

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΙΚΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΑΡΙΝΑ Α. ΤΣΙΛΗ Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΚΛΑΔΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Αθήνα, Ιούνιος 2005



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος Εργαστηρίο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΙΚΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μαρίνα Α. Τσίλη

Συμβουλευτική Επιτροπή : Αντώνιος Γ. Κλαδάς (επιβλέπων) Πολυξένη Ι. Γιαννοπούλου-Λασκαράτου Στέφανος Ν. Μανιάς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 21^{η} Ιουνίου 2005

Π. Γεωργιλάκης Επίκ. Καθηγ. Πολυτεχνείου Κρήτης

Σ. Μανιάς Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2005

Π. Γιαννοπούλου-Λασκαράτου Επίκ. Καθηγ. ΕΜΠ

Αναπλ. Καθηγ. Ε.Μ.Π.

M. Gawonous

Σ. Παπαθανασίου Λέκτορας ΕΜΠ

Θ. ΤσιμπούκηςΚαθηγητής ΑΠΘ

Ν. Χατζηαργυρίου
 Καθηγητής ΕΜΠ

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

Copyright © Μαρίνα Α. Τσίλη, 2005. 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 διατριβή εξετάζεται η δημιουργία αριθμητικών μοντέλων για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος τριφασικών μετασχηματιστών ισχύος με τη χρήση τρισδιάστατων αριθμητικών τεχνικών και η προσαρμογή τους στην υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης. Η ανάπτυξη των μοντέλων επικεντρώνεται αρχικά στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης μέσω της πρόβλεψης του πεδίου σκέδασης των τυλιγμάτων τους κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης.

Η ανάπτυξη των μοντέλων γίνεται με στόχο την ενσωμάτωσή τους στη βιομηχανική διαδικασία παραγωγής μετασχηματιστών. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου πραγματοποιείται σύγκριση διαφόρων αριθμητικών μοντέλων αναπαράστασης του μετασχηματιστή, με βάση τα αποτελέσματα και την υπολογιστική απόδοση των οποίων επιλέγεται το καταλληλότερο για την πρόβλεψη των παραμέτρων και τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην κατάλληλη διαμόρφωση των παραμέτρων των τρισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύσσονται, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια με το ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό κόστος.

Τα μοντέλα που αναπτύσσονται επιβεβαιώνονται πειραματικά τόσο μέσω τοπικών πεδιακών μετρήσεων σε κατασκευασμένους τριφασικούς μετασχηματιστές τύπου τυλιχτού πυρήνα, κατά τα διάρκεια της δοκιμής βραχυκύκλωσης, όσο και με σύγκρισή των παραμέτρων που υπολογίζονται με τις μετρημένες παραμέτρους που προσδιορίζονται από τις δοκιμές του κατασκευαστή. Στη συνέχεια, η ισχύς τους γενικεύεται με εφαρμογή σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών, διαφορετικής ισχύος, συνδεσμολογίας τυλιγμάτων και επιπέδων τάσης πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, κατά την οποία αποδεικνύεται η δυνατότητά τους να προβλέψουν τα χαρακτηριστικά του ισοδυνάμου κυκλώματος με μεγάλη ακρίβεια.

Εκτός από τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, παρουσιάζονται και μοντέλα μεικτών τεχνικών, τα οποία, λόγω της γεωμετρικής διαμόρφωσης του μετασχηματιστή (μεγάλες περιοχές με αέρα, περιοχές με μη γραμμικά υλικά) εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης της γεωμετρίας τους. Επιπλέον, πραγματοποιείται σύζευξη των μεικτών τεχνικών με κατάλληλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, για την επιλογή βέλτιστης διαμόρφωσης γεωμετρικών χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων μετασχηματιστών.

Η εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων επεκτείνεται στη μελέτη των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών, με υπολογισμό του πεδίου κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (πραγματοποιώντας κατάλληλες τροποποιήσεις για τη θεώρηση του μαγνητικού κορεσμού), αποτελώντας τη βάση για την ανάπτυξη ενός ενιαίου μοντέλου πρόβλεψης των χαρακτηριστικών τους, με τη χρήση προηγμένων τεχνικών ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου.

Λέξεις – Κλειδιά

Μετασχηματιστές Ισχύος, Βελτιστοποίηση Σχεδίασης, Τρισδιάστατες Αριθμητικές Μέθοδοι, Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, Μέθοδος Οριακών Στοιχείων, Τάση Βραχυκύκλωσης, Μαγνητοστατικά Προβλήματα, Απώλειες Κενού Φορτίου.

ABSTRACT

The present thesis concerns the development of numerical models for the calculation of the equivalent circuit parameters of three-phase power transformers, with the use of threedimensional numerical techniques and their adaptation to the existing design methodology. In the first part of the thesis, the model development focuses on the short-circuit impedance calculation through estimation of the windings leakage field during short-circuit test.

These numerical models are developed in order to be incorporated to the industrial transformer production process. For the achievement of this goal, various numerical models are compared, and the most suitable one (in terms of accuracy and computational efficiency) is chosen for the prediction of the transformer operational parameters and their design optimization. Special attention is given to the proper configuration of the developed three-dimensional finite element models, in order to obtain the maximum possible accuracy with the least possible computational cost.

The numerical models are verified experimentally through local field measurements, conducted on constructed three-phase, wound core, power transformers, during short-circuit test, and through comparison of the calculated parameters with the measured ones defined during the tests performed by the manufacturer. Consequently, their validity is generalized by application to several cases of transformers, of different power ratings, windings connection and primary and secondary voltage levels. The results of this application prove their ability to accurately predict the equivalent circuit parameters.

Apart from the three-dimensional finite element models, hybrid finite element – boundary element models are also developed. These models present important advantages during the transformer geometry optimization process, mainly due to the transformer geometrical configuration, comprising large parts of air and areas with non-linear materials. Moreover, these hybrid numerical techniques are coupled to proper optimization algorithms, for the optimal choice of the geometrical parameters of the considered transformers.

The application of the numerical models is expanded to the transformer no load loss calculation, through estimation of the magnetic field under open-circuit test (after the implementation of proper modifications for the consideration of magnetic saturation), consisting the base for the creation of a uniform model for the prediction of their operating characteristics, based on advanced numerical field analysis methods.

Keywords

Power Transformers, Design Optimization, Three-Dimensional Numerical Methods, Finite Element Method, Boundary Element Method, Short-Circuit Impedance, Magnetostatics, No Load Loss.

Στη μητέρα μου, Πολυξένη.

προλογος

Η διατριβή αυτή άρχισε να εκπονείται το Σεπτέμβριο του 2001 και ολοκληρώθηκε το Μάιο του 2005 στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή κ. Αντωνίου Κλαδά.

Στο τέλος της τετραετούς αυτής προσπάθειας, θα ήθελά να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνετέλεσαν στην ολοκλήρωση της διατριβής, με όλους τους δυνατούς τρόπους στήριξης.

