



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ  
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ  
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την  
απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

υπό

**Αναστασία Ι. Τσιβγούλη**

**Χανιά, 2006**

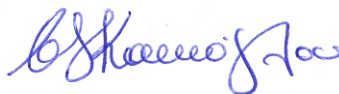
© Copyright υπό Αναστασία Ι. Τσιβγούλη, 2006

Η διατριβή της Αναστασίας Τσιβγούλη εγκρίνεται από τους Παύλο Γεωργιλάκη (επιβλέποντα), Βασίλειο Κουϊκόγλου και Ιωάννη Νικολό, μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

1. Παύλος Γεωργιλάκης (επιβλέπων) \*



2) Βασίλειος Κουϊκόγλου



3) Ιωάννης Νικολός



\*Συνεπιβλέπουσα της διατριβής της Αναστασίας Τσιβγούλη είναι η Μαρίνα Τσίλη.

Η Αναστασία Τσιβγούλη γεννήθηκε στην Αθήνα το 1981. Αποφοίτησε από το 1<sup>ο</sup> Γενικό Λύκειο Αιγάλεω το 1999. Απέκτησε το δίπλωμα Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης από το Πολυτεχνείο Κρήτης το 2004. Είναι τελειόφοιτος του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών στον τομέα Συστημάτων Παραγωγής του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Έχει διατελέσει πρακτική άσκηση στη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού στον ΑΗΣ Χανίων. Από το 2004 έως τώρα συνεργάζεται με το εργοστάσιο κατασκευής μετασχηματιστών διανομής της ΣΝΕΝΤΕΡ ΕΛΕΚΤΡΙΚ Α.Ε. και με το Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου στα πλαίσια ερευνητικής εργασίας, σχετικής με τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης μετασχηματιστών ισχύος, κατά την εκπόνηση της διπλωματικής και της μεταπτυχιακής διατριβής της. Είναι μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας από το 2005.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνησή της έγινε υπό την επίβλεψη του Επικουρου Καθηγητή κ. Γεωργιλάκη Παύλου και της Διδάκτορος του ΕΜΠ κας Τσίλη Μαρίνας. Με την ευκαιρία της παρουσίασης της εργασίας μου αυτής, θεωρώ χρέος μου να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν αποφασιστικά στην όλη μου προσπάθεια.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεωργιλάκη Παύλο, ο οποίος με την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που παρείχε, καλλιέργησε άρτιο κλίμα συνεργασίας σε όλη την πορεία της εργασίας, υπογράφοντας την επιτυχή της ολοκλήρωση.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως, τη Διδάκτορα του ΕΜΠ κα Τσίλη Μαρίνα, η συμβολή της οποίας σε αυτό το εγχείρημα ήταν εξαιρετικά μεγάλη και χωρίς την άψογη συνεργασία της και το ενδιαφέρον που έδειξε δε θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κουϊκόγλου Βασίλειο και το Λέκτορα κ. Νικολό Ιωάννη, οι οποίοι με τίμησαν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν ως μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Επιπροσθέτως, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Κλαδά Αντώνιο, καθώς και την εταιρία Σνεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ και ιδιαίτερα τους κ. Παπαρήγα Δημήτριο και κ. Σουφλάρη Αθανάσιο για την παροχή των κατασκευαστικών στοιχείων των μετασχηματιστών και τις διευκρινήσεις τους σε θέματα τεχνικής φύσεως.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου που είναι πάντα δίπλα μου και στους φίλους που έχουν νικήσει το χρόνο και τις αποστάσεις, καθώς και σε όλους εκείνους που μου δείχνουν το δρόμο να γίνομαι καλύτερος άνθρωπος.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάζει τη μελέτη μετασχηματιστών ισχύος με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να εκτιμηθούν οι απώλειες σιδήρου (κενού φορτίου), εστιάζοντας στη λειτουργία των μετασχηματιστών σε συνθήκες κενού φορτίου (δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος). Στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου το οποίο είναι σε θέση να προβλέψει συστηματικά και με μικρή απόκλιση τις απώλειες κενού φορτίου των μετασχηματιστών ισχύος. Η εργασία πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με την εταιρία κατασκευής Μετασχηματιστών ισχύος Σνεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ, η οποία είναι θυγατρική του ομίλου Schneider Electric Industries SA.

Περιλαμβάνει την ανάπτυξη της δυσδιάστατης μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αποτελεί ένα αξιόπιστο και αποδοτικό εργαλείο για τη μελέτη του πεδίου ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών, διαφορετικής ονομαστικής ισχύος και τα αποτελέσματά της συγκρίνονται με τις μετρημένες τιμές απωλειών που δίνονται από τον κατασκευαστή.

Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μια διαδικασία βελτιστοποίησης της σχεδίασης των μετασχηματιστών, παρέχοντας στους μηχανικούς της παραγωγικής μονάδας τα εργαλεία για τη σωστή πρόβλεψη της λειτουργίας τους κατά τη φάση της σχεδίασης και τη δυνατότητα να εξετάσουν τη βέλτιστη γεωμετρική διαμόρφωση των πυρήνων η οποία οδηγεί σε χαμηλές απώλειες και υψηλή απόδοση και αξιοπιστία.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μετασχηματιστές Ισχύος, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, Απώλειες κενού φορτίου



# **ABSTRACT**

The present MSc thesis concerns the study of power transformers with the use of finite element method for the evaluation of the transformer no load loss. Its main objective relies on the development of an arithmetic model which can accurately and systematically predict the no load losses of power transformers. The thesis was implemented in collaboration with the transformer manufacturing industry Schneider Electric AE, which is part of Schneider Electric Industries SA group.

The thesis includes the development of a two-dimensional finite element method, which is a reliable and efficient tool for the study of electromagnetic fields. The method is applied in various cases of transformers, of different rated power and the results are being compared with the loss value measured by the manufacturer during the open-circuit test.

This model can constitute the basis for an optimization of transformer design process and therefore can be used by the transformer designer to accurately predict the performance characteristics of each design in order to examine the optimum geometrical configuration of the cores that minimizes the no load loss and increases the performance and reliability.

# **KEYWORDS**

Power Transformer, Finite Element Method, No load loss.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Ανάγκες που οδήγησαν στην πραγματοποίηση της έρευνας	1
1.2	Μεθοδολογία πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου	3
1.3	Περιεχόμενα της εργασίας	3

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Αναγκαιότητα και σημασία εξοικονόμησης ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας	5
2.2	Μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας	6
2.2.1	Κοινοτική πολιτική εξοικονόμησης ενέργειας	6
2.2.2	Εθνική πολιτική εξοικονόμησης ενέργειας	7
2.2.2.1	Εξοικονόμηση ενέργειας σε βιομηχανικό περιβάλλον	7
2.2.2.2	Εξοικονόμηση ενέργειας στο δημόσιο τομέα	9
2.2.3	Ηλεκτρικές εταιρίες και εξοικονόμησης ενέργειας	11
2.3	Ενεργειακή απόδοση μετασχηματιστών και εξοικονόμηση ενέργειας	13
2.3.1	Απόδοση μετασχηματιστών	13
2.3.2	Κόστος απωλειών	15
2.3.3	Ειδικοί τύποι μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης	15
2.4	Προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας με βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των μετασχηματιστών	16
2.5	Βιβλιογραφία	17

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

3.1	Απώλειες μετασχηματιστών	19
3.2	Μαγνητικές απώλειες πυρήνα – απώλειες κενού φορτίου	22
3.2.1	Απώλειες υστέρησης	23
3.2.2	Απώλειες δινορρευσμάτων	26
3.2.3	Συνολικές απώλειες πυρήνα	29
3.3	Προδιαγραφές απωλειών κενού φορτίου	31
3.4	Σπουδαιότητα της πρόβλεψης και της μείωσης των απωλειών κενού φορτίου	31
3.5	Τεχνολογίες κατασκευής πυρήνα	33
3.6	Φάση σχεδίασης απωλειών κενού φορτίου	34
3.7	Φάση παραγωγής	36
3.8	Φάση ποιοτικού ελέγχου	37
3.8.1	Μέτρηση μονοφασικών απωλειών πυρήνων	37
3.8.2	Μέτρηση απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	37

3.9	Δυσκολίες στην πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου	37
3.10	Βιβλιογραφία	39

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

4.1	Μέθοδοι πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	41
4.1.1	Κυκλωματικά μοντέλα πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	43
4.1.2	Μοντέλα αριθμητικών τεχνικών ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου για την πρόβλεψη απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	43
4.1.3	Στοχαστικές μέθοδοι πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	43
4.2	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	44
4.3	Μοντελοποίηση λειτουργίας κενού φορτίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	45
4.3.1	Επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	46
4.3.2	Μοντελοποίηση υλικών κατά την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	46
4.4	Υπολογισμός απωλειών κενού φορτίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	48
4.5	Ιδιότητες υλικού πυρήνα μετασχηματιστών και τρόπος προσδιορισμού τους	49
4.5.1	Επίδραση μηχανικών καταπονήσεων και θερμικών κατεργασιών στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού του πυρήνα	51
4.5.2	Εξαγωγή χαρακτηριστικών καμπυλών υλικού πυρήνα με μετρήσεις	52
4.6	Βιβλιογραφία	53

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

5.1	Δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την αναπαράσταση της δοκιμής κενού φορτίου μετασχηματιστή	55
5.1.1	Γεωμετρία δισδιάστατου μοντέλου μετασχηματιστή	56
5.1.2	Οριακές συνθήκες	58
5.1.3	Υπολογισμός απωλειών κενού φορτίου με προσομοίωση της δοκιμής κενού φορτίου	58
5.2	Προσδιορισμός απωλειών κενού φορτίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών	58
5.2.1	Μετασχηματιστής 400 kVA	58
5.3.2	Μετασχηματιστής 1000 kVA	63
5.3.3	Μετασχηματιστής 630 kVA	65
5.3	Συμπεράσματα	67

5.4	Βιβλιογραφία	69
-----	--------------	----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

6.1	Συμπεράσματα της εργασίας	71
6.2	Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση	72

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ**

75

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ**

77



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιείται ανάλυση του μαγνητικού πεδίου μετασχηματιστών ισχύος με τη χρήση αριθμητικών τεχνικών ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη λειτουργία των μετασχηματιστών σε συνθήκες κενού φορτίου (δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος), μέσω της οποίας μπορούν να μελετηθούν οι απώλειες σιδήρου (κενού φορτίου).

### 1.1 ΑΝΑΓΚΕΣ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

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

- Αυξάνει την αξιοπιστία των μετασχηματιστών,
- Εξασφαλίζει την υψηλή απόδοση των μετασχηματιστών,
- Μειώνει το κόστος των υλικών, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικρότερο περιθώριο ασφαλείας,
- Βοηθά τον κατασκευαστή να αποφύγει την πληρωμή ρητρών απωλειών (καθώς οι παραγόμενοι μετασχηματιστές είναι σύμφωνοι με τις προδιαγραφές των Πινάκων 1.1-1.2 εντός των ανοχών που παρατίθενται στον Πίνακα 1.3)

Ονομαστική ισχύς (kVA)	Κατηγορία Α'		Κατηγορία Β'		Κατηγορία C'	
	Απώλειες κενού $P_0$ (W)	Θόρυβος $L_w$ (dB)	Απώλειες κενού $P_0$ (W)	Θόρυβος $L_w$ (dB)	Απώλειες κενού $P_0$ (W)	Θόρυβος $L_w$ (dB)
50	190	55	145	50	125	47
100	320	59	260	54	210	49
160	460	62	375	57	300	52
250	650	65	530	60	425	55
400	930	68	750	63	610	58
630	1.300	70	1.030	65	860	60
630	1.200	70	940	65	800	60
1.000	1.700	73	1.400	68	1.100	63
1.600	2.600	76	2.200	71	1.700	66
2.500	3.800	81	3.200	76	2.500	71

**Πίνακας 1.1:** Κατηγορίες απωλειών κενού φορτίου σύμφωνα με CENELEC HD 428.1 S1/1992.

Ονομαστική ισχύς (kVA)	Κατηγορία A	Κατηγορία B	Κατηγορία C	Τάση βραχυκύκλωσης (%)
	Απώλειες φορτίου $P_k$ (W)	Απώλειες φορτίου $P_k$ (W)	Απώλειες φορτίου $P_k$ (W)	
50	1.100	1.350	875	4
100	1.750	2.150	1.475	4
160	2.350	3.100	2.000	4
250	3.250	4.200	2.750	4
400	4.600	6.000	3.850	4
630	6.500	8.400	5.400	4
630	6.750	8.700	5.600	6
1.000	10.500	13.000	9.500	6
1.600	17.000	20.000	14.000	6
2.500	26.500	32.000	22.000	6

**Πίνακας 1.2:** Κατηγορίες απωλειών φορτίου σύμφωνα με CENELEC HD 428.1 S1/1992.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
<b>α) Απώλειες</b>	
α <sub>1</sub> ) Συνολικές απώλειες (Fe+Cu)	<b>+10%</b> των εγγυημένων συνολικών απωλειών (Fe+Cu)
α <sub>2</sub> ) Απώλειες Fe (απώλειες Cu)	<b>+15%</b> των απωλειών Fe (απωλειών Cu) με την προϋπόθεση ότι δεν θα παραβιαστεί η ανοχή για τις συνολικές απώλειες

**Πίνακας 1.3:** Ανοχές απωλειών μετασχηματιστών κατά το πρότυπο IEC 60076 – 1.

Τα παραπάνω οφέλη είναι άμεσα για τους κατασκευαστές μετασχηματιστών, έχουν ωστόσο έμμεσα πολύ σημαντική επίδραση στα ηλεκτρικά δίκτυα και τις ηλεκτρικές εταιρίες, καθώς η ενεργειακή απόδοση των μετασχηματιστών συνδέεται με τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μετασχηματιστές ως ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα στοιχεία των δικτύων διανομής, αποτελούν ένα σημαντικό σύνδεσμο στις προσπάθειες των ηλεκτρικών εταιριών να μεταφέρουν στους καταναλωτές ηλεκτρισμό με ασφαλή, αξιόπιστο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Κατά μέσο όρο, οι μετασχηματιστές παραμένουν σε λειτουργία για περισσότερο από 30 χρόνια, κατά τη διάρκεια των οποίων εκτελούν τη βασική λειτουργία τους αξιόπιστα και με μικρή υποβάθμιση της ποιότητας. Ωστόσο, οι μετασχηματιστές εμφανίζουν σημαντικές επιρροές στο περιβάλλον. Οι απώλειες ενέργειας των μετασχηματιστών μπορούν να μειωθούν οικονομικά και αποδοτικά κατά 10% έως 40%, χρησιμοποιώντας ποικίλες τεχνικές, μία από τις οποίες είναι και η μείωση των απωλειών πυρήνα τους.

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

## 1.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η μελέτη γίνεται κατά κύριο λόγο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αποτελεί ένα αξιόπιστο και αποδοτικό εργαλείο για τη μελέτη του πεδίου ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων. Η μέθοδος έχει επικρατήσει στην ανάλυση του πεδίου διατάξεων δισδιάστατης και τρισδιάστατης γεωμετρίας που περιλαμβάνουν υλικά με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως οι μετασχηματιστές, ενώ λόγω της εξέλιξης των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων μπορεί πλέον να εφαρμοσθεί σε εύλογο χρόνο χρησιμοποιώντας κατάλληλο προσωπικό υπολογιστή.

Στα πλαίσια αυτά η βελτίωση της μεθοδολογίας μοντελοποίησης των μετασχηματιστών μέσω λεπτομερούς ανάλυσεως του μαγνητικού πεδίου με χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων συμβάλλει ουσιαστικά στην αύξηση της ακρίβειας πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών ισχύος.

Η εργασία περιλαμβάνει υπολογισμό των απωλειών με τη δισδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών διαφορετικής ονομαστικής ισχύος και τα αποτελέσματά της συγκρίνονται με τις μετρημένες τιμές απωλειών που δίνονται από τον κατασκευαστή. Έτσι προκύπτει μια συνολική εικόνα για την ακρίβεια της μεθόδου και τη δυνατότητά της να προβλέψει τις απώλειες σιδήρου των μετασχηματιστών. Διαπιστώνεται επίσης ο ελάχιστος βαθμός πολυπλοκότητας του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων που απαιτείται για να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα (εξετάζεται δηλαδή η πυκνότητα πλέγματος και ο χρόνος επίλυσης ως συνάρτηση του σφάλματος πρόβλεψης των απωλειών).

Στις περιπτώσεις που η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζει σημαντικές αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές στην εκτίμηση των απωλειών σιδήρου, προτείνεται η δυνατότητα βελτίωσης της πρόβλεψης απωλειών με τις ακόλουθες μεθόδους:

- συνυπολογισμό της μηχανικής και θερμικής κατεργασίας για την διαμόρφωση των πυρήνων, η οποία τροποποιεί τα αρχικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας. Η κατεργασία αυτή λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας καμπύλη μαγνήτισης και ελάσσονες βρόχους υστέρησης της μαγνητικής λαμαρίνας μετά τη διαμόρφωσή της σε πυρήνες (και όχι τις αντίστοιχες καμπύλες που δίνονται από τον κατασκευαστή της λαμαρίνας πριν την κατεργασία της).
- καλύτερη αναπαράσταση των υλικών με μελέτη φαινομένων που διαδραματίζονται σε μικροσκοπική κλίμακα σε αυτά.

Στόχος της παραπάνω ανάλυσης είναι η δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου το οποίο είναι σε θέση να προβλέψει συστηματικά και με μικρή απόκλιση τις απώλειες κενού φορτίου των μετασχηματιστών ισχύος. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μια διαδικασία βελτιστοποίησης της σχεδίασης των μετασχηματιστών, παρέχοντας στους μηχανικούς της παραγωγικής μονάδας τα εργαλεία για τη σωστή πρόβλεψη της λειτουργίας τους κατά τη φάση της σχεδίασης και τη δυνατότητα να εξετάσουν τη βέλτιστη γεωμετρική διαμόρφωση των πυρήνων η οποία οδηγεί σε χαμηλές απώλειες και υψηλή απόδοση και αξιοπιστία.

## 1.3 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα κεφάλαια της εργασίας έχουν την ακόλουθη δομή:

Στο **Κεφάλαιο 2**, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας, το οποίο αντιμετωπίζεται με όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο σε σχέση με τις απώλειες των μετασχηματιστών, οι οποίοι αποτελούν μία από τις ζωτικότερες συνιστώσες των ηλεκτρικών δικτύων. Έτσι, καταδεικνύεται άμεσα η χρησιμότητα της μείωσης των απωλειών και της αύξησης της ενεργειακής τους απόδοσης, η οποία αποτελεί το κεντρικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας, μέσω της αύξησης της ακρίβειας πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου.

Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφονται θεωρητικά τα είδη απωλειών ενός μετασχηματιστή ισχύος, με έμφαση στις απώλειες κενού φορτίου.

Στο **Κεφάλαιο 4** μελετάται η πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών ισχύος με τη χρήση της μεθόδου των *πεπερασμένων στοιχείων*. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο με τον οποίο αναπαριστώνται οι ιδιότητες του υλικού του πυρήνα, ο οποίος είναι καθοριστικός για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου.

Στο **Κεφάλαιο 5**, παρατίθεται η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρημένες τιμές απωλειών που έδωσε ο κατασκευαστής.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και εφαρμογές των προηγούμενων κεφαλαίων.

### **ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας, το οποίο αντιμετωπίζεται με όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο. Η αναφορά αυτή κρίθηκε αναγκαία, δεδομένου ότι το ζήτημα αυτό συνδέεται άμεσα με τις απώλειες των μετασχηματιστών, οι οποίοι αποτελούν μία από τις ζωτικότερες συνιστώσες των ηλεκτρικών δικτύων. Έτσι, καταδεικνύεται άμεσα η χρησιμότητα της μείωσης των απωλειών και της αύξησης της ενεργειακής τους απόδοσης, η οποία αποτελεί το κεντρικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας, μέσω της αύξησης της ακρίβειας πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου.

#### **2.1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΗΜΑΣΙΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

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

Το Ελληνικό ενεργειακό σύστημα βρίσκεται σε φάση σημαντικών αλλαγών. Η διεύθυνση του φυσικού αερίου, η κατασκευή των διευρωπαϊκών δικτύων, η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της εξοικονόμησης ενέργειας, η πρόκληση του φαινομένου του θερμοκηπίου και τέλος η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τα νέα δεδομένα του. Σημαντικές είναι οι επιπτώσεις των νέων αυτών δεδομένων στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας, στη μείωση της εξάρτησής της από το εισαγόμενο πετρέλαιο, με όλα τα συνεπαγόμενα οφέλη στην εθνική οικονομία, στην εξοικονόμηση μη ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων, στην αύξηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, στην προστασία του περιβάλλοντος και τέλος στην βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών στους καταναλωτές, [2.1].

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

## 2.2 ΜΕΤΡΑ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται μια σειρά μέτρων που έχουν ληφθεί ή προγραμματίζονται να ληφθούν στα πλαίσια κοινοτικών και εθνικών προγραμμάτων εξοικονόμησης ενέργειας. Η παράθεσή τους είναι ενδεικτική τόσο της σπουδαιότητας του ζητήματος, όσο και της ανάγκης διαρκούς αναζήτησης λύσεων, στα πλαίσια της οποίας η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του υφιστάμενου εξοπλισμού αποτελεί μια σημαντική προοπτική αναβάθμισης.

### 2.2.1 Κοινοτική πολιτική εξοικονόμησης ενέργειας

Μέσα στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα υφίσταται η ανάγκη βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης, κατά την τελική χρήση, διαχείρισης της ζήτησης ενέργειας και προώθηση της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά την τελική χρήση θα συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας και στον περιορισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση ενέργειας, βοηθώντας έτσι την Ευρωπαϊκή Κοινότητα να μειώσει την εξάρτησή της από τις εισαγωγές ενέργειας. Επιπλέον, η στροφή προς τεχνολογίες με καλύτερη ενεργειακή απόδοση μπορεί να ενισχύσει την καινοτομία και την ανταγωνιστικότητα της Κοινότητας, [2.2].

Η εξοικονόμηση ενέργειας καθορίζεται με τη μέτρηση και/ή την εκτίμηση της κατανάλωσης πριν από και μετά την εφαρμογή του μέτρου ενώ πρέπει παράλληλα να εξασφαλίζονται η προσαρμογή και η ομαλοποίηση βάσει των εξωτερικών συνθηκών που συνήθως επηρεάζουν τη χρήση της ενέργειας. Οι συνθήκες που συνήθως επηρεάζουν τη χρήση της ενέργειας, μπορούν επίσης να διαφοροποιούνται και με το χρόνο.

Τα κράτη μέλη θα πρέπει, ως εκ τούτου, να υιοθετήσουν εθνικούς ενδεικτικούς στόχους για την προώθηση της ενεργειακής απόδοσης κατά την τελική χρήση και να εξασφαλίσουν την περαιτέρω μεγέθυνση και τη βιωσιμότητα της αγοράς ενεργειακών υπηρεσιών. Ο εθνικός ενδεικτικός στόχος εξοικονόμησης συνίσταται σε 6% της προαναφερόμενης ετήσιας μέσης κατανάλωσης, μετράται μετά το έκτο έτος εφαρμογής της κοινοτικής οδηγίας και εκφράζεται σε απόλυτες τιμές ως GWh ή ισοδύναμες μονάδες, είναι το αποτέλεσμα της σωρευτικής ετήσιας εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται καθ' όλη την εξαετή περίοδο εφαρμογής της οδηγίας και επιτυγχάνεται με τις ενεργειακές υπηρεσίες και τα άλλα μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Ωστόσο, το τελικό αποτέλεσμα των δράσεων των κρατών μελών εξαρτάται από πολλούς εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των καταναλωτών όσον αφορά στη χρήση της ενέργειας και την προθυμία τους να χρησιμοποιούν μεθόδους και συσκευές εξοικονόμησης ενέργειας. Συνεπώς, ο εθνικός στόχος εξοικονόμησης ενέργειας είναι από τη φύση του ενδεικτικός και δεν περιλαμβάνει νομικά εκτελεστέα υποχρέωση των κρατών μελών να τον υλοποιήσουν.

Οι διανομείς ενέργειας, οι διαχειριστές συστημάτων διανομής και οι εταιρείες λιανικής πώλησης ενέργειας μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα, εφόσον προσφέρονται στην αγορά ενεργειακές υπηρεσίες που περιλαμβάνουν αποτελεσματική τελική χρήση, όπως εσωτερική θερμική άνεση, ζεστό νερό για οικιακή κατανάλωση, ψύξη, κατασκευή προϊόντων, φωτισμό και κινητήρια ισχύ. Η μεγιστοποίηση του κέρδους συσχετίζεται με τον τρόπο αυτό στενότερα με την πώληση ενεργειακών υπηρεσιών σε όσους το δυνατόν περισσότερους πελάτες αντί της πώλησης όσο το δυνατόν περισσότερης ενέργειας σε κάθε μεμονωμένο πελάτη.

Ο δημόσιος τομέας κάθε κράτους μέλους θα πρέπει να αποτελέσει υπόδειγμα όσον αφορά στις επενδύσεις, τη συντήρηση και άλλες δαπάνες για τον εξοπλισμό που καταναλώνει ενέργεια, τις ενεργειακές υπηρεσίες και άλλα μέτρα για την ενεργειακή απόδοση. Συνεπώς, ο δημόσιος τομέας θα πρέπει να παροτρυνθεί να ενσωματώνει μελήματα της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης στις επενδύσεις του, τις λογιστικές απόσβεσης και στους προϋπολογισμούς λειτουργίας. Δεδομένου ότι οι διοικητικές δομές διαφέρουν πολύ στα διάφορα κράτη μέλη, τα διάφορα είδη μέτρων που μπορεί να λαμβάνει ο δημόσιος τομέας θα πρέπει να λαμβάνονται στο κατάλληλο εθνικό, περιφερειακό και/ή τοπικό επίπεδο.

Τα κράτη μέλη εξασφαλίζουν ότι υπάρχουν αποτελεσματικά και υψηλής ποιότητας συστήματα ενεργειακών ελέγχων, τα οποία σχεδιάζονται για να εντοπίζουν δυνητικά μέτρα βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και τα οποία εφαρμόζονται κατά ανεξάρτητο τρόπο, σε όλους τους τελικούς καταναλωτές, συμπεριλαμβανομένων των μικρών οικιακών και εμπορικών πελατών και των μικρομεσαίων πελατών του βιομηχανικού τομέα. Επίσης, εξασφαλίζουν ώστε, εφόσον είναι τεχνικώς εφικτό, οικονομικώς εύλογο και ανάλογο προς τη δυνητική εξοικονόμηση ενέργειας, να παρέχονται σε ανταγωνιστική τιμή στους τελικούς καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου, τηλεθέρμανσης ή τηλεψύξης και ζεστού νερού για οικιακή κατανάλωση, ατομικοί μετρητές που να αντικατοπτρίζουν επακριβώς την πραγματική ενεργειακή κατανάλωση του τελικού καταναλωτή και να παρέχουν πληροφορίες όσον αφορά στον πραγματικό χρόνο χρήσης. Επιπροσθέτως, εξασφαλίζουν ώστε, ανάλογα με την περίπτωση, η χρέωση που πραγματοποιείται από τους διανομείς ενέργειας, τους διαχειριστές συστημάτων διανομής και τις εταιρείες λιανικής πώλησης ενέργειας, να βασίζεται στην πραγματική ενεργειακή κατανάλωση και να παρουσιάζεται με σαφή και κατανοητό τρόπο. Στο λογαριασμό του τελικού καταναλωτή πρέπει να υπάρχουν κατάλληλες πληροφορίες, ώστε να έχει πλήρη εικόνα του τρέχοντος ενεργειακού του κόστους. Ανάλογα με την περίπτωση και με την ποσότητα της ενεργειακής κατανάλωσης του εκάστοτε καταναλωτή, η χρέωση πρέπει να είναι αρκετά συχνή ώστε οι καταναλωτές να μπορούν να ρυθμίζουν την ενεργειακή τους κατανάλωση.

## **2.2.2 Εθνική πολιτική εξοικονόμησης ενέργειας**

### **2.2.2.1 Εξοικονόμηση ενέργειας σε βιομηχανικό περιβάλλον**

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποσκοπεί τόσο σε οικονομικό όφελος όσο και στην προστασία του περιβάλλοντος. Πρόκειται για ένα θέμα στρατηγικής και καίριας σημασίας, καθώς επηρεάζει την ανταγωνιστικότητα και την επιβίωση των βιομηχανικών μονάδων, αλλά και του περιβάλλοντος.

Η βασική αρχή για τις **επεμβάσεις** εξοικονόμησης ενέργειας είναι ότι σε κάθε περίπτωση, πριν από αντικαταστάσεις εξοπλισμού ή εισαγωγή νέων τεχνολογιών, πρέπει να εξαντλούνται τα περιθώρια εξοικονόμησης ενέργειας, ώστε να γίνεται τεχνικά και οικονομικά η ορθολογικότερη επιλογή. Οι επεμβάσεις στην εξοικονόμηση ενέργειας μπορούν να γίνουν σε τρία επίπεδα: καλή ενεργειακή διαχείριση, βελτίωση εξοπλισμού και βελτίωση στις διαδικασίες παραγωγής.

Κατά την καύση μπορεί να υπάρξει απώλεια ενέργειας, λόγω ατελούς καύσης, απώλειας στα καυσαέρια, απωλειών λόγω ακτινοβολίας ή μεταφοράς και λόγω υγρασίας στο καύσιμο. Από την άλλη, μπορεί να γίνει ορθολογική διαχείριση ενέργειας, με την αποφυγή ενεργοβόρων διακυμάνσεων φορτίου, με την περιοδική ή/και τη συνεχή παρακολούθηση βασικών παραμέτρων λειτουργίας της μονάδας, με τον περιορισμό του περίσσιου αέρα στα κατώτερα επίπεδα και με τη συντήρηση. Εξοικονόμηση ενέργειας, κατά την καύση, μπορεί να επιτευχθεί και με την αύξηση της απόδοσης του συντελεστή καύσης. Με τη μείωση της θερμοκρασίας καυσαερίων κατά 25 βαθμούς Κελσίου, ο συντελεστής απόδοσης αυξάνεται κατά 1%, ενώ η εγκατάσταση ή βελτίωση της ήδη υπάρχουσας θερμομόνωσης του θαλάμου

καύσης συμβάλλει στη μείωση των απωλειών, λόγω ακτινοβολίας θερμότητας στο περιβάλλον.

Στους **λέβητες** η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με την προθέρμανση αέρα εισαγωγής, με τη λειτουργία του λέβητα στην κατώτερη δυνατή πίεση ατμού ή θερμοκρασίας ζεστού νερού που καθορίζεται από το σύστημα μεταφοράς/διανομής. Μπορεί ακόμα να γίνει αντικατάσταση παλαιών καυστήρων με αποδοτικότερους, αντικατάσταση των λεβήτων και εγκατάσταση πτερυγίων για στροβιλισμό φλόγας, δημιουργία τύρβης και καλύτερη ανάμιξη αέρα - καυσίμου. Παράλληλα, μπορεί να καθιερωθεί πρόγραμμα συντήρησης λεβήτων, καθαρισμός αυλών και ανάλυση καυσαερίων για ρύθμιση λόγου αέρα /καυσίμου.

Η εξοικονόμηση ενέργειας στον **ατμό** μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μόνωση του δικτύου ατμού, την επισκευή μόνωσης δικτύου ατμού, τη μείωση απωλειών από αγωγούς και βαλβίδες, στεγανοποίηση δικτύου που δε χρησιμοποιείται, μείωση των διαρροών περίσσειας ατμού, χρήση ατμού με την ελάχιστη δυνατή πίεση λειτουργίας. Παράλληλα, μπορεί να γίνει χρήση σωστά διαστασιολογημένων ατμοπαγίδων και αντικατάσταση ή επισκευή τους, αύξηση της ποσότητας των συμπυκνωμάτων επιστροφής, μόνωση δοχείων αποθήκευσης συμπυκνωμάτων, εγκατάσταση ή επισκευή μόνωσης αγωγών συμπυκνωμάτων και χρήση θερμότητας συμπυκνωμάτων για παραγωγή ζεστού νερού. Τέλος, μπορεί να γίνει χρήση ταμιευτών ατμού, αξιοποίηση της θερμότητας των καυσαερίων και ανάκτηση θερμότητας με επιστροφή συμπυκνωμάτων.

Στους βιομηχανικούς **φούρνους** και κλίβανους η εξοικονόμηση ενέργειας πραγματοποιείται με την προθέρμανση πετρελαίου σε κατάλληλη θερμοκρασία για σωστό ψεκασμό, ρύθμιση της παροχής αέρα καύσης στα επιτρεπτά όρια, μείωση και έλεγχος δευτερογενούς αέρα καύσης στην απαιτούμενη ποσότητα για τη σωστή λειτουργία του φούρνου και με τη χρήση συστημάτων ελέγχου της καύσης. Όσο αφορά στον εξοπλισμό, πρέπει να υπάρχουν μονώσεις και των ανοιγμάτων αέρα. Πρέπει να γίνεται συντήρηση μόνωσης τοιχωμάτων, ρύθμιση καυστήρων, μείωση απωλειών καυσαερίων, και επισκευή στις πόρτες των φούρνων ώστε να σφραγίζουν.

Η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με την ανάκτηση θερμότητας. Αυτό γίνεται με την ανάκτηση καυσαερίων: χρήση απορριπτόμενης θερμότητας καυσαερίων για προθέρμανση του αέρα καύσης και χρήση θερμότητας καυσαερίων για προθέρμανση νερού τροφοδοσίας του λέβητα. Μπορεί επίσης να γίνει ανάκτηση θερμότητας από ειδικά μηχανήματα όπως μετασχηματιστές, από φούρνους, κλίβανους και από συμπυκνωτές ψυκτικών διεργασιών. Ταυτόχρονα, μπορεί να γίνει χρήση καυσαερίων για παραγωγή ατμού ή/και ηλεκτρισμού, χρήση θερμότητας καυσαερίων για προθέρμανση προϊόντων που προορίζονται για ξήρανση ή έψηση, χρήση καυσαερίων για παραγωγή θερμότητας ή θερμού νερού ή ακόμα χρήση καυσαερίων για θέρμανση αέρα που προορίζεται για θέρμανση χώρων.

Οι απώλειες ενέργειας μπορεί να μειωθούν με τη μόνωση “γυμνού” εξοπλισμού, με τη χρήση βέλτιστου πάχους μόνωσης, με τη μόνωση δικτύου ατμού, ζεστού νερού, ψυκτικών υγρών και μόνωση μεταξύ χώρων θερμών και ψυκτικών διεργασιών. Η εξοικονόμηση ενέργειας στη βιομηχανική ψύξη πραγματοποιείται με τη διαστασιολόγηση του συστήματος ψύξης για τη λειτουργία του συμπιεστή στη χαμηλότερη δυνατή πίεση, με την αποφυγή δημιουργίας πάγου στους εξατμιστές, με τη χρήση εξωτερικής πηγής ψυχρού νερού για συνεχή παροχή και με τη χρήση απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλής ενθαλπίας για ψύξη με απορρόφηση.

Οι επεμβάσεις που μπορεί να πραγματοποιηθούν για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι πολλές. Μπορεί να δημιουργηθεί ένα **σχέδιο λειτουργίας** των μηχανημάτων σε περιόδους που δεν εμφανίζονται αιχμές, μπορεί να αποθηκευτεί ενέργεια ή να υπάρχει ένα σύστημα ελέγχου για την αυτόματη επέμβαση στην κατανομή φορτίου. Όσο αφορά στην

παραγωγή ηλεκτρισμού, μπορεί να εγκατασταθούν αποδοτικοί ανορθωτές ή ν' αντικατασταθεί ο εξοπλισμός συνεχούς ρεύματος με εξοπλισμό εναλλασσόμενου. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν συστήματα ελέγχου του  $\cos\phi$  και να βελτιωθεί το  $\cos\phi$  (βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα της παραγόμενης ισχύος), να χρησιμοποιηθεί η απορριπτόμενη ενέργεια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, να προωθηθεί ιδιοπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας/ψύξης. Στους ηλεκτρικούς κινητήρες πάλι, αν γίνεται η χρήση κατάλληλων ιμάντων και άλλων μηχανισμών, αν αντικατασταθούν οι υπερδιαστασιολογημένοι κινητήρες και γίνει χρήση ρυθμιστικών στροφών για αντλίες, συμπιεστές και άλλα, θα εξοικονομηθεί ενέργεια. Στους αεροσυμπιεστές πρέπει να μειωθεί η πίεση στο κατώτερο επιτρεπτό όριο, πρέπει να γίνει εισαγωγή κρύου αέρα, να γίνεται ορθολογική χρήση πεπιεσμένου αέρα για ψύξη προϊόντων, να κλείσουν αγωγοί δικτύου που δε χρησιμοποιούνται, να μειωθούν οι απώλειες δικτύου σε αγωγούς και βαλβίδες και να γίνει εγκατάσταση εισαγωγών αέρα σε κρύους χώρους.

Μέσα σ' ένα κτίριο, για να γίνει εξοικονόμηση ενέργειας, πρέπει να υπάρχει ρύθμιση στάσης φωτισμού, λειτουργία φωτισμού, έλεγχος και αυτοματισμοί στο φωτισμό, πρέπει να γίνεται συντήρηση του χώρου, να υπάρχει εξοπλισμός θέρμανσης και ψύξης, εξοπλισμός ανακύκλωσης αέρα, αφύγρανση, σύστημα ελέγχου, έλεγχος υγρασίας, να πραγματοποιείται αερισμός και να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας.

Στα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης υπάρχουν πολλές δυνατότητες να εξοικονομηθεί ενέργεια: Με τη σαφή εικόνα των ενεργειακών καταναλώσεων και της ενεργειακής απόδοσης σε μια επιχείρηση, με τις αυτόματες ρυθμίσεις προεπιλεγμένων ενεργειακών χρήσεων, με την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης, αλλά και της αποδοτικότητας στη χρήση άλλων πόρων, με την άμεση ή έμμεση πληροφόρηση σχετικά με την απόδοση και τον τρόπο λειτουργίας του ενεργειακού και παραγωγικού εξοπλισμού, τα περιθώρια βελτίωσης, καθώς και τα αποτελέσματα από ενδεχόμενη λήψη μέτρων και, τέλος, με μηχανισμούς βελτιστοποίησης της απόδοσης, ξεκινώντας από την υφιστάμενη κατάσταση.

