



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ

ΙΣΧΥΟΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του
ΦΩΤΙΟΥ Α. ΚΟΤΣΙΡΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΚΛΑΔΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Αθήνα, Απρίλιος 2005



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΙΣΧΥΟΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΦΩΤΙΟΥ Α. ΚΟΤΣΙΡΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΚΛΑΔΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20η Απριλίου 2005.

Αντώνιος Κλαδάς
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Πόλυ Γιαννοπούλου-Λασκαράτου
Επικ. Καθηγ. Ε.Μ.Π

Αθήνα, Απρίλιος 2005

(Υπογραφή)

.....

ΦΩΤΙΟΣ Α. ΚΟΤΣΙΡΑΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

© 2005 – All rights reserved

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται οι απώλειες σιδήρου (κενού φορτίου) σε μετασχηματιστές ισχύος. Η μελέτη γίνεται με τόσο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όσο και μέσω συστηματικής ανάλυσης των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών (βρόχος υστέρησης, δινορρεύματα) με αναλυτικές μεθοδολογίες και ειδικότερα με το μοντέλο Preisach-Neel.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των απωλειών με τη διδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε τρεις μετασχηματιστές διαφορετικής ισχύος (1000, 400 και 630 kVA) και τα αποτελέσματα της συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές του κατασκευαστή.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών με αναλυτικές μεθοδολογίες με σκοπό την προσαρμογή τους για την κατά περιοχές εφαρμογή τους σε μοντέλα μακροσκοπικής κλίμακας (όπως είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται ο τρόπος συστηματικής μελέτης των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού με τη χρήση του μοντέλου υστέρησης Preisach-Neel. Το μοντέλο εφαρμόζεται στην ανάλυση των ιδιοτήτων ενός τύπου μαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών σιδήρου.

Λέξεις - κλειδιά: Μετασχηματιστές Ισχύος, Απώλειες Κενού Φορτίου, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, Υστέρηση, Μοντέλο Preisach-Neel.

ABSTRACT

In the present thesis, the transformer no load (iron) losses are studied. The study is carried out with the use of finite element method as well as systematic analysis of the local characteristics of the core material (hysteresis loop, eddy currents) through analytical methods, such as the Preisach-Neel model.

At first, the no load loss calculation is conducted with the use of two dimensional finite element method. The method is applied to three cases of three-phase, wound core, distribution transformers of different rated power (1000, 400 and 630 kVA) and its results are compared to the respective loss values measured by the manufacturer.

Consequently, a systematic analysis of the core material local characteristics is realized, with the use of analytical methods. The analysis aims at the adaptation of these methods for their local application in conjunction with large scale models (such as the finite element method). More specifically, the systematic way of studying the core material characteristics with the Preisach-Neel model is analysed. The model is applied in the analysis of a specific core material (used during the transformer core manufacturing process) in a way that it can be adapted to the large scale models used for the estimation of transformer no load loss.

Keywords: Power Transformers, No Load Loss, Finite Element Method, Hysteresis, Preisach-Neel Model.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Μέθοδοι πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου	1
1.2	Σημασία απωλειών κενού φορτίου στους μετασχηματιστές ισχύος	3
1.3	Περιεχόμενα της εργασίας	5
1.4	Βιβλιογραφία	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

2.1	Δομή και χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών	7
2.2	Αρχές λειτουργίας των μετασχηματιστών ισχύος – Μαγνητικά κυκλώματα	8
2.3	Περιγραφή λειτουργίας ιδανικού μετασχηματιστή	11
2.4	Περιγραφή λειτουργίας πραγματικού μετασχηματιστή	17
2.5	Είδη και τρόποι κατασκευής μετασχηματιστών ισχύος	21
2.6	Μετασχηματιστές διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα	25
2.7	Βιβλιογραφία	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

3.1	Απώλειες μετασχηματιστών	29
3.2	Μαγνητικές απώλειες πυρήνα	33
3.2.1	Απώλειες από υστέρηση	34
3.2.2	Απώλειες από δινορρεύματα	37
3.2.3	Συνολικές απώλειες πυρήνα	40
3.3	Βιβλιογραφία	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

4.1	Προσδιορισμός απωλειών κενού φορτίου σε Μ/Σ ισχύος	45
4.1.1	Διδιάστατη ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	45
4.1.2	Διδιάστατη ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος FEMM	48
4.1.2.1	Δομή προγράμματος FEMM	48
4.1.3	Μοντελοποίηση μετασχηματιστή με τη διδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	49
4.1.3.1	Γεωμετρική διαμόρφωση μοντέλου	49
4.1.3.2	Προσομοίωση δοκιμής ανοιχτοκύκλωσης	52
4.1.3.3	Υπολογισμός απωλειών πυρήνα	52

4.1.4	Διδιάστατη πεδιακή ανάλυση μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης	53
4.1.4.1	Μετασχηματιστής ισχύος 1000 kVA	53
4.1.4.2	Μετασχηματιστής ισχύος 400 kVA	63
4.1.4.3	Μετασχηματιστής ισχύος 630 kVA	72
4.2	Ανάλυση βρόχων υστέρησης υλικού πυρήνα M/Σ με το μοντέλο Preisach - Neel	79
4.2.1	Περιγραφή του μοντέλου υστέρησης Preisach - Neel	79
4.2.1.1	Γενικά για τη μοντελοποίηση της υστέρησης υλικών	80
4.2.1.2	Τροποποιημένο μοντέλο Preisach για την αναπαράσταση της υστέρησης	82
4.2.2	Προσδιορισμός των βαρών του μοντέλου Preisach - Neel	83
4.2.3	Αξιοποίηση μοντέλου Preisach - Neel	91
4.2.3.1	Υπολογισμός βρόχων υστέρησης υλικού με τη χρήση του τριγώνου Preisach-Neel	91
4.2.3.2	Βελτίωση αναπαράστασης τοπικών ιδιοτήτων υλικού πυρήνα με χρήση του τριγώνου Preisach-Neel	91
4.3	Βιβλιογραφία	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1	Συμπεράσματα της εργασίας	95
5.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης	96
5.3	Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση	97

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται οι απώλειες σιδήρου (κενού φορτίου) σε μετασχηματιστές ισχύος. Η μελέτη γίνεται τόσο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όσο και μέσω συστηματικής ανάλυσης των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών (βρόχοι υστέρησης, δινορρεύματα) με αναλυτικές μεθοδολογίες και ειδικότερα με το μοντέλο Preisach-Neel.

Η μελέτη των απωλειών κενού φορτίου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς οι απώλειες αυτές είναι σταθερές και ανεξάρτητες του φορτίου του μετασχηματιστή. Έτσι, για ένα μετασχηματιστή που είναι καθημερινά υπό τάση, οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές και καταναλώνονται καθημερινά, 24 ώρες το 24ωρο, 365 μέρες το χρόνο. Από τη στιγμή που οι απώλειες αυτές είναι σταθερές για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, προκαλούν το ειδικό ενδιαφέρον των ηλεκτρικών εταιρειών, οι οποίες συνεχώς αναζητούν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, στο σημερινό, έντονα ανταγωνιστικό και παγκοσμιοποιημένο επιχειρηματικό περιβάλλον, η ανάγκη για περισσότερο αποδοτικούς μετασχηματιστές, γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική, γεγονός το οποίο στρέφει το ενδιαφέρον των κατασκευαστών στην προσπάθεια αύξησης της απόδοσης των μετασχηματιστών μέσω μείωσης των απωλειών κενού φορτίου τους, [1.1, 1.2].

1.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Η συστηματική αύξηση των επιδόσεων των υπολογιστών και η δραματική εξέλιξη των αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης πεδιακών μεγεθών καθιστά δυνατή την λεπτομερέστατη ανάλυση μαγνητικού πεδίου διατάξεων με υπολογιστικά συστήματα ευρείας διάδοσης και χαμηλού κόστους. Για παράδειγμα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία έχει επικρατήσει στην ανάλυση του πεδίου διατάξεων τρισδιάστατης γεωμετρίας που περιλαμβάνουν υλικά με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως οι μετασχηματιστές, η οποία προ δεκαετίας απαιτούσε

διανυσματικό υπολογιστή ή άλλο σύστημα υψηλών επιδόσεων, μπορεί πλέον να εφαρμοσθεί σε εύλογο χρόνο χρησιμοποιώντας κατάλληλο προσωπικό υπολογιστή.

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

Εν τούτοις η εφαρμογή των προαναφερομένων μεθόδων στην εκτίμηση των απωλειών σιδήρου εμφανίζει συχνά αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές για δύο κυρίως λόγους:

- η αναπαράσταση των υλικών πραγματοποιείται σε μακροσκοπική κλίμακα μέσω κατάλληλων χαρακτηριστικών με αποτέλεσμα να ομογενοποιούνται ή αγνοούνται φαινόμενα που διαδραματίζονται σε μικροσκοπική κλίμακα στα χρησιμοποιούμενα υλικά. Για το λόγο αυτό πολλές φορές η αναπαράσταση των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ατελής.
- η μηχανική και η θερμική κατεργασία για την διαμόρφωση των πυρήνων τροποποιεί τα αρχικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι αναγκαία η συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών με αναλυτικές μεθοδολογίες με σκοπό την προσαρμογή τους για την κατά περιοχές εφαρμογή τους σε μοντέλα μακροσκοπικής κλίμακας (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Το μοντέλο υστέρησης Preisach-Neel θεωρείται από τους πιο ακριβείς τρόπους εξομοίωσης του φαινομένου υστέρησης. Σύμφωνα με αυτό, το μαγνητικό υλικό αποτελείται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό (σχεδόν άπειρο) μαγνητικών διπόλων, κάθε ένα από τα οποία έχει ένα στοιχειώδη ορθογώνιο βρόχο υστέρησης ο οποίος αντιστοιχεί μόνο σε δύο καταστάσεις μαγνήτισης, τη θετική και την αρνητική. Η συνολική μαγνήτιση του εξεταζόμενου δοκιμίου προκύπτει σωρευτικά από τη μαγνήτιση όλων των διπόλων ή ισοδύναμα προσδιορίζεται από τη μαγνητική κατάσταση της πλειοψηφίας των διπόλων. Η χρήση του μοντέλου και των διάφορων τροποποιημένων εκδοχών του επιτρέπει την εξαγωγή της μαγνητικής επαγωγής B σε κάθε σημείο του δοκιμίου, λαμβάνοντας ως είσοδο την ένταση του μαγνητικού πεδίου H . Έτσι, οδηγεί και στον υπολογισμό των απωλειών υστέρησης για δεδομένο σημείο λειτουργίας στην καμπύλη μαγνήτισης του υλικού.

1.2 ΣΗΜΑΣΙΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η ακριβής εκτίμηση των απωλειών και της τάσης βραχυκύκλωσης κατά τη φάση σχεδίασης των μετασχηματιστών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς,

- Αυξάνει την αξιοπιστία των μετασχηματιστών,
- Εξασφαλίζει την υψηλή απόδοση των μετασχηματιστών,
- Μειώνει το κόστος των υλικών, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικρότερο περιθώριο ασφαλείας,
- Βοηθά τον κατασκευαστή να αποφύγει την πληρωμή ρητρών απωλειών,
- Ελαχιστοποιεί την ανάγκη κατασκευής πρωτοτύπου μετασχηματιστών (για την επιβεβαίωση της ακρίβειας της σχεδίασης) καθώς και των δοκιμών βραχυκύκλωσης υπό ονομαστική τάση, οι οποίες είναι επίπονες και δαπανηρές,
- Μειώνει το χρόνο παράδοσης των μετασχηματιστών.

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

Οι πίνακες 1.1 και 1.2 παραθέτουν τις τιμές και τις επιτρεπόμενες αποκλίσεις των λειτουργικών χαρακτηριστικών μετασχηματιστών ισχύος από αυτές τις τιμές, όπως επιβάλλονται από διεθνή πρότυπα, με τα οποία πρέπει να εναρμονίζονται οι κατασκευαστές μετασχηματιστών, [1.3, 1.4]

Ονομαστική ισχύς (kVA)	Κατηγορία Α'	Κατηγορία Β'	Κατηγορία C'	Τάση βραχυκύκλωσης (%)
	Απώλειες κενού P_0 (W)	Απώλειες κενού P_0 (W)	Απώλειες κενού P_0 (W)	
50	190	145	125	4
100	320	260	210	4
160	460	375	300	4
250	650	530	425	4
400	930	750	610	4
630	1.300	1.030	860	4
630	1.200	940	800	6
1.000	1.700	1.400	1.100	6
1.600	2.600	2.200	1.700	6
2.500	3.800	3.200	2.500	6

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

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
α) Απώλειες	
α ₁) Συνολικές απώλειες (Fe+Cu)	+10% των εγγυημένων συνολικών απωλειών (Fe+Cu)
α ₂) Απώλειες Fe (απώλειες Cu)	+15% των απωλειών Fe (απωλειών Cu) με την προϋπόθεση ότι δεν θα παραβιαστεί η ανοχή για τις συνολικές απώλειες
β) Λόγος μετασχηματισμού	
β ₁) Λόγος μετασχηματισμού κατά την ονομαστική λήψη	Η μικρότερη από τις παρακάτω τιμές: α) ±0.5% του εγγυημένου λόγου μετασχηματισμού β) ±1/10 της μετρηθείσας ονομαστικής τάσης βραχυκύκλωσης (υ _K %)
β ₂) Λόγος μετασχηματισμού των τάσεων των άλλων λήψεων	συμφωνείται με τον πελάτη
γ) Τάση βραχυκύκλωσης (Μ/Σ δύο τυλιγμάτων)	
γ ₁) Ονομαστική λήψη	±7.5% της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι ≥10% ±10% της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι <10%
γ ₂) Σε άλλες λήψεις	±10% της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι ≥10% ±15% της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι <10%
δ) Ρεύμα κενού	+30% του εγγυημένου ρεύματος κενού

Πίνακας 1.2: Ανοχές διάφορων χαρακτηριστικών των μετασχηματιστών κατά το πρότυπο IEC 60076 – 1, [1.3].

1.3 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου στους Μ/Σ ισχύος καθώς επίσης και η σημασία αυτών των απωλειών στη σχεδίαση τέτοιων Μ/Σ.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και το ισοδύναμο κύκλωμα ενός Μ/Σ ισχύος, ενώ περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων του κυκλώματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα είδη απωλειών στους Μ/Σ ισχύος με έμφαση στις απώλειες κενού φορτίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο υπολογίζονται οι απώλειες κενού φορτίου σε τρεις Μ/Σ διαφορετικής ονομαστικής ισχύος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των βρόχων υστέρησης του υλικού του πυρήνα των Μ/Σ με τη βοήθεια του μοντέλου Preisach-Neel.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα και τα θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.4] Π. Σ. Γεωργιλάκης, “Συμβολή Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης στη μείωση των Απωλειών Κενού Φορτίου Μετασχηματιστών Διανομής”. Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2000.
- [1.2] B.W. McConnell, “Increasing Distribution Transformer Efficiency: Potential for Energy Savings,” *IEEE Power Engineering Review*, vol. 18, no. 7, pp. 8-10, July 1998.
- [1.3] IEC 60076-1, “Power transformers – Part 1: General,” 2000.
- [1.4] Π. Γεωργιλάκης, Α. Σουφλάρης, Δ. Παπαρήγας, «Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών διανομής υψηλής ενεργειακής απόδοσης σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς», *Σύνοδος Ελληνικής Επιτροπής CIGRE*, Αθήνα, Μάρτιος 2002.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

2.1 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Ο μετασχηματιστής είναι μία ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου τάσης σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια διαφορετικού επιπέδου τάσης χρησιμοποιώντας σαν μέσο το μαγνητικό πεδίο. Αυτή η συσκευή αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά συνήθως δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η μόνη σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των σπειρών είναι το κοινό μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του πυρήνα.

Το ένα από τα δύο πηνία του μετασχηματιστή συνδέεται με μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ενώ το δεύτερο (ή το τρίτο, εάν υπάρχει) συνδέεται με το φορτίο. Το πρώτο τύλιγμα ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα ή τύλιγμα εισόδου του μετασχηματιστή και το δεύτερο ονομάζεται δευτερεύον ή τύλιγμα εξόδου. Αν υπάρχει και τρίτο τύλιγμα, αυτό ονομάζεται τριτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή.

Ο σπουδαιότερος σκοπός των μετασχηματιστών είναι η προσαρμογή της ηλεκτρικής ενέργειας στην εκάστοτε τάση. Μπορεί να είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί. Οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτρικά δίκτυα, π.χ. της ΔΕΗ. Η ΔΕΗ χρησιμοποιεί μετασχηματιστές για να αυξήσει την τάση του παραγόμενου ρεύματος το οποίο μεταφέρεται με γραμμές υψηλής τάσης, έτσι ώστε να περιορίζονται οι απώλειες. Προκειμένου όμως να παραχθεί η χαμηλή τάση των 220V, εγκαθίστανται άλλοι μετασχηματιστές που μετατρέπουν την υψηλή τάση σε μεσαία και τελικά σε χαμηλή. Η τελευταία υποβίβαση είναι συνήθως από 20 kV σε 230/400 V που χρησιμοποιούνται στην κατανάλωση.

Το σύστημα συνεχούς ρεύματος ένεκα της αδυναμίας μετασχηματισμού και ένεκα ανεπάρκειας των μηχανών συνεχούς ρεύματος είχε αρχικά παραμεριστεί όσον αφορά στη μεταφορά ενέργειας. Ο μετασχηματιστής έχει την ικανότητα να υψώνει την τάση της γεννήτριας σε μία επιθυμητή τιμή και έτσι παρέχει την ικανότητα εύκολης μεταφοράς μεγάλης ισχύος (π.χ. 1500MVA) μίας σύγχρονης γεννήτριας. Οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται και σε άλλες εφαρμογές, όπως στην αποβολή υψηλών συχνοτήτων και απομόνωση κυκλωμάτων, σε συστήματα ελέγχου, σε τροφοδοτικά, σε τηλεπικοινωνιακά κυκλώματα, σε μετατροπείς από 220V σε 110V και αντίστροφα, κ.ά. Ανάλογα με τη χρήση τους, διακρίνονται σε μετασχηματιστές απομόνωσης (isolation transformers), αυτομετασχηματιστές (autotransformers) και μετασχηματιστές ρεύματος ή ισχύος (power transformers). Στον ενεργειακό κλάδο ο μετασχηματιστής χρησιμοποιείται επίσης για τη σύνδεση δύο δικτύων.

Ο σκοπός για τον οποίο προορίζεται κάθε φορά ο μετασχηματιστής υπαγορεύει τα χαρακτηριστικά του αλλά και τον τρόπο κατασκευής του. Οι πλέον συνήθεις μετασχηματιστές είναι:

- Μετασχηματιστές ισχύος για τη μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας
- Μετασχηματιστές για την τροφοδότηση διατάξεων στατικών μετατροπέων
- Μετασχηματιστές μετρήσεων, για τη σύνδεση οργάνων μετρήσεως σε δίκτυα
- Μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιών κ.λ.π

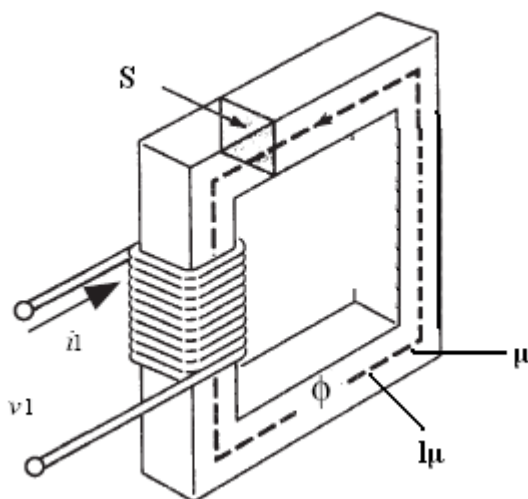
Τελευταία, η πρόοδος στα ολοκληρωμένα κυκλώματα επιτρέπει την αντικατάσταση των μετασχηματιστών (και των επαγωγέων) από κυκλώματα αντιστάσεων, πυκνωτών και τελεστικών ενισχυτών, που παράγονται πιο εύκολα και οικονομικά. Ωστόσο, οι μετασχηματιστές είναι και θα παραμείνουν ένα σημαντικό ηλεκτρικό στοιχείο στη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ – ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

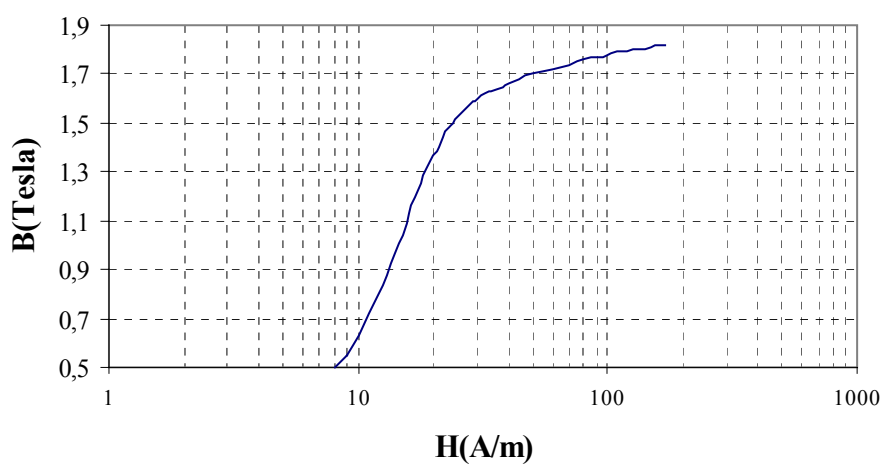
Στο σχήμα 2.1 φαίνεται ένα απλό μαγνητικό κύκλωμα, το οποίο αποτελείται από τον πυρήνα και το πηνίο. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό και χαρακτηρίζεται από τη διατομή S , το μέσο μήκος l_m και τη μαγνητική διαπερατότητα μ . Η συμπεριφορά της διαπερατότητας του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα φαίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης του, η οποία είναι μη γραμμική $B=F(H)$ του σχήματος 2. 2. Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια της παραγράφου (βασικά μεγέθη μαγνητικού πεδίου) συνοψίζονται στον πίνακα 2.1.

Όνομα	Σύμβολο	Μονάδες
Ένταση μαγνητικού πεδίου	H	$(A\tau / m)$
Μαγνητική επαγωγή	B	(T)
Μαγνητική ροή	Φ	(wb)
Μαγνητική διαπερατότητα υλικού	μ	(H / m)
Σχετική μαγνητική διαπερατότητα	μ_r	αδιάστατο μέγεθος
Μαγνητική διαπερατότητα του κενού	μ_0	(H / m)

Πίνακας 2.1: Βασικά μεγέθη μαγνητικού πεδίου



Σχήμα 2.1. Απλό μαγνητικό κύκλωμα



Σχήμα 2.2. Καμπύλη μαγνήτισης

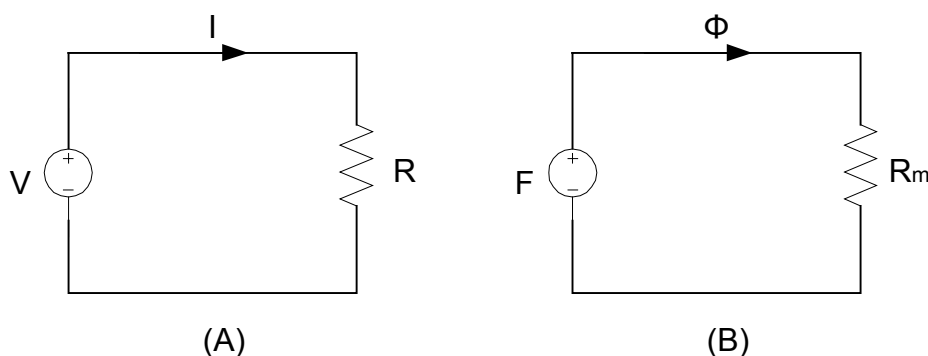
Στην αρχή μια μικρή αύξηση της έντασης του πεδίου H προκαλεί μεγάλη αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B . Η περιοχή αυτή ονομάζεται ακόρεστη.

Μετά από ένα συγκεκριμένο σημείο η επιπλέον αύξηση του πεδίου H προκαλεί σχετικά μικρότερη αύξηση μαγνητικής επαγωγής B . Αυτή η περιοχή είναι η περιοχή μετάβασης από την ακόρεστη στην κορεσμένη περιοχή και ονομάζεται γόνατο κορεσμού. Κορεσμένη περιοχή είναι η περιοχή όπου η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια.

Η χρήση σιδηρομαγνητικών υλικών στους μετασχηματιστές παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι για συγκεκριμένη ένταση πεδίου H στο εσωτερικό τους παράγεται πολλαπλάσια μαγνητική ροή απ' αυτή που θα παράγονταν στον αέρα.

Το πηνίο είναι τυλιγμένο γύρω από τον πυρήνα και αποτελείται από N σπείρες μονωμένες ηλεκτρικά μεταξύ τους και ως προς τον πυρήνα.

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μαγνητικού κυκλώματος του σχ. 2.2 φαίνεται στο σχ. 2.3 και χρησιμοποιείται για την απλοποίηση της πολύπλοκης ανάλυσης και σχεδίασης μαγνητικών κυκλωμάτων. Εδώ η αντίστοιχη ποσότητα της τάξης είναι η μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) : $F=NI$ σε At . Η ΜΕΔ προκαλεί ροή Φ , η οποία είναι η αντίστοιχη ποσότητα του ρεύματος I των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Η μαγνητική αντίσταση του κυκλώματος συμβολίζεται με R_m σε AT / wb όπου $R_m = l_m/\mu S$ και αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του ηλεκτρικού κυκλώματος. Όπως στον ηλεκτρισμό ισχύει ο νόμος του Ohm $U=IR$, στο μαγνητισμό ισχύει ο τύπος του Hopkinson, $F=\Phi R_m$, [2.1].



Σχήμα 2.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μαγνητικού κυκλώματος

(A) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

(B) Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του σχήματος (A)

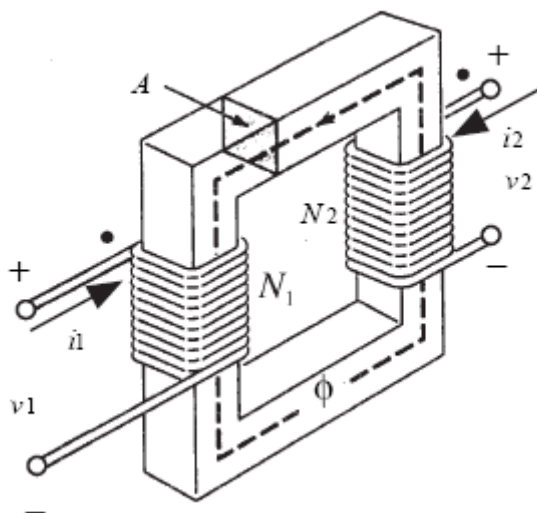
Όμως ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής Φ ενός μαγνητικού κυκλώματος με τη βοήθεια ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι προσεγγιστικός, διότι :

1. έγινε η παραδοχή ότι η ροή είναι συγκεντρωμένη μέσα στον πυρήνα, ωστόσο ένα μικρό κλάσμα της ροής που δε λήφθηκε υπόψη ξεφεύγει από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει. Η ροή αυτή ονομάζεται ροή σκεδάσεως.
2. κατά τον υπολογισμό της μαγνητικής αντίστασης θεωρούνται σταθερά το μέσο μήκος και η διατομή του πυρήνα. Αυτές οι προσεγγίσεις δεν είναι απολύτως σωστές κύριως στις γωνίες του πυρήνα.
3. η μαγνητική διαπερατότητα εξαρτάται από την τιμή της εντάσεως του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται στο υλικό άρα κι από τη ροή.

Έτσι δεν είναι σταθερή όπως θεωρήθηκε.

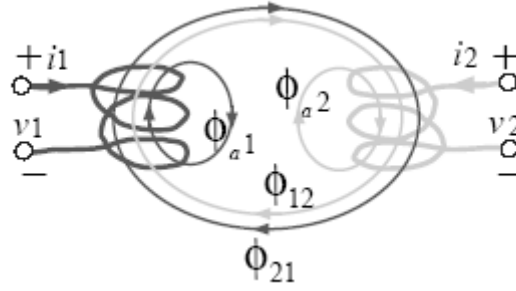
2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΙΔΑΝΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Όπως είναι γνωστό, ο μετασχηματιστής είναι το δίθυρο ηλεκτρικό στοιχείο στο οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο της αλληλεπαγωγής (σχ. 2.4). Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δύο επαγωγείς (πηνία) πολλών τυλιγμάτων (σπειρών) με κοινό πυρήνα. Ο μετασχηματιστής έχει τέσσερις ακροδέκτες και δύο θύρες από τις οποίες λαμβάνει ή αποδίδει ενέργεια. Για το λόγο αυτό, από άποψη συστημάτων είναι ένα ηλεκτρικό δίθυρο, [2.2].



Σχήμα 2.4: Μετασχηματιστής με θετικό συντελεστή αλληλεπαγωγής

Τα δύο πηνία ενός μετασχηματιστή φαίνονται στο σχ. 2.5. Σε αυτό το σχήμα, καθώς και στην ανάλυση που ακολουθεί, παραλείπουμε την αντίσταση που αντιστοιχεί στο μεγάλο μήκος του σύρματος των πηνίων, υποθέτουμε δηλαδή ιδανικά πηνία.



Σχήμα 2.5: Πηνία σε μαγνητική σύζευξη

Το πηνίο 1 διαρρέεται από ρεύμα i_1 και το πηνίο 2 από ρεύμα i_2 . Το ρεύμα i_1 προκαλεί μαγνητική ροή ϕ_{21} που εμπλέκει το πηνίο 2 και ροή ϕ_{a1} που εμπλέκει το πηνίο 1. Κατ' αναλογία, το ρεύμα i_2 προκαλεί μαγνητική ροή ϕ_{12} που εμπλέκει το πηνίο 1 και ροή ϕ_{a2} που εμπλέκει το πηνίο 2. Επομένως, η συνολική πεπλεγμένη ροή που διέρχεται από το πηνίο 1 είναι

$$\lambda_1 = N_1(\phi_{a1} + \phi_{21} + \phi_{12}) = N_1(\phi_{11} + \phi_{12}) \quad (2.1)$$

όπου ϕ_{11} είναι η συνολική ροή που οφείλεται στο ρεύμα i_1 . Για το πηνίο 2, η συνολική πεπλεγμένη ροή είναι

$$\lambda_2 = N_2(\phi_{a2} + \phi_{12} + \phi_{21}) = N_2(\phi_{22} + \phi_{21}) \quad (2.2)$$

όπου ϕ_{22} η συνολική ροή που οφείλεται στο ρεύμα i_2 . Από τη θεωρία των μαγνητικών κυκλωμάτων, οι σχέσεις αυτές μπορούν να γραφούν σαν συνάρτηση των ρευμάτων που προκαλούν τις αντίστοιχες ροές ως εξής

$$\lambda_1 = N_1(N_1 P_{11} i_1 + N_2 P_{12} i_2) = N_1^2 P_{11} i_1 + N_1 N_2 P_{12} i_2 \quad (2.3)$$

$$\lambda_2 = N_2(N_2 P_{22} i_2 + N_1 P_{21} i_1) = N_1 N_2 P_{21} i_1 + N_2^2 P_{22} i_2 \quad (2.4)$$

όπου οι παράμετροι P_{ij} είναι σταθερές που εξαρτώνται από τη γεωμετρία και τη μορφή του μαγνητικού πεδίου.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο νόμος του Faraday

$$v = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.5)$$

οπότε προκύπτει ότι

$$v_1 = N_1^2 P_{11} \frac{di_1}{dt} + N_1 N_2 P_{12} \frac{di_2}{dt} = L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (2.6)$$

$$v_2 = N_1 N_2 P_{21} \frac{di_1}{dt} + N_2^2 P_{22} \frac{di_2}{dt} = L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt} \quad (2.7)$$

όπου

$$L_{11} = N_1^2 P_{11} \quad (2.8)$$

$$L_{12} = N_1 N_2 P_{12} \quad (2.9)$$

$$L_{21} = N_1 N_2 P_{21} \quad (2.10)$$

$$L_{22} = N_2^2 P_{22} \quad (2.11)$$

Όλοι οι συντελεστές των παραπάνω 4 εξισώσεων έχουν μονάδες αυτεπαγωγής και μετρώνται σε H. Ο συντελεστής L_{11} είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πρώτου πηνίου, ενώ ο συντελεστής L_{22} είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του δεύτερου πηνίου. Οι άλλοι δύο συντελεστές οφείλονται στη σύζευξη των πηνίων. Εάν το μέσο από το οποίο διέρχεται η ροή είναι γραμμικό, τότε ισχύει ότι

$$L_{21} = L_{12} = M \quad (2.12)$$

Η σταθερά M λέγεται συντελεστής αλληλεπαγωγής των πηνίων. Για ευκολία, θέτουμε $L_{11} = L_1$, $L_{22} = L_2$.