Αρχικά, στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, από την πρώτη στιγμή ανάθεσης της διατριβής και τη διαρκή συμπαράστασή του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της. Η στενή παρακολούθηση και το αμέριστο ενδιαφέρον σε κάθε βήμα της ερευνητικής πορείας ήταν καταλυτικός παράγοντας για την κατανόηση των επιμέρους στόχων και την περαιτέρω εξέλιξη και εμβάθυνση σε κάθε έναν από τους γνωστικούς τομείς που εμπίπτουν στο αντικείμενο της διατριβής. Το γεγονός ότι η εμπιστοσύνη και ενθάρρυνση του ήταν δεδομένη από την πρώτη ουσιαστικά ημέρα της εκπόνησης της διατριβής αυτής συνέβαλλε καθοριστικά στην επίτευξη όλων των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μέχρι την ολοκλήρωσή της. Στα πλαίσια αυτής της συνεργασίας, θα ήθελα ακόμη να τονίσω τη σημασία της ηθικής του συμπαράστασης στα πλαίσια των δυσκολιών και αντιξοοτήτων που αντιμετωπίστηκαν κατά την υλοποίηση των επιμέρους ερευνητικών στόχων.

Επιθυμώ επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Στέφανο Μανιά, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για την επιστημονική και ηθική βοήθεια και υποστήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της διατριβής καθώς και σε όλους τους τομείς των δραστηριοτήτων μου ως μεταπτυχιακής φοιτήτριας του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος. Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης να εκφράσω στην Επ. Καθηγήτρια κ. Πολυξένη Γιαννοπούλου, μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, για το διαρκές ενδιαφέρον και συμπαράστασή της σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διατριβής, τον Ομ. Καθηγητή κ. Ιωάννη Τεγόπουλο, για τη βοήθεια και συνεχή συμπαράσταση και ενθάρρυνσή του και τον κ. Θ. Τσιμπούκη, Καθηγητή ΑΠΘ, για το θερμό ενδιαφέρον του για την παρούσα διατριβή καθώς και τις καίριες παρατηρήσεις και διορθώσεις του στο τελικό κείμενο.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να εκφράσω στον κ. Παύλο Γεωργιλάκη, Επικουρο Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, ο οποίος συνέβαλλε ουσιαστικά και με όλους τους δυνατούς τρόπους στο ξεκίνημα, την υλοποίηση και την περάτωση της διατριβής, τόσο με τις επιστημονικές του γνώσεις και την εμπειρία του στον τομέα των μετασχηματιστών ισχύος, όσο και με τη δημιουργία όλων των απαραίτητων προϋποθέσεων για την άψογη συνεργασία με τη Σνεντερ Ελεκτρικ ΑΕ, και την ηθική του στήριξη σε κάθε βήμα της ερευνητικής πορείας αυτών των χρόνων.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τον Ομ. Καθηγητή κ. Μιχάλη Παπαδόπουλο, η συμβολή του οποίου υπήρξε καθοριστική για το ξεκίνημα της διατριβής αυτής ενώ η διαρκής παρουσία και το ενδιαφέρον του συνετέλεσαν στην ολοκλήρωσή της. Εξίσου καθοριστική ήταν και η συμβολή του Λέκτορα κ. Σταύρου Παπαθανασίου, ο οποίος υπήρξε μόνιμος συμπαραστάτης στην προσπάθεια όλων αυτών των χρόνων, παρέχοντας κάθε επιστημονική και ηθική βοήθεια τόσο στα πλαίσια της διατριβής όσο και σε όλα τα βήματα των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Η συμβολή των στελεχών της Σνεντέρ Ελεκτρίκ ΑΕ, η οποία παρείχε μαζί με τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας συγχρηματοδότηση ερευνητικού προγράμματος που βρισκόταν κοντά στην περιοχή της παρούσας διατριβής, ήταν καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση και την επιστημονική αρτιότητά της: Ο κ. Δημήτρης Παπαρήγας, Διευθυντής Βιομηχανικής Λειτουργίας, με τη διαρκή ηθική και υλική υποστήριξη που παρείχε κατέστησε δυνατή την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της έρευνας και την εφαρμογή τους στη βιομηχανική παραγωγή. Ο κ. Θανάσης Σουφλάρης, Προϊστάμενος Μελετών Μετασχηματιστών, με τη στενή συνεργασία και καθοδήγησή του συνέβαλε ουσιαστικά στην υλοποίηση των ερευνητικών στόχων της διατριβής. Η παροχή κάθε είδους αναγκαίων τεχνικών πληροφοριών, η ενεργός συμμετοχή του σε κάθε βήμα της έρευνας, το αμέριστο ενδιαφέρον και συμπαράσταση σε όλους τους τομείς καθώς και το κλίμα συνεργασίας το οποίο καλλιέργησε σε όλη την πορεία της διατριβής υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες, στους οποίους οφείλεται αναμφισβήτητα η επιτυχής ολοκλήρωσή της. Ο κ. Διονύσης Σπηλιόπουλος, Πρόεδρος και Διευθύνων Σύμβουλος, με την άψογη συνεργασία και το ενδιαφέρον του για την πορεία του ερευνητικού έργου επέτρεψε τη δημιουργία ενός ιδανικού περιβάλλοντος συνεργασίας. Οι κκ. Κώστας Αναστασίου και Γιώργος Περρής προσέφεραν επίσης κάθε δυνατή βοήθεια καθιστώντας εφικτό το δύσκολο κομμάτι της πειραματικής επιβεβαίωσης των προτεινόμενων μεθόδων.

Δε θα μπορούσα να παραλέιψω τις ευχαριστίες μου για τη συμπαράσταση των συναδέλφων μου κ. Α. Χανιώτη, Γ. Καλοκύρη και Κ. Τάτη, του κ. Π. Ζάννη καθώς και όλων των μελών ΔΕΠ, ΕΔΤΠ και υποψηφίων διδακτόρων του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα φιλικά και συγγενικά μου πρόσωπα, και ιδιαίτερα τον πατέρα μου Αντώνιο, τον αδερφό μου Χρήστο και τη θεία μου Αικατερίνη, οι οποίοι με στήριξαν απεριόριστα σε κάθε βήμα των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών σπουδών μου, καθιστώντας εφικτή την πραγματοποίηση των στόχων της πολύχρονης αυτής προσπάθειας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Ανάγκα	Ανάγκες που οδήγησαν στην πραγματοποίηση της έρευνας					
1.2	Ανασκ	Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας					
	1.2.1	Προσδιορισμός του πεδίου σκέδασης μετασχηματιστών 3					
	1.2.2	.2 Συμβολή αριθμητικών τεχνικών στην ανάλυση μαγνητικών πεδίων					
		1.2.2.1	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και μέθοδος πεπερασμένων διαφορών	5			
		1.2.2.2	Μέθοδος οριακών στοιχείων	6			
		1.2.2.3	Μεικτή μέθοδος πεπερασμένων – οριακών στοιχείων	7			
1.3	Αντικε	ίμενο έρευ	νας και συμβολή της διατριβής	7			
1.4	Περιεχόμενα της διατριβής						
1.5	Βιβλιο	γραφία		11			