Τα **οφέλη** από την εφαρμογή των συστημάτων αυτών είναι η δυνατότητα συνεχούς ελέγχου όσον αφορά στη χρήση ενέργειας με μείωση του ενεργειακού κόστους, ο καταμερισμός της ευθύνης για αποδοτική χρήση της ενέργειας στα διάφορα επίπεδα της ιεραρχίας μέσα στην επιχείρηση και ιδιαίτερα σε επίπεδο τελικού χρήστη, η γρήγορη απόκριση μεταξύ “έντοπισμού σφάλματος” και “διόρθωσης”, τα έμμεσα οφέλη στην παραγωγική διαδικασία. Τα βασικά στάδια ανάπτυξης του συστήματος ενεργειακής διαχείρισης είναι: η ενεργειακή μελέτη και επισκόπηση εγκαταστάσεων, η επιλογή κατάλληλων κέντρων ενεργειακού κόστους, ο υπολογισμός ενεργειακών δεικτών, ο προσδιορισμός της πρότυπης ενεργειακής απόδοσης, η υιοθέτηση κατάλληλων μηχανισμών οργανωτικής υποδομής για τη λειτουργία του συστήματος, η παρακολούθηση της ενεργειακής κατάστασης, ο προγραμματισμός και η θέσπιση νέων στόχων.

#### **2.2.2.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στο δημόσιο τομέα**

Η παροχή επαρκούς ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της σύγχρονης κοινωνίας και κινητήρια δύναμη κάθε αναπτυξιακής δραστηριότητας. Η παραγωγή της όμως σήμερα, αποτελεί μια από τις κυριότερες αιτίες μόλυνσης της ατμόσφαιρας, των υδάτων και του εδάφους λόγω των ορυκτών καυσίμων και κυρίως του πετρελαίου που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη παραγωγής. Η συνεχής αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η ανησυχητική αύξηση της ρύπανσης και η συνεχιζόμενη μείωση των ορυκτών αποθεμάτων καυσίμων, καθώς και η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας, επέβαλλαν τη θέσπιση κεντρικής ενεργειακής πολιτικής με στόχο την ενεργειακή ανεξαρτησία. Στα πλαίσια της ενεργειακής στρατηγικής της Ε.Ε. περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων, η ορθολογική χρήση και η εξοικονόμηση ενέργειας ως πρωταρχικό μέτρο για την προστασία του περιβάλλοντος και τον περιορισμό της εκροής συναλλάγματος προς εξασφάλιση ορυκτών καυσίμων.

Η άμεση απαίτηση εξοικονόμησης ενέργειας αφορά στις ηλεκτροβόρες εγκαταστάσεις του δημοσίου που εμφανίζουν συντελεστή αέργου ισχύος σε χαμηλά επίπεδα (κάτω του 0,95) με την προσθήκη πυκνωτών αντιστάθμισης. Οι πυκνωτές που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος όμως είναι δυνατόν να δημιουργήσουν και αρνητικές επιδράσεις που σχετίζονται με τη λεγόμενη «ποιότητα ισχύος» και τελικά μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση του κόστους χρήσης μιας εγκατάστασης αν δε βρεθεί τρόπος να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα αξιοπιστίας και να αυξάνονται οι πραγματικές απώλειες της εγκατάστασης με παράλληλη αύξηση του κόστους ενέργειας και δαπανών συντήρησης.

Κάθε μέτρο για την εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί σημαντική επέμβαση προς τη διατήρηση καθαρού περιβάλλοντος και παράλληλης μείωσης λειτουργικών εξόδων. Η εφαρμογή τους όμως απαιτεί επιστημονική προσέγγιση στη συνολική Ενεργειακή Διαχείριση εγκαταστάσεων, με συγκεκριμένες δεσμεύσεις και στόχους και κυρίως την αλλαγή της ενεργειακής συμπεριφοράς των καταναλωτών.

Οι όποιες δράσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας στα δημόσια κτίρια θα πρέπει είναι οικονομικά βιώσιμες και να έχουν ως στόχο τη μείωση της κατανάλωσης κάθε μορφής ενέργειας και τη μείωση των λειτουργικών εξόδων. Ειδικότερα, τα κτίρια που ανήκουν στο δημόσιο και στον ευρύτερο δημόσιο τομέα (είναι περίπου 200.000), αντιπροσωπεύουν το 5% του τριτογενούς τομέα. Παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία ως προς τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και τις εγκαταστάσεις τους, δεδομένου ότι έχουν κατασκευαστεί σε διάφορες χρονικές περιόδους και συχνά για κάλυψη εντελώς διαφορετικών αναγκών από αυτές που τελικά εξυπηρετούν. Ένα μεγάλο μέρος τους είναι ενοικιαζόμενα, με σημαντική διαφοροποίηση σε επίπεδο εξοπλισμού. Συνοπτικά, η ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων, όπως αυτή διαπιστώθηκε από ελέγχους και μετρήσεις, κυμαίνεται περί τις 200 kWh ανά τετραγωνικό μέτρο ωφέλιμης επιφάνειας (μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας).

Οι περισσότερες από τις ηλεκτρικές καταναλώσεις σήμερα περιέχουν τουλάχιστον ένα από τα παρακάτω ηλεκτρικά στοιχεία: ηλεκτρικούς κινητήρες (ψυγεία, κλιματιστικά, παντός τύπου μηχανές παραγωγής κλπ), πηνία ισχύος (φωτιστικά για λυχνίες φθορισμού ή εκκένωσης αερίων, ηλεκτρονικές συσκευές κλπ), μετασχηματιστές (ηλεκτροσυγκολλήσεις, επιμεταλλώσεις, ηλεκτρονικές συσκευές κλπ). Τα παραπάνω ηλεκτρικά στοιχεία χαρακτηρίζονται επαγωγικά και απαιτούν μαγνητικό πεδίο για να λειτουργήσουν.

Για τη δημιουργία και διατήρηση του μαγνητικού πεδίου απαιτείται ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο πρέπει να παρασχεθεί από τη ΔΕΗ. Το ρεύμα αυτό είναι η «άεργη» συνιστώσα που αθροιζόμενη διανυσματικά με την «πραγματική» συνιστώσα αποτελούν το συνολικό απορροφούμενο ρεύμα μιας εγκατάστασης. Τα ρεύματα αυτά μεταφέρουν την «άεργη ισχύ» που χρησιμοποιείται στη δημιουργία των πεδίων και την «πραγματική ισχύ» που μετατρέπεται στο χρήσιμο έργο, το διανυσματικό άθροισμα των οποίων αποτελεί την «φαινόμενη ισχύ». Η έννοια του «αέργου» έχει στην πραγματικότητα να κάνει με ποσά ενέργειας που παλινδρομούν μεταξύ πηγής (ΔΕΗ) και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Τα μαγνητικά πεδία (επειδή το ρεύμα που τα δημιουργεί είναι εναλλασσόμενο) μεταβάλλονται και εναλλάσσονται συνεχώς, στη φάση της δημιουργίας ή αύξησης της έντασής τους απορροφούν ηλεκτρική ενέργεια από την πηγή (ΔΕΗ), κατά τη μείωση της έντασης ή την κατάρρευση τους επιστρέφουν το ίδιο ποσό ενέργειας πίσω στην πηγή. Το πηλίκο της πραγματικής ισχύος δια τη φαινόμενη ονομάζεται «συντελεστής ισχύος» και αποτελεί μέτρο απόδοσης μιας εγκατάστασης.

Σκοπός της αντιστάθμισης είναι η μείωση της αέργου ισχύος που απορροφά μια ηλεκτρική εγκατάσταση από τη ΔΕΗ, έτσι ώστε η πραγματική ισχύς να πλησιάσει όσο το δυνατόν την φαινόμενη και άρα ο συντελεστής ισχύος να πλησιάσει τη μονάδα. Η

αντιστάθμιση επιτυγχάνεται κυρίως με τη χρήση πυκνωτών, που τοποθετούνται παράλληλα με τα επαγωγικά φορτία, έτσι ώστε η ενέργεια που είναι απαραίτητη για τη δημιουργία των μαγνητικών τους πεδίων να μην παλινδρομεί μεταξύ ΔΕΗ και εγκατάστασης, αλλά μεταξύ των πηνίων και των πυκνωτών της ίδιας της εγκατάστασης. Οι πυκνωτές δηλαδή παρέχουν στα πηνία την ενέργεια που χρειάζονται κατά τη φάση της δημιουργίας των μαγνητικών τους πεδίων και αποθηκεύουν την ενέργεια που επιστρέφουν τα πηνία όταν τα πεδία τους καταρρέουν για να τους την δώσουν ξανά στον επόμενο κύκλο δημιουργίας – κατάρρευσης.

Η βελτίωση του συντελεστή ισχύος (με στόχο την επίτευξη  $\cos\varphi > 0.95$ ), παρέχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής:

- Μείωση του ρεύματος που ρέει στους αγωγούς του συστήματος παραγωγής- διανομής της ΔΕΗ με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ικανότητα απόκρισής του σε αυξημένα φορτία και σημαντική μείωση απωλειών ισχύος στα δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής. Η αύξηση στη ζήτηση ισχύος, οφείλεται κυρίως στην εκτεταμένη χρήση κλιματιστικών συσκευών και αντλιών άρδευσης.
- Μείωση της Χρεωστέας Μέγιστης Ζήτησης (XMZ) που εμφανίζεται σε κάποια από τα βιομηχανικά τιμολόγια πελατών μέσης τάσεως της ΔΕΗ με αποτέλεσμα μικρότερους μηνιαίους λογαριασμούς.
- Μείωση των απωλειών ισχύος στο καλώδιο παροχής (από το μετρητή της ΔΕΗ μιας εγκατάστασης μέχρι τη συστοιχία των πυκνωτών) λόγω της μείωσης του απορροφούμενου ρεύματος.

Η εξοικονόμηση αυτή της ενέργειας οδηγεί ταυτόχρονα και στην ελάττωση της εκπομπής ρύπων προς το περιβάλλον γεγονός πολύ σημαντικό στις μέρες μας

### 2.2.3 Ηλεκτρικές εταιρίες και εξοικονόμηση ενέργειας

Σε διάστημα ενός αιώνα, οι περιουσίες των περισσότερων ηλεκτρικών εταιριών έχουν τόσο αυξηθεί όσο και μειωθεί με βάση την παραγωγή. Επισημαίνεται ότι η πώληση πιο πολλών κιλοβατώραν, οδηγεί στην επίτευξη μεγαλύτερου κέρδους. Ωστόσο, στην περίπτωση πυκνοκατοικημένων βιομηχανικών περιοχών συντρέχουν κοινωνικοί και πολιτικοί λόγοι για τους οποίους η κατασκευή εργοστασίων παραγωγής ισχύος είναι πιο ακριβή ως και αδύνατη. Από περιβαντολογικής σκοπιάς, το σενάριο είναι ακόμα λιγότερο ελκυστικό, υποθέτοντας ότι οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και άλλες χώρες συνεχίζουν να στηρίζονται σε μεγάλο βαθμό σε φυσικά καύσιμα. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι περισσότερες κιλοβατώρας σημαίνει περισσότερους τόνους διοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου και οξειδίων του αζώτου στην ατμόσφαιρα, δηλαδή μεγαλύτερη υποβάθμιση του περιβάλλοντος, [2.3].

Μέσα από πειράματα που αποσκοπούσαν να αναπτύξουν οικονομικοεπιχειρησιακά μοντέλα πιο κοντά στη σύγχρονη πραγματικότητα, οι ηλεκτρικές εταιρίες των Ηνωμένων Πολιτειών και οι κρατικοί φορείς στην Καλιφόρνια, τη Νέα Υόρκη και τη Νέα Αγγλία υιοθέτησαν ρυθμίσεις που καθιστούν τις εταιρίες ικανές να έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερο κέρδος, πείθοντας τους πελάτες τους να μειώσουν τη χρήση ηλεκτρικού ρεύματος και να βασιστούν σε πιο τεχνολογικά αναβαθμισμένο και ενεργειακά αποδοτικό εξοπλισμό, φωτισμό και συσκευές.

Τα πλεονεκτήματα από ένα τέτοιο εγχείρημα ορίζονται ως τα νομισματικά αποθέματα της εταιρίας, τα οποία προέρχονται από την παραγωγή, μεταφορά και διανομή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, με την αγορά για παράδειγμα λιγότερων καυσίμων, αφαιρώντας το κόστος της εταιρίας που αφορά στην επίτευξη της εν λόγω εξοικονόμησης (το κόστος των μερικών απαλλαγών από οφειλές στους πελάτες που αγοράζουν αποδοτικότερες συσκευές, καθώς και οι δαπάνες σε διαφημιστικές καμπάνιες για τα προγράμματα). Επίσης, είναι δυνατή η μείωση του κόστους εάν κατά την ανέγερση κτιρίου εγκατασταθεί καλύτερη μόνωση, πιο αποδοτικός εξοπλισμός και συσκευές και ακόμα ανιχνευτές για την καταγραφή και τον έλεγχο της ενεργειακής χρήσης.

Παράλληλα με την παρακίνηση της χρήσης συσκευών υψηλής απόδοσης σε συγκεκριμένες περιοχές μέσω τέτοιων προγραμμάτων, έχουν κινητοποιηθεί και οι ομοσπονδιακές αρχές ώστε να υπάρξει εθνικός αντίκτυπος. Συγκεκριμένα, όσον αφορά στον οικιστικό τομέα, η ομοσπονδιακή κυβέρνηση έχει εφαρμόσει μέτρα απόδοσης από το 1987 και σήμερα επιθεωρούνται τα μέτρα για 14 κατηγορίες οικιστικού εξοπλισμού τουλάχιστον κάθε τρία χρόνια, προσφέροντας στους καταναλωτές συνεχώς πιο αποδοτικές επιλογές, [2.4].

Παρά το γεγονός ότι αποδοτικές τεχνολογίες έχουν επιτύχει σημαντικά κέρδη όσον αφορά στη διείσδυση στην αγορά τα τελευταία χρόνια, υπάρχει ακόμα ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης. Η ραγδαία άνοδος επιτυχημένων τεχνολογιών συνήθως οφείλεται στην καθολική τους αξία και όχι σε κάποιο πλεονέκτημα απόδοσης. Συνήθως, το κοινό χαρακτηριστικό αυτών των τεχνολογιών είναι η ικανότητά τους να συμβαδίζουν με τις ανάγκες του καταναλωτή.

Οι ηλεκτρικές εταιρίες μπορούν να αποκομίσουν πολλά από προηγούμενες προσπάθειες ώστε να προωθήσουν ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες και υπηρεσίες, γνώση στην οποία είναι δυνατό να βασισθούν νέες τεχνολογίες και υπηρεσίες ώστε να εδραιωθεί η χρήση τους. Στην πραγματικότητα, οι ερευνητές αναφέρουν ότι σε ένα απελευθερωμένο, ανταγωνιστικό βιομηχανικό περιβάλλον, οι ηλεκτρικές εταιρίες θα αντιμετωπίσουν παρόμοιες δυσκολίες στην προσπάθειά τους να πουλήσουν στους πελάτες τους διαφοροποιημένα προϊόντα και υπηρεσίες.

Ειδικότερα, στον εμπορικό και βιομηχανικό τομέα, οι πελάτες των εν λόγω εταιριών έχουν μεγαλύτερο συμφέρον από την εξοικονόμηση ενέργειας, με αποτέλεσμα να ενδιαφέρονται γενικά πιο πολύ για οικονομικές και ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες, συγκριτικά με τους οικιστικούς πελάτες. Λαμπτήρες φθορισμού υψηλής απόδοσης, κινητήρες, αντλίες θέρμανσης και τεχνολογίες ειδικής εφαρμογής όπως επαγωγική θέρμανση είναι μόλις κάποιες από τις πολλές τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτούς τους τομείς.

Οι ηλεκτρικές εταιρίες είναι δυνατό να βελτιώσουν την απόδοση των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας τις απώλειες. Οι βιομηχανικοί και οι εμπορικοί χρήστες της ηλεκτρικής ενέργειας επίσης βελτιώνουν την απόδοση των δικτύων διανομής τους, μειώνοντας τις απώλειες. Η μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής γίνεται με αντικατάσταση των μεγαλύτερων αγωγών που είναι σε λειτουργία, αύξηση της τάσης του συστήματος, βελτίωση του συντελεστή ισχύος του συστήματος με προσθήκη πυκνωτών διακλάδωσης, προσθήκη γραμμών μεταφοράς ή αγωγών τροφοδοσίας, προσθήκη ή εξισορρόπηση φάσεων, χρήση ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών (χαμηλών απωλειών) και επαναδιαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Ενώ μερικές από τις παραπάνω παρεμβάσεις μπορούν να υλοποιηθούν ευκολότερα από κάποιες άλλες, η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών Μ/Σ πραγματοποιείται πάντοτε εύκολα. Δε χρειάζεται μεγάλη τεχνική εμπειρία, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σωστά οι Μ/Σ 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.

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 επίσης βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες μετασχηματιστών συνεχίζουν να χρησιμοποιούν φθηνότερους μη αποδοτικούς μετασχηματιστές. Οι σημερινοί

μετασχηματιστές είναι περισσότερο αποδοτικοί παρά ποτέ. Νέες τεχνικές κατασκευής και νέοι τύποι μαγνητικών υλικών έχουν οδηγήσει στην κατασκευή οικονομικών και ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών, όπως θα φανεί στη συνέχεια του κεφαλαίου.

## **2.3 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Ένα από τα πιο εντυπωσιακά χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών είναι η αξιοπιστία και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Κατά μέσο όρο, οι μετασχηματιστές παραμένουν σε λειτουργία για περισσότερο από 30 χρόνια, κατά τη διάρκεια των οποίων εκτελούν τη βασική λειτουργία τους αξιόπιστα και με μικρή υποβάθμιση της ποιότητας. Ωστόσο, οι μετασχηματιστές εμφανίζουν σημαντικές επιρροές στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, περισσότερο από 2% της συνολικής ετήσιας παραγωγής στις ΗΠΑ – σχεδόν 61 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες ηλεκτρισμού- χάνεται κάθε χρόνο λόγω των ανεπαρειών στους μετασχηματιστές. Οι απώλειες των μετασχηματιστών οδηγούν στην εκπομπή 45 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα, 353 εκατομμυρίων χιλιόγραμμων διοξειδίου του θείου και 152 εκατομμυρίων χιλιόγραμμων οξειδίου του αζώτου. Αυτές οι εκπομπές αντιστοιχούν στις ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από 6 εκατομμύρια αυτοκίνητα ή το ετήσιο απορροφημένο διοξείδιο του άνθρακα από 12,3 εκατομμύρια μονάδες επιφάνειας δέντρων.

Οι απώλειες ενέργειας του μετασχηματιστή μπορούν να μειωθούν οικονομικοαποδοτικά κατά 10% έως 40%, χρησιμοποιώντας ποικίλες τεχνολογίες μετασχηματιστών, οι οποίες έχουν ήδη ευρέως διαδεδομένη χρήση από τη βιομηχανική εταιρία και δεν αποτελούν απειλή για την αξιοπιστία ή την ασφάλεια των συστημάτων διανομής της εταιρίας. Η επίτευξη 0,1% στη μέση απόδοση των μετασχηματιστών της εταιρίας σε ένα μόνο χρόνο μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας 2.9 δισεκατομμυρίων kWh και σε μείωση εκπομπών που αντιστοιχούν στην απομάκρυνση 240.000 αυτοκινήτων από τους δρόμους για ένα χρόνο, [2.5].

### **2.3.1 Απόδοση μετασχηματιστών**

Οι μετασχηματιστές αποτελούν το συνδετικό κρίκο στο σύστημα ισχύος κάθε νέας ή προϋπάρχουσας κατασκευής είναι. Οι μετασχηματιστές συχνά εξετάζονται όσον αφορά στην αυστηρώς τεχνική απόδοση και λαμβάνονται ως ευκαιρία εξοικονόμησης ενέργειας. Το γεγονός ότι οι μετασχηματιστές ενεργοποιούνται 24 ώρες ημερησίως, κάθε ημέρα, σημαίνει ότι σημαντικό ποσό ενέργειας καταναλώνεται στον πυρήνα τους, το οποίο αναφέρεται ως απώλειες πυρήνα.

Οι μετασχηματιστές διανομής είναι πολύ αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές με βαθμό απόδοσης πάνω από 95%. Η απόδοση ισχύος οποιασδήποτε ηλεκτρικής μηχανής ορίζεται ως ο λόγος της χρήσιμης ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου. Η απόδοση μπορεί να καθορισθεί με ταυτόχρονη μέτρηση των ισχύων εξόδου και εισόδου. Ειδικά για μεγάλες μηχανές μία τέτοια μέτρηση είναι δαπανηρή και δύσκολη. Επιπλέον, όταν η απόδοση είναι υψηλή, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, εάν η απόδοση εκφραστεί μέσω των απωλειών. Οι απώλειες του μετασχηματιστή χωρίζονται σε απώλειες κενού φορτίου και σε απώλειες φορτίου. Οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές, ενώ οι απώλειες φορτίου είναι ανάλογες του φορτίου του μετασχηματιστή.

Η απόδοση του μετασχηματιστή βελτιώνεται με τη μείωση των απωλειών του. 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 σχεδιάσής του.

Η ιδεατή *σχεδίαση* του 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. Όμως, η μείωση της μαγνητικής επαγωγής απαιτεί 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 μετασχηματιστή με μειωμένες απώλειες είναι μία επαναληπτική διαδικασία που περιλαμβάνει ένα συμβιβασμό από τη μία 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. Η επιλογή των υλικών έγκειται στη μείωση του συνολικού κόστους, στην ικανοποίηση των απαιτήσεων των πελατών και στην προσέγγιση των επιπέδων απόδοσης και ασφάλειας. Οι σύγχρονες τεχνικές σχεδίασης με τη βοήθεια Η/Υ επιτρέπουν πολλές μεταβολές στις μεταβλητές σχεδίασης με αποτέλεσμα την επιλογή της βέλτιστης τεχνικοοικονομικά λύσης.

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 περαιτέρω μειώσεις των απωλειών κενού φορτίου χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο χαραγμένο με laser, στον οποίο οι κόκκοι είναι προσανατολισμένοι κατά την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Επίσης, 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. 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.

Η επιλογή της ονομαστικής ισχύος του μετασχηματιστή επηρεάζει την απόδοσή του. Αν επιλεγεί μετασχηματιστής με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ από την απαιτούμενη, τότε αυξάνονται οι απώλειες κενού φορτίου, ενώ, αν επιλεγεί μετασχηματιστής μικρότερου μεγέθους, τότε αυξάνονται οι απώλειες φορτίου. 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 ισχύ.

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

*Τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης* έχουν πρόσφατα εφαρμοστεί για τη βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών μέσω της μείωσης των απωλειών κενού φορτίου (οι απώλειες φορτίου παραμένουν αμετάβλητες). Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των δένδρων απόφασης προσδιορίζονται οι πιο σημαντικές παράμετροι, που επηρεάζουν τις απώλειες κενού φορτίου. Οι παράμετροι αυτές είναι η μαγνητική επαγωγή, οι μέσες ειδικές απώλειες (στα 15000 και στα 17000 Gauss) του μαγνητικού υλικού των τεσσάρων ατομικών πυρήνων, ο λόγος του πραγματικού προς το θεωρητικό συνολικό βάρος των τεσσάρων ατομικών

πυρήνων και ο λόγος των πραγματικών προς τις θεωρητικές συνολικές απώλειες κενού φορτίου των τεσσάρων ατομικών πυρήνων. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι γνωστές πριν από την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής των μετασχηματιστών.

Τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζονται για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, χρησιμοποιώντας ως είσοδο τις τιμές των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί από τα δένδρα απόφασης. Η πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου με χρήση των νευρωνικών δικτύων είναι πολύ ακριβής (μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα 1.6%) και εφαρμόζεται με επιτυχία στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα, [2.6].

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής τύπου τυλιχτού πυρήνα αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς ατομικούς πυρήνες. Όταν πρόκειται να κατασκευαστεί μία παρτίδα μετασχηματιστών (ίδια μελέτη και ίδιος τύπος μετασχηματιστή), τότε πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα της ομαδοποίησης των πυρήνων, δηλαδή να συνδυαστούν οι ατομικοί πυρήνες με τον καλύτερο δυνατό τρόπο έτσι, ώστε να προκύψουν Μ/Σ με τις χαμηλότερες δυνατές απώλειες. Ένας προσεγγιστικός τρόπος, που χρησιμοποιείται παραδοσιακά για την επίλυση του προβλήματος ομαδοποίησης, είναι να συνδυαστούν ατομικοί πυρήνες με μεγαλύτερες και μικρότερες απώλειες έτσι, ώστε να προκύψουν μετασχηματιστές με μέσες απώλειες.

Οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης δίνουν μία πολύ καλύτερη λύση στο πρόβλημα της ομαδοποίησης των ατομικών πυρήνων. Πιο συγκεκριμένα, τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου καθενός από τους εναλλακτικούς τρόπους συνδυασμού των ατομικών πυρήνων. Επειδή ο αριθμός των συνδυασμών αυτών είναι αρκετά μεγάλος, χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι έτσι, ώστε να υπολογιστεί μέσα σε μερικές ανακυκλώσεις η βέλτιστη διάταξη των ατομικών πυρήνων.

### **2.3.2 Κόστος απωλειών**

Οι ηλεκτρικές εταιρίες προμηθεύονται μετασχηματιστές με βάση το κριτήριο του *συνολικού κόστους κτήσης*, [2.7]. Ανάμεσα σε εναλλακτικές προσφορές, πιο συμφέρουσα είναι η προμήθεια των μετασχηματιστών με το μικρότερο συνολικό κόστος κτήσης, συνυπολογίζοντας το κόστος των απωλειών με την τιμή πώλησης των μετασχηματιστών. Ωστόσο, οι περισσότεροι βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες δεν αξιολογούν τις απώλειες των μετασχηματιστών. Ο λόγος είναι ότι προμηθεύονται μετασχηματιστές σε μικρές ποσότητες και επιπλέον δεν αγοράζουν τους Μ/Σ απευθείας από τους κατασκευαστές αλλά μέσω αντιπροσώπων τους. Οι βιομηχανικοί χρήστες μπορούν, αντί να μελετούν διεξοδικά όλες τις παραμέτρους κόστους των απωλειών των μετασχηματιστών (όπως κάνουν οι ηλεκτρικές εταιρίες), να χρησιμοποιούν μία περισσότερο απλή αλλά αποδοτική προσέγγιση μέσω της ζήτησης ενέργειας και του ποσού με το οποίο η ηλεκτρική εταιρία τους χρεώνει την ενέργεια. Η δυσκολία της μεθόδου αυτής έγκειται στην πρόβλεψη της τιμής με την οποία η ηλεκτρική εταιρία θα τους χρεώνει την ενέργεια στο μέλλον.

### **2.3.3 Ειδικοί τύποι μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης**

Εκτός από τους συμβατικούς μετασχηματιστές υπάρχουν και οι λεγόμενοι υπεραγώγιμοι μετασχηματιστές υψηλής θερμοκρασίας, οι οποίοι υπόσχονται σημαντικές βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης. Σε ένα υπεραγώγιμο μετασχηματιστή υψηλής θερμοκρασίας (HTS) τα συμβατικά πηνία αντικαθίστανται με υπεραγώγιμο σύρμα και για την ψύξη αντί για λάδι χρησιμοποιείται υγρό άζωτο. Οι μετασχηματιστές HTS προσφέρουν βελτιωμένες ενεργειακές αποδοτικότητες, μειωμένα περιβαλλοντολογικά προβλήματα και σημαντικά πλεονεκτήματα στο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος.

Η επίδραση των μετασχηματιστών στο περιβάλλον οφείλεται στο ανόργανο λάδι που περιέχουν, στις απώλειες ισχύος και στο θόρυβο που παράγουν. Η άμεση ευνοϊκή

περιβαντολογική επίδραση μέσω των HTS μετασχηματιστών είναι η εξάλειψη του λαδιού του μετασχηματιστή, το οποίο αποτελεί ενδεχόμενο κίνδυνο φωτιάς και δεν είναι φιλικό προς το περιβάλλον.

Οι μετασχηματιστές HTS μπορούν να έχουν μειωμένο βάρος και μέγεθος συγκριτικά με τους συμβατικούς μετασχηματιστές, γεγονός που συνεισφέρει στη βελτιωμένη λειτουργία και διατήρηση μιας ηλεκτρικής εταιρίας. Επίσης, δύναται να σχεδιαστούν οικονομικά ώστε να υπερφορτίζονται χωρίς να υπάρχουν απώλειες ζώης και επιπρόσθετες απώλειες φορτίου.

#### **2.4 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ**

Το βασικό χαρακτηριστικό των μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης είναι ότι μπορούν να βοηθήσουν τις ηλεκτρικές εταιρίες να εκπληρώσουν μία ποικιλία στρατηγικών στόχων, όπως η μείωση των λειτουργικών εξόδων του συστήματος, η επίτευξη χαμηλού κόστους περιβαλλοντολογικών απολαβών, η βελτίωση της εξυπηρέτησης των πελατών και η μείωση του ηλεκτρικού φορτίου με τη συνεπαγόμενη εξοικονόμηση ενέργειας.

Ήδη, πολλά από τα προγράμματα εξοικονόμησης ενέργειας που εκπονούνται σε διεθνές επίπεδο επικεντρώνονται στους μετασχηματιστές ισχύος και διανομής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πρόγραμμα μετασχηματιστών Energy Star, το οποίο εισήγαγε τον Απρίλιο του 1995 η υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος (Environmental Protection Agency-EPA) στις Η.Π.Α.: πρόκειται για έναν εθελοντικό συνεταιρισμό μεταξύ της EPA και των ηλεκτρικών εταιριών για την προώθηση της χρήσης οικονομικά αποδοτικών μετασχηματιστών διανομής, [2.8].

Η συμμετοχή των κατασκευαστών μετασχηματιστών σε τέτοιου είδους πρωτοβουλίες συνεπάγεται σημαντικά πλεονεκτήματα όπως η δημόσια αναγνώριση των περιβαλλοντολογικών προσπαθειών τους και η τεχνική υποστήριξη για την αύξηση της κερδοφορίας των αγορών μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης (μελέτη και ανάπτυξη λογισμικού για το μέγεθος των μετασχηματιστών, εργαλεία εκτίμησης μετασχηματιστών διανομής που βοηθούν τις εταιρίες να συνυπολογίσουν τόσο τα οικονομικά όσο και τα περιβαντολογικά πλεονεκτήματα των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών διανομής και να εκτιμήσουν πολλαπλές προσφορές μετασχηματιστών). Στα πλαίσια αυτά, οι μηχανικοί των εταιριών θα είναι ικανοί να απαιτήσουν προσφορές και να επιλέξουν σχεδίαση μετασχηματιστών που ικανοποιεί μία ποικιλία ειδικών απαιτήσεων του δικτύου. Βασική προϋπόθεση σε αυτήν την προσπάθεια αποτελεί η ανάπτυξη κατάλληλων τεχνικών μοντελοποίησης και πρόβλεψης των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους, κατεύθυνση στην οποία επιχειρεί να συμβάλλει η ανάλυση των επόμενων κεφαλαίων της παρούσας διατριβής.

## 2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] [http://imm.demokritos.gr/solwin/Project/about\\_project/state\\_of\\_the\\_art/Greece/body\\_greece.html](http://imm.demokritos.gr/solwin/Project/about_project/state_of_the_art/Greece/body_greece.html)
- [2.2] [http://www.europarl.eu.int/meetdocs/2004\\_2009/documents/dv/st10721\\_/st10721\\_el.pdf](http://www.europarl.eu.int/meetdocs/2004_2009/documents/dv/st10721_/st10721_el.pdf)
- [2.3] G. Zorpette, “Utilities Get Serious About Efficiency,” *IEEE Spectrum*, May 1993, pp. 42-43.
- [2.4] L. Lamarre, “Energy Efficiency: A Hard Sell, “ *IEEE Power Engineering Review*, Aug. 1995, pp. 13-16.
- [2.5] T.J. Hammons, B. Kennedy, R. Lorand, S. Thigpen, B.W McConnell, S. Rouse, T.A. Prevost, C. Pruess, S.J. Daile, YR. Ramanan, T.L. Baldwin, “Future Trends in Energy-Efficient Transformers,” *IEEE Power Engineering Review*, Jul. 1998, pp. 5-16.
- [2.6] P.S. Georgilakis, N.D. Hatziaergyriou, D. Paparigas, “AI helps reduce transformer iron losses,” *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 12, No. 4, pp. 41-46, 1999.
- [2.7] Π. Γεωργιλάκης, Α. Σουφλάρης, Δ. Παπαρήγας, «Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών διανομής υψηλής ενεργειακής απόδοσης σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς», Σύνοδος Ελληνικής Επιτροπής CIGRE, Αθήνα, Μάρτιος 2002.
- [2.8] <http://www.energystar.gov>



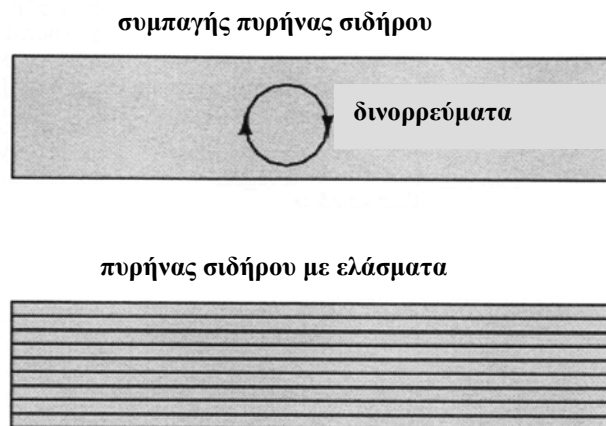
### 3.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

$S_1$	:	Φαινόμενη ισχύς εισόδου
$S_2$	:	Φαινόμενη ισχύς εξόδου
$P_1$	:	Πραγματική ισχύς εισόδου
$P_2$	:	Πραγματική ισχύς εξόδου
$Q_1$	:	Άεργη ισχύς εισόδου
$Q_2$	:	Άεργη ισχύς εξόδου
$P_{απ}$	:	Πραγματικές απώλειες
$P_{fe}$	:	Απώλειες σιδήρου
$P_{cu}$	:	Απώλειες χαλκού
$P_Y$	:	Απώλειες δινορρευμάτων
$P_{\Delta}$	:	Απώλειες υστέρησης
$P_{1cu}$	:	Απώλειες χαλκού στο πρωτεύον τύλιγμα
$P_{2cu}$	:	Απώλειες χαλκού στο δευτερεύον τύλιγμα
$Q_{απ}$	:	Άεργες απώλειες
$Q_{\sigma}$	:	Απώλειες σκέδασης
$Q_{1\sigma}$	:	Απώλειες σκέδασης στο πρωτεύον τύλιγμα
$Q_{2\sigma}$	:	Απώλειες σκέδασης στο δευτερεύον τύλιγμα
$Q_m$	:	Απώλειες μαγνήτισης

Όπως το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο οδηγεί σε ύπαρξη επαγόμενων ρευμάτων στα δευτερεύοντα τυλίγματα, εξαιτίας της χρονικά μεταβαλλόμενης ροής αναπτύσσονται τάσεις από επαγωγή (νόμος *Faraday*), οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα την κυκλοφορία ρευμάτων (δινορρευμάτων) στο εσωτερικό του υλικού (κάθετα προς τα ελίσματα του πρωτεύοντος). Σ' αυτήν την περιστροφική κίνηση οφείλουν και το όνομα τους (όπως οι δίνες ενός ρέματος που δεν κινούνται σε ευθύγραμμες τροχιές, αλλά περιστρέφονται). Τα ρεύματα αυτά προκαλούν απώλειες *Joule*, υπό μορφή θερμότητας, που ονομάζονται **απώλειες δινορρευμάτων**, [3.2]. Ωστόσο, ο σίδηρος δεν είναι τόσο καλός αγωγός του ηλεκτρισμού όσο ο χαλκός ή το αλουμίνιο, υλικά από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως τα τυλίγματα. Για το λόγο αυτό τα «δινορρεύματα» πρέπει να υπερνικήσουν σημαντική ηλεκτρική αντίσταση καθώς περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα. Υπερνικώντας την αντίσταση που οφείλεται στο σίδηρο, ελευθερώνουν ισχύ με τη μορφή θερμότητας, η οποία αποτελεί αιτία μείωσης της απόδοσης του μετασχηματιστή και είναι δύσκολο να εξαλειφθεί.

Η κύρια στρατηγική μείωσης των περιττών δινορρευμάτων στους πυρήνες των μετασχηματιστών είναι η διαμόρφωση τους σε ελάσματα, καθένα από τα οποία επικαλύπτεται με μονωτικό υλικό, έτσι ώστε ο πυρήνας να διαμερίζεται σε λεπτά τμήματα και τελικά να επιτυγχάνεται κυκλοφορία των δινορρευμάτων σε πολύ μικρό βάθος πυρήνα. Οι πυρήνες με ελάσματα είναι καθιερωμένοι σε όλους σχεδόν τους μετασχηματιστές που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες. Η αύξηση των απωλειών δινορρευμάτων με τη συχνότητα (π.χ. τα 400 Hz που χρησιμοποιούνται σε πολλές στρατιωτικές και αεροναυτικές εφαρμογές) καθιστά αναγκαία τη χρησιμοποίηση λεπτότερων στρωμάτων ώστε να διατηρούνται οι απώλειες σε ένα ελάχιστο επίπεδο με το ανεπιθύμητο όμως αποτέλεσμα της αύξησης του κατασκευαστικού κόστους του μετασχηματιστή.

Εναλλακτικά, μία παρόμοια τεχνική ελαχιστοποίησης των απωλειών δινορρευμάτων, πιο αποτελεσματική σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων, είναι η κατασκευή του πυρήνα από ρινίσματα σιδήρου αντί λεπτών φύλλων. Όπως τα ελάσματα, τα ρινίσματα σιδήρου επικαλύπτονται ξεχωριστά με ένα ηλεκτρικά μονωτικό υλικό, το οποίο καθιστά τον πυρήνα μη αγωγίμο εκτός από το πάχος του κάθε τεμαχίου. Τέτοιοι πυρήνες απαντώνται συχνά σε μετασχηματιστές που χειρίζονται ρεύματα στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων.