Με αυτές τις παρατηρήσεις, θα έχουμε για τις τάσεις v_1 και v_2 συναρτήσει του χρόνου t :

$$v_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (2.13)$$

$$v_2(t) = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2.14)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις τάσης-ρεύματος αποτελούν τις εξισώσεις στοιχείου του γραμμικού μετασχηματιστή.

Στην παραπάνω ανάλυση υποτέθηκε ότι η ροή ϕ_{12} προστίθεται με τη ροή ϕ_{11} . Εάν όμως το τύλιγμα του πηνίου 2 είχε περιελιχθεί με αντίστροφη φορά, τότε αυτή η ροή θα έπρεπε να αφαιρεθεί από την ϕ_{11} . Για το λόγο αυτό, στις παραπάνω εξισώσεις, ο όρος που περιέχει το συντελεστή αλληλεπαγωγής δύο πηνίων μπορεί να έχει θετικό ή αρνητικό πρόσημο. Για παράδειγμα, οι εξισώσεις αυτές είναι ορθές γιατί στο σχ. 2.5 η ροή ϕ_{12} προστίθεται με τη ροή ϕ_{21} (έχουν την ίδια φορά). Η φορά εξαρτάται από τη γεωμετρία κατασκευής του μετασχηματιστή και το νόμο του δεξιόστροφου κοχλία.

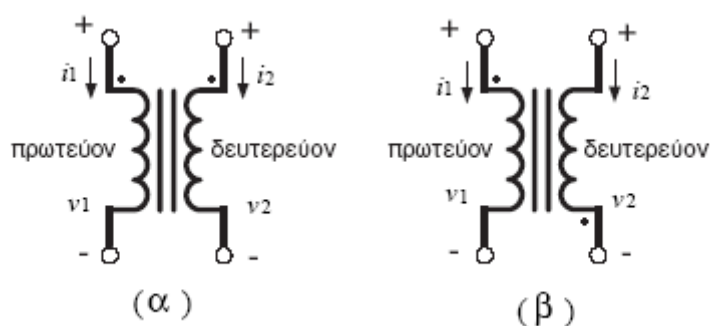
Επειδή όταν επιλύονται κυκλώματα δεν είναι δυνατό να σχεδιάζεται προσεκτικά τη γεωμετρία περιέλιξης, χρησιμοποιείται η σύμβαση των στιγμών.

Κατά τη σύμβαση αυτή, τοποθετείται αυθαίρετα μία στιγμή στον ένα ακροδέκτη του ενός πηνίου και άλλη στιγμή στον ακροδέκτη του άλλου πηνίου, έτσι ώστε αν και από τους δύο ακροδέκτες με στιγμή εισέλθουν θετικά ρεύματα, οι μαγνητικές ροές να προστίθενται. Αυτό συμβαίνει και στο μετασχηματιστή του σχ. 2.4.

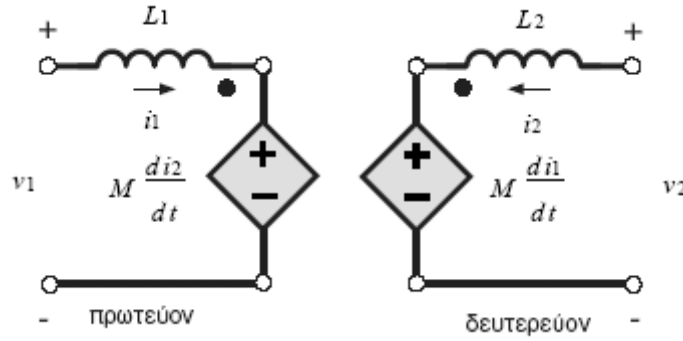
Εάν οι στιγμές έχουν τεθεί, τότε η σύμβαση χρησιμοποιείται ως εξής: Σε κάθε πηνίο, εκλέγεται η φορά αναφοράς του ρεύματος έτσι ώστε τα ρεύματα να εισέρχονται από το θετικό ακροδέκτη. Εάν τα ρεύματα και των δύο πηνίων εισέρχονται ή εξέρχονται από τους ακροδέκτες με τη στιγμή, ο M λαμβάνεται με θετικό πρόσημο. Σε αντίθετη περίπτωση, λαμβάνεται με αρνητικό.

Το σχ. 2.6 περιλαμβάνει δύο κυκλωματικά σύμβολα μετασχηματιστών που διαφέρουν μόνο κατά τη θέση των στιγμών. Όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα, το ένα από τα πηνία ονομάζεται πρωτεύον και το άλλο δευτερεύον. Συνήθως, πρωτεύον είναι το πηνίο που είναι συνδεδεμένο με μια πηγή ενέργειας, ενώ δευτερεύον είναι το πηνίο που συνδέεται με το φορτίο (καταβόθρα ενέργειας).

Τέλος, οι εξισώσεις στοιχείου ενός μετασχηματιστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατασκευαστεί ένα μοντέλο με τη βοήθεια εξαρτημένων πηγών τάσης, όπως φαίνεται στο σχ. 2.7. Πράγματι, στις εξισώσεις αυτές, οι όροι που περιέχουν τους συντελεστές αυτεπαγωγής L_1 και L_2 αντιστοιχούν σε δύο επαγωγείς. Οι όροι που περιέχουν την αλληλεπαγωγή αντιστοιχούν σε τάση ανάλογη της παραγώγου του ρεύματος του άλλου πηνίου και επομένως αντιστοιχούν σε εξαρτημένες πηγές.



Σχήμα 2.6: Σύμβολα μετασχηματιστών σε κύκλωμα.



Σχήμα 2.7: Μοντέλο μετασχηματιστή με εξαρτημένες πηγές.

Ο ιδανικός μετασχηματιστής είναι ένα απλό μοντέλο μετασχηματιστή, όπου ο συντελεστής ζεύξης k ισούται με τη μονάδα και οι παράμετροι P_{ij} έχουν πολύ μεγάλες τιμές. Στην πράξη, υπάρχουν μετασχηματιστές που προσεγγίζουν το μοντέλο αυτό. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{N_2^2}{N_1^2} = n^2 \quad (2.15)$$

$$\text{με } n = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.16)$$

όπου n είναι ο λόγος σπειρών του ιδανικού μετασχηματιστή. Με $k=1$, οι εξισώσεις στοιχείου του μετασχηματιστή δίνουν

$$v_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + nL_1 \frac{di_2}{dt} \quad (2.17)$$

$$v_2(t) = nL_1 \frac{di_1}{dt} + n^2 L_1 \frac{di_2}{dt} \quad (2.18)$$

δηλαδή

$$\frac{v_1(t)}{N_1} = \frac{v_2(t)}{N_2} \quad (2.19)$$

ή ισοδύναμα

$$v_2(t) = nv_1(t) \quad (2.20)$$

Επίσης, στο όριο όπου ο L_1 απειρίζεται (διότι το P_{11} είναι πολύ μεγάλο), έχουμε

$$\frac{di_1}{dt} + n \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (2.21)$$

Ολοκληρώνοντας αυτή την εξίσωση από $-\infty$ έως t παίρνουμε

$$i_2(t) = -\frac{1}{n}i_1(t) \quad (2.22)$$

ή ισοδύναμα

$$\frac{i_1(t)}{N_2} = -\frac{i_2(t)}{N_1} \quad (2.23)$$

Η παραπάνω εξίσωση μαζί με την

$$v_2(t) = nv_1(t) \quad (2.24)$$

μπορούν να γραφούν σε μορφή πινάκων ως εξής

$$\begin{bmatrix} v_2(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & 0 \\ 0 & -\frac{1}{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ i_1(t) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

και παριστάνουν μια πολύ απλή αλγεβρική σχέση μεταξύ των μεταβλητών των δύο θυρών, 1 και 2. Αυτή η σχέση είναι η εξίσωση στοιχείου του ιδανικού μετασχηματιστή.

Για τη συνολική τώρα ισχύ που προσδίδεται ή αποδίδεται από έναν ιδανικό μετασχηματιστή βρίσκουμε ότι

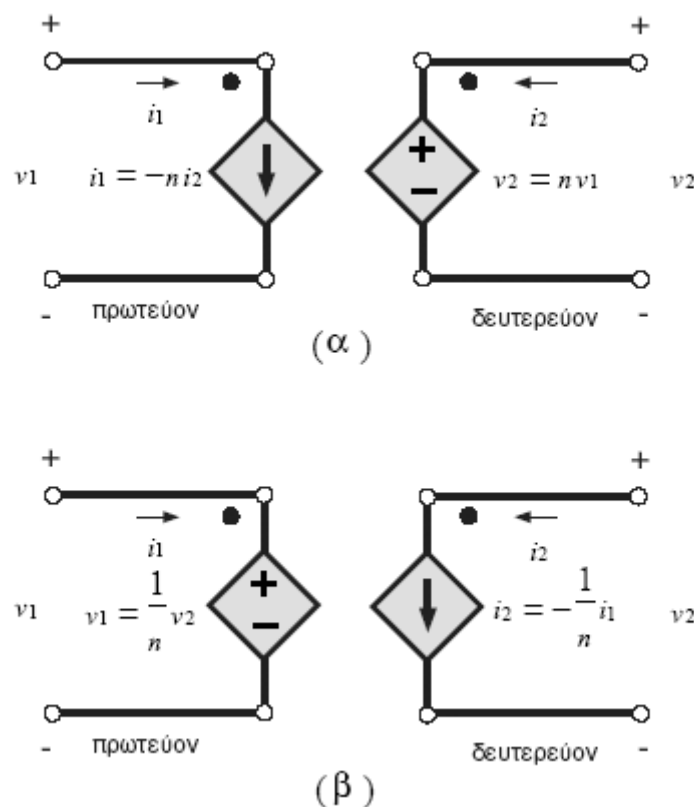
$$p(t) = v_1(t)i_1(t) + v_2(t)i_2(t) \equiv 0 \quad (2.26)$$

Επομένως, όση ισχύς εισέρχεται από τη μία θύρα του ιδανικού μετασχηματιστή, πρέπει απαραίτητα να εξέλθει από την άλλη. Η συνέπεια αυτής της σημαντικής παρατήρησης είναι ότι ο ιδανικός μετασχηματιστής έχει μηδενικές απώλειες ηλεκτρικής ισχύος. Επίσης, εάν η τελευταία εξίσωση ολοκληρωθεί, θα δώσει ενέργεια μηδέν, δηλαδή ο ιδανικός μετασχηματιστής δε μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια και είναι ένα στατικό στοιχείο μετασχηματισμού τάσεων και ρευμάτων.

Μετά από τις παρατηρήσεις αυτές, κατασκευάζουμε το κυκλωματικό μοντέλο του ιδανικού μετασχηματιστή. Λόγω της παραπάνω μητρικής εξίσωσης, εάν το ρεύμα μίας θύρας καθορίζεται από το κύκλωμα, τότε το ρεύμα της άλλης θύρας θα παράγεται από εξαρτημένη πηγή. Το ίδιο ισχύει και για τις τάσεις. Εάν μία τάση του μετασχηματιστή καθορίζεται από το κύκλωμα, η άλλη θα παράγεται από εξαρτημένη πηγή.

Έτσι, εάν θεωρήσουμε ότι το ρεύμα i_2 καθορίζεται από το κύκλωμα, το ρεύμα i_1 θα αντιστοιχεί σε εξαρτημένη πηγή ρεύματος. Για το λόγο αυτό, στο σχ. 2.8 χρησιμοποιούμε μία εξαρτημένη πηγή ρεύματος στον κλάδο 1. Για την πηγή αυτή, η τάση δε μπορεί να είναι εξαρτημένη, αλλά θα πρέπει να καθορίζεται από το κύκλωμα. Άρα η τάση v_1 πρέπει να καθορίζεται από το κύκλωμα, και τότε η τάση v_2 θα παράγεται από εξαρτημένη πηγή τάσης. Χρειαζόμαστε λοιπόν και μία εξαρτημένη πηγή τάσης στον κλάδο 2, όπως φαίνεται στο σχ. 2.8(α).

Εάν όμως θεωρήσουμε ότι το ρεύμα i_1 καθορίζεται από το κύκλωμα, ο παραπάνω συλλογισμός μας δίνει το μοντέλο του σχ. 2.8(β). Άλλο μοντέλο δεν είναι δυνατό να προκύψει. Η επιλογή του μοντέλου θα εξαρτηθεί από το κύκλωμα στο οποίο συνδέεται ο μετασχηματιστής.



Σχήμα 2.8: Μοντέλα ιδανικού μετασχηματιστή με εξαρτημένες πηγές.

(α) οι μεταβλητές v_1 , i_2 καθορίζονται από το κύκλωμα.

(β) οι μεταβλητές v_2 , i_1 καθορίζονται από το κύκλωμα.

2.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Η ακρίβεια οποιουδήποτε μοντέλου του πραγματικού μετασχηματιστή εξαρτάται πάντα από το αν στην ανάπτυξη του λαμβάνονται υπ' όψιν όλα σχεδόν τα

είδη των απωλειών κατά τη λειτουργία του. Οι πιο βασικές από αυτές τις απώλειες είναι οι ακόλουθες, [2.3]:

1. Απώλειες Χαλκού (I^2R). Πρόκειται για τις θερμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος στα τυλίγματά του
2. Απώλειες εξ' αιτίας των δινορευμάτων. Είναι οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετασχηματιστή.
3. Απώλειες υστέρησης. Αυτές έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα η οποία συμβαίνει σε κάθε ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Η μεταβολή τους με το χρόνο είναι μια πολύπλοκη μη γραμμική συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στο μετασχηματιστή.
4. Ροή σκέδασης . Πρόκειται για τις μαγνητικές ροές ϕ_{LP} και ϕ_{LS} που αναλύθηκαν στα προηγούμενα, οι οποίες ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει και εμφανίζονται μόνο στο ένα από τα δύο τυλίγματα. Αυτές οι ροές παράγουν τις αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του πυρήνα που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.

Από την ανάλυση των απωλειών αυτών προκύπτουν και οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή. Έτσι, οι απώλειες χαλκού που είναι θερμικές απώλειες είναι πολύ εύκολο να ενσωματωθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή απλά με την προσθήκη δύο αντιστάσεων. Της R_p που αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος και της R_s που αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος. Σε προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ότι η ροή σκέδασης του πρωτεύοντος ϕ_{LP} παράγει την τάση e_{LP} που δίνεται από την:

$$e_{LP} = N_p \frac{d\phi_{LP}}{dt} \quad (2.27)$$

ενώ η ροή σκέδασης του δευτερεύοντος ϕ_{LS} παράγει την τάση e_{LS} που δίνεται από την:

$$e_{LS}(t) = N_p \frac{d\phi_{LS}}{dt} \quad (2.28)$$

Επειδή οι διαδρομές των ροών σκέδασης βρίσκονται στον αέρα του οποίου η μαγνητική αντίσταση είναι σταθερή και πολύ μεγαλύτερη της μαγνητικής αντίστασης του πυρήνα, η ροή ϕ_{LP} είναι ανάλογη του ρεύματος του πρωτεύοντος

Οι απώλειες χαλκού που είναι θερμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων είναι εύκολο να τοποθετηθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα. Παρουσιάζονται με την προσθήκη δύο αντιστάσεων. Της R_p που αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος και της R_s που αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος.

Η ροή σκέδασης του πρωτεύοντος ϕ_{LP} παράγει την τάση e_{LP} που δίδεται από τη σχέση:

$$e_{LP}(t) = N_p \frac{d\phi_{LP}}{dt} \quad (2.29)$$

ενώ η ροή σκέδασης του δευτερεύοντος ϕ_{LS} παράγει την τάση e_{LS} που δίδεται από τη σχέση:

$$e_{LS}(t) = N_s \frac{d\phi_{LS}}{dt} \quad (2.30)$$

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί επειδή οι διαδρομές των ροών σκέδασης βρίσκονται στον αέρα του οποίου η μαγνητική αντίσταση είναι σταθερή και πολύ μεγαλύτερη της μαγνητικής αντίστασης του πυρήνα, η ροή ϕ_{LP} είναι ανάλογη του ρεύματος του πρωτεύοντος i_p , ενώ η ϕ_{LS} είναι ανάλογη του ρεύματος του δευτερεύοντος i_s σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\phi_{LP} = (PN_p)i_p \quad (2.31)$$

$$\phi_{LS} = (PN_s)i_s \quad (2.32)$$

όπου

P = η μαγνητική αγωγιμότητα της διαδρομής της μαγνητικής ροής

N_p = ο αριθμός των σπειρών στο πρωτεύον τύλιγμα

N_s = ο αριθμός των σπειρών στο δευτερεύον τύλιγμα

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει

$$e_{LP} = N_p \frac{d}{dt}(PN_p)i_p = N_p^2 P \frac{di_p}{dt} \quad (2.33)$$

$$e_{LS} = N_s \frac{d}{dt}(PN_s)i_s = N_s^2 P \frac{di_s}{dt} \quad (2.34)$$

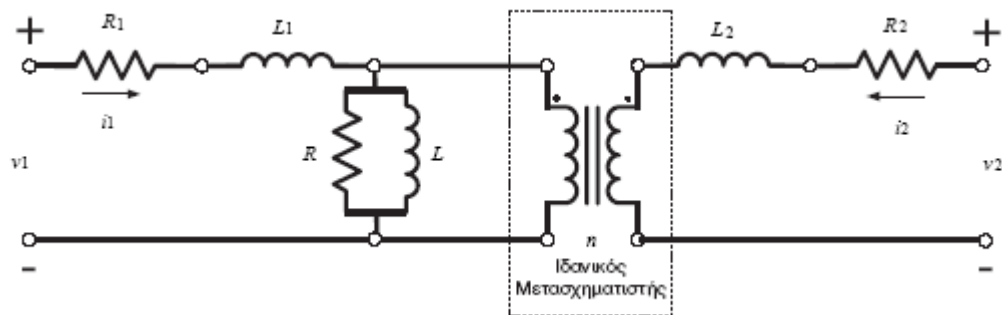
και αν όλες οι παραπάνω σχέσεις συμπτυχθούν σε μία, γίνονται:

$$e_{LP} = L_P \frac{di_P}{dt} \quad (2.35)$$

$$e_{LS} = L_S \frac{di_S}{dt} \quad (2.36)$$

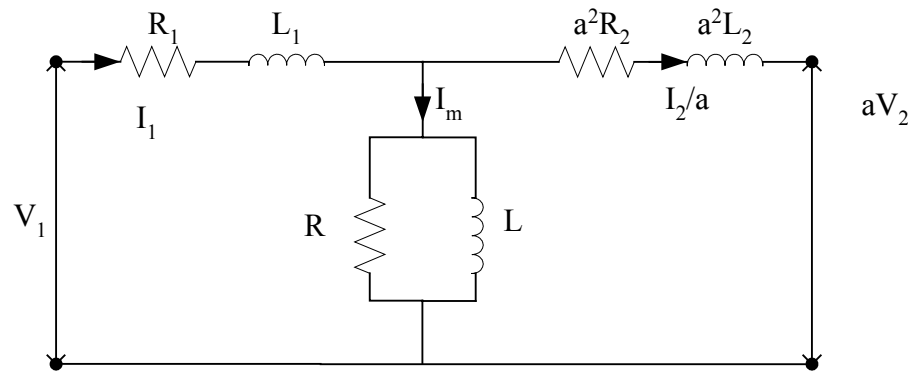
όπου $L_P = N_P^2 P$ η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος τυλίγματος και $L_S = N_S^2 P$ η αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή. Δηλαδή οι δύο ροές σκέδασης αντιστοιχίζονται στο ισοδύναμο κύκλωμα σε αυτεπαγωγές.

Το ρεύμα μαγνήτισης i_m είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή ενώ η κυματομορφή του έπεται της κυματομορφής της τάσης κατά 90° . Έτσι το ρεύμα αυτό αντιστοιχίζεται σε μία αντίδραση X_m τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης. Τέλος το ρεύμα απωλειών του πυρήνα i_{h+e} (απώλειες οφειλόμενες στο φαινόμενο της υστέρησης και στα δινορεύματα) είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του μετασχηματιστή και η κυματομορφή του είναι σε φάση με την κυματομορφή της τάσης. Έτσι αυτό το ρεύμα είναι δυνατό να παρουσιάζεται με μια αντίσταση R_c τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης.



Σχήμα 2.9: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή.

Στο σχήμα 2.9 φαίνεται το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή. Αν και το κύκλωμα του σχήματος 2.9 θα έδινε μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς ωστόσο δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμο. Για την ανάλυση του κυκλώματος που περιλαμβάνει μετασχηματιστές είναι απαραίτητη η μετατροπή του αρχικού κυκλώματος σ' ένα ισοδύναμο κύκλωμα που όμως να παρουσιάζει μόνο ένα επίπεδο τάσης. Έτσι το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματίζεται, ώστε το επίπεδο τάσης να ισούται με το επίπεδο τάσης του πρωτεύοντος ή του δευτερεύοντος. Στο σχήμα 2.10 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον τύλιγμά του.



Σχήμα 2.10: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού μετασχηματιστή, ανηγμένο στο πρωτεύον.

2.5 ΕΙΔΗ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Οι μετασχηματιστές διακρίνονται ως προς την ισχύ τους σε :

- **Μετασχηματιστές οργάνων:** Είναι μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται σε όργανα μέτρησης και σε πίνακες εσωτερικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων
- **Μετασχηματιστές ισχύος:** Μεταβιβάζουν σημαντικές ισχύς και χρησιμοποιούνται στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι μετασχηματιστές ισχύος διακρίνονται:

- Ως προς τον αριθμό των φάσεων τους σε :
 - **Τριφασικούς μετασχηματιστές:** Χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της τάσεως σε τριφασικό σύστημα
 - **Μονοφασικούς μετασχηματιστές:** Χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της τάσεως μίας φάσεως του τριφασικού συστήματος .
- Ως προς τον τρόπο ψύξης τους σε:
 - **Μετασχηματιστές ξηρού τύπου :** Οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου ψύχονται με αέρα .
 - **Μετασχηματιστές λαδιού:** Οι μετασχηματιστές λαδιού ψύχονται με κυκλοφορία λαδιού
- Ως προς τον χώρο τοποθέτησής τους σε :
 - **Μετασχηματιστές υπαίθρου**
 - **Μετασχηματιστές κλειστού χώρου**
- Ως προς τη χρήση τους στο σύστημα ηλεκτροδότησης

-**Μετασχηματιστές μονάδος ή ανυψώσεως** : Συνδέονται στην έξοδο των γεννητριών και ανυψώνουν την τάση ώστε να οδηγηθεί στη γραμμή μεταφοράς .

-**Μετασχηματιστές υποσταθμών ή υποβιβασμού** : Συνδέονται στο τέλος των γραμμών μεταφοράς και υποβιβάζουν την τάση στα επίπεδα διανομής .

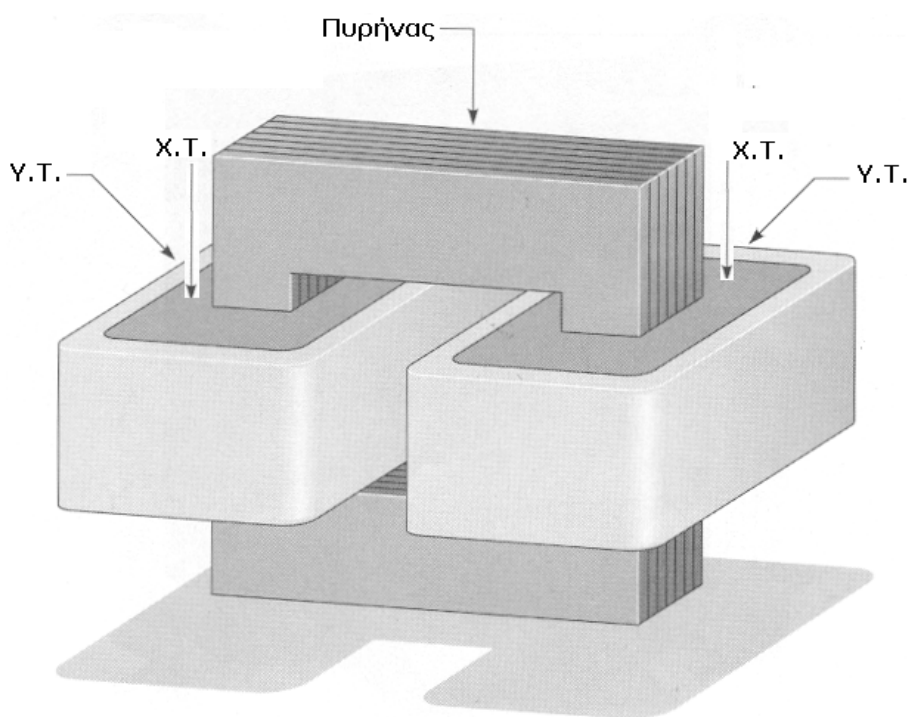
-**Μετασχηματιστές διανομής** : Υποβιβάζουν την τάση στα επίπεδα χρησιμοποίησης .

▪ Ως προς τον τύπο του πυρήνα

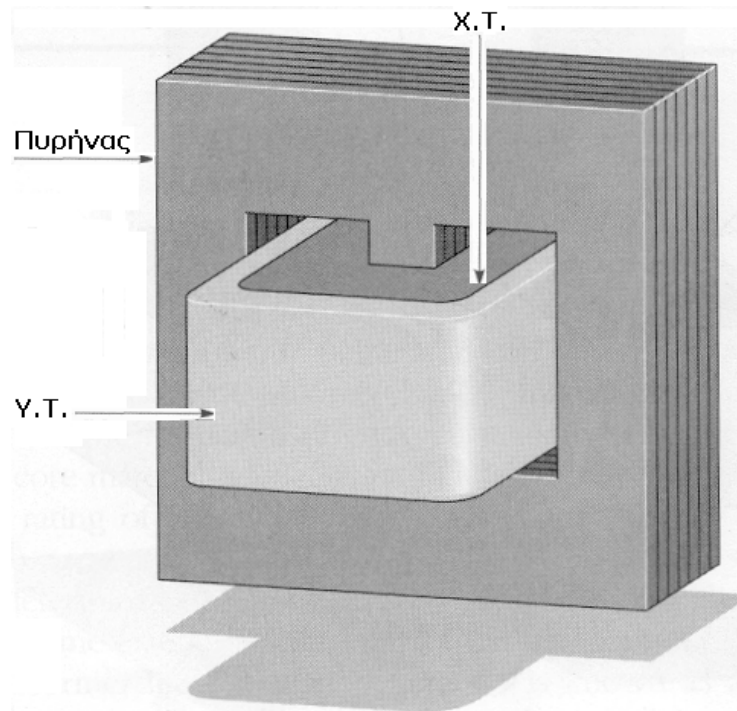
- **Μετασχηματιστές τύπου πυρήνα** : Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται γύρω από τις δύο πλευρές (σκέλη) ενός ορθογώνιου πυρήνα .

-**Μετασχηματιστές τύπου κελύφους ή μανδύα**: Σε αυτού του τύπου τους μετασχηματιστές τα τυλίγματα του μετασχηματιστή τοποθετούνται στο μεσαίο σκέλος και η ροή κλείνει κύκλωμα από τα ακριανά σκέλη και το ζύγωμα . Ο πυρήνας περιβάλλει τα τυλίγματα .

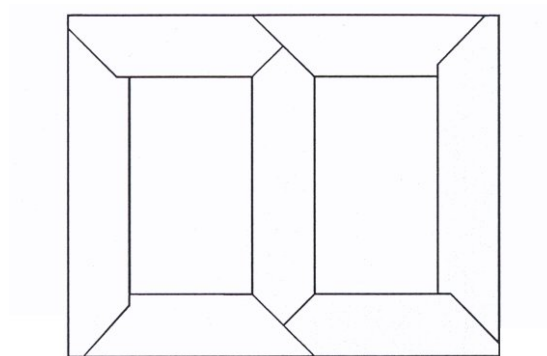
Οι μετασχηματιστές τύπου κελύφους έχουν μικρότερη ροή σκεδάσεως από τους μετασχηματιστές τύπου πυρήνα



Σχήμα 2.11: Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα.

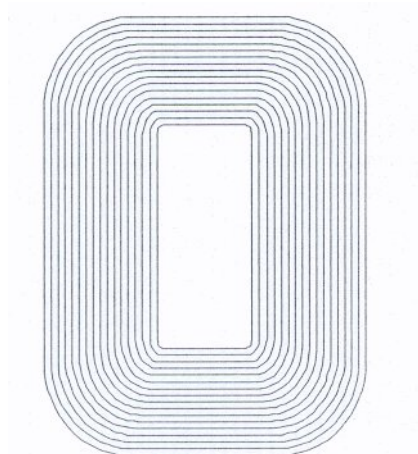


Σχήμα 2.12: Μετασχηματιστής τύπου μανδύα.



Σχήμα 2.13: Στοιβαχτός πυρήνας

Όταν τα ελάσματα τυλίγονται σε μορφή πυρήνα με αποκομμένες λωρίδες μαγνητικού υλικού τότε ο πυρήνας ονομάζεται τυλιχτός πυρήνας .



Σχήμα 2.14: Τυλιχτός πυρήνας

Ανεξάρτητα από τον τύπο στον οποίο ανήκει ένας μετασχηματιστής ο πυρήνας του είναι κατασκευασμένος από λεπτά σιδηρομαγνητικά ελάσματα πυριτιούχου χάλυβα πάχους 0.5 mm ή 0.3 mm . Τα ελάσματα αυτά είναι μονωμένα μεταξύ τους με ειδικό μονωτικό βερνίκι για την ελάττωση των δυνορευμάτων που επάγονται στον πυρήνα . Όταν τα ελάσματα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο έτσι ώστε τα κενά μεταξύ του τέλους των ελασμάτων του ενός στρώματος να επικαλύπτονται από το έλασμα του επόμενου στρώματος τότε ο πυρήνας ονομάζεται στοιβαχτός πυρήνας .