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1	Εισαγω	ή					
2.2	Μέθοδα	ος των πεπερασμένων στοιχείων					
2.3	Επίλυσι	η μαγνητοσ	στατικών προβλημάτων	16			
	2.3.1	Εξισώσει	ς πεδίου	16			
	2.3.2	Οριακές α	συνθήκες	17			
		2.3.2.1	Διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό	17			
		2.3.2.2	Βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό	17			
2.4	Επίλυσι πεπερασ	η τρισδιάσ 5μένων στο	τατων μαγνητοστατικών προβλημάτων με τη μέθοδο των ηχείων	18			
	2.4.1	Χρήση τρισδιάστ	βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού κατά την επίλυση ατων μαγνητοστατικών προβλημάτων	18			
		2.4.1.1	Μέθοδος βασισμένη σε «ολικό» βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό	18			
		2.4.1.2	Μέθοδος βασισμένη σε «ανηγμένο» βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό	18			
		2.4.1.3	Μέθοδος βασισμένη σε συνδυασμό «ολικού» και «ανηγμένου» βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού	19			
		2.4.1.4	Μέθοδος βασισμένη σε συνδυασμό διανυσματικού ηλεκτρικού δυναμικού και βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού	19			
	2.4.2	Εξισώσει βαθμωτό	ουναμικου ς πεδίου με τη χρήση ειδικής μεθόδου βασισμένης στο μαγνητικό δυναμικό	20			
	2.4.3	Διακριτο <i>τ</i> μέθοδο τα	τοίηση των εξισώσεων πεδίου και αναπαράστασή τους στη ων πεπερασμένων στοιχείων	20			
		2.4.3.1	Συναρτήσεις μορφής	20			

		2.4.3.2	Αριθμ	μητική προσέγγιση	των εξισώσεων	του πεδίου	23
2.5	Μέθοδο	ς οριακών	στοιχε	είων			27
2.6	Επίλυση τρισδιάστατων μαγνητοστατικών προβλημάτων με τη μέθοδο των οριακών στοιχείων					27	
	2.6.1	Εξαγωγή	ολοκλ	ηρωτικής εξίσωσης			27
	2.6.2	Διακριτο	τοίηση	ι ολοκληρωτικής εξ	ίσωσης		29
2.7	Μεικτή	μέθοδος πα	επερασ	σμένων-οριακών στ	οιχείων		32
	2.7.1	Σύγκριση	μεθόδ	δων πεπερασμένων-	οριακών στοιχεί	ίων	32
	2.7.2	Πλεονεκτ	τήματα	ι συνδυασμού πεπερ	νασμένων-οριακ	ών στοιχείων	33
2.8	Επίλυση τρισδιάστατων μαγνητοστατικών προβλημάτων με τη μεικτή μέθοδο						
	πεπερασμένων-οριακών στοιχείων					34	
2.9	Βιβλιογρ	οαφία					37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

3.1	Εισαγα	<i>σαγωγ</i> ή					
3.2	Σύγκρι σε απλ	ιση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και της μεικτής τεχνικής .οποιημένη γεωμετρία μετασχηματιστή	40				
3.3	Επιβεβ θεωρία	βαίωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση της ας των ειδώλων	41				
3.4	Εξαγω [.] εξεταζ	Εξαγωγή μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για την αναπαράσταση του εξεταζόμενου μετασχηματιστή					
	3.4.1	Πραγματική γεωμετρία μετασχηματιστή	43				
	3.4.2	Γεωμετρία μοντέλου μετασχηματιστή	44				
		3.4.2.1 Διαστάσεις μοντέλου	46				
	3.4.3	Τρόπος υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης με τη χρήση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων					
	3.4.4	Αναπαράσταση των πηγών του μαγνητικού πεδίου (τυλιγμάτων)	50				
		3.4.4.1 Απλοποιημένη αναπαράσταση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή	50				
		3.4.4.2 Λεπτομερής αναπαράσταση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή	52				
3.5	Συμπερ	ράσματα	60				
3.6	Βιβλιο	γραφία	61				

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

4.1	Εισαγα	Εισαγωγή							
4.2	Πρώτη σειρά μετρήσεων								
	4.2.1	Μετασχηματιστές που μετρήσεων	χρησιμοποιήθηκαν	στην	πρώτη	σειρά	63		
	4.2.2	Περιγραφή μετρήσεων					63		

	4.2.3	Αποτελέσματα μετρήσεων	64				
4.3	Σύγκρι πεπερα	Σύγκριση πρώτης σειράς μετρήσεων με αποτελέσματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων					
	4.3.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων για το μετασχηματιστή 400 kVA	72				
	4.3.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων για το μετασχηματιστή 1000 kVA	79				
4.4	Δεύτερ	η σειρά μετρήσεων	84				
	4.4.1	Μετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε στη δεύτερη σειρά μετρήσεων					
	4.4.2	Περιγραφή μετρήσεων	84				
	4.4.3	Αποτελέσματα μετρήσεων	84				
4.5	Σύγκριση δεύτερης σειράς μετρήσεων με αποτελέσματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων						
	4.5.1	Αποτελέσματα πεδιακής ανάλυσης – σύγκριση με τις μετρήσεις					
	4.5.2	Εφαρμογή των βελτιώσεων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στους μετασχηματιστές της πρώτης σειράς μετρήσεων					
4.6	Συμπερ	ράσματα	108				
	4.6.1	Πρώτη σειρά μετρήσεων					
	4.6.2	Δεύτερη σειρά μετρήσεων					
4.7	Βιβλιο	γραφία	111				

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΓΕΝΙΚΕΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

5.1	Εισαγωγή						
5.2	Εφαρμα μετασχι	ιογή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων σε διάφορες περιπτώσεις χηματιστών					
5.3	Αποτελ	έσματα της	μεθοδολογίας σε άλλες περιπτώσεις μετασχηματιστών	115			
	5.3.1	Στοιχεία μ	ετασχηματιστών που μελετήθηκαν	115			
		5.3.1.1	Μετασχηματιστής 1000/01054	115			
		5.3.1.2	Μετασχηματιστής 630/99039	117			
		5.3.1.3	Μετασχηματιστής 100/98029	119			
		5.3.1.4	Μετασχηματιστής 100/98022	121			
		5.3.1.5	Μετασχηματιστής 250/02030	122			
		5.3.1.6	Μετασχηματιστής 630/01015	124			
		5.3.1.7	Μετασχηματιστής 160/01046	126			
		5.3.1.8	Μετασχηματιστής 100/03017	127			
		5.3.1.9	Μετασχηματιστής 50/03003	129			
		5.3.1.10	Μετασχηματιστής 100/03005	131			
		5.3.1.11	Μετασχηματιστής 400/02042	132			
	5.3.2	Αποτελέσ	ματα της μεθοδολογίας	134			
5.4	Σύγκρια κατασκ	ση της μεθά ευαστή	όδου των πεπερασμένων στοιχείων με τη μεθοδολογία του	135			

	5.4.1	Παρτίδα 12 μετασχηματιστών μελέτης 1000/01054	136			
	5.4.2	Παρτίδα 30 μετασχηματιστών μελέτης 100/98029	136			
	5.4.3	Παρτίδα 50 μετασχηματιστών μελέτης 630/99039	136			
	5.4.4	Παρτίδα 33 μετασχηματιστών μελέτης 100/98022	138			
	5.4.5	Παρτίδα 10 μετασχηματιστών μελέτης 250/02030	138			
	5.4.6	Παρτίδα 15 μετασχηματιστών μελέτης 630/01015	138			
5.5	Διερεύνηση της επίδρασης του τρόπου παραλληλισμού των υποπηνίων υψηλής					
	τάσης σ	την τάση βραχυκύκλωσης	140			
5.6	Συμπερ	άσματα	144			
5.7	Βιβλιογ	ραφία	145			