**Σχήμα 3.2:** Διαμόρφωση υλικού πυρήνα μετασχηματιστών για τη μείωση των δινορρευμάτων.

Ένα άλλο είδος «απωλειών πυρήνα» είναι εκείνο της **μαγνητικής υστέρησης**. Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν την τάση να διατηρήσουν κάποιο επίπεδο μαγνήτισης μετά την έκθεσή τους σε κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται μαγνητική υστέρηση. Για να υπερνικηθεί η αντίθεση κατά την εκάστοτε αλλαγή πολικότητας του μαγνητικού πεδίου, το οποίο παράγεται από τα τυλίγματα του πρωτεύοντος, απαιτείται κάποια επένδυση σε ενέργεια. Η μείωση αυτού του είδους απωλειών μπορεί να επιτευχθεί μέσα από σωστή επιλογή υλικού για τον πυρήνα, π.χ. ένα κράμα με χαμηλή υστέρηση, όπως αποδεικνύεται από μία «λεπτή» καμπύλη υστέρησης  $B/H$ , καθώς και από μία σχεδίαση, η οποία θα επιτρέπει ένα ελάχιστο όριο ανοχής του πυρήνα στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής (μεγάλη περιοχή διατομής).

Οι **απώλειες ενέργειας** στους μετασχηματιστές έχουν την τάση να επιδεινώνονται αυξανόμενης της συχνότητας. Το **επιδερμικό φαινόμενο** μέσα στα τυλίγματα των αγωγών μειώνει τη διαθέσιμη επιφάνεια διατομής για τη ροή ηλεκτρονίων, αυξάνοντας την ενεργό αντίσταση σε συνάρτηση με τη συχνότητα και προκαλώντας περισσότερες απώλειες ισχύος μέσω των αντιστάσεων. Οι **μαγνητικές απώλειες πυρήνα** αυξάνονται επίσης ραγδαία με τη συχνότητα, οδηγώντας σε σοβαρές επιπτώσεις από τα φαινόμενα της υστέρησης και των δινορρευμάτων. Για το λόγο αυτό, οι μετασχηματιστές μεγάλου μεγέθους σχεδιάζονται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αποτελεσματική λειτουργία τους σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων. Στα περισσότερα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπου η συχνότητα των γραμμών μεταφοράς είναι πολύ σταθερή, μπορεί να θεωρηθεί ότι η μεγάλη συχνότητα δεν αποτελεί ποτέ πρόβλημα, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις αρμονικών που παράγονται από μη γραμμικά φορτία.

Όπως είναι γνωστό, οι μη ημιτονοειδείς κυματομορφές είναι ισοδύναμες με μία σειρά πολλαπλών ημιτονοειδών κυματομορφών με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες. Σε συστήματα ισχύος οι συχνότητες αυτές είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, δηλαδή είναι πάντα υψηλότερες από τη συχνότητα σχεδίασης του μετασχηματιστή, [3.3]. Για πάρα πολύ υψηλές μάλιστα συχνότητες είναι δυνατό να προκληθεί σοβαρή υπερθέρμανση. Οι μετασχηματιστές ισχύος μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να χειρίζονται συγκεκριμένα επίπεδα αρμονικών στα ενεργειακά συστήματα και η ικανότητα αυτή δηλώνεται μερικές φορές με το ονομαστικό μέγεθος του «παράγοντα  $K$ ».

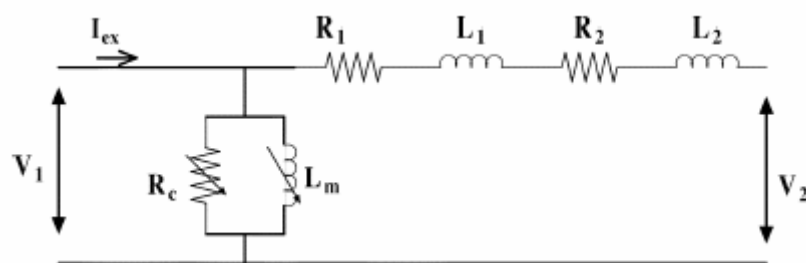
### 3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ-ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Για την κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών χρησιμοποιούνται ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού, μονωμένα μεταξύ τους. Το σιδηρομαγνητικό υλικό αποτελείται από κράμα πυριτίου-σιδήρου με προσανατολισμένους κόκκους. Ο σίδηρος χρησιμοποιείται επειδή έχει μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα (δηλαδή πολύ καλές μαγνητικές ιδιότητες), επιτρέποντας λειτουργία σε υψηλή μαγνητική επαγωγή σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και το χαμηλότερο κόστος από όλα τα διαθέσιμα σιδηρομαγνητικά υλικά. Ο προσανατολισμός των κόκκων ευνοεί τη διέλευση της μαγνητικής ροής προς μία ορισμένη διεύθυνση, η οποία ονομάζεται διεύθυνση κύλισης. Η διεύθυνση κύλισης είναι συνεπώς η κατεύθυνση με τις ιδανικές μαγνητικές ιδιότητες, ενώ στις υπόλοιπες διευθύνσεις του υλικού οι μαγνητικές του ιδιότητες είναι αρκετά διαφορετικές. Το γεγονός αυτό καθιστά το υλικό έντονα ανισότροπο. Οι κατασκευαστές των μαγνητικών υλικών χρησιμοποιούν τη μέθοδο της ψυχρής εξέλασης για να πετύχουν τον προσανατολισμό των κόκκων.

Με κατάλληλες μηχανικές και χημικές επεξεργασίες το σιδηρομαγνητικό υλικό αποκτά τις ιδιότητες εκείνες που είναι απαραίτητες για να χρησιμοποιηθεί ως υλικό κατασκευής του μαγνητικού κυκλώματος των μετασχηματιστών και οι οποίες είναι οι εξής:

- Μέγιστη μαγνητική επαγωγή για απόκτηση υψηλής επαγωγής εντός εναλλασσόμενου πεδίου.
- Ελάχιστες ειδικές απώλειες πυρήνα για χαμηλές απώλειες κενού φορτίου.
- Χαμηλή φαινόμενη ισχύς εισόδου για χαμηλό ρεύμα κενού φορτίου.
- Χαμηλή μαγνητοσυστολή (δηλαδή αλλαγή των διαστάσεων του υλικού από την επίδραση του μαγνητισμού) για χαμηλό επίπεδο θορύβου.
- Υψηλό βαθμός μόνωσης.
- Καλές μηχανικές ιδιότητες (απαραίτητες για την επεξεργασία του υλικού κατά τη διάρκεια κατασκευής του πυρήνα του μετασχηματιστή).

Στο Σχήμα 3.3 παριστάνεται το κυκλωματικό μοντέλο για τη μελέτη των μαγνητικών απωλειών πυρήνα ενός μονοφασικού μετασχηματιστή με λειτουργία στο κενό φορτίο. Στο πρωτεύον τύλιγμα η πτώση τάσης αγνοείται. Η μη γραμμική συμπεριφορά των απωλειών πυρήνα αναπαρίσταται από μία μεταβλητή αντίσταση  $R_c$  και από μια μεταβλητή επαγωγή  $L_m$ . Η αντίσταση και η επαγωγή σκέδασης πρωτεύοντος συμβολίζονται  $R_1$  και  $L_1$ , αντίστοιχα, ενώ η αντίσταση και η επαγωγή σκέδασης δευτερεύοντος, ανηγμένες στο πρωτεύον τύλιγμα, συμβολίζονται, αντίστοιχα,  $R_2$  και  $L_2$ . Οι στιγμιαίες τάσεις εισόδου και εξόδου δηλώνονται ως  $V_1$  και  $V_2$ .



**Σχήμα 3.3:** Κυκλωματικό μοντέλο μονοφασικού μετασχηματιστή υπό κενό φορτίο.

Σε συνθήκες κενού φορτίου μετρώνται οι μαγνητικές απώλειες πυρήνα, οι οποίες όπως έχει ήδη αναφερθεί έχουν δύο συνιστώσες, τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες δινορρευμάτων. Η μονάδα μέτρησής τους είναι το Watt/kg σε ειδικά πάχη ελασμάτων,

συχνότητα και μέγιστη πυκνότητα ροής. (Αντίστοιχα, σε συνθήκες βραχυκυκλώματος, μετρώνται οι απώλειες φορτίου, οι οποίες οφείλονται στο ρεύμα που διέρχεται από τα τυλίγματα. Αποτελούνται από τις απώλειες τυλιγμάτων και τις διαφεύγουσες απώλειες στα τυλίγματα, τα τοιχώματα του κελύφους, τις γωνιακές συνδέσεις των πυρήνων κτλ.). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από τα δύο γενικευμένα είδη απωλειών σιδήρου, στο υλικό του πυρήνα υπάρχουν και πρόσθετες απώλειες που προκαλούνται από το συντελεστή κατασκευής (Building Factor), ο οποίος επιφέρει μία αύξηση 10% στις απώλειες πυρήνα. Ο συντελεστής αυτός είναι γενικά μία συνάρτηση του είδους του υλικού του πυρήνα, της γεωμετρίας του, του τρόπου συσσώρευσης των ελασμάτων και της ποιότητας κατασκευής του, [3.4, 3.5].

Μία περιοδική παροχή τάσης  $V_1$  στο κύκλωμα του Σχήματος 3.3 παράγει ένα βρόχο υστέρησης συνεχούς ρεύματος (ΣΡ). Η περιοχή στο εσωτερικό του βρόχου B-H αναπαριστά τις απώλειες υστέρησης ΣΡ, οι οποίες αυξάνονται με τη μέγιστη πυκνότητα ροής  $B_m$  και τη συχνότητα διέγερσης  $f$ . Οι κατασκευαστές ελασμάτων παρέχουν τόσο τις απώλειες υστέρησης όσο και τα δεδομένα των μαγνητικών απωλειών πυρήνα συναρτήσει του  $B_m$  για διάφορες συχνότητες. Οι κλασσικές απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται από τα  $f$ ,  $B_m$ , καθώς επίσης και από την αντίσταση και το πάχος των ελασμάτων του υλικού του πυρήνα. Όπως είναι γνωστό, η επίδραση των δινορρευμάτων συνίσταται στην αύξηση του  $H$  για δεδομένο  $B$  επάνω στο βρόχο υστέρησης.

### 3.2.1 Απώλειες Υστέρησης

Οι απώλειες υστέρησης συνδέονται στενά με την απορρόφηση ενέργειας από μέσο, το οποίο διαπερνάται από μαγνητικό πεδίο. Εάν το μέσο είναι ο,τιδήποτε άλλο εκτός του κενού, αποθηκεύεται σε αυτό μόνο μέρος της ενέργειας που λαμβάνεται από το ηλεκτρικό κύκλωμα διέγερσης, το οποίο είναι ανακτήσιμο από το μέσο όταν η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) διέγερσης αφαιρεθεί. Το υπόλοιπο της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα ως αποτέλεσμα έργου που εκτελείται στο υλικό του μέσου κατά τη διάρκεια της απόκρισής του στη μαγνήτιση.

Για τον υπολογισμό των απωλειών υστέρησης, καθορίζεται αρχικά η αποθηκευμένη ενέργεια ανά μονάδα όγκου σε σημείο του μαγνητικού πεδίου όταν η μαγνητική επαγωγή στο σημείο αυτό μεταβληθεί από την τιμή  $B_1$  στην τιμή  $B_2$ . Στην περίπτωση αυτή η ενέργεια ανά μονάδα όγκου που απορροφάται από το μέσο εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση, [3.6]:

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

όπου  $B$  είναι η μαγνητική επαγωγή (ή πυκνότητα μαγνητικής ροής) και  $H$  είναι η μαγνητική ένταση.

Η ολοκλήρωση της σχέσης (3.1) προϋποθέτει τη γνώση της  $H$  ως συνάρτησης της  $B$  για τη θεωρούμενη μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Έτσι, αν η πυκνότητα ροής  $B$  εκτελεί κυκλική μεταβολή και το μέσο το οποίο διαπερνάται από τη ροή είναι σιδηρομαγνητικό υλικό απαιτείται η καμπύλη μαγνήτισης του υλικού του πυρήνα κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου.

Η μαγνητική επαγωγή  $B$  και η πεδιακή ένταση  $H$  συνδέονται με την ακόλουθη σχέση, [3.7]:

$$B = \mu_0 H + M \quad (3.2)$$

όπου  $M$  είναι η μαγνήτιση και  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ( $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$ ).

Η σχέση (3.2) εφαρμόζεται στους μόνιμους μαγνήτες, ενώ στα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, όπου το  $M$  διαφέρει πολύ λίγο από το  $B$ , χρησιμοποιείται ευρύτατα η σχέση:

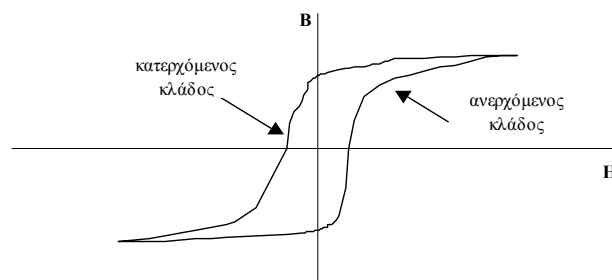
$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (3.3)$$

όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού και  $\mu_r$  η σχετική μαγνητική διαπερατότητά του.

Η σχέση (3.3) ισχύει στη γραμμική περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης, στην οποία το  $B$  είναι ευθέως ανάλογο του  $H$ . Ωστόσο, μπορεί να επεκταθεί και να ισχύει προσεγγιστικά και στη μη γραμμική περιοχή. Στην περίπτωση όμως αυτή το  $\mu$  δεν είναι σταθερό, αλλά συνάρτηση του  $H$ ,  $\mu(H)$ , οπότε η σχέση (3.3) γίνεται:

$$B = \mu(H)H \quad (3.4)$$

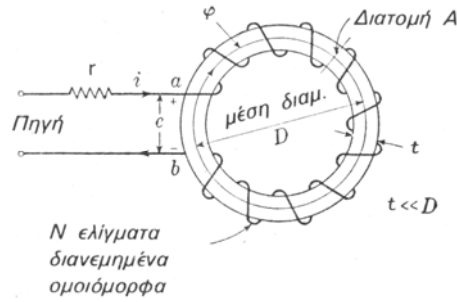
Το ολοκλήρωμα της σχέσης (3.1) είναι ανάλογο του εμβαδού που ορίζεται από την καμπύλη  $B(H)$  του μέσου και εξαρτάται από τις τιμές των  $B_1$  και  $B_2$ , καθώς και από τη μορφή της καμπύλης. Εάν η πυκνότητα ροής μειωθεί από μία ορισμένη τιμή σε μία μικρότερη τιμή, το αλγεβρικό σημείο του  $w$  είναι αρνητικό και αποδίδεται ενέργεια από το υλικό. Όταν το θεωρούμενο μέσο είναι σιδηρομαγνητικό υλικό, η καμπύλη μαγνήτισης μεταξύ δύο οποιοδήποτε τιμών  $B_1$  και  $B_2$ , οι οποίες αντιστοιχούν σε μειούμενες τιμές του  $H$ , είναι διαφορετική από την καμπύλη η οποία αντιστοιχεί σε αυξανόμενες τιμές του  $H$ . Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.4, ο βρόχος υστέρησης του σιδηρομαγνητικού υλικού αποτελείται από δύο κλάδους, τον ανερχόμενο κλάδο ή κλάδο μαγνήτισης και τον κατερχόμενο κλάδο ή κλάδο απομαγνήτισης. Λόγω της διαφορετικότητας των καμπυλών των δύο κλάδων, η ενέργεια που απορροφάται από το υλικό όταν η πυκνότητα ροής αυξηθεί από  $B_1$  σε  $B_2$  είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που επιστρέφεται όταν η πυκνότητα ροής μειώνεται από  $B_2$  σε  $B_1$ . Η διαφορά των δύο αυτών ενεργειών είναι ίση με το μέτρο των απωλειών υστέρησης.



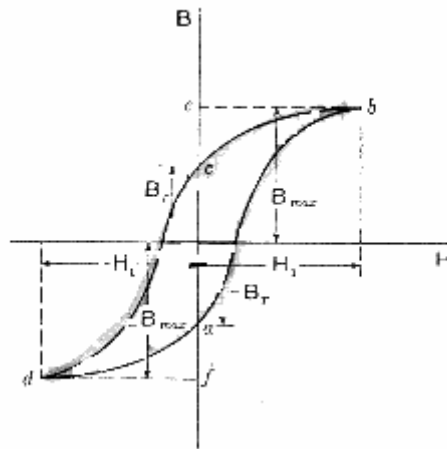
**Σχήμα 3.4:** Τυπικός βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

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. Προκύπτει με κυκλική μαγνήτιση σιδηρομαγνητικού υλικού όπως του δακτυλίου που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5. Με γραφικό υπολογισμό του ολοκληρώματος της παραπάνω εξίσωσης είναι δυνατός ο καθορισμός της απώλειας υστέρησης ανά κύκλο, λόγω της μαγνητικής υστέρησης.

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει τη γραφική μέθοδο για την περίπτωση της αποθηκευμένης ενέργειας στο σύστημα του δακτυλίου του Σχήματος 3.5. Το πηνίο διέγερσης του δακτυλίου φέρει εναλλασσόμενο ρεύμα έτσι ώστε η ένταση του μαγνητικού πεδίου να αναστρέφεται κυκλικά μεταξύ των ορίων  $+H_1$  και  $-H_1$ , ενώ η συσχέτιση μεταξύ  $B$  και  $H$  φαίνεται στο βρόχο υστέρησης του Σχήματος 3.6.



**Σχήμα 3.5:** Δακτυλιοειδές μαγνητικό κύκλωμα διεγειρόμενο από πηνίο για την εξαγωγή ενεργειακών σχέσεων.



**Σχήμα 3.6:** Συσχέτιση B και H σε βρόχο υστέρησης

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

**Πίνακας 3.1:** Γραφική μέθοδος υπολογισμού αποθηκευμένης ενέργειας συστήματος δακτυλίου

Η παρουσία της υστέρησης ασκεί σημαντική επίδραση στην απόδοση, την ανύψωση της θερμοκρασίας και ως εκ τούτου στην ικανότητα πολλών ηλεκτρομαγνητικών συσκευών. Το ποσό της ενέργειας, η οποία χάνεται στον πυρήνα ανά μονάδα όγκου και ανά κύκλο λόγω

της υστέρησης εκφράζεται μέσω του εμβαδού του κλειστού βρόχου υστέρησης, δε λαμβάνεται όμως κάποια πληροφορία για το τμήμα του κύκλου όπου συμβαίνει η απώλεια.

Εμπειρικά, μέσω των αποτελεσμάτων μεγάλου αριθμού μετρήσεων πάνω σε δείγματα διαφόρων σιδήρων και χαλύβων που χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή ηλεκτρομαγνητικών συσκευών, προέκυψε ότι οι απώλειες υστέρησης ανά μονάδα όγκου και ανά κύκλο δίνονται από την παρακάτω σχέση, [3.6]:

$$w = \eta B_m^n \quad (3.5)$$

όπου  $\eta$  και  $n$  είναι σταθερές που λαμβάνουν τιμές εξαρτώμενες από το υλικό και  $B_m$  είναι η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής. Η σχέση (3.5) προτάθηκε αρχικά από τον *Steinmetz*, ο οποίος διαπίστωσε ότι είναι αρκετά ικανοποιητική μία τιμή του  $n$  ίση με 1.6, [3.8]. Νεότερες μελέτες σε μαγνητικά υλικά που κατασκευάστηκαν μετά την έρευνα του *Steinmetz* έδειξαν ότι η τιμή 1.6 για τον εκθέτη της (3.5) δεν επαρκεί. Για το λόγο αυτό συστήνεται προσεκτική χρησιμοποίηση της σχέσης (3.5), καθώς η τιμή του  $n$ , η οποία μπορεί να ποικίλει από 1.5 έως 2.5 είναι δυνατό να μην είναι σταθερή για ένα υλικό.

Για ορισμένα υλικά, μία έκφραση όπως η σχέση (3.5) δεν είναι επαρκώς ακριβής για γενική χρήση. Για το λόγο αυτό οι δύο σταθερές  $\eta$  και  $n$  πρέπει να υπολογισθούν για ορισμένη περιοχή του  $B_m$  και κατόπιν να χρησιμοποιούνται για τιμές του  $B_m$  μόνο μέσα στην περιοχή αυτή. Έτσι, η (3.5) μπορεί να γραφεί σε λογαριθμική μορφή ως εξής:

$$\log w = n \log B_m + \log \eta \quad (3.6)$$

δηλαδή υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της  $\log w$  και της  $\log B_m$ . Άρα, αν απεικονιστούν γραφικά μετρήσεις της  $\log w$  για διάφορες τιμές της  $\log B_m$ , τότε αυτές θα βρίσκονται πάνω σε μία ευθεία γραμμή με κλίση  $n$ . Θεωρητικά, δύο μόνο μετρήσεις των  $w$  και  $B_m$  είναι αρκετές για τον υπολογισμό των σταθερών  $\eta$  και  $n$ . Αν χρησιμοποιηθούν όμως περισσότερα ζεύγη τιμών, τότε θα φανεί ότι η σχέση (3.6) προσαρμόζεται καλά στις μετρήσεις. Αν οι μετρήσεις δε βρίσκονται πάνω σε μία ευθεία γραμμή, τότε η μορφή της εξίσωσης (3.5) δεν είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό των απωλειών υστέρησης, [3.9].

Οι *συνολικές απώλειες υστέρησης* σε υλικό όγκου  $V$  (σε  $\text{m}^3$ ), σε όλα τα σημεία του οποίου η πυκνότητα ροής είναι ομοιόμορφη και μεταβάλλεται κυκλικά με συχνότητα  $f$  κύκλους ανά δευτερόλεπτο μπορεί να εκφραστεί εμπειρικά ως εξής:

$$P_h = \eta V f B_m^n \quad (3.7)$$

Οι σχέσεις (3.5) και (3.7) ισχύουν μόνο κάτω από τη θεώρηση συμμετρικών βρόχων υστέρησης στους οποίους η πυκνότητα ροής  $B$  μεταβάλλεται μεταξύ ίσων θετικών και αρνητικών τιμών και στους οποίους δεν υφίστανται τοπικά επανεισερχόμενοι βρόχοι.

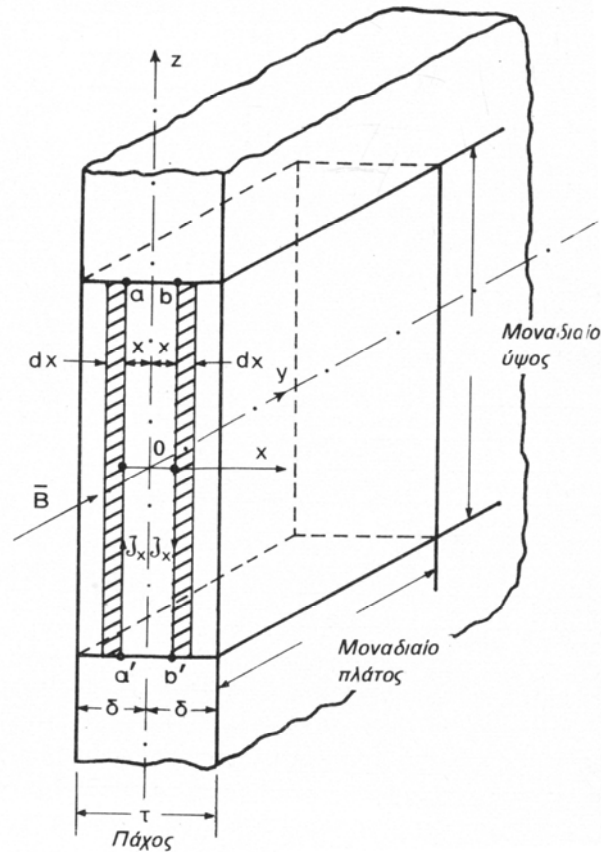
### 3.2.2 Απώλειες Δινορρευμάτων

Όταν σε ένα μέσο η μαγνητική ροή μεταβάλλεται με το χρόνο, εμφανίζεται σε αυτό ένα ηλεκτρικό πεδίο  $E$ , το γραμμικό ολοκλήρωμα του οποίου πάνω σε μία κλειστή διαδρομή, δίνεται από το νόμο επαγωγής του Faraday:

$$\oint_l E dl = - \frac{d}{dt} \int B_n ds \quad (3.8)$$

όπου  $l$  είναι η κλειστή διαδρομή, η οποία περικλείει το εμβαδόν που προσπίπτει η ροή  $\phi$ , δηλαδή  $\int \vec{B} \cdot \vec{n} ds$  και  $\vec{n}$  το μοναδιαίο άνωσμα κάθετα προς την επιφάνεια αυτή. Εάν το μέσο

είναι αγωγίμο εγκαθίσταται ένα ρεύμα γύρω από την κλειστή διαδρομή εξαιτίας της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης  $e$ , η οποία προέρχεται από το επικαμπύλιο (ή γραμμικό) ολοκλήρωμα του ηλεκτρικού πεδίου  $E$ . Τα ρεύματα αυτά ονομάζονται δινορρεύματα και η παρουσία τους έχει σαν αποτέλεσμα απώλειες θερμότητας (φαινόμενο *Joule*) λόγω της κυκλοφορίας ρευμάτων εντός του υλικού, οι οποίες ονομάζονται απώλειες δινορρευμάτων. Η ενέργεια απορροφάται από το κύκλωμα, το οποίο προκαλεί το πεδίο και μετατρέπεται σε θερμότητα στο μέσο.



Σχήμα 3.7: Μοναδιαίο στοιχείο ελάσματος για υπολογισμό απώλειας από δινορρεύματα.

Η σχετικά μεγάλη πυκνότητα ροής σε σιδηρομαγνητικά υλικά και το γεγονός ότι η ειδική αντίσταση των υλικών αυτών δεν είναι πολύ υψηλή, καθιστούν τις επαγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις και συνεπώς τα δινορρεύματα και την απώλεια από αυτά υπολογίσιμα εάν δε ληφθούν μέτρα για μείωσή τους. Οι απώλειες αυτές έχουν ιδιαίτερη σημασία για τον καθορισμό της απόδοσης της ανύψωσης της θερμοκρασίας και επομένως της ικανότητας των ηλεκτρομαγνητικών συσκευών στις οποίες παρατηρείται μεταβολή της πυκνότητας ροής.

Για τον υπολογισμό των εν λόγω απωλειών σε συνθήκες όμοιες με αυτές που υφίστανται στον πυρήνα του μετασχηματιστή, θεωρείται επίπεδη λεπτή μεταλλική πλάκα (Σχήμα 3.7) από ηλεκτρικά αγωγίμο υλικό, η οποία διαπερνάται από εναλλασσόμενη ροή  $\varphi$ . Έστω  $\tau$  το πάχος της πλάκας και  $\rho$  η ειδική αντίσταση όγκου του υλικού. Θεωρούμε επίσης ότι η πλάκα αποτελείται από όμοια ελάσματα με τέλεια μόνωση μεταξύ τους, έτσι ώστε να μην υφίστανται ρεύματα κάθετα προς τα ελάσματα. Ισχύει επίσης η παραδοχή ότι προσπίπτει στην πλάκα ομοιόμορφα διανεμημένο μαγνητικό πεδίο, η διεύθυνση του οποίου είναι παράλληλη προς τον άξονα (κατά μήκος) της πλάκας και το μέτρο του μεταβάλλεται με το χρόνο:

$$B = B_m \cos \omega t \quad (3.9)$$

Η επαγόμενη ΗΕΔ  $e$  στην οριακή γραμμή  $aa'b'b$  μιας επιφάνειας μέσω της οποίας μεταβάλλεται η ροή, δίνεται από τη σχέση:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (3.10)$$

Η επίδραση της τάσης αυτής στο κύκλωμα  $aa'b'b$ , προκαλεί κυκλοφορία ρεύματος γύρω από την οριακή γραμμή και συνεπώς δημιουργία μαγνητεγερτικής δύναμης με φορά αντίθετη στη μεταβολή της ροής  $\phi$ . Η διανομή της ροής στο θεωρούμενο εμβαδόν είναι τέτοια ώστε να εμφανίζεται μικρότερη πυκνότητα ροής στο κέντρο της πλάκας παρά κοντά στην περιβάλλουσα επιφάνεια, εκφράζοντας την τάση της συνολικής ροής να συγκεντρωθεί κοντά στην περιβάλλουσα επιφάνεια της πλάκας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επιδερμικό. Παρόμοιο φαινόμενο συμβαίνει σε ηλεκτρικό αγωγό μεταβαλλόμενου ρεύματος, ακόμα και αν είναι κατασκευασμένος από μη μαγνητικό υλικό, έχοντας δηλαδή μοναδιαία σχετική μαγνητική διαπερατότητα. Σε έναν τέτοιο αγωγό η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος είναι μεγαλύτερη κοντά στην επιφάνεια.

Τόσο το μαγνητικό όσο και το ηλεκτρικό επιδερμικό φαινόμενο έχουν την ίδια φύση, και επομένως υπόκεινται στην ίδια μαθηματική ανάλυση, η οποία συνίσταται στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης της διάχυσης, λαμβάνοντας υπόψη τις σχετικές οριακές συνθήκες. Η περιπλοκότητα όμως μιας τέτοιας ανάλυσης έχει σαν αποτέλεσμα να αγνοείται συνήθως αυτό το φαινόμενο και τα αποτελέσματα που προκύπτουν έχουν μια σχετική ακρίβεια για πολλές εφαρμογές, ειδικά σε συσκευές οι οποίες διαθέτουν πυρήνες με ελάσματα.

Με βάση τις θεωρήσεις αυτές αποδεικνύεται ότι σε μαγνητικό κύκλωμα, το οποίο περιέχει όγκο  $V$  υλικού πυρήνα σε ελάσματα και το οποίο υπόκειται στις ίδιες μαγνητικές συνθήκες με το μοναδιαίο όγκο του Σχήματος 3.7, η μέση τιμή των απωλειών ισχύος από δινορρεύματα, δίνεται από τη σχέση του *Steinmetz*:

$$P_e = \frac{\pi^2 f^2 \tau^2 B_m^2 V}{6\rho} \quad (3.11)$$

όπου ο όγκος του υλικού του πυρήνα  $V$  εκφράζεται σε  $m^3$ ,  $B_m$  είναι η μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής σε Weber/ $m^2$ ,  $f$  η συχνότητα μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής (ή πυκνότητας ροής) σε Hz,  $\rho$  η ειδική αντίσταση του υλικού σε  $\Omega m$ ,  $\tau$  το πάχος του ελάσματος σε m και η τιμή  $P_e$  σε Watts, [3.6].

Η σχέση (3.11) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο οι απώλειες δινορρευσμάτων εξαρτώνται από τους διάφορους παράγοντες και δεν αποτελεί ακριβή σχέση υπολογισμού των πραγματικών απωλειών πυρήνα. Με βάση τη σχέση αυτή, οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες προς το τετράγωνο της συχνότητας, το τετράγωνο του πάχους του ελάσματος και το τετράγωνο της πυκνότητας ροής και αντιστρόφως ανάλογες της ειδικής αντίστασης του υλικού. Η απώλεια δινορρευσμάτων για ορισμένο υλικό γράφεται και ως εξής:

$$P_e = K_e f^2 \tau^2 B_m^2 V \quad (3.12)$$

όπου θεωρητικά η σταθερά  $K_e$  για ένα μαγνητικό υλικό υπολογίζεται από τη σχέση (3.13):

$$K_e = \frac{\pi^2}{6\rho} \quad (3.13)$$

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

### 3.2.3 Συνολικές Απώλειες Πυρήνα

Οι συνολικές απώλειες ισχύος που λαμβάνουν χώρα σε πυρήνες μετασχηματιστών, οι οποίοι υπόκεινται σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Προκύπτει επομένως ότι αν συνδυαστούν οι εμπειρικές σχέσεις (3.7) και (3.11), οι συνολικές απώλειες πυρήνα ανά μονάδα όγκου δίνονται από τη σχέση:

$$p_{\pi} = \frac{P_h + P_e}{V} = \eta f B_m^n + \frac{\pi^2 f^2 \tau^2 B_m^2}{6\rho} \quad (3.14)$$

Εάν η μέση τιμή της πυκνότητας ροής είναι η ίδια σε όλο τον όγκο  $V$  του πυρήνα, οι συνολικές απώλειες στον όγκο αυτό είναι:

$$P_{\pi} = V p_{\pi} \quad (3.15)$$

Συσκευές με σιδηρομαγνητικά υλικά τα οποία φέρουν εναλλασσόμενες ροές διαθέτουν σχεδόν πάντα ηλεκτρικά κυκλώματα, τα οποία εμπλέκουν τα αντίστοιχα μαγνητικά, π.χ. μετασχηματιστές και αντιδραστήρες σιδηρού πυρήνα έχουν σιδηρομαγνητικούς πυρήνες με ελάσματα ή από σκόνη, γύρω από τους οποίους τυλίγονται τα ελίσματα ενός ή περισσότερων πηνίων. Οι συνολικές απώλειες πυρήνα σχετίζονται με την ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται σε ένα τέτοιο πηνίο από τη μεταβαλλόμενη ροή. Η μέγιστη τιμή  $\Phi_m$  της ροής συναρτήσει της ενδεικνύμενης τιμής  $E$  της επαγόμενης ΗΕΔ σε πηνίο  $N$  ελιγμάτων, δίνεται από τη σχέση (3.16) και ισχύει στις περιπτώσεις που η ροή και συνεπώς η ΗΕΔ μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο:

$$\Phi_m = \frac{E}{4.44 f N} \quad (3.16)$$

Εάν η πυκνότητα ροής στο εμβαδόν  $A$  της διατομής του πυρήνα είναι ομοιόμορφη, τότε ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{A} = \frac{E}{4.44 f N A} \quad (3.17)$$

Για δεδομένο μετασχηματιστή, ο αριθμός ελιγμάτων και η διατομή του πυρήνα είναι σταθερά από κατασκευής. Έτσι η προηγούμενη σχέση γράφεται ως εξής:

$$B_m = K \frac{E}{f} \quad (3.18)$$

όπου, προφανώς, η σταθερά  $K = \frac{1}{4.44 N A}$ .

Τελικά, με αντικατάσταση της (3.18) στη (3.14), προκύπτει ότι η συνολική απώλεια ισχύος ανά μονάδα όγκου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p_{\pi} = \eta f \left( \frac{KE}{f} \right)^n + \frac{\pi^2 f^2 \tau^2 K^2 E^2}{6\rho f^2} = K_1 \frac{E^n}{f^{n-1}} + K_2 E^2 \quad (3.19)$$

Η εξίσωση αυτή ισχύει μόνο όταν η μορφή του κύματος είναι ημιτονοειδής. Αν και η απώλεια υστέρησης εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή της πυκνότητας ροής και είναι

ανεξάρτητη της μορφής κύματος της ροής, εφόσον ο κύκλος υστέρησης είναι συμμετρικός και χωρίς μερικούς κύκλους, η *σχέση μεταξύ της μέγιστης τιμής της πυκνότητας ροής και της ενδεικνύμενης τιμής της επαγόμενης ΗΕΔ εξαρτάται από την κυματομορφή*. Επομένως, οι απώλειες υστέρησης εκφρασμένες συναρτήσει της ενδεικνύμενης τιμής της ΗΕΔ δίνονται από τον πρώτο όρο του δεύτερου μέλους της (3.19), *μόνο για την περίπτωση ημιτονοειδούς κυματομορφής*.

Αντίθετα, ο δεύτερος όρος των απωλειών πυρήνα της (3.19) παρέχει τις απώλειες δινορρευσμάτων *ανεξάρτητα από τη μορφή του κύματος*, υπό τον όρο ότι οι συχνότητες των αρμονικών του μη ημιτονοειδούς κύματος δεν είναι αρκετά υψηλές ώστε να προκαλούν έντονο επιδερμικό φαινόμενο. Όταν το κύμα ροής αποτελείται από συνιστώσες διαφόρων συχνοτήτων, η κάθε μία από τις συνιστώσες αυτές επάγει δινορρευσματά στον πυρήνα. Οι απώλειες δινορρευσμάτων που παράγονται από κάθε αρμονική συνιστώσα της ροής είναι ανάλογες του τετραγώνου της αυτής αρμονικής συνιστώσας της ΗΕΔ, η οποία επάγεται στο τύλιγμα. Εάν  $E_1, E_3, E_5, \dots$  είναι οι ενδεικνύμενες τιμές της θεμελιώδους και των αρμονικών συνιστωσών της επαγόμενης ΗΕΔ, οι συνολικές απώλειες δινορρευσμάτων ανά μονάδα όγκου προκύπτουν, σύμφωνα με το δεύτερο όρο της ανωτέρω εξίσωσης:

$$p_e = K_2 (E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots) \quad (3.20)$$

όπου  $K_2$  κατάλληλη σταθερά. Σημειώνεται εδώ ότι το άθροισμα των  $E_1^2, E_3^2, E_5^2, \dots$  ισούται με το τετράγωνο της ενεργού τιμής  $E$  της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ή ενδεικνύμενης τιμής  $E$  της ΗΕΔ). Επίσης, οι απώλειες δινορρευσμάτων όταν εκφράζονται συναρτήσει του  $E$  είναι ανεξάρτητες της συχνότητας.

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας όπως αυτές απαντώνται στην πράξη έχουν αμελητέα επίδραση στις απώλειες από υστέρηση, ενώ αύξηση της θερμοκρασίας δύναται να προκαλέσει κάποια ελάττωση στις απώλειες δινορρευσμάτων. Για δοσμένη μεταβολή της ροής, οι απώλειες αυτού του είδους είναι αντιστρόφως ανάλογες της ειδικής αντίστασης του υλικού του πυρήνα, δεδομένου ότι η ειδική αντίσταση αυξάνει με τη θερμοκρασία. Σε πυρήνες δοθέντος σχηματισμού και δεδομένων συνθηκών για τη χρησιμοποίηση αυτών, οι απώλειες υστέρησης μπορούν να μειωθούν με την εισαγωγή υλικού πυρήνα, το οποίο έχει βρόχο υστέρησης μικρού εμβαδού.

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

Εάν η δέσμη από ελάσματα μετασχηματιστή φέρει πείρους ή συσφιγκτήρες για τη σύσφιξη ή άλλα συμπαγή τεμάχια μετάλλου στην περιοχή όπου υφίσταται η μεταβαλλόμενη ροή, τότε οι απώλειες αυξάνονται. Εξάλλου, η χρήση πολύ λεπτών ελασμάτων αυξάνει το κόστος κατασκευής και το μέγεθος της συσκευής, λόγω ελάττωσης του συντελεστή σώρευσης.

Στις βιομηχανικές συχνότητες, οι απώλειες δινορρευσμάτων μπορούν να μειωθούν εύκολα σε αρκετά χαμηλή τιμή με τη χρήση λεπτών ελασμάτων υψηλής ειδικής αντίστασης. Αντίθετα, η ελάττωση των απωλειών υστέρησης είναι *δυσκολότερη*, καθώς απαιτείται υλικό

με μικρό βρόχο υστέρησης. Για το λόγο αυτό, οι απώλειες υστέρησης είναι συνήθως τα  $\frac{2}{3}$  έως  $\frac{3}{4}$  περίπου των συνολικών απωλειών πυρήνα στη συχνότητα των 50 Hz.

