος του μετασχηματιστή ίση με 50%. Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι οι τιμές της θερμοκρασίας στον πίνακα 6.1, αντιστοιχούν σε τιμές πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Το κόστος από τη χρήση του αραμιδίου ως μονωτικού υλικού είναι σχετικά υψηλό. Πολλές εταιρίες ηλεκτρισμού έχουν να επιλέξουν ανάμεσα στη χρήση ενός συμβατικού υλικού, όπου τους επιτρέπει να μειώσουν τις απώλειες χωρίς να αυξήσουν την ισχύ του μετασχηματιστή τους και στη χρήση ως μονωτικού υλικού του αραμιδίου, όπου τους επιτρέπει να έχουν μεγαλύτερη ισχύ με τις ίδιες απώλειες. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες του αραμιδίου ως μονωτικού υλικού, επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερων αγωγών και επομένως μπορούμε να έχουμε αύξηση της διατομής των αγωγών χωρίς να έχουμε αύξηση στο μέγεθος του μετασχηματιστή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε λιγότερες απώλειες φορτίου. Από την άλλη μεριά όμως το υψηλό κόστος του υλικού αυτού, περιορίζει τη χρήση του μόνο στις πιο περιοχές του μετασχηματιστή που θερμαίνονται περισσότερο. Αρκετοί επιλέγουν τη μερική χρήση του σε ένα ποσοστό 20 με 30%. Η χρήση του σε ποσοστό πάνω από 30% γίνεται από όσους ενδιαφέρονται να αυξήσουν σημαντικά την ισχύ του μετασχηματιστή τους.

Τέλος, ένα ακόμα πλεονέκτημα της επιλογής αυτής είναι ότι μπορούμε να πετύχουμε αναβάθμιση της ισχύος του μετασχηματιστή, που ήδη χρησιμοποιούμε, χωρίς ταυτόχρονα να αυξήσουμε τις απώλειες που προέρχονται από το βοηθητικό εξοπλισμό του, δηλαδή από το σύστημα ψύξης του.

6.2.3. ΑΝΑΚΑΙΝΙΣΗ ΤΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Η επιλογή αυτή περιλαμβάνει την αντικατάσταση ενός περιορισμένου αριθμού εξαρτημάτων του μετασχηματιστή, όπως για παράδειγμα οι σύνδεσμοι, τα παξιμάδια, οι φλάντζες και οι μονωτήρες. Ακόμη μπορεί να περιλαμβάνει και την αλλαγή του λαδιού.

Οι φλάντζες χρησιμεύουν για τη στεγανοποίηση των διάφορων μερών του μετασχηματιστή και πρέπει να έχουν αρκετή αντοχή και μεγάλη διάρκεια ζωής. Πρέπει να είναι κατασκευασμένες από ελαστικό υλικό για να μπορούν να προσαρμόζονται στις ατέλειες της επιφάνειας που σφραγίζουν. Τα υλικά από τα οποία συνήθως κατασκευάζονται είναι: Cork/Corkprene, Nitrile/Buna N Rubber και Viton Rubber. Επίσης πρέπει να είναι ανθεκτικές στην πίεση, στις υψηλές θερμοκρασίες, στις διαστολές, στις συστολές και στις δονήσεις. Αν δεν ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια, τότε θα υπάρξει διαρροή. Επομένως ο έλεγχός τους και η αντικατάστασή τους είναι αναγκαία για τη σωστή λειτουργία ενός μετασχηματιστή.

Το εξωτερικό περίβλημα στους μονωτήρες πρέπει να είναι κατασκευασμένο από πορσελάνη. Η πορσελάνη έχει πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες. Επειδή δεν υπάρχει τέλεια μόνωση, πάντα θα υπάρχει μια πολύ μικρή διαρροή ρεύματος. Κατά τη διαδικασία της συντήρησης του μετασχηματιστή θα πρέπει να ελέγχουμε αν στο μονωτήρα υπάρχουν ρωγμές ή άλλες φθορές. Στην περίπτωση που έχει υποστεί κάποια ζημιά ο μονωτήρας, τότε το ρεύμα διαρροής είναι υπερβολικό και ίχνη άνθρακα μπορεί να εμφανιστούν στην επιφάνειά του, [6.4].

Τέλος, οι σύνδεσμοι σε έναν μετασχηματιστή πρέπει να έχουν τη σωστή ροπή και να είναι σε πολύ καλή κατάσταση έτσι ώστε να παρέχουν την αναγκαία μόνωση σε ένα μετασχηματιστή. Είναι σημαντικό να μην εισέρχεται στο εσωτερικό ενός μετασχηματιστή η υγρασία ή ο αέρας. Το οξυγόνο σε συνδυασμό με την υγρασία έχουν αρνητικές συνέπειες στο λάδι που περιέχεται εσωτερικά σε έναν μετασχηματιστή και κατά συνέπεια μειώνουν τη διάρκεια ζωής του.

Το λάδι πρέπει να είναι άριστης ποιότητας και πρέπει πάντα να πληρεί τις διεθνείς προδιαγραφές. Εκτός όμως από τα πλεονεκτήματα που έχει ως ψυκτικό μέσο, έχει το μειονέκτημα να προσβάλλεται εύκολα από τον αέρα και την υγρασία. Προκαλείται η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του όταν έρθει σε επαφή με τον αέρα, αφού οξειδώνεται με την πρόσληψη οξυγόνου. Η αντικατάσταση του λαδιού σε ένα μετασχηματιστή είναι επιβεβλημένη, όταν έχει χάσει την μονωτική του αντοχή.

6.3. ΝΕΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ

Η απόσυρση του παλιού μετασχηματιστή και η αντικατάστασή του από ένα νέο μετασχηματιστή έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Ο νέος μετασχηματιστής σε σύγκριση με τον παλιό έχει λιγότερες απώλειες. Επίσης η εγκατάσταση ενός νέου μετασχηματιστή καλύπτει τις ανάγκες σε φορτίο, ενώ ο ήδη υπάρχον μετασχηματιστής ίσως να αδυνατεί να αντεπεξέλθει στις απαιτήσεις αυτές. Ακόμη η ύπαρξη μιας νέας μονάδας συνοδεύεται πάντα από εγγύηση, ενώ η αντίστοιχη εγγύηση για την παλιά μονάδα έχει παρέλθει. Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε πως το καινούριο συνδέεται άμεσα με την αξιοπιστία και την ανανέωση του προσδόκιμου χρόνου ζωής του. Επομένως ο νέος μετασχηματιστής υπερτερεί σημαντικά σε όσα αναφέραμε σε σχέση τον ήδη εγκατεστημένο μετασχηματιστή. Ωστόσο η

επιλογή ανάμεσα στην πλήρη αντικατάσταση ή στην επισκευή ενός μετασχηματιστή είναι κάτι που προσδιορίζεται με τη βοήθεια της οικονομικής αξιολόγησης των εναλλακτικών επιλογών. Σημαντική παράμετρος για την λήψη της σωστής απόφασης είναι η συντήρηση του μετασχηματιστή και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τους ελέγχους και τις δοκιμές των διαφόρων μερών του.