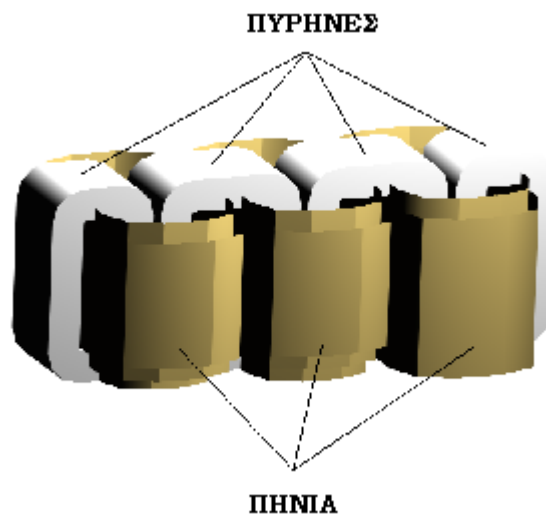
Οι μετασχηματιστές τυλιχτού πυρήνα παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα έναντι των μετασχηματιστών στοιβαχτού πυρήνα :

- Έχουν μικρότερο ρεύμα μαγνήτισης
- Έχουν μικρότερο θόρυβο διότι αποτελούνται από μικρότερα φύλλα μαγνητικού υλικού
- Υπάρχει πλήρης εκμετάλλευση της διατομής του πυρήνα
- Μικρότερες απώλειες πυρήνα
- Δεν απαιτείται σημαντική εργασία διότι η τύλιξη γίνεται με κατάλληλη αυτόματη μηχανή .

Τα μειονεκτήματά τους έναντι των μετασχηματιστών τύπου στοιβαχτού πυρήνα είναι αντίστοιχα:

- Τα κενά αέρος πιθανόν να διαφέρουν μεταξύ τους λόγω των ανοχών της μηχανής περιέλιξης των πυρήνων και λόγω των δυσκολιών στην επεξεργασία του μαγνητικού υλικού

- Οι επιθυμητές διαστάσεις των τυλιχτών πυρήνων δεν μπορούν να επιτευχθούν με ακρίβεια
- Η μηχανή περιέλιξης πυρήνων έχει συγκεκριμένες δυνατότητες. Μπορεί να τυλίξει πυρήνες εώς ένα μέγιστο βάρος και μέχρι κάποια μέγιστη διάμετρο. Αντίθετα οι στοιβαχτοί πυρήνες κατασκευάζονται για οποιαδήποτε επιθυμητή διάσταση .



Σχήμα 2.15: Τριφασικός μετασχηματιστής διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα.

Τα τυλίγματα Υψηλής Τάσης (YT) και Χαμηλής Τάσης (XT) ενός μετασχηματιστή μπορούν να τοποθετηθούν με δύο τρόπους :

- **Ομόκεντρα ή συγκεντρικά:** Το τύλιγμα χαμηλής τάσης τοποθετείται στο εσωτερικό του τυλίγματος υψηλής τάσης
- **Σε δίσκους:** Τα δύο τυλίγματα χωρίζονται σε υποπηνία (δίσκους) οι οποίοι τοποθετούνται εναλλάξ ένας δίσκος χαμηλής τάσης ένας υψηλής τάσης κλπ. Οι δίσκοι χαμηλής τάσης συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους ομοίως και οι δίσκοι υψηλής τάσης. Έτσι έχουμε δύο άκρα για τη χαμηλή τάση και δύο για την υψηλή τάση .

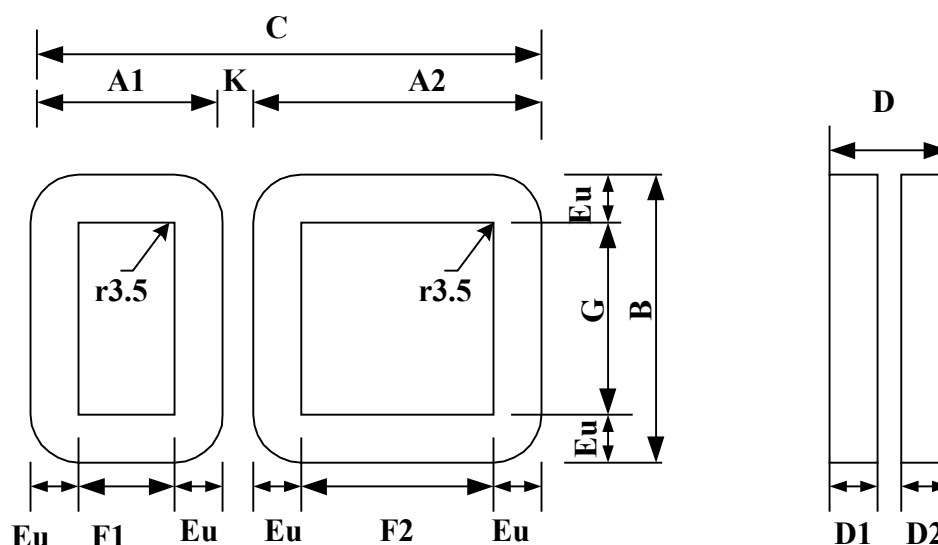
2.6 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ ΤΥΛΙΧΤΟΥ ΠΥΡΗΝΑ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα, στον οποίο επικεντρώνεται η ανάλυση των επόμενων κεφαλαίων, [2.4, 2.5].

Ο υπό μελέτη μετασχηματιστής είναι τριφασικός μετασχηματιστής διανομής, τύπου τυλιχτού πυρήνα της εταιρείας Schneider Electric και απεικονίζεται στο σχήμα 2.14.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη μετασχηματιστή αφορούν τόσο στον πυρήνα όσο και στα πηνία.

Για να κατασκευαστεί ένας τριφασικός μετασχηματιστής διανομής τύπου πυρήνα, πρέπει να συναρμολογηθούν δύο μικροί και δύο μεγάλοι ατομικοί πυρήνες. Οι πυρήνες είναι τεχνολογίας τυλιχτού πυρήνα (wound core) και κατασκευάζονται από μαγνητική λαμαρίνα χαμηλών απωλειών. Η διαδικασία παραγωγής τους έχει ως εξής: Αρχικά κόβεται η πρώτη ύλη μαγνητικής λαμαρίνας σε λωρίδες τυποποιημένου πλάτους. Ακολουθεί η κοπή σε προκαθορισμένα μήκη και η περιέλιξη σε στρογγυλό τύμπανο, οπότε προκύπτει ο στρογγυλός πυρήνας. Στη συνέχεια, ο στρογγυλός πυρήνας διαμορφώνεται σε ειδική πρέσα και λαμβάνει τη μορφή ορθογωνικής διατομής. Τέλος, ο τυλιχτός πυρήνας ανοπτύεται προκειμένου ν' ανακτηθούν πλήρως οι ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητες του μαγνητικού υλικού. Οι διαστάσεις και οι κατασκευαστικές παράμετροι ενός μικρού και ενός μεγάλου πυρήνα φαίνονται στο σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16: Διαστάσεις μικρού και μεγάλου πυρήνα μετασχηματιστή.

Τα πηνία του μετασχηματιστή είναι συγκεντρικά, ορθογωνικής διατομής, με το τύλιγμα της χαμηλής τάσης να βρίσκεται πλησιέστερα στον πυρήνα. Για την κατασκευή του τυλίγματος της υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό. Η

2.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Β. Λάζαρης, “*Ανάπτυξη Λογισμικού Σχεδίασης Μετασχηματιστή Ισχύος με Αριθμητική και Πειραματική Επιβεβαίωση*”. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2003.
- [2.2] Ε. Παπαδόπουλος, “*Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Κυκλώματα και Συστήματα*”, ΕΜΠ, Αθήνα, 2001.
- [2.3] Χ. Δικαιάκος, Κ. Μόφορη, “*Σχεδίαση Μετασχηματιστή Τυλιχτού Πυρήνα και Μελέτη Δυνάμεων σε Βραχυκύκλωμα*”. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2001.
- [2.4] Schneider Electric, “*Τεχνικό Τετράδιο Νο.2 – Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ*”
- [2.5] “Βελτίωση της μεθοδολογίας σχεδίασης- πρόβλεψης χαρακτηριστικών μετασχηματιστών ισχύος χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου και πειραματική επιβεβαίωση,” *Τελική έκθεση του έργου ΠΑΒΕΤ 00ΒΕ457*, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2003.

ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

3.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

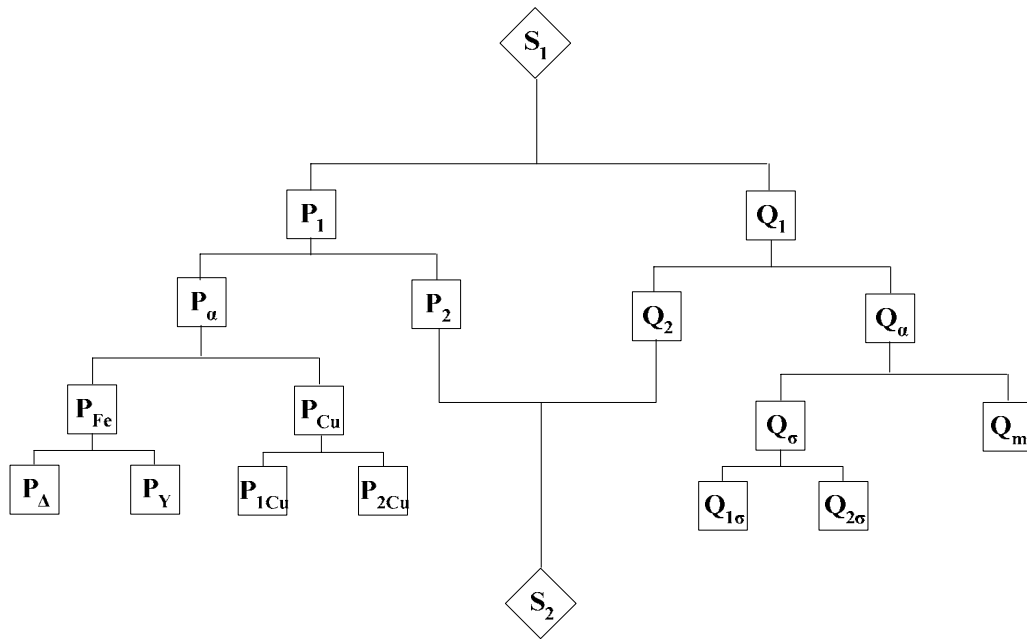
Η μετατροπή ισχύος από τους μετασχηματιστές γίνεται πάντα με κάποιες απώλειες. Η σχεδίαση των σύγχρονων μετασχηματιστών ισχύος συνήθως υπερβαίνει το 95% σε λειτουργικότητα. Είναι χρήσιμο, ωστόσο, να γνωρίζουμε πού καταλήγει ένα μέρος των απωλειών αυτών και τι προκαλεί το φαινόμενο αυτό.

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται το διάγραμμα ροής ισχύος ενός μετασχηματιστή. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζεται το μέρος της ισχύος εισόδου το οποίο καταναλώνεται στο μετασχηματιστή με τη μορφή απωλειών. Στη συνέχεια, δίνεται μια συνοπτική περιγραφή του κάθε είδους απωλειών που εμφανίζεται στο σχήμα αυτό.

Αρχικά, υπάρχουν απώλειες ισχύος που οφείλονται στην αντίσταση των τυλιγμάτων. Αν δε χρησιμοποιούνται υπεραγώγιμα σύρματα, θα υπάρχει πάντα ισχύ διαχεόμενη με τη μορφή θερμότητας μέσα από την αντίσταση των αγωγών που μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Επειδή οι μετασχηματιστές απαιτούν μεγάλα μήκη αγωγού, αυτές οι απώλειες μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας. Αυξάνοντας τις διαστάσεις των τυλιγμάτων, επιτυγχάνουμε μείωση των απωλειών, αλλά με ταυτόχρονη σημαντική αύξηση στο κόστος, το μέγεθος και το βάρος.

Εκτός από τις απώλειες στην αντίσταση, το μέγεθος των απωλειών των μετασχηματιστών ισχύος οφείλεται σε μαγνητικές επιδράσεις στον πυρήνα. Ίσως οι πιο σημαντικές από αυτές τις «απώλειες πυρήνα» είναι οι απώλειες δινορρευσμάτων, οι οποίες

είναι ωμικές και οφείλονται στη διαδρομή επαγόμενων ρευμάτων μέσα από τον πυρήνα σιδήρου.



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής ισχύος μετασχηματιστή

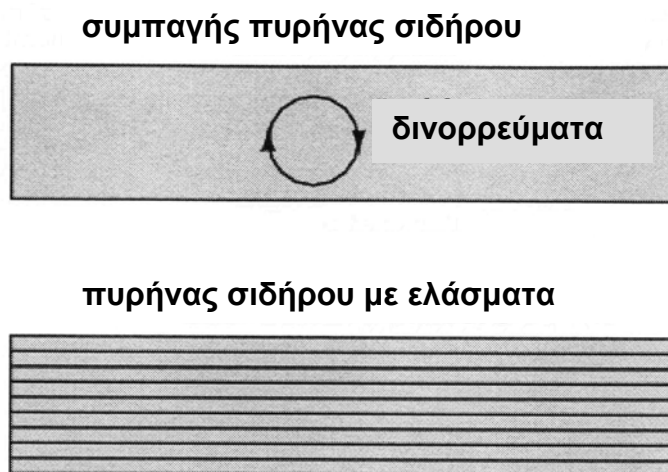
όπου:

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_{Δ}	:	Απώλειες χαλκού
P_Y	:	Απώλειες δινορρευμαίων
P_{cu}	:	Απώλειες υστέρησης
P_{1cu}	:	Απώλειες χαλκού στο πρωτεύον τύλιγμα
P_{2cu}	:	Απώλειες χαλκού στο δευτερεύον τύλιγμα
$Q_{απ}$:	Άεργες απώλειες
Q_{σ}	:	Απώλειες σκέδασης
$Q_{1\sigma}$:	Απώλειες σκέδασης στο πρωτεύον τύλιγμα
$Q_{2\sigma}$:	Απώλειες σκέδασης στο δευτερεύον τύλιγμα
Q_m	:	Απώλειες μαγνήτισης

Επειδή ο σίδηρος είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, καθώς επίσης και ένας εξαιρετικός «αγωγός» της μαγνητικής ροής, θα υπάρχουν επαγόμενα ρεύματα στο σίδηρο όπως υπάρχουν επαγόμενα ρεύματα στα δευτερεύοντα τυλίγματα από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτά τα επαγόμενα ρεύματα-όπως περιγράφονται από την υπόθεση καθετότητας του νόμου του Faraday-τείνουν να κυκλοφορήσουν μέσα από τη διατομή του πυρήνα κάθετα προς τα ελίγματα του πρωτεύοντος. Η περιστροφική τους κίνηση τους δίνει αυτό το ασυνήθιστο όνομα: όπως οι δίνες σε ένα ρέμα που περιστρέφονται αντί να κινούνται σε ευθύγραμμες τροχιές.

Ο σίδηρος είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, αλλά όχι τόσο όσο ο χαλκός ή το αλουμίνιο από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως τα τυλίγματα. Συνεπώς, αυτά 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. Αυτή είναι μια αιτία μείωσης της απόδοσης του μετασχηματιστή που είναι δύσκολο να εξαλειφθεί.

Η κύρια στρατηγική για τη μείωση αυτών των περιττών δινορρευσμάτων στους πυρήνες των μετασχηματιστών είναι η διαμόρφωση του σιδηρού πυρήνα σε ελάσματα, με κάθε έλασμα να καλύπτεται με μονωτικό υλικό έτσι ώστε αυτός να διαμερίζεται σε λεπτά τμήματα. Το αποτέλεσμα είναι ένα πολύ μικρό βάθος στον πυρήνα για την κυκλοφορία των δινορρευσμάτων:



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

Οι πυρήνες με ελάσματα, όπως αυτός που φαίνεται στο σχήμα 3.2, είναι καθιερωμένοι σε όλους σχεδόν τους μετασχηματιστές που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες. Οι απώλειες δινορρευμάτων αυξάνονται με τη συχνότητα, έτσι ώστε εκείνοι οι μετασχηματιστές οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν με ισχύ μεγαλύτερης συχνότητας (όπως τα 400 Hz, που χρησιμοποιούνται σε πολλές στρατιωτικές και αεροναυτικές εφαρμογές) να πρέπει να χρησιμοποιούν λεπτότερα στρώματα για να κρατούν τις απώλειες σε ένα ελάχιστο επίπεδο. Αυτό όμως έχει το ανεπιθύμητο αποτέλεσμα της αύξησης του κατασκευαστικού κόστους του μετασχηματιστή.

Μία άλλη, παρόμοια τεχνική για την ελαχιστοποίηση των απωλειών δινορρευμάτων η οποία είναι πιο αποτελεσματική σε υψηλής συχνότητας εφαρμογές, 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. Ακόμα ένα είδος «απωλειών πυρήνα» είναι εκείνο της μαγνητικής υστέρησης. Όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά τείνουν να διατηρήσουν κάποιο επίπεδο μαγνήτισης μετά από έκθεση σε κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η ροπή του να παραμένουν τα υλικά αυτά υπό μαγνήτιση αποκαλείται «υστέρηση», και απαιτείται κάποια επένδυση σε ενέργεια για να υπερνικηθεί η αντίθεση κατά την εκάστοτε αλλαγή πολικότητας του μαγνητικού πεδίου το οποίο παράγεται από τα τυλίγματα πρωτεύοντος. Αυτό το είδος απωλειών μπορεί να μειωθεί μέσα από μια σωστή επιλογή υλικού για τον πυρήνα, διαλέγοντας π.χ. ένα κράμα με χαμηλή υστέρηση, όπως αποδεικνύεται από μια «λεπτή» καμπύλη υστέρησης B/H, καθώς επίσης και από μια σχεδίαση η οποία θα επιτρέπει ένα ελάχιστο όριο ανοχής του πυρήνα στην πυκνότητα της μαγνητικής ροής (μεγάλη περιοχή διατομής).

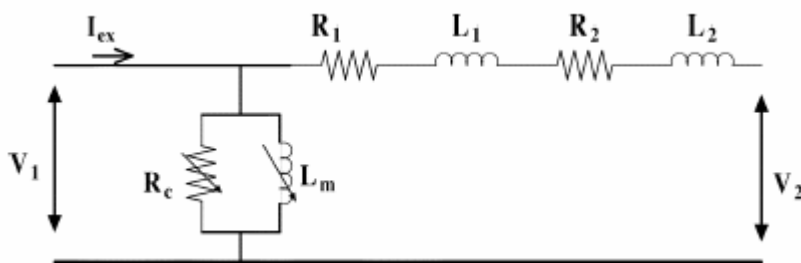
Οι απώλειες ενέργειας στους μετασχηματιστές έχουν την τάση να επιδεινώνονται αυξανόμενης της συχνότητας. Το επιδερμικό φαινόμενο μέσα στα τυλίγματα των αγωγών μειώνει τη διαθέσιμη επιφάνεια διατομής για τη ροή ηλεκτρονίων, έτσι που να αυξάνει την ενεργό αντίσταση με τη συχνότητα και να προκαλεί περισσότερες απώλειες ισχύος μέσω των αντιστάσεων. Οι μαγνητικές απώλειες πυρήνα αυξάνονται επίσης ραγδαία με τη συχνότητα και έχουμε σοβαρές επιπτώσεις από τα φαινόμενα της υστέρησης και των δινορρευμάτων. Για το λόγο αυτό, οι μετασχηματιστές μεγάλου μεγέθους σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν αποτελεσματικά σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων. Στα περισσότερα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπου η συχνότητα των γραμμών

μεταφοράς είναι πολύ σταθερή, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η μεγάλη συχνότητα δε μπορεί ποτέ να αποτελεί πρόβλημα. Ωστόσο αποτελεί πρόβλημα, με τη μορφή των αρμονικών που παράγονται από μη γραμμικά φορτία.

Όπως είναι γνωστό, οι μη ημιτονοειδείς κυματομορφές είναι ισοδύναμες με μια σειρά πολλαπλών ημιτονοειδών κυματομορφών με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες. Σε συστήματα ισχύος, αυτές οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, που σημαίνει ότι θα είναι πάντα υψηλότερες, ποτέ χαμηλότερες, από τη συχνότητα σχεδίασης του μετασχηματιστή, [3.1]. Όταν μάλιστα είναι πάρα πολύ υψηλές, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρή υπερθέρμανση. Οι μετασχηματιστές ισχύος μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να χειρίζονται συγκεκριμένα επίπεδα αρμονικών στα ενεργειακά συστήματα, και αυτή η ικανότητα μερικές φορές δηλώνεται με το ονομαστικό μέγεθος του «παράγοντα K ».

3.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ

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



Σχήμα 3.3: Κυκλωματικό μοντέλο μονοφασικού μετασχηματιστή υπό κενό φορτίο

Σε συνθήκες κενού φορτίου, μετρώνται οι μαγνητικές απώλειες πυρήνα που έχουν δύο συνιστώσες: τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες δινορρευσμάτων. 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, που 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 πέρα 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, [3.2, 3.3].

Μία περιοδική παροχή τάσης V_1 στο κύκλωμα που εικονίζεται στο σχ. 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 κλασικές 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 από υστέρηση

Όπως είναι γνωστό, όταν η πυκνότητα ροής σε κάποιο μέσο μεταβληθεί από μια τιμή B_1 σε μια άλλη τιμή B_2 , απορροφάται ενέργεια από το μέσο. Η απορροφούμενη ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

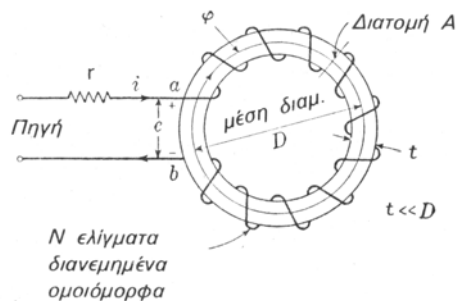
$$w = \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (3.1)$$

Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης αυτής είναι ανάλογο του εμβαδού που ορίζεται από την καμπύλη $B(H)$ του μέσου, τον άξονα των B και τις ευθείες που είναι παράλληλες στον

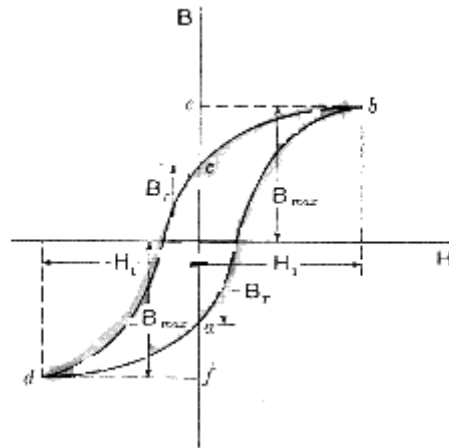
άξονα των H και παριστάνουν τις σταθερές τιμές B_1 και B_2 , αντίστοιχα. Το μέτρο του ολοκληρώματος εξαρτάται από τις τιμές B_1 , B_2 , και τη μορφή της καμπύλης. Εάν η πυκνότητα ροής μειωθεί από μια ορισμένη τιμή σε μικρότερη, το αλγεβρικό σημείο του w είναι αρνητικό και έχουμε απόδοση ενέργειας από το υλικό, [3.4].

Όταν το θεωρούμενο μέσο αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό, η καμπύλη μαγνήτισης μεταξύ δύο οποιωνδήποτε τιμών B_1 και B_2 οι οποίες αντιστοιχούν σε μειούμενες τιμές του H , είναι διαφορετική από την καμπύλη που αντιστοιχεί σε αυξανόμενες τιμές του. Αυτό είναι προφανές από το βρόχο υστέρησης του σχ. 3.5 του σιδηρομαγνητικού υλικού, ο οποίος αποτελείται από δύο κλάδους, έναν για αυξανόμενες τιμές του H , dab , και έναν άλλο για μειούμενες τιμές του, bcd . Ο βρόχος αυτός προκύπτει με κυκλική μαγνήτιση σιδηρομαγνητικού υλικού όπως π.χ. του δακτυλίου του σχ. 3.4. Λόγω της διαφοράς των καμπυλών των δύο κλάδων, προκύπτει ότι 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 ελαττωθεί από B_2 σε B_1 . Η διαφορά των δύο αυτών ενεργειών είναι το μέτρο της απώλειας υστέρησης. Με γραφικό υπολογισμό του ολοκληρώματος της παραπάνω εξίσωσης είναι δυνατός ο καθορισμός της απώλειας υστέρησης ανά κύκλο, λόγω της μαγνητικής υστέρησης.

Η γραφική μέθοδος δίνεται στον παρακάτω πίνακα για την περίπτωση της αποθηκευμένης ενέργειας στο σύστημα του δακτυλίου του σχ.3.4. Το πηνίο διέγερσης του δακτυλίου φέρει εναλλασσόμενο ρεύμα με τρόπο ώστε η ένταση του μαγνητικού πεδίου να αναστρέφεται κυκλικά μεταξύ των ορίων $+H_1$ και $-H_1$. Η συσχέτιση μεταξύ B και H φαίνεται στο βρόχο υστέρησης του σχ.3.5.



Σχήμα 3.4: Δακτυλιοειδές μαγνητικό κύκλωμα διεγερόμενο από πηνίο για την εξαγωγή ενεργειακών σχέσεων.



Σχήμα 3.5: Βρόχος υστέρησης

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

Πίνακας 3.1: Γραφική μέθοδος υπολογισμού αποθηκευμένης ενέργειας συστήματος δακτυλίου σχήματος 3.3.

Η καθαρή ενέργεια w , η οποία απορροφάται από το μαγνητικό πεδίο ανά μονάδα όγκου για έναν πλήρη κύκλο είναι

$$w_h = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = \text{εμβαδό (abcd)} \text{ του βρόχου υστέρησης} \quad (3.2)$$

Η ενέργεια αυτή χάνεται ως θερμότητα στο υλικό για κάθε κύκλο, και ονομάζεται απώλεια από υστέρηση. Η παρουσία της υστέρησης ασκεί σημαντική επίδραση στην απόδοση, την ανύψωση της θερμοκρασίας, και ως εκ τούτου στην ικανότητα πολλών ηλεκτρομαγνητικών συσκευών.

Αν και το εμβαδό του κλειστού βρόχου υστέρησης δείχνει πόση ενέργεια χάνεται στον πυρήνα ανά μονάδα όγκου και ανά κύκλο λόγω της υστέρησης, εντούτοις δεν αποκαλύπτει σε ποιο τμήμα του κύκλου λαμβάνει χώρα η απώλεια.

Η συνολική απώλεια από υστέρηση σε όγκο V (σε m^3) υλικού 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:

$$P_h = \eta V f B_m^n \quad (3.3)$$

Στην εξίσωση αυτή, η και n είναι σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό, και B_m η μέγιστη μαγνητική επαγωγή. Όταν ο κύκλος υστέρησης είναι μη συμμετρικός ή περιλαμβάνει μερικούς κύκλους, η εξίσωση δεν ισχύει.

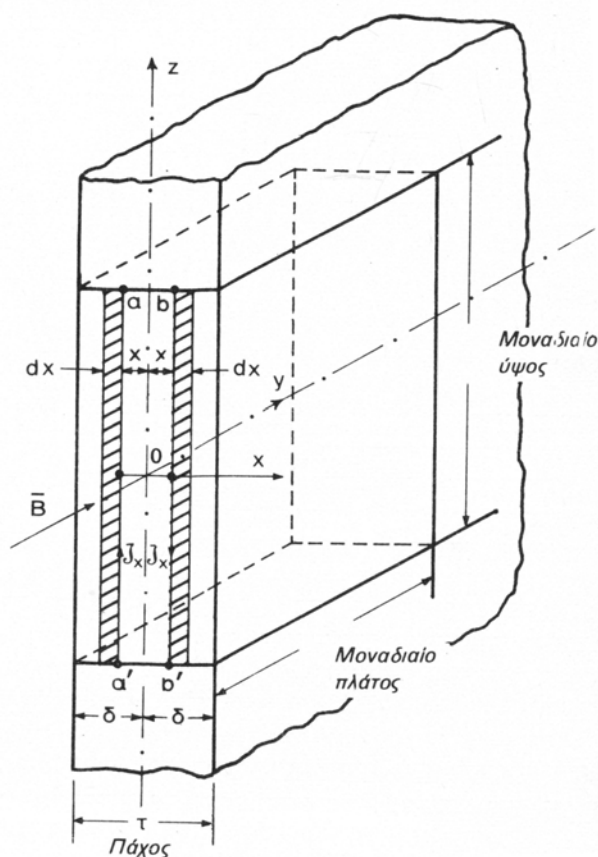
3.2.2 Απώλειες από δινορρεύματα

Όταν σε ένα μέσο η μαγνητική ροή μεταβάλλεται με το χρόνο, εμφανίζεται σε αυτό ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το γραμμικό ολοκλήρωμα του πεδίου αυτού E πάνω σε μια κλειστή διαδρομή η οποία περικλείει τη ροή δίνεται από το νόμο επαγωγής του Faraday:

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = -d/dt \int \vec{B} \cdot \vec{n} ds \quad (3.4)$$

όπου l είναι η κλειστή διαδρομή η οποία περιέχει την επιφάνεια επί της οποίας προσπίπτει η ροή Φ , δηλαδή $\int \vec{B} \cdot \vec{n} ds$, και \vec{n} το μοναδιαίο άνωσμα κάθετα προς την επιφάνεια αυτή. Εφόσον το μέσο είναι αγωγίμο, ένα ρεύμα εγκαθίσταται (σχ.3.6) γύρω από τη διαδρομή εξαιτίας της ηλεκτρεγερτικής δύναμης e η οποία προέρχεται από το γραμμικό ολοκλήρωμα του ηλεκτρικού πεδίου. Τέτοια ρεύματα ονομάζονται δινορρεύματα, και η παρουσία τους έχει ως αποτέλεσμα απώλειες Joule λόγω της κυκλοφορίας ρευμάτων εκτός του υλικού, ή αλλιώς απώλειες από δινορρεύματα. Η

ενέργεια απορροφάται από το κύκλωμα το οποίο προκαλεί το πεδίο και μετατρέπεται σε θερμότητα στο μέσο.



Σχήμα 3.6: Μοναδιαίο στοιχείο ελάσματος για υπολογισμό απώλειας από δινορρεύματα.

Επειδή η πυκνότητα ροής σε σιδηρομαγνητικά υλικά είναι συνήθως σχετικά μεγάλη, και η ειδική αντίσταση των υλικών δεν είναι πολύ υψηλή, οι επαγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις και συνεπώς τα δινορρεύματα και η απώλεια από αυτά μπορεί να είναι 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 καθορισμό της απώλειας από δινορρεύματα σε συνθήκες όμοιες προς αυτές που υφίστανται σε σιδηρό πυρήνα, θεωρούμε λεπτή μεταλλική πλάκα (σχ.3.6), η οποία διαπερνάται από εναλλασσόμενη ροή Φ . Η ΗΕΔ e η επαγόμενη στην οριακή γραμμή $aa'b'ba$ μιας επιφάνειας μέσω της οποίας η ροή μεταβάλλεται δίνεται από τη σχέση:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (3.5)$$

Η τάση αυτή, όταν επιδρά στο κύκλωμα αα'β'βα, προκαλεί ρεύμα το οποίο κυκλοφορεί γύρω από την οριακή γραμμή και δημιουργεί μαγνητεγερτική δύναμη με τέτοια φορά ώστε να αντισταθεί στη μεταβολή της ροής ϕ . Η διανομή της ροής στο θεωρούμενο εμβαδό είναι τέτοια ώστε μικρότερη πυκνότητα ροής εμφανίζεται στο κέντρο της πλάκας παρά κοντά στην περιβάλλουσα επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική ροή τείνει να συγκεντρωθεί κοντά στην περιβάλλουσα επιφάνεια της πλάκας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επιδερμικό. Παρόμοιο φαινόμενο λαμβάνει χώρα σε ηλεκτρικό αγωγό ο οποίος φέρει μεταβαλλόμενο ρεύμα, ακόμα και αν είναι κατασκευασμένος από μη μαγνητικό υλικό, έχοντας δηλαδή σχετική μαγνητική διαπερατότητα τη μονάδα. 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. Επειδή όμως μια τέτοια ανάλυση είναι κάπως περίπλοκη, συνήθως αγνοείται το φαινόμενο αυτό, και τα αποτελέσματα που προκύπτουν έχουν μια σχετική ακρίβεια για πολλές εφαρμογές, ειδικά σε συσκευές οι οποίες διαθέτουν πυρήνες με ελάσματα.