### 3.3 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Οι απώλειες του μετασχηματιστή διακρίνονται σε *απώλειες κενού φορτίου* (ή *απώλειες σιδήρου*), οι οποίες εμφανίζονται στο υλικό του πυρήνα λόγω του φαινομένου της υστέρησης και των δινορρευσμάτων και σε *απώλειες φορτίου*, οι οποίες εμφανίζονται στα τυλίγματα, τους αγωγούς σύνδεσης και το δοχείο του μετασχηματιστή, λόγω του φαινομένου *Joule*, των δινορρευσμάτων και της διαρροής της ροής (*flux leakage*).

Οι απώλειες που προσδιορίζονται από την προδιαγραφή του χρήστη του μετασχηματιστή ονομάζονται *εγγυημένες απώλειες*. Ο μηχανικός μελετών μετασχηματιστών σχεδιάζει το μετασχηματιστή έτσι ώστε οι απώλειες κενού φορτίου και φορτίου να είναι πολύ κοντά στις εγγυημένες απώλειες. Επίσης, οι απώλειες πρέπει να βρίσκονται εντός των ανοχών που προσδιορίζονται από διεθνείς προδιαγραφές, προκειμένου να αποφευχθεί η πληρωμή ρητρών απωλειών από πλευράς του κατασκευαστή μετασχηματιστών. Οι απώλειες, οι οποίες υπολογίζονται κατά τη διάρκεια της μελέτης του μετασχηματιστή ονομάζονται *θεωρητικές απώλειες*. Στο τέλος της παραγωγής, μετρώνται οι απώλειες του μετασχηματιστή, οι οποίες ονομάζονται *πραγματικές*. Έτσι, οι πραγματικές απώλειες κενού φορτίου και οι πραγματικές απώλειες φορτίου πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του χρήστη του μετασχηματιστή και τους διεθνείς κανονισμούς.

Έστω  $P_0^g$ ,  $P_0^a$  οι εγγυημένες και οι πραγματικές απώλειες κενού φορτίου και  $P_k^g$ ,  $P_k^a$  οι εγγυημένες και οι πραγματικές απώλειες φορτίου, αντίστοιχα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές IEC [3.10] και τις προδιαγραφές BS [3.11], οι ανοχές των απωλειών του μετασχηματιστή πρέπει να ικανοποιούν ταυτόχρονα τις ακόλουθες ανισοτικές σχέσεις, οπότε και ο μετασχηματιστής είναι αποδεκτός κατά IEC και BS:

$$P_0^a + P_k^a < 1.10(P_0^g + P_k^g), \quad (3.21)$$

$$P_0^a < 1.15P_0^g, \quad (3.22)$$

$$P_k^a < 1.15P_k^g. \quad (3.23)$$

Στην πράξη, ο κάθε χρήστης μπορεί να δώσει συγκεκριμένες ανοχές, οπότε η προδιαγραφή του υπερισχύει των διεθνών προδιαγραφών. Μπορεί, δηλαδή, είτε να ζητήσει να είναι οι ανοχές των απωλειών σύμφωνα με μία διεθνή προδιαγραφή είτε να ορίσει ο ίδιος τότε ο μετασχηματιστής είναι αποδεκτός.

### 3.4 ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η δυνατότητα για ακριβή πρόβλεψη των απωλειών *κενού φορτίου* είναι πολύ σημαντική για τον κατασκευαστή μετασχηματιστών, καθώς συμβάλλει σε, [3.12]:

- Αύξηση της αξιοπιστίας του.
- Μείωση του κόστους των υλικών.
- Αποφυγή της πληρωμής ρητρών απωλειών.

- Ελάττωση του χρόνου παράδοσης.

Πιο συγκεκριμένα, η ακριβής πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου οδηγεί σε πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των πραγματικών και εγγυημένων απωλειών κενού φορτίου, οδηγώντας σε ικανοποίηση των πελατών και αύξηση της αξιοπιστίας του κατασκευαστή στην αγορά μετασχηματιστών. Επιπλέον, είναι δυνατή η ικανοποίηση των ανοχών απωλειών από τον κατασκευαστή, αποφεύγοντας τόσο την πληρωμή ρητρών απωλειών ή ακόμα και την απόρριψη κάποιων μετασχηματιστών.

Παραδοσιακά, οι μηχανικοί μελετών μετασχηματιστών σχεδιάζουν το μετασχηματιστή με λίγο περισσότερο μαγνητικό υλικό, προκειμένου να είναι σίγουροι ότι δε θα πληρώσουν ρήτρες απωλειών κενού φορτίου. Στην περίπτωση όμως που είναι δυνατή η ακριβής πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου μπορεί να αποφευχθεί το επιπλέον μαγνητικό υλικό, το οποίο οδηγεί σε αύξηση των διαστάσεων του μετασχηματιστή και αύξηση του κόστους του χαλκού (υλικού τυλιγμάτων), των μονωτικών υλικών και του λαδιού. Παρέχεται ακόμη η δυνατότητα στον κατασκευαστή να αποφεύγει την κατασκευή δοκιμών για την επιβεβαίωση κάποιας μελέτης, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στη μείωση του χρόνου παράδοσης και κατά συνέπεια στην αύξηση της ανταγωνιστικότητάς του.

Η δυνατότητα ακριβούς πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου μπορεί να συνοδεύεται και με δυνατότητα μείωσης των απωλειών κενού φορτίου, οπότε και προκύπτουν επιπλέον πλεονεκτήματα τόσο για τον κατασκευαστή μετασχηματιστών όσο και για το χρήστη του μετασχηματιστή. Αν ένας κατασκευαστής μπορεί να προσφέρει μετασχηματιστές με μικρότερες απώλειες κενού φορτίου και στην ίδια τιμή πώλησης με αυτή που προσφέρει η αγορά, τότε μπορεί να αυξηθεί το μερίδιο του συγκεκριμένου κατασκευαστή στην αγορά. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ηλεκτρικές εταιρίες προμηθεύονται μετασχηματιστές με βάση το κριτήριο του *συνολικού κόστους κτήσης (total owning cost)*, με βάση το οποίο προκύπτει ότι αν δύο κατασκευαστές προσφέρουν τον ίδιο μετασχηματιστή στην ίδια τιμή πώλησης, αλλά με διαφορετικές απώλειες κενού φορτίου, τότε μικρότερο συνολικό κόστος κτήσης (πιο ανταγωνιστικός μετασχηματιστής) αντιστοιχεί στο μετασχηματιστή με τις μικρότερες απώλειες κενού φορτίου.

Όσον αφορά στη ΔΕΗ και γενικότερα στις ηλεκτρικές εταιρίες, που είναι οι μεγαλύτεροι χρήστες μετασχηματιστών, οι απώλειες κενού φορτίου έχουν βαρύνουσα σημασία λόγω του μεγάλου πλήθους μετασχηματιστών διανομής στα ηλεκτρικά δίκτυα. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι στο ελληνικό σύστημα η ΔΕΗ διαθέτει περί τους 80.000 μετασχηματιστές διανομής, που με ένα μέσο ύψος απωλειών 400 W/μετασχηματιστή ισοδυναμούν σε απαιτήσεις ισχύος 32 MW ή περίπου 300 GWh/χρόνο [3.13]. Επομένως, είναι προφανές ότι μία οποιαδήποτε προσπάθεια μείωσης αυτών των απωλειών είναι ιδιαίτερα σημαντική.

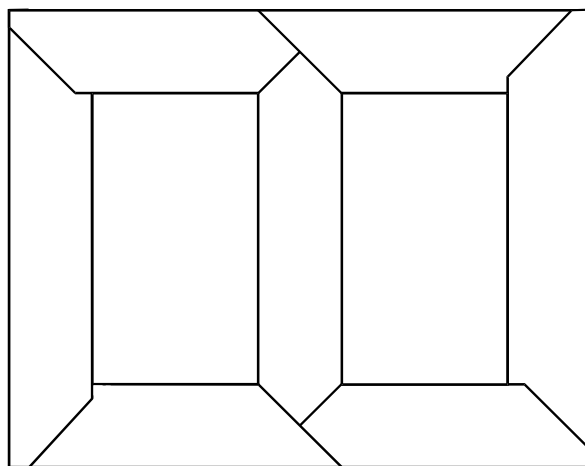
Οι απώλειες στο μαγνητικό κύκλωμα του μετασχηματιστή εμφανίζονται εφόσον ο μετασχηματιστής είναι υπό τάση, άρα υπάρχουν ακόμη και στη χαμηλή φόρτιση ή υπό συνθήκες κενού, [3.14]. Για μετασχηματιστές που είναι ενεργοποιημένοι καθημερινά, 24 ώρες το 24ωρο, σημαντική ενέργεια καταναλώνεται στον πυρήνα τους, ενώ το γεγονός ότι οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές για ολόκληρη τη ζωή του μετασχηματιστή, συνήθως 20-30 χρόνια, καθιστά τις απώλειες κενού φορτίου ιδιαίτερα ενδιαφέρον ζήτημα για τους διαχειριστές ενέργειας των ηλεκτρικών εταιριών, οι οποίοι συνεχώς αναζητούν πηγές εξοικονόμησης ενέργειας.

Η αυξημένη αναγνώριση του κόστους των απωλειών κενού φορτίου από τις ηλεκτρικές εταιρίες προκαλεί τη διαρκή και έντονη ερευνητική δραστηριότητα τόσο των κατασκευαστών μετασχηματιστών όσο και των κατασκευαστών μαγνητικού υλικού. Οι κατασκευαστές μαγνητικού υλικού προσπαθούν να βελτιώσουν τα χαρακτηριστικά του υλικού και οι βιομηχανίες μετασχηματιστών προσπαθούν να αξιοποιήσουν πιο αποδοτικά τα

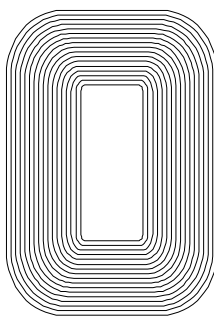
υφιστάμενα ή νέα υλικά, βελτιώνοντας τη σχεδίαση και τις γραμμές παραγωγής των μετασχηματιστών, [3.15].

### 3.5 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΥΡΗΝΑ

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κατασκευής πυρήνων με βάση τον τρόπο στοίβαξης των ελασμάτων: οι στοιβαχτοί (*stacked*) και οι τυλιχτοί (*wound*) πυρήνες [3.16]. Στους στοιβαχτούς πυρήνες τα στρώματα των ελασμάτων τοποθετούνται έτσι ώστε τα κενά μεταξύ του τέλους των ελασμάτων του ενός στρώματος να επικαλύπτονται με το έλασμα του επόμενου στρώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Από την άλλη μεριά, στους τυλιχτούς πυρήνες, τα ελάσματα τυλίγονται σε μορφή πυρήνα από κομμένες λωρίδες μαγνητικού υλικού (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8: Στοιβαχτός πυρήνας.



Σχήμα 3.9: Τυλιχτός πυρήνας.

Η καθεμία από τις δύο τεχνολογίες στοίβαξης των ελασμάτων του πυρήνα παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των τυλιχτών πυρήνων σε σχέση με την αντίστοιχη των στοιβαχτών πυρήνων είναι τα εξής:

- Οι μετασχηματιστές τυλιχτού πυρήνα έχουν μικρότερο ρεύμα μαγνήτισης, ενώ στους μετασχηματιστές τύπου στοιβαχτού πυρήνα απαιτείται μεγαλύτερο ρεύμα μαγνήτισης για να διατηρηθεί η μαγνητική ροή.

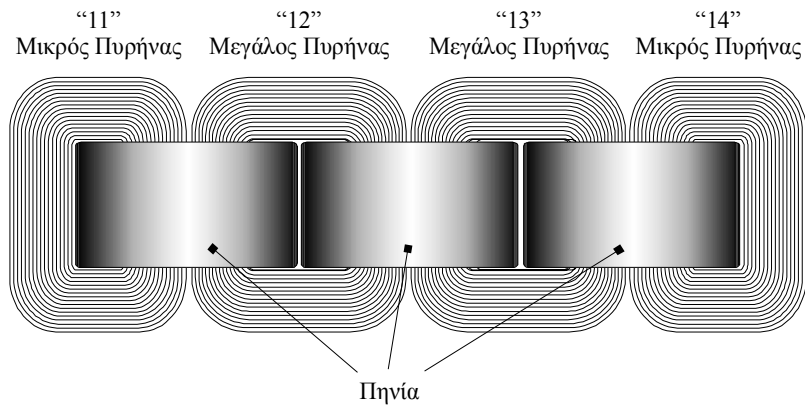
- Έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά ότι οι μετασχηματιστές στοιβαχτού πυρήνα παρουσιάζουν μεγαλύτερο θόρυβο, καθώς αποτελούνται από μεγαλύτερα φύλλα μαγνητικού υλικού.
- Στους μετασχηματιστές τυλιχτού πυρήνα γίνεται πλήρης εκμετάλλευση της διατομής του πυρήνα, ενώ δε συμβαίνει αυτό στους στοιβαχτούς πυρήνες λόγω της πολλαπλώς κλιμακωτής διατομής του πυρήνα τους.
- Στους στοιβαχτούς πυρήνες υπάρχουν πάντοτε ορισμένες θέσεις (π.χ. στα σημεία σύσφιξης των ελασμάτων των ζυγών με τα ελάσματα των σκελών του πυρήνα) στον πυρήνα όπου η μαγνητική ροή δεν πορεύεται παράλληλα προς τη διεύθυνση εξέλασης του μαγνητικού υλικού, με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών του πυρήνα και του ρεύματος διέγερσης.
- Κατά τη συναρμολόγηση του στοιβαχτού πυρήνα απαιτείται σημαντική εργασία, διότι τα ελάσματα περιλαμβάνουν επικαλύψεις στα σημεία σύνδεσης, ενώ σε περίπτωση που χρησιμοποιείται λεπτότερο φύλλο μαγνητικού υλικού, το κόστος των εργατικών αυξάνεται περισσότερο, αφού η στοίβαξη γίνεται με τη βοήθεια ανθρώπων (σε αντιδιαστολή με την τύλιξη που γίνεται με κατάλληλη αυτόματη μηχανή).

Εν συνεχεία, η τεχνολογία των τυλιχτών πυρήνων παρουσιάζει τα ακόλουθα μειονεκτήματα σε σχέση με την αντίστοιχη των στοιβαχτών πυρήνων:

- Τα κενά αέρα στους τυλιχτούς πυρήνες πιθανόν να διαφέρουν μεταξύ τους λόγω των ανοχών της μηχανής περιέλιξης των πυρήνων και λόγω των δυσκολιών στην επεξεργασία του μαγνητικού υλικού (γλύστριμα κατά την περιέλιξη).
- Οι επιθυμητές διαστάσεις των τυλιχτών πυρήνων δεν μπορούν να επιτευχθούν με την ίδια ακρίβεια όπως στους στοιβαχτούς πυρήνες.
- Η μηχανή περιέλιξης των τυλιχτών πυρήνων έχει συγκεκριμένες δυνατότητες, δηλαδή μπορεί να τυλίξει πυρήνες έως ένα μέγιστο βάρος και μέχρι κάποια μέγιστη διάμετρο, ενώ στην τεχνολογία στοιβαχτών πυρήνων το μαγνητικό υλικό μπορεί να κοπεί σε οποιαδήποτε επιθυμητή διάσταση.
- Για τη διαμόρφωση των στρογγυλών πυρήνων σε πυρήνες ορθογωνικής διατομής απαιτούνται πολλοί διαφορετικοί τύποι καλουπιών.
- Η διαμόρφωση των τυλιχτών πυρήνων αλλοιώνει τις ιδιότητές τους και απαιτείται η χρονοβόρα διαδικασία της ανόπτησης για την ανάκτηση αυτών των ιδιοτήτων, κατά την οποία όμως είναι δύσκολο να επιτευχθεί ομοιογενής κατανομή της θερμοκρασίας. Αντίθετα στους στοιβαχτούς πυρήνες δεν απαιτείται ανόπτηση.

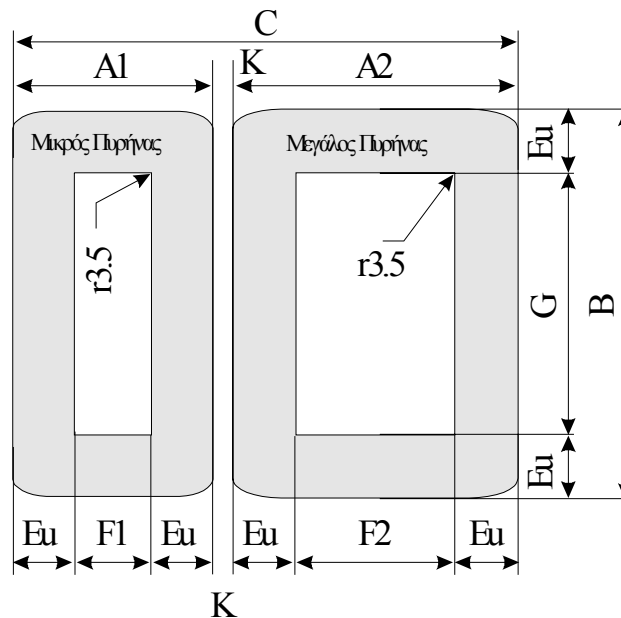
### 3.6 ΦΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η κατασκευή ενός τριφασικού μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα, απαιτεί τη συναρμολόγηση δύο μικρών ατομικών πυρήνων με πλάτος παραθύρου ίσο με  $F1$  και δύο μεγάλων ατομικών πυρήνων με πλάτος παραθύρου ίσο με  $F2$ . Γενικά, η διάσταση  $F2$  είναι διπλάσια της  $F1$ , [3.17]. Στο Σχήμα 3.10 απεικονίζεται το συναρμολογημένο ενεργό μέρος ενός τριφασικού μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα. Οι τέσσερις πυρήνες διατάσσονται στο χώρο (από αριστερά προς τα δεξιά) ως εξής: ένας μικρός πυρήνας ακολουθείται διαδοχικά από δύο μεγάλους πυρήνες και τέλος ένα μικρό πυρήνα. Χρησιμοποιούνται οι συμβολισμοί “11” και “12” για τον αριστερό μικρό και μεγάλο πυρήνα, και “13” και “14” για το δεξιό μεγάλο και μικρό πυρήνα. Έτσι, η διάταξη των πυρήνων από αριστερά προς τα δεξιά είναι “11”-“12”-“13”-“14”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



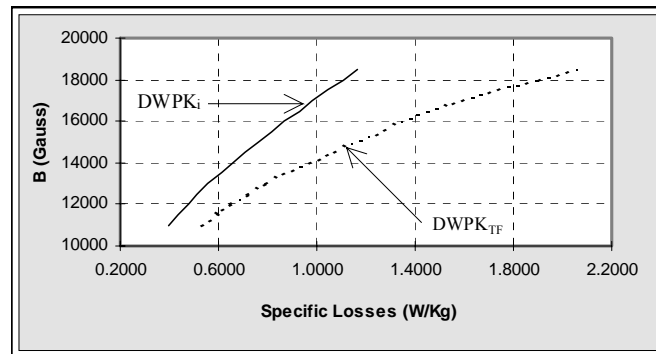
**Σχήμα 3.10:** Συναρμολογημένο ενεργό μέρος τριφασικού μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα.

Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζονται οι κατασκευαστικές παράμετροι ενός μικρού και ενός μεγάλου τυλιχτού πυρήνα.



**Σχήμα 3.11:** Κατασκευαστικές παράμετροι μικρού και μεγάλου τυλιχτού πυρήνα.

Κατά τη φάση σχεδίασης του μετασχηματιστή, υπολογίζονται αρχικά οι θεωρητικές διαστάσεις των τυλιχτών πυρήνων και στη συνέχεια οι θεωρητικές μονοφασικές τους απώλειες, με τη βοήθεια της καμπύλης απωλειών. Σε κάθε συγκεκριμένο τύπο και πάχος μαγνητικού υλικού και επίσης σε κάθε προμηθευτή μαγνητικού υλικού αντιστοιχεί μία διαφορετική καμπύλη απωλειών. Μία ενδεικτική καμπύλη απωλειών φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Στον οριζόντιο άξονα φαίνονται οι ειδικές απώλειες (σε  $W/Kg$ ) τόσο του ατομικού πυρήνα (καμπύλη  $DWPK_i$ ) όσο και του συναρμολογημένου τριφασικού μετασχηματιστή (καμπύλη  $DWPK_{TF}$ ), ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται η μαγνητική επαγωγή (σε  $Gauss$ ). Οι καμπύλες αυτές είναι εμπειρικές και προκύπτουν μέσα από μία σειρά μετρήσεων σε ατομικούς πυρήνες, αλλά και μετασχηματιστές.



Σχήμα 3.12: Τυπική καμπύλη απωλειών

Με δεδομένη την επαγωγή, υπολογίζονται οι ειδικές μονοφασικές απώλειες  $DWPK_i$  και οι θεωρητικές απώλειες  $W1$  (σε  $W$ ) του μικρού πυρήνα, δίνονται από τη σχέση:

$$W1 = DWPK_i * CTW1 \quad (3.24)$$

όπου  $CTW1$  (σε  $Kg$ ) είναι το θεωρητικό βάρος του μικρού πυρήνα. Αντίστοιχα, οι θεωρητικές απώλειες του μεγάλου πυρήνα, δίνονται από τη σχέση:

$$W2 = DWPK_i * CTW2. \quad (3.25)$$

Μετά τον υπολογισμό των μονοφασικών απωλειών, ακολουθεί ο υπολογισμός των θεωρητικών τριφασικών απωλειών (απωλειών κενού φορτίου) του μετασχηματιστή, χρησιμοποιώντας επίσης την καμπύλη του Σχήματος 3.12. Με δεδομένη την επαγωγή, υπολογίζονται οι ειδικές τριφασικές απώλειες  $DWPK_{TF}$ , οπότε οι θεωρητικές τριφασικές απώλειες του μετασχηματιστή δίνονται από τη σχέση:

$$TFLosses = DWPK_{TF} * CTW \quad (3.26)$$

όπου  $CTW$  είναι το θεωρητικό συνολικό βάρος και των τεσσάρων πυρήνων του μετασχηματιστή. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται θεωρητικά οι απώλειες κενού φορτίου του μετασχηματιστή.

### 3.7 ΦΑΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η διαδικασία παραγωγής των πυρήνων αποτελείται από 5 στάδια:

- Κοπή ρολού μαγνητικής λαμαρίνας.
- Τύλιγμα πυρήνα.
- Διαμόρφωση πυρήνα.
- Ανόπτηση πυρήνα.
- Συναρμολόγηση ενεργού μέρους μετασχηματιστή.

Κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης του ενεργού μέρους κατασκευάζεται το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή (Σχήμα 3.10). Αρχικά, διατάσσονται τα τρία πηνία (φάσεις  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) στον πάγκο συναρμολόγησης, έτσι ώστε τα παράθυρα των πηνίων να βρίσκονται στην ίδια ευθεία και οι προσκείμενες πλευρές των πηνίων να εφάπτονται. Οι πυρήνες είναι χωρισμένοι σε ομάδες, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε ένα μετασχηματιστή και χαρακτηρίζεται από τον κωδικό αριθμό του μετασχηματιστή. Κάθε πυρήνας έχει ένα αριθμό (“11”, “12”, “13”, ή “14”, Σχήμα 3.10) που δηλώνει τη θέση του στο ενεργό μέρος.

Ο πυρήνας αποτελείται από φύλλα που είναι χωρισμένα σε ομάδες. Εάν ο πυρήνας είναι μικρός, τα φύλλα του θα περιβάλλουν μία πλευρά πηνίου, ενώ αν είναι μεγάλος τα φύλλα του θα περιβάλλουν δύο εφαιπόμενες πλευρές πηνίων. Πρώτα πλέκεται ο μικρός πυρήνας. Το τέλος κάθε φύλλου της ομάδας πρέπει να απέχει από την αρχή του επόμενου φύλλου, τόσο όσο είναι το αρχικό διάκενο. Η δεύτερη ομάδα φύλλων τοποθετείται πάνω από την πρώτη, κοκ. Μετά και την τοποθέτηση και της τελευταίας ομάδας, τοποθετούνται χαρτόνια στα κενά μεταξύ των πυρήνων και της πλευράς ΥΤ.

### 3.8 ΦΑΣΗ ΠΟΙΟΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Ο ποιοτικός έλεγχος των πυρήνων γίνεται σε δύο φάσεις:

- Μέτρηση των μονοφασικών απωλειών των πυρήνων.
- Μέτρηση των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών.

#### 3.8.1 Μέτρηση Μονοφασικών Απωλειών Πυρήνων

Μετά το πέρας της παραγωγικής διαδικασίας ελέγχονται όλοι οι μαγνητικοί πυρήνες με σκοπό την αξιολόγηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους και το συνδυασμό τους σε ομάδες για την κατασκευή των μετασχηματιστών. Με χρήση κατάλληλου συστήματος απόκτησης δεδομένων (*data acquisition*) μετρώνται οι μονοφασικές απώλειες των πυρήνων, και τα αποτελέσματα καταγράφονται σε ηλεκτρονικό αρχείο [3.18].

Μετά τη μέτρηση των απωλειών μιας συγκεκριμένης παρτίδας παραγωγής ακολουθεί η κατάταξη των πυρήνων σε κλάσεις (κατηγορίες ποιότητας) ανάλογα με την απόκλιση των μετρημένων μονοφασικών τους απωλειών από τις θεωρητικά αναμενόμενες απώλειες (υπολογίζονται από τη μελέτη του μετασχηματιστή). Έπειτα, συνδυάζονται πυρήνες ανώτερης και κατώτερης ποιότητας προκειμένου να επιτευχθεί μία “μέση” ποιότητα για το μετασχηματιστή. Η τεχνική αυτή ονομάζεται *διαδικασία ομαδοποίησης πυρήνων*, δηλαδή αποφασίζει το μετασχηματιστή και τη θέση στην οποία θα τοποθετηθεί ο κάθε μικρός και ο κάθε μεγάλος πυρήνας. Οι πυρήνες που συνδυάζονται για τη χρησιμοποίησή τους στην κατασκευή ενός μετασχηματιστή σημειώνονται με ένα αριθμό, ο οποίος αποτελεί το σειριακό αριθμό του τελικού προϊόντος, καθώς επίσης και με τη θέση που θα έχει ο πυρήνας στον υπό συναρμολόγηση μετασχηματιστή.

#### 3.8.2 Μέτρηση Απωλειών Κενού Φορτίου Μετασχηματιστών

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής, ο μετασχηματιστής υποβάλλεται σε δοκιμές σειράς. Μία από τις δοκιμές σειράς είναι η μέτρηση των απωλειών κενού φορτίου, η οποία γίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές IEC [3.10] ή BS [3.11]. Οι ανοχές στις απώλειες κενού φορτίου πρέπει να ικανοποιούν τους διεθνείς κανονισμούς και την προδιαγραφή του χρήστη του μετασχηματιστή.

### 3.9 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Οι απώλειες κενού φορτίου εξαρτώνται από το βαθμό (*grade*) του μαγνητικού υλικού, το πάχος του, τη συχνότητα του ρεύματος, την πυκνότητα μαγνητικής ροής (μαγνητική επαγωγή) και το βάρος [3.19], παράγοντες οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη κατά τη φάση μελέτης του μετασχηματιστή. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, οι απώλειες κενού φορτίου είναι δυνατό να επηρεαστούν από μία σειρά παραγόντων, όπως το είδος της μόνωσης των ελασμάτων, η ανόπτηση, η κατασκευή του πυρήνα και η ποιότητα της συναρμολόγησης, παράμετροι οι οποίες δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη μέσα από ένα αναλυτικό μοντέλο. Ως εκ τούτου, οι υπολογισμοί βασίζονται σε γραφήματα και πίνακες που λαμβάνονται από προηγούμενες μετρήσεις σε πραγματικούς

μετασχηματιστές. Τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται από αυτούς τους πίνακες τροποποιούνται από συντελεστές, οι οποίοι αντιστοιχούν στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σχεδίασης του πυρήνα και της τεχνολογίας παραγωγής του πυρήνα. Παραδοσιακά, οι απώλειες κενού φορτίου υπολογίζονται μέσω καμπυλών απωλειών (Σχήμα 3.12), λαμβάνοντας υπόψιν μόνο την επίδραση της μαγνητικής επαγωγής για κάθε συγκεκριμένο μαγνητικό υλικό.

Συνεπώς, στην πράξη παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών της ίδιας εντολής παραγωγής, δηλαδή μετασχηματιστών που κατασκευάστηκαν με την ίδια μελέτη, από το ίδιο μαγνητικό υλικό και την ίδια χρονική περίοδο και οι οποίοι θεωρητικά θα έπρεπε να είχαν τις ίδιες απώλειες κενού φορτίου. Οι μέγιστες αποκλίσεις μπορούν να φτάσουν έως και  $\pm 10\%$  σε σχέση με τις εγγυημένες απώλειες φορτίου [3.20], οφειλόμενες σε ένα μεγάλο βαθμό και στις διαφοροποιήσεις των χαρακτηριστικών των μονοφασικών πυρήνων από τις θεωρητικές τους τιμές. Αναφέρεται ενδεικτικά ότι η μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται στις απώλειες των ατομικών πυρήνων είναι  $\pm 15\%$ , ενώ η μέγιστη απόκλιση στο βάρος των πυρήνων είναι  $\pm 1.5\%$ . Αξίζει, επίσης, να σημειωθεί ότι ενώ για την ίδια παρτίδα παραγωγής χρησιμοποιείται ίδιο μαγνητικό υλικό (κοινός προμηθευτής, πάχος και τύπος υλικού), οι ιδιότητες του υλικού αυτού δεν είναι ίδιες για διαφορετικά ρολά μαγνητικού υλικού, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή όλων των πυρήνων της συγκεκριμένης εντολής παραγωγής.

### 3.10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Β. Λάζαρης, “Ανάπτυξη Λογισμικού Σχεδίασης Μετασχηματιστή Ισχύος με Αριθμητική και Πειραματική Επιβεβαίωση”. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2003.
- [3.2] Ι. Α. Τεγόπουλος, *Ηλεκτρικές Μηχανές – Μέρος Β Μόνιμη Κατάσταση*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1986.
- [3.3] Σ. Ν. Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1988.
- [3.4] E. F. Fuchs, D. Yildirim, W. Mack Grady, “Measurement of Eddy-Current Loss Coefficient PEC-R, Derating of Single-Phase Transformers, and Comparison with K-Factor Approach,” *IEEE Trans. PWRD*, Vol. 15, No. 1, pp. 148-154, Jan. 2000.
- [3.5] H. Akçay and D. Gökhan Ece, “Modeling of Hysteresis and Power Losses in Transformer Laminations,” *IEEE Trans. PWRD*, Vol. 18, No. 2, pp. 487-492, Apr. 2003.
- [3.6] Members of the Staff of the Department of Electrical Engineering of M.I.T., *Magnetic Circuits and Transformers*. John Wiley, New York, 5<sup>th</sup> edition, 1947.
- [3.7] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*. IEEE Press, 1993.
- [3.8] C. P. Steinmetz, “On the Law of Hysteresis,” *American Institute of Electrical Engineers Transactions*, vol. 9, 1892, pp. 3-51.
- [3.9] P. G. Agnew, “A Study of the Current Transformer with Particular Reference to Iron Loss,” *National Bureau of Standards Bulletin*, vol. 7, 1911, pp. 423-474.
- [3.10] IEC 60076-1, *Power Transformers – Part 1: General*, 2000.
- [3.11] BS EN 60076-1, *Power Transformers – Part 1: General*, 1997.
- [3.12] Π. Σ. Γεωργιάκης, “Συμβολή Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης στη μείωση των Απωλειών Κενού Φορτίου Μετασχηματιστών Διανομής”. Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2000.
- [3.13] Δ. Σπηλιόπουλος, “Προοπτικές Κατασκευής Μετασχηματιστών Διανομής Αμόρφου Σιδήρου,” *Πρακτικά Συνόδου 1990 Ελληνικής Επιτροπής CIGRE*.
- [3.14] Πρακτικά Συμποσίου με θέμα “Τεχνολογικά και οικονομικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση μετασχηματιστών διανομής με μειωμένες απώλειες,” Αθήνα, Μάιος 1994.
- [3.15] Π. Σ. Γεωργιάκης, Δ. Σ. Σπηλιόπουλος, Α. Τ. Σουφλάρης, Δ. Γ. Παπαρήγας, και Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, “Κατασκευή Μετασχηματιστών με Πυρήνα Άμορφου Σιδήρου στην Ελλάδα,” Πρακτικά Ημερίδας ΔΕΗ για νέες Τεχνολογίες Μετασχηματιστών, Αθήνα, Φεβρουάριος 1999.
- [3.16] R. L. Bean, N. Chackan, H. R. Moore, and E. C. Wentz, *Transformers for the Electric Power Industry*. Westinghouse Electric Corporation, USA, 1959.
- [3.17] Schneider Electric, “Τεχνικό Τετράδιο No.2 – Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ”
- [3.18] P. S. Georgilakis, N. D. Hatziargyriou, N. D. Doulamis, A. D. Doulamis, and J. A. Bakopoulos, “An Efficient PC-based Environment for the Improvement of Magnetic Cores Industrial Process,” in S.G. Tzafestas (ed): *Advances in Manufacturing*, Springer-Verlag, February 1999, pp. 385-396.
- [3.19] A. Dymkov, *Transformer Design*. English translation from the Russian by A. Gavrilovets, Mir Publishers, Moscow, 1975.
- [3.20] P. S. Georgilakis, N. D. Hatziargyriou, N. D. Doulamis, A. D. Doulamis, and S. D. Kollias, “Prediction of Iron Losses of Wound Core Distribution Transformers based on Artificial Neural Networks,” *Neurocomputing*, vol. 23, no. 1-3, December 1998, pp. 15-29.



## **ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

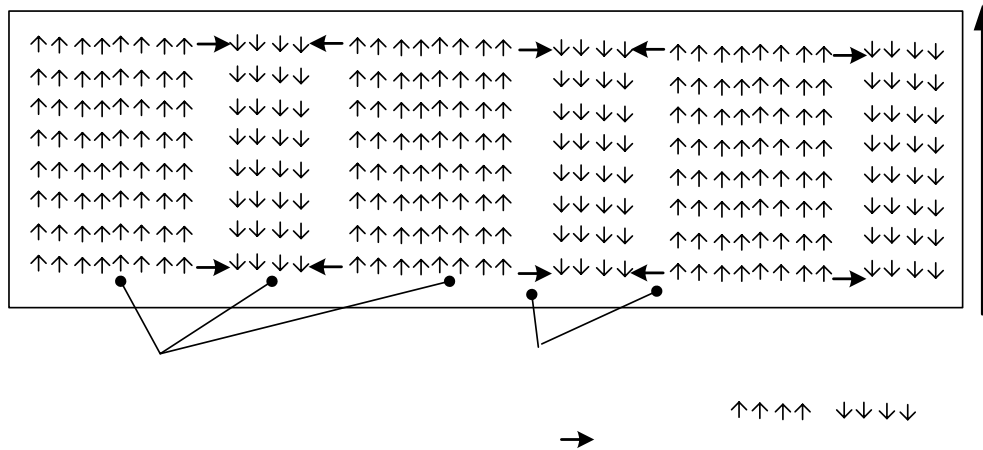
Στο παρόν Κεφάλαιο, μελετάται η πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών ισχύος με τη χρήση της μεθόδου των *πεπερασμένων στοιχείων*. Στην αρχή του Κεφαλαίου παρατίθεται εν συντομία ένα θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψή των απωλειών κενού φορτίου τόσο από τους κατασκευαστές όσο και από τους ερευνητές του συγκεκριμένου θέματος. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη μελέτη της δοκιμής κενού φορτίου (δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος), με προσομοίωση της οποίας προκύπτουν οι απώλειες κενού φορτίου. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο με τον οποίο αναπαριστώνται οι ιδιότητες του υλικού του πυρήνα, ο οποίος είναι καθοριστικός για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου.

### **4.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ**

Οι απώλειες κενού φορτίου μετασχηματιστών, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, συνίστανται στις απώλειες μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα τους και αναφέρονται και ως απώλειες πυρήνα.

Είναι γνωστό ότι ο τρόπος μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι ομογενής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, η εσωτερική δομή ενός μαγνητισμένου σιδηρομαγνητικού υλικού μπορεί να χωριστεί σε περιοχές, οι οποίες διαφέρουν κατά τη διεύθυνση μαγνήτισης. Οι περιοχές αυτές οριοθετούνται με ένα είδος μαγνητικών «τοιχωμάτων» και οποιαδήποτε μεταβολή στη συνολική μαγνήτιση του υλικού μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη μετακίνηση αυτών των τοιχωμάτων. Έτσι, οι μεταβολές στη μαγνήτιση του υλικού έχουν έντονα τοπικό χαρακτήρα και μπορούν να θεωρηθούν διακριτές στο χώρο. Η μη καθαρότητα και οι ατέλειες μέσα στο υλικό εμποδίζουν την κίνηση των τοιχωμάτων και προκαλούν άτακτες μετακινήσεις τους, καθιστώντας την ταχύτατη μετακίνησή τους όχι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής του εξωτερικού πεδίου και τη συνολική μεταβολή της μαγνήτισης διακριτή στο χρόνο.

Η χωρική και χρονική μεταβολή μαγνήτισης του υλικού συνεπάγεται γρήγορες τοπικές μεταβολές, ακόμη και για απειροελάχιστα μικρό ρυθμό μεταβολών του εξωτερικού πεδίου. Οι μεταβολές αυτές στη μαγνήτιση σχετίζονται με τοπικές απώλειες ενέργειας, οφειλόμενες τόσο στη μεταβολή της φοράς μαγνήτισης των στοιχειωδών μαγνητικών διπόλων που αποτελούν το υλικό (*απώλειες υστέρησης*) όσο και σε δινορρεύματα που αναπτύσσονται στο υλικό (*απώλειες δινορρευμάτων*). Οι απώλειες αυτές καθορίζονται από τη χωρική και χρονική κατανομή των μεταβολών μαγνήτισης. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει σαφής φυσικός διαχωρισμός μεταξύ των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Πρακτικά, υπάρχει ένα μόνο φυσικό αίτιο δημιουργίας των απωλειών μαγνήτισης, δηλαδή η δυσκολία στη μετακίνηση των τοιχωμάτων μαγνήτισης (λόγω των δινορρευμάτων και του φαινομένου υστέρησης), [4.1].