6.4. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Η σωστή συντήρηση μπορεί να εξασφαλίσει ότι ο υπάρχον μετασχηματιστής λειτουργεί αποδοτικά και αξιόπιστα. Θα πρέπει να καταγράφουμε σε μια βάση δεδομένων τα συμπεράσματα και τις παρατηρήσεις που εξάγουμε κάθε φορά που πραγματοποιούμε τη συντήρηση. Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά μπορούμε να προσδιορίσουμε τη χρονική στιγμή που πρέπει να αντικαταστήσουμε ένα παλιό μετασχηματιστή από έναν καινούριο. Η συντήρηση περιλαμβάνει την επιθεώρηση και τον έλεγχο των διαφόρων μερών ενός μετασχηματιστή, όπως για παράδειγμα το λάδι, τη μόνωση της περιέλιξης κ.α. Επίσης με την πραγματοποίηση της συντήρησης έχουμε τη δυνατότητα με διάφορους ελέγχους και δοκιμές να εντοπίσουμε ενδεχόμενες βλάβες σε ένα μετασχηματιστή και να τις επισκευάσουμε. Τέλος η συντήρηση συνήθως πραγματοποιείται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα που είναι καθορισμένα από τον κατασκευαστή του μετασχηματιστή. Στον πίνακα 6.2 αναφέρουμε βασικές οδηγίες για τη συντήρηση των μετασχηματιστών ελαίου, που πρέπει να εφαρμόζονται για να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία τους, [6.5].

Πίνακας 6.2: Οδηγίες για τη συντήρηση μετασχηματιστών ελαίου.

Χρονικό Διάστημα	Είδος Συντήρησης
Σε 3 μήνες	<ol style="list-style-type: none"> 1. Έλεγχος στάθμης λαδιού 2. Έλεγχος θερμοκρασίας 3. Έλεγχος υγρασίας από τον αφυγραντήρα 4. Εξωτερικά μέρη και ειδικά οι μονωτήρες να καθαρίζονται 5. Καθαριότητα δαπέδου του χώρου 6. Έλεγχος για τυχόν εξωτερικές σκουριές
Ετησίως	<ol style="list-style-type: none"> 1. Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής λαδιού 2. Έλεγχος της προστασίας του μετασχηματιστή 3. Έλεγχος και σύσφιξη λυομένων συνδέσμων 4. Λίπανση κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν) 5. Έλεγχος πυροσβεστήρων
Σε 2 έτη	Αλλαγή ρουλεμάν κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν)
Σε 5 έτη	Πλήρης έλεγχος του λαδιού και σε περίπτωση μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων αλλαγή

6.4.1. ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΑΔΙΟΥ

Ένα καλό πρόγραμμα συντήρησης περιλαμβάνει το μεθοδικό έλεγχο της κατάστασης του λαδιού σε έναν μετασχηματιστή. Η κατάσταση του λαδιού επιδρά όχι μόνο στη μόνωση αλλά και στην ψύξη του. Η υγρασία και τα αέρια που δημιουργούνται κατά τη γήρανση του μονωτικού λαδιού, μειώνουν δραστικά τη διηλεκτρική αντοχή του. Για το λόγο αυτό προβλέπονται μέσα ελέγχου, που προειδοποιούν για τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του

μονωτικού λαδιού. Προβλέπεται επίσης προστασία του μετασχηματιστή όταν η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού είναι σημαντική. Πρόκειται για τον αφυγραντήρα και τη συσκευή Buchholz, που πρέπει να περιλαμβάνει ο μετασχηματιστής.

Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών ελαίων γίνεται με ειδικές συσκευές. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, καθώς και η διαδικασία δοκιμής, καθορίζονται ανάλογα με τον κανονισμό που θα γίνουν οι δοκιμές (VDE 0370/10 66, B.S.S 148-195, A.S.T.M D870-49, C.E.I. 10-1 VI 1953). Για αυτό, όταν δίνονται τα αποτελέσματα ενός ελέγχου, είναι απαραίτητο να γίνεται αναφορά στον κανονισμό δοκιμών. Περισσότερες πληροφορίες για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής θα πρέπει να αναζητηθούν στις προδιαγραφές που προαναφέρθηκαν, [6.5].

Μια μέθοδος διάγνωσης της ποιότητας του λαδιού, που εφαρμόζεται από τις εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται στα είδη των παραγόμενων αερίων (κυρίως υδρογόνο, μεθάνιο, αιθάνιο, αιθυλένιο και ακετυλένιο) και τις σχετικές ποσότητές τους, μέσω χρωματογράφου αερίων. Μια μικρή αποσύνθεση γίνεται φανερή σε κανονικές θερμοκρασίες λειτουργίας, όπου παράγονται κυρίως υδρογόνο και μεθάνιο. Η παραγωγή του αιθανίου και του αιθυλενίου θεωρείται ότι σχετίζεται με θέσεις αυξημένης θερμοκρασίας του μετασχηματιστή. Το ακετυλένιο γίνεται σημαντικό σε ποσότητα σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες, που οφείλονται κυρίως στην εκδήλωση ηλεκτρικού τόξου και ισχυρών μερικών εκκενώσεων, [6.5].

Οι αεριοχρωματικές μετρήσεις των εκλυόμενων και διαλυμένων αερίων εμφανίζουν περιορισμούς όσον αφορά στο χαρακτηρισμό της μονωτικής ικανότητας του ελαίου. Οι περιορισμοί στη χρήση αεριοχρωματογραφικών προσεγγίσεων (Dissolved Gas Analysis, DGA) προέρχονται από το γεγονός ότι η συνολική σύσταση των διαλυμένων αερίων συστατικών (Total Dissolved Gas Composition, TDGC) δεν μπορεί να καταγράφεται ανά πάσα στιγμή, αφού τα αέρια μπορούν είτε να εκλύονται είτε να απορροφώνται από το υγρό μονωτικό, με αποτέλεσμα οι μετρούμενες τιμές να είναι το αποτέλεσμα δύο ανταγωνιστικών αντιδράσεων των ανιχνευόμενων αερίων, [6.6]. Επίσης το λάδι θα πρέπει να υπόκειται και στον έλεγχο για τυχόν ύπαρξη στρώματος αζώτου. Στον πίνακα 6.3 εμφανίζουμε τα αποδεκτά όρια αερίων που πρέπει να περιέχονται μέσα στο λάδι, (πρότυπο ANSI/IEEE C57.104).

Πίνακας 6.3: Οδηγός επιτρεπτών ορίων αερίων στο λάδι κατά ANSI/IEEE C57.104.

Παραγόμενα Αέρια	Όριο (ppm)
Υδρογόνο (H ₂)	100
Μεθάνιο (CH ₄)	120
Ακετυλένιο (C ₂ H ₂)	035
Αιθυλένιο (C ₂ H ₄)	050
Αιθάνιο (C ₂ H ₆)	065
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	350

Με μια απλή χρήση ενός χρωματογράφου και σύγκριση του χρώματος του λαδιού με εκείνων από το χρωματογράφο, μπορούμε να συμπεράνουμε έστω και υποκειμενικά την κατάσταση του λαδιού. Το αρκετά σκούρο χρώμα στο λάδι αποτελεί ένδειξη κακής ποιότητάς του. Η κλίμακα που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ποιότητα του λαδιού σε αυτή την εξέταση είναι από 0,5 έως 5. Όσο πιο κοντά πλησιάζουμε στο 5 τόσο η ποιότητά του είναι κακή.

Μια εξίσου απλή μέθοδος και αρκετά αντικειμενική είναι να εφαρμόσουμε μια τάση σε ένα μικρό δείγμα λαδιού που έχουμε πάρει από το μετασχηματιστή. Εφαρμόζουμε την τάση μέχρι να συμβεί διάσπαση στο λάδι. Το λάδι δεν ικανοποιεί τις προδιαγραφές του αν η

διάσπασή του συμβεί σε τάση κάτω από 20.000 V, [6.1]. Τέλος, αν η συγκέντρωση του νερού στο λάδι ξεπερνά τα 30 ppm, το λάδι θα πρέπει να ακολουθήσει τη διαδικασία που ορίζουν οι οδηγίες από τον κατασκευαστή του.