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 που θεωρήσαμε στο παραπάνω σχήμα, η μέση τιμή απώλειας ισχύος από δινορρεύματα είναι:

$$P_e = \frac{\pi^2 f^2 \tau^2 B_m^2 V}{6\rho} \quad (3.6)$$

Το V εκφράζεται σε m^3 , B_m είναι η μέγιστη τιμή της πυκνότητας ροής σε weber/ m^2 , f η συχνότητα μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής σε Hz, ρ η ειδική αντίσταση του υλικού σε ohm·m, τ το πάχος του στοιχείου σε m και η τιμή P_e σε watts. Η απώλεια για ορισμένο υλικό γράφεται και ως εξής:

$$P_e = K_e f^2 \tau^2 B_m^2 V \quad (3.7)$$

όπου, προφανώς

$$K_e = \frac{\pi^2}{6\rho} \quad (3.8)$$

Ωστόσο, είναι προτιμότερος ο καθορισμός του K_e από μετρήσεις σε δείγμα του υλικού, έτσι ώστε να αρθούν αποκλίσεις από τις παραδοχές που ισχύουν λόγω του πεπερασμένου του όγκου του υλικού και 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 σιδηρούς πυρήνες οι οποίοι υπόκεινται σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο είναι το άθροισμα των απωλειών από υστέρηση και δινορρεύματα. Εάν το υλικό του πυρήνα είναι τέτοιο ώστε η απώλεια υστέρησης να ακολουθεί την εμπειρική σχέση (3.3) και η μέση τιμή της πυκνότητας ροής είναι σταθερή σε ολόκληρο τον όγκο V του πυρήνα, η συνολική απώλεια P_π στον όγκο αυτό είναι:

$$P_\pi = \eta V f B_m^n + \frac{\pi^2 f^2 \tau^2 B_m^2 V}{6\rho} \quad (3.9)$$

Οι συσκευές στις οποίες τα σιδηρομαγνητικά υλικά φέρουν εναλλασσόμενες ροές, σχεδόν πάντοτε διαθέτουν ηλεκτρικά κυκλώματα τα οποία εμπλέκουν τα αντίστοιχα μαγνητικά. Μετασχηματιστές και αντιδραστήρες σιδηρού πυρήνα π.χ. έχουν σιδηρομαγνητικούς πυρήνες με ελάσματα ή από σκόνη, γύρω από τους οποίους τυλίγονται τα ελίσματα ενός ή περισσότερων πηνίων. Οι απώλειες πυρήνα σχετίζονται με την ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται σε ένα τέτοιο πηνίο από τη μεταβαλλόμενη ροή. Η μέγιστη τιμή της ροής συναρτήσει της ενδεικνύμενης τιμής της επαγόμενης ΗΕΔ E σε πηνίο από N ελίσματα είναι:

$$\Phi_m = \frac{E}{4.44 f N} \quad (3.10)$$

όταν η ροή και συνεπώς η ΗΕΔ μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο. Εάν η πυκνότητα ροής στη διατομή του πυρήνα εμβαδού A είναι ομοιόμορφη, τότε ισχύει:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{A} = \frac{E}{4.44 f N A} \quad (3.11)$$

Για δεδομένο μετασχηματιστή ή επαγωγικό αντιδραστήρα, ο αριθμός ελιγμάτων και η διατομή του πυρήνα είναι σταθερά από κατασκευής, και η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$B_m = K \frac{E}{f} \quad (3.12)$$

όπου, προφανώς, η σταθερά $K = \frac{1}{4.44 N A}$. Τελικά προκύπτει ότι η συνολική απώλεια ισχύος ανά μονάδα όγκου είναι:

$$p_\pi = \eta f \left(\frac{KE}{f} \right)^n + \frac{\pi^2 f^2 \tau^2 K^2 E^2}{6 \rho f^2} \quad (3.13)$$

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, η απώλεια υστέρησης εκφραζόμενη συναρτήσει της ΗΕΔ δίνεται ορθά από τον πρώτο όρο του δευτέρου μέλους της εξίσωσης, μόνο για την περίπτωση ημιτονοειδούς κυματομορφής.

Αντίθετα, ο δεύτερος όρος της απώλειας πυρήνα της εξίσωσης (3.13) παρέχει την ορθή απώλεια από δινορρεύματα ανεξάρτητα από την κυματομορφή, 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, η κάθε μια από αυτές επάγει δινορρεύματα στον πυρήνα. Η απώλεια δινορρευμάτων που παράγεται από κάθε αρμονική συνιστώσα στη ροή είναι ανάλογη του τετραγώνου της ίδιας αρμονικής συνιστώσας της ηλεκτρεγερτικής δύναμης 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, η συνολική απώλεια από δινορρεύματα ανά μονάδα όγκου προκύπτει, σύμφωνα με το δεύτερο όρο της ανωτέρω εξίσωσης:

$$p_e = K_1(E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots) \quad (3.14)$$

όπου K_1 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. Επίσης, η απώλεια δινορρευμάτων όταν εκφράζεται ως συνάρτηση του E είναι ανεξάρτητη της συχνότητας.

Μεταβολές στη θερμοκρασία όπως απαντώνται στην πράξη έχουν αμελητέα επίδραση στις απώλειες από υστέρηση. Οι απώλειες δινορρευμάτων ελαττώνονται κάπως με αύξηση της θερμοκρασίας. Για δοσμένη μεταβολή της ροής, οι απώλειες αυτού του είδους είναι αντιστρόφως ανάλογες της ειδικής αντίστασης του υλικού του πυρήνα. Η ειδική αντίσταση αυξάνει με τη θερμοκρασία.

Στους πυρήνες δοθέντος σχηματισμού και δεδομένων συνθηκών κάτω από τις οποίες αυτοί χρησιμοποιούνται, η απώλεια υστέρησης μπορεί να μειωθεί με την εισαγωγή υλικού πυρήνα το οποίο να έχει βρόχο υστέρησης μικρού εμβαδού.

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.1, Η απώλεια από δινορρεύματα μπορεί να ελαττωθεί με τη χρήση λεπτών ελασμάτων υλικού το οποίο έχει υψηλή ειδική αντίσταση και μόνωση μεταξύ των ελασμάτων. Σκόνη του κράματος Permaloy (Ni, Cr) το οποίο έχει μικρό βρόχο υστέρησης, αναμειγνύεται 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 την 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. Εάν η μείωση του συντελεστή σώρευσης είναι υπολογίσιμη σε πυρήνες μετασχηματιστών, ο συντελεστής σύζευξης, του οποίου η τιμή πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη στη μονάδα, μπορεί να ελαττωθεί μέχρι κάποιο ανεπιθύμητο όριο.

Στις βιομηχανικές συχνότητες, οι απώλειες από δινορρεύματα μπορούν να μειωθούν εύκολα σε αρκετά χαμηλή τιμή με τη χρήση λεπτών ελασμάτων υψηλής ειδικής

αντίστασης, ενώ η ελάττωση της απώλειας υστέρησης είναι δυσκολότερη, επειδή απαιτείται η εξεύρεση υλικού με μικρό βρόχο υστέρησης. Για αυτό συνήθως η απώλεια από υστέρηση είναι περίπου τα $\frac{2}{3}$ έως $\frac{3}{4}$ της συνολικής απώλειας πυρήνα στη συχνότητα των 50 Hz.

3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Σ. Ν. Μανιάς, “*Ηλεκτρονικά Ισχύος*”. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1988.
- [3.2] 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.
- [3.3] 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.
- [3.4] Ι. Α. Τεγόπουλος, “*Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β: Μόνιμη Κατάσταση*”. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσονται εφαρμογές υπολογισμών απωλειών πυρήνα σε μετασχηματιστές ισχύος. Αρχικά παρατίθεται υπολογισμός των απωλειών με τη διδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε τρεις μετασχηματιστές διαφορετικής ισχύος και τα αποτελέσματα της συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές του κατασκευαστή. Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος συστηματικής μελέτης των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού με τη χρήση του μοντέλου υστέρησης Preisach-Neel. Το μοντέλο εφαρμόζεται στην ανάλυση των ιδιοτήτων ενός τύπου μαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών σιδήρου.

4.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ Μ/Σ ΙΣΧΥΟΣ

4.1.1 Διδιάστατη ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται συνοπτικά ο τρόπος επίλυσης μαγνητοστατικών προβλημάτων, στην οποία ανήκει και η ανάλυση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, [4.1, 4.2] .

Μαγνητοστατικά είναι τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι χρονικά αμετάβλητο. Σ' αυτήν την περίπτωση, η ένταση (\vec{H}) και η πυκνότητα (\vec{B}) του μαγνητικού πεδίου (ή μαγνητική επαγωγή) ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \text{ (διαφορική μορφή νόμου Ampere)} \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ (διαφορική μορφή νόμου Gauss)} \quad (4.2)$$

ενώ εν γένει συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση¹ :

¹ Εκτός από την περίπτωση μονίμων μαγνητών

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.3)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, η οποία συνδέεται με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού μ_0 με τη σχέση:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (4.4)$$

Αν το μαγνητικό υλικό που εξετάζεται είναι μη γραμμικό, η μαγνητική διαπερατότητα είναι συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής και δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (4.5)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (4.1) και (4.2) στις δύο διαστάσεις γίνεται με χρήση του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού \vec{A} , το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4.6)$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης, η (4.1) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (4.7)$$

Για γραμμικά υλικά, η παραπάνω σχέση καταλήγει στη σχέση:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{J} \Rightarrow \nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (4.8)$$

Έτσι, ο υπολογισμός του διανυσματικού δυναμικού \vec{A} 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 μερικές διαφορικές εξισώσεις (4.7) ή (4.8) 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 δινορρευσμάτων.

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, [4.3, 4.4].

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 \vec{B} , χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία (τρίγωνα στο επίπεδο, τετράεδρα στο χώρο κ.λ.π.). Για τη διαδικασία διακριτοποίησης του χώρου, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που δημιουργούν αυτόματα το πλέγμα. Η πλεγματοποίηση ξεκινά συνήθως από τα σύνορα του χώρου και λαμβάνει υπόψη την απαιτούμενη ακρίβεια στις διάφορες περιοχές του πλέγματος. Ο διαχωρισμός της περιοχής του πλέγματος σε ολόένα 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.

4.1.2 Διδιάστατη ανάλυση με τη χρήση του προγράμματος FEMM

4.1.2.1 Δομή προγράμματος FEMM

Το πρόγραμμα Femm αποτελείται από ένα σύνολο υποπρογραμμάτων με τα οποία επιλύονται μαγνητοστατικά προβλήματα. Τα υποπρογράμματα αυτά επιλύουν προβλήματα αξονικής συμμετρίας και είναι τα εξής, [4.5]:

1. Προεπεξεργασία (preprocessing): Πρόκειται για πρόγραμμα τύπου CAD το οποίο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση της γεωμετρίας του υπό μελέτη προβλήματος καθώς και για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των υλικών και των οριακών συνθηκών.
2. Επίλυση (Solution): Πρόκειται για πρόγραμμα το οποίο λαμβάνει ένα σύνολο δεδομένων τα οποία περιγράφουν το πρόβλημα και επιλύει τις αντίστοιχες εξισώσεις Maxwell για τον καθορισμό του μαγνητικού πεδίου στο χώρο που εξετάζεται.
3. Μετεπεξεργασία (Postprocessing): Με το πρόγραμμα αυτό επιτυγχάνεται τόσο η απεικόνιση του μαγνητικού πεδίου όσο και ο υπολογισμός της μαγνητικής επαγωγής σε διάφορα τμήματα της γεωμετρίας που εξετάζεται.

Το Femm περιλαμβάνει ξεχωριστό υποπρόγραμμα τριγωνοποίησης του πεδίου ορισμού του προβλήματος (Πλεγματοποιητής-triangle.exe). Με το πρόγραμμα αυτό επιτυγχάνεται η κατάτμηση του πεδίου ορισμού σε πολύ μικρά τριγωνικά στοιχεία, διαδικασία η οποία, όπως προαναφέρθηκε, είναι καθοριστική σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Άλλο πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται για την απεικόνιση γραφικών παραστάσεων οι οποίες προκύπτουν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης είναι το λεγόμενο Πρόγραμμα απεικόνισης (femmplot.exe).

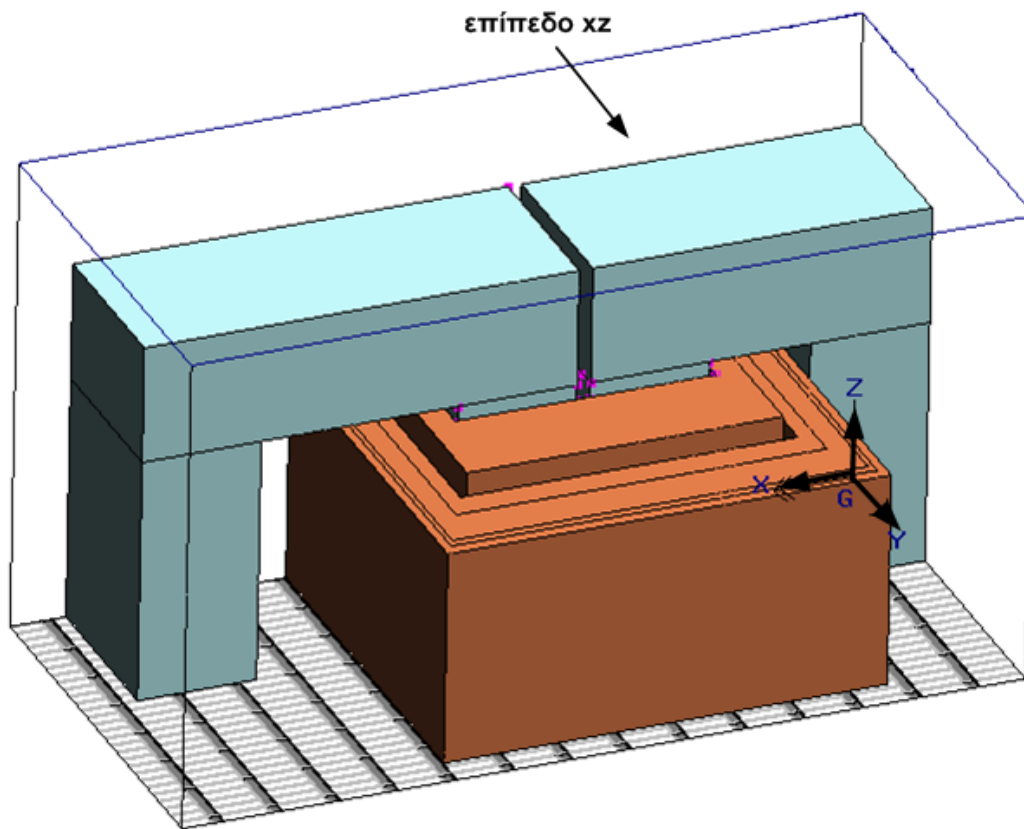
4.1.3 Μοντελοποίηση μετασχηματιστή με τη διδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

4.1.3.1 Γεωμετρική διαμόρφωση μοντέλου

Το διδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε από το επίπεδο xz του τριδιάστατου μοντέλου του σχήματος 4.1 το οποίο αναπαριστά τη γεωμετρία των πραγματικών τριφασικών μετασχηματιστών.

Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει τα τυλίγματα χαμηλής και υψηλής τάσης μίας φάσης καθώς και το μικρό και μεγάλο πυρήνα που τα περιβάλλει. Λόγω των συμμετριών του προβλήματος, έχει ληφθεί υπόψη μόνο το ένα τέταρτο της γεωμετρίας. Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι υπάρχει ασυμμετρία λόγω των ακροδεκτών στη μία πλευρά της υψηλής τάσης, η οποία δε λαμβάνεται υπόψη για τη μείωση του πεδίου ορισμού του εξεταζόμενου προβλήματος. Η χρήση αυτού του μοντέλου έναντι του συνολικού τριφασικού μετασχηματιστή έγινε για δύο λόγους, [4.6]:

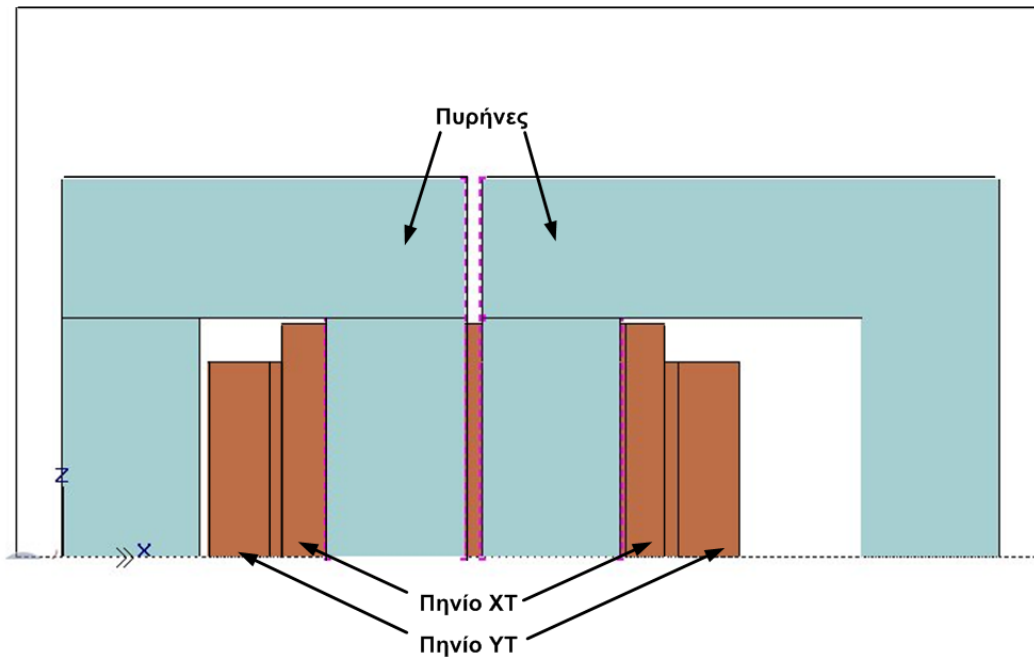
1. Το μικρότερο γεωμετρικό μέγεθος του μοντέλου επιτρέπει την κατασκευή πυκνότερου πλέγματος χωρίς μεγάλη επιβάρυνση στο χρόνο υπολογισμού (δεδομένου ότι η ακριβής αναπαράσταση του πεδίου απαιτεί μεγάλη ακρίβεια υπολογισμών, η οποία συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα του πλέγματος και κατ' επέκταση με το χρόνο επίλυσης του μαγνητοστατικού προβλήματος)
2. Με την αναπαράσταση της μίας μόνο φάσης δε μειώνεται σημαντικά η ακρίβεια στον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος.



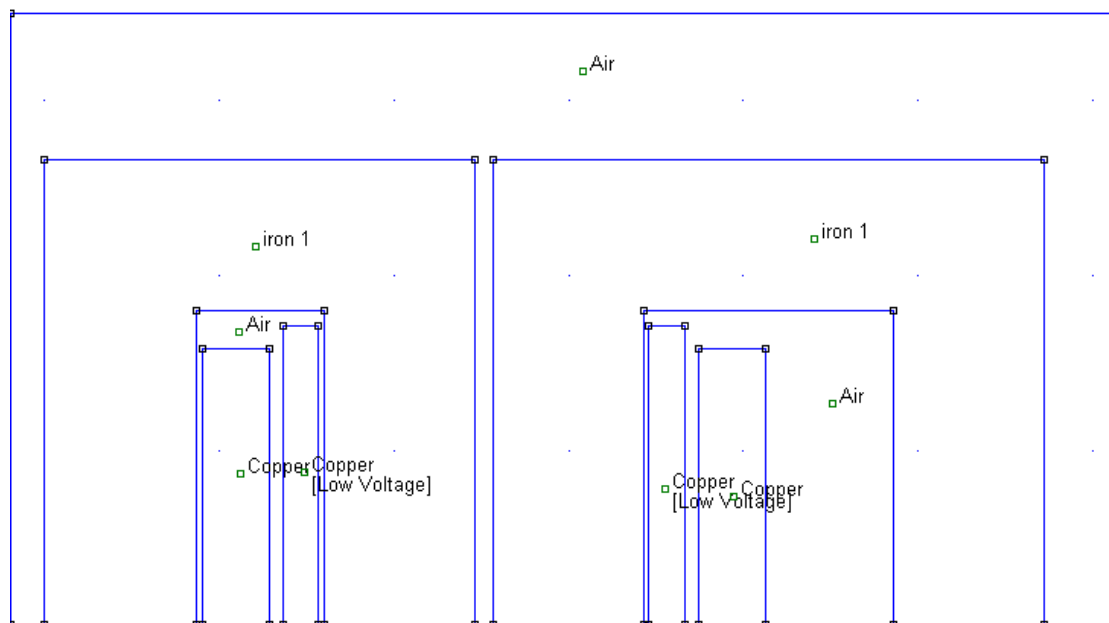
Σχήμα 4.1: Προοπτική όψη της μίας φάσης του τριφασικού μετασχηματιστή που χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση του γεωμετρικού μοντέλου.

Η γεωμετρία του μοντέλου περιβάλλεται από κουτί αέρα, οι διαστάσεις του οποίου είναι ίδιες με τις διαστάσεις του κελύφους του μετασχηματιστή, περιορίζοντας έτσι τον υπολογισμό του πεδίου σε αυτόν το χώρο. Στις όψεις του κουτιού αέρα έχουν επιβληθεί οριακές συνθήκες κατάλληλες για την αναπαράσταση του μαγνητοστατικού προβλήματος του μετασχηματιστή.

Στο σχήμα 4.2 δίνεται η γεωμετρία του διδιάστατου μοντέλου του μετασχηματιστή, ενώ στο σχήμα 4.3 φαίνεται το μοντέλο FEMM το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίησή του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 4.2: Γεωμετρία διδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 4.3: Μοντέλο FEMM τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα.

Στο μοντέλο του σχήματος 4.3 αναγράφονται τα υλικά κάθε περιοχής. Στις τρεις εξωτερικές γραμμές της γεωμετρίας (δηλ. στα σύνορα δεξιά, αριστερά και πάνω από

το ενεργό μέρος) επιβάλλεται οριακή συνθήκη Dirichlet ($A=0$), ενώ στη γραμμή συμμετρίας του μοντέλου ($z=0$) δεν επιβάλλεται καμία οριακή συνθήκη, γεγονός το οποίο, στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ισοδυναμεί με την επιβολή της οριακής συνθήκης Neumann ($\frac{\partial A}{\partial n}=0$).

4.1.3.2 Προσομοίωση δοκιμής ανοιχτοκύκλωσης

Η δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης πραγματοποιείται με εφαρμογή ονομαστικής τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα (τύλιγμα χαμηλής τάσης) ενώ το πρωτεύον τύλιγμα (τύλιγμα υψηλής τάσης) ανοιχτοκυκλώνεται. Υπό αυτές τις συνθήκες το τύλιγμα χαμηλής τάσης διαρρέεται από το ρεύμα μαγνήτισης, ενώ το τύλιγμα υψηλής τάσης δε διαρρέεται από ρεύμα. Έτσι, για τη μελέτη του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή υπό συνθήκες ανοιχτοκυκλώματος, θεωρείται ότι τα αμπερελίγματα του τυλίγματος χαμηλής τάσης λαμβάνονται ίσα με τον αριθμό των ελιγμάτων του πηνίου πολλαπλασιασμένο με το ρεύμα μαγνήτισης. Το ρεύμα μαγνήτισης λαμβάνεται ίσο με το ρεύμα το οποίο έχει μετρηθεί από τον κατασκευαστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης του εκάστοτε εξεταζόμενου μετασχηματιστή.

4.1.3.3 Υπολογισμός απωλειών πυρήνα

Ο υπολογισμός των απωλειών πυρήνα γίνεται με τη χρήση των τιμών της μαγνητικής επαγωγής του πυρήνα οι οποίες υπολογίζονται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής B σε κάθε τρίγωνο του πλέγματος (όταν χρησιμοποιούνται τριγωνικά στοιχεία πρώτης τάξης η τιμή του B είναι σταθερή εντός του στοιχείου) λαμβάνονται από το πρόγραμμα με τη μορφή αρχείου ASCII. Στη συνέχεια, γίνεται προσπέλαση του αρχείου των υλικών των τριγώνων (το οποίο είναι επίσης αρχείο ASCII στο οποίο σε κάθε τριγωνικό στοιχείο αντιστοιχεί αριθμός ο οποίος δηλώνει το υλικό του) και, εφόσον το εξεταζόμενο τριγωνικό στοιχείο ανήκει στον πυρήνα, η αντίστοιχη τιμή μαγνητικής επαγωγής του πολλαπλασιάζεται με την αντίστοιχη τιμή ειδικών απωλειών (η οποία λαμβάνεται από την καμπύλη ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα). Το γινόμενο πολλαπλασιάζεται με το εμβαδό του τριγώνου και με το πάχος του πυρήνα (δηλαδή με τον ισοδύναμο στοιχειώδη όγκο του εξεταζόμενου στοιχείου), για να δώσει τη στοιχειώδη απώλεια στο στοιχείο. Το άθροισμα των απωλειών όλων των στοιχείων του πλέγματος που αντιστοιχούν στον πυρήνα δίνει το $\frac{1}{4}$ των συνολικών απωλειών πυρήνα (δεδομένου ότι, σύμφωνα με το σχήμα 4.3 μοντελοποιείται το $\frac{1}{4}$ της πραγματικής γεωμετρίας του μετασχηματιστή). Έτσι, οι συνολικές απώλειες πυρήνα υπολογίζονται με τετραπλασιασμό του παραπάνω αθροίσματος.

Οι υπολογισμοί που περιγράφηκαν παραπάνω δε γίνονται από το ίδιο το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, για τη διεξαγωγή τους ήταν αναγκαία η υλοποίηση κάποιων λειτουργιών μετεπεξεργασίας, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- την εξαγωγή των τιμών του B σε κάθε τρίγωνο από το πρόγραμμα, με τη χρήση κατάλληλων εντολών (scripts σε γλώσσα υποστηριζόμενη από το FEMM),
- τον υπολογισμό των στοιχειωδών απωλειών των στοιχείων και την άθροισή τους για να προκύψουν οι συνολικές απώλειες πυρήνα. Η διαδικασία αυτή έγινε σε κώδικα Visual Basic, με τη χρήση κατάλληλων εντολών και φόρμας εισόδου στην οποία δίνεται η καμπύλη ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα του εξεταζόμενου μετασχηματιστή.

4.1.4 Διδιάστατη πεδιακή ανάλυση μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών που μελετήθηκαν με τη χρήση του μοντέλου που περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.1.3. Για κάθε περίπτωση μετασχηματιστή παρατίθενται τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του μαγνητικού του πεδίου και τα αποτελέσματά της ανάλυσης. Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα αυτά υπολογίζονται οι απώλειες πυρήνα του μετασχηματιστή, οι οποίες και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές.

4.1.4.1 Μετασχηματιστής ισχύος 1000 kVA

♦ Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική ισχύς $S_{nom}=1000 \text{ kVA}$
- Τάση τυλίγματος υψηλής (πρωτεύον) $V_{1nom}=15-20 \text{ kV}$
- Τάση τυλίγματος χαμηλής (δευτερεύον) $V_{2nom}=0.4 \text{ kV}$
- Συνδεσμολογία τυλιγμάτων : **Dyn11** (τρίγωνο - αστέρας)
- Λόγος τάσεως/σπείρα $=16.49621 \text{ V/turn}$
- Σπείρες πρωτεύοντος $N_1=1212$ (20 kV)
- Σπείρες δευτερεύοντος $N_2=14$
- Αριθμός ενδιάμεσων λήψεων (taps) : **5**
- Τάση βραχυκύκλωσης $U_k=6\%$

Από τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν τα εξής:

- Ονομαστική φασική τάση του δευτερεύοντος: $V_{LV} = V_{2nom}^{phase} = \frac{V_{2nom}}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ V}.$

- Ονομαστικό φασικό ρεύμα πρωτεύοντος: $I_{HV} = I_{1nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{1nom}} = 16.67 \text{ A}$

- Ονομαστικό φασικό ρεύμα δευτερεύοντος: $I_{LV} = I_{2nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{2nom}^{phase}} = 1443.4 \text{ A}.$

♦ *Γεωμετρικά χαρακτηριστικά*

Ο Πίνακας 4.1 περιλαμβάνει τις διαστάσεις των πυρήνων του μετασχηματιστή, κατ'αντιστοιχία με το σχήμα 2.16 του Κεφαλαίου 2.

Μέγεθος	Μήκος (mm)
Eu	86.6
A1	245.2
A2	317.2
F1	72
F2	144
G	360
B	533.2
K	10
D	254
D1	127
D2	127

Πίνακας 4.1: Διαστάσεις πυρήνων μετασχηματιστή 1000 kVA (σύμφωνα με το σχήμα 2.16 του Κεφαλαίου 2).

Για την κατασκευή του τυλίγματος της υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό με δύο διαφορετικές διαμέτρους 2.75 mm και 2.34 mm αντίστοιχα. Συνδεσμολογώντας κατάλληλα τα πηνία μεταξύ τους επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση λειτουργίας (20 kV ή 15 kV), καθώς και οι ενδιάμεσες λήψεις τους. Έτσι, λαμβάνονται ονομαστικές τάσεις λειτουργίας πρωτεύοντος από 14kV έως 16kV και από 19 έως 21kV. Η κατασκευή του τυλίγματος της χαμηλής τάσης είναι απλούστερη καθώς αποτελείται από 14 στρώσεις φύλλου χαλκού διατομής 311.22 mm², οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες.

Μεταξύ του τυλίγματος της υψηλής τάσης και του πυρήνα, μεταξύ των στρώσεων των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης, μεταξύ του τυλίγματος της χαμηλής τάσης και του πυρήνα, καθώς και μεταξύ των τυλιγμάτων της υψηλής και χαμηλής τάσης υπάρχει στρώμα μονωτικού χαρτιού.