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

6.1	Εισαγα	νγή		147			
6.2	Ανάγκι πεπερα	ι ανάπτυξ σμένων στο	ης λογισμικού για την εφαρμογή της μεθόδου των ριχείων σε μετασχηματιστές ισχύος	147			
6.3	Δομή π	ρογράμματ	ος – περιβάλλον λειτουργίας	148			
6.4	Αποδο	τικότητα λο	γισμικού μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων	151			
6.5	Ενσωμάτωση του λογισμικού που αναπτύχθηκε στη διαδικασία σχεδίασης μετασχηματιστών			153			
	6.5.1	6.5.1 Περιγραφή του βιομηχανικού κύκλου 1					
	6.5.2	Διαδικασία σχεδίασης μετασχηματιστών					
		6.5.2.1	Τεχνικές προδιαγραφές	153			
		6.5.2.2	Πρόγραμμα μελέτης μετασχηματιστή	154			
		6.5.2.3	Σύνδεση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα μελέτης μετασχηματιστή	155			
6.6	Πλεονε διαδικα	κτήματα ισία σχεδίαα	ενσωμάτωσης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων στη σης μετασχηματιστών	158			
6.7	Συμπερ	νάσματα		160			
6.8	Βιβλιο	γραφία		161			

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΚΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ-ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

7.1	Εισαγωγή							163
7.2	Βελτιστοποίηση τεχνικών	γεωμετρίας	μετασχηματιστών	με	τη	χρήση	αριθμητικών	163

7.3	Πλεονει	κτήματα γ	γρήσης του μεικτού μοντέλου πεπερασμένων – οριακών					
	στοιχεία	υV		164				
7.4	Βελτιστοποίηση γεωμετρίας της μαγνητικής θωράκισης							
	7.4.1	Μαθηματ	τική διατύπωση του προβλήματος	164				
	7.4.2	Αλγόριθμ	ιοι βελτιστοποίησης	165				
		7.4.2.1	Μέθοδος πιο απότομης καθόδου (Steepest Descent)	165				
		7.4.2.2	Μέθοδος συζευγμένης κλίσης (Conjugate Gradient)	165				
		7.4.2.3	Μέθοδος Davidon-Fletcher-Powell (DFP)	165				
		7.4.2.4	Μέθοδος Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)	166				
		7.4.2.5	Μέθοδος αναζήτησης προτύπου (Pattern Search)	166				
	7.4.3	Εξαγωγή	αντικειμενικής συνάρτησης	167				
7.5	Σύγκρισ	τη μεθόδων	ν βελτιστοποίησης	170				
7.6	Ανάλυσ	η ευαισθη	σίας	172				
7.7	Συμπερ	άσματα		174				
7.8	Βιβλιογ	Βιβλιογραφία 175						

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:	ПРО	ΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ	ΑΠΩΛΕΙΩ	N KENOY	ΦΟΡΊ	IOY
	ΣΕ	ΜΕΤΑΣΧΗΜ	ΑΤΙΣΤΕΣ	ΙΣΧΥΟΣ	ME	TH
	MEG	ΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕ	ΠΕΡΑΣΜΕΝ	νΩν Στοιχ	ΈΙΩΝ	

8.1	Απώλει	ες κενού φο	ρτίου μετασχηματιστών και μέθοδοι πρόβλεψής τους	177
	8.1.1	Είδη απωλ	ειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	177
	8.1.2	Μέθοδοι π	ρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	178
		8.1.2.1	Κυκλωματικά μοντέλα πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	179
		8.1.2.2	Μοντέλα αριθμητικών τεχνικών ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	180
		8.1.2.3	Στοχαστικές μέθοδοι πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών	180
8.2	Μοντελ στοιχεία	οποίηση λε ον	ιτουργίας κενού φορτίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων	181
	8.2.1	Επίλυση πεπερασμέ	μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των ένων στοιχείων	181
		8.2.1.1	Κυκλική αναπροσαρμογή των τιμών μαγνητικής διαπερατότητας	182
		8.2.1.2	Μέθοδος Newton – Raphson	182
		8.2.1.3	Μοντελοποίηση υλικών κατά την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	184
8.3	Υπολογ στοιχεία	ισμός απωλ ον	λειών κενού φορτίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων	188
8.4	Ιδιότητε	ες υλικού πυ	ρήνα μετασχηματιστών και τρόπος προσδιορισμού τους	190

	8.4.1	Επίδραση μηχανικών καταπονήσεων και θερμικών κατεργασιών στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού του πυρήνα	191
	8.4.2	Εξαγωγή χαρακτηριστικών καμπυλών υλικού πυρήνα με μετρήσεις	192
8.5	Προσδιορισμός απωλειών κενού φορτίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών		192
	8.5.1	Μετασχηματιστής 400 kVA πρώτης σειράς μετρήσεων	192
	8.5.2	Μετασχηματιστής 1000 kVA πρώτης σειράς μετρήσεων	197
	8.5.3	Μετασχηματιστής 630 kVA δεύτερης σειράς μετρήσεων	199
8.6	Συμπερά	ίσματα	200
8.7	Βιβλιογραφία		203

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

9.1	Συμπεράσματα	207
9.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης	209
9.3	Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση	210

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

П.1	Κώδικας Fortran		
	П.1.1	Προ-επεξεργασία	211
	П.1.2	Κατάστρωση και επίλυση του συστήματος εξισώσεων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων	246
	П.1.3	Μετεπεξεργασία	248
П.2	Αλληλε	πίδραση υποπρογραμμάτων Visual Basic - Fortran	250
П.3	Βιβλιογραφία		253

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ПЕРІГРАФН
ΠΣ	Πεπερασμένα Στοιχεία
ΟΣ	Οριακά Στοιχεία
ΜΠΣ	Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων
ΜΟΣ	Μέθοδος Οριακών Στοιχείων
ΜΔΕ	Μερική Διαφορική Εξίσωση
2Δ	Δισδιάστατος
3Δ	Τρισδιάστατος
$\Pi\Sigma - O\Sigma$	Πεπερασμένα Στοιχεία – Οριακά Στοιχεία
M/Σ	Μετασχηματιστής
XT	Χαμηλή Τάση
YT	Υψηλή Τάση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διατριβή εξετάζεται η δημιουργία αριθμητικών μοντέλων για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος ενός κατασκευασμένου τριφασικού μετασχηματιστή ισχύος με τη χρήση αριθμητικών τεχνικών και η προσαρμογή τους στην υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης. Η ανάπτυξη των μοντέλων επικεντρώνεται στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης μέσω της επαγωγικής πτώσης τάσης ΙΧ%, δηλαδή της πτώσης τάσης η οποία οφείλεται στην αντίδραση σκέδασης των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή (όπως φαίνεται στο απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 1.1). Η ανάλυση εστιάζει στο πεδίο σκεδάσεως ειδικά για δύο λόγους. Πρώτον διότι αυτό είναι που καθορίζει τις αυτεπαγωγές σκεδάσεως άρα και το ρεύμα βραχυκύκλωσης που θα διαρρέει το μετασχηματιστή όταν συμβεί κάποιο σφάλμα. Δεύτερον διότι στις δυνάμεις που δημιουργούνται κατά το βραχυκύκλωμα, οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό η αστοχία στη λειτουργία μεγάλων μετασχηματιστών ισχύος.