6.4.2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΟΝΩΣΗΣ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ

Κατά τη διάρκεια μιας συντήρησης είναι πολλές φορές αναγκαίο να πραγματοποιούμε διάφορες μετρήσεις για να ελέγξουμε την κατάσταση της μόνωσης στα τυλίγματα ενός μετασχηματιστή. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που μας επιτρέπουν να εξάγουμε συμπεράσματα για την κατάσταση της μόνωσης.

Η μέτρηση Megger περιλαμβάνει την εφαρμογή τάσης συνεχούς ρεύματος στο τύλιγμα και στη συνέχεια με τη βοήθεια ενός μέγα-ωμόμετρου μετράμε την αντίσταση μεταξύ του άκρου του τυλίσματος και της γείωσης. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε διάφορες θερμοκρασίες και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με καθορισμένες τιμές για τυχόν αποκλίσεις.

Η μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού πραγματοποιείται με την εφαρμογή τάσης 120 V εναλλασσόμενου ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα και στη συνέχεια μέτρηση της τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα. Όπως γνωρίζουμε ο λόγος των σπειρών είναι ίσος με τον λόγο των τάσεων μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου. Μια απόκλιση μεγαλύτερη από 0,5% υποδηλώνει αστοχία.

Η μέτρηση του συντελεστή ισχύος της μόνωσης μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε το ωμικό ρεύμα και κατά συνέπεια την κατάσταση της μόνωσης. Η διαδικασία της μέτρησης περιλαμβάνει εφαρμογή τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος στο τύλιγμα. Μικρή τιμή του συντελεστή μόνωσης υποδηλώνει μικρή τιμή ωμικού ρεύματος και επομένως ικανοποιητική κατάσταση της μόνωσης. Ουσιαστικά η μέθοδος αυτή μας δείχνει τη διαφορά φάσης μεταξύ του ρεύματος και της τάσης. Αν η τιμή του συντελεστή προκύψει να είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα τότε πιθανόν υπάρχει πρόβλημα με τη μόνωση και είναι αναγκαίο να υπάρξει επιπλέον διερεύνηση.

6.5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Με τη βοήθεια της μεθόδου ανάλυσης ευαισθησίας μπορούμε να προσδιορίσουμε την κατάλληλη χρονική στιγμή για την αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή. Το κόστος των απωλειών του υπάρχοντος μετασχηματιστή και το κόστος αγοράς ενός νέου μετασχηματιστή, εισάγονται ως δεδομένα στη μέθοδο αυτή για να προσδιοριστεί η χρονική στιγμή που μας συμφέρει οικονομικά να γίνει η αντικατάσταση της παλιάς μονάδας από τη νέα. Οι μεταβλητές που εισάγονται στη μέθοδο αυτή είναι το κόστος των απωλειών κενού φορτίου και φορτίου (συντελεστές A και B), καθώς και το επιτόκιο προεξοφλήσεως. Το χρονικό σημείο στο οποίο η αντικατάσταση του παλιού μετασχηματιστή μας συμφέρει οικονομικά να γίνει, καλείται «νεκρό σημείο». Επομένως το ζητούμενο για μια ηλεκτρική εταιρεία είναι το πώς θα προσδιορίσει το «νεκρό σημείο».

Ο προσδιορισμός του «νεκρού σημείου» γίνεται υπολογίζοντας την παρούσα αξία του συνολικού κόστους κατοχής του υπάρχοντος μετασχηματιστή για διάφορες χρονικές στιγμές. Ουσιαστικά με αυτό τον τρόπο υπολογίζουμε την παρούσα αξία του κόστους των απωλειών που εμφανίζει να έχει σε διάφορες μελλοντικές χρονικές στιγμές ο ήδη υπάρχον μετασχηματιστής μέχρι το τέλος της διάρκειας ζωής του. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το κόστος κατοχής για ένα νέο μετασχηματιστή. Έπειτα σε ένα γράφημα τοποθετούμε τόσο την καμπύλη που προκύπτει από το συνολικό κόστος κατοχής του υπάρχοντος μετασχηματιστή για διάφορες χρονικές στιγμές όσο και την ευθεία που έχει προκύψει από τον υπολογισμό του

κόστους κατοχής ενός νέου μετασχηματιστή. Ο ένας άξονας του γραφήματος αναφέρεται στο κόστος και ο άλλος στο χρόνο. Το σημείο τομής της καμπύλης με την ευθεία αποτελεί και το «νεκρό σημείο». Το ίδιο σκεπτικό ακολουθείται και στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει αντί για την πλήρη αντικατάσταση του παλιού από το νέο, η ανακαίνιση του ήδη υπάρχοντος μετασχηματιστή, δηλαδή η επισκευή του.

Η δυσκολία που έχει η μέθοδος αυτή είναι στον προσδιορισμό των απωλειών του ήδη υπάρχοντος μετασχηματιστή. Οι απώλειες δεν είναι σταθερές σε όλη τη διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή και επομένως ο ακριβής προσδιορισμός τους για κάθε χρονική στιγμή αποτελεί ένα αστάθμητο παράγοντα. Συνήθως για τον προσδιορισμό των απωλειών αυτών οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν πληροφορίες από διάφορες έρευνες που έχουν γίνει.

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τόσο η διάρκεια ζωής ενός ήδη εγκατεστημένου μετασχηματιστή όσο και η τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου, στηρίζονται σε υποθέσεις που κάνουμε για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής. Οποιαδήποτε αλλαγή στις δυο αυτές παραμέτρους, επιφέρει αντίστοιχη αλλαγή και στη σύγκριση που κάνουμε. Αν για παράδειγμα, η υποθετική τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου προκύψει να είναι μικρότερη από την κανονική, τότε αυτό θα έχει επιδράσει και στον υπολογισμό του κόστους των απωλειών του μετασχηματιστή. Επομένως θα μας έχει οδηγήσει στο εσφαλμένο συμπέρασμα να διατηρήσουμε τον παλιό ή τον ανακαινισμένο μετασχηματιστή για περισσότερο χρονικό διάστημα από ότι θα έπρεπε.

6.6. Βιβλιογραφία

- [6.1] Barry W. Kennedy, Energy Efficient Transformers, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [6.2] Oak Ridge National Laboratory, “The Feasibility of Replacing or Upgrading Utility Distribution Transformers During Routine Maintenance”, April 1995. It can be downloaded from the URL address:
<http://www.ornl.gov/~webworks/cpr/v823/rpt/78562.pdf>
that has been accessed on February 2007.
- [6.3] W. I. Nutt, “Increased MVA Transformer Rebuilds with Thermally Upgraded insulation”, Doble Conference, 1989, 6D-1-11.
- [6.4] United States Department of the Interior Bureau of Reclamation Denver, Colorado, “Transformer Maintenance – Facilities Instructions, Standards and Techniques”, October 2000. It can be downloaded from the URL address:
http://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_30/fist3_30.pdf
that has been accessed on February 2007.
- [6.5] Δ. Δημητριάδου, “Στατιστική Ανάλυση των Μερικών Εκκενώσεων σε Βιομηχανικά Ηλεκτρομονωτικά Υλικά υπό Κρουστικές Τάσεις Χειρισμών και υπό Κεραυνικές Τάσεις”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2004.
- [6.6] Χ. Δ. Παρασκευάς, Ν. Στεφάνου, Π. Βασιλείου, Κ. Θ. Δέρβος, “Χαρακτηρισμός Γήρανσης Μονωτικών Ελαίων Μετασχηματιστών – Φυσικοχημικές / Αναλυτικές Μέθοδοι και Διηλεκτρική Φασματοσκοπία. Μέρος II – Πειραματική Προσέγγιση”, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, III, τεύχος 1-2, 2003, σελ. 31-44.