Οι διαστάσεις των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης καθώς και των μεταξύ τους διακένων έχουν ως εξής:

- Διάκενο μεταξύ πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων: $\ell_{HV-HV}=3.6$ mm
- Πάχος YT: $BLD_{HV}=38.5$ mm
- Διάκενο μεταξύ YT και XT: $\ell_{HV-LV}=7.8$ mm
- Πάχος XT: $BLD_{LV}=20.3$ mm
- Διάκενο μεταξύ XT και πυρήνα: $\ell_{LV-C}=1.5$ mm

♦ *Καμπύλη μαγνήτισης και ειδικών απωλειών*

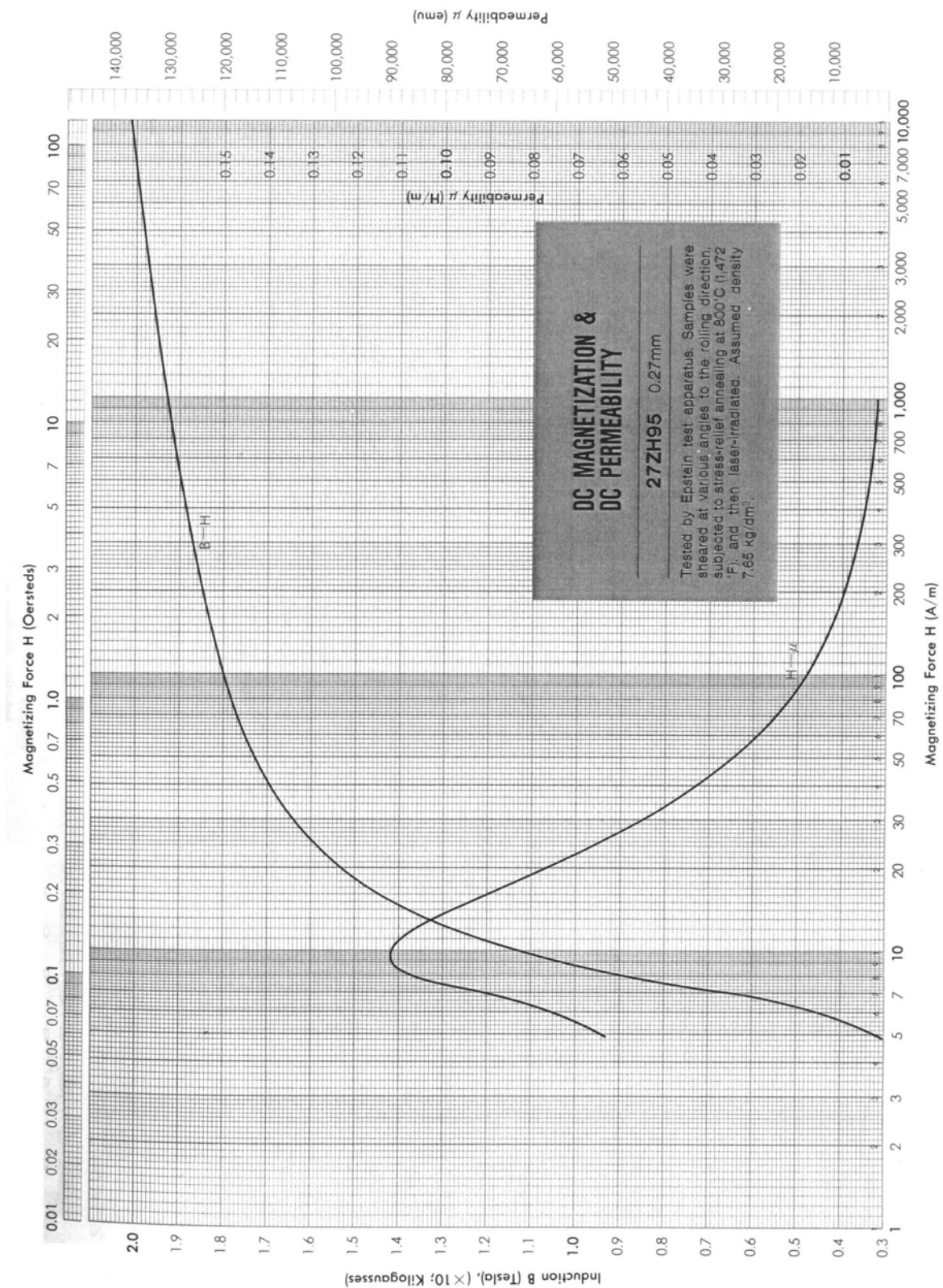
Ο πυρήνας του μετασχηματιστή 1000 kVA είναι κατασκευασμένος από μαγνητική λαμαρίνα 27ZH95 (πάχος ελασμάτων 0.27 mm). Στα σχήματα 4.4 και 4.5 παρατίθενται οι καμπύλες μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή (πριν τη θερμική και μηχανική κατεργασία του υλικού για τη διαμόρφωση των πυρήνων).

♦ *Διαστάσεις μοντέλου FEMM*

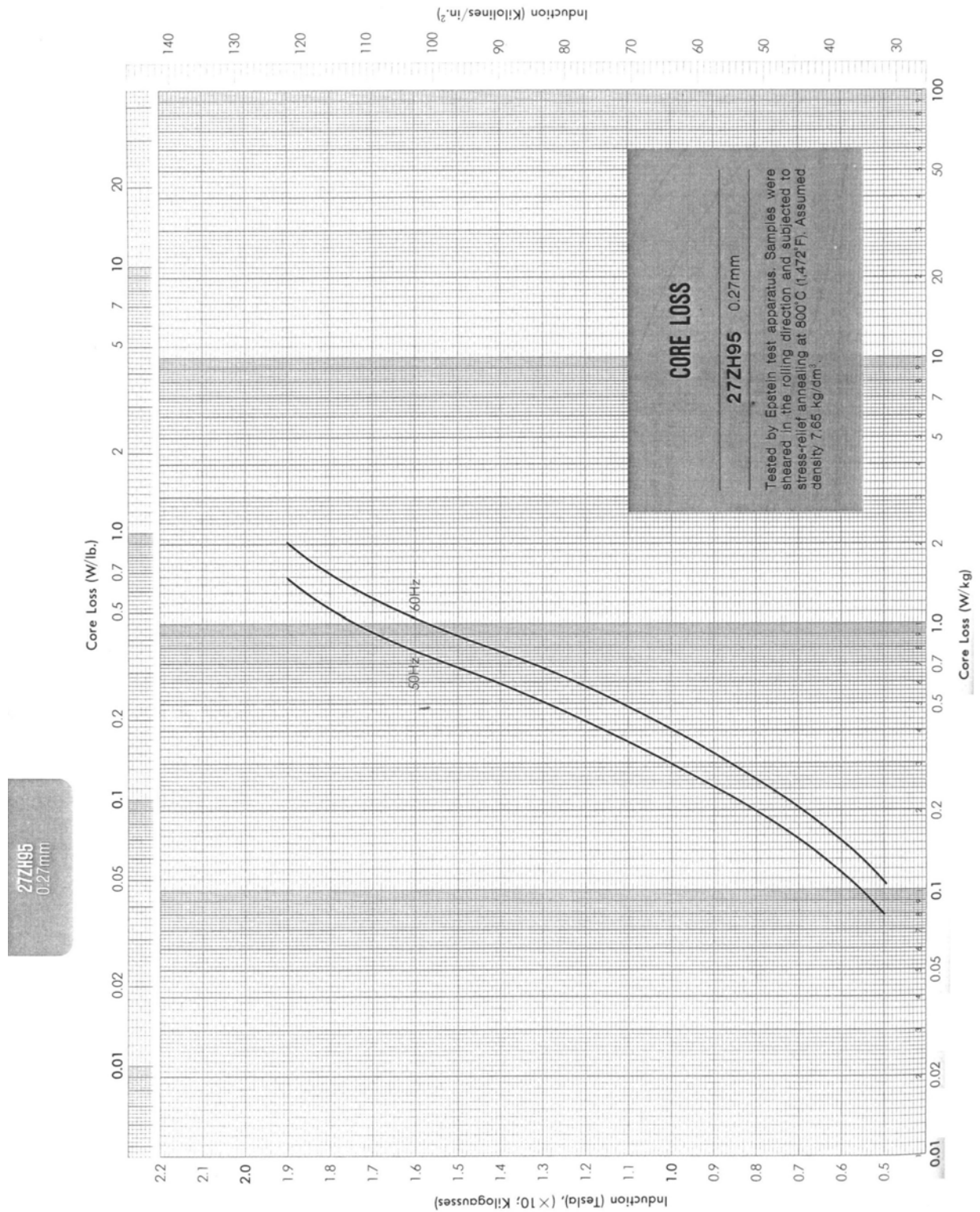
Το σχήμα 4.6 περιλαμβάνει τις διαστάσεις του μοντέλου FEMM που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.

♦ *Διδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων*

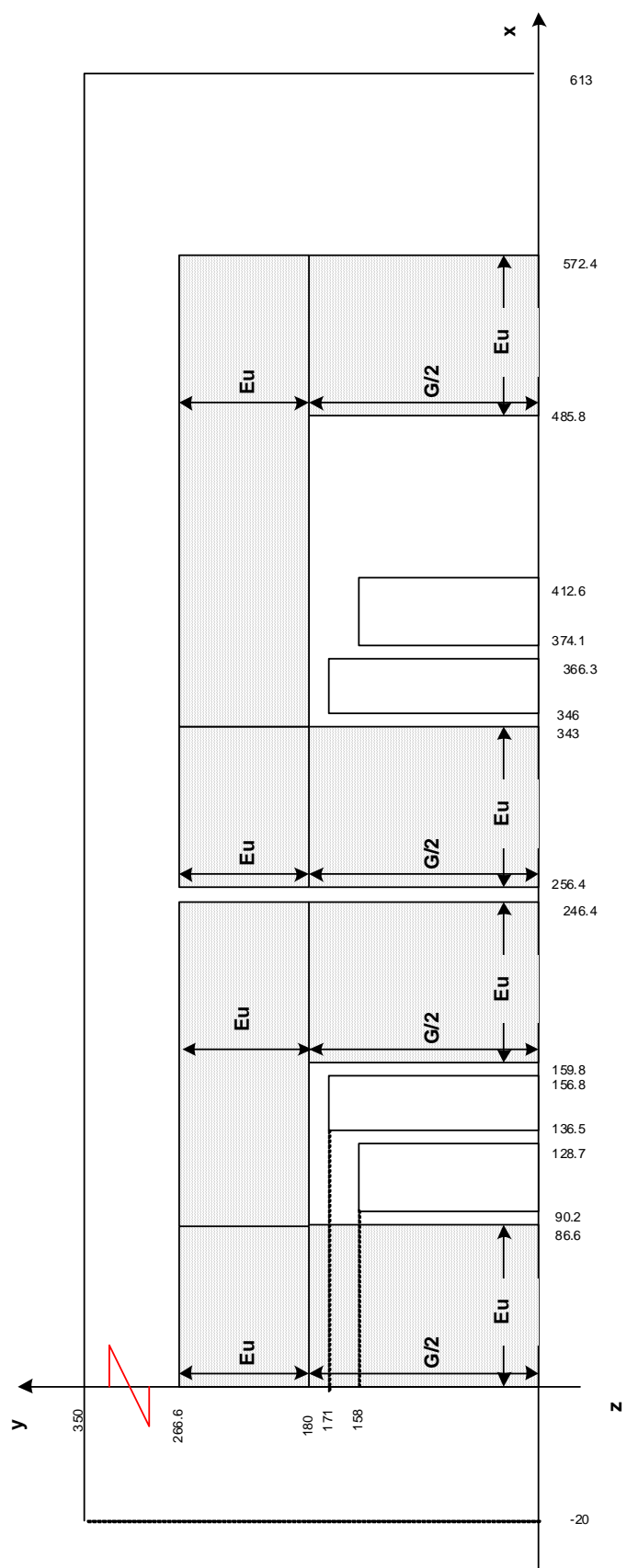
Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με τριγωνικά στοιχεία πρώτης τάξης. Κατασκευάστηκαν πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας για να διαπιστωθεί η επίδραση του αριθμού των κόμβων στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 4.7 εικονίζεται ένα πλέγμα μικρής πυκνότητας, αποτελούμενο από 4818 κόμβους, ενώ στο σχήμα 4.8 ένα πολύ πυκνότερο πλέγμα, με 54179 κόμβους.



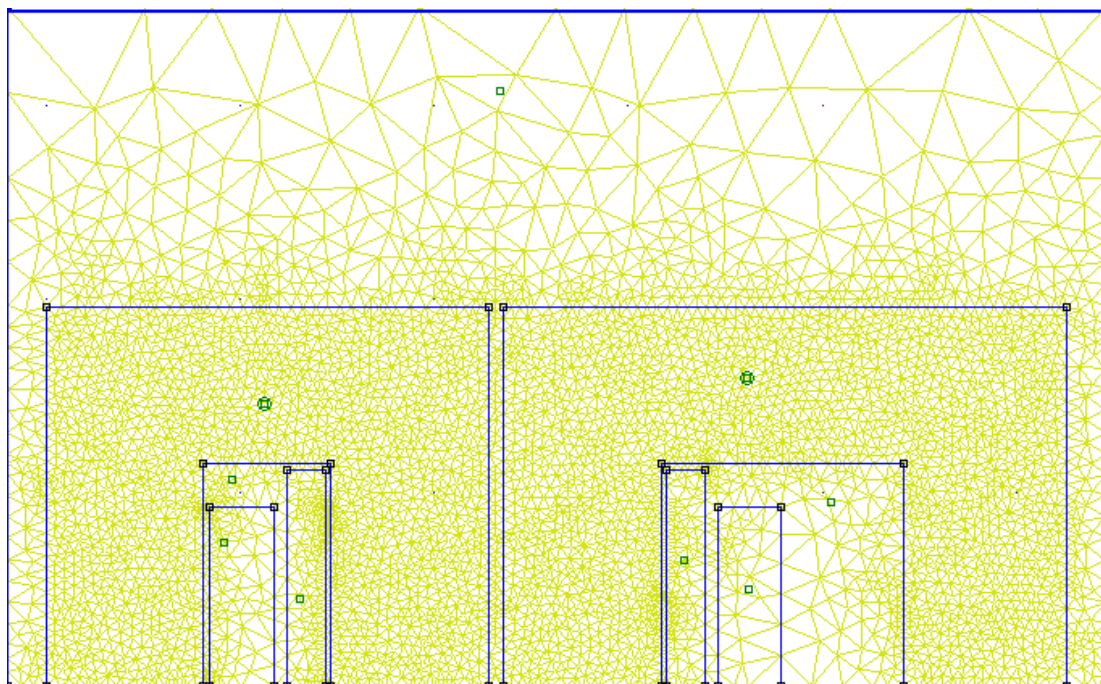
Σχήμα 4.4: Καμπύλη μαγνήτισης υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 1000 kVA.



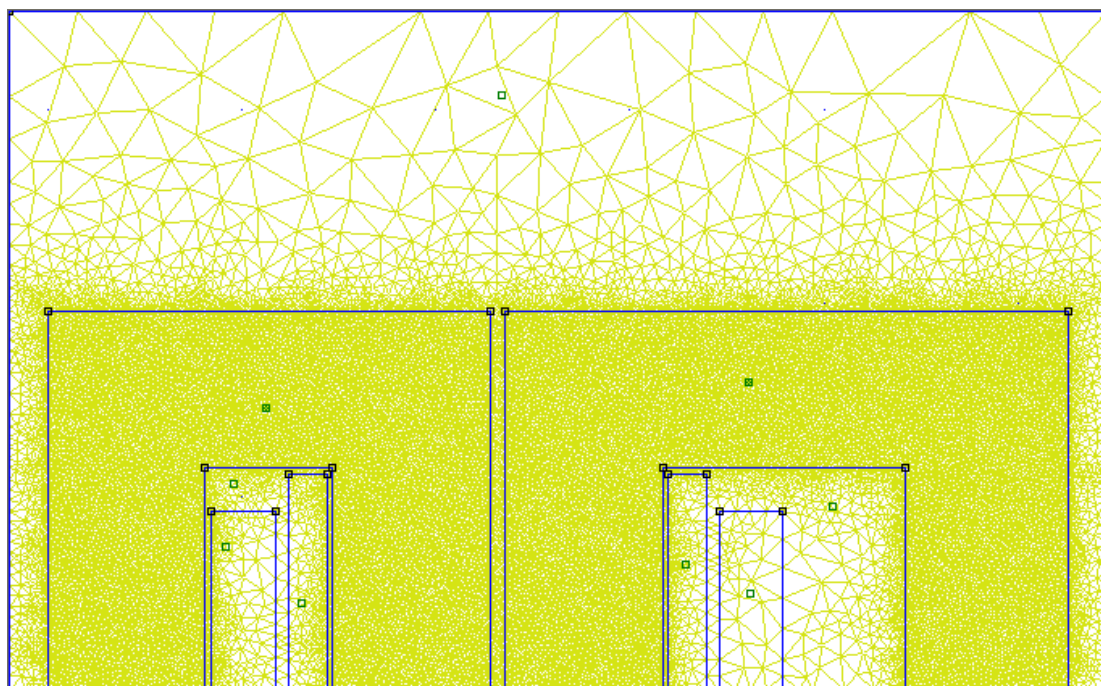
Σχήμα 4.5: Καμπύλη ειδικών απωλειών υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 1000 kVA.



Σχήμα 4.6: Διαστάσεις μοντέλου FEMM τριφασικού μετασχηματιστή 1000 kVA.



Σχήμα 4.7: Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το μετασχηματιστή 1000 kVA (πυκνότητας 4818 κόμβων).



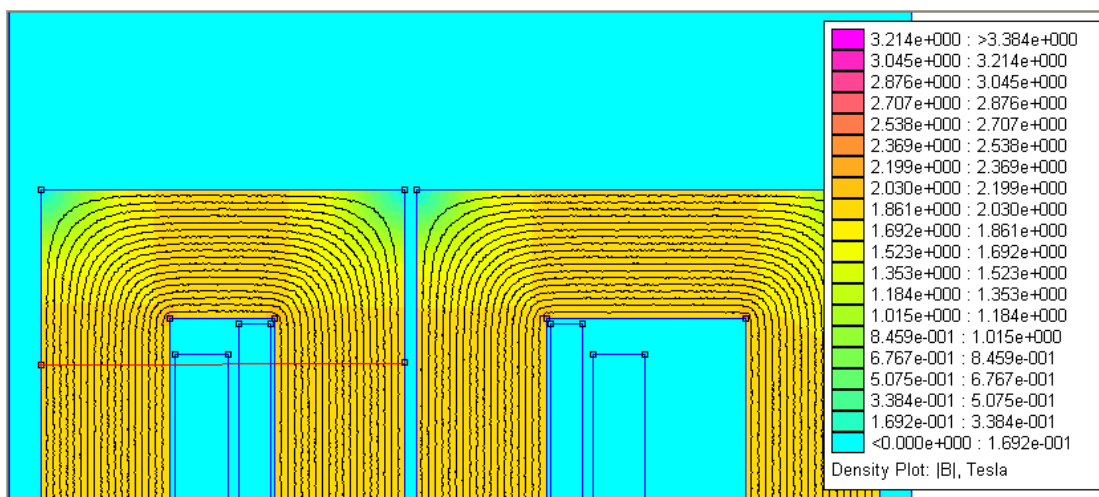
Σχήμα 4.8: Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το μετασχηματιστή 1000 kVA (πυκνότητας 54179 κόμβων).

Κατά την κατασκευή του πλέγματος δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στις περιοχές των πυρήνων, δεδομένου ότι αυτές επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Έτσι, έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί ομοιογένεια του πλέγματος στην περιοχή των πυρήνων, ενώ για την εξαγωγή πυκνότερων πλεγμάτων, αυξήθηκε ο αριθμός των στοιχείων κυρίως στην περιοχή των πυρήνων (με αυτόν τον τρόπο προέκυψε το πλέγμα του σχήματος 4.8 από το πλέγμα του σχήματος 4.7).

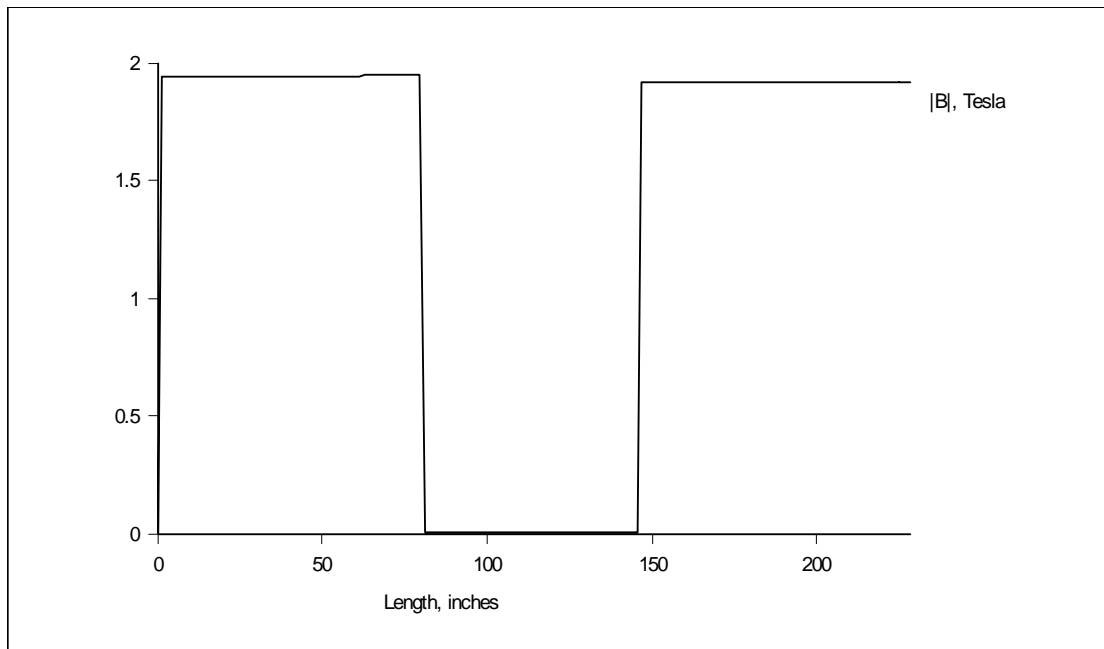
♦ Αποτελέσματα ανάλυσης

Η κατανομή της μαγνητικής ροής, όπως προέκυψε από την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος, με τη χρήση του πλέγματος του σχήματος 4.8, εικονίζεται στο σχήμα 4.9. Η κατανομή αυτή αντιστοιχεί στις μαγνητικές ροές σκέδασης, που εμφανίζονται κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης. Μεταξύ των ισοδυναμικών γραμμών του πεδίου κυκλοφορεί η ίδια μαγνητική ροή. Από το σχήμα 4.9 προκύπτει ότι κατά το ανοιχτοκύκλωμα όλη η μαγνητική ροή περνά μέσα από τους πυρήνες, ενώ είναι πολύ μικρή στην περιοχή των πηνίων. Σύμφωνα με τον τρόπο απεικόνισης της κατανομής του σχήματος 4.9, το πεδίο είναι ελάχιστο στις περιοχές με το γαλάζιο χρώμα, ενώ μεγιστοποιείται στις περιοχές με το μωβ χρώμα.

Η μορφή της κατανομής της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της κόκκινης διαδρομής του σχήματος 4.9 φαίνεται στο σχήμα 4.10. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η κάθετη συνιστώσα της επαγωγής είναι περίπου σταθερή στον πυρήνα και στα διάκενα ενώ πέφτει στο μηδέν στο χώρο των τυλιγμάτων.



Σχήμα 4.9: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή 1000 kVA κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.



Σχήμα 4.10: Γραφική απεικόνιση της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής του σχήματος 4.7.

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα του μετασχηματιστή 1000 kVA, κατασκευάστηκαν πλέγματα με εύρος πυκνότητας από 2.000 έως 100.000 κόμβους. Για την εκάστοτε πυκνότητα πλέγματος και με βάση την τιμή της μαγνητικής επαγωγής στην περιοχή των πυρήνων (όπως αυτή υπολογίστηκε με τη χρήση του μοντέλου), υπολογίστηκαν οι απώλειες, ενώ ο αντίστοιχος αριθμός των κόμβων βοήθησε στην εξαγωγή της καμπύλης μεταβολής των απωλειών συναρτήσει της πυκνότητας του πλέγματος.

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με τη χρήση του προγράμματος FEMM για τον αριθμό των κόμβων και τις απώλειες πυρήνα στο μετασχηματιστή 1000 kVA (Πίνακας 4.2):

Αριθμός κόμβων	Απώλειες πυρήνα (W)
1998	572.2
23895	746.7
54179	1669.6
88720	1690.9

Πίνακας 4.2: Τιμές απωλειών πυρήνα συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το μετασχηματιστή 1000 kVA.

Η τιμή των απωλειών, η οποία υπολογίστηκε με τη μέθοδο της Παραγράφου 4.1.3.3, συγκρίθηκε με τη τιμή των απωλειών που μετρήθηκαν από τον κατασκευαστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης, η οποία είναι ίση με 1428 W.

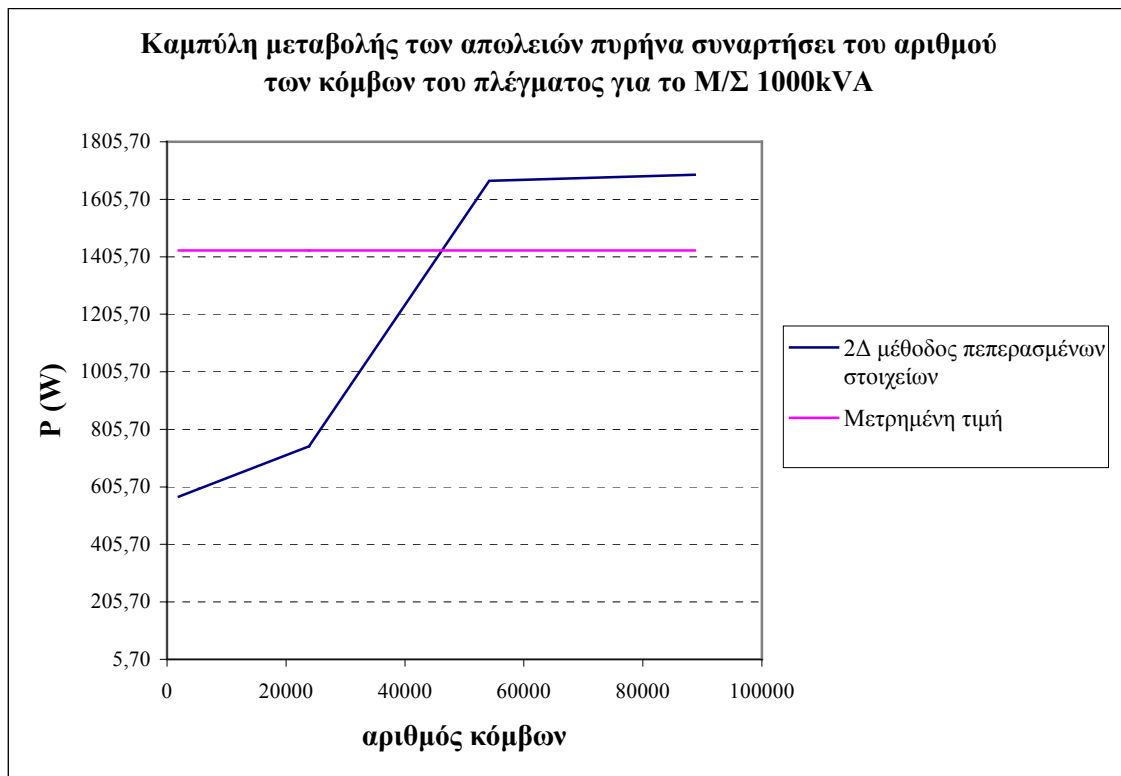
Στο επόμενο γράφημα (σχήμα 4.11), απεικονίζεται η καμπύλη της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων σε συνδυασμό με την αντίστοιχη μετρημένη τιμή. Είναι φανερό ότι η αύξηση του αριθμού των κόμβων συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση της τιμής των απωλειών που δίνει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η τιμή της οποίας, μετά από μία πυκνότητα πλέγματος και μετά, είναι σχεδόν σταθερή.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα είναι δυνατό να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα όσον αφορά στο μετασχηματιστή 1000 kVA:

Σύμφωνα με τη δισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, η αύξηση του αριθμού των κόμβων προκαλεί ανάλογη αύξηση της τιμής των απωλειών. Οι τιμές των απωλειών παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στις μικρές πυκνότητες πλέγματος (ξεκινώντας από τιμή μικρότερη των 600W στο αραιό πλέγμα, για να ξεπεράσουν τα 1600W στους 50000 κόμβους και στη συνέχεια να σταθεροποιηθούν σ' αυτήν την τιμή), γεγονός που τονίζει την ανάγκη χρήσης πυκνού πλέγματος για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Η απόκλιση της τιμής που δίνει το πυκνότερο πλέγμα από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή (η οποία υπολογίζεται με τη χρήση της σχέσης (4.9)) είναι ίση με 18.4%. Οφείλεται δε σε δύο λόγους:

- Η καμπύλη ειδικών απωλειών αντιστοιχεί σε υλικό πριν την κατεργασία του για τη διαμόρφωση των πυρήνων του μετασχηματιστή. Έτσι, κατά την παραπάνω ανάλυση αγνοείται η μηχανική και η θερμική κατεργασία για τη διαμόρφωση των πυρήνων, η οποία τροποποιεί σημαντικά τα αρχικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας και κατ' επέκταση και το επίπεδο των απωλειών σιδήρου
- η αναπαράσταση των υλικών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται σε μακροσκοπική κλίμακα με αποτέλεσμα να ομογενοποιούνται ή αγνοούνται φαινόμενα που διαδραματίζονται σε μικροσκοπική κλίμακα στα χρησιμοποιούμενα υλικά. Για το λόγο αυτό πολλές φορές η αναπαράσταση των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ατελής.

$$\text{απόκλιση} = \frac{|P_{\text{μετρημένες}} - P_{\text{υπολογισμένες}}|}{P_{\text{μετρημένες}}} \cdot 100\% \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.11 : Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το Μ/Σ 1000 kVA.

4.1.4.2 Μετασχηματιστής ισχύος 400 kVA

♦ Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική ισχύς $S_{nom}=400 \text{ kVA}$
- Τάση τυλίγματος υψηλής (πρωτεύον) $V_{1nom}=15\text{-}20 \text{ kV}$
- Τάση τυλίγματος χαμηλής (δευτερεύον) $V_{2nom}=0.4 \text{ kV}$
- Συνδεσμολογία τυλιγμάτων : **Dyn11** (τρίγωνο - αστέρας)
- Λόγος τάσεως/σπείρα $=11.54734 \text{ V/turn}$
- Σπείρες πρωτεύοντος $N_1=1732$ (20 kV)
- Σπείρες δευτερεύοντος $N_2=20$
- Αριθμός ενδιάμεσων λήψεων (taps) : **5**
- Τάση βραχυκύκλωσης $U_k=6\%$

Από τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν τα εξής:

- Ονομαστική φασική τάση του δευτερεύοντος: $V_{LV} = V_{2nom}^{phase} = \frac{V_{2nom}}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ V}$.

- Ονομαστικό φασικό ρεύμα πρωτεύοντος: $I_{HV} = I_{1nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{1nom}} = 6.67 \text{ A}$

- Ονομαστικό φασικό ρεύμα δευτερεύοντος: $I_{LV} = I_{2nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{2nom}^{phase}} = 577.4 \text{ A}$.

♦ *Γεωμετρικά χαρακτηριστικά*

Ο Πίνακας 4.3 περιλαμβάνει τις διαστάσεις των πυρήνων του μετασχηματιστή, κατ'αντιστοιχία με το σχήμα 2.16 του Κεφαλαίου 2.

Μέγεθος	Μήκος (mm)
Eu	81
A1	228
A2	294
F1	66
F2	132
G	230
B	392
K	8
D	190
D1	190
D2	0

Πίνακας 4.3: Διαστάσεις πυρήνων μετασχηματιστή 400 kVA (σύμφωνα με το σχήμα 2.16 του Κεφαλαίου 2).

Το τύλιγμα υψηλής τάσης κατασκευάζεται από αγωγούς από χαλκό με δύο διαμέτρους 2.75 mm και 2.34 mm. Το τύλιγμα της χαμηλής τάσης αποτελείται από 20 στρώσεις φύλλου χαλκού διατομής 129.32 mm^2 , οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες.