**Σχήμα 4.1:** Τοπικές μεταβολές μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού

Ωστόσο, η δυσκολία προσδιορισμού της χωρικής και χρονικής κατανομής των μεταβολών μαγνήτισης έχει καθιερώσει την υιοθέτηση του διαχωρισμού των απωλειών μαγνήτισης  $P_m$  σε δύο είδη, δηλαδή τις στατικές απώλειες υστέρησης  $P_h$  και τις δυναμικές απώλειες δινορρευσμάτων  $P_e$ , έτσι ώστε:

$$P_m = P_h + P_e \quad (4.1)$$

Η παραπάνω προσέγγιση, αν και απλοποιεί σημαντικά τη μοντελοποίηση των απωλειών μαγνήτισης, μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα σφάλματα πρόβλεψης των πραγματικών τιμών απωλειών. Για την αποφυγή αυτών των σφαλμάτων, συναντάται συχνά στην τεχνική βιβλιογραφία η εισαγωγή μίας τρίτης «τεχνικής» συνιστώσας απωλειών, αναφερόμενη ως «απώλειες ανωμαλίας κατανομής δινορρευσμάτων» (eddy current anomaly loss),  $P_a$ . Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν προσεγγιστικά μοντέλα που προσδιορίζουν τους παραμέτρους  $P_h$  και  $P_e$  των απωλειών μαγνήτισης [4.2], η δυσκολία πρόβλεψης της τρίτης συνιστώσας έχει οδηγήσει σε αναζήτηση διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των απωλειών κενού φορτίου, οι οποίες συνδυάζουν πειραματική μελέτη των υλικών του πυρήνα.

Το έντονο ανταγωνιστικό περιβάλλον στην αγορά ενέργειας σε συνδυασμό με την αύξηση του κόστους παραγωγής καθιστά αναγκαία την αναζήτηση τρόπων μείωσης των απωλειών που εμπλέκονται στο κόστος μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Μία μικρή μείωση των απωλειών πυρήνα των μετασχηματιστών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά οικονομικά οφέλη καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Είναι πολύ σημαντική η σωστή θεωρητική αναπαράσταση των απωλειών αυτών, ενώ απαιτείται εκτενής γνώση της διαμόρφωσης και των κατασκευαστικών λεπτομερειών του πυρήνα, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την πραγματική τιμή απωλειών.

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος πρόβλεψης που συναντάται στη βιομηχανική κατασκευή μετασχηματιστών είναι κατά βάση εμπειρική και εμπλέκει σταθερές της σχεδίασης που εξάγονται με βάση μετρήσεις σε ήδη κατασκευασμένους μετασχηματιστές, [4.3]. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ικανοποιητικό βαθμό επιτυχίας για τυποποιημένες κατασκευές, όμως η ακρίβειά της μειώνεται όταν μελετώνται μη τυποποιημένες κατασκευές ή υλικά με νέα χαρακτηριστικά απωλειών συναρτήσεων των τοπικών τιμών έντασης του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, η έρευνα για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου επικεντρώνεται σε διαφορετικούς τρόπους ανάλυσης, οι οποίοι μπορούν να διακριθούν στις τρεις ακόλουθες βασικές κατηγορίες:

#### **4.1.1 Κυκλωματικά μοντέλα πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών**

Πρόκειται για βελτιωμένες εκδοχές του κλασσικού ισοδυνάμου κυκλώματος του μετασχηματιστή, στο οποίο οι απώλειες πυρήνα αναπαριστώνται από τον εγκάρσιο κλάδο μαγνήτισης. Παρά το γεγονός ότι οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης των μαγνητικών πεδίων των πυρήνων μετασχηματιστών προσφέρουν μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, τα κυκλωματικά μοντέλα εξακολουθούν να αποτελούν αντικείμενο έρευνας ([4.4]-[4.9]).

Τα περισσότερα κυκλωματικά μοντέλα αναπαριστούν παράγοντες όπως η διαμόρφωση των πυρήνων, η ροή σκέδασης, καθώς και απώλειες που οφείλονται στον τρόπο κατασκευής των πυρήνων, ως εγγενείς παραμέτρους που προκύπτουν από μετρήσεις που πραγματοποιούνται στους μετασχηματιστές. Έτσι, δεν είναι εφικτή η σωστή πρόβλεψη των απωλειών σε καταστάσεις λειτουργίας των μετασχηματιστών που δεν έχουν μελετηθεί πειραματικά. Οι κατασκευαστικές αυτές λεπτομέρειες καθιστούν τα κυκλωματικά μοντέλα αρκετά περίπλοκα, αναιρώντας ως ένα βαθμό το πλεονέκτημα της απλότητας εφαρμογής τους. Αντίθετα, μπορούν να ενσωματωθούν πιο εύκολα σε μοντέλα αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης του πεδίου, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

#### **4.1.2 Μοντέλα αριθμητικών τεχνικών ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου για την πρόβλεψη απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών**

Οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου των μετασχηματιστών μπορούν να προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια στην αναπαράσταση των απωλειών του πυρήνα και στην ακριβή τους εκτίμηση, κυρίως λόγω της δυνατότητας λεπτομερούς αναπαράστασης της πραγματικής γεωμετρίας του πυρήνα. Οι μέθοδοι αυτές συνδυάζουν συνήθως την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου με δεδομένα για τις απώλειες και τον τρόπο μαγνήτισης του υλικού του πυρήνα, μετρημένα σε ελάσματα του υλικού του. Έτσι, οδηγούν σε πρόβλεψη των απωλειών, η οποία δεν εξαρτάται από σταθερές σχεδίασης βασισμένες σε αποτελέσματα από παλαιότερες μετρήσεις σε συναρμολογημένους πυρήνες μετασχηματιστών. Ωστόσο, και αυτές οι μέθοδοι ενδέχεται να παρουσιάσουν σφάλμα στην εκτίμηση των απωλειών, εάν δε ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η τοπική κατανομή της ροής στον πυρήνα, η περιστροφική συνιστώσα της ροής στις γωνίες του πυρήνα, [4.10], ή η ροή που κυκλοφορεί μεταξύ των ελασμάτων του πυρήνα, [4.11].

Τα αριθμητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια δίνουν ιδιαίτερη βαρύτητα στους παράγοντες που προαναφέρθηκαν, όπως φαίνεται ενδεικτικά και στις αναφορές [4.12] και [4.13], ενώ εστιάζεται η μικροσκοπική αναπαράσταση των φαινομένων που διαδραματίζονται κατά τη μαγνήτιση του υλικού του πυρήνα.

#### **4.1.3 Στοχαστικές μέθοδοι πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών**

Στην κατηγορία των στοχαστικών μεθόδων εντάσσονται οι γενετικοί αλγόριθμοι και τα νευρωνικά δίκτυα, η χρήση των οποίων στην ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών και μετασχηματιστών έχει αυξηθεί δραματικά την τελευταία δεκαετία. Στη μελέτη απωλειών κενού φορτίου έχουν χρησιμοποιηθεί και μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης, προτείνοντας μοντέλα που είναι σε θέση να μειώσουν δραστικά το σφάλμα πρόβλεψής τους, [4.3], [4.14-4.15].

Οι παραπάνω μέθοδοι αποτελούν εργαλεία εκτενώς χρησιμοποιούμενα στην προσπάθεια αναζήτησης νέων υλικών και μεθόδων κατασκευής των πυρήνων των μετασχηματιστών με στόχο τη μείωση των απωλειών τους. Οι προσπάθειες αυτές έχουν ενταθεί τα τελευταία χρόνια με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα, τουλάχιστον σε ερευνητικό επίπεδο (σε περιπτώσεις υλικών, η χρήση των οποίων δεν είναι ακόμη διαδεδομένη στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών). Για παράδειγμα, η χρήση του

άμορφου σιδήρου στους μετασχηματιστές προσελκύει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών, [4.16-4.18], ενώ η επίδραση του τρόπου διαμόρφωσης των πυρήνων, [4.19] και των κατεργασιών του υλικού του είναι αντικείμενο έρευνας, το οποίο οδηγεί στη διαρκή εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για νέους δυνατούς τρόπους μείωσης των απωλειών πυρήνα.

## 4.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στην παράγραφο αυτή δίνεται μια πολύ σύντομη ανασκόπηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, αναλυτικότερες πληροφορίες για την οποία παρατίθενται στην αναφορά [4.20]. Η μέθοδος στηρίζεται στη διακριτοποίηση των εξισώσεων που περιγράφουν το μαγνητοστατικό πεδίο (νόμος Ampere, Gauss και εξισώσεις Maxwell). Σύμφωνα με τις εξισώσεις αυτές, ο υπολογισμός του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού  $\vec{A}$  σε κάθε σημείο του χώρου ενός προβλήματος ανάγεται στην επίλυση μιας μερικής διαφορικής εξίσωσης ελλειπτικού τύπου. Στη συνέχεια, οι τιμές των  $\vec{B}$  και  $\vec{H}$  μπορούν να προκύψουν με διαφορίση του  $\vec{A}$ .

Η μοναδικότητα της λύσης που προκύπτει από τις παραπάνω μερικές διαφορικές εξισώσεις εξασφαλίζεται με ορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών, των τιμών δηλαδή του  $\vec{A}$  ή της κάθετης παραγώγου του  $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}$  στο σύνορο του εξεταζόμενου πεδίου. Οι οριακές συνθήκες μπορεί να είναι τριών ειδών:

1. *Dirichlet*: όταν ορίζεται η τιμή του διανυσματικού δυναμικού  $\vec{A}$  στο σύνορο. Η συνθήκη  $\vec{A}=0$  (φυσική συνθήκη *Dirichlet*) αναπαριστά τα όρια μέσα στα οποία περιορίζεται το πεδίο (έξω από αυτά το πεδίο μηδενίζεται) ή επίπεδα συμμετρίας της γεωμετρίας του προβλήματος όπου οι πηγές έχουν αντίθετη κατεύθυνση (αντισυμμετρική συνθήκη)
2. *Neumann*: όταν ορίζεται η τιμή της κάθετης παραγώγου  $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}$  στο σύνορο. Θέτοντας  $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}=0$  (φυσική συνθήκη *Neumann*) σε ένα σύνορο περιγράφεται ένα πεδίο το οποίο διαπερνά κάθετα το σύνορο αυτό. Μία τέτοια οριακή συνθήκη σχετίζεται με σύνορα μεταξύ αέρα και υλικών με μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα ή με επίπεδα συμμετρίας της γεωμετρίας του προβλήματος και των πηγών (συμμετρική συνθήκη).
3. *Robin (ή μεικτές)*: όταν ορίζεται μία σχέση μεταξύ της τιμής του  $\vec{A}$  και της κάθετης παραγώγου του  $\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}$  σε διάφορα σημεία του συνόρου. Τέτοιες οριακές συνθήκες εμφανίζονται συχνά σε προβλήματα δινορρευμάτων.

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

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι αριθμητική τεχνική για την επίλυση προβλημάτων που περιγράφονται με μερικές διαφορικές εξισώσεις. Το πεδίο ενδιαφέροντος αναπαρίσταται ως μία ομάδα από πεπερασμένα στοιχεία. Η διακριτοποίηση του χώρου γίνεται συνήθως με τρίγωνα ή τετράεδρα, αν το πρόβλημα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο αντίστοιχα και το πεδίο προσεγγίζεται με συναρτήσεις μορφής, με άγνωστες τιμές στις κορυφές των τριγώνων ή τετραέδρων του χώρου. Έτσι, ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων με άγνωστες τιμές στους

κόμβους των κορυφών τους. Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος ανάγεται σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, ενώ οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων μπορούν να ανακτηθούν με τη βοήθεια των υπολογισμένων τιμών στις κορυφές τους.

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

1. Η προσέγγιση του φυσικού πεδίου με πεπερασμένα στοιχεία παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια (ακόμη και όταν οι συναρτήσεις μορφής είναι απλές) η οποία μεγαλώνει με την αύξηση του αριθμού των στοιχείων
2. Η προσέγγιση του πεδίου με τιμές στους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε συστήματα εξισώσεων με «αραιές» μήτρες. Αυτό σημαίνει ότι με επιλογή κατάλληλης μεθόδου μπορούν να επιλυθούν προβλήματα με μεγάλο αριθμό αγνώστων.

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

#### 4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Κατά την εξαγωγή και διακριτοποίηση των εξισώσεων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι αναγκαίο να ληφθεί υπόψη ότι λόγω των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα  $\mu_r$  των μη γραμμικών υλικών του μοντέλου είναι συνάρτηση της θέσης του εξεταζόμενου σημείου. Για την προσομοίωση της δοκιμής βραχυκύκλωσης, κατά την οποία ο σίδηρος λειτουργεί στη γραμμική περιοχή (σε τιμές πολύ μικρότερες του γόνατου κορεσμού της καμπύλης μαγνήτισης), οι τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας των υλικών θεωρούνται γνωστές. Ωστόσο, στην περίπτωση της μοντελοποίησης της λειτουργίας κενού φορτίου, κατά την οποία οι τιμές μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα βρίσκονται στη μη γραμμική περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η τοπική εξάρτηση των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας από τις τιμές του πεδίου. Η μαγνητική διαπερατότητα δε λαμβάνεται σταθερή κατά την επίλυση, αλλά σχετίζεται με τις τοπικές τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου (σε περιπτώσεις μαγνητοστατικού προβλήματος) ή τις μέγιστες τιμές της (σε περιπτώσεις αρμονικών προβλημάτων). Ωστόσο, δεδομένου ότι οι τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου εξαρτώνται και αυτές από την κατανομή της μαγνητικής διαπερατότητας, η διαδικασία επίλυσης πρέπει να είναι επαναληπτική, καθιστώντας έτσι την προσομοίωση της λειτουργίας του μετασχηματιστή υπό συνθήκες κενού φορτίου μη γραμμικό πρόβλημα, [4.21].

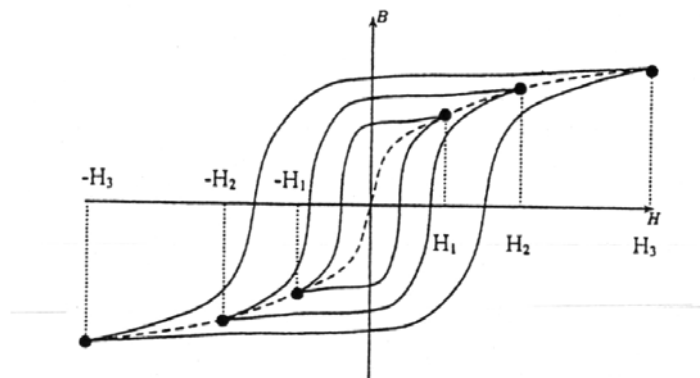
#### 4.3.1 Επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, δύο είναι οι συνήθεις μέθοδοι που χρησιμοποιούνται:

1. Επίλυση του προβλήματος με υποθετικές τιμές μαγνητικής διαπερατότητας, η οποία ακολουθείται από αναπροσαρμογή τους με βάση τις τιμές πεδίου που έδωσε η αρχική επίλυση. Έτσι, πραγματοποιείται συνεχής εφαρμογή ενός κύκλου επίλυσης-προσαρμογής μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση.
2. Εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson, η οποία χρησιμοποιεί το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος του μαγνητικού δυναμικού για την εκτίμηση των νέων τιμών δυναμικού (και κατ' επέκταση μαγνητικής διαπερατότητας) της βελτιωμένης λύσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και πάλι μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση. Η διαδικασία αυτή, εάν και πολυπλοκότερη από αυτή που περιγράφηκε παραπάνω, οδηγεί κατά κανόνα σε γρηγορότερη σύγκλιση.

#### 4.3.2 Μοντελοποίηση υλικών κατά την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση των μαγνητικών διατάξεων απαιτεί ακριβή γνώση των φυσικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών. Η μαγνήτιση ενός τμήματος σιδηρομαγνητικού υλικού σε μια αρχική τιμή  $H_1$ , η μείωση του πεδίου στη συνέχεια σε τιμή  $-H_1$  και η επανάληψη της διαδικασίας για μεγαλύτερες τιμές του  $H$  ( $H_3 > H_2 > H_1$ ) οδηγεί στην εξαγωγή μιας οικογένειας καμπυλών μαγνήτισης, οι οποίες αποτελούν τους βρόχους υστέρησης του υλικού (Σχήμα 4.2), οι οποίοι αναπαριστούν το φαινόμενο της υστέρησης κατά τη διαδικασία μαγνήτισής του. Η σύνδεση των κορυφών των βρόχων υστέρησης του Σχήματος 4.2 δίνει την ονομαζόμενη χαρακτηριστική καμπύλη πρώτης μαγνήτισης του υλικού. Η καμπύλη αυτή χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των μη γραμμικών σιδηρομαγνητικών υλικών στα πεπερασμένα στοιχεία. Οι βρόχοι υστέρησης χρησιμοποιούνται μετά τον υπολογισμό του πεδίου για τον υπολογισμό των απωλειών των σιδηρομαγνητικών υλικών.



Σχήμα 4.2: Βρόχοι υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.

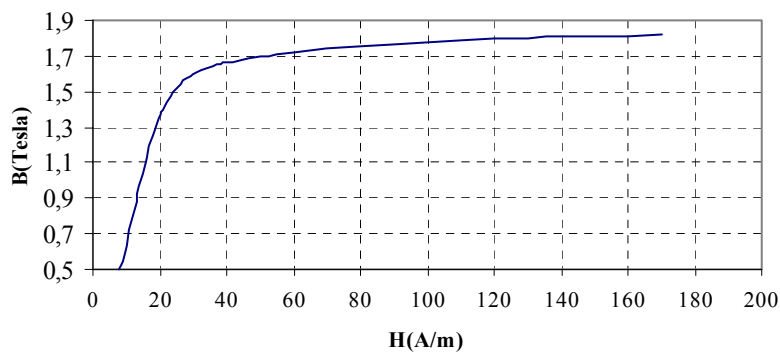
Η τυπική μορφή μιας καμπύλης πρώτης μαγνήτισης, η οποία παρέχεται από τους κατασκευαστές σιδηρομαγνητικών υλικών φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Η καμπύλη μπορεί να δίνεται είτε με τη μορφή της χαρακτηριστικής  $B-H$  ή με τη μορφή της χαρακτηριστικής  $\mu-H$  και με τους δύο τρόπους σε κοινό διάγραμμα.

Η μοντελοποίηση του τρόπου μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, η οποία συνδέεται άμεσα με την καμπύλη μαγνήτισής του, παίζει σημαντικό ρόλο στις

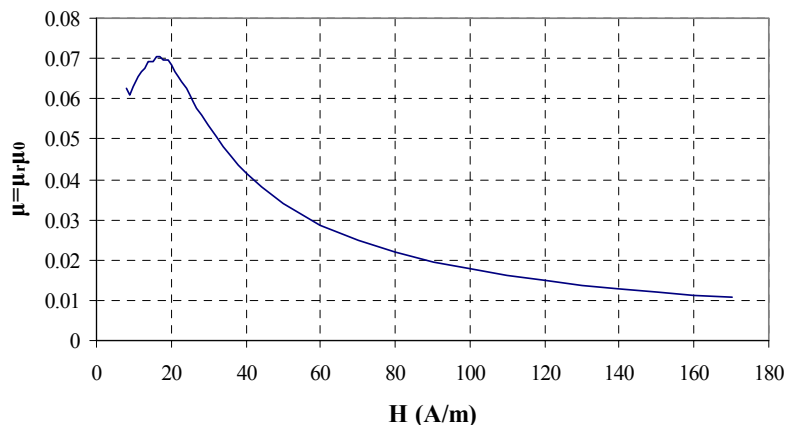
ιδιότητες σύγκλισης της μεθόδου, η οποία χρησιμοποιείται κατά την επίλυση ενός μη γραμμικού προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.3 (β), η μορφή της καμπύλης  $\mu$ -H σε μικρές τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου προκαλεί έντονες διακυμάνσεις της παραγώγου  $\frac{\partial \mu}{\partial H}$ , δυσχεραίνοντας έτσι τη σύγκλιση της αναγωγικής μεθόδου. Αντίθετα, η μορφή της ισοδύναμης καμπύλης  $\nu$ -B<sup>2</sup>, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.4, παρουσιάζει μεγαλύτερη ομαλότητα και μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα χαρακτηριστικά σύγκλισης της αναγωγικής μεθόδου.

Για τη μοντελοποίηση των καμπυλών των Σχημάτων 4.3 και 4.4, πραγματοποιείται προσέγγισή τους με ισοδύναμα ευθεία τμήματα πολύ μικρού μήκους. Τα δεδομένα των καμπυλών αντιπροσωπεύονται από μία ομάδα σημείων που περιγράφεται με ζεύγη τιμών  $\mu$ -H (ή  $\nu$ -B<sup>2</sup>), ενώ τα ενδιάμεσα σημεία υπολογίζονται με κάποιον είδους παρεμβολή. Ο απλούστερος τρόπος είναι η χρήση γραμμικής παρεμβολής, με την οποία η καμπύλη μαγνήτισης προσεγγίζεται με πολύγωνο. Ωστόσο, μία τέτοια παρεμβολή μπορεί να είναι ασυνεχής σε κάποια από τα σημεία της καμπύλης, ενώ η χρήση της μεθόδου Newton-Raphson απαιτεί τη συνέχεια της συνάρτησης  $\mu(H)$  (ή  $\nu(B^2)$ ). Γι' αυτό το λόγο, τα ενδιάμεσα σημεία της καμπύλης μαγνήτισης προσεγγίζονται συνήθως με πολυώνυμα παρεμβολής τρίτου βαθμού, τύπου spline (cubic spline interpolating polynomials), ενώ τα σημεία εκτός του εύρους προσέγγισης της καμπύλης μπορούν να προσεγγιστούν γραμμικά.

Καμπύλη μαγνήτισης



(α)

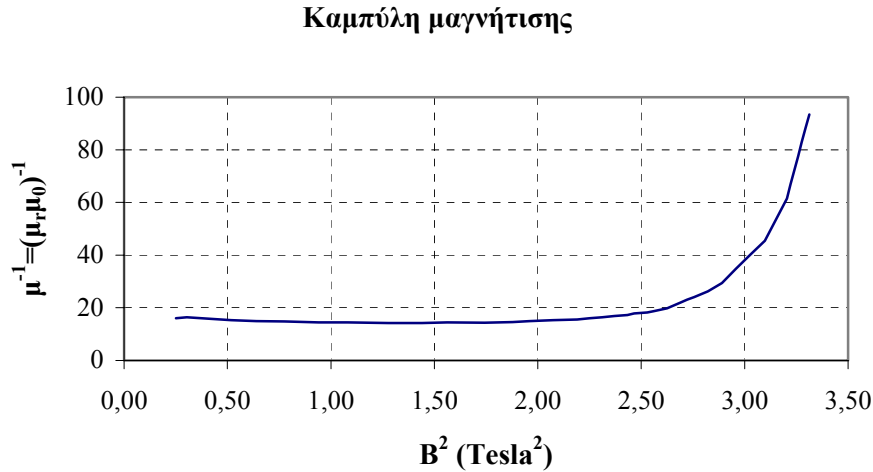


(β)

**Σχήμα 4.3:** Τυπική μορφή καμπύλης πρώτης μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού.

(α) σε άξονες B-H

(β) σε άξονες  $\mu$ -H



**Σχήμα 4.4:** Ισοδύναμη μορφή καμπύλης πρώτης μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού, σε άξονες  $\nu$ - $B^2$ .

#### 4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

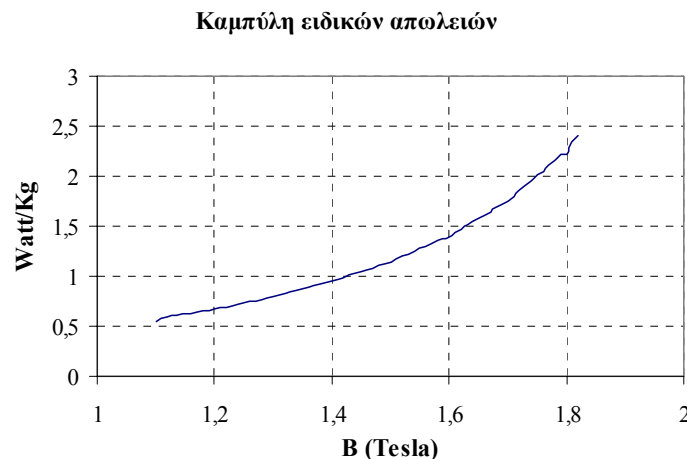
Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του Κεφαλαίου, για τον υπολογισμό των απωλειών κενού φορτίου προσομοιώνεται η δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (κενού φορτίου) των μετασχηματιστών. Κατά τη δοκιμή αυτή, το πηνίο Υψηλής Τάσης (ΥΤ) ανοιχτοκυκλώνεται, ενώ στο πηνίο Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) επιβάλλεται τάση ίση με την ονομαστική. Έτσι, κατά την προσομοίωση της δοκιμής κενού φορτίου θεωρείται ότι το πηνίο ΧΤ διαρρέεται από το ρεύμα μαγνήτισης, ενώ το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο ΥΤ λαμβάνεται ίσο με μηδέν. Με τη διαδικασία επίλυσης λαμβάνονται οι τιμές του πεδίου σε όλο το χώρο του μοντέλου του εξεταζόμενου μετασχηματιστή, από τις οποίες υπολογίζεται και η τιμή των απωλειών πυρήνα, με τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

Από την επίλυση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτει η τιμή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής  $B_m(j)$  σε κάθε τρίγωνο  $j$  του πλέγματος (θεωρούνται και πάλι πεπερασμένα στοιχεία πρώτου βαθμού, στο εσωτερικό των οποίων η συνάρτηση μορφής μεταβάλλεται γραμμικά, δίνοντας μία τιμή μαγνητικής επαγωγής και έντασης του μαγνητικού πεδίου ανά τρίγωνο). Από την τιμή αυτή, μπορεί να προσδιοριστεί η αντίστοιχη τιμή ειδικών απωλειών  $SW_m(j)$  ενός τριγώνου που ανήκει σε περιοχή πυρήνα, με βάση την καμπύλη του Σχήματος 4.5. Η καμπύλη αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή του υλικού του πυρήνα, για συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας του μετασχηματιστή. Περιλαμβάνει τις απώλειες δινορρευσμάτων και υστέρησης και εξάγεται από μετρήσεις του κατασκευαστή στο υλικό. Η τιμή των ειδικών απωλειών, πολλαπλασιαζόμενη με το εμβαδόν του τριγώνου  $S_j$  και την πυκνότητα του υλικού του πυρήνα,  $\rho_c$ , δίνει τη στοιχειώδη απώλεια  $W(j)$  εντός του τριγώνου, σύμφωνα με τη Σχέση (4.2). Έτσι, οι συνολικές απώλειες πυρήνα μπορούν να προκύψουν αθροίζοντας τις στοιχειώδεις απώλειες όλων των τριγώνων που αναπαριστούν τον πυρήνα στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με τη Σχέση (4.3), όπου  $N$ , συνολικός αριθμός τριγώνων που αποτελούν το υλικό του πυρήνα.

$$W(j) = SW_m(j) \cdot S_j \cdot \rho_c \quad (4.2)$$

$$W = \sum_{j=1}^N W(j) \quad (4.3)$$

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται εποπτικά στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.6. Για την εξαγωγή των τιμών ειδικών απωλειών από την καμπύλη του Σχήματος 4.5 χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή. Η χρήση πιο περίπλοκης μεθόδου παρεμβολής δεν είναι αναγκαία, καθώς οι τιμές που λαμβάνονται από την παρεμβολή χρησιμοποιούνται μόνο για τη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, χωρίς να επηρεάζουν τη σύγκλιση της αναγωγικής μεθόδου που χρησιμοποιείται για την επίλυση της.



**Σχήμα 4.5:** Καμπύλη ειδικών απωλειών σιδηρομαγνητικού υλικού (για δεδομένη συχνότητα λειτουργίας, 50Hz).

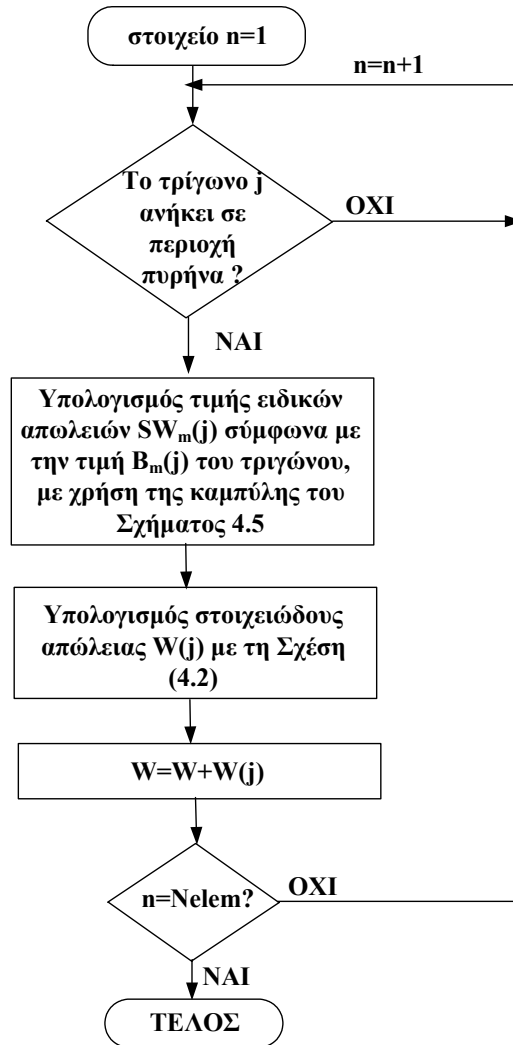
Όπως φαίνεται από την περιγραφή του τρόπου υπολογισμού των απωλειών αλλά και του τρόπου διεξαγωγής της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, οι ιδιότητες του υλικού του πυρήνα αναπαριστώνται τόσο μέσω της καμπύλης πρώτης μαγνήτισης όσο και μέσω της καμπύλης ειδικών απωλειών. Η ακρίβεια αναπαράστασης των ιδιοτήτων αυτών είναι ζωτικής σημασίας για την εξαγωγή ακριβών αποτελεσμάτων απωλειών κενού φορτίου. Στον υπολογισμό των απωλειών που παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο, τα στοιχεία αυτά στηρίζονται εξ'ολοκλήρου στα δεδομένα που παρέχει ο κατασκευαστής του υλικού (με τη μορφή των αντίστοιχων καμπυλών). Στην επόμενη παράγραφο δίνεται μία αναλυτικότερη περιγραφή των χαρακτηριστικών διαφόρων ειδών μαγνητικής λαμαρίνας που διατίθενται από τους κατασκευαστές για τη διαμόρφωση των πυρήνων μετασχηματιστών ισχύος.

#### 4.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥΣ

Για την κατασκευή των μαγνητικών πυρήνων των μετασχηματιστών ισχύος απαιτούνται μαγνητικά υλικά με πολλούς συνδυασμούς ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε τυλιχτούς ή στοιβακτούς πυρήνες μετασχηματιστών είναι στην πλειοψηφία τους κράματα σιδήρου-πυριτίου, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των οποίων τα καθιστούν κατάλληλα για χρήση σε πυρήνες με ελάσματα, στα οποία η πολικότητα της ροής αντιστρέφεται πολλές φορές στη διάρκεια 1 sec (κατά την επιβολή εναλλασσόμενου πεδίου διέγερσης).

Για την εξασφάλιση της ομοιογένειας κατά την προδιαγραφή, παραγωγή και αγορά μαγνητικών λαμαρίνων, έχει καθιερωθεί η ταξινόμησή τους με βάση τις απώλειες πυρήνα. Ο χαρακτηρισμός του κάθε είδους δίνεται συνήθως από το χαρακτήρα  $M$ , ακολουθούμενο από κάποιο αριθμό. Ο χαρακτήρας  $M$  υποδηλώνει τον όρο μαγνητικό υλικό (*magnetic material*), ενώ ο αριθμός είναι ενδεικτικός των απωλειών πυρήνα του εκάστοτε είδους. Την εποχή που

υιοθετήθηκε αυτός ο χαρακτηρισμός<sup>1</sup>, ο αριθμός αυτός αντιστοιχούσε σε περίπου δέκα φορές την απώλεια πυρήνα (εκφρασμένη σε Watt/round) για δεδομένο πάχος λαμαρίνας (29 gauge), μετρημένη σε μαγνητική επαγωγή 15 kilogauss και σε συχνότητα 60 Hz. Σήμερα, ωστόσο, ο αριθμός αυτός δεν αντιπροσωπεύει τις ίδιες απώλειες, δεδομένου ότι τα μαγνητικά υλικά έχουν βελτιωθεί σημαντικά και οι αντίστοιχες απώλειες πυρήνα έχουν μειωθεί δραστικά. Ωστόσο, οι αριθμοί αυτοί δεν αντιπροσωπεύουν μόνο την κλάση απωλειών του συγκεκριμένου υλικού, αλλά και τη σχετική μεταβολή της τιμής απωλειών μεταξύ των υλικών της ίδιας κλάσης.



**Σχήμα 4.6:** Διάγραμμα ροής υπολογισμού απωλειών κενού φορτίου με βάση τις τοπικές τιμές πεδίου του πυρήνα.

Τα υλικά των μαγνητικών πυρήνων των μετασχηματιστών μπορούν να διαιρεθούν σε δύο βασικές κλάσεις με βάση τις κύριες μαγνητικές ιδιότητες του υλικού αλλά και τον τρόπο παραγωγής τους, [4.22]:

- *Λαμαρίνες μη κατευθυνόμενων κόκκων:* Σε αυτό το είδος λαμαρίνων, οι μαγνητικές ιδιότητες είναι πρακτικά ίδιες για όλες τις κατευθύνσεις μαγνήτισης. Ο όρος «μη κατευθυνόμενων κόκκων» χρησιμοποιείται για να τις διαφοροποιήσει από το άλλο είδος,

<sup>1</sup> Ο χαρακτηρισμός αυτός καθιερώθηκε αρχικά από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σιδήρου και Χάλυβα (American Iron Steel and Institute, AISI).

το οποίο παράγεται με διεργασίες που δημιουργούν συγκεκριμένο προσανατολισμό ή κατεύθυνση των μαγνητικών ιδιοτήτων.

- *Λαμαρίνες κατευθυνόμενων κόκκων:* Ο όρος χρησιμοποιείται για να προδιαγραφεί λαμαρίνες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μαγνητικές ιδιότητες με έντονο προσανατολισμό σε σχέση με την κατεύθυνση της εξέλασής τους. Με τη διαδικασία εξέλασης και ανόπτησης, κράματα κατάλληλης σύνθεσης μπορούν να αποκτήσουν μεταλλική κρυσταλλική δομή στην οποία οι κόκκοι του υλικού ευθυγραμμίζονται, έτσι ώστε οι μαγνητικές ιδιότητες να είναι πολύ μεγαλύτερες στην κατεύθυνση εξέλασης, σε σχέση με τις υπόλοιπες κατευθύνσεις.

Οι κατασκευαστές μετασχηματιστών χρησιμοποιούν πλέον στην πλειοψηφία τους τη δεύτερη κατηγορία λαμαρίνων, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η δυνατότητα προσανατολισμού του μαγνητικού πεδίου τους. Τόσο οι απώλειες πυρήνα, όσο και η μαγνητική διαπερατότητα παρουσιάζουν έντονη διακύμανση, ανάλογα με την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής ως προς την κατεύθυνση εξέλασης του υλικού. Για παράδειγμα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, η διαφορά στο ρεύμα διέγερσης ανάμεσα στην κύρια και τις υπόλοιπες κατευθύνσεις σε λαμαρίνες κατευθυνόμενων κόκκων μπορεί να είναι 20 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τις λαμαρίνες μη κατευθυνόμενων κόκκων. Καθοριστική για τις ιδιότητες του υλικού είναι και η περιεκτικότητά του σε πυρίτιο, και οι συνήθεις τιμές της είναι 3 έως 3.5%. Μικρότερη περιεκτικότητα σε πυρίτιο οδηγεί σε υψηλές απώλειες δινορρευσμάτων ενώ μεγαλύτερη περιεκτικότητα μειώνει το επίπεδο πυκνότητας κορεσμού, απαιτώντας υψηλότερες διεγέρσεις σε υψηλές πυκνότητες κορεσμού, περιορίζοντας έτσι το εύρος των τιμών επαγωγής λειτουργίας. Τέλος, η εξέλιξη των μεθόδων εξέλασης του υλικού και των κατεργασιών παραγωγής του γενικότερα έχουν οδηγήσει σε παραγωγή τύπων λαμαρίνας με πολύ βελτιωμένα χαρακτηριστικά απωλειών και μαγνητικών ιδιοτήτων, γενικότερα.

#### ***4.5.1 Επίδραση μηχανικών καταπονήσεων και θερμικών κατεργασιών στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού του πυρήνα***

Οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού του πυρήνα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε μηχανικές καταπονήσεις. Οι μεταβολές των ιδιοτήτων οφείλονται στη μεταβολή της κρυσταλλικής δομής στις περιοχές του υλικού που καταπονείται, η οποία προκαλεί κατά κανόνα υποβάθμισή τους.

Μετά την κατεργασία του από τον ίδιο τον κατασκευαστή της λαμαρίνας, το υλικό ανοπτύεται σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας, χρόνου και ατμόσφαιρας, έτσι ώστε να ανακτήσει πλήρως τις επιθυμητές μαγνητικές ιδιότητες και να ελαχιστοποιηθεί οποιαδήποτε επίδραση από προηγούμενη καταπόνηση. Μετά από την ανόπτυση, το υλικό παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά τα οποία προδιαγράφονται από τον κατασκευαστή στις αντίστοιχες καμπύλες μαγνήτισης και ειδικών απωλειών. Ωστόσο, στη συνέχεια υποβάλλεται σε νέες καταπονήσεις, κατά τη διαμόρφωσή του σε πυρήνες από τους κατασκευαστές μετασχηματιστών. Οι καταπονήσεις αυτές πραγματοποιούνται κατά την κοπή των ελασμάτων και την τύλιξη τους για τη διαμόρφωση των τυλιχτών πυρήνων και μπορούν να ελαχιστοποιηθούν μόνο μέσω της ανόπτωσης. Αυτό ισχύει και για τις ελαστικές καταπονήσεις, ο μόνος τρόπος ελαχιστοποίησης των οποίων σε συναρμολογημένους πυρήνες είναι η ανόπτυσή τους, έτσι ώστε να διατηρήσουν την τελική τους μορφή. Το μέγεθος της επίπτωσης των καταπονήσεων στις μαγνητικές ιδιότητες επηρεάζεται από την έκταση των ανεπιθύμητων καταπονήσεων που προκαλούνται κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε χειρισμού ή βήματος κατασκευής μετά την τελευταία διαδικασία ανόπτωσης. Η επίπτωση αυτή μπορεί να υποβαθμίσει το υλικό σε τέτοιο βαθμό, ώστε να επηρεάσει την επιλογή κλάσης υλικού για δεδομένη εφαρμογή (οδηγώντας πιθανόν σε επιλογή υλικού με χαμηλότερες ειδικές απώλειες, με την προοπτική αύξησής τους μετά την κατεργασία του). Κάτι τέτοιο μπορεί όμως να αποφευχθεί υποβάλλοντας τους διαμορφωμένους πυρήνες σε νέα ανόπτυση, μετά το τελικό στάδιο κατασκευής τους.