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

7.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΓΩΓΩΝ

Οι μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης αποτελούν την απάντηση των κατασκευαστών στο αίτημα των αγοραστών για μετασχηματιστές με μικρές απώλειες. Η μείωση των απωλειών είναι αποτέλεσμα τόσο της βελτίωσης των υλικών όσο και των μεθόδων κατασκευής των τυλιγμάτων και των πυρήνων στους μετασχηματιστές. Η χρήση αγωγών τύπου ταινίας στα τυλίγματα, αποτελεί την πιο πρόσφατη εξέλιξη στον τομέα του σχεδιασμού των αγωγών.

Η εξέλιξη στην κατασκευή και στο σχεδιασμό των αγωγών τα τελευταία 25 χρόνια, έχει επιφέρει σημαντικές μειώσεις στις απώλειες φορτίου. Αρχικά οι αγωγοί χαλκού αντικατέστησαν τους αγωγούς αλουμινίου, εξαιτίας της μικρότερης αντίστασης και ταυτόχρονα της υψηλότερης αντοχής σε ελατότητα που εμφανίζουν να έχουν. Στη συνέχεια η εξέλιξη του σχεδιασμού στους αγωγούς οδήγησε στην ανάπτυξη αγωγών τύπου ταινίας (ribbon conductors).

Οι αγωγοί τύπου ταινίας μειώνουν τις απώλειες φορτίου μέσω της μείωσης των απωλειών δινορευμάτων και επίσης επιτρέπουν την τοποθέτηση περισσότερου χαλκού σε μικρότερο χώρο. Η μείωση των απωλειών δινορευμάτων επιτυγχάνεται από τη μείωση του εμβαδού της διατομής, που προκύπτει λόγω της χρήσης των αγωγών τύπου ταινίας. Μελέτες έχουν δείξει ότι για κάθε ποσοστιαία μείωση στις διαστάσεις της διατομής του αγωγού, υπάρχει μια αντίστοιχη μείωση των απωλειών λόγω δινορευμάτων ίση περίπου με 1,5% και επίσης μια βελτίωση του συντελεστή χώρου κατά 25%, [7.1]. Κατασκευάζεται από επτά επίπεδα τμήματα αγωγών κολλημένα το ένα δίπλα στο άλλο, ενώ η αξονική ψύξη των αγωγών κρίνεται απαραίτητη για τη διατήρηση της θερμοκρασίας τους μέσα στα επιτρεπτά όρια.

Στον πίνακα 7.1 εμφανίζουμε τα αποτελέσματα από τη σύγκριση δυο μετασχηματιστών 25/33.3/41.6 MVA, [7.1]. Η διαφορά ανάμεσα στους δυο μετασχηματιστές έγκειται στην κατασκευή των τυλιγμάτων τους. Ο πρώτος μετασχηματιστής έχει τύλιγμα κατασκευασμένο από απλό αγωγό (συμβατικός), ενώ ο δεύτερος έχει τύλιγμα κατασκευασμένο από αγωγό τύπου ταινίας. Ο αγωγός τύπου ταινίας εγκαταστάθηκε στο τύλιγμα που φέρει την υψηλή τάση 141 kV, ενώ το δεύτερο τύλιγμα 13 kV φέρει συμβατικό αγωγό. Η σύγκριση αφορά τις απώλειες κενού φορτίου, τις απώλειες φορτίου και το βάρος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι ο εξελιγμένος μετασχηματιστής έχει λιγότερες απώλειες κενού φορτίου πάνω από 10%, λιγότερες απώλειες φορτίου κατά 17% και μικρότερο βάρος κατά 5,5% σε σχέση με το συμβατικό μετασχηματιστή. Το μικρότερο βάρος οφείλεται στο ότι ο αγωγός τύπου ταινίας καταλαμβάνει περίπου 30% λιγότερο χώρο από τον απλό αγωγό.

Πίνακας 7.1: Σύγκριση μεταξύ συμβατικού και εξελιγμένου μετασχηματιστή τύπου 25/33/41.6 MVA.

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

7.2. Η ΧΡΗΣΗ ΧΑΛΥΒΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ

Η συνεχής απαίτηση για μείωση των απωλειών κενού φορτίου, έχει οδηγήσει τους κατασκευαστές στην επιλογή σιδήρου υψηλής απόδοσης. Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό καλείται χάλυβας πυριτίου χαμηλών απωλειών. Τα τελευταία 20 με 30 χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές για τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου. Αρχικά χρησιμοποίησαν χάλυβα ψυχρής εξέλασης με μείωση της περιεκτικότητας σε πυρίτιο και αργότερα ανέπτυξαν νέες τεχνικές παρεμβάσεις στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου. Το αποτέλεσμα από την εξέλιξη αυτή επέφερε μείωση 50% στις απώλειες κενού φορτίου. Στον πίνακα 7.2 δείχνουμε ενδεικτικά τη διαφορά των απωλειών που εμφανίζουν οι μετασχηματιστές με πυρήνα από απλό χάλυβα σε σχέση με τους μετασχηματιστές που έχουν κατασκευαστεί από χάλυβα πυριτίου χαμηλών απωλειών, [7.1].

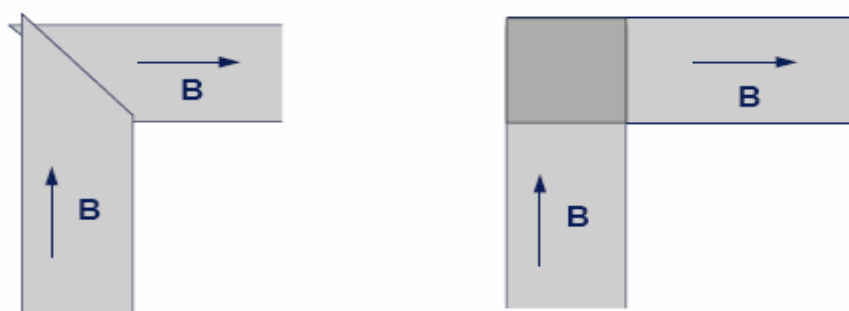
Πίνακας 7.2: Σύγκριση απωλειών κενού φορτίου ανάμεσα σε μετασχηματιστές με πυρήνα από τυπικό χάλυβα και με πυρήνα από χάλυβα χαμηλών απωλειών.

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

Οι κατασκευαστές έχουν επιτύχει τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου με τέσσερις τρόπους. Χρησιμοποιούν χάλυβα χαμηλών απωλειών με τις τεχνικές που περιγράψαμε προηγουμένως. Έχουν βελτιώσει τις τεχνικές κοπής και συναρμολόγησης των ελασμάτων στον πυρήνα του μετασχηματιστή. Τέλος με τη χρήση υπολογιστή και κατάλληλων προγραμμάτων έχουν επιτύχει μέσα από τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης να μειώσουν τις απώλειες κενού φορτίου.