R1: ωμική αντίσταση πρωτεύοντος τυλίγματος
R2: ωμική αντίσταση
δευτερεύοντος τυλίγματος
Xσ1: Αυτεπαγωγή σκέδασης
πρωτεύοντος τυλίγματος
Xσ2: Αυτεπαγωγή σκέδασης
δευτερεύοντος τυλίγματος
α: Λόγος μετασχηματισμού

Σχήμα 1.1: Απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ανηγμένο στο πρωτεύον - Επαγωγική πτώση τάσης τυλιγμάτων.

Η ανάπτυξη των μοντέλων γίνεται με στόχο τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης μετασχηματιστών ισχύος, τόσο μέσω της δυνατότητας ακριβούς πρόβλεψης των χαρακτηριστικών τους κατά τη φάση της σχεδίασης, όσο και με εφαρμογή τους σε συνδυασμό με αλγορίθμους βελτιστοποίησης για την επιλογή της βέλτιστης σχεδίασης από πλευράς κόστους και απόδοσης.

Η εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων επεκτείνεται στη μελέτη των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών, αποτελώντας τη βάση για την ανάπτυξη ενός ενιαίου μοντέλου πρόβλεψης των χαρακτηριστικών τους, με τη χρήση προηγμένων τεχνικών ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου.

1.1 ΑΝΑΓΚΕΣ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΤΗ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η διαδικασία απελευθέρωσης της ενέργειας και ιδιωτικοποίησης των ηλεκτρικών εταιρειών έχει δημιουργήσει ένα νέο, ανταγωνιστικό περιβάλλον στην παγκόσμια αγορά

ενέργειας. Οι ηλεκτρικές εταιρείες του εικοστού πρώτου αιώνα θα προσπαθήσουν να βελτιώσουν την ποιότητα και την ευστάθεια τους, παραμένοντας ταυτόχρονα οικονομικά αποδοτικές. Σε αυτό το νέο και ενδιαφέρον περιβάλλον, εμφανίζεται στη βιομηχανία παραγωγής μετασχηματιστών η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης και αξιοπιστίας των προϊόντων τους και μείωσης του κόστους δεδομένου ότι τα προϊόντα υψηλής ποιότητας και χαμηλού κόστους είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομική τους επιβίωση [1.1]. Η απόδοση των μετασχηματιστών βελτιώνεται με τη μείωση των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου [1.2]. Η αξιοπιστία των μετασχηματιστών βελτιώνεται κυρίως με την ακριβή εκτίμηση του πεδίου σκέδασης, της τάσης βραχυκύκλωσης και των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα τυλίγματά τους κατά το βραχυκύκλωσης και τα σφάλματα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η μείωση του κόστους των μετασχηματιστών επιτυγχάνεται κυρίως με την τεχνική και οικονομική βελτιστοποίηση της σχεδίασής τους.

Οι χρήστες μετασχηματιστών (π.χ., ηλεκτρικές εταιρείες) καθορίζουν ένα επιθυμητό επίπεδο απωλειών φορτίου και κενού φορτίου (εγγυημένες απώλειες) όπως και ένα επιθυμητό επίπεδο τάσης βραχυκύκλωσης. Οι σχεδιαστές μετασχηματιστών είναι υπεύθυνοι για την υλοποίηση της σχεδίασης έτσι ώστε να πληρούνται οι τεχνικές προδιαγραφές με το μικρότερο συνολικό κόστος. Οι μετασχηματιστές σχεδιάζονται έτσι ώστε οι απώλειές και η τάση βραχυκύκλωσής τους να είναι ίσες (με κάποιο περιθώριο ασφαλείας) με τις εγγυημένες. Ωστόσο, στην πράξη, οι πραγματικές (μετρημένες) απώλειες και τάση βραχυκύκλωσης των μετασχηματιστών αποκλίνουν από τις σχεδιασμένες (θεωρητικές) τιμές εξαιτίας κατασκευαστικών ατελειών, οι οποίες εμφανίζονται κατά τη φάση παραγωγής τους. Για αυτό το λόγο, εφαρμόζονται ανοχές σε συγκεκριμένες παραμέτρους (π.χ., απώλειες και τάση βραχυκύκλωσης), σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα [1.3, 1.4].

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

- 1) Αυξάνει την αξιοπιστία των μετασχηματιστών,
- 2) Εξασφαλίζει την υψηλή απόδοση των μετασχηματιστών,
- Μειώνει το κόστος των υλικών, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικρότερο περιθώριο ασφαλείας,
- 4) Βοηθά τον κατασκευαστή να αποφύγει την πληρωμή ρητρών απωλειών,
- 5) 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,
- 6) Μειώνει το χρόνο παράδοσης των μετασχηματιστών.

Οι σημερινές ανάγκες της βιομηχανίας επιτάσσουν την κατασκευή μεγάλης ποικιλίας τύπων μετασχηματιστών, οι οποίοι δεν εντάσσονται σε τυποποιημένες κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι εμπειρικοί τρόποι υπολογισμού των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους δεν παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια, καθώς αφορούν σε συγκεκριμένες γεωμετρίες. Επιπλέον, ο περιορισμένος χρόνος παράδοσης των παραγγελιών καθιστά δύσκολη την πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών των παραγόμενων μετασχηματιστών, με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας υπέρβασης των προδιαγεγραμμένων ορίων των τιμών αυτεπαγωγής σκέδασης και της αντίστοιχης τάσης βραχυκύκλωσης. Δεδομένου ότι οι παράμετροι αυτές είναι μείζονος σημασίας για την αξιοπιστία και τη λειτουργία του μετασχηματιστή στα πλαίσια των διεθνών κανονισμών, προκύπτει επιτακτική ανάγκη βελτίωσης της ακρίβειας της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας σχεδίασής τους.

Η αναβάθμιση της τάσης των δικτύων διανομής από τα 15 kV στα 20 kV δημιούργησε την ανάγκη κατασκευής μετασχηματιστών κατάλληλων και για τα δύο επίπεδα τάσης με απλή μεταβολή της σύνδεσης τμημάτων των τυλιγμάτων υψηλής τάσης. Στις περιπτώσεις αυτές έχει διαπιστωθεί δυσκολία πρόβλεψης των παραμέτρων του μετασχηματιστή με την υφιστάμενη μεθοδολογία όταν παραλληλίζονται τμήματα των τυλιγμάτων. Η δυσκολία αυτή μπορεί να ξεπεραστεί ενσωματώνοντας τεχνικές ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου (με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων) στις καθιερωμένες προσεγγιστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται από τους κατασκευαστές.

Για τους παραπάνω λόγους, το πεδίο σκέδασης των μετασχηματιστών, ο υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσής τους και η πρόβλεψη των απωλειών είναι αντικείμενο συνεχούς μελέτης και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία.