Πρέπει ωστόσο να τονιστεί ότι στην περίπτωση της λαμαρίνας κατευθυνόμενων κόκκων, η διαδικασία ελαχιστοποίησης των καταπονήσεων μέσω της ανόπτυσης δεν μπορεί να οδηγήσει πάντα σε πλήρη ανάκτηση των μαγνητικών ιδιοτήτων. Έτσι, οι μηχανικές καταπονήσεις και η θερμική κατεργασία του υλικού του πυρήνα επηρεάζουν τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του με τρόπο που μπορεί να προσδιοριστεί μόνο μέσω μετρήσεων μετά την τελική διαμόρφωση και ανόπτυση, δημιουργώντας έτσι ένα ποσοστό απόκλισης από τις καμπύλες που παρέχονται από τον κατασκευαστή της μαγνητικής λαμαρίνας. Αυτός είναι και ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των υπολογισμών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

#### ***4.5.2 Εξαγωγή χαρακτηριστικών καμπυλών υλικού πυρήνα με μετρήσεις***

Η εξαγωγή της καμπύλης πρώτης μαγνήτισης του υλικού του πυρήνα (Σχήμα 4.3) γίνεται από τον κατασκευαστή της λαμαρίνας με χρήση μηχανής Epstein, για DC διέγερση, σε δείγματα υλικού κομμένα σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατεύθυνση εξέλασης και μετά την υποβολή τους σε διαδικασία ανόπτυσης υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Με την ίδια διαδικασία προκύπτει και η καμπύλη ειδικών απωλειών (Σχήμα 4.5).

## 4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] J. Reinert, A. Brockmeyer, R. W. A. A. De Doncker, "Calculation of Losses in Ferro- and Ferrimagnetic Materials Based on the Modified Steinmetz Equation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, No 4, pp. 1055-1061, Jul. 2001.
- [4.2] Ι. Α. Τεγόπουλος, "Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β: Μόνιμη Κατάσταση". Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [4.3] Π. Σ. Γεωργιλάκης, "Συμβολή Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης στη μείωση των Απωλειών Κενού Φορτίου Μετασχηματιστών Διανομής". Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2000.
- [4.4] D. N. Ewart, "Digital computer simulation model of steel-core transformer," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 1, pp. 174-183, Jul. 1986.
- [4.5] R. Yacamini, "The calculation of inrush current in three-phase transformers," *IEE Proc.*, Pt. B, vol. 133, pp. 235-242, Jan. 1986.
- [4.6] M. A. Rahman, "Digital simulation of magnetizing inrush currents in three-phase transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 1, pp. 235-242, Oct. 1986.
- [4.7] M. Elleuch, M. Poloujadoff, "Three phase, three limb transformer model for switching transient calculations. Part I: Parameter Definition and Identification," *Acta Technica Csav.*, no. 1, pp. 100-117, 1988.
- [4.8] R. C. Y. Ling, A. Basak, "Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, pp. 3217-3222, 1988.
- [4.9] J. D. Greene, C. A. Gross, "Nonlinear modeling of transformer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 24, pp. 434-438, 1988.
- [4.10] A. J. Moses, B. Thomas, "Problems in the design of Power Transformers," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 10, no. 2, pp. 148-150, June 1974.
- [4.11] A. J. Moses, "Comparison of transformer loss prediction from computed and measured flux density distribution," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 34, no. 4, pp. 1186-1188, Jul. 1998.
- [4.12] A. Mae, K. Harada, Y. Ishihara, T. Todaka, "A study of characteristic analysis of the three-phase transformer with step-lap wound-core," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 38, no. 2, pp. 829-832, Mar. 2002.
- [4.13] A. Basak, C. H. Yu, G. Lloyd, "Efficient transformer design by computing core loss using a novel approach," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, no. 5, pp. 3725-3728, Sept. 1994.
- [4.14] P.S. Georgilakis, N.D. Doulamis, A.D. Doulamis, N.D. Hatziaargyriou, S.D. Kollias, "A novel iron loss reduction technique for distribution transformers based on a combined genetic algorithm-neural network approach," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 31, no. 1, pp. 16-34, Feb. 2001.
- [4.15] P. Georgilakis, N. Hatziaargyriou, D. Paparigas, "AI Helps Reduce Transformer Iron Losses," *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 12, Nr. 4, pp. 41-46, 1999.
- [4.16] Πρακτικά Συμποσίου με θέμα "Τεχνολογικά και οικονομικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση μετασχηματιστών διανομής με μειωμένες απώλειες," Αθήνα, Μάιος 1994.
- [4.17] Π. Σ. Γεωργιλάκης, Δ. Σ. Σπηλιόπουλος, Α. Τ. Σουφλάρης, Δ. Γ. Παπαρήγας, και Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, "Κατασκευή Μετασχηματιστών με Πυρήνα Άμορφου Σιδήρου στην Ελλάδα," Πρακτικά Ημερίδας ΔΕΗ για νέες Τεχνολογίες Μετασχηματιστών, Αθήνα, Φεβρουάριος 1999.
- [4.18] S. Sieradzki, "Apparent Core Losses and Core Losses in Five Limb Amorphous

- Trnasformer of 160 kVA,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 34, no. 4, pp. 1189-1191, Jul. 1998.
- [4.19] R. Findlay, R. Belmans, D. Mayo, “Influence on the stacking method on the iron losses in power transformer cores,” *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 26, no. 5, pp. 1990-1992, Sept. 1990.
- [4.20] Α. Τσιβγούλη, «Μελέτη γεωμετρίας Μετασχηματιστή με Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων». Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Οκτώβριος 2004.
- [4.21] A. B. J. Reece, “*Finite Element Methods in Electrical Power Engineering*”. Oxford University Press, May 2000.
- [4.22] “*Selection of Electrical Sheets for Magnetic Cores*,” Product Data Bulletin, 2000, AK Steel Corporation.

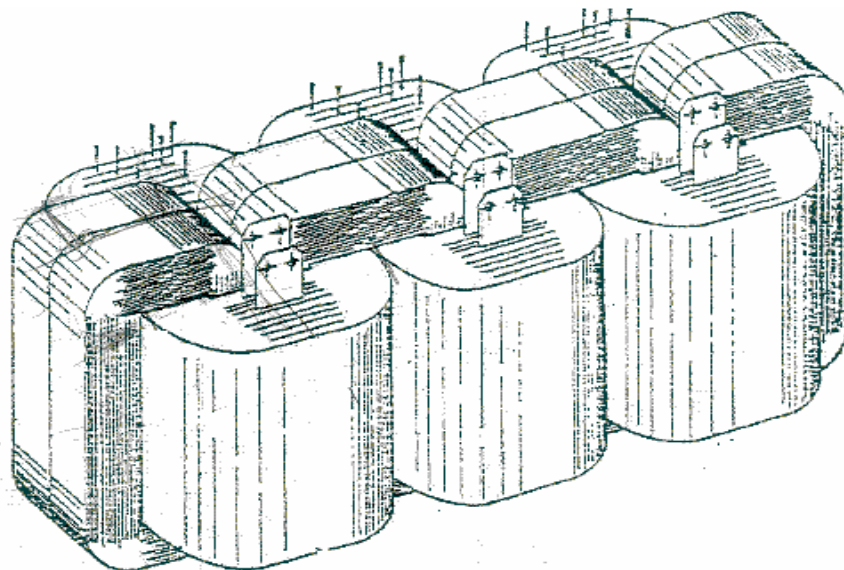
## ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών. Αρχικά γίνεται περιγραφή του μοντέλου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση των μετασχηματιστών και τη μελέτη της δοκιμής κενού φορτίου. Ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων της μεθόδου στις τρεις περιπτώσεις των μετασχηματιστών και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρημένες τιμές απωλειών που έδωσε ο κατασκευαστής.

### 5.1 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Για τη μοντελοποίηση του μετασχηματιστή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMM (Finite Element Method Magnetics), η χρήση και η λειτουργία του οποίου περιγράφεται αναλυτικά στην αναφορά [5.1]. Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η διαμόρφωση του μοντέλου, και ο τρόπος με τον οποίο αναπαριστά τα πραγματικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα.

Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το ενεργό μέρος του υπό μελέτη μετασχηματιστή (τριφασικός μετασχηματιστής διανομής, τύπου τυλιχτού πυρήνα της εταιρείας Schneider Electric), το οποίο αποτελείται από δύο μικρούς και δύο μεγάλους πυρήνες και τα τυλίγματα υψηλής τάσης και χαμηλής τάσης των τριών φάσεων.

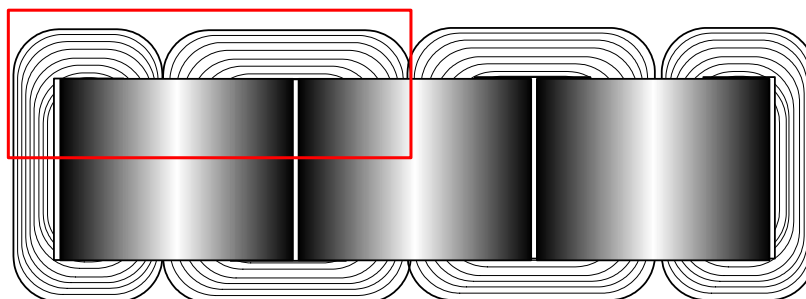


Σχήμα 5.1: Τριφασικός μετασχηματιστής διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα.

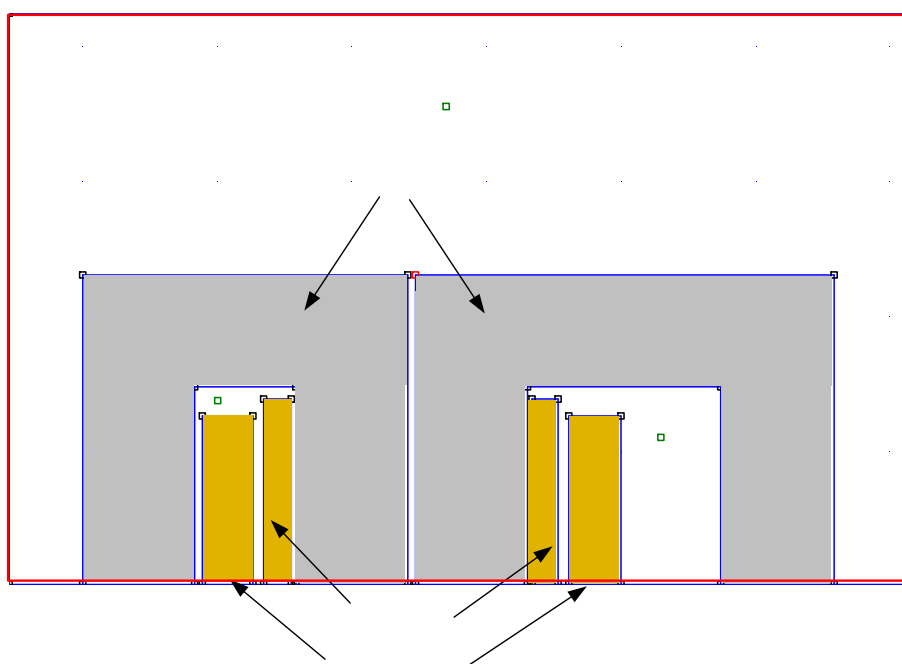
### 5.1.1 Γεωμετρία δισδιάστατου μοντέλου μετασχηματιστή

Η εξαγωγή του ισοδύναμου μονοφασικού μοντέλου στηρίζεται στην αξιοποίηση της συμμετρίας η οποία χαρακτηρίζει το ενεργό μέρος, έτσι ώστε να μειώνεται κατά το δυνατό η διάσταση του μοντέλου (και του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, αντίστοιχα) χωρίς να υποβιβάζεται η ακρίβεια της αναπαράστασης, [5.2]. Έτσι, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προκύπτει από το τμήμα του ενεργού μέρους το οποίο επισημαίνεται στο Σχήμα 5.2. Το τμήμα αυτό αποτελείται από το  $\frac{1}{2}$  των πηνίων XT και YT μίας φάσης και του ενός μικρού και μεγάλου πυρήνα που τα περιβάλλουν. Το αντίστοιχο μοντέλο FEMM εικονίζεται στο Σχήμα 5.3. Το μοντέλο του Σχήματος 5.3 διαφέρει από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην αναφορά [5.1] για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης, το οποίο εικονίζεται στο Σχήμα 5.4 ως εξής:

- Στο μοντέλο του Σχήματος 5.4 χρησιμοποιείται τροποποιημένη ισοδύναμη γεωμετρία των τυλιγμάτων, έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των τμημάτων τους εκτός του πυρήνα (δεδομένου ότι τα τμήματα αυτά δε μπορούν να αναπαρασταθούν σε δύο διαστάσεις). Η τροποποιημένη γεωμετρία προϋποθέτει αύξηση του ύψους των τυλιγμάτων μέσα στο παράθυρο του πυρήνα σύμφωνα με τους συντελεστές Rogowski, είναι δε αναγκαία στην περίπτωση της δοκιμής βραχυκύκλωσης, στην οποία το μεγαλύτερο μέρος της ροής σκέδασης αναπτύσσεται στο χώρο μεταξύ των τυλιγμάτων και στα τμήματά τους εκτός του πυρήνα, επηρεάζοντας σημαντικά την υπολογιζόμενη τάση βραχυκύκλωσης. Αντίθετα, στην περίπτωση της δοκιμής κενού φορτίου, στην οποία το ένα τύλιγμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο, η ροή σκέδασης μεταξύ των πηνίων είναι πρακτικά αμελητέα και το μεγαλύτερο μέρος του πεδίου διέρχεται από τον πυρήνα. Έτσι, στο μοντέλο του Σχήματος 5.3 λαμβάνονται οι πραγματικές διαστάσεις των πηνίων στο παράθυρο του πυρήνα.
- Λόγω της τροποποιημένης γεωμετρίας των πηνίων του μοντέλου του Σχήματος 5.4, προκύπτει αντίστοιχα τροποποιημένη γεωμετρία του πυρήνα. Αντίθετα, στο μοντέλο του Σχήματος 5.3 έχει αναπαρασταθεί η πραγματική γεωμετρία των πυρήνων, δεδομένου ότι αυτή είναι καθοριστική στην περίπτωση της πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου.
- Στο μοντέλο του Σχήματος 5.4 χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας από τους πυρήνες για τη μοντελοποίηση της μίας φάσης, δεδομένου ότι στην περίπτωση της δοκιμής βραχυκύκλωσης η περιοχή των πηνίων είναι αυτή που καθορίζει το πεδίο σκέδασης. Αντίθετα, στην περίπτωση της δοκιμής κενού φορτίου (μοντέλο Σχήματος 5.3) μοντελοποιούνται και οι δύο πυρήνες που περιβάλλουν τα πηνία μίας φάσης, για τη λεπτομερέστερη απεικόνιση της πραγματικής γεωμετρίας τους.

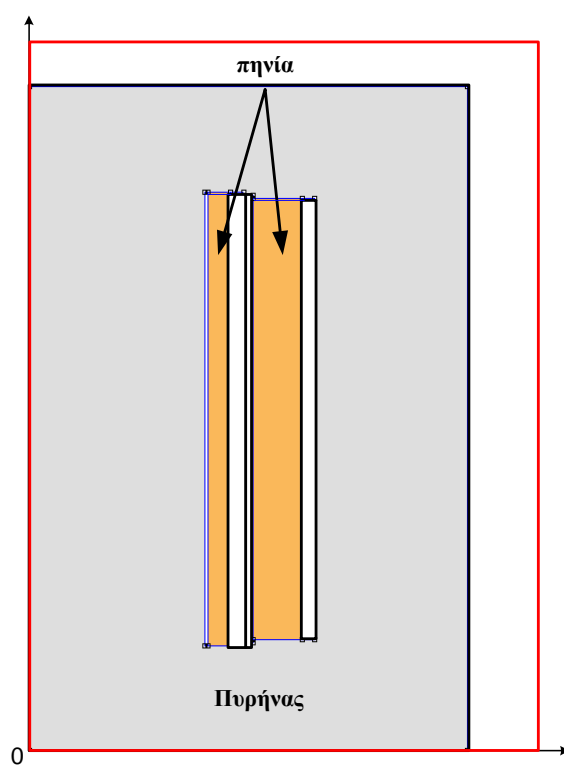


**Σχήμα 5.2:** Τμήμα του ενεργού μέρους από το οποίο προκύπτει το ισοδύναμο δισδιάστατο μοντέλο του Σχήματος 5.3.



πυρήνες

**Σχήμα 5.3:** Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μετασχηματιστή για την αναπαράσταση της δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος (προσδιορισμός απωλειών κενού φορτίου).



Πηνίο XT

Πηνίο YT

**Σχήμα 5.4:** Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μετασχηματιστή για την αναπαράσταση της δοκιμής βραχυκυκλώματος (προσδιορισμός τάσης βραχυκύκλωσης), [5.3, 5.4].

### 5.1.2 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο εξωτερικό σύνορο είναι τύπου Dirichlet ( $\vec{A}=0$ ) και εκφράζουν το γεγονός ότι εκτός του σιδήρου η μαγνητική ροή είναι μηδενική (κατά το βραχυκύκλωμα μπορεί να θεωρηθεί ότι όλη σχεδόν η μαγνητική ροή περικλείεται στον πυρήνα).

### 5.1.3 Υπολογισμός απωλειών κενού φορτίου με προσομοίωση της δοκιμής κενού φορτίου

Ο υπολογισμός των απωλειών κενού φορτίου με τη χρήση του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με τον τρόπο που περιγράφηκε αναλυτικά στην Παράγραφο 4.4 του Κεφαλαίου 4. Για τον υπολογισμό των απωλειών κενού φορτίου προσομοιώνεται η δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (κενού φορτίου) των μετασχηματιστών. Με τη διαδικασία επίλυσης λαμβάνονται οι τιμές του πεδίου (μαγνητικής επαγωγής) σε όλο το χώρο του μοντέλου του εξεταζόμενου μετασχηματιστή. Η διαδικασία του υπολογισμού στηρίζεται στην καμπύλη ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα, η οποία συνδέει την τοπική τιμή της επαγωγής του πυρήνα με τις ειδικές απώλειες (Watt/kg) του πυρήνα. Αθροίζοντας τις τοπικές τιμές ειδικών απωλειών (οι οποίες προκύπτουν σε κάθε τρίγωνο του διδιάστατου πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων) και πολλαπλασιάζοντας με τη μάζα των πυρήνων προκύπτει η συνολική τιμή απωλειών για το μοντέλο του Σχήματος 5.3. Δεδομένου ότι το μοντέλο αυτό αποτελεί το 1/4 του συνολικού ενεργού μέρους του μετασχηματιστή, οι συνολικές απώλειες πυρήνα προκύπτουν τετραπλασιάζοντας την παραπάνω υπολογισμένη τιμή απωλειών.

## 5.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Στην Παράγραφο αυτή περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό των απωλειών κενού φορτίου σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών. Ειδικότερα, μελετώνται τρεις περιπτώσεις μετασχηματιστών ισχύος, 400, 630 και 1000 kVA, διπλού επιπέδου υψηλής τάσης 20-15 kV, επιπέδου χαμηλής τάσης 400 V και συνδεσμολογίας Dyn11. Οι απώλειες κενού φορτίου που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνονται με τις μετρημένες τιμές απωλειών από τον κατασκευαστή (άθροισμα μετρημένων απωλειών τριών φάσεων).

### 5.2.1 Μετασχηματιστής 400 kVA

Όσον αφορά στην πεδιακή ανάλυση του μετασχηματιστή 400 kVA σε συνθήκες κενού φορτίου, η προσομοίωση της δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι το πηνίο YT αποτελείται από μηδενικά αμπερελίγματα (δεδομένου ότι είναι ανοιχτοκυκλωμένο), ενώ το πηνίο XT αποτελείται από αμπερελίγματα που δίνονται από τον αριθμό των ελιγμάτων του, πολλαπλασιασμένο με το ρεύμα μαγνήτισης. Ως ρεύμα μαγνήτισης λαμβάνεται το ρεύμα της δοκιμής κενού φορτίου που έχει μετρηθεί από τον κατασκευαστή κατά τη διεξαγωγή της αντίστοιχης δοκιμής (ειδικότερα, λαμβάνεται η μέση τιμή του ρεύματος των τριών φάσεων). Τα αμπερελίγματα των πηνίων του μετασχηματιστή 400 kVA για τη δοκιμή κενού φορτίου παρατίθενται στον Πίνακα 5.1. Ο Πίνακας 5.1, όπως και όλα τα στοιχεία δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος και της αντίστοιχης προσομοίωσης με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αναφέρονται σε ένα επίπεδο YT (ειδικότερα, τα 20 kV) αφού η δοκιμή πραγματοποιείται στη XT (εξάλλου, το τύλιγμα YT δε διαρρέεται από ρεύμα, οπότε η συνδεσμολογία των υποπηνίων του δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα).

Πηνίο XT		Πηνίο YT							
		Υποπηνίο 1		Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4	
N	I	N	I	N	I	N	I	N	I
20	4.71	501	0	433	0	433	0	365	0
Συνολικά αμπερελίγματα		Συνολικά αμπερελίγματα							
94.2		0							

**Πίνακας 5.1:** Αμπερελίγματα πηνίου υψηλής και χαμηλής τάσης για τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος του μετασχηματιστή 400 kVA.

Στα Σχήματα 5.5 και 5.6 δίνονται οι καμπύλες πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα του μετασχηματιστή 400 kVA. Πρόκειται για λαμαρίνα τύπου M4, πάχους ελασμάτων 0.27 mm. Οι καμπύλες των Σχημάτων 5.5 και 5.6 δίνονται από τον κατασκευαστή της μαγνητικής λαμαρίνας και αναφέρονται στο υλικό πριν την τελική του κατεργασία στη μονάδα παραγωγής μετασχηματιστών για τη διαμόρφωσή του σε τυλιχτούς πυρήνες.

Όπως αναφέρθηκε, στην περίπτωση της δοκιμής κενού φορτίου, η μαγνητική ροή διέρχεται κυρίως από την περιοχή των πυρήνων, καθιστώντας έτσι την ακριβή αναπαράστασή τους σημαντικό παράγοντα για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, όσον αφορά στην κατασκευή του πλέγματος στην περίπτωση της δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην ομοιογένεια και πυκνότητα του πλέγματος στην περιοχή των πυρήνων. Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζεται ένα από τα πυκνότερα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν, στο οποίο είναι εμφανής ο διαφορετικός βαθμός διακριτότητας που έχει υιοθετηθεί στην περιοχή των πηνίων και των πυρήνων. Είναι εμφανές ότι το πλέγμα στην περιοχή των πηνίων είναι αρκετά αραιό, επιτρέποντας έτσι την αύξηση της πυκνότητας στην περιοχή των πυρήνων χωρίς πολύ μεγάλη αύξηση του συνολικού αριθμού κόμβων πλέγματος του μοντέλου.

Για τη διερεύνηση της επίπτωσης του αριθμού κόμβων του πλέγματος στην ακρίβεια προσδιορισμού των απωλειών κενού φορτίου, χρησιμοποιήθηκαν και πάλι διάφορες πυκνότητες πλέγματος, έως και 150000 κόμβους περίπου. Το Σχήμα 5.8 απεικονίζει την κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος, για την περίπτωση του πλέγματος των 100000 κόμβων. Στο Σχήμα αυτό φαίνεται ότι, όπως αναμένεται, στην περίπτωση της λειτουργίας κενού φορτίου, το σύνολο της μαγνητικής ροής διέρχεται από τους πυρήνες, ενώ η μαγνητική επαγωγή στα πηνία είναι πρακτικά αμελητέα.

Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι τιμές ρεύματος μαγνήτισης και απωλειών που μετρήθηκαν από τον κατασκευαστή κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος. Παρατίθενται οι τιμές και των τριών φάσεων, η διακύμανση των οποίων οφείλεται, εκτός από την ασυμμετρία του μαγνητικού κυκλώματος των τριών φάσεων του μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα, και στο γεγονός ότι οι τέσσερις πυρήνες που συναρμολογούνται για την κατασκευή του μετασχηματιστή εμφανίζουν έντονα διαφοροποιημένα μαγνητικά χαρακτηριστικά λόγω της κατεργασίας τους, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.4 του Κεφαλαίου 4. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει και τη δυσκολία πρόβλεψης της τιμής των απωλειών με βάση τις καμπύλες μαγνήτισης και ειδικών απωλειών που δίνονται από τον κατασκευαστή της μαγνητικής λαμαρίνας. Η δυσκολία αυτή είναι εμφανής στον Πίνακα 5.3, όπου φαίνονται τα αποτελέσματα απωλειών κενού φορτίου τα οποία υπολογίστηκαν με χρήση των αποτελεσμάτων της πεδιακής ανάλυσης και η σύγκρισή τους με τις μετρημένες τιμές για διάφορες πυκνότητες πλεγμάτων. Η σύγκριση έγινε με το άθροισμα των απωλειών των τριών φάσεων του Πίνακα 5.2, το οποίο στην περίπτωση του μετασχηματιστή 400 kVA είναι ίσο με **818 W**. Η τιμή των απωλειών του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε μετά την επίλυσή του, με τη διαδικασία της Παραγράφου 5.1.3 και την καμπύλη του Σχήματος 5.6 για

συχνότητα λειτουργίας 50 Hz. Δεδομένου ότι το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη τις συμμετρίες του προβλήματος, αναπαριστά μόνο το 1/4 της πραγματικής γεωμετρίας του μετασχηματιστή, άρα και των πυρήνων του, οι απώλειες που υπολογίστηκαν από τη Σχέση (4.3) του Κεφαλαίου 4 πολλαπλασιάστηκαν με συντελεστή 4 για την εξαγωγή των συνολικών απωλειών κενού φορτίου. Η απόκλιση η οποία εμφανίζεται στον Πίνακα 5.3 προέκυψε με τη χρήση της Σχέσης (5.1):

$$\text{απόκλιση} = \frac{|P_{\text{μετρημένες κενού φορτίου}} - P_{\text{υπολογισμένες κενού φορτίου}}|}{P_{\text{μετρημένες κενού φορτίου}}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

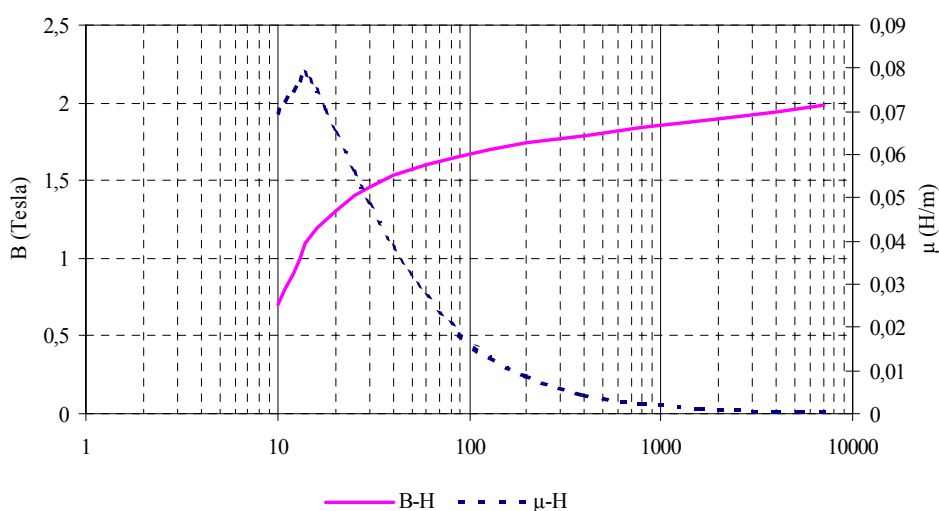
Μετρήσεις δοκιμής κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 400 kVA		
Φάση	Απώλειες πυρήνα (W)	Ρεύμα μαγνήτισης (A)
A	252	5,04
B	198	4,34
C	368	4,72
	$P_{\text{ολ}}=818$	$I_m^{\text{μέσο}} = 4,70$

**Πίνακας 5.2:** Μετρημένες απώλειες κενού φορτίου και ρεύμα μαγνήτισης τριών φάσεων για το μετασχηματιστή 400 kVA.

Αριθμός κόμβων πλέγματος	Υπολογισμένη τιμή απωλειών πυρήνα (W)	Απόκλιση (%)
1339	591,12	27,74
15949	897,24	9,69
40977	1099,52	34,42
88720	985,96	20,53
108040	1078,32	31,82
154765	1048,40	32,57

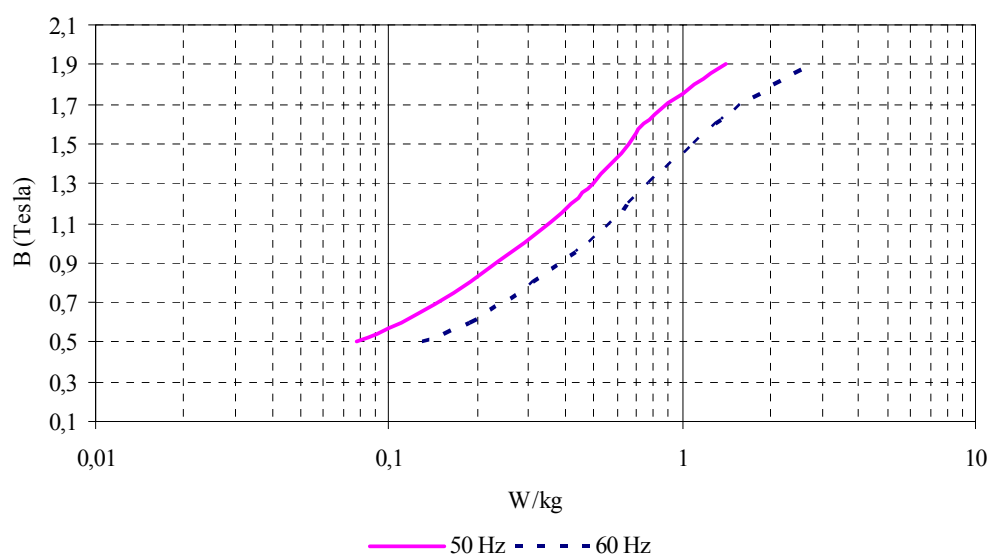
**Πίνακας 5.3:** Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών απωλειών κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 400 kVA.

**Καμπύλη μαγνήτισης λαμαρίνας M4-0.27**

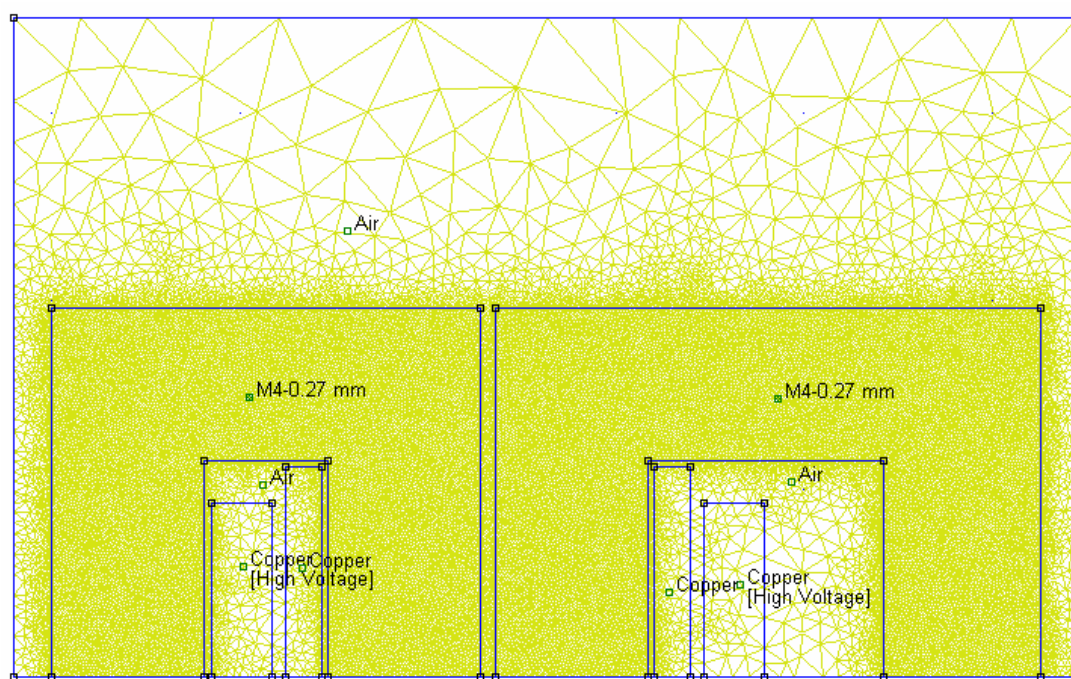


**Σχήμα 5.5:** Καμπύλη μαγνήτισης υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 400 kVA.

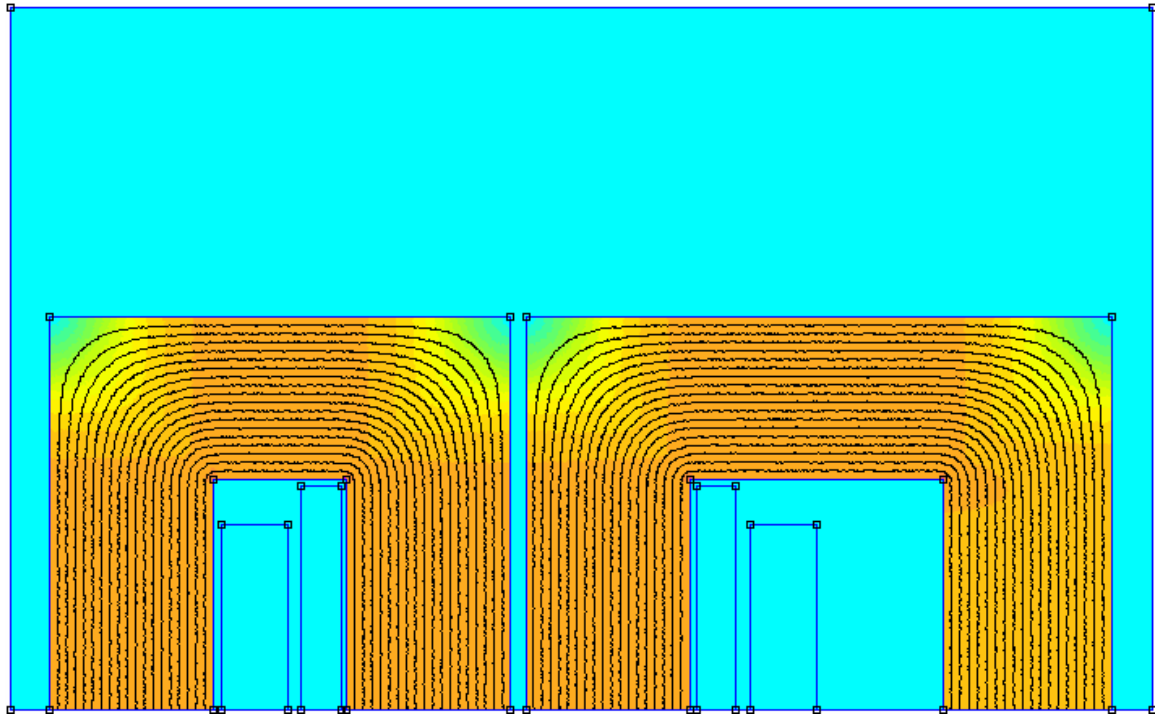
Καμπύλη ειδικών απωλειών λαμαρίνας M4-0.27



Σχήμα 5.6: Καμπύλη ειδικών απωλειών υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 400 kVA.

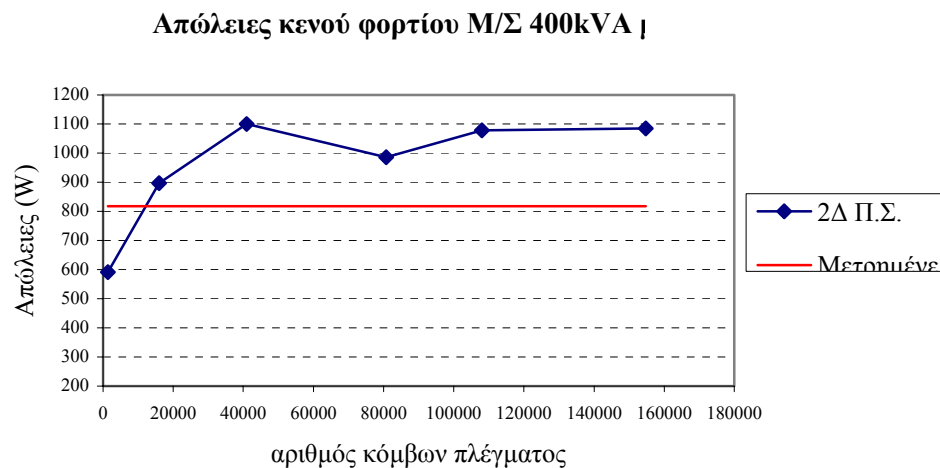


Σχήμα 5.7: Πλέγμα μοντέλου μετασχηματιστή 400 kVA για την προσομοίωση της λειτουργίας κενού φορτίου (πυκνότητας περίπου 100000 κόμβων).



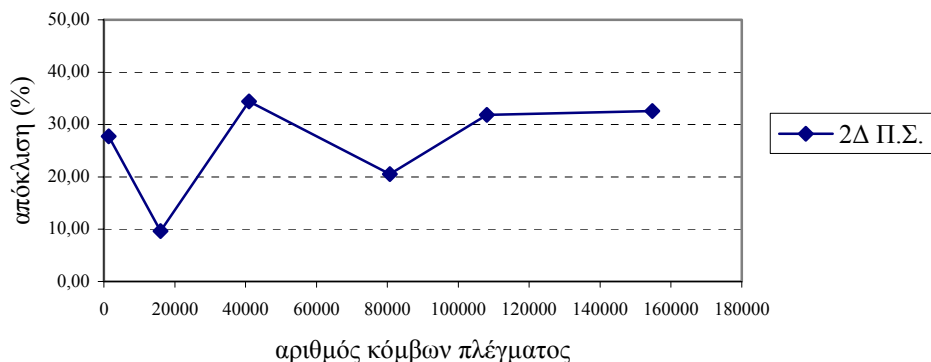
**Σχήμα 5.8:** Κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής για το Μ/Σ 400 kVA σε δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (πυκνότητας περίπου 100000 κόμβων).