Η κατασκευή των ελασμάτων είναι ένας από τους παράγοντες που συνδέονται άμεσα με τις απώλειες κενού φορτίου. Η μείωση του πάχους τους έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες δινορευμάτων. Οι διαστάσεις του πάχους τους κυμαίνονται από 7 έως 14 χιλιοστά και είναι ταξινομημένες στις ακόλουθες πέντε βαθμίδες: M2, M3, M4, M5 και M6. Σήμερα με τη βοήθεια των τεχνικών κοπής μέσω laser μπορούμε να επιτύχουμε την κατασκευή πολύ λεπτών και επίπεδων ελασμάτων από χάλυβα. Το πλεονέκτημα της κοπής μέσω laser είναι ο προσανατολισμός της δομής του χάλυβα με τις γραμμές ροής, ενώ το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι το υψηλό κόστος.

Η κοπή των ελασμάτων του πυρήνα μπορεί να γίνει είτε σε γωνία 90° είτε σε γωνία 45° , όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1. Η κοπή των ελασμάτων σε γωνία 90° έχει μικρότερο κόστος κατασκευής και αυξημένες απώλειες. Η επιλογή της κοπής των ελασμάτων σε γωνία 45° ευνοούν την ροή της μαγνητικής ροής, διότι το κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου είναι προσανατολισμένο με την μαγνητική ροή, [7.2].



Σχήμα 7.1: Κοπή ελασμάτων πυρήνα σε γωνία 45° και 90° .

7.3. Η ΧΡΗΣΗ ΑΜΟΡΦΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ

Ο άμορφος σίδηρος είναι ένα κράμα, που αποτελείται από 92% σίδηρο, 5% πυρίτιο και 3% βάριο. Η εφαρμογή του στους μετασχηματιστές έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου σε σχέση με τους μετασχηματιστές που χρησιμοποιούν πυριτιούχο χάλυβα χαμηλών απωλειών. Συνήθως οι μετασχηματιστές από άμορφο σίδηρο είναι κατά 25% με 30% πιο ακριβοί από τους συμβατικούς μετασχηματιστές, που είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα πυριτίου χαμηλών απωλειών.

Το υψηλό αυτό κόστος προσπαθούν οι ειδικοί να το μειώσουν είτε με την παραγωγή όλο και περισσότερων μετασχηματιστών με πυρήνα από άμορφο σίδηρο είτε αναπτύσσοντας νέες τεχνικές για την παραγωγή άμορφου σιδήρου. Συχνά ο αγοραστής έρχεται αντιμέτωπος με το δίλημμα της αγορά ενός νέου μετασχηματιστή από άμορφο σίδηρο ή ενός συμβατικού μετασχηματιστή, με κριτήριο το οικονομικό συμφέρον του. Η οικονομική αξιολόγηση μέσω του συνολικού κόστους επένδυσης ενός μετασχηματιστή είναι η προσέγγιση που αρκετές εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμόζουν για να εκτιμήσουν αν είναι δικαιολογημένη η υψηλή τιμή ενός μετασχηματιστή σε σχέση με τις απώλειές του ή αν είναι τελικά οικονομικά πιο αποδοτικό να αγοράσουν ένα συμβατικό μετασχηματιστή. Στον πίνακα 7.3 εμφανίζουμε ένα απλό αριθμητικό παράδειγμα, όπου συγκρίνουμε δυο μετασχηματιστές, εφαρμόζοντας την εξίσωση (5.21). Υπενθυμίζουμε ότι η εξίσωση (5.21) αναφέρεται στο ισοδύναμο κόστος επένδυσης και είναι η εξής:

$$TOC = BP + A * NLL + B * LL$$

όπου BP (€) είναι το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, NLL (W) είναι οι απώλειες κενού φορτίου, LL (W) είναι οι απώλειες φορτίου, A (€/W) είναι ο συντελεστής κενού φορτίου και B (€/W) είναι ο συντελεστής φορτίου.

Πίνακας 7.3: Οικονομική αξιολόγηση και σύγκριση μετασχηματιστών με πυρήνα από άμορφο σίδηρο και με πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα.

Μετασχηματιστής Διανομής 60 Hz, 500 kVA	Πυρήνας Άμορφου Σιδήρου	Πυρήνας Πυριτιούχου Χάλυβα
Απώλειες κενού φορτίου (W)	230	610
Συντελεστής κόστους απωλειών κενού φορτίου (€/W)	5,5	5,5
Απώλειες φορτίου (W)	3.192	3.153
Συντελεστής κόστους απωλειών φορτίου (€/W)	1,50	1,50
Απόδοση (%)	99,6	99,4
Κόστος αγοράς	11.500	10.000
Κόστος απωλειών κενού φορτίου (€)	1.265	3.335
Κόστος απωλειών φορτίου (€)	4.788	4.730
Συνολικός κόστος κατοχής (€)	17.553	18.065

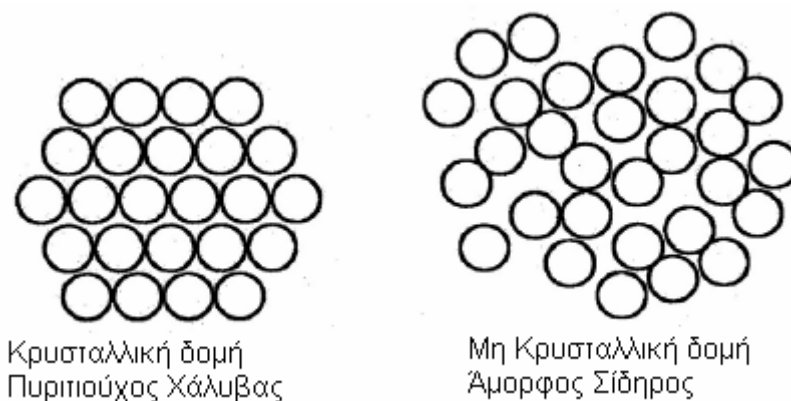
Ο πίνακας 7.3 μας δείχνει ότι παρόλο που ο μετασχηματιστής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο είναι πιο ακριβός κατά 15%, τελικά έχει μικρότερο συνολικό κόστος επένδυσης (κατοχής) κατά 3%, σε σχέση με ένα συμβατικό μετασχηματιστή με πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα. Επίσης εκτός από τις λιγότερες απώλειες εμφανίζεται να έχει και καλύτερη απόδοση, με αποτέλεσμα λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι από μελέτες που είχαν διεξαχθεί τη δεκαετία του 1990, προέβλεπαν σημαντικές μειώσεις των εκπομπών αερίων στο περιβάλλον από τη χρήση μετασχηματιστών με πυρήνα από άμορφο σίδηρο, [7.3]. Τόσο τα ενεργειακά οφέλη όσο οι μειώσεις των αερίων αναφέρονται στον πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4: Οφέλη από τη χρήση μετασχηματιστών από άμορφο σίδηρο.

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

Η δομή του άμορφου σιδήρου δεν είναι κρυσταλλική, όπως στην περίπτωση του πυριτιούχου χάλυβα σύμφωνα με το σχήμα 7.3. Τα άτομα του πυριτιούχου χάλυβα είναι διευθετημένα σε μια καθορισμένη δομή, ενώ τα άτομα του άμορφου σιδήρου εμφανίζουν μια τυχαία κατανομή μη-κρυσταλλική. Λόγω αυτής της σύνθεσής τους παρουσιάζουν χαμηλές απώλειες υστέρησης και μοναδικές μαγνητικές ιδιότητες.



Σχήμα 7.3: Η δομή του πυριτιούχου χάλυβα και του άμορφου σιδήρου.