1.2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

1.2.1 Προσδιορισμός του πεδίου σκέδασης μετασχηματιστών

Ένα από τα σημαντικά προβλήματα κατά τη σχεδίαση μετασχηματιστών είναι ο προκαθορισμός της επαγωγικής πτώσης τάσης των τυλιγμάτων του όταν βρίσκεται υπό φορτίο και των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε αυτά κατά το βραχυκύκλωμα. Ο ακριβής υπολογισμός τους παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία, η οποία οδηγεί τους σχεδιαστές στην υιοθέτηση κατάλληλων συντελεστών, οι οποίοι προκύπτουν με εμπειρικό τρόπο μέσα από διαδικασία μέτρησης του πεδίου σε κατασκευασμένους μετασχηματιστές. Μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους εμπειρικού υπολογισμού είναι η μέθοδος των συντελεστών Rogowski, η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών, [1.5]. Η μέθοδος Rogowski υπολογίζει το πεδίο σκέδασης θεωρώντας πηνία σταθερής πυκνότητας ρεύματος, σε μικρή απόσταση από τα σκέλη του πυρήνα. Κατά τον υπολογισμό λαμβάνεται δισδιάστατη τροποποιημένη αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας του μετασχηματιστή. Κατά την εξαγωγή της, η συμβολή των τμημάτων των πηνίων που βρίσκονται εκτός των παραθύρων του πυρήνα (δηλαδή ο συνυπολογισμός της τρίτης διάστασης) πραγματοποιείται με κατάλληλη τροποποίηση των πραγματικών διαστάσεων των πηνίων. Η αυτεπαγωγή σκέδασης υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$L_{\sigma} = \frac{\mu_{\rm r}\mu_{\rm o}}{g} N_1^2 \Delta' U \tag{1.1}$$

όπου g είναι η απόσταση μεταξύ των σκελών του πυρήνα, N_1 ο αριθμός ελιγμάτων του πρωτεύοντος τυλίγματος, Δ΄ το ισοδύναμο πάχος των πηνίων και U το μήκος της μέσης σπείρας των πηνίων. Το ισοδύναμο πάχος δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta' = \left(\frac{1}{3}\alpha_1 + \beta + \frac{1}{3}\alpha_2\right) K_{\rm R}$$
(1.2)

όπου α_1 είναι το πάχος του πρωτεύοντος τυλίγματος, α_2 το πάχος του δευτερεύοντος τυλίγματος, β η απόσταση μεταξύ των τυλιγμάτων και K_R ο συντελεστής Rogowski, που προκύπτει από τη Σχέση (1.3):

$$K_{R} = 1 - \frac{\alpha}{\pi g} \left(1 - e^{\frac{-\pi g}{a}} \right)$$
(1.3)

Ωστόσο, η χρήση των συντελεστών Rogowski, λόγω των απλοποιήσεων που υιοθετούν κατά τη μοντελοποίηση της πραγματικής γεωμετρίας του μετασχηματιστή, ενδέχεται να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές του πεδίου σκέδασης, ιδίως σε περιπτώσεις μετασχηματιστών που δεν εμπίπτουν σε τυποποιημένες γεωμετρίες. Η αναζήτηση αναλυτικότερων μεθόδων εκτίμησης του πεδίου σκέδασης συναντάται στην τεχνική βιβλιογραφία εδώ και αρκετές δεκαετίες. Σε αναφορές όπως στην [1.6], γίνεται προσπάθεια τρισδιάστατου υπολογισμού του πεδίου σκέδασης και των απωλειών που οφείλονται σε αυτό με τη χρήση της μεθόδων των πεπερασμένων διαφορών. Πρόκειται για μία από τις πρώτες προσπάθειες τρισδιάστατου υπολογισμού, στην οποία επιχειρείται αντιμετώπιση των προβλημάτων μειωμένης ακρίβειας υπολογισμού μέσω των δισδιάστατων αριθμητικών μεθόδων, [1.7], μέσα στα περιορισμένα πλαίσια των δυνατοτήτων των υπολογιστικών της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.

Η συστηματική αύξηση των επιδόσεων των υπολογιστών κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες ευνόησε τη ραγδαία εξέλιξη των αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, δίνοντας έτσι περαιτέρω ώθηση στη διερεύνηση της εφαρμογής τους για τη λεπτομερή εκτίμηση του πεδίου σκέδασης των μετασχηματιστών. Οι μέθοδοι που υιοθετήθηκαν για την ανάλυση του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης μπορούν να διαιρεθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: τις μεθόδους που χρησιμοποιούν ολοκληρωτικές εξισώσεις (εφαρμόζοντας αναλυτική επίλυσή τους σε περιοχές της γεωμετρίας όπου αυτό είναι εφικτό) και τις αριθμητικές μεθόδους.

Οι μέθοδοι των ολοκληρωτικών εξισώσεων εφαρμόζονται από τους Zakrzewski και Tomczuk για την ανάλυση του πεδίου σκέδασης μετασχηματιστών ρεύματος, [1.8], και από τους Higuchi, Koizumi και Sato για την ανάλυση δινορρευμάτων, [1.9, 1.10]. Επιπλέον, ο Tomczuk εφαρμόζει τη μέθοδο στις τρεις διαστάσεις, σε συνδυασμό με δισδιάστατες αναλυτικές λύσεις για τον υπολογισμό του πεδίου σε μετασχηματιστές υψηλής αντίδρασης σκέδασης, [1.11]. Οι ολοκληρωτικές εξισώσεις μπορούν να λυθούν αναλυτικά μόνο για απλές διαμορφώσεις, προσφέρουν ωστόσο αρκετά πλεονεκτήματα όταν πρέπει να συνδυαστούν με αριθμητικές μεθόδους, [1.12-1.16].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τον προσδιορισμό τόσο του πεδίου σκέδασης όσο και των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε τυλίγματα μετασχηματιστών κατά το βραχυκύκλωμα. Οι Salon, LaMattina και Sivasubramaniam χρησιμοποιούν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με διαφορετικό βαθμό πολυπλοκότητας για τον υπολογισμό των δυνάμεων αυτών σε μονοφασικό μετασχηματιστή τύπου κελύφους, [1.17]. Οι De Gersem και Hameyer χρησιμοποιούν μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τη λεπτομερή αναπαράσταση τυλίγματος τριφασικού μετασχηματιστή τύπου πυρήνα, [1.18], ενώ οι Xiang, Jinsha, Guoquiang, Yuanlu και Qifan συνδυάζουν μοντέλα ελαχιστοποίησης της μαγνητικής ενέργειας με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση προβλημάτων πεδίου σκέδασης, [1.19]. Οι Κλαδάς, Παπαδόπουλος και Τεγόπουλος, εφαρμόζουν δισδιάστατη και τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και μέθοδο των ειδώλων σε τριφασικό μετασχηματιστή τύπου κελύφους για υπολογισμό του πεδίου σκέδασης και των δυνάμεων κατά το βραχυκύκλωμα, [1.20]. Άλλοι ερευνητές, όπως οι Zakrzewski και Kukaniszyn, προτείνουν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ως μέσο υπολογισμού του πεδίου σκέδασης σε μονοφασικούς και τριφασικούς μετασχηματιστές τύπου πυρήνα, [1.21].