Τα δεδομένα του Πίνακα 5.3 απεικονίζονται γραφικά στα Σχήματα 5.9 και 5.10, στα οποία φαίνεται η μεταβολή της υπολογισμένης τιμής απωλειών κενού φορτίου συναρτήσει των κόμβων του πλέγματος και η μεταβολή της απόκλισής της από τις μετρημένες τιμές.



**Σχήμα 5.9:** Μεταβολή της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το Μ/Σ 400 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.

**Απόκλιση υπολογισμένων από τις μετρημένες απώλειες  
κενού φορτίου Μ/Σ 400kVA**



**Σχήμα 5.10:** Μεταβολή της απόκλισης της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή για το Μ/Σ 400 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.

### 5.2.2 Μετασχηματιστής 1000 kVA

Ακολουθώς, στην περίπτωση της πεδιακής ανάλυσης του μετασχηματιστή 1000 kVA σε συνθήκες κενού φορτίου, τα αμπερελίγματα των πηνίων του για τη δοκιμή κενού φορτίου παρατίθενται στον Πίνακα 5.4.

	Πηνίο XT		Πηνίο YT							
			Υποπηνίο 1		Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4	
	N	I	N	I	N	I	N	I	N	I
20 kV	14	7.54	334	0	606	0	81	0	191	0
	Συνολικά αμπερελίγματα		Συνολικά αμπερελίγματα							
20 kV	106		0							

**Πίνακας 5.4:** Αμπερελίγματα πηνίου υψηλής και χαμηλής τάσης για τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος του μετασχηματιστή 1000 kVA.

Μετρήσεις δοκιμής κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 1000 kVA		
Φάση	Απώλειες πυρήνα (W)	Ρεύμα μαγνήτισης (A)
A	426	7,90
B	392	7,02
C	610	7,70
	$P_{ολ}=1428$	$I_m^{μέσο} = 7,54$

**Πίνακας 5.5:** Μετρημένες απώλειες κενού φορτίου και ρεύμα μαγνήτισης τριών φάσεων για το μετασχηματιστή 1000 kVA.

Το υλικό του πυρήνα του μετασχηματιστή 1000 kVA είναι το ίδιο με αυτό του μετασχηματιστή 400kVA (M4-0.27mm). Έτσι, οι καμπύλες πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα είναι αυτές των Σχημάτων 5.5 και 5.6, αντίστοιχα.

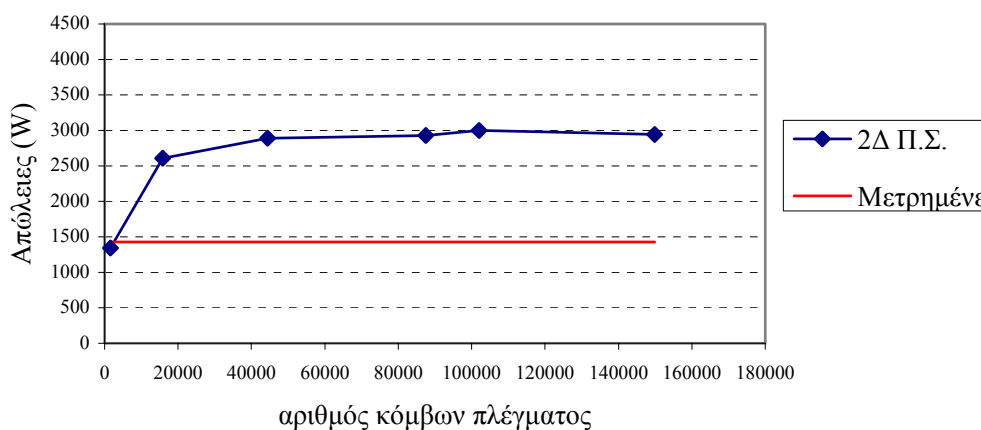
Ο Πίνακας 5.5 δίνει τις τιμές ρεύματος μαγνήτισης και απωλειών που μετρήθηκαν από τον κατασκευαστή κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος. Σε αυτήν την περίπτωση, οι τιμές των απωλειών των τριών φάσεων εμφανίζουν ακόμη μεγαλύτερη διακύμανση σε σχέση με τις αντίστοιχες του Πίνακα 5.2. Ο Πίνακας 5.6 δίνει τις υπολογισμένες τιμές απωλειών στο μετασχηματιστή 1000 kVA για διάφορες πυκνότητες πλέγματος και την απόκλισή τους από τις αντίστοιχες συνολικές μετρημένες απώλειες, οι οποίες είναι ίσες με **1428 W**.

Αριθμός κόμβων πλέγματος	Υπολογισμένη τιμή απωλειών πυρήνα (W)	Απόκλιση (%)
1531	1341,16	6,08
15789	2607,00	82,56
44430	2889,52	102,35
87535	2926,88	104,96
102033	3001,80	110,21
149833	2945,04	106,23

**Πίνακας 5.6:** Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών απωλειών κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 1000 kVA.

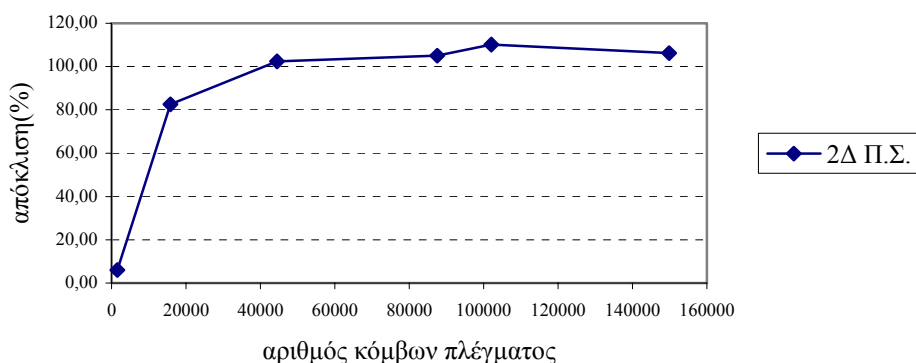
Τα αποτελέσματα απεικονίζονται γραφικά στα Σχήματα 5.11 και 5.12, στα οποία φαίνεται η μεταβολή της υπολογισμένης τιμής απωλειών κενού φορτίου συναρτήσει των κόμβων του πλέγματος, και η μεταβολή της απόκλισής της από τις μετρημένες τιμές.

#### Απώλειες κενού φορτίου Μ/Σ 1000kVA



**Σχήμα 5.11:** Μεταβολή της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το Μ/Σ 1000 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.

**Απόκλιση υπολογισμένων από τις μετρημένες απώλειες  
κενού φορτίου Μ/Σ 1000kVA**



**Σχήμα 5.12:** Μεταβολή της απόκλισης της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή για το Μ/Σ 1000 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.

### 5.2.3 Μετασχηματιστής 630 kVA

Εν συνεχεία, στην περίπτωση της πεδιακής ανάλυσης του μετασχηματιστή 630 kVA σε συνθήκες κενού φορτίου παρατίθενται τα αμπερελίγματα των πηνίων του για τη δοκιμή κενού φορτίου στον Πίνακα 5.7.

	Πηνίο XT		Πηνίο YT							
			Υποπηνίο 1		Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4	
	N	I	N	I	N	I	N	I	N	I
20 kV	16	9.26	339	0	692	0	155	0	199	0
	Συνολικά αμπερελίγματα		Συνολικά αμπερελίγματα							
20 kV	148.16		0							

**Πίνακας 5.7:** Αμπερελίγματα πηνίου υψηλής και χαμηλής τάσης για τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος του μετασχηματιστή 630 kVA.

Μετρήσεις δοκιμής κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 630 kVA		
Φάση	Απώλειες πυρήνα (W)	Ρεύμα μαγνήτισης (A)
A	201	10,23
B	210	8,04
C	720	9,51
	$P_{ολ}=1131$	$I_m^{μέσο} = 9,26$

**Πίνακας 5.8:** Μετρημένες απώλειες κενού φορτίου και ρεύμα μαγνήτισης τριών φάσεων για το μετασχηματιστή 630 kVA.

Το υλικό του πυρήνα του μετασχηματιστή 630 kVA είναι το ίδιο με αυτό των μετασχηματιστών 400 και 1000 kVA (M4-0.27mm). Έτσι, οι καμπύλες πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα είναι αυτές των Σχημάτων 5.5 και 5.6, αντίστοιχα.

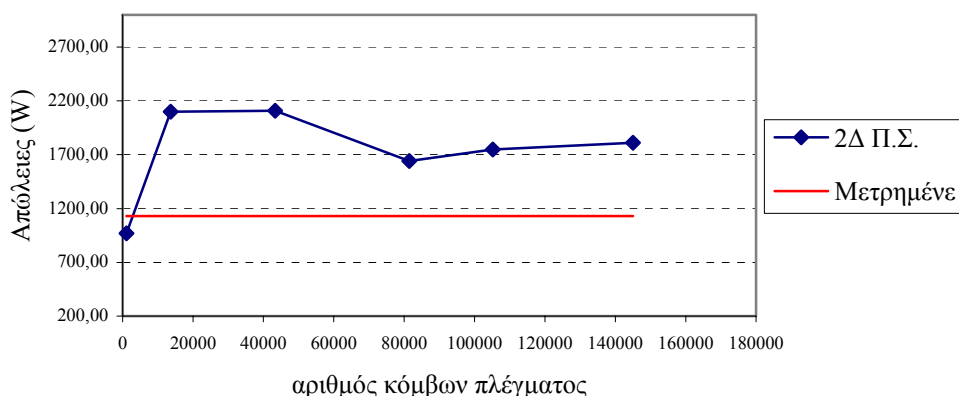
Ο Πίνακας 5.9 δίνει τις υπολογισμένες τιμές απωλειών στο μετασχηματιστή 630kVA για διάφορες πυκνότητες πλέγματος και την απόκλιση τους από τις αντίστοιχες μετρημένες απώλειες, οι οποίες είναι ίσες με **1131W**. Η τιμή αυτή είναι η συνολική τιμή των απωλειών των τριών φάσεων του Πίνακα 5.8.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.9 απεικονίζονται γραφικά στα Σχήματα 5.13 και 5.14, στα οποία φαίνεται η μεταβολή της υπολογισμένης τιμής απωλειών κενού φορτίου συναρτήσει των κόμβων του πλέγματος και η μεταβολή της απόκλισής της από τις μετρημένες τιμές.

Αριθμός κόμβων πλέγματος	Υπολογισμένη τιμή απωλειών πυρήνα (W)	Απόκλιση (%)
1051	970,36	14,20
13629	2099,76	85,66
43404	2109,08	86,48
81499	1642,56	45,23
105139	1748,24	54,57
145030	1810,40	60,07

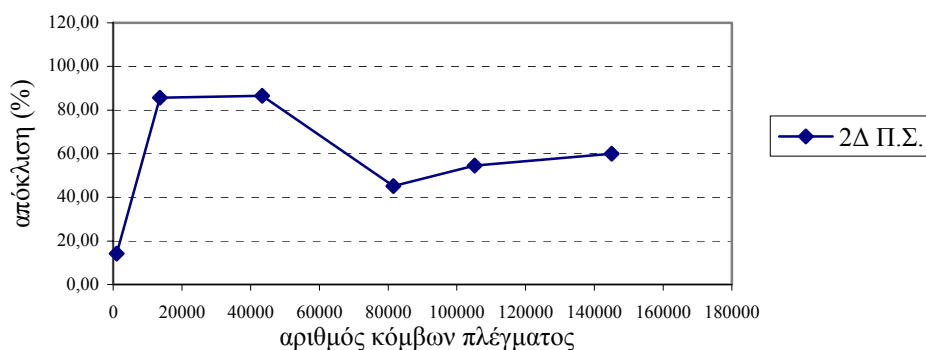
**Πίνακας 5.9:** Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών απωλειών κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 630 kVA.

**Απώλειες κενού φορτίου Μ/Σ 630kVA**



**Σχήμα 5.13:** Μεταβολή της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το Μ/Σ 630 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.

**Απόκλιση υπολογισμένων από τις μετρημένες απώλειες  
κενού φορτίου Μ/Σ 630kVA**



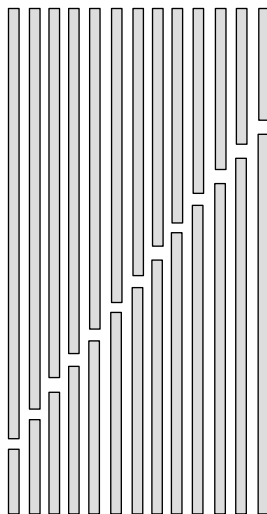
**Σχήμα 5.14:** Μεταβολή της απόκλισης της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή για το Μ/Σ 630 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.

### 5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύγκριση των καμπυλών των Σχημάτων 5.9 έως 5.14, προκύπτει το γενικό συμπέρασμα ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προβλέπει τιμές απωλειών σιδήρου πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μετρημένες. Η απόκλιση για την περίπτωση του Μ/Σ 630kVA ξεκινά με ελαφρά μεγαλύτερο σφάλμα για μικρές πυκνότητες πλέγματος και σταθεροποιείται στην τελική τιμή της για πυκνότητες άνω των 80000 κόμβων. Αντίθετα, όσον αφορά στους άλλους δύο μετασχηματιστές (400 και 1000kVA) για μικρές τιμές κόμβων το σφάλμα είναι μικρό, ενώ η αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος οδηγεί σε αύξηση και τελικά σταθεροποίηση της απόκλισης των υπολογισμένων από τις μετρημένες απώλειες κενού φορτίου. Σε γενικές γραμμές, το σφάλμα παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις κατά τον υπολογισμό των απωλειών (τουλάχιστον μέχρι τα πλέγματα πυκνότητας 80000 κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν). Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 5.2.1, η χρήση των καμπυλών πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα δε λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του κατά τη διαμόρφωσή του σε πυρήνες, [5.5]. Έτσι, χάνεται πολύ σημαντικό ποσοστό πληροφορίας για τα πραγματικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας, τα οποία παρουσιάζουν έντονη διακύμανση στους τέσσερις πυρήνες του τριφασικού μετασχηματιστή, όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις των Πινάκων 5.2, 5.5 και 5.8 (με χαρακτηριστικότερη την περίπτωση του Πίνακα 5.8, όπου οι απώλειες της φάσης C είναι μεγαλύτερες από το τριπλάσιο των απωλειών των φάσεων A και B). Η μείωση του σφάλματος μπορεί να επιτευχθεί μόνο με κατάλληλη τροποποίηση των καμπυλών πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα, με πραγματοποίηση τοπικών μετρήσεων των χαρακτηριστικών των διαμορφωμένων πυρήνων σε ήδη κατασκευασμένους μετασχηματιστές.

Ένας σημαντικός παράγοντας αύξησης των απωλειών κενού φορτίου, ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αναπαράσταση του υλικού του πυρήνα είναι η ανομοιομορφία που παρουσιάζει η κατανομή της ροής στον πυρήνα λόγω των διακένων που δημιουργούνται μεταξύ των ελασμάτων του, λόγω της κοπής του μαγνητικού υλικού σε φύλλα. Τα διάκενα αυτά διατάσσονται κατά μήκος του σκέλους του πυρήνα με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 5.15. Τα διάκενα αυτά δημιουργούν ανομοιομορφία στην κατανομή της

μαγνητικής ροής κατά μήκος του πυρήνα, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της τοπικής τιμής της, η οποία μπορεί να ξεπερνά έως και 20% τη μέση τιμή του μέτρου μαγνητικής επαγωγής στο υπόλοιπο τμήμα του πυρήνα, ([5.6] – [5.8]).



**Σχήμα 5.15:** Διάταξη διακένων μεταξύ των ελασμάτων του υλικού του πυρήνα, λόγω της κοπής του σε φύλλα.

Η διάταξη των ελασμάτων του πυρήνα του Σχήματος 5.15 δε λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του εν λόγω Κεφαλαίου, το οποίο θεωρεί ότι το υλικό του πυρήνα κατανέμεται ομοιόμορφα στην περιοχή των πυρήνων (για να μειωθεί η πολυπλοκότητα του μοντέλου). Έτσι, η λεπτομερής αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας των πυρήνων θα επηρεάσει σημαντικά την ακρίβεια πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου (κατά τρόπο αντίστοιχο με την επίδραση της λεπτομερούς αναπαράστασης των πηνίων στην ακρίβεια πρόβλεψης του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης).

Η χρήση του μετρημένου ρεύματος μαγνήτισης ως δεδομένου εισόδου για την πραγματοποίηση της ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου είναι μία ακόμη παράμετρος σφάλματος για το μοντέλο, καθώς το ρεύμα μαγνήτισης επηρεάζεται σημαντικά από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πυρήνα. Αντίθετα, η χρήση της επιβαλλόμενης τάσης κατά τη δοκιμή κενού φορτίου θα οδηγήσει σε μείωση των παρατηρούμενων αποκλίσεων. Πρόκειται ωστόσο για αλλαγή η οποία απαιτεί τροποποίηση των εξισώσεων της μεθόδου και του τρόπου επίλυσης του μη γραμμικού προβλήματος υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου κατά τη δοκιμή κενού φορτίου, αλλαγή η οποία δεν ήταν εφικτή μέσω του προγράμματος FEMM το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου.

Ένας ακόμη τρόπος μείωσης των αποκλίσεων που εμφανίστηκαν κατά τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού του πυρήνα με αναλυτικές μεθοδολογίες με σκοπό την προσαρμογή τους για την κατά περιοχές εφαρμογή τους σε μοντέλα μακροσκοπικής κλίμακας (όπως είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Μία τέτοια συστηματική μελέτη των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού μπορεί να γίνει με τη χρήση του μοντέλου υστέρησης Preisach-Neel, [5.9]. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση των ιδιοτήτων της μαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών, λαμβάνοντας υπόψη τα τοπικά μετρημένα χαρακτηριστικά των διαμορφωμένων πυρήνων σε κατασκευασμένους μετασχηματιστές έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών κενού φορτίου.

## 5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] Α. Τσιβγούλη, «Μελέτη γεωμετρίας Μετασχηματιστή με Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων». Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Οκτώβριος 2004.
- [5.2] Anastasia J. Tsivgouli, Marina A. Tsili, Pavlos S. Georgilakis, Antonios G. Kladas, Athanassios T. Souflaris and Dimitrios G. Paparigas, "Finite Element Based Methodology for the Accurate Prediction and Minimization of No Load Loss in Power Transformers," *Proc. of 17th International Conference on Electrical Machines, ICEM'2006*, Crete, Greece, 2-5 September 2006.
- [5.3] A.J. Tsivgouli, M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, A.D. Skarlatini, "Geometry optimization of electric shielding in power transformers based on finite element method," *accepted for publication in Journal of Materials Processing Technology*.
- [5.4] A.J. Tsivgouli, M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, A.D. Skarlatini, "Geometry optimization of electric shielding in power transformers based on finite element method," *Proc. 4<sup>th</sup> Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials (JAPMED '04)*, pp. 99-100, Cairo, Egypt, September 2005.
- [5.5] M.A. Tsili, A.G. Kladas, A.J. Tsivgouli, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, D.G. Paparigas, "Efficient finite element model for power transformer optimization," *Proc. 15th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2005)*, Vol. III, pp. 67-68, Shenyang, China, June 2005.
- [5.6] Ed G. teNyenhuys, R. S. Girgis, G. F. Mechler, "Other Factors Contributing to the Core Loss Performance of Power and Distribution Transformers," *IEEE Trans. PWRD*, Vol. 16, no. 4, pp. 648-653, Oct. 2001.
- [5.7] G. F. Mechler, R. S. Girgis, "Magnetic Flux Distributions in Transformer Core Joints," *IEEE Trans. PWRD*, Vol. 15, no. 1, pp. 198-203, Jan. 2000.
- [5.8] G. F. Mechler, R. S. Girgis, "Calculation of Spatial Loss Distribution in Stacked Power and Distribution Transformer Cores," *IEEE Trans. PWRD*, Vol. 13, no. 2, pp. 532-537, Apr. 1998.
- [5.9] Ι. Προυσαλίδης, «Συμβολή στην ανάπτυξη μαθηματικών εργαλείων για ψηφιακή εξομοίωση της συμπεριφοράς των μετασχηματιστών και διακοπών ισχύος σε ταχεία ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 1997.



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την εκπόνηση της μεταπτυχιακής διατριβής. Στη συνέχεια προτείνονται μερικά θέματα για επιπλέον διερεύνηση τα οποία θα ανέπτυσαν περαιτέρω την εργασία η οποία έχει ήδη πραγματοποιηθεί.

### 6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι απώλειες σιδήρου (κενού φορτίου) σε μετασχηματιστές ισχύος. Δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, η μείωση των οποίων:

- είναι καθοριστική για τους κατασκευαστές μετασχηματιστών, δεδομένου ότι αυξάνει την αξιοπιστία των μετασχηματιστών, εξασφαλίζει την υψηλή απόδοσή τους, μειώνει το κόστος των υλικών, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικρότερο περιθώριο ασφαλείας και βοηθά τον κατασκευαστή να αποφύγει την πληρωμή ρητρών απωλειών,
- εναρμονίζεται με τις διεθνείς σύγχρονες ανάγκες εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς η ενεργειακή απόδοση των μετασχηματιστών συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μελέτη των απωλειών σιδήρου έγινε με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, μέσω ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή κενού φορτίου, η οποία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των απωλειών σιδήρου. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών διαφορετικής ονομαστικής ισχύος (400, 630 και 1000 kVA) και τα αποτελέσματά της συγκρίθηκαν με τις μετρημένες τιμές απωλειών που δίνονται από τον κατασκευαστή.

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

- η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προβλέπει μεγαλύτερες τιμές απωλειών σιδήρου από τις αντίστοιχες μετρημένες,
- η απόκλιση για την περίπτωση του Μ/Σ 630kVA ξεκινά με ελαφρά μεγαλύτερο σφάλμα για μικρές πυκνότητες πλέγματος και σταθεροποιείται στην τελική τιμή της για πυκνότητες άνω των 80000 κόμβων. Αντίθετα, όσον αφορά στους άλλους δύο μετασχηματιστές (400 και 1000kVA) για μικρές τιμές κόμβων το σφάλμα είναι μικρό, ενώ η αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος οδηγεί σε αύξηση και τελικά σταθεροποίηση της απόκλισης των υπολογισμένων από τις μετρημένες απώλειες κενού φορτίου,
- σε γενικές γραμμές, το σφάλμα παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις κατά τον υπολογισμό των απωλειών (τουλάχιστον μέχρι τα πλέγματα πυκνότητας 80000 κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν).

Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι, η χρήση των καμπυλών πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα δε λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του κατά τη διαμόρφωσή του σε πυρήνες. Έτσι, χάνεται πολύ σημαντικό ποσοστό πληροφορίας για τα πραγματικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας, τα οποία παρουσιάζουν έντονη διακύμανση στους τέσσερις πυρήνες του τριφασικού μετασχηματιστή, όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις απωλειών του κατασκευαστή.

Η μείωση του σφάλματος μπορεί να επιτευχθεί μόνο με κατάλληλη τροποποίηση των καμπυλών πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα, με πραγματοποίηση τοπικών μετρήσεων των χαρακτηριστικών των διαμορφωμένων πυρήνων σε ήδη κατασκευασμένους μετασχηματιστές. Ένας επιπλέον παράγοντας αύξησης των απωλειών κενού φορτίου, ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αναπαράσταση του υλικού του πυρήνα είναι η ανομοιομορφία που παρουσιάζει η κατανομή της ροής στον πυρήνα λόγω των διακένων που δημιουργούνται μεταξύ των ελασμάτων του, λόγω της κοπής του μαγνητικού υλικού σε φύλλα. Η ανομοιομορφία αυτή δεν ελήφθη υπόψη στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, λόγω της σημαντικής πολυπλοκότητας που εισάγει στην αναπαράσταση της γεωμετρίας του πυρήνα.

Η χρήση του μετρημένου ρεύματος μαγνήτισης ως δεδομένου εισόδου για την πραγματοποίηση της ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου είναι μία ακόμη παράμετρος σφάλματος για το μοντέλο, καθώς το ρεύμα μαγνήτισης επηρεάζεται σημαντικά από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πυρήνα. Αντίθετα, η χρήση της επιβαλλόμενης τάσης κατά τη δοκιμή κενού φορτίου θα οδηγήσει σε μείωση των παρατηρούμενων αποκλίσεων. Πρόκειται ωστόσο για αλλαγή η οποία απαιτεί τροποποίηση των εξισώσεων της μεθόδου και του τρόπου επίλυσης του μη γραμμικού προβλήματος υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου κατά τη δοκιμή κενού φορτίου, αλλαγή η οποία δεν ήταν εφικτή μέσω του προγράμματος FEMM το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου.

Ένας ακόμη τρόπος μείωσης των αποκλίσεων που εμφανίστηκαν κατά τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού του πυρήνα, λαμβάνοντας υπόψη τα τοπικά μετρημένα χαρακτηριστικά των διαμορφωμένων πυρήνων σε κατασκευασμένους μετασχηματιστές έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών κενού φορτίου.

## 6.2 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να επεκταθεί και να τροποποιηθεί κατάλληλα, αποτελώντας τη βάση για τη δημιουργία ενός πιο σύνθετου αλλά και αποδοτικού εργαλείου πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου.

Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο του Κεφαλαίου 5 μπορεί να συνδυαστεί με εισαγωγή δεδομένων από τοπικές πεδιακές μετρήσεις του υλικού του πυρήνα με στόχο τη συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων της, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών σιδήρου. Επιπλέον, με χρήση λογισμικού που επιτρέπει την επέμβαση στις εξισώσεις υπολογισμού του πεδίου και τη χρήση της επιβαλλόμενης τάσης στα τυλίγματα ως δεδομένου εισόδου, θα ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα που εισάγεται από τη χρήση του μετρημένου ρεύματος μαγνήτισης. Τέλος, η πιο λεπτομερής αναπαράσταση της γεωμετρίας των πυρήνων (και των διακένων που δημιουργούνται μεταξύ των ελασμάτων του) θα αυξήσει την ακρίβεια του μοντέλου.

Οι παραπάνω βελτιώσεις, σε συνδυασμό με το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 5, θα αυξήσει σημαντικά την ικανότητα της μεθόδου να

προβλέψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις απώλειες πυρήνα μετασχηματιστών, ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία της. Έτσι, η μέθοδος μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μια διαδικασία βελτιστοποίησης της σχεδίασης των μετασχηματιστών, παρέχοντας στους μηχανικούς της παραγωγικής μονάδας τα εργαλεία για τη σωστή πρόβλεψη της λειτουργίας τους κατά τη φάση της σχεδίασης και τη δυνατότητα να εξετάσουν τη βέλτιστη γεωμετρική διαμόρφωση των πυρήνων η οποία οδηγεί σε χαμηλές απώλειες και υψηλή απόδοση και αξιοπιστία.



### ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

#### Α. ΔΙΑΤΡΙΒΕΣ

- [A1] Α.Ι. Τσιβγούλη, Μελέτη γεωμετρίας μετασχηματιστή με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, *Διπλωματική Εργασία*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Οκτώβριος 2004, 114 σελίδες.
- [A2] Α.Ι. Τσιβγούλη, Μελέτη απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών ισχύος με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, *Μεταπτυχιακή Διατριβή*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Απρίλιος 2006, 73 σελίδες.

#### Β. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

- [B1] A.J. Tsivgouli, M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, A.D. Skarlatini, "Geometry optimization of electric shielding in power transformers based on finite element method," *accepted for publication in Journal of Materials Processing Technology*.

#### Γ. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ

- [Γ1] M.A. Tsili, A.G. Kladas, A.J. Tsivgouli, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, D.G. Paparigas, "Efficient finite element model for power transformer optimization," *Proc. 15th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2005)*, Vol. III, pp. 67-68, Shenyang, China, June 2005.
- [Γ2] A.J. Tsivgouli, M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, A.D. Skarlatini, "Geometry optimization of electric shielding in power transformers based on finite element method," *Proc. 4<sup>th</sup> Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials (JAPMED '04)*, pp. 99-100, Cairo, Egypt, September 2005.
- [Γ3] Anastasia J. Tsivgouli, Marina A. Tsili, Pavlos S. Georgilakis, Antonios G. Kladas, Athanassios T. Souflaris and Dimitrios G. Paparigas, "Finite Element Based Methodology for the Accurate Prediction and Minimization of No Load Loss in Power Transformers," *Proc. of 17th International Conference on Electrical Machines, ICEM'2006*, Crete, Greece, 2-5 September 2006.



---

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

---

### ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ





## Geometry optimization of electric shielding in power transformers based on finite element method

Anastassia J. Tsivgouli<sup>a</sup>, Marina A. Tsili<sup>b</sup>, Antonios G. Kladas<sup>b</sup>, Pavlos S. Georgilakis<sup>a,\*</sup>,  
Athanasios T. Souflaris<sup>c</sup>, Annie D. Skarlatini<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Department of Production Engineering & Management, Technical University of Crete, GR-73100 Chania, Greece

<sup>b</sup> Faculty of Electrical & Computer Engineering, National Technical University of Athens, GR-15780 Athens, Greece

<sup>c</sup> Schneider Electric AE, Elvim Plant, GR-32011 Inofyta, Viotia, Greece

<sup>d</sup> Engineering Supervision and Control of Megalopolis Projects Entity, Public Power Corporation, Greece

### Abstract

In this article, a finite element model, suitable for power transformer representation, is used for the evaluation of transformer characteristics and their modification due to the introduction of electric shielding, focusing on the short-circuit impedance calculation. The use of deterministic optimization methods, in conjunction with the finite element model enables the optimization of the transformer shielding geometrical configuration, with respect to its cost and efficiency.

© 2006 Published by Elsevier B.V.

**Keywords:** Power transformer; Short-circuit impedance; Finite element method; Electric shielding; Optimization methods

### 1. Introduction

The process of electric utilities restructuring, privatization and deregulation has created a competitive, global marketplace for energy. In this new and challenging environment, there is an urgent need for a transformer manufacturing industry to improve transformer efficiency and reliability and to reduce cost, since high-quality low-cost products have become the key to survival [1,2]. Transformer reliability is improved by the accurate evaluation of the leakage field, the short-circuit impedance and the resulting forces on transformer windings under short-circuit, since these enable to avoid mechanical damages and failures during short-circuit tests and power system faults. The technical and economical optimization of transformer design contributes significantly in transformer cost reduction.

Numerical field analysis techniques used in conjunction with optimization algorithms for the design optimization of magnetostatic devices are widely encountered in the technical literature. In Ref. [3], direct differentiation of finite element (FE) matrices is used for the sensitivity analysis of three-dimensional (3D) magnetostatic problems, while in Ref. [4] the FE formulation

is used for calculation of global quantities for the derivation of the best search direction of deterministic optimization methods. In Refs. [5,6] the authors use the finite element method (FEM) for the shape optimization of a BLDC motor and a linear actuator, respectively. The boundary element method (BEM) is employed in Refs. [7,8], where the authors carry out the design optimization of magnetostatic devices through boundary integration formulas.

Transformer manufacturers are obliged to comply with the short-circuit impedance values specified by transformer users. In cases where the difference between the actual (measured) and specified values does not satisfy the limitations imposed by international standards, [9], design modifications should be implemented in order to meet the specifications. Reduction of the short-circuit impedance value can be achieved through electric shielding, which attenuates the stray flux from the transformer windings, resulting to decrease of the total leakage inductance. On the other hand, magnetic shielding increases the magnetic stray field and the winding leakage inductance. The finite element method is a reliable tool for the prediction of the leakage field variations due to the introduction of shielding and it can be used in conjunction with optimization methods for the design optimization of power transformer electric shielding, taking into account the shielding power loss minimization and the cost reduction through shielding material minimization.

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [kladasel@central.ntua.gr](mailto:kladasel@central.ntua.gr) (A.G. Kladas),  
[pgeorg@dpem.tuc.gr](mailto:pgeorg@dpem.tuc.gr) (P.S. Georgilakis).

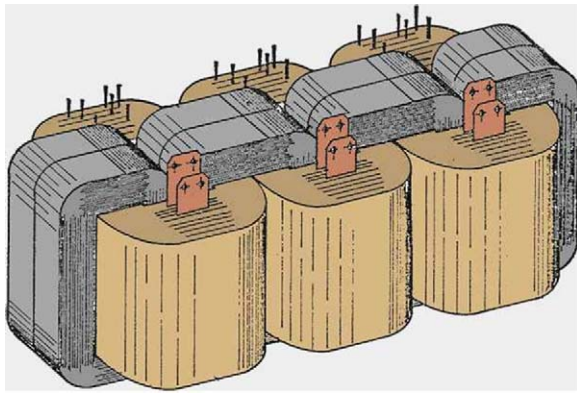


Fig. 1. Real geometry of a three-phase, wound core, distribution transformer.

The impact of magnetic shielding on the transformer electric shield has been examined with the use of hybrid three-dimensional finite element-boundary element method (FEM-BEM) in Ref. [10]. Experimental study of this kind of shielding is also carried out in Ref. [11], while in Refs. [12,13], the transformer tank shield geometry is optimized with the use of 2D FEM in conjunction with deterministic optimization methods. In the present paper, two-dimensional finite element method is applied to cases involving the shape optimization of power transformer electric shielding. The 2D FEM is suitable for use with optimization algorithms, as it reduces the total time needed for the magnetic field calculation during each iteration (due to the reduced number of mesh nodes involved in 2D modeling). The shape optimization is combined with the shielding power loss minimization, resulting to total cost reduction of the electric shielding.

## 2. Transformer modeling with 2D finite element method

The considered transformer is 1250 kV A, rated primary voltage 20 kV and rated secondary voltage 400 V, three-phase, wound core, distribution transformer (Fig. 1). Its magnetic circuit is of shell type and is assembled from two small and two large wound iron cores. The low voltage (LV) winding (secondary winding) comprises layers of copper sheet, while the high voltage (HV) winding (primary winding) consists of copper wire.

Fig. 2 shows the 2D FEM model of the transformer one-phase part, based on cylindrical symmetry. In order to take into account the contribution of the winding parts outside the core window to the transformer leakage field, appropriate modifications of the winding height are implemented, based on the Rogowski coefficients (modified transformer geometry).

For the transformer magnetic field simulation, the active part is represented by a triangular finite element mesh, illustrated in Fig. 3.

## 3. Geometry optimization of electric shielding

The 2D finite element model presented above has been used for the evaluation of the transformer short-circuit impedance ( $U_k$ ) after the introduction of magnetic and electric shielding.

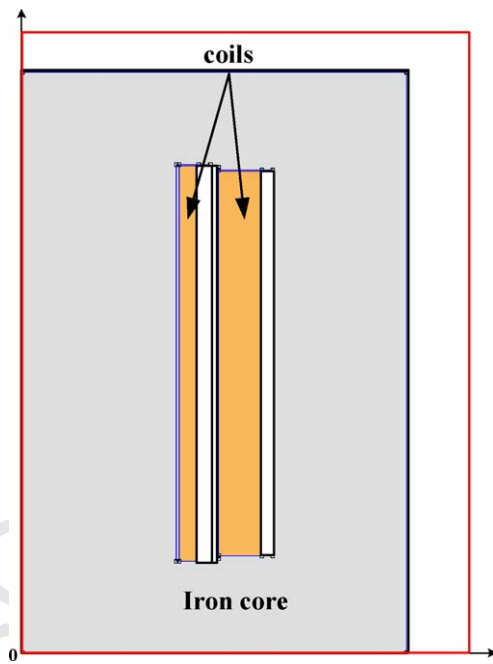


Fig. 2. 2D FEM model of transformer one-phase part (modified geometry).

Particularly, the short-circuit impedance has been calculated before and after the placement of electric shielding above the windings and magnetic shielding along the transformer tank walls. Comparison between the variations of the magnetic leakage field and the winding leakage inductance for each kind of

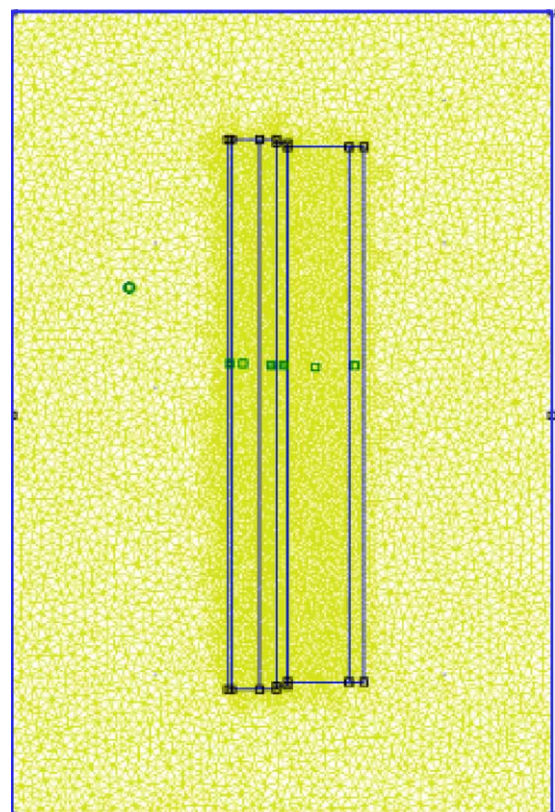


Fig. 3. 2D finite element mesh for the transformer 1250 kV A.

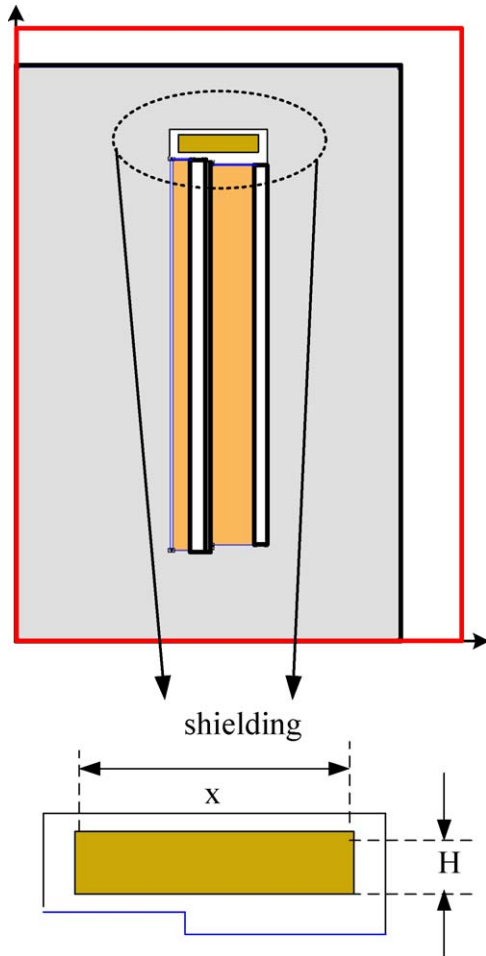


Fig. 4. Placement of electric shielding above the transformer windings and design variables (shielding width,  $x$  and height,  $H$ ).

shielding resulted to the conclusion that the electric shielding is the most efficient one, in terms of  $U_k$  variation, for the considered transformer. The optimization of the electric shielding dimensions is realized with the use of the 2D FEM model, in conjunction with deterministic optimization methods.