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

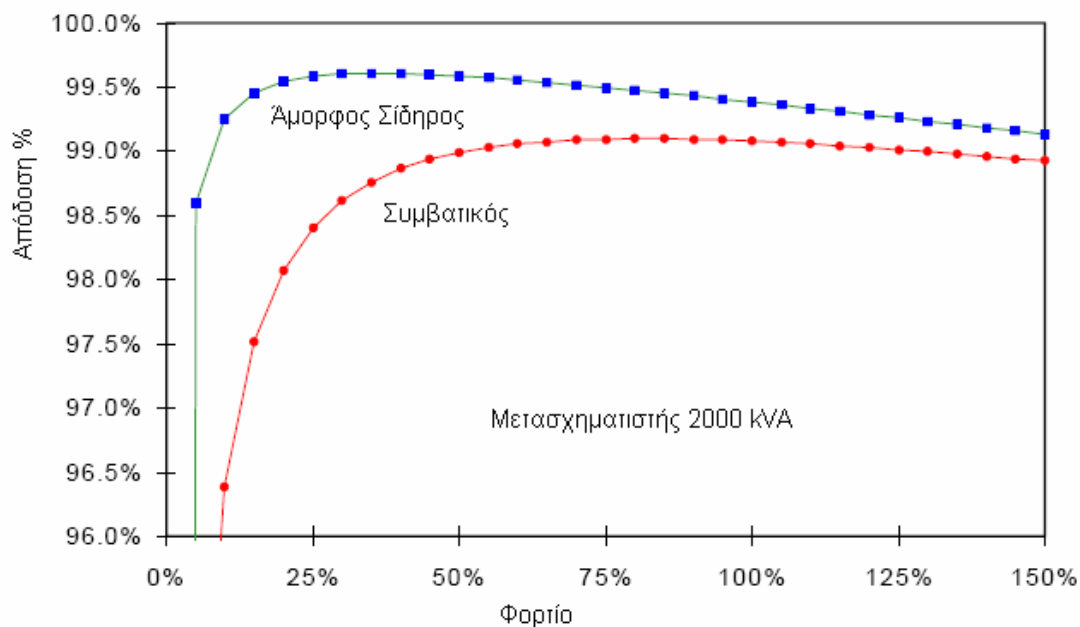
Επίσης ο μετασχηματιστής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο μπορεί να κατασκευαστεί από πιο λεπτά ελάσματα από τον αντίστοιχο μετασχηματιστή που κατασκευάζεται από συμβατικό χάλυβα πυριτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχει λιγότερες απώλειες δινορευμάτων. Συνήθως το πάχος του ελάσματος από άμορφο σίδηρο είναι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

Ο συνδυασμός των λιγότερων απωλειών δινορευμάτων και υστέρησης στον πυρήνα ενός μετασχηματιστή από τη χρήση άμορφου σιδήρου, επιφέρει μια συνολική μείωση των απωλειών στον πυρήνα πάνω από το 70% με 80%, σε σχέση με τους μετασχηματιστές από πυριτιούχο χάλυβα. Επίσης αν αναλογιστούμε ότι οι απώλειες αυτές αναφέρονται στις απώλειες κενού φορτίου που συμβαίνουν 24 ώρες την ημέρα και 365 ημέρες το χρόνο, τότε η εξοικονόμησή τους είναι συγκρίσιμη και εξισορροπούν την αύξηση του κόστους αγοράς που έχουν οι μετασχηματιστές από άμορφο σίδηρο. Για παράδειγμα, ένας μετασχηματιστής με ισχύ 25 kVA και με πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα έχει απώλειες πυρήνα 57 W, ενώ ο αντίστοιχος μετασχηματιστής με πυρήνα από άμορφο σίδηρο έχει απώλειες 15,5 W. Στον πίνακα 7.5 δείχνουμε τις απώλειες κενού φορτίου ανάμεσα στον άμορφο σίδηρο και στο χάλυβα πυριτίου χαμηλών απωλειών.

Εάν η χρήση άμορφου σιδήρου συνδυαστεί και με το βέλτιστο σχεδιασμό των πηνίων, τότε πρακτικά επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση των απωλειών στους μετασχηματιστές και συνεπώς αυτοί οι μετασχηματιστές είναι ενεργειακά πιο αποδοτικοί από τους συμβατικούς, [7.4]. Στο σχήμα 7.4 δείχνουμε τη διαφορά σε απόδοση που έχουν οι δυο μετασχηματιστές σε ποικίλες τιμές φορτίου.

Πίνακας 7.5: Σύγκριση απωλειών κενού φορτίου ανάμεσα σε μετασχηματιστές με πυρήνα από χάλυβα χαμηλών απωλειών και με πυρήνα από άμορφο σίδηρο.

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



Σχήμα 7.4: Σύγκριση απόδοσης μεταξύ μετασχηματιστών που οι πυρήνες τους είναι κατασκευασμένοι από πυριτιούχο χάλυβα και από άμορφο σίδηρο.

Το κύριο μειονέκτημα του άμορφου σιδήρου είναι ο μικρός συντελεστής χώρου που έχει, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερο υλικό για την κατασκευή του πυρήνα ενός μετασχηματιστή από ότι θα χρειαζόταν από πυριτιούχο χάλυβα. Αυτό συνεπάγεται με την σειρά του βαρύτερο και μεγαλύτερο μετασχηματιστή σε σχέση με έναν αντίστοιχο συμβατικό μετασχηματιστή από πυρήνα χάλυβα χαμηλών απωλειών. Η εξέλιξη αυτή αντιτίθεται με την προσδοκία των αγοραστών για ελαφρύτερους και μικρότερους μετασχηματιστές, διότι θα υπάρχει δυσκολία εγκατάστασής τους κατά της διαδικασία αντικατάστασης ενός παλιού από έναν νέο μετασχηματιστή. Στον πίνακα 7.6 εμφανίζουμε τη διαφορά βάρους ανάμεσα σε πυρήνα από άμορφο σίδηρο και σε πυρήνα από πυριτιούχο χάλυβα χαμηλών απωλειών.

Πίνακας 7.6: Σύγκριση βάρους πυρήνων μετασχηματιστών από άμορφο σίδηρο με πυρήνες από χάλυβα χαμηλών απωλειών.

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

Τέλος αναφέρουμε ότι υπάρχουν σημαντικά εμπόδια τόσο στην Ευρώπη, ειδικά, όσο και σε χώρες παγκοσμίως, όπου έχουν μια ήδη εδραιωμένη ή αναδυόμενη ικανότητα για παραγωγή συμβατικών μετασχηματιστών. Η κατασκευή του πυρήνα άμορφου σιδήρου θα απαιτούσε μια σημαντική επένδυση και μια αναδιάρθρωση της παρούσας βιομηχανίας. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η κατασκευή και η επισκευή μετασχηματιστών διανομής γίνεται τοπικά σχεδόν σε όλα τα Ευρωπαϊκά κράτη και αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό τμήμα του ηλεκτρολογικού τομέα της κάθε χώρας, καθώς και της τοπικής απασχόλησης, [7.5].

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

7.4. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΜΕ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Κ

Αρμονικές καλούνται τα ημιτονοειδή ρεύματα ή τάσεις με συχνότητες πολλαπλάσιες της θεμελιώδους συχνότητας του δικτύου. Οι διαταραγμένες, λόγω αρμονικών, κυματομορφές αναλύονται σε άθροισμα της θεμελιώδους και των αρμονικών που δημιουργούνται από τις μη γραμμικές χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος των συσκευών που συνδέονται στο δίκτυο. Μέσω της τάσης και σε συνάρτηση με την ισχύ βραχυκυκλώσεως του δικτύου, οι αρμονικές που παράγονται σε ένα σημείο μεταδίδονται και μπορεί να

δημιουργήσουν προβλήματα και σε άλλα φορτία, [7.6]. Σχεδόν όλες οι βιομηχανίες έχουν μη γραμμικές απώλειες. Τα τυπικά μη γραμμικά φορτία περιλαμβάνουν:

- Ηλεκτρονικούς υπολογιστές
- Συστήματα UPS, για την αδιάλειπτη παροχή ισχύος
- Κινητήρες πολύ υψηλών ταχυτήτων
- Αντιστροφείς.