Οι διαστάσεις των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης καθώς και των μεταξύ τους διακένων έχουν ως εξής:

- Διάκενο μεταξύ πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων: $\ell_{HV-HV} = 5.76 \text{ mm}$
- Πάχος YT: $BLD_{HV} = 38.35 \text{ mm}$

- Διάκενο μεταξύ YT και XT: $\ell_{HV-LV}=6.58 \text{ mm}$
- Πάχος XT: $BLD_{LV}=20.35\text{mm}$
- Διάκενο μεταξύ XT και πυρήνα: $\ell_{LV-C}=1.5\text{mm}$

♦ **Καμπύλη μαγνήτισης και ειδικών απωλειών**

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή 400 kVA είναι κατασκευασμένος από μαγνητική λαμαρίνα M4 (πάχος ελασμάτων 0.27 mm). Στα σχήματα 4.12 και 4.13 παρατίθενται οι καμπύλες μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή (πριν τη θερμική και μηχανική κατεργασία του υλικού για τη διαμόρφωση των πυρήνων).

♦ **Διαστάσεις μοντέλου FEMM**

Το σχήμα 4.14 περιλαμβάνει τις διαστάσεις του μοντέλου FEMM που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.

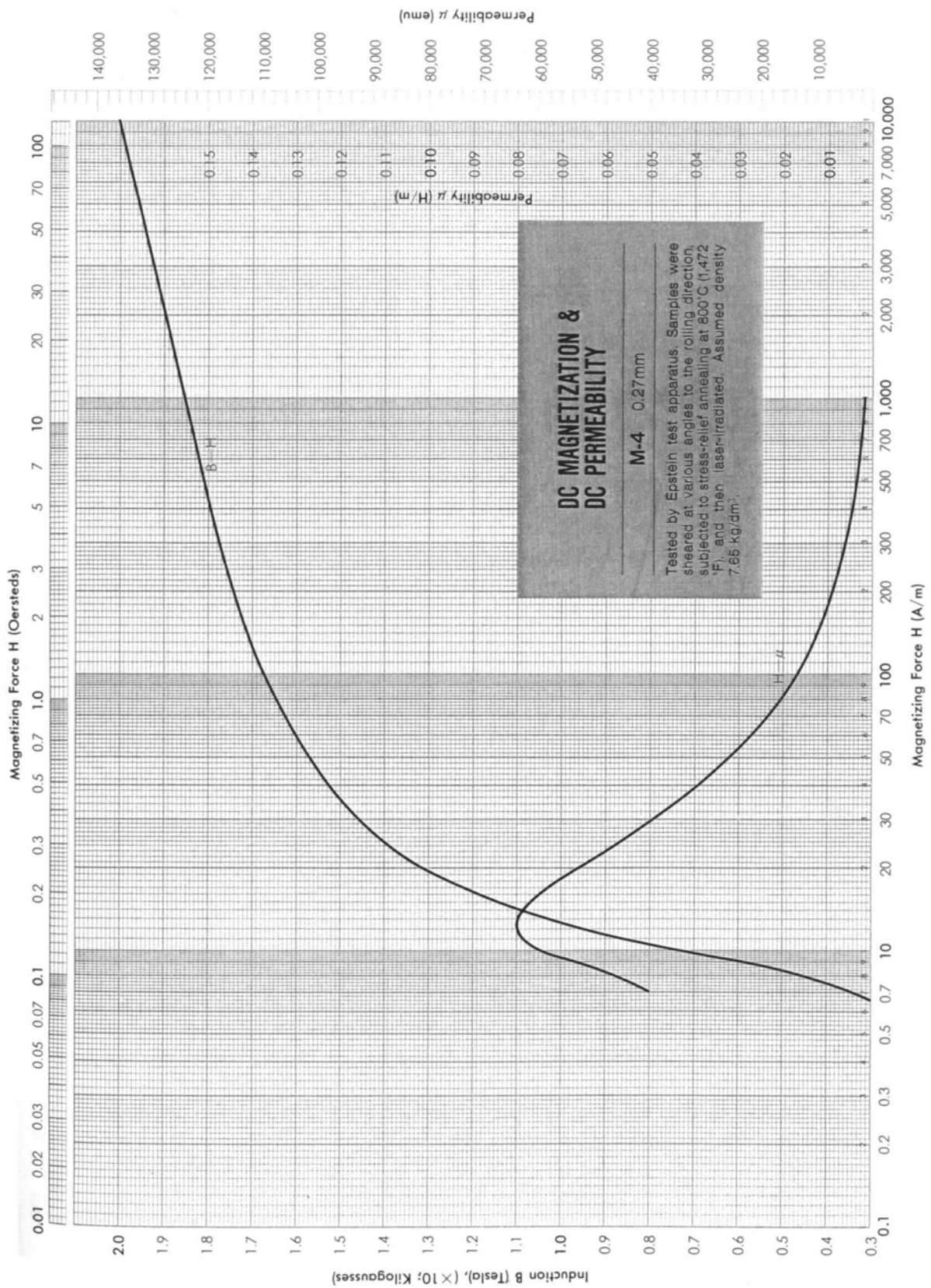
♦ **Διδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων**

Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με τριγωνικά στοιχεία πρώτης τάξης. Κατασκευάστηκαν πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας για να διαπιστωθεί η επίδραση του αριθμού των κόμβων στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 4.15 εικονίζεται ένα πλέγμα μικρής πυκνότητας, αποτελούμενο από 1520 κόμβους, ενώ στο σχήμα 4.16 ένα πολύ πυκνότερο πλέγμα, με 88839 κόμβους.

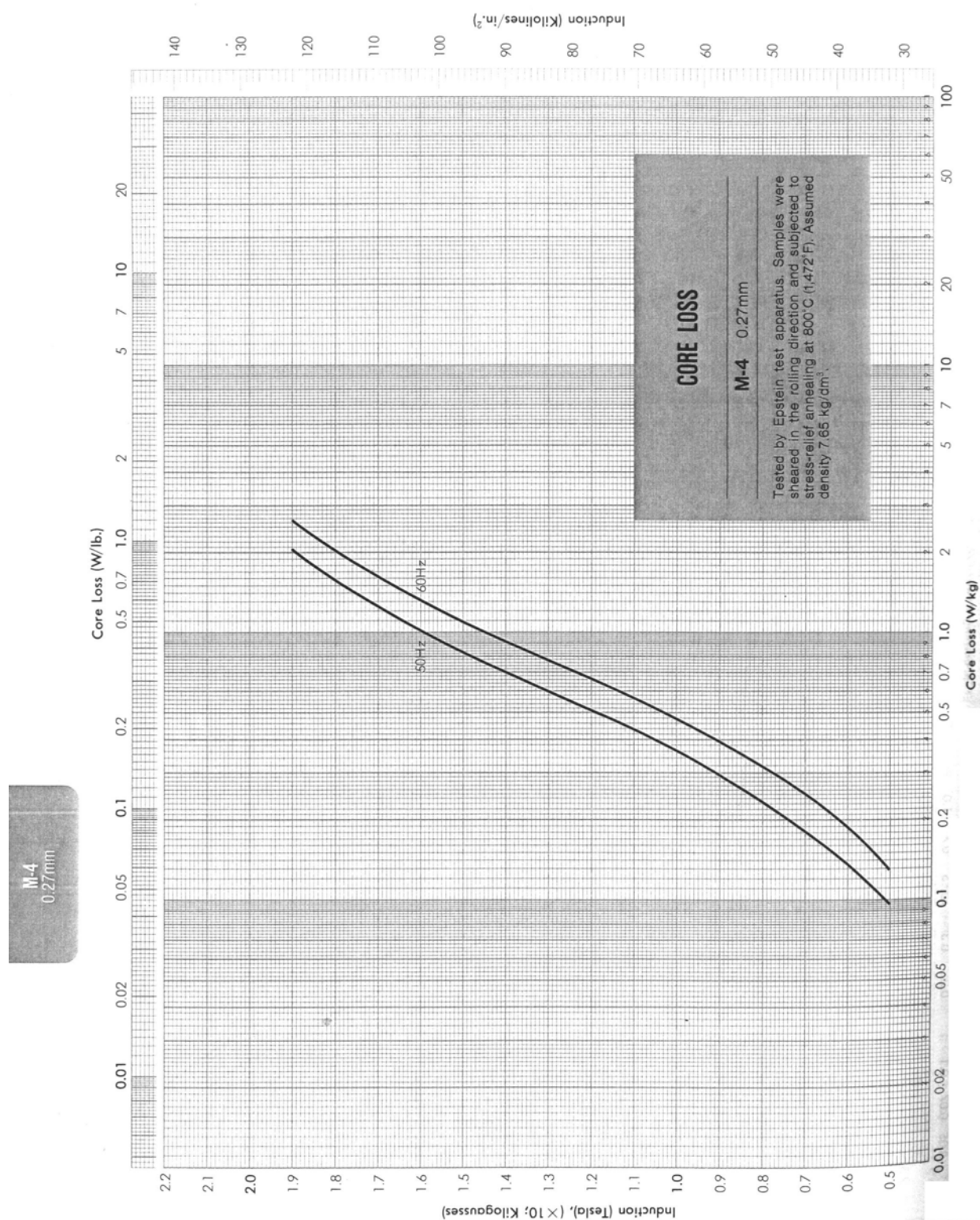
♦ **Αποτελέσματα ανάλυσης**

Η κατανομή της μαγνητικής ροής, όπως προέκυψε από την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος, με τη χρήση του πλέγματος του σχήματος 4.16, εικονίζεται στο σχήμα 4.17.

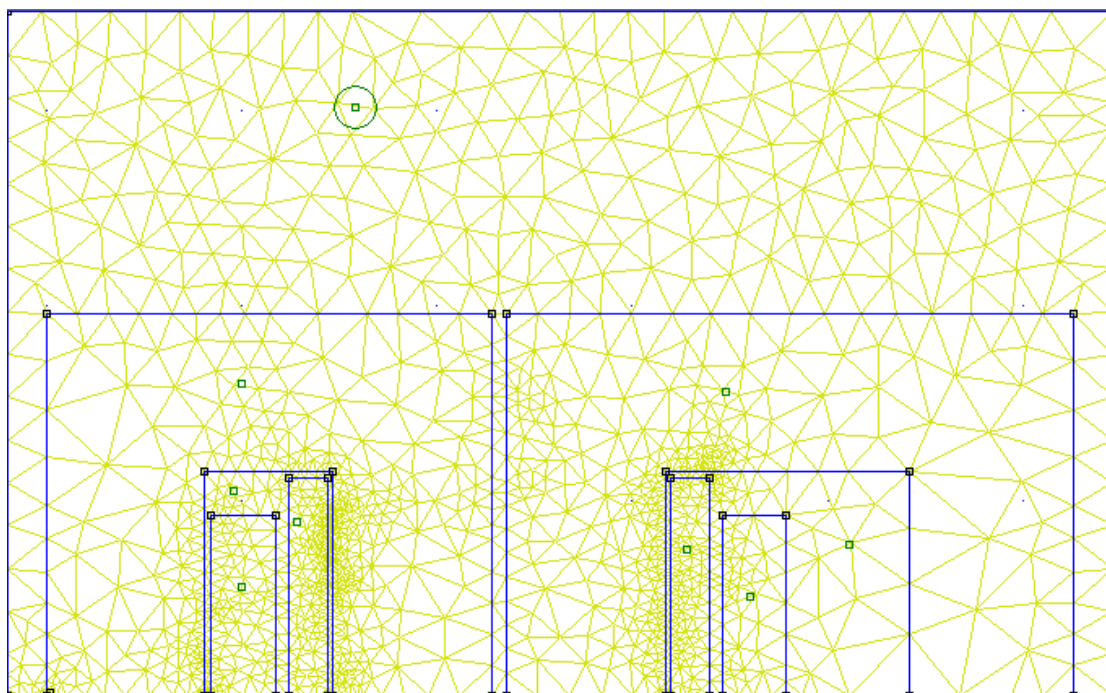
Η μορφή της κατανομής της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της κόκκινης διαδρομής του σχήματος 4.17 φαίνεται στο σχήμα 4.18. Στο σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η κάθετη συνιστώσα της επαγωγής είναι περίπου σταθερή στον πυρήνα και στα διάκενα ενώ πέφτει στο μηδέν στο χώρο των τυλιγμάτων.



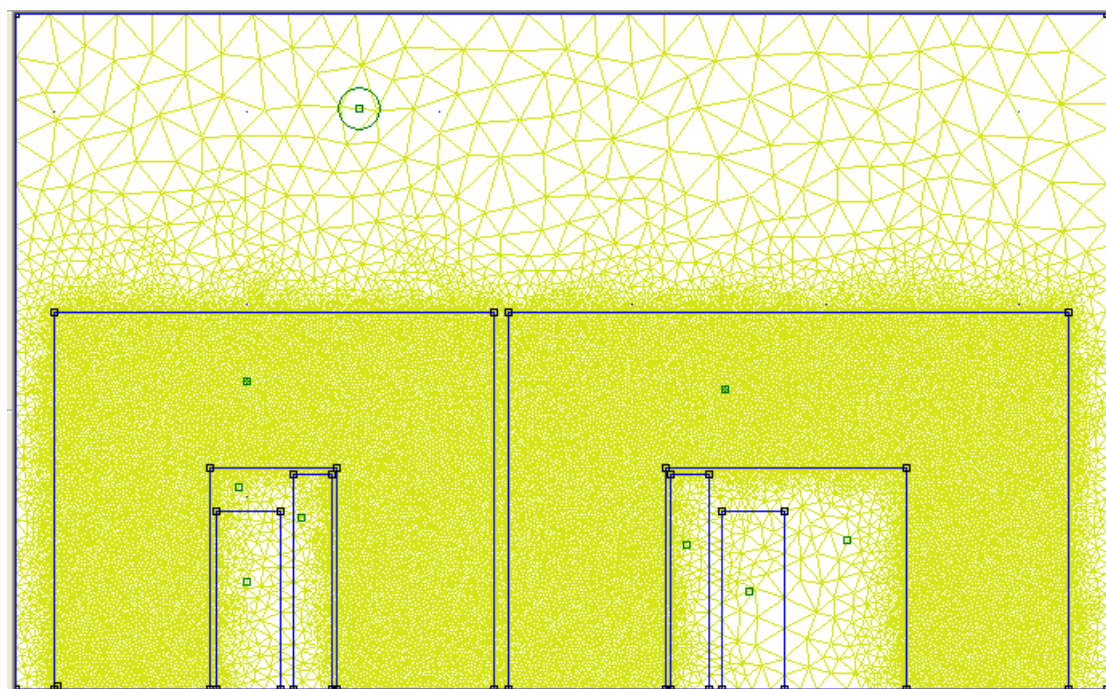
Σχήμα 4.12: Καμπύλη μαγνήτισης υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 400 kVA.



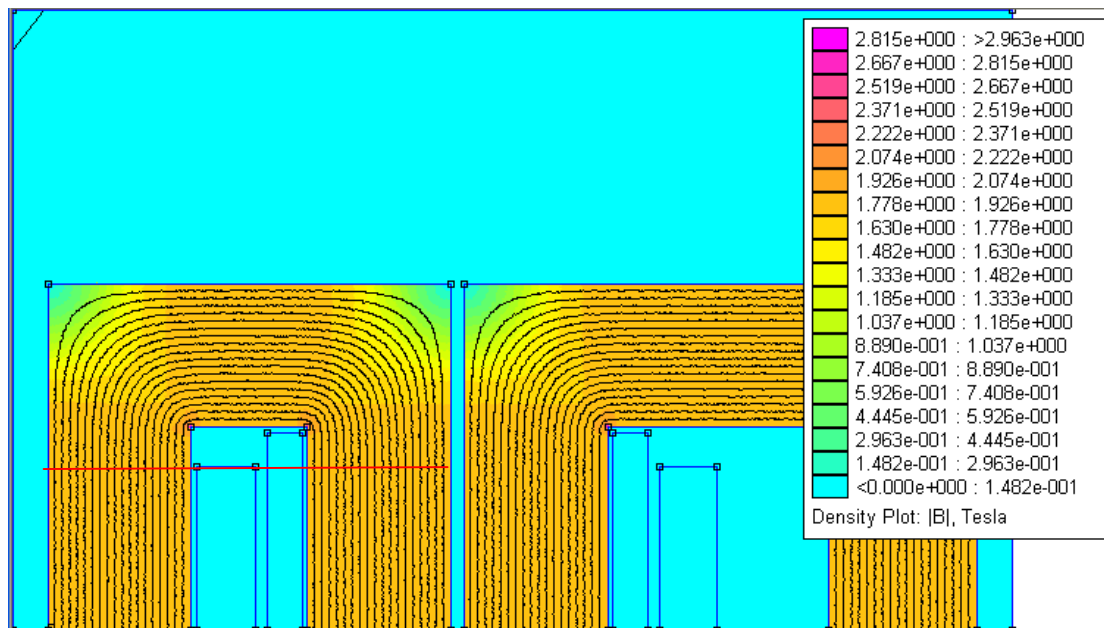
Σχήμα 4.13: Καμπύλη ειδικών απωλειών υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 400 kVA.



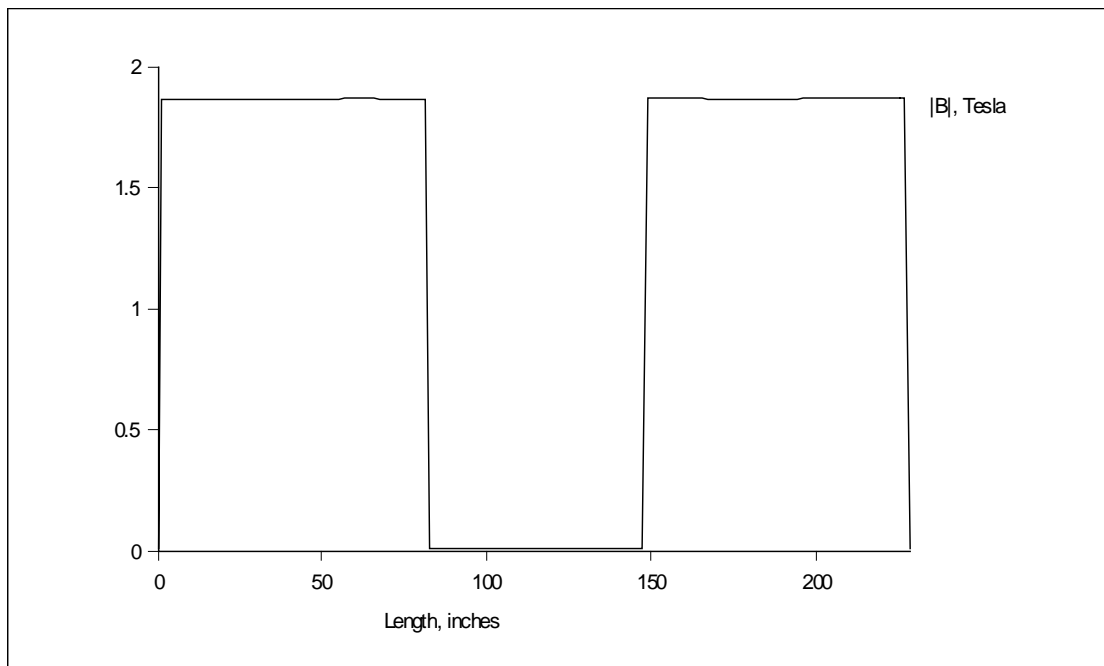
Σχήμα 4.15: Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το μετασχηματιστή 400 kVA (πυκνότητας 1520 κόμβων).



Σχήμα 4.16: Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το μετασχηματιστή 400 kVA (πυκνότητας 88839 κόμβων).



Σχήμα 4.17: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή 400 kVA κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.



Σχήμα 4.18: Γραφική απεικόνιση της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής του σχήματος 4.17.

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα του μετασχηματιστή 400 kVA, κατασκευάστηκαν πλέγματα με εύρος πυκνότητας από 2.000 έως 100.000 κόμβους. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία

προέκυψαν με τη χρήση του προγράμματος FEMM για τον αριθμό των κόμβων και τις απώλειες πυρήνα στο μετασχηματιστή 400 kVA (Πίνακας 4.4):

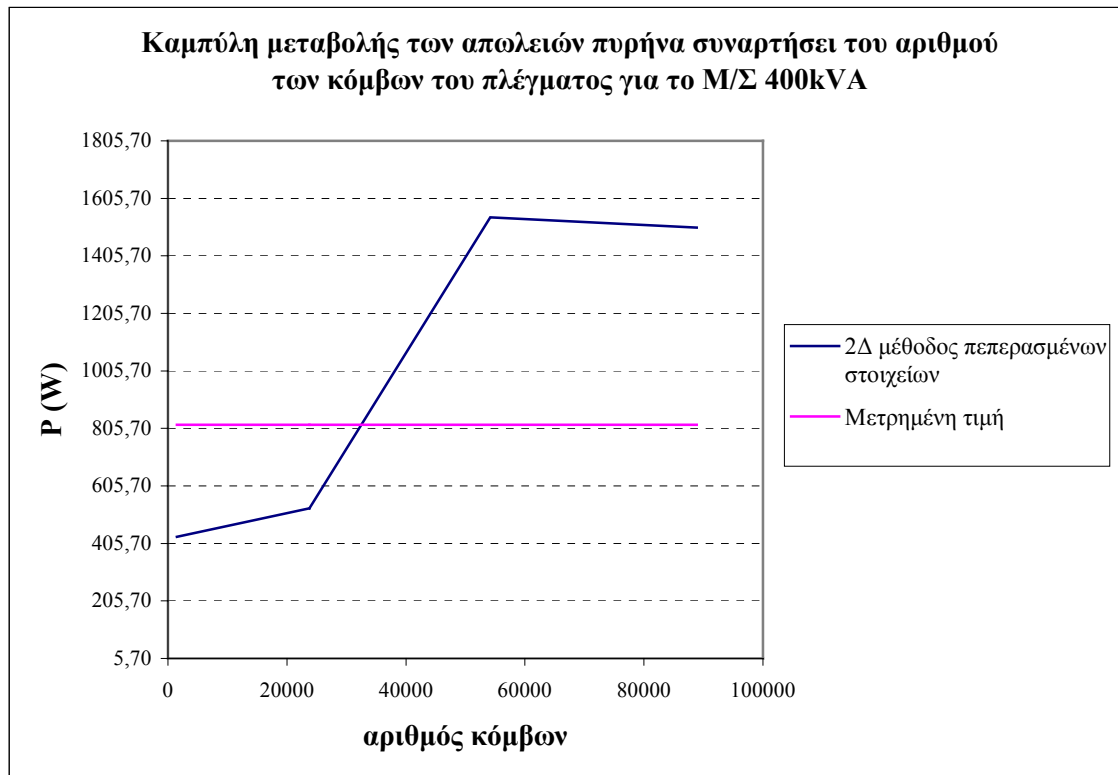
Αριθμός κόμβων	Απώλειες πυρήνα (W)
1520	428.4
23794	528.28
54169	1539.48
88839	1503.56

Πίνακας 4.4: Τιμές απωλειών πυρήνα συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το μετασχηματιστή 400 kVA.

Η τιμή των απωλειών, η οποία υπολογίστηκε με τη μέθοδο της Παραγράφου 4.1.3.3, συγκρίθηκε με τη τιμή των απωλειών που μετρήθηκαν από τον κατασκευαστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης, η οποία είναι ίση με 818 W.

Στο σχήμα 4.19 απεικονίζεται η καμπύλη της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων σε συνδυασμό με την αντίστοιχη μετρημένη τιμή. Όπως και στην περίπτωση του 1000 kVA, η αύξηση του αριθμού των κόμβων προκαλεί ανάλογη αύξηση της τιμής των απωλειών. Οι τιμές των απωλειών παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στις μικρές πυκνότητες πλέγματος (ξεκινώντας από τιμή μικρότερη των 500W στο αραιό πλέγμα, για να ξεπεράσουν τα 1500W στους 50000 κόμβους και στη συνέχεια να σταθεροποιηθούν σ' αυτήν την τιμή), γεγονός που επιβεβαιώνει την ανάγκη χρήσης πυκνού πλέγματος για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Η απόκλιση της τιμής που δίνει το πυκνότερο πλέγμα από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή (η οποία υπολογίζεται με τη χρήση της σχέσης (4.9)) είναι ίση με 83.81%. Είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του μετασχηματιστή 1000 kVA, οφείλεται ωστόσο στους ίδιους λόγους που αναλύθηκαν στην Παράγραφο 4.1.4.2. Η πολύ μεγάλη τιμή αυτής της απόκλισης αποδεικνύει το σημαντικό ρόλο που παίζει η εξέταση του υλικού σε μικροσκοπική κλίμακα και η εξέταση των επιπτώσεων της θερμικής και μηχανικής κατεργασίας του κατά τη μελέτη των απωλειών προκειμένου να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.19 : Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το Μ/Σ 400 kVA.

4.1.4.3 Μετασχηματιστής ισχύος 630 kVA

♦ Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

Τα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική ισχύς $S_{nom}=630 \text{ kVA}$
- Τάση τυλίγματος υψηλής (πρωτεύον) $V_{1nom}=15\text{-}20 \text{ kV}$
- Τάση τυλίγματος χαμηλής (δευτερεύον) $V_{2nom}=0.4 \text{ kV}$
- Συνδεσμολογία τυλιγμάτων : **Dyn11** (τρίγωνο - αστέρα)
- Λόγος τάσεως/σπείρα = **14.4338 V/turn**
- Σπείρες πρωτεύοντος $N_1=1385(20 \text{ kV})$
- Σπείρες δευτερεύοντος $N_2=16$
- Αριθμός ενδιάμεσων λήψεων (taps) : **5**
- Τάση βραχυκύκλωσης $U_k=6\%$

Από τα παραπάνω μεγέθη προκύπτουν τα εξής:

- Ονομαστική φασική τάση του δευτερεύοντος: $V_{LV} = V_{2nom}^{phase} = \frac{V_{2nom}}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ V}$.

- Ονομαστικό φασικό ρεύμα πρωτεύοντος: $I_{HV} = I_{1nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{1nom}} = 10.5 \text{ A}$

- Ονομαστικό φασικό ρεύμα δευτερεύοντος: $I_{LV} = I_{2nom} = \frac{S_{nom} / 3}{V_{2nom}^{phase}} = 909.33 \text{ A}$.

♦ *Γεωμετρικά χαρακτηριστικά*

Ο Πίνακας 4.5 περιλαμβάνει τις διαστάσεις των πυρήνων του μετασχηματιστή, κατ'αντιστοιχία με το σχήμα 2.16 του Κεφαλαίου 2.

Μέγεθος	Μήκος (mm)
Eu	83.6
A1	239
A2	311
F1	72
F2	144
G	295
B	462
K	5
D	237
D1	110
D2	127

Πίνακας 4.5: Διαστάσεις πυρήνων μετασχηματιστή 630 kVA (σύμφωνα με το σχήμα 2.16 του Κεφαλαίου 2).

Το τύλιγμα υψηλής τάσης κατασκευάζεται από αγωγούς χαλκού με δύο διαφορετικές διαμέτρους 2.05 mm και 1.8 mm αντίστοιχα. Το τύλιγμα χαμηλής τάσης αποτελείται από 16 στρώσεις φύλλου χαλκού διατομής 207.75 mm^2 , οι οποίες καταλήγουν σε ακροδέκτες.

Οι διαστάσεις των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης καθώς και των μεταξύ τους διακένων έχουν ως εξής:

- Διάκενο μεταξύ πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων: $\ell_{HV-HV} = 5.76 \text{ mm}$
- Πάχος YT: $BLD_{HV} = 38.35 \text{ mm}$

- Διάκενο μεταξύ YT και XT: $\ell_{HV-LV}=8\text{ mm}$
- Πάχος XT: $BLD_{LV}=20.35\text{mm}$
- Διάκενο μεταξύ XT και πυρήνα: $\ell_{LV-C}=1.5\text{mm}$

♦ **Καμπύλη μαγνήτισης και ειδικών απωλειών**

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή 630 kVA είναι κατασκευασμένος από μαγνητική λαμαρίνα παρόμοια με αυτή του μετασχηματιστή 1000 kVA. Έτσι, οι αντίστοιχες καμπύλες μαγνήτισης και ειδικών απωλειών είναι αυτές των σχημάτων 4.12 και 4.13.

♦ **Διαστάσεις μοντέλου FEMM**

Το σχήμα 4.20 περιλαμβάνει τις διαστάσεις του μοντέλου FEMM που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.

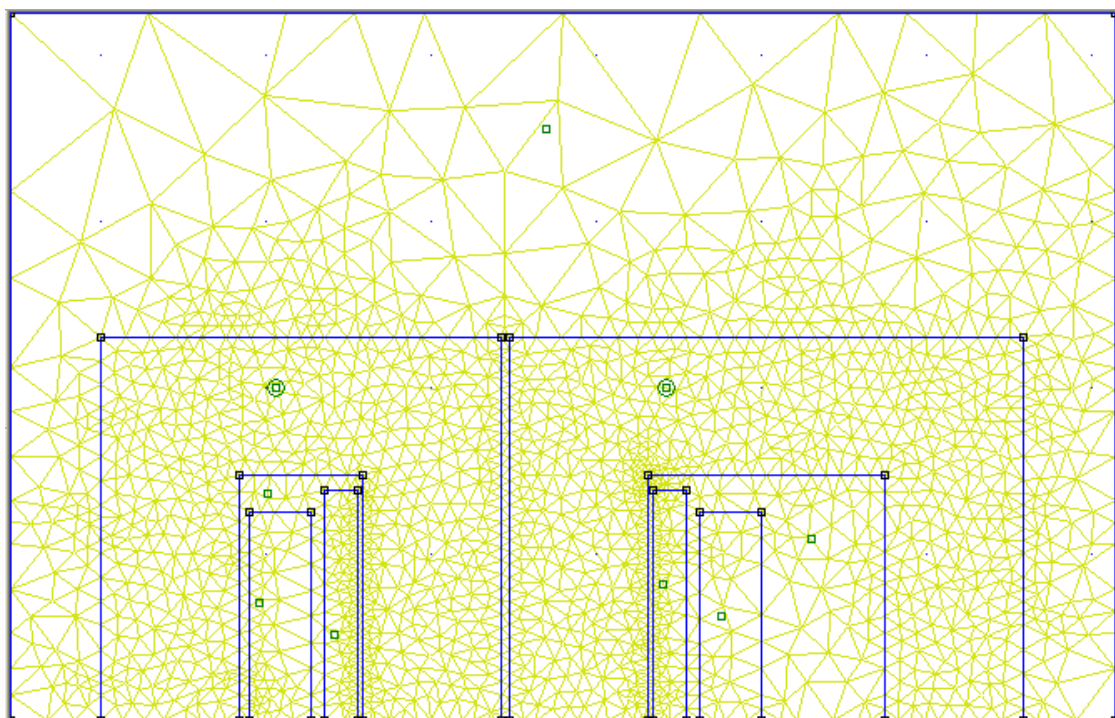
♦ **Διδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων**

Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με τριγωνικά στοιχεία πρώτης τάξης. Κατασκευάστηκαν πλέγματα διαφορετικής πυκνότητας για να διαπιστωθεί η επίδραση του αριθμού των κόμβων στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 4.21 εικονίζεται ένα πλέγμα μικρής πυκνότητας, αποτελούμενο από 2055 κόμβους, ενώ στο σχήμα 4.22 ένα πολύ πυκνότερο πλέγμα, με 55838 κόμβους.