Fig. 4 illustrates the placement of electric shielding above the transformer windings. It consists of copper sheets of a given width and height, located in the gap between the upper part of the core and the windings. This location is chosen so that the copper attenuates the magnetic flux lines coming out of the windings, resulting to reduction of the transformer leakage field, which is mainly concentrated in the gap between the low and high voltage winding.

Figs. 5 and 6 demonstrate the impact of this kind of shielding, by comparison of the transformer magnetic field under short-circuit test, before and after the placement of the shielding. The attenuation of the flux lines above the windings is obvious in Fig. 6, compared to Fig. 5, corresponding to decrease of the leakage field and the short-circuit impedance.

In order to examine the impact of the shielding dimensions on the short-circuit impedance variation, an investigation of the influence on the short-circuit impedance decrease ( $DU_k$ ) of the shielding width has been conducted, for different values of the

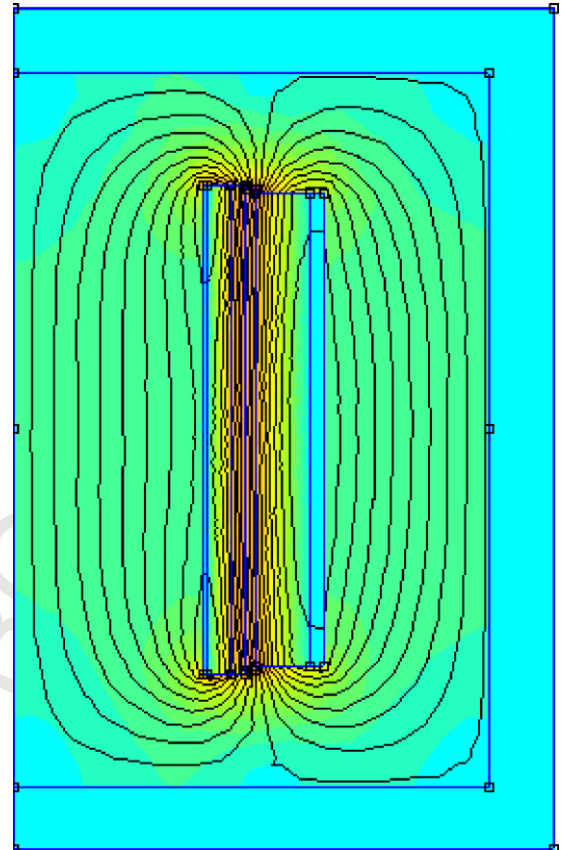


Fig. 5. Magnetic field distribution under short-circuit test before the placement of electric shielding.

shielding height and the respective results for a given height value, equal to 84 mm, are shown in Fig. 7. The same analysis has been performed for the impact of the shielding height, at various values of shielding width (resulting to  $DU_k$  curves as a function of the shielding height).

According to Fig. 7, a decrease from 0.5% up to 3.5% can be achieved by increasing accordingly the shielding width. However, in such a case, the increase in the shielding material cost and power loss must be considered, in order to find the optimum compromise between  $U_k$  reduction and loss increase. Fig. 8 illustrates the variation of the shielding power loss as a function of its width. The choice of the optimal shielding configuration should accordingly be based on combination of the results of Figs. 7 and 8, for different values of shielding height values. Therefore, the electric shielding shape optimization is a complex task, which must take into account the  $DU_k$  and loss variation with the shielding dimensions. This is solved as a non-linear, multi-criteria, constrained optimization problem.

The general mathematic form of the electric shielding geometry optimization consists in the minimization of an objective function  $F(\mathbf{X}_i)$ , where  $\mathbf{X}_i$  is the vector of the design variables of the problem. In case of the electric shielding, the design variables comprise the geometrical parameters of the shielding, while the objective function is governed by the desired change in the transformer leakage field. The vector  $\mathbf{X}_i$  is subject to constraints imposed by the transformer geometry (active part and

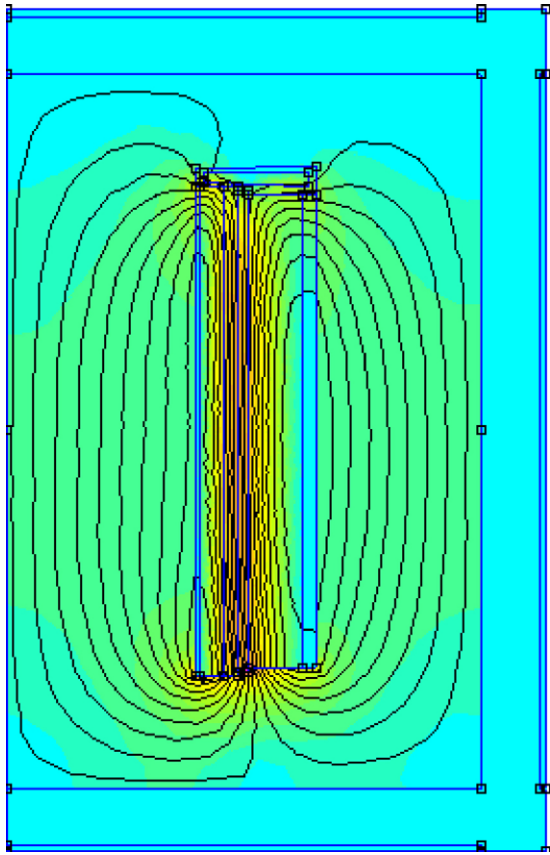


Fig. 6. Magnetic field distribution under short-circuit test after the placement of electric shielding.

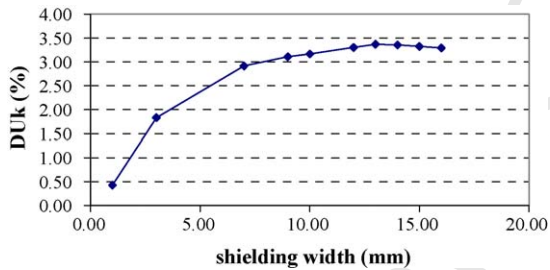


Fig. 7. Variation of short-circuit impedance decrease with the width of the shielding (for a given shield height, equal to 84 mm).

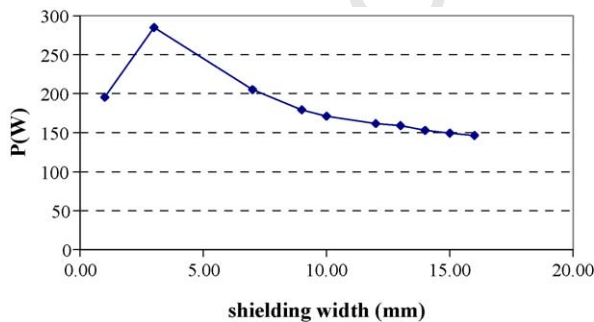


Fig. 8. Shielding power loss variation with the width of the shielding (for a given shield height, equal to 84 mm).

tank dimensions).

$$\text{Minimize } F(\mathbf{X}_i) \quad (1)$$

$$\text{under } \mathbf{X}_i^{\text{low}} \leq \mathbf{X}_i \leq \mathbf{X}_i^{\text{up}}$$

where  $F(\mathbf{X}_i)$  is the difference between the specified and calculated  $\text{DU}_k$ ,  $\mathbf{X}_i$  the vector of the design variables of the problem (width and height of the shielding) and  $\mathbf{X}_i^{\text{low}}$  and  $\mathbf{X}_i^{\text{up}}$  are the constraints imposed by the transformer geometry.

## 4. Results and discussion

### 4.1. Formulation of the objective function

The objective function must take into account three factors: desired decrease in short-circuit impedance, restrain of the increase in the shielding power loss and minimization of the shielding material. The analytical expression of the objective function is given by (2):

$$F = w_1 \frac{|\text{DU}_k^{\text{calc}} - \text{DU}_k^{\text{spec}}|}{\text{DU}_k^{\text{spec}}} + w_2 \left| \frac{P_{\text{shunt}}^{\text{calc}}}{P_{\text{shunt}}^{\text{min}}} \right| + w_3 \frac{S_{\text{shunt}}^{\text{calc}}}{S_{\text{shunt}}^{\text{max}}} \quad (2)$$

where  $\text{DU}_k^{\text{calc}}$  is the calculated variation in the short-circuit impedance;  $\text{DU}_k^{\text{spec}}$  is the specified (desired) variation in the short-circuit impedance;  $P_{\text{shunt}}^{\text{calc}}$  is the calculated shielding power loss;  $P_{\text{shunt}}^{\text{min}}$  is the minimum permissible value of the shielding power loss;  $S_{\text{shunt}}^{\text{calc}} = xH$ , where  $x$  is the width and  $H$  is the height of the electric shielding;  $S_{\text{shunt}}^{\text{max}}$  is the maximum shielding surface and  $w_1, w_2, w_3$  are the weight coefficients of the objective function components, with values  $w_1 = 0.8, w_2 = 0.1$  and  $w_3 = 0.1$ .

The selection of the multiobjective function weights,  $w_1, w_2$  and  $w_3$ , aimed to a maximum accuracy in the variation of the short-circuit impedance, considering the minimization of the power losses and the shielding material as less important. Thus, more emphasis has been given to the configuration of the transformer characteristics than to the criterion of the cost.

## 5. Comparison of different optimization methods

The following optimization algorithms, [10,14], have been tested in case of magnetic shunt optimization:

- (i) *Steepest descent method*: It is a gradient-based method, where the search direction for the optimal solution is constructed using the gradient of the objective function.
- (ii) *Conjugate gradient Fletcher-Reeves (CG-FR) method*: This method is a variation of the steepest descent method, with a modification in the search direction which attributes the property of quadratic convergence to the method.
- (iii) *Davidon-Fletcher-Powell (DFP) method*: The DFP is a quasi-Newton, variable metric (VM), gradient-based method, where the history from all previous iterations is used to establish the search vector for the optimal solution.
- (iv) *Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) method*: The BFGS is another VM method and its difference compared to

Table 1

Results of different optimization methods (specified  $DU_k = 3.5\%$ ,  $P_{\text{shunt}}^{\min} = 100 \text{ W}$  and  $S_{\text{shunt}}^{\max} = 2.000 \text{ mm}^2$ )

Method	Optimal shielding geometry			$\Delta U_k (\%)$	$P \text{ (W)}$	Number of iterations
	Width, $x \text{ (mm)}$	Height, $y \text{ (mm)}$	Area, $S \text{ (mm}^2\text{)}$			
BFGS	76.0	17.1	1299.60	3.5	203.2	26
DFP	77.6	19.1	1482.16	3.5	200.0	3
CG-FR	76.6	14.4	1103.04	3.5	214.4	4
Steepest descent	79.2	19.8	1568.16	3.5	204.6	5
Pattern search	79.6	20.0	1592.00	3.5	206.4	5

the DFP lies in the way that the history of previous iterations is updated.

(v) *Pattern search method*: In this non-gradient optimization method, the search direction is cycled through the number of  $n$  variables in sequence and the  $n + 1$  search direction is assembled as a linear combination of the previous  $n$  search directions.

The optimization methods mentioned above were used to minimize the objective function (2) in case of  $DU_k^{\text{spuc}} = 3.5\%$ ,  $P_{\text{shunt}}^{\min} = 100 \text{ W}$ ,  $S_{\text{shunt}}^{\max} = 2.000 \text{ mm}^2$ .

Table 1 summarizes the respective results for the optimal shielding geometry, the calculated variation in the short-circuit impedance and the shielding power loss (corresponding to the optimal solution given by each method) and the number of iterations needed for the convergence of each method. Figs. 9 and 10 illustrate the variation of the difference between the specified and calculated variation in  $U_k$  and the shielding power loss, respectively, with the iterations of the methods of Table 1.

The observation of the results listed in Table 1 and the curves of Figs. 9 and 10 leads to the following conclusions:

- The DFP is the quickest converging method, providing the optimal solution in the smallest number of iterations. However, this solution is inferior to the ones provided by the CG and BFGS methods, as it corresponds to the greatest increase in the shunt power loss and area.
- Between the gradient-based methods, the CG and the DFP are the ones concluding to the optimal solution in the least number of iterations. The CG solution is more effective in

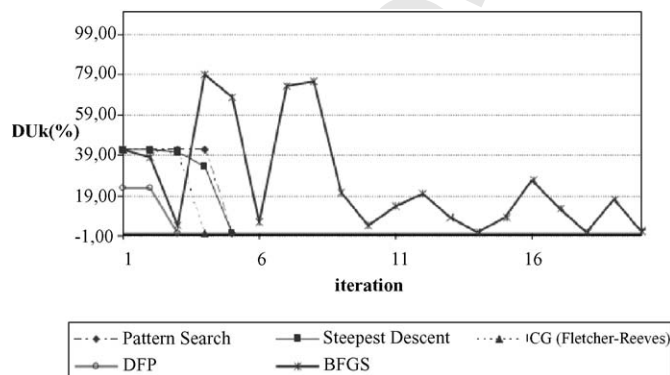


Fig. 9. Convergence to the target  $U_k$  value of the optimization methods illustrated in Table 1.

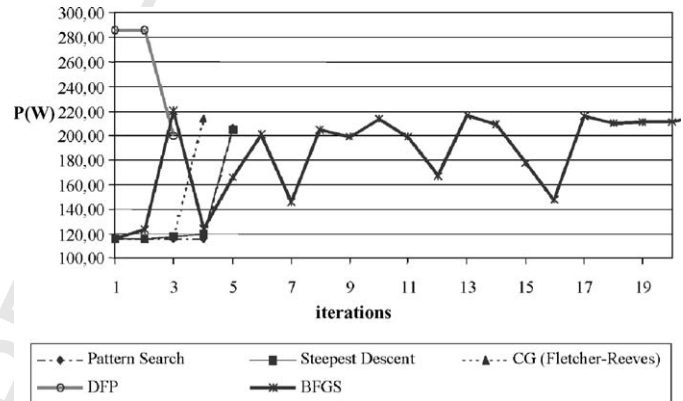


Fig. 10. Variation of shielding loss value of the optimization methods illustrated in Table 1.

terms of shunt loss and construction cost, as it corresponds to the minimum total area.

- The steepest descent and pattern search methods converge practically to the same minimum, with the same total number of iterations.

According to the above observations, the CG-FR method appears to be the most effective one for the solution of the electric shielding geometry optimization problem.

## 6. Conclusion

The application of a 2D FEM method has been introduced to the geometry optimization of electric shielding on power transformers. The problem was solved as a non-linear, multiobjective, constrained optimization problem and the proposed method was combined to several deterministic optimization algorithms. The CG-FR algorithm showed the best results in terms of convergence rate and optimal solution quality.

## References

- P.S. Georgilakis, N.D. Doulamis, A.D. Doulamis, N.D. Hatzigrygiou, S.D. Kollias, A novel iron loss reduction technique for distribution transformers based on a combined genetic algorithm–neural network approach, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. C* 31 (February) (2001) 16–34.
- P. Georgilakis, N. Hatzigrygiou, D. Paparigas, AI helps reduce transformer iron losses, *IEEE Comput. Appl. Power* 12 (4) (1999) 41–46.
- J.A. Ramirez, E.M. Freeman, C. Chat-uthai, D.A. Lowther, Sensitivity analysis for the automatic shape design of electromagnetic devices in 3D using FEM, *IEEE Trans. Magn.* 33 (March (2)) (1997) 1859.

- [4] J.A. Ramirez, E.M. Freeman, The Direct Calculation of Global Quantities from a FE formulation for the Optimization of Power Frequency Electromagnetic Devices, *IEEE Trans. Magn.* 34 (September (5)) (1998) 2881–2884.
- [5] S. Wang, J. Kang, Shape optimization of BLDC motor using 3D finite element method, *IEEE Trans. Magn.* 36 (July (4)) (2000) 1119–1123.
- [6] J.M. Biedinger, D. Lemoine, Shape sensitivity analysis of magnetic forces, *IEEE Trans. Magn.* 33 (May (3)) (1997) 2309–2316.
- [7] S.K. Chang, O.A. Mohammed, S.-y. Hahn, Nonlinear shape design sensitivity analysis of magnetostatic problems using boundary element method, *IEEE Trans. Magn.* 31 (May (3)) (1995) 1944–1947.
- [8] H.-K. Jung, K. Choi, A continuum approach in shape design sensitivity analysis of magnetostatic problems using the boundary element Method, *IEEE Trans. Magn.* 29 (March (2)) (1993) 1771–1774.
- [9] IEC 60076-1, Power transformers. Part 1: General, 2000.
- [10] M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, D.G. Paparigas, Geometry optimization of magnetic shunts in power transformers based on a particular hybrid finite element–boundary element model and sensitivity analysis, *IEEE Trans. Magn.* 41 (May (5)) (2005) 1776–1779.
- [11] J.C. Olivares, Y. Liu, J.M. Canedo, R. Escarela-Perez, J. Driesen, P. Moreno, Reducing losses in distribution transformers, *IEEE Trans. PWRD.* 18 (July (3)) (2003) 821–826.
- [12] N. Takahashi, T. Kitamura, M. Horii, J. Takehara, Optimal design of tank shield model of transformer, *IEEE Trans. Magn.* 36 (July (4)) (2000) 1089–1093.
- [13] M. Horii, N. Takahashi, 3D optimization of design variables in  $x$ -  $y$ - and  $z$ -directions of transformer tank shield model, *IEEE Trans. Magn.* 37 (September (5)) (2001) 3631–3634.
- [14] P. Venkataraman, *Applied Optimization with MATLAB Programming*, Wiley-Interscience, 2002.

**Anastassia J. Tsivgouli** was born in Athens, Greece in 1981. She received the diploma in production engineering and management in 2004 from the Technical University of Crete (TUC), Greece. She is currently a postgraduate student at the Production Engineering and Management Department of TUC.

**Marina A. Tsili** was born in Greece, in 1976. She received the diploma in electrical and computer engineering in 2001 and the PhD degree in 2005 from the National Technical University of Athens, Greece. Her research interests include transformer and electric machine modeling as well as analysis of generating units by renewable energy sources. She is a member of IEEE and the Technical Chamber of Greece.

**Antonios G. Kladas** was born in Greece, in 1959. He received the diploma in electrical engineering from the Aristotle University of Thessaloniki, Greece in 1982 and the DEA and PhD degrees in 1983 and 1987, respectively from the University of Pierre and Marie Curie (Paris 6), France. He served as associate assistant in the University of Pierre and Marie Curie from 1984 to 1989. During the period 1991–1996 he joined the Public Power Corporation of Greece, where he was engaged in the System Studies Department. Since 1996 he joined the Department of Electrical and Computer Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA), where he is now associate professor. His research interests include transformer and electric machine modeling and design as well as analysis of generating units by renewable energy sources and industrial drives.

**Pavlos S. Georgilakis** was born in Chania, Greece in 1967. He received the diploma in electrical and computer engineering and the PhD degree from the National Technical University of Athens, Greece in 1990 and 2000, respectively. From 1994 to 2003 he was with Schneider Electric AE, where he worked as quality control engineer for 1 year, transformer design engineer for 4 years, R&D manager for 3 years and low voltage products marketing manager for 2 years. He is currently assistant professor at the Production Engineering and Management Department of the Technical University of Crete (TUC) and Director of Electric Circuits and Electronics Laboratory. His research interests include transformer modeling and design as well as power systems and intelligent systems. He is member of IEEE, CIGRE and the Technical Chamber of Greece.

**Athanassios T. Souflaris** was born in Athens, Greece in 1956. He received the diploma in electrical engineering from the Technical University of Pireaus, Greece in 1981. He joined Schneider Electric AE in 1985 as transformer design engineer and from 1988 he is the transformer design manager of Schneider Electric AE.

**Annie D. Skarlatini** was born in Greece, in 1976. She received the diploma in electrical and computer engineering from the Technical University of Patras in 2000. From 2000 to 2002 she was with T.A.M.E. S.A, where she worked in the Technical Department and was involved in technical, economical and environmental studies regarding the construction and operation of Agroindustrial Sector Plants. From 2002 to 2004 she was with Schneider Electric AE, where she worked as transformer design engineer. From 2004 till now, she works for the Public Power Corporation of Greece, as the project engineer responsible for the engineering, supervision and control of Megalopolis projects entity.

# Efficient Finite Element Model for Power Transformer Optimization

M. A. Tsili<sup>1</sup>, A. G. Kladas<sup>1</sup>, A. J. Tsivgouli<sup>2</sup>, P. S. Georgilakis<sup>2</sup>, A. T. Souflaris<sup>3</sup> and D. G. Paparigas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical & Computer Engineering, National Technical University of Athens, GR-15780, Athens, Greece,  
e-mail : kladasel@central.ntua.gr

<sup>2</sup>Department of Production Engineering & Management, Technical University of Crete, GR-73100, Chania, Greece,  
e-mail : pgeorg@dpem.tuc.gr

<sup>3</sup>Schneider Electric AE, Elvim Plant, GR-32011, Inofyta, Viotia, Greece, e-mail : dimitris\_paparigas@mail.schneider.fr

**Abstract--** In this article, an efficient model for the finite element analysis of distribution transformers is presented. In this model, a particular reduced scalar potential formulation is adopted, necessitating no prior source field calculation, reducing significantly the computational effort of the magnetic field sources calculation. This formulation, in conjunction with the detailed modeling of the transformer windings results to a computational tool, which allows the accurate and fast transformer optimization. Comparisons between this method and test values for a number of commercial transformers, prove its validity and accuracy. The model is also used for the magnetic field and transformer characteristics prediction under open circuit test.

## I. TRANSFORMER MODELING METHODOLOGY

### A. Particular reduced scalar potential formulation

The finite element method is a numerical technique for the solution of problems described by partial differential equations. The governing equation in the case of a magnetostatic field is the Laplace equation:

$$\nabla^2 \Phi_m = 0 \quad (1)$$

where  $\Phi_m$  is the scalar magnetic potential.

Many scalar potential formulations have been developed for 3D magnetostatics, but they usually necessitate a prior source field calculation by using Biot-Savart's law. This presents the drawback of considerable computational effort.

In the present paper, a particular scalar potential formulation has been adopted, enabling the 3D magnetostatic field analysis. According to this method, the magnetic field strength  $\mathbf{H}$  is conveniently partitioned to a rotational and an irrotational part as follows, [1]:

$$\mathbf{H} = \mathbf{K} - \nabla \Phi \quad (2)$$

where  $\Phi$  is a scalar potential extended all over the solution domain, while  $\mathbf{K}$  is a vector quantity (fictitious field distribution), that satisfies Ampere's law and is perpendicular on the subdomain boundary.

A model has been developed based on such a formulation, for power transformer analysis under short circuit test and short-circuit impedance evaluation [2]. In the present paper, this method is extended for considering the detailed winding

geometry, including cooling ducts, by defining an appropriate fictitious source field distribution, which is important for geometry optimization. Moreover, accurate no load analysis is performed, by incorporating convenient tensor reluctivities for grain oriented laminations representation.

### B. Detailed representation of the transformer windings

The considered transformer is a three-phase, wound core, distribution transformer. Its magnetic circuit is of shell type and is assembled from two small and two large wound iron cores. As shown in the one phase part model of Fig. 1, the Low Voltage (LV) winding (secondary winding) comprises layers of copper sheet, while the High Voltage (HV) winding (primary winding) consists of copper wire.

The construction of the transformer model with detailed winding geometry is realized in two steps: first, an elliptic approximation of the winding corners is considered, while, afterwards, the winding cooling ducts are inserted into the model. This modeling affects the calculation of the fictitious field distribution  $\mathbf{K}_z$ , which must take into account the exact geometry of the coil boundaries as well as the fact that the current density is equal to zero in the ducts area. A division of the HV coil to four subcoils is also realized, enabling the modeling of winding arrangements that produce different primary voltage levels (dual voltage transformers).

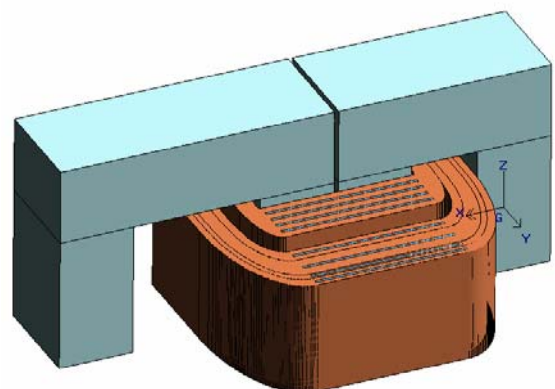


Fig. 1. Perspective view of the active part of the transformer one phase part modeled (detailed winding geometry).

### C. Computer code for automated optimization of distribution transformers

For the generalization of the method, a computer code was developed, performing the pre-processing tasks, the finite element calculations and the post-processing of the results.

A process of mesh parameterization was adopted, which modifies the coordinates of initial tetrahedral meshes of various densities in accordance with the geometric data of the examined transformers. This interface has overbalanced another major deficiency that has so far restrained the proliferation of the use of 3D FEM techniques for optimization of transformers by a manufacturing industry. The structure of the computer program is depicted in the flowchart of Fig. 2.

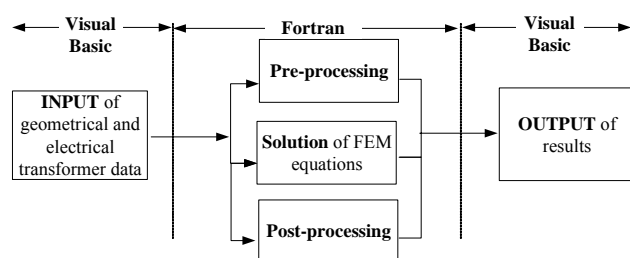


Fig. 2. Structure of the computer code implemented for the application of FEM to distribution transformers.

## II. RESULTS AND DISCUSSION

### A. Geometry optimization

The finite element method has been used to determine the optimized geometry transformer short circuit impedance. The results were compared to the ones provided by simplified modeling of the transformer windings and to the actual short circuit impedance measured after the transformer construction in the case of a 630 kVA transformer. The respective results are shown in Fig. 3, proving the ability of the detailed model to provide accurate results with the use of low mesh densities.

### B. Transformer field under open-circuit test

Fig.4 shows the resulting magnetic induction variation of the considered transformer under open circuit test, focusing on the iron core, where the magnetic induction distribution appears to be less uniform, especially in the upper part. This can be attributed to the fact that for representation of the core magnetic characteristics, a tensor magnetization is adopted (Fig. 5) consisting of three main axes, taking into account the different characteristics due to the iron laminations and the grain orientation of the considered material [3]. However, such a representation requires additional data for the magnetic permeability along the directions vertical to the grain orientation directions  $\mu_x$  and  $\mu_z$ . The material manufacturers usually provide only the magnetization curve along the grain

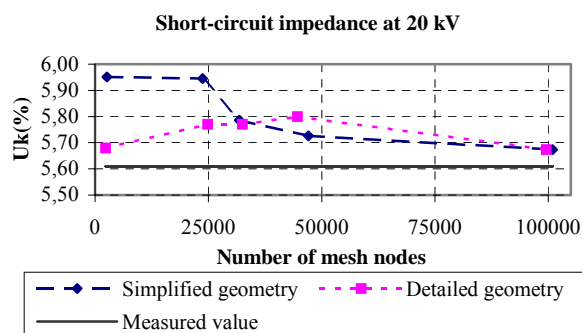


Fig. 3. Short circuit impedance results for simplified and detailed winding geometry of a 630 kVA, 20-15/0.4 kV transformer.

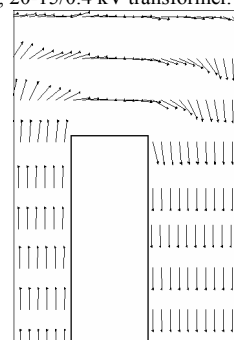


Fig. 4. Magnetic induction distribution during open circuit test, in the right iron core of Fig. 1 (xz-plane).

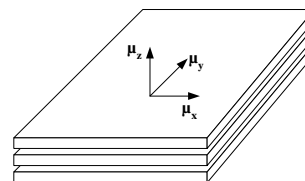


Fig. 5. Magnetization tensor along the sheets of the iron core shown in Fig. 1.

orientation direction ( $\mu_y$ ), which is also used for the other two axes of the magnetization tensor. This fact, along with the use of the experiential value of the lamination stacking factor (influencing the  $\mu_z$  component of the magnetization tensor) results to the inhomogeneity of the induction distribution appearing in Fig. 4.

## III. REFERENCES

- [1] A. Kladas, J. Tegopoulos, "A new scalar potential formulation for 3D magnetostatics necessitating no source field calculation", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, pp. 1103-1106, 1992.
- [2] M. Tsili, A. Kladas, P. Georgilakis, A. Souflaris, C. Pitsilis, J. Bakopoulos, D. Paparigas, "Hybrid Numerical Techniques for Power Transformer Modeling: A Comparative Analysis Validated by Measurements", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no 2, pp. 842-845, 2004.
- [3] T. Nakata, N. Takahashi, Y. Kawase, M. Nakano, "Influence of lamination orientation and stacking on magnetic characteristics of grain-oriented silicon steel laminations", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 20, pp. 1774-1776, 1984.

# Finite Element Based Methodology for the Accurate Prediction and Minimization of No Load Loss in Power Transformers

Anastasia J. Tsivgouli<sup>1</sup>, Marina A. Tsili<sup>2</sup>, Pavlos S. Georgilakis<sup>1</sup>, Antonios G. Kladas<sup>2</sup>, A. T. Souflaris<sup>3</sup> and D. G. Paparigas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Production Engineering & Management, Technical University of Crete, GR-73100, Chania, Greece, e-mail : pgeorg@dpem.tuc.gr

<sup>2</sup>Faculty of Electrical & Computer Engineering, National Technical University of Athens, GR-15780, Athens, Greece, e-mail : mtsili@central.ntua.gr

<sup>3</sup>Schneider Electric AE, Elvim Plant, GR-32011, Inofyta, Viotia, Greece, e-mail : thanassis.souflaris@gr.schneider-electric.com

## I. INTRODUCTION

In this article, a finite element model, suitable for power transformer representation, is used for the evaluation of transformer no load loss. The adoption of an efficient two dimensional (2D) finite element formulation, in conjunction with the proper representation of the core material characteristics and geometrical configuration, provides good agreement between calculated and measured loss values. Therefore, the model can be used by the transformer designer to accurately predict the performance characteristics of each design, in order to select the one that minimizes the no load loss.

## II. TRANSFORMER MODELING WITH 2D FINITE ELEMENT METHOD (FEM)

The considered transformer is a three-phase, wound core, distribution transformer (Fig. 1). Its magnetic circuit is of shell type and is assembled from two small and two large wound iron cores. The Low Voltage (LV) winding (secondary winding) comprises layers of copper sheet, while the High Voltage (HV) winding (primary winding) consists of copper wire. Figure 1 shows the 2D FEM model of the transformer one phase part, based on cylindrical symmetry, [1]. In order to take into account the contribution of the winding parts outside the core window to the transformer leakage field, appropriate modifications of the winding height are implemented, based on the Rogowski coefficients (modified transformer geometry).

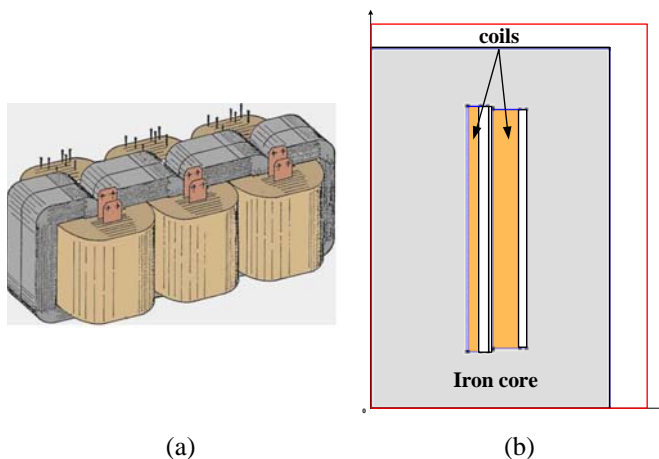


Figure 1. (a) Real geometry of the considered transformer  
(b) 2D FEM model of the transformer one phase part (modified geometry)

## III. RESULTS AND DISCUSSION

The proposed model was used for the evaluation of the no load loss of a 400 kVA transformer with rated primary voltages 20 and 15 kV (dual primary voltage 20–15 kV), and rated secondary voltage 400 V. The results of the model were compared to the actual no load loss value measured after the transformer construction. In order to perform a sensitivity analysis of the impact of the mesh density in the accuracy of the no load loss evaluation, various mesh densities were employed, consisting of up to 150000 nodes. Fig. 2 illustrates the variation of the computed no load loss value with the increase of mesh density. According to the diagram of Fig. 2, the no load loss predicted by the FEM model exhibits an underestimation for low mesh density (1500 nodes), which decreases as the number of mesh nodes increases and an overestimation after an intermediate density of 30000 nodes. Moreover, the variation of the error with the number of nodes becomes practically stable after a density of approximately 100000 nodes. The variation of the error in Fig. 2 indicates that the proposed model is able to provide satisfactory accuracy at medium mesh densities, thus reducing its complexity and facilitating its adoption in an automated design procedure.

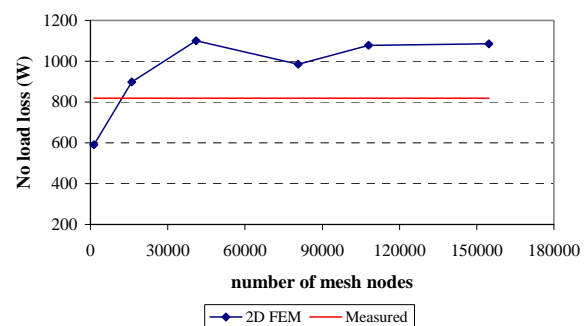


Fig. 2. No load loss results for the FEM model of a 400 kVA, 20-15/0.4 kV transformer.

## IV. REFERENCES

- [1] A.J. Tsivgouli, M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, A.D. Skarlatini, "Geometry optimization of electric shielding in power transformers based on finite element method," *Proc. 4<sup>th</sup> Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials (JAPMED '04)*, Egypt, September 2005.



## **B. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΕΘΝΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ**

- [B1] A.J. Tsivgouli, M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, A.D. Skarlatini, "Geometry optimization of electric shielding in power transformers based on finite element method," *accepted for publication in Journal of Materials Processing Technology*.

Σε αυτό το άρθρο αναπτύσσεται δυσδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κατάλληλο για την αναπαράσταση μετασχηματιστών ισχύος και τον υπολογισμό τόσο των παραμέτρων τους όσο και των μεταβολών που προκαλούνται σε αυτές με την προσθήκη ηλεκτρικών θωρακίσεων. Η μελέτη εστιάζει στην πρόβλεψη της τάσης βραχυκύκλωσης. Το προτεινόμενο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων συνδυάζεται με ντετερμινιστικές μεθόδους βελτιστοποίησης για την επιλογή της βέλτιστης γεωμετρικής διαμόρφωσης των ηλεκτρικών θωρακίσεων, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος και την απόδοσή τους.

## **Γ. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ**

- [Γ1] M.A. Tsili, A.G. Kladas, A.J. Tsivgouli, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, D.G. Paparigas, "Efficient finite element model for power transformer optimization," *Proc. 15th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2005)*, Vol. III, pp. 67-68, Shenyang, China, June 2005.

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κατάλληλο για βελτιστοποίηση μετασχηματιστών ισχύος. Το μοντέλο αυτό υιοθετεί τεχνική βασισμένη σε ανηγμένο βαθμωτό δυναμικό (η οποία πλεονεκτεί σε σχέση με τις υπάρχουσες τεχνικές των πεπερασμένων στοιχείων) σε συνδυασμό με λεπτομερή αναπαράσταση των τυλιγμάτων και του πυρήνα των μετασχηματιστών, επιτρέποντας έτσι την επίτευξη υψηλής ακρίβειας στον προσδιορισμό της τάσης βραχυκύκλωσης και των απωλειών τους. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με μετρημένες τιμές σε διάφορες περιπτώσεις κατασκευασμένων μετασχηματιστών επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα του να προβλέπει με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά τους τόσο κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης όσο και κατά τη δοκιμή κενού φορτίου.

- [Γ2] A.J. Tsivgouli, M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, A.D. Skarlatini, "Geometry optimization of electric shielding in power transformers based on finite element method," *Proc. 4<sup>th</sup> Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials (JAPMED '04)*, pp. 99-100, Cairo, Egypt, September 2005.

Σε αυτό το άρθρο διερευνάται η χρήση δυσδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των μεταβολών των παραμέτρων μετασχηματιστών ισχύος λόγω της προσθήκης ηλεκτρικών θωρακίσεων. Η μελέτη εστιάζει στην πρόβλεψη της τάσης βραχυκύκλωσης.

- [Γ3] Anastasia J. Tsivgouli, Marina A. Tsili, Pavlos S. Georgilakis, Antonios G. Kladas, Athanassios T. Souflaris and Dimitrios G. Paparigas, "Finite Element Based Methodology for the Accurate Prediction and Minimization of No Load Loss in Power Transformers," *Proc. of 17th International Conference on Electrical Machines, ICEM'2006*, Crete, Greece, 2-5 September 2006.

Σε αυτό το άρθρο παρουσιάζεται η χρήση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, κατάλληλου για αναπαράσταση μετασχηματιστών ισχύος, για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου. Η υιοθέτηση κατάλληλης δυσδιάστατης μεθοδολογίας πεπερασμένων στοιχείων, βασισμένης σε διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό, σε συνδυασμό με την ακριβή αναπαράσταση των γεωμετρικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του πυρήνα παρέχει καλή συσχέτιση μεταξύ των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών απωλειών. Έτσι, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους μηχανικούς σχεδίασης της μονάδας παραγωγής μετασχηματιστών για την ακριβή πρόβλεψη των λειτουργικών χαρακτηριστικών κάθε σχεδίασης, με σκοπό την επιλογή αυτής η οποία ελαχιστοποιεί τις απώλειες.