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

Οι αρμονικές που είναι πολλαπλάσιες της 3^{ης} αρμονικής (3^η, 9^η, 15^η κλπ) είναι η σημαντικότερη αιτία θέρμανσης, αφού τα φασικά ρεύματα προστίθενται στον ουδέτερο αγωγό. Εκτός από τις πολλαπλάσιες της 3^{ης} αρμονικής, ένας μετασχηματιστής που τροφοδοτεί ένα μετατροπέα ή ένα αντιστροφέα μπορεί να έχει πρόβλημα και με τις άλλες αρμονικές, [7.5]. Το μέγεθος του ρεύματος που παράγουν οι αρμονικές μπορεί να οδηγήσει και στο διπλασιασμό του φασικού ρεύματος. Επομένως έχουμε άμεση επίδραση των αρμονικών στην αύξηση των απωλειών και της θερμότητας σε ένα μετασχηματιστή.

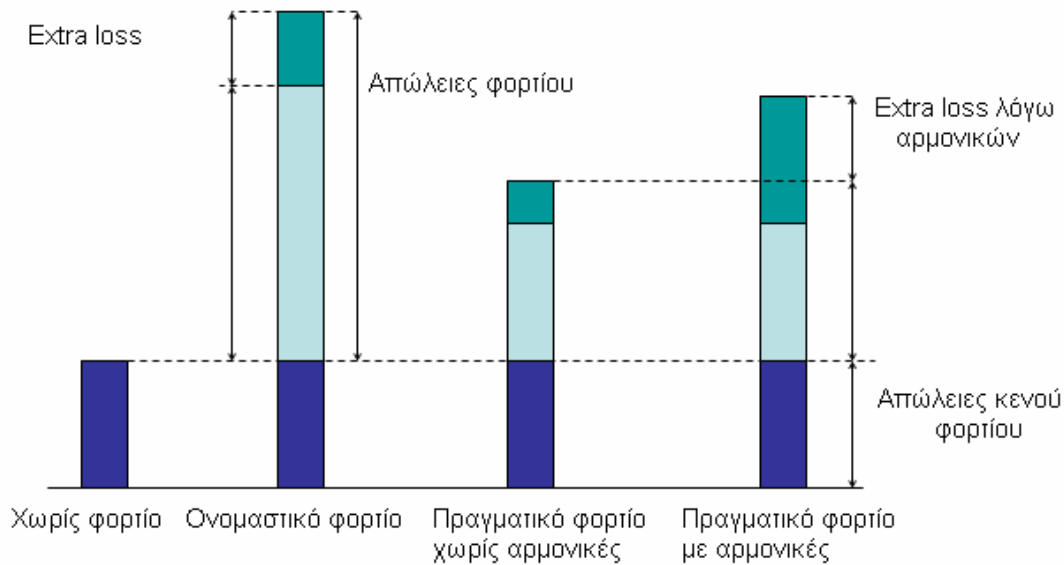
Η αύξηση των απωλειών φορτίου οφείλεται στην αύξηση των απωλειών δινορευμάτων, των απωλειών I^2R και των σποραδικών απωλειών. Επίσης οι αρμονικές ευθύνονται και για την αύξηση των απωλειών κενού φορτίου μέσω της αύξησης των απωλειών υστέρησης. Η νέα μέση τιμή του ρεύματος υπολογίζεται από την εξίσωση (7.1):

$$I = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} (I_h)^2 \right]^{1/2} \quad (7.1)$$

όπου I είναι η νέα τιμή ρεύματος, h είναι η τιμή της αρμονικής και I_h είναι η τιμή του ρεύματος για δεδομένη τιμή αρμονικής h .

Αύξηση της τιμής του ρεύματος συνεπάγεται και αύξηση των απωλειών δινορευμάτων, των απωλειών I^2R και των σποραδικών απωλειών.

Τα υψηλότερης συχνότητας στοιχεία του ρεύματος του φορτίου (αρμονικές), προκαλούν επιπρόσθετες απώλειες επειδή οι αρμονικές δεν διαπερνούν πλήρως τον αγωγό. Ταξιδεύουν στην περιφέρεια του αγωγού και αυτό ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο. Όταν παρουσιάζεται το φαινόμενο αυτό, η αποτελεσματική διατομή του αγωγού μειώνεται, ενώ παράλληλα αυξάνονται η αντίσταση και οι απώλειες I^2R , οι οποίες αυξάνουν τη θερμοκρασία του αγωγού και όλων των στοιχείων που συνδέονται με αυτόν. Τέλος οι απώλειες κενού φορτίου επηρεάζονται από τις αρμονικές μόνο σε επίπεδο συνεισφοράς σε τάση και όχι σε ρεύμα. Αυτό οφείλεται στο ότι η πυκνότητα ροής είναι ανάλογη της συχνότητας της τάσης που εφαρμόζεται. Επομένως αύξηση της συχνότητας της τάσης προκαλεί αντίστοιχη αύξηση και στην πυκνότητα ροής, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίσταση μαγνήτισης του υλικού και οι απώλειες υστέρησης του. Οι απώλειες λόγω των αρμονικών δείχνονται στο σχήμα 7.5 και ονομάζονται επιπρόσθετες απώλειες.



Σχήμα 7.5: Επιπρόσθετες απώλειες (extra loss) εξαιτίας των αρμονικών.

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

Οι μετασχηματιστές με συντελεστή K είναι μια πρόσφατη εξέλιξη και η κατασκευή τους αποτελεί μια λύση στο πρόβλημα των αρμονικών. Οι μετασχηματιστές αυτοί δεν είναι αναγκαίο να είναι πιο αποδοτικοί από τους μετασχηματιστές χωρίς συντελεστή K . Ο συντελεστής αυτός είναι μια σταθερά και λαμβάνει υπόψη την επίδραση των αρμονικών. Οι μετασχηματιστές με συντελεστή K το αναγράφουν στην πινακίδα τους και ο υπολογισμός του γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (7.2):

$$K = \frac{\sum (I_h * h)^2}{\sum (h)^2} \quad (7.2)$$

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

Ο μετασχηματιστής με συντελεστή K είναι ειδικά σχεδιασμένος με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να αντεπεξέρχεται στην αύξηση της θερμοκρασίας εξαιτίας των αρμονικών. Επομένως ένας μετασχηματιστής μπορεί να έχει ιδιαίτερη μόνωση στους αγωγούς του, για να αντιμετωπίζει το επιδερμικό φαινόμενο ή να διαθέτει μεγαλύτερο ουδέτερο αγωγό στο δευτερεύον τύλιγμα για να αντεπεξέρχεται στη αύξηση του ρεύματος λόγω της 3^{ης} αρμονικής. Μπορεί επίσης να διαθέτει αρκετά καλή μόνωση στα ελάσματα του πυρήνα του για να ελαττώσει τις απώλειες λόγω δινορευμάτων. Γενικά πολλές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν για την αντιμετώπιση των απωλειών αυτών και έχουν αναφερθεί αναλυτικά για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά στα προηγούμενα κεφάλαια. Τέλος μια τιμή του συντελεστή K κοντά στο 13 ή μικρότερη κρίνεται αρκετά ικανοποιητική.