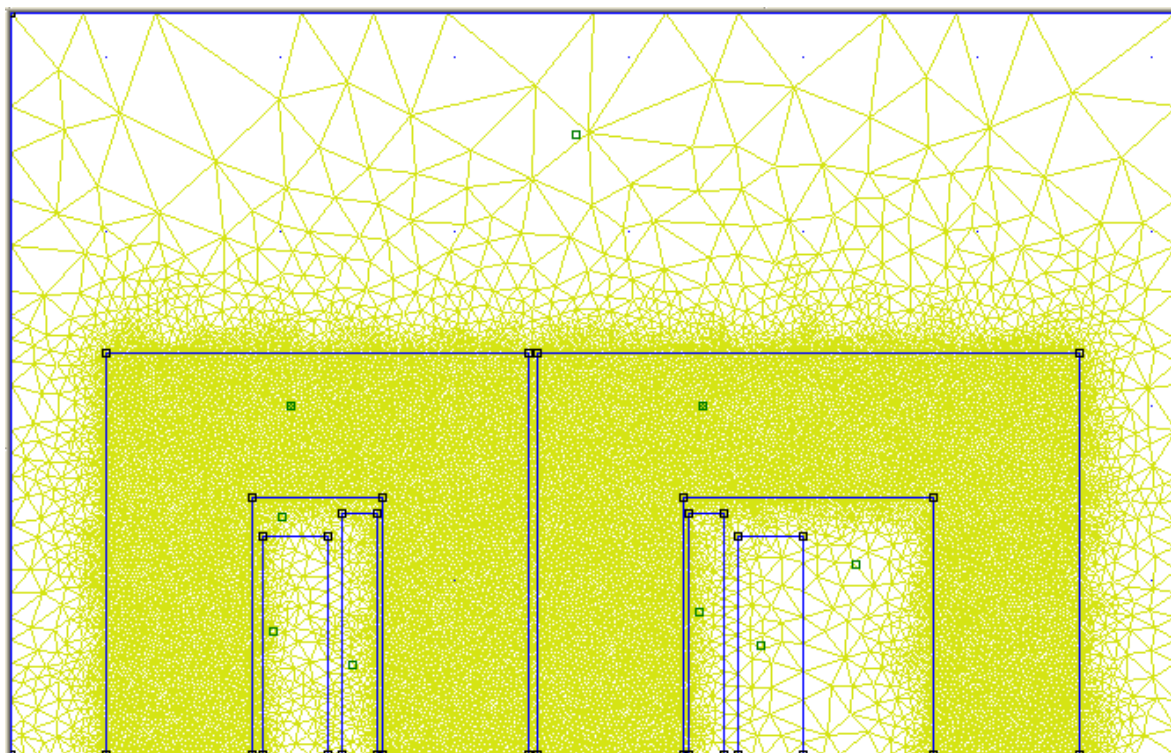
♦ **Αποτελέσματα ανάλυσης**

Η κατανομή της μαγνητικής ροής, όπως προέκυψε από την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος, με τη χρήση του πλέγματος του σχήματος 4.22, εικονίζεται στο σχήμα 4.23. Η μορφή της κατανομής της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της κόκκινης διαδρομής του σχήματος 4.23 φαίνεται στο σχήμα 4.24. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα του μετασχηματιστή 630 kVA, κατασκευάστηκαν πλέγματα με εύρος πυκνότητας από 1.000 έως 100.000 κόμβους. Για την εκάστοτε πυκνότητα πλέγματος και με βάση την τιμή της μαγνητικής επαγωγής στην περιοχή των πυρήνων (όπως αυτή υπολογίστηκε με τη χρήση του μοντέλου), υπολογίστηκαν οι απώλειες, ενώ ο αντίστοιχος αριθμός των κόμβων βοήθησε στην εξαγωγή της καμπύλης μεταβολής των απωλειών συναρτήσει της πυκνότητας του πλέγματος.

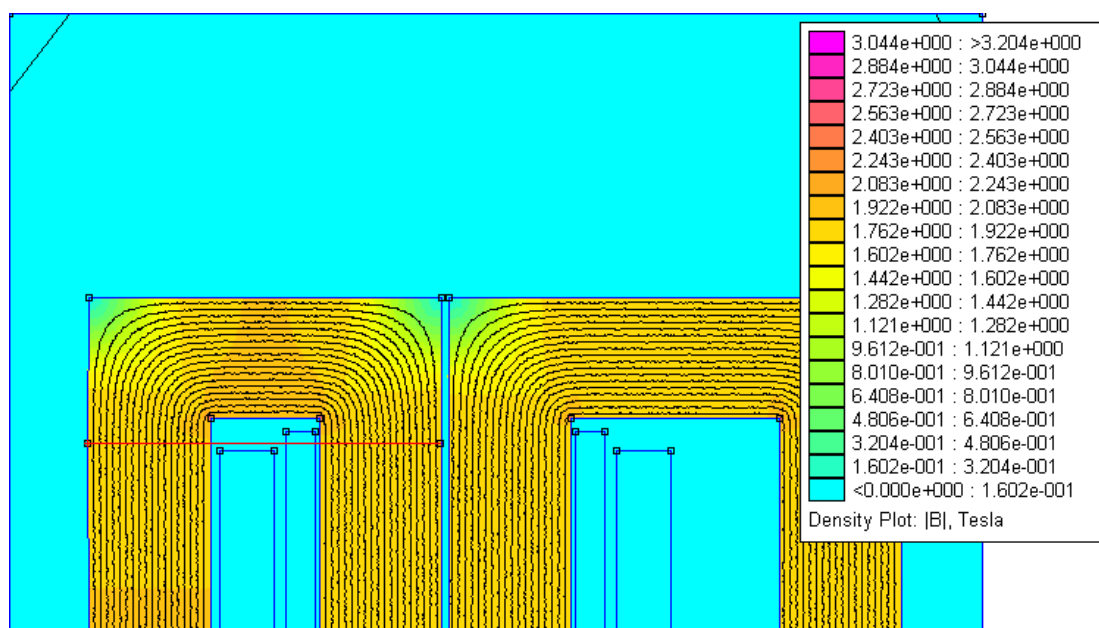




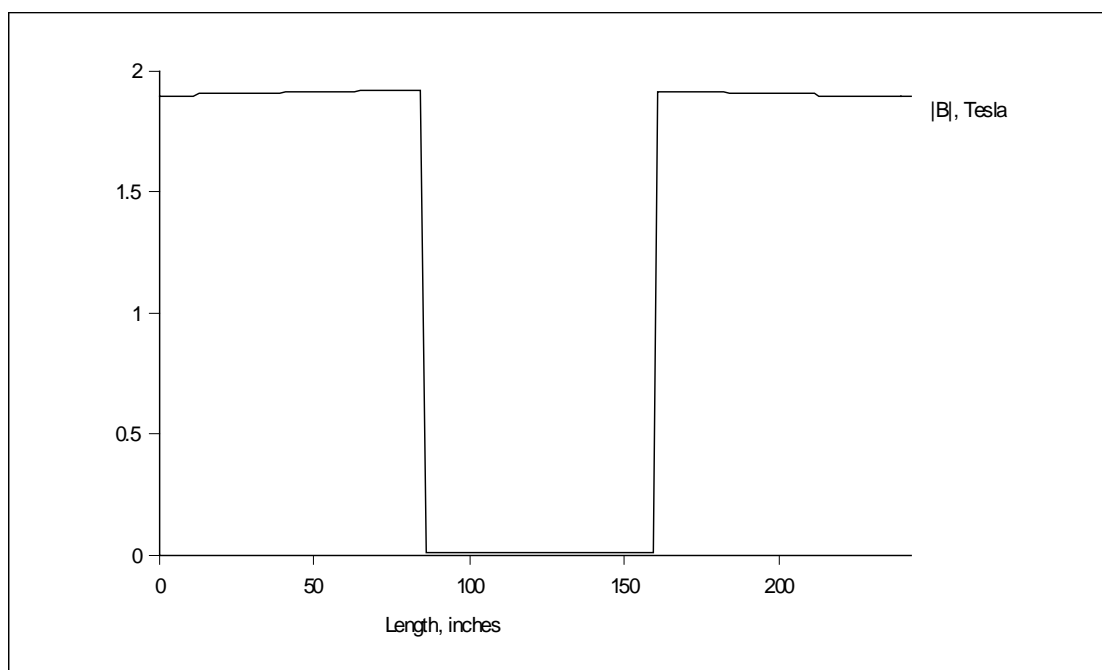
Σχήμα 4.21: Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το μετασχηματιστή 630 kVA (πυκνότητας 2055 κόμβων).



Σχήμα 4.22: Δισδιάστατο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για το μετασχηματιστή 630kVA (πυκνότητας 55838 κόμβων).



Σχήμα 4.23: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή 630 kVA κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης.



Σχήμα 4.24: Γραφική απεικόνιση της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής του σχήματος 4.23.

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν με τη χρήση του προγράμματος FEMM για τον αριθμό των κόμβων και τις απώλειες πυρήνα στο μετασχηματιστή 630 kVA:

Αριθμός κόμβων	Απώλειες πυρήνα (W)
1051	566.84
23818	948.92
55838	919.92
88364	1169.08

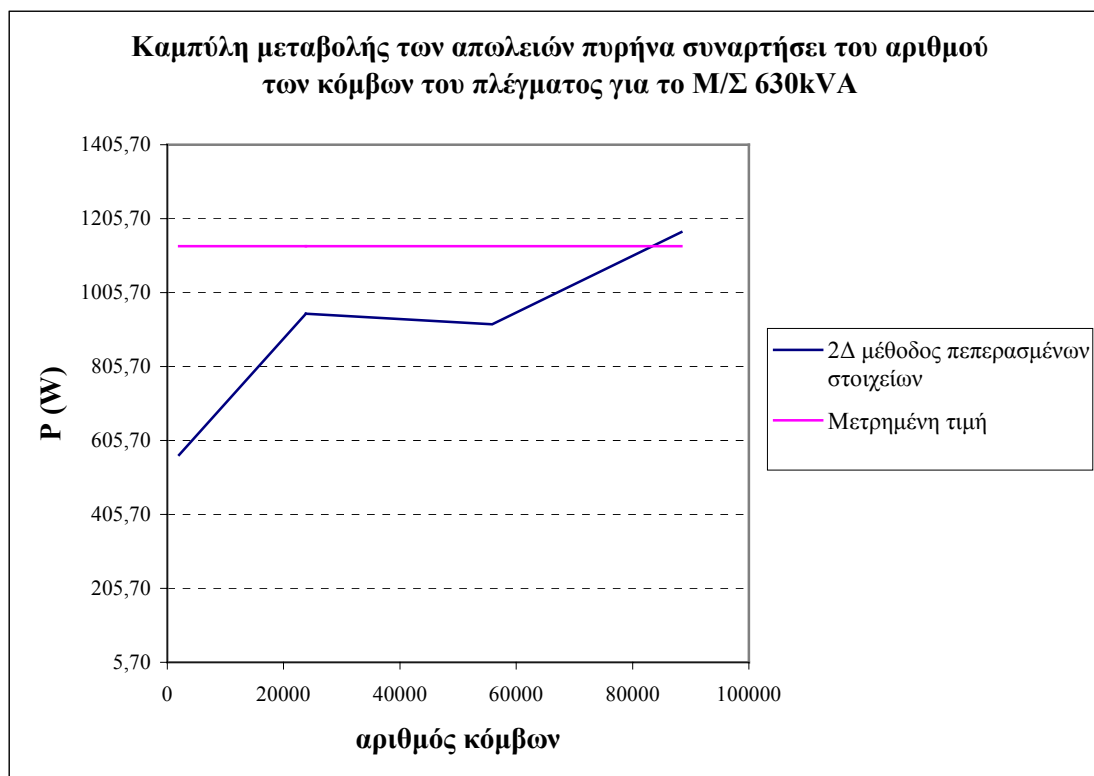
Πίνακας 4.6: Τιμές απωλειών πυρήνα συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το μετασχηματιστή 630 kVA.

Η τιμή των απωλειών, η οποία υπολογίστηκε με τη μέθοδο της Παραγράφου 4.1.3.3, συγκρίθηκε με τη τιμή των απωλειών που μετρήθηκαν από τον κατασκευαστή κατά τη δοκιμή ανοιχτοκύκλωσης, η οποία είναι ίση με 1131 W.

Στο σχήμα 4.25 απεικονίζεται η καμπύλη της επαγωγικής πτώσης τάσης συναρτήσει του αριθμού των κόμβων σε συνδυασμό με την αντίστοιχη μετρημένη τιμή. Είναι φανερό ότι η αύξηση του αριθμού των κόμβων συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση της τιμής των απωλειών που δίνει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η τιμή της οποίας, μετά από μία πυκνότητα πλέγματος και μετά, είναι σχεδόν σταθερή.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα είναι δυνατό να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα όσον αφορά στο μετασχηματιστή 630 kVA:

Σύμφωνα με τη δισδιάστατη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, η αύξηση του αριθμού των κόμβων προκαλεί ανάλογη αύξηση της τιμής των απωλειών. Οι τιμές των απωλειών παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση στις μικρές πυκνότητες πλέγματος (ξεκινώντας από τιμή μικρότερη των 600W στο αραιό πλέγμα, για να ξεπεράσουν τα 1100W στους 88000 κόμβους και στη συνέχεια να σταθεροποιηθούν σ' αυτήν την τιμή), γεγονός που τονίζει την ανάγκη χρήσης πυκνού πλέγματος για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Η απόκλιση της τιμής που δίνει το πυκνότερο πλέγμα από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή (η οποία υπολογίζεται με τη χρήση της σχέσης (4.9)) είναι ίση με 3.37%. Πρόκειται για τη μικρότερη απόκλιση (σε σχέση με τους μετασχηματιστές 1000 και 400 kVA). Ωστόσο η καλή ακρίβεια της μεθόδου σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να ληφθεί ως γενικό συμπέρασμα, δεδομένου ότι στις υπόλοιπες περιπτώσεις εμφανίστηκε μεγάλη διακύμανση και σημαντικό μέγεθος σφάλματος.



Σχήμα 4.25 : Καμπύλη μεταβολής των απωλειών συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος για το Μ/Σ 630 kVA.

4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΡΟΧΩΝ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΠΥΡΗΝΑ Μ/Σ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ PREISACH-NEEL

Οι αποκλίσεις που εμφανίστηκαν στην Παράγραφο 4.1 κατά τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι είναι αναγκαία η συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών με αναλυτικές μεθοδολογίες με σκοπό την προσαρμογή τους για την κατά περιοχές εφαρμογή τους σε μοντέλα μακροσκοπικής κλίμακας (όπως είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων).

4.2.1 Περιγραφή του μοντέλου υστέρησης Preisach-Neel

Το μοντέλο υστέρησης Preisach-Neel θεωρείται από τους πλέον ακριβείς τρόπους εξομοίωσης του φαινομένου υστέρησης, γενικά, και όχι μόνο για τα μαγνητικά υλικά που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία. Στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά ως ένα μαθηματικό μοντέλο που συνδέει τη διέγερση με την υστερούσα απόκριση ενός συστήματος. Στην ειδική περίπτωση που το σύστημα είναι ένα μαγνητικό υλικό, ως

διέγερση θεωρείται η πεδιακή ένταση H , ενώ ως απόκριση η μαγνητική επαγωγή B , [4.7 – 4.9].

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία κατά Preisach, το μαγνητικό υλικό αποτελείται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό, σχεδόν άπειρο, μαγνητικών διπόλων. Κάθε δίπολο έχει ένα στοιχειώδη ορθογώνιο βρόχο υστέρησης, που αντιστοιχεί μόνο σε δύο καταστάσεις μαγνήτισης, τη θετική και την αρνητική. Η συνολική μαγνήτιση του όλου δοκιμίου προκύπτει συσσωρευτικά από τη μαγνήτιση όλων των διπόλων, ή ισοδύναμα προσδιορίζεται από τη μαγνητική κατάσταση της πλειοψηφίας των διπόλων.

4.2.1.1 Γενικά για τη μοντελοποίηση της υστέρησης υλικών

Γενικά, δύο είδη τεχνικών μοντελοποίησης χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την εξέλιξη του φαινομένου: η φυσική μοντελοποίηση και η φαινομενολογική μοντελοποίηση. Στη φυσική μοντελοποίηση, οι βασικές εξελίξεις προσομοιώνονται έτσι ώστε να μπορούν να περιγράψουν τις βασικές καταστάσεις μαγνήτισης. Στα φαινομενολογικά μοντέλα, η χονδροειδής συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται μαθηματικά από γενικευμένες καμπύλες, ακολουθώντας προκαθορισμένους κανόνες, για τις ιδιότητες των υλικών. Τα πιο πρόσφατα μοντέλα είναι συχνά πιο αποδοτικά από τα παλαιότερα, αλλά δε δίνουν μία ολοκληρωμένη εικόνα των ιδιοτήτων που περιλαμβάνονται σε αυτά.

Για τη σχεδίαση ηλεκτρομαγνητικών συσκευών, ακριβείς προσδιορισμοί των απεικονίσεων του μαγνητικού πεδίου στη συσκευή είναι συχνά απαραίτητοι για μια ρεαλιστική πρόβλεψη των χαρακτηριστικών απόδοσης της συσκευής. Συνεπώς, σε πολλές περιπτώσεις, οι υπολογισμοί του μαγνητικού πεδίου θα πρέπει να εξηγούν τα ακριβή χαρακτηριστικά των μαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται, περιλαμβάνοντας τις συνέπειες του φαινομένου της υστέρησης. Σε αυτό το σημείο, οι μακροσκοπικές ιδιότητες, που περιγράφονται από φαινομενολογικά μοντέλα, συνδυάζονται με τις εξισώσεις του Maxwell, έτσι ώστε να αποκτήσουμε ακριβείς λύσεις για προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Η μοντελοποίηση της υστέρησης γίνεται ακόμα πιο σημαντική όταν κάποιος στοχεύει στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων που σχετίζονται άμεσα με τις διαδικασίες της υστέρησης, π.χ. τον υπολογισμό των απωλειών σιδήρου σε ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις. Θυμόμαστε ότι οι απώλειες υστέρησης σχετίζονται με το γεγονός ότι η σχέση μεταξύ του διανύσματος της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} και του διανύσματος της έντασης του πεδίου \vec{H} στο υλικό εξαρτάται από την προϊστορία του μαγνητικού

πεδίου. Για αυτές τις περιπτώσεις ένα φαινομενολογικό μοντέλο υστέρησης που περιγράφει τη σχέση B-H είναι επαρκές όσο η επιθυμητή ακρίβεια επιτυγχάνεται.

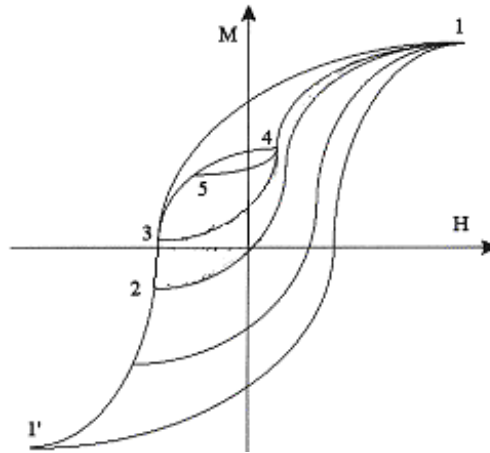
Σε άλλες εφαρμογές, υπάρχει προτίμηση για ένα φυσικό μοντέλο υστέρησης, ή για ένα μοντέλο οι παράμετροι του οποίου μπορούν ευθέως να συσχετισθούν με μικροσκοπικές ιδιότητες του υλικού. Είναι σαφές ότι ένα τέτοιο μοντέλο υστέρησης θα πρέπει να έχει τουλάχιστον κάποιες παραμέτρους που να συσχετίζονται άμεσα με τις μεταλλουργικές ιδιότητες του υλικού. Αλλαγές στη μικροδομή του υλικού οδηγούν σε τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων, οι οποίες θα πρέπει να αναγνωρισθούν από τις αλλαγές στις ιδιότητες της μαγνητικής υστέρησης, ή από το περιορισμένο πλήθος των υλικών παραμέτρων που περιγράφονται στο μοντέλο υστέρησης.

Τελικά, πρέπει να διαχωρίσουμε τα μοντέλα βαθμωτής υστέρησης από τα αντίστοιχα της διανυσματικής υστέρησης. Στην πραγματικότητα, ανάλογα με την εφαρμογή, η απεικόνιση της μαγνητικής ροής μπορεί να είναι μονοκατευθυντική, δηλαδή η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου ή της μαγνητικής επαγωγής να καθορίζεται επακριβώς, αλλά το μέγεθος να αλλάζει συνεχώς. Σε άλλες εφαρμογές, π.χ. σε στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές, ένα σημαντικό τμήμα των μαγνητικών πεδίων έχει περιστροφικό χαρακτήρα, δηλαδή το μέγεθος, όπως και η διεύθυνση, του διανύσματος του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής μεταβάλλεται συνεχώς.

Η μοντελοποίηση της υστέρησης χειρίζεται το πρόβλημα του πώς να κατασκευαστούν (προβλεφθούν) οι καμπύλες μετάβασης, οι οποίες αντιστοιχούν σε κάθε αλλαγή του μαγνητικού πεδίου H. Παρά την ποικιλία χαρακτηριστικών ανάμεσα σε διαφορετικά μαγνητικά υλικά, μερικά γενικά γνωρίσματα παρατηρούνται στις διαδικασίες μαγνήτισής τους, τα οποία μπορούν να ληφθούν ως κανόνες. Θεωρώντας τις καμπύλες υστέρησης στο σχ. 4.26, αυτοί οι πειραματικά επιβεβαιωμένοι κανόνες μπορούν να διατυπώθουν ως εξής:

- 1) Η διαδρομή κάθε καμπύλης μετάβασης (αντιστροφής) καθορίζεται κατά μοναδικό τρόπο από τις συντεταγμένες των σημείων αντιστροφής, από τα οποία πηγάζουν αυτές οι καμπύλες.
- 2) Αν κάθε σημείο 4 της καμπύλης 3-4-1 γίνει ένα νέο σημείο αντιστροφής, τότε η καμπύλη 4-5-3 που ξεκινάει στο σημείο 4 επιστρέφει στο αρχικό σημείο 3 («μνήμη-σημείου-επιστροφής»).
- 3) Αν το σημείο 5 της καμπύλης 4-5-3 γίνει το πιο πρόσφατο σημείο αντιστροφής και αν η καμπύλη μετάβασης 5-4 επεκταθεί πέρα από το σημείο

4, θα διέλθει από το τμήμα 4-1 της καμπύλης 3-4-1, σαν να μην υπήρχε καθόλου ο προηγούμενος κλειστός βρόχος 4-5-4 («ιδιότητα εξάλειψης»).



Σχήμα 4.26: Καμπύλες μετάβασης που επεξηγούν τις διαδικασίες μαγνήτισης υλικών.

4.2.1.2 Τροποποιημένο μοντέλο Preisach για την αναπαράσταση της υστέρησης

Στο μοντέλο Preisach εισάγεται η έννοια της συνάρτησης βάρους $\varphi(a,b)$, που παίρνει τιμές μη μηδενικές εντός των ορίων του κύριου βρόχου υστέρησης, ο οποίος αντιστοιχίζεται με ένα ισοσκελές τρίγωνο. Στο τροποποιημένο μοντέλο Preisach, η συνάρτηση βάρους $\varphi(a,b)$ θεωρείται ως το γινόμενο δύο ανεξάρτητων συναρτήσεων:

$$\varphi(a,b) = \varphi_1(a)\varphi_2(b) \quad (4.10)$$

Οι τιμές των συναρτήσεων βάρους $\varphi_1(a)$ και $\varphi_2(b)$ υπολογίζονται με τη βοήθεια μόνο της καμπύλης αρχικής μαγνήτισης και του κύριου βρόχου υστέρησης. Πιο συγκεκριμένα, διατρέχοντας το θετικό κλάδο της αρχικής καμπύλης μαγνήτισης, δηλαδή εφαρμόζοντας αυξανόμενο μαγνητικό πεδίο κατά βήματα Δa , ορίζεται ένα σύνολο εξισώσεων με αγνώστους τα $\varphi_1(a)$ και $\varphi_2(b)$, το οποίο σε διακριτή μορφή είναι:

$$\frac{1}{2Bs} \frac{B(i+1) - B(i-1)}{H(i+1) - H(i-1)} = \Delta b \phi_1(i) \sum_{j=-i}^{+i} \phi_2(j), \quad i=0, \dots, N \quad (4.11)$$

όπου N : το φάσμα διακριτοποίησης του τριγώνου Preisach.

Το αριστερό μέλος των εξισώσεων (4.11) αποτελείται από κανονικοποιημένες παραγώγους του B συναρτήσει του H , που συμβολίζονται ως $f(i)$.

Διατρέχοντας τώρα τον κατερχόμενο κλάδο του κύριου βρόχου, δηλαδή εφαρμόζοντας μειούμενο μαγνητικό πεδίο κατά βήματα Δb , ορίζεται ένα δεύτερο σύνολο εξισώσεων με αγνώστους τα $\phi_1(a)$ και $\phi_2(b)$, το οποίο σε διακριτή μορφή είναι:

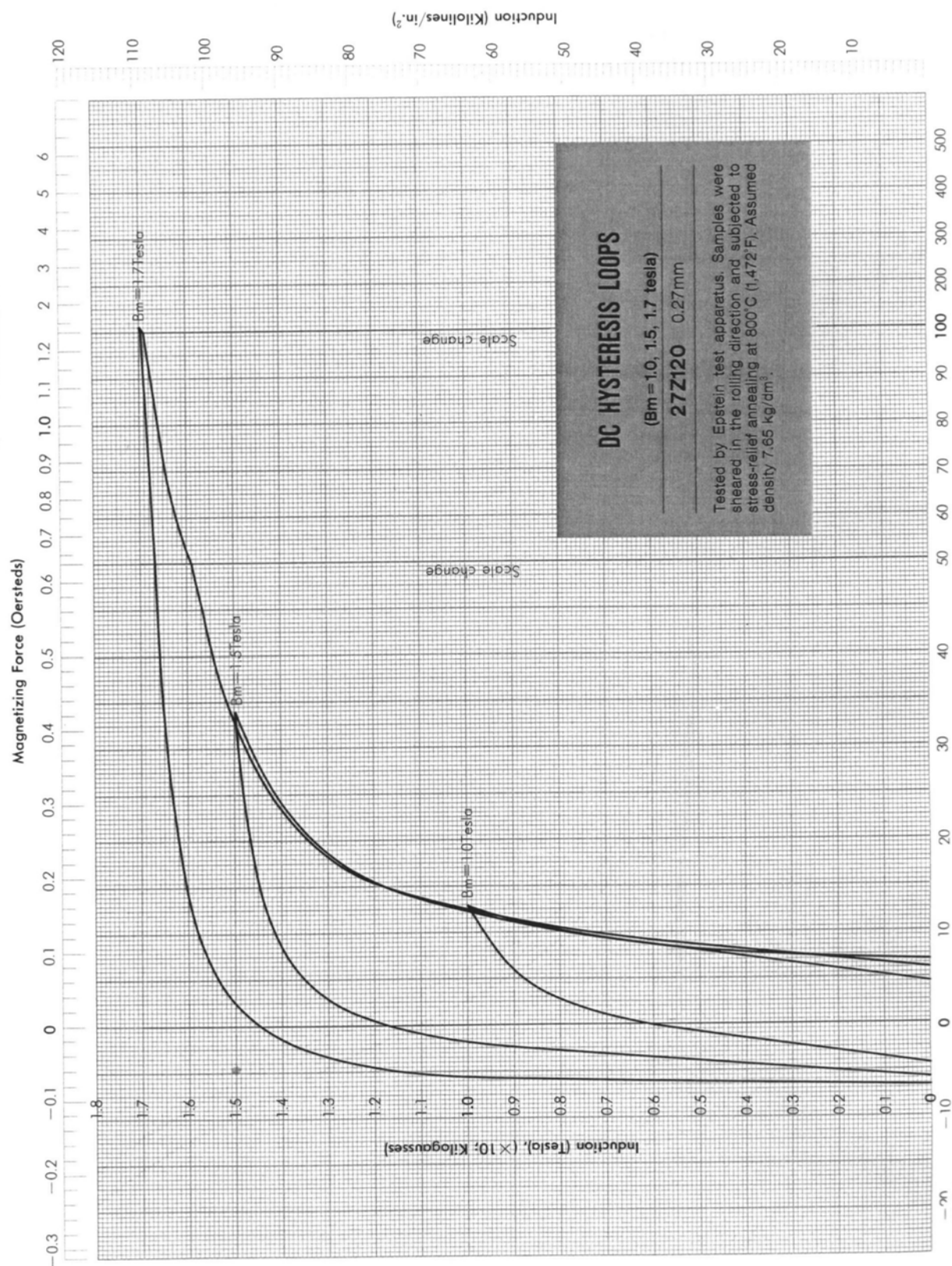
$$\frac{1}{2Bs} \frac{B(j+1) - B(j-1)}{H(j+1) - H(j-1)} = \Delta a \phi_2(j) \sum_{i=j}^N \phi_1(i), \quad j=N, \dots, 0 \quad (4.12)$$

$$\frac{1}{2Bs} \frac{B(j+1) - B(j-1)}{H(j+1) - H(j-1)} - f(-j) = \Delta a \phi_2(j) \sum_{i=|j|}^N \phi_1(i), \quad j=-1, \dots, -N \quad (4.13)$$

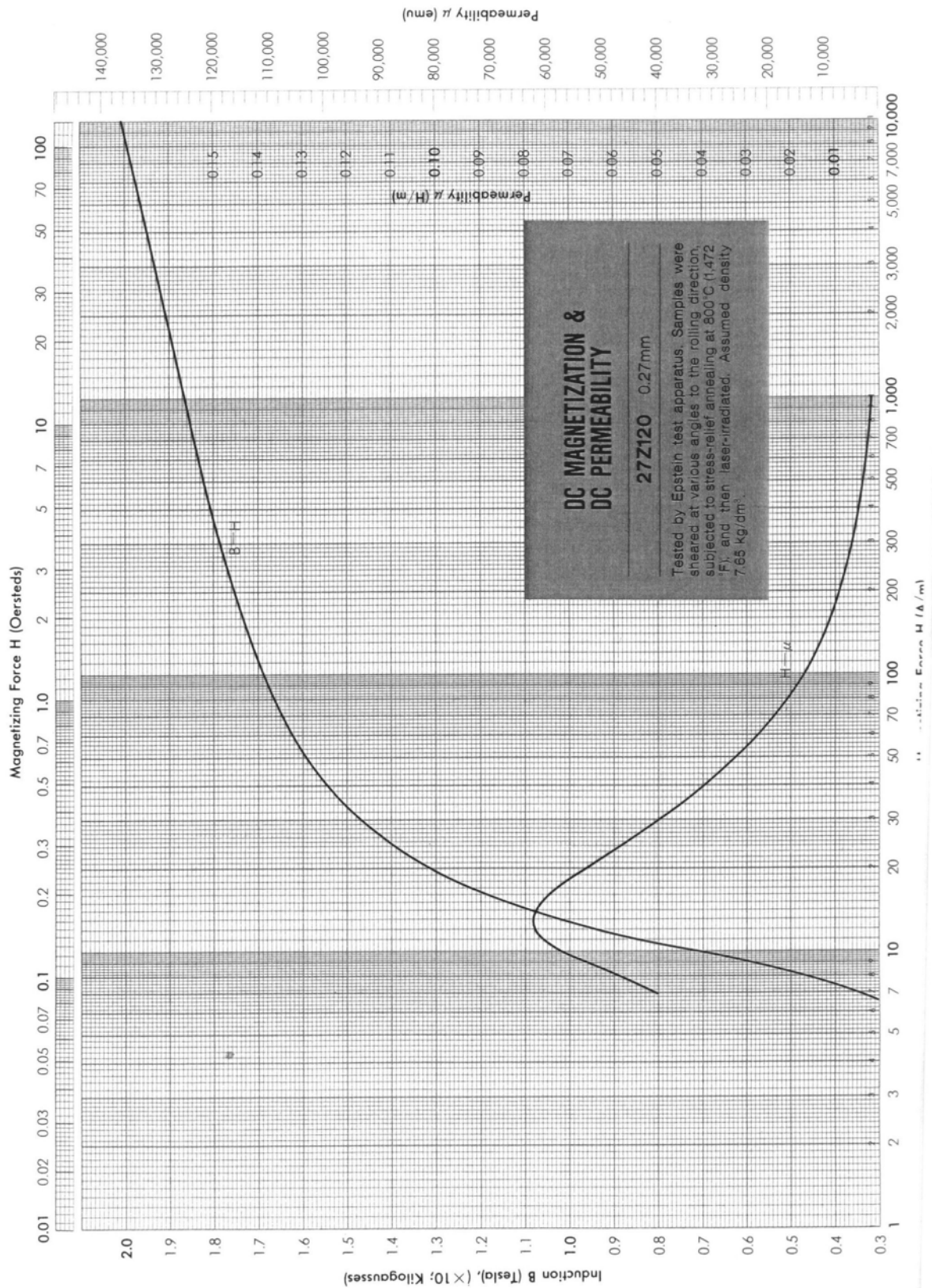
Το αριστερό μέλος των εξισώσεων (4.12) και (4.13) αποτελείται από κανονικοποιημένες παραγώγους του B συναρτήσει του H , που συμβολίζονται ως $g(j)$.