Εκτός από τις δύο κατηγορίες μεθόδων που περιγράφηκαν παραπάνω, έχει κατά καιρούς προταθεί και η υιοθέτηση εναλλακτικών τρόπων υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου μετασχηματιστών, όπως η χρήση δικτύου μαγνητικών αντιστάσεων, [1.22], ή της θεωρίας των μαγνητικών φορτίων, [1.23, 1.24].

1.2.2 Συμβολή αριθμητικών τεχνικών στην ανάλυση μαγνητικών πεδίων

1.2.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται για πρώτη φορά στην επίλυση προβλημάτων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τον Silvester, το 1969, [1.25, 1.26]. Ακολουθεί η δουλειά άλλων ερευνητών με την επίλυση κυρίως δισδιάστατων προβλημάτων, λόγω της αυξημένης υπολογιστικής επιβάρυνσης που απαιτούσε η εφαρμογή του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού σε προβλήματα τριών διαστάσεων, δυσκολία η οποία άρχισε να ξεπερνάται με την εισαγωγή του βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού, η οποία παρουσιάστηκε αρχικά από τον Zienkiewicz το 1970, [1.27] και επεκτάθηκε από τους Simkin και Trowbridge το 1980, [1.28, 1.29].

Η εξέλιξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων δίνει τη δυνατότητα λεπτομερούς υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου σε περιπτώσεις δισδιάστατων και τρισδιάστατων διαμορφώσεων, ενώ με την υπέρθεση στοιχειωδών δισδιάστατων (και τρισδιάστατων αντίστοιχα) λύσεων επιτρέπει τον υπολογισμό του πεδίου σκέδασης τριφασικών μετασχηματιστών. Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων μπορούν ακόμη να συνδυαστούν με διαδικασίες βελτιστοποίησης της σχεδίασης με στόχο τη βελτίωση του σχήματος των τυλιγμάτων για ελαχιστοποίηση των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα.

Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς, εκτός από τον υπολογισμό του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης, και για τον υπολογισμό των απωλειών δινορρευμάτων, ο οποίος αποτελεί πρόβλημα μεγάλου ενδιαφέροντος σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, [1.30]. Οι προσπάθειες για την επίλυση των προβλημάτων δινορρευμάτων επικεντρώνονται στην εισαγωγή κατάλληλων διατυπώσεων ως προς τα δυναμικά Α,Φ και Τ-Ω, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η καλή ακρίβεια και το χαμηλό υπολογιστικό κόστος της λύσης τους, [1.31]. Στα πλαίσια αυτών των προσπαθειών, οι Γκόλιας και Τσιμπούκης χρησιμοποιούν αυτοβελτιούμενες τεχνικές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση τρισδιάστατων προβλημάτων δινορρευμάτων στην επίλυση τρισδιάστατων προβλημάτων δινορρευμάτων στην αναφορά [1.32]. Οι Pavlik, Johnson και Girgis αναπτύσσουν ένα εργαλείο για των υπολογισμό των διαφευγουσών απωλειών και των απωλειών δινορρευμάτων σε μετασχηματιστές τύπου πυρήνα στην αναφορά [1.33] ενώ οι Turowski και Pelikant πραγματοποιούν πρόβλεψη της αύξησης θερμοκρασίας στο κέλυφος μετασχηματιστών λόγω των δινορρευμάτων στην αναφορά [1.34].

Η δισδιάστατη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει όμως χρησιμοποιηθεί και για τη μελέτη όλων των βασικών χαρακτηριστικών των μετασχηματιστών, πέραν του πεδίου σκέδασης και των δινορρευμάτων: ο Moses τη χρησιμοποιεί για υπολογισμό απωλειών στην αναφορά [1.35]. Στην αναφορά [1.36] εξετάζονται εσωτερικά σφάλματα των τυλιγμάτων με τη δισδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από τους Wang και Butler, ενώ στην αναφορά [1.37] οι Yu και Liu τη χρησιμοποιούν ως βάση για την ανάλυση κορεσμού DC. Οι Driesen, Belmans και Hameyer την εφαρμόζουν για τη μελέτη των επιπτώσεων αρμονικών ρευμάτων στην αναφορά [1.38], ενώ οι Wen, Zhou, Fu και Jin τη χρησιμοποιούν για την ανάλυση του πεδίου μετασχηματιστών μετατροπέων HVDC στην αναφορά [1.39]. Χρησιμοποιείται επίσης κατά την εξαγωγή των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος [1.40, 1.41] από τους Chiping, Kutkut, Novotny, Divan και Qing, Lee, Jian, Jovanovic αντίστοιχα. Άλλες εργασίες στην ίδια κατηγορία, από τους Mechler, Girgis και teNyenhuis, προτείνουν τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ως μέθοδο εκτίμησης των απωλειών και της κατανομής της ροής σε μετασχηματιστές τύπου στοιβακτού πυρήνα [1.42-1.44] ενώ ο Pierce τη χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό της κατανομής θερμοκρασίας σε μετασχηματιστές ξηρού τύπου [1.45].

Παρά το γεγονός ότι η δισδιάστατη μοντελοποίηση είναι κατάλληλη για την επίλυση πολλών προβλημάτων σχεδίασης, μπορεί να κριθεί ανεπαρκής για λεπτομερή ανάλυση και υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, οπότε και απαιτείται η τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Η υλοποίηση τρισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων συναντάται πολύ συχνά στην τεχνική βιβλιογραφία: για παράδειγμα, οι Koppikar, Kulkarni, Srinivas, Khaparde και Jain υλοποιούν λεπτομερή αναπαράσταση μονοφασικού αυτομετασχηματιστή στην αναφορά [1.46], ενώ οι Lin, Xiang, Yanlu, Zhingwang, Guoqiang και Yinhan υπολογίζουν απώλειες στην αναφορά [1.47]. Τρισδιάστατος υπολογισμός απωλειών, μαγνητικής ροής και πεδίου σκέδασης πραγματοποιείται επίσης στην αναφορά [1.48]. Επιπλέον, τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του σιδήρου έχουν μοντελοποιηθεί κατάλληλα μέσω της μεθόδου, από τους Mohammed και Demerdash, [1.49] τους Enokizono και Soda, [1.50], και τους Προυσσαλίδη, Χατζηαργυρίου και Κλαδά, [1.51] ενώ για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης μετασχηματιστών ισχύος με μη γραμμικά φορτία έχει πραγματοποιηθεί σύζευξη κυκλωματικών και πεδιακών εξισώσεων, [1.52, 1.53].

Εκτός από τους μετασχηματιστές, που αποτέλεσαν το επίκεντρο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αυτής της παραγράφου, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων συναντάται επίσης σε μεγάλο βαθμό στην ανάλυση όλων των ειδών ηλεκτρικών μηχανών. Αναφέρεται ενδεικτικά η εφαρμογή της σε σύγχρονες μηχανές από τους Shima, Ide, Takahashi, Yoshinari και Nitobe, [1.54], σε επαγωγικούς κινητήρες και γεννήτριες από τους Williamson και Gersh, [1.55] και Chan, Lai και Yan, [1.56], αντίστοιχα, και σε ειδικές μηχανές όπως οι γεννήτριες μονίμων μαγνητών από τους Colamartino, Marchand, Razek και Pavlik, Garg, Repp και Weiss, [1.57, 1.58] ή οι μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης από τους Moallem και Ong, [1.59].