7.5. Βιβλιογραφία

- [7.1] Barry W. Kennedy, Energy Efficient Transformers, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [7.2] Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, “Εξοικονόμηση Ενέργειας στους Μετασχηματιστές Διανομής”. It can be downloaded from the URL address:
<http://www.cres.gr/motorchallenge/Praktika/Inverters-Energy%20savings%20in%20DTs.pdf>
that has been accessed on December 2006.
- [7.3] Metglas Solutions, “Amorphous Metals in Electric – Power Distributions Applications”, 2002. It can be downloaded from the URL address:
http://www.metglas.com/downloads/lit/amor_elec_pow_dist_appl.pdf
that has been accessed on March 2007.
- [7.4] R. Hasegawa Metglas Inc, “Energy Efficiency of Amorphous Metal Based Transformers”, October 2004. It can be downloaded from the URL address:
<http://www.leonardo-energy.org/transformers/Files/PL-7.pdf>
that has been accessed on April 2007.
- [7.5] Κ. Π. Μουτάφης, “Εξοικονόμηση Ενέργειας σε Μετασχηματιστές Διανομής”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 2007.
- [7.6] Α. Θ. Κοροντζή, “Μετρήσεις Ποιότητας Ισχύος στο Υβριδικό Σύστημα του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2007.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

8.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι μέθοδοι αξιολόγησης των μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στο κόστος των απωλειών σε σχέση με το αρχικό κόστος αγοράς τους. Οι συγκρίσεις που περιλαμβάνονται στην εργασία έγιναν σε σχέση με το συνολικό κόστος κατοχής.

Αρχικά, έγινε μια γενική αναφορά στους μετασχηματιστές και στις αρχές λειτουργίας τους. Αναφέραμε τα κατασκευαστικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένας μετασχηματιστής καθώς και τα εξαρτήματά του.

Στη συνέχεια επικεντρωθήκαμε στις απώλειες και στον προσδιορισμό αυτών. Οι μετασχηματιστές αν και είναι ηλεκτρικές μηχανές με ιδιαίτερα υψηλή απόδοση, ωστόσο εμφανίζουν απώλειες, οι οποίες είναι σημαντικές, αν αναλογιστούμε ότι σε ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οι μετασχηματιστές διανομής είναι μερικές δεκάδες χιλιάδες. Η απόδοση ενός μετασχηματιστή και οι απώλειές του συνδέονται άμεσα. Ο κοινός στόχος ανάμεσα στους κατασκευαστές μετασχηματιστών και στους χρήστες αυτών είναι η προμήθεια όσο το δυνατόν πιο ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών σε χαμηλή τιμή αγοράς. Η ισορροπία αυτή είναι δύσκολη να επιτευχθεί, διότι η μείωση των απωλειών και κατά συνέπεια η αύξηση της απόδοσής τους συνεπάγεται τη χρήση πιο ακριβών υλικών και τεχνικών με συνέπεια να αυξάνει το κόστος και άρα η τιμή πώλησης.

Από τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε πόσο σημαντικό ρόλο παίζουν οι απώλειες στην οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών. Η ακριβής εκτίμησή τους είναι σημαντική για την επιλογή του κατάλληλου μετασχηματιστή. Οι διαδικασίες που πρέπει να αναπτύσσονται για την αποτίμησή τους πρέπει να είναι εύκολες στην εφαρμογή τους από όλους τους αγοραστές. Η εξοικονόμηση ενέργειας και συνεπώς η εξοικονόμηση χρημάτων είναι το ζητούμενο. Οι μεγαλύτεροι χρήστες μετασχηματιστών, όπως για παράδειγμα είναι οι ηλεκτρικές εταιρίες που παράγουν ή διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια, θα πρέπει να αποτιμούν τις απώλειες αυτές με λεπτομέρεια.

Οι απώλειες θα πρέπει να υπολογίζονται ως αξία. Διαφορετικά αποτιμά ένας απλός χρήστης τις απώλειες από έναν μετασχηματιστή που διαθέτει και που μάλιστα έχει διάρκεια ζωής μεγαλύτερη από 25 χρόνια και διαφορετικά αποτιμά την αξία των απωλειών μια εταιρία ηλεκτρικής ενέργειας που διαθέτει πλήθος μετασχηματιστών. Ο πληθωρισμός, το κόστος βλάβης, το κόστος αντικατάστασης, το κόστος ανά μονάδα χαμένης ενέργειας ή το κόστος συντήρησης θα πρέπει να συνυπολογίζονται στη διάρκεια του χρόνου για να μπορεί κάποιος να πάρει τη σωστή απόφαση για την επιλογή του κατάλληλου για αυτόν μετασχηματιστή.

Η αξία των απωλειών στις μέρες μας δεν είναι μόνο νομισματική. Τα περιβαλλοντικά οφέλη θα πρέπει συνυπολογίζονται από τη χρήση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Τα οφέλη από τη μείωση των εκπομπών CO₂ είναι σημαντικά. Ακόμα και για έναν απλό χρήστη μπορεί να μην αποτελεί ένα άμεσο κόστος για αυτόν, ωστόσο αποτελεί ένα κόστος για την ίδια την κοινωνία. Επίσης περιβαλλοντικό όφελος εξακολουθεί να υπάρχει και για τα επόμενα έτη από την επιλογή αποδοτικών ενεργειακά μετασχηματιστών.

Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν βασίστηκαν στο συνολικό κόστος κατοχής (TOC). Έτσι, η σύγκριση των εναλλακτικών προσφορών μετασχηματιστών επιτυγχάνεται σε ισοδύναμη βάση. Η εξίσωση περιλαμβάνει το κόστος των απωλειών σε όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, το κόστος αγοράς τους καθώς και τη χρονική αξία του χρήματος σε περιπτώσεις που η αγορά ενός μετασχηματιστή αποτελεί μια ιδιαίτερη επένδυση. Επίσης, η εκτίμηση του κόστους της ενέργειας στο μέλλον καθώς και η πρόβλεψη για κάλυψη της αύξησης του φορτίου, είναι δυο παράγοντες που πρέπει να προσδιορίζονται και να εκτιμώνται πριν την αγορά ενός μετασχηματιστή.

Η αξιοπιστία ενός μετασχηματιστή αποτελεί μέρος της οικονομικής του αξιολόγησης. Η σύγκρισή τους θα πρέπει να επιδιώκεται και σε αυτή την παράμετρο. Το κόστος αντικατάστασης, συντήρησης, βλάβης ή ανακαίνισης ενός μετασχηματιστή πολλές φορές θα πρέπει να υπολογίζεται από την αρχή της αγοράς του.

Σήμερα με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουμε τη δυνατότητα να έχουμε μετασχηματιστές με υψηλή ενεργειακή απόδοση. Η υψηλή τιμή αγοράς τους θα πρέπει να συγκρίνεται με το οικονομικό όφελός τους από τη χρήση τους στη διάρκεια του χρόνου και επίσης να αντισταθμίζεται με το περιβαλλοντικό όφελος.

Γενικά η τάση που επικρατεί για το μέλλον είναι η κατασκευή όλο και περισσότερο αξιόπιστων μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, χωρίς ταυτόχρονα το κόστος κατασκευής τους να αυξάνεται σημαντικά. Επομένως η ακριβής εκτίμηση των απωλειών και η προσπάθεια ελαχιστοποίησής τους μέσω της εξέλιξης της τεχνολογίας αποτελεί τον κύριο παράγοντα για την επίτευξη αυτού του στόχου.