4.2.2 Προσδιορισμός των βαρών του μοντέλου Preisach-Neel

Το τροποποιημένο μοντέλο Preisach το οποίο αναπτύχθηκε παραπάνω εφαρμόστηκε σε μαγνητική λαμαρίνα 27Z120 (με πάχος ελασμάτων 0.27 mm). Επιλέχτηκε το υλικό αυτό, επειδή ανήκει στην κατηγορία των υλικών που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή μαγνητικών πυρήνων μετασχηματιστών. Επιπλέον, για το υλικό αυτό ήταν διαθέσιμοι ο μείζων και δύο ελάσσονες βρόχοι υστέρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.27. Στο σχήμα 4.28 εικονίζεται η καμπύλη πρώτης μαγνήτισης που αντιστοιχεί στο εξεταζόμενο υλικό.



Σχήμα 4.27: Βρόχοι υστέρησης για τη μαγνητική λαμαρίνα 27Z120.



Σχήμα 4.28: Καμπύλη πρώτης μαγνήτισης για τη μαγνητική λαμαρίνα 27Z120.

Με βάση τα σύνολα εξισώσεων που διατυπώθηκαν στην παράγραφο 4.2.1.2, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις για το υπόδειγμα της εργασίας, όπου $B_s=1,7$ T, $\Delta a=\Delta b=5$ A/m και $N=22$, κατ'αρχήν για την καμπύλη πρώτης μαγνήτισης:

$$\begin{aligned}
 5\varphi_1(0)\varphi_2(0) &= 0,010588235 \\
 5\varphi_1(1)[\varphi_2(-1)+\varphi_2(0)+\varphi_2(1)] &= 0,023235294 \\
 5\varphi_1(2)[\varphi_2(-2)+\varphi_2(-1)+\dots+\varphi_2(2)] &= 0,029264705 \\
 5\varphi_1(3)[\varphi_2(-3)+\varphi_2(-2)+\dots+\varphi_2(3)] &= 0,01617647 \\
 5\varphi_1(4)[\varphi_2(-4)+\varphi_2(-3)+\dots+\varphi_2(4)] &= 0,007205882 \\
 5\varphi_1(5)[\varphi_2(-5)+\varphi_2(-4)+\dots+\varphi_2(5)] &= 0,003823529 \\
 5\varphi_1(6)[\varphi_2(-6)+\varphi_2(-5)+\dots+\varphi_2(6)] &= 0,002647058 \\
 5\varphi_1(7)[\varphi_2(-7)+\varphi_2(-6)+\dots+\varphi_2(7)] &= 0,002205882 \\
 5\varphi_1(8)[\varphi_2(-8)+\varphi_2(-7)+\dots+\varphi_2(8)] &= 0,001764705 \\
 5\varphi_1(9)[\varphi_2(-9)+\varphi_2(-8)+\dots+\varphi_2(9)] &= 0,001323529 \\
 5\varphi_1(10)[\varphi_2(-10)+\varphi_2(-9)+\dots+\varphi_2(10)] &= 0,00117647 \\
 5\varphi_1(11)[\varphi_2(-11)+\varphi_2(-10)+\dots+\varphi_2(11)] &= 0,000882352 \\
 5\varphi_1(12)[\varphi_2(-12)+\varphi_2(-11)+\dots+\varphi_2(12)] &= 0,000735294 \\
 5\varphi_1(13)[\varphi_2(-13)+\varphi_2(-12)+\dots+\varphi_2(13)] &= 0,000735294 \\
 5\varphi_1(14)[\varphi_2(-14)+\varphi_2(-13)+\dots+\varphi_2(14)] &= 0,000588235 \\
 5\varphi_1(15)[\varphi_2(-15)+\varphi_2(-14)+\dots+\varphi_2(15)] &= 0,000441176 \\
 5\varphi_1(16)[\varphi_2(-16)+\varphi_2(-15)+\dots+\varphi_2(16)] &= 0,000441176 \\
 5\varphi_1(17)[\varphi_2(-17)+\varphi_2(-16)+\dots+\varphi_2(17)] &= 0,000441176 \\
 5\varphi_1(18)[\varphi_2(-18)+\varphi_2(-17)+\dots+\varphi_2(18)] &= 0,000294117 \\
 5\varphi_1(19)[\varphi_2(-19)+\varphi_2(-18)+\dots+\varphi_2(19)] &= 0,000294117 \\
 5\varphi_1(20)[\varphi_2(-20)+\varphi_2(-19)+\dots+\varphi_2(20)] &= 0,000294117 \\
 5\varphi_1(21)[\varphi_2(-21)+\varphi_2(-20)+\dots+\varphi_2(21)] &= 0,000441176 \\
 5\varphi_1(22)[\varphi_2(-22)+\varphi_2(-21)+\dots+\varphi_2(22)] &= 0,000441176
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Οι εξισώσεις τώρα για τον κατερχόμενο κλάδο του κύριου βρόχου είναι οι ακόλουθες:

$$\begin{aligned}
 5\varphi_2(22)\varphi_1(22) &= 0,000147058 \\
 5\varphi_2(21)[\varphi_1(21)+\varphi_1(22)] &= 0 \\
 5\varphi_2(20)[\varphi_1(20)+\varphi_1(21)+\varphi_1(22)] &= 0,000147058 \\
 5\varphi_2(19)[\varphi_1(19)+\varphi_1(20)+\dots+\varphi_1(22)] &= 0,000294117 \\
 5\varphi_2(18)[\varphi_1(18)+\varphi_1(19)+\dots+\varphi_1(22)] &= 0,000147058 \\
 5\varphi_2(17)[\varphi_1(17)+\varphi_1(18)+\dots+\varphi_1(22)] &= 0,000147058 \\
 5\varphi_2(16)[\varphi_1(16)+\varphi_1(17)+\dots+\varphi_1(22)] &= 0,000294117
 \end{aligned} \tag{4.15a}$$

$$\begin{aligned}
&5\varphi_2(15)[\varphi_1(15)+\varphi_1(16)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000147058 \\
&\quad 5\varphi_2(14)[\varphi_1(14)+\varphi_1(15)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&5\varphi_2(13)[\varphi_1(13)+\varphi_1(14)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000294117 \\
&5\varphi_2(12)[\varphi_1(12)+\varphi_1(13)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000294117 \\
&\quad 5\varphi_2(11)[\varphi_1(11)+\varphi_1(12)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&5\varphi_2(10)[\varphi_1(10)+\varphi_1(11)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000294117 \\
&\quad 5\varphi_2(9)[\varphi_1(9)+\varphi_1(10)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000294117 \\
&\quad 5\varphi_2(8)[\varphi_1(8)+\varphi_1(9)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000294117 \\
&\quad 5\varphi_2(7)[\varphi_1(7)+\varphi_1(8)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000588235 \\
&\quad 5\varphi_2(6)[\varphi_1(6)+\varphi_1(7)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000588235 \\
&\quad 5\varphi_2(5)[\varphi_1(5)+\varphi_1(6)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000588235 \\
&\quad 5\varphi_2(4)[\varphi_1(4)+\varphi_1(5)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000882352 \\
&\quad 5\varphi_2(3)[\varphi_1(3)+\varphi_1(4)+\dots+\varphi_1(22)]=0,00117647 \\
&\quad 5\varphi_2(2)[\varphi_1(2)+\varphi_1(3)+\dots+\varphi_1(22)]=0,001911764 \\
&\quad 5\varphi_2(1)[\varphi_1(1)+\varphi_1(2)+\dots+\varphi_1(22)]=0,003970588 \\
&5\varphi_2(0)[\varphi_1(0)+\varphi_1(1)+\dots+\varphi_1(22)]=0,011764705 \tag{4.15\beta} \\
&\quad 5\varphi_2(-1)[\varphi_1(1)+\varphi_1(2)+\dots+\varphi_1(22)]=0,0425 \\
&5\varphi_2(-2)[\varphi_1(2)+\varphi_1(3)+\dots+\varphi_1(22)]=0,038676471 \\
&\quad 5\varphi_2(-3)[\varphi_1(3)+\varphi_1(4)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-4)[\varphi_1(4)+\varphi_1(5)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-5)[\varphi_1(5)+\varphi_1(6)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-6)[\varphi_1(6)+\varphi_1(7)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-7)[\varphi_1(7)+\varphi_1(8)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&5\varphi_2(-8)[\varphi_1(8)+\varphi_1(9)+\dots+\varphi_1(22)]=-0,000147057 \\
&\quad 5\varphi_2(-9)[\varphi_1(9)+\varphi_1(10)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&5\varphi_2(-10)[\varphi_1(10)+\varphi_1(11)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000147059 \\
&\quad 5\varphi_2(-11)[\varphi_1(11)+\varphi_1(12)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-12)[\varphi_1(12)+\varphi_1(13)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-13)[\varphi_1(13)+\varphi_1(14)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&5\varphi_2(-14)[\varphi_1(14)+\varphi_1(15)+\dots+\varphi_1(22)]=-0,000147058 \\
&\quad 5\varphi_2(-15)[\varphi_1(15)+\varphi_1(16)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&5\varphi_2(-16)[\varphi_1(16)+\varphi_1(17)+\dots+\varphi_1(22)]=0,000147059 \\
&\quad 5\varphi_2(-17)[\varphi_1(17)+\varphi_1(18)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-18)[\varphi_1(18)+\varphi_1(19)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-19)[\varphi_1(19)+\varphi_1(20)+\dots+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-20)[\varphi_1(20)+\varphi_1(21)+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-21)[\varphi_1(21)+\varphi_1(22)]=0 \\
&\quad 5\varphi_2(-22)\varphi_1(22)=0
\end{aligned}$$

Λόγω προβλημάτων σύγκλισης στην προσπάθεια επίλυσης των μη γραμμικών εξισώσεων (4.14) και (4.15), προτιμήθηκε η γραφική μέθοδος προσδιορισμού των βαρών του υποδείγματος Preisach-Neel, [4.10]. Σύμφωνα με αυτήν, στο τρίγωνο των βαρών Preisach, το άθροισμα των βαρών κάθε στήλης i , $i=0,\dots,21$, δίνεται από τη σχέση:

$$\sum_{j=1}^{2i+1} x_{i+1,j} = \frac{B_{i+1} - B_i}{2B_s \Delta a} \quad (4.16)$$

όπου B_i η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στην καμπύλη πρώτης μαγνήτισης στο i -οστό σημείο διακριτοποίησης, με το μηδενικό σημείο στον άξονα των H να είναι το 0 και $x_{i+1,j} = \varphi(i,j-i-1)$.

Το βάρος $x_{i+1,j}$ δίνεται, ανάλογα με την περίπτωση, με μία από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$1) \ x_{i+1,j} = \frac{B_{i+1,j} - B_{i+1,j-1}}{2B_s \Delta a}, \quad (4.17)$$

για $i=1,\dots,21$ και $j=i+1,\dots,2i+1$, όπου $B_{i+1,j}$ η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στον κατερχόμενο κλάδο του $(i+1)$ -οστού βρόχου υστέρησης για το j -οστό σημείο διακριτοποίησης του κλάδου, με το πρώτο σημείο στον άξονα των H να είναι το 0.

$$2) \ x_{i+1,j} = \sum_{j=1}^{2i+1} x_{i+1,j} - \sum_{j=i+1}^{2i+1} x_{i+1,j}, \text{ για } i=1,\dots,21 \text{ και } j=i. \quad (4.18)$$

$$3) \ x_{i+1,j} = 0, \text{ για } i=2,\dots,21 \text{ και } j=1,\dots,i-1. \quad (4.19)$$

Με τη χρήση των εξισώσεων (4.16) έως (4.19), προέκυψε το τρίγωνο βαρών Preisach του σχήματος 4.29 (για καλύτερη ευκρίνεια των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται χωρισμένο σε δύο τμήματα).

												0
										0,00011765	0,00017647	
									0,00017647	0,00017647	0,00041176	
								0,00011765	0,00041176	0,00088235	0,00088235	
							0,00023529	0,00047059	0,00058824	0,00076471	0,001	
					0,00141176	0,00064706	0,00088235	0,00117647	0,00123529	0,00117647	0,00117647	
				0	0,00064706	0,00088235	0,00088235	0,00117647	0,00117647	0,00117647	0,00105882	
			0,00058824	0,00123529	0,00170588	0,00117647	0,00117647	0,00105882	0,00117647	0,00117647	0,00117647	
		0,00117647	0,00223529	0,00170588	0,00117647	0,00117647	0,00170588	0,00170588	0,00170588	0,00170588	0,00188235	
	0,00323529	0,00352941	0,00341176	0,00294118	0,00211765	0,00205882	0,00270588	0,00241176	0,00247059	0,00252941		
	0,00735294	0,00647059	0,00529412	0,00523529	0,00441176	0,00388235	0,00411765	0,00429412	0,00470588	0,00411765	0,00411765	
0,01058824	0,01970588	0,01264706	0,01117647	0,01147059	0,01088235	0,01094118	0,00852941	0,007	0,00647059	0,00647059	0,00617647	
	0,00882353	0,00029412	-0,0114706	-0,0182353	-0,0182353	-0,0185294	-0,0173529	-0,0176471	-0,0188235	-0,0191176	-0,02	
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	
				0	0	0	0	0	0	0	0	
					0	0	0	0	0	0	0	
						0	0	0	0	0	0	
							0	0	0	0	0	
								0	0	0	0	
									0	0	0	
										0	0	
											0	
												0

Σχήμα 4.29 (α): Τρίγωνο βαρών μοντέλου Preisach για τη μαγνητική λαμαρίνα 27Z120.

Σχήμα 4.29 (β): Τρίγωνο βαρών μοντέλου Preisach για τη μαγνητική λαμαρίνα 27Z120.

4.2.3 Αξιοποίηση μοντέλου Preisach-Neel

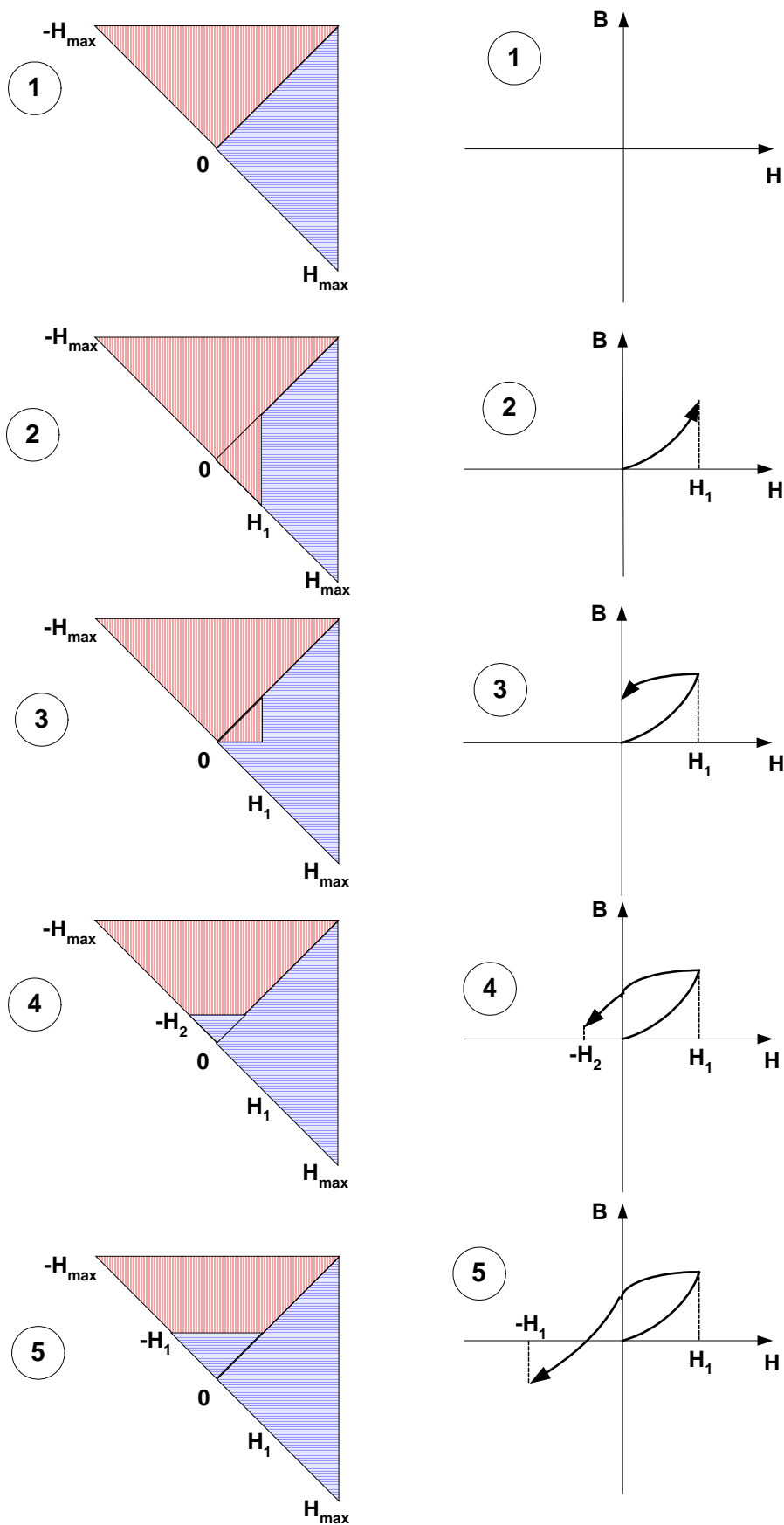
4.2.3.1 Υπολογισμός βρόχων υστέρησης υλικού με τη χρήση του τριγώνου Preisach-Neel

Το τρίγωνο του σχήματος 4.29 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των βρόχων υστέρησης του υλικού του πυρήνα. Η διαδικασία υπολογισμού περιγράφεται στο σχήμα 4.30, όπου φαίνεται ο τρόπος μετάβασης από το ένα στο άλλο σημείο του εξεταζόμενου βρόχου και η αντιστοιχία του με τη μεταβολή των βαρών του τριγώνου. Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιείται βήμα μεταβολής για το H ίσο με το βήμα διακριτοποίησης που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των βαρών του τριγώνου ($\Delta a = \Delta b = 5 \text{ A/m}$), ενώ το B που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα υπολογίζεται αθροίζοντας τα βάρη του τριγώνου στα οποία πραγματοποιείται μεταβολή της κατάστασης μαγνήτισης (δηλαδή τα βάρη του τριγώνου που μεταβάλλονται από μπλε σε κόκκινα και αντίστροφα σε κάθε μετάβαση, ή αλλιώς τα βάρη των οποίων η διαγράμμιση μεταβάλλεται από οριζόντια σε κατακόρυφη και αντίστροφα). Το τρίγωνο του σχήματος 4.30 αποτελείται από δύο όμοια τρίγωνα: το κάτω δεξιά (μπλε χρώμα, οριζόντια διαγράμμιση) είναι το τρίγωνο του σχήματος 4.29, ενώ το πάνω αριστερά (κόκκινο χρώμα, κάθετη διαγράμμιση) είναι το συμμετρικό του ως προς τη διαγώνιο του συνολικού τριγώνου. Στο σχήμα 4.31 φαίνονται οι υπολογισμένοι βρόχοι υστέρησης για το εξεταζόμενο υλικό. Για λόγους ευκρίνειας απεικονίζονται μόνο οι βρόχοι που αντιστοιχούν σε $H=10, 40, 60$ και 100 A/m .

4.2.3.2 Βελτίωση αναπαράστασης τοπικών ιδιοτήτων υλικού πυρήνα με χρήση του τριγώνου Preisach-Neel

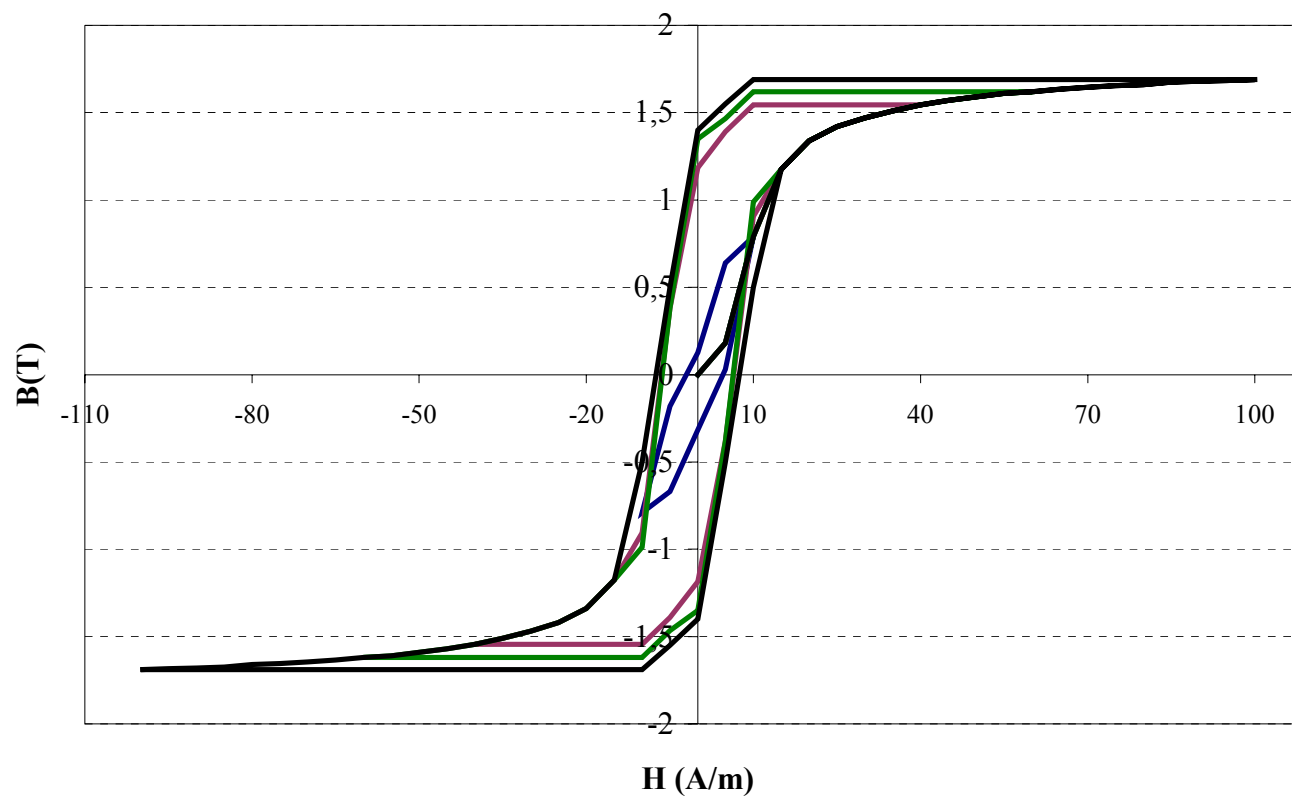
Το μοντέλο που εφαρμόστηκε στην περίπτωση της μαγνητικής λαμαρίνας που εξετάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο είχε στόχο τη συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων της, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών σιδήρου. Αυτό σημαίνει ότι τα βάρη του μοντέλου του σχήματος 4.29 μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με την κατεργασία που υφίσταται το υλικό κατά τη διαμόρφωσή του σε πυρήνες, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις της στα τοπικά χαρακτηριστικά του.

Μια τέτοια ανάλυση, σε συνδυασμό με τα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων της παραγράφου 4.1, θα αυξήσει σημαντικά την ικανότητα της μεθόδου να προβλέψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις απώλειες πυρήνα μετασχηματιστών, ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία της.



Σχήμα 4.30: Τρόπος εξαγωγής βρόχων υστέρησης υλικού με χρήση του μοντέλου του σχήματος 4.29

Βρόχοι υστέρησης που υπολογίστηκαν με τη χρήση του τριγώνου
Preisach-Neel
(για $H=10, 40, 60$ και 100 A/m)



Σχήμα 4.31: Βρόχοι υστέρησης υλικού που προέκυψαν με χρήση του μοντέλου του σχήματος 4.29

4.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] A. Τσιβγούλη, «Μελέτη γεωμετρίας Μετασχηματιστή με Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων». Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Οκτώβριος 2004.
- [4.2] P. P. Silvester, R. L. Ferrari, “*Finite Elements for electrical engineers*”, Cambridge University Press.
- [4.3] G. P. Nikishkov, “*Introduction to the Finite Element Method*”. Lecture Notes, UCLA, 2001.
- [4.4] A. G. Kladas, J. A. Tegopoulos, “A new scalar potential formulation for 3D Magnetostatics necessitating no source field calculation”. *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 28, No.2, March 1992, pp. 1103-1106.
- [4.5] D. Meeker, “*Finite Element Method Magnetics – Version 3.0 – User’s Manual*”. March 10, 2001.
- [4.6] A. B. J. Reece, “*Finite Element Methods in Electrical Power Engineering*”. Oxford University Press, May 2000.
- [4.7] 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.
- [4.8] J. Prousalidis, N. D. Hatzargyriou, A. G. Kladas: "Iron lamination efficient representation in power transformers", *Proceedings of the 1st Japanese-Greek Joint Workshop on Superconductivity and Magnetic Materials*, pp. 171-176, Athens, 1999.
- [4.9] J.M. Prousalidis, N.D. Hatzargyriou, B.C. Papadimas: "Representation of hysteresis in 3-phase transformer models for electromagnetic transients", *IEE Proceedings in Electric Power Applications*, Vol. 143, pp. 331-338, 1996.
- [4.10] A. Kladas, “*Etude du Couple et des Pertes Fer d’une Machine a Reluctance Variable*”, rapport de Stage de DEA, laboratoire des Universites Paris VI et IX, Orsay 1983 (France).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια, αναφέρονται τα σημεία προαγωγής της επιστήμης στα οποία συνέβαλε ενώ προτείνονται μερικά θέματα για επιπλέον διερεύνηση τα οποία θα ανέπτυσαν περαιτέρω την εργασία η οποία έχει ήδη πραγματοποιηθεί.

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι απώλειες σιδήρου (κενού φορτίου) σε μετασχηματιστές ισχύος. Η μελέτη έγινε τόσο με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όσο και μέσω συστηματικής ανάλυσης των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών (βρόχοι υστέρησης) με αναλυτικές μεθοδολογίες και ειδικότερα με το μοντέλο Preisach-Neel.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των απωλειών με τη διδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος εφαρμόστηκε σε τρεις μετασχηματιστές διαφορετικής ισχύος (1000, 400 και 630 kVA) και τα αποτελέσματά της συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές του κατασκευαστή. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μετρημένες τιμές για τους τρεις μετασχηματιστές προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση της τιμής των απωλειών που δίνει η μέθοδος, η τιμή της οποίας, από μία πυκνότητα πλέγματος και μετά, είναι σχεδόν σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι για τη λήψη αξιόπιστων αποτελεσμάτων απαιτείται η χρήση πυκνού πλέγματος, με αριθμό κόμβων άνω των 60.000.
- Στις δύο από τις τρεις περιπτώσεις μετασχηματιστών που μελετήθηκαν εμφανίστηκε σημαντική απόκλιση από τις μετρήσεις, γεγονός που οφείλεται σε δύο βασικούς λόγους:

- ο η καμπύλη ειδικών απωλειών αντιστοιχεί σε υλικό πριν την κατεργασία του για τη διαμόρφωση των πυρήνων του μετασχηματιστή. Έτσι, κατά την παραπάνω ανάλυση αγνοείται η μηχανική και η θερμική κατεργασία για την διαμόρφωση των πυρήνων, η οποία τροποποιεί σημαντικά τα αρχικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας και κατ' επέκταση και το επίπεδο των απωλειών σιδήρου και
 - ο η αναπαράσταση των υλικών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται σε μακροσκοπική κλίμακα με αποτέλεσμα να ομογενοποιούνται ή να αγνοούνται φαινόμενα που διαδραματίζονται σε μικροσκοπική κλίμακα στα χρησιμοποιούμενα υλικά. Για το λόγο αυτό πολλές φορές η αναπαράσταση των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ατελής.
- Σε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις μετασχηματιστών εμφανίστηκε απόκλιση μικρότερη του 5% από τις μετρημένες απώλειες σιδήρου. Ωστόσο η καλή ακρίβεια της μεθόδου σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να ληφθεί ως γενικό συμπέρασμα, δεδομένου ότι στις υπόλοιπες περιπτώσεις εμφανίστηκε μεγάλη διακύμανση και σημαντικό μέγεθος σφάλματος.

Οι αποκλίσεις που εμφανίστηκαν κατά τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι είναι αναγκαία η συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων των υλικών με αναλυτικές μεθοδολογίες με σκοπό την προσαρμογή τους για την κατά περιοχές εφαρμογή τους σε μοντέλα μακροσκοπικής κλίμακας (όπως είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Γι' αυτό το λόγο, στη συνέχεια της εργασίας, αναλύεται ο τρόπος συστηματικής μελέτης των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού με τη χρήση του μοντέλου υστέρησης Preisach-Neel. Το μοντέλο εφαρμόζεται στην ανάλυση των ιδιοτήτων ενός τύπου μαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών σιδήρου.

5.2 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

Τα κύρια σημεία συμβολής της παρούσας διπλωματικής εργασίας στην προαγωγή της επιστήμης μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- Διερεύνηση της ακρίβειας της διδιάστατης μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων κατά την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου σε μετασχηματιστές ισχύος,

- Ανάπτυξη μοντέλου Preisach-Neel για την ανάλυση τοπικών ιδιοτήτων του υλικού της μαγνητικής λαμαρίνας των μετασχηματιστών ισχύος,
- Βελτίωση της μεθοδολογίας μοντελοποίησης των μετασχηματιστών μέσω λεπτομερούς αναλύσεως του μαγνητικού πεδίου με χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με αναπαράσταση των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού του πυρήνα.

5.3 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία μπορούν να επεκταθούν και να τροποποιηθούν κατάλληλα.

Το μοντέλο που εφαρμόστηκε στην περίπτωση της μαγνητικής λαμαρίνας που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 4 είχε στόχο τη συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων της, έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών σιδήρου. Αυτό σημαίνει ότι τα βάρη του μοντέλου του τριγώνου Preisach μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με την κατεργασία που υφίσταται ο σίδηρος κατά τη διαμόρφωσή του σε πυρήνες, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις της στα τοπικά χαρακτηριστικά του.

Μια τέτοια ανάλυση, σε συνδυασμό με τα μοντέλα των πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4, θα αυξήσει σημαντικά την ικανότητα της μεθόδου να προβλέψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις απώλειες πυρήνα μετασχηματιστών, ενισχύοντας έτσι την αξιοπιστία της.