1.2.2.2 Μέθοδος οριακών στοιχείων

Μια άλλη αριθμητική τεχνική πεδιακής ανάλυσης είναι η μέθοδος των οριακών στοιχείων [1.60]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την ολοκληρωτική μορφή των εξισώσεων που περιγράφουν το μαγνητικό πεδίο και διακριτοποιεί μόνο τα σύνορα των εξεταζόμενων περιοχών (σε αντίθεση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία διακριτοποιεί όλο το πεδίο). Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα στοιχεία της μεθόδου είναι το μικρότερο σύστημα εξισώσεων και κατά συνέπεια η μείωση των απαιτούμενων δεδομένων για την επίλυση προβλημάτων. Επιπλέον, η αριθμητική ακρίβεια των οριακών στοιχείων είναι γενικά μεγαλύτερη από αυτή των πεπερασμένων. Η μέθοδος ενδείκνυται επίσης για προβλήματα με ανοιχτά σύνορα, υστερεί ωστόσο στην αναπαράσταση μη γραμμικών υλικών. Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημά της είναι η μη δυνατότητα εφαρμογής της σε όλες τις περιπτώσεις προβλημάτων και η μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην κατάστρωση και επίλυση των εξισώσεών της, σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των οριακών στοιχείων έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται σε επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, τα τελευταία κυρίως χρόνια. Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μείωση του αριθμού των αγνώστων σε συνδυασμό με την υψηλή ακρίβεια που παρέχουν τα οριακά στοιχεία [1.61]. Ωστόσο, η χρήση της σε προβλήματα υπολογισμού του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διατάξεων και ειδικότερα, μετασχηματιστών, δε συναντάται σε μεγάλο βαθμό στη βιβλιογραφία. Πιο συνήθης είναι η εφαρμογή της

μεθόδου σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές (υβριδική μέθοδος), όπως θα φανεί και στην παρουσίαση των αναφορών της επόμενης παραγράφου.

1.2.2.3 Μεικτή μέθοδος πεπερασμένων - οριακών στοιχείων

Ο συνδυασμός των μεθόδων πεπερασμένων και οριακών στοιχείων για τη διαμόρφωση μιας υβριδικής τεχνικής έχει συγκεντρώσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών στον τομέα της μοντελοποίησης ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων, καθώς έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτική στην επίλυση δισδιάστατων και αξισυμμετρικών προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Η μέθοδος επιτρέπει την αναπαράσταση περιοχών του εξεταζόμενου πεδίου είτε με πεπερασμένα ή οριακά στοιχεία. Έτσι, μπορούν να λυθούν προβλήματα ανοιχτών συνόρων ή εξωτερικά προβλήματα με τη χρήση οριακών στοιχείων σε συνδυασμό με τη δυνατότητα καλύτερης αναπαράστασης μη γραμμικών υλικών που παρέχουν τα πεπερασμένα στοιχεία. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του συνδυασμού πεπερασμένων και οριακών στοιχείων σε ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα επικεντρώνεται στο γεγονός ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δεν περιορίζεται μόνο στους αγωγούς αλλά επεκτείνεται σε μεγάλα τμήματα αέρα, όπου η χρήση αναπαράστασης με οριακά στοιχεία μπορεί να μειώσει σημαντικά το χρόνο των υπολογισμών. Έτσι, μια τέτοια μέθοδος ενδείκνυται και για τρισδιάστατες διαμορφώσεις, στις οποίες μπορεί να παρέχει μεγάλο βαθμό ακρίβειας υπολογισμών σε συνδυασμό με μειωμένη υπολογιστική επιβάρυνση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες από τις βασικότερες εργασίες που κάνουν χρήση της μεικτής μεθόδου πεπερασμένων – οριακών στοιχείων: Οι Meunier, Coulomb, Salon και Krahenbul παρουσιάζουν την πρώτη εφαρμογή της μεθόδου σε προβλήματα δυναμικού στην αναφορά [1.62] την οποία οι Salon και D'Angelo επεκτείνουν σε επιπλέον εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, σε απλοποιημένες γεωμετρίες, [1.63]. Η μεικτή μέθοδος εφαρμόζεται στην ανάλυση ασύγχρονων κινητήρων από τον Kuhn, [1.64], στον υπολογισμό δινορρευμάτων σε απλοποιημένες τρισδιάστατες γεωμετρίες, από τους Matsuoka και Kameari, [1.65] και σε στροβιλογεννήτριες από τους Satake, Tanaka, Shumizu, Araki και Morimoto, [1.66]. Οι Αντωνόπουλος, Τσιμπούκης και Κριεζής εφαρμόζουν υβριδική μέθοδο για τον υπολογισμό του πεδίου κυλινδρικού κελύφους απείρου μήκους, [1.67]. Οι Fetzer, Kurz, Lehner, Rucker, Henninger και Rockelein εφαρμόζουν τη μεικτή μέθοδο στη μελέτη δινορρευμάτων και κορεσμού, συγκρίνοντάς τη με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [1.68]. Τέλος, ένα υβριδικό μοντέλο πεπερασμένων – οριακών στοιχείων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό δυνάμεων σε γραμμικό κινητήρα επαγωγής από τους Pichon και Razek στην αναφορά [1.69].

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Οι αριθμητικές μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους μπορούν να αποτελέσουν πολύτιμα εργαλεία για τη μελέτη μετασχηματιστών και την ακριβή πρόβλεψη των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους. Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η περαιτέρω διερεύνηση και εφαρμογή τους σε περιπτώσεις τριφασικών μετασχηματιστών ισχύος, προκειμένου να προκύψει το βέλτιστο και οικονομικότερο (από πλευράς κόστους και χρόνου) σχήμα για ενσωμάτωση στις παραγωγικές διαδικασίες. Στόχος αυτής της ενσωμάτωσης είναι η βελτίωση της μεθοδολογίας σχεδίασης μετασχηματιστών ισχύος έτσι ώστε να προβλέπονται τα χαρακτηριστικά τους (αυτεπαγωγή σκέδασης, μεταβολή των παραμέτρων μετά από βραχυκύκλωμα, απώλειες κενού φορτίου) με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου πραγματοποιείται σύγκριση διαφόρων αριθμητικών μοντέλων αναπαράστασης του μετασχηματιστή, με βάση τα αποτελέσματα και την υπολογιστική απόδοση των οποίων επιλέγεται το καταλληλότερο για την πρόβλεψη των παραμέτρων και τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης. Όλα τα αναπτυσσόμενα μοντέλα είναι τρισδιάστατα, έτσι ώστε να αποδοθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η πραγματική γεωμετρία του μετασχηματιστή και να ξεπεραστούν τα προβλήματα ακρίβειας που εισάγονται από τις απλοποιήσεις που εμπλέκει η δισδιάστατη μοντελοποίηση.

Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην κατάλληλη διαμόρφωση των παραμέτρων των τρισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύσσονται, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια με το ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό κόστος. Στη συνέχεια, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσαρμόζεται στην υφιστάμενη σχεδιαστική διαδικασία, προκειμένου να γίνει δυνατή η ενσωμάτωσή της στην παραγωγική διαδικασία μετασχηματιστών ισχύος. Από την περιγραφή των μεθοδολογιών, τα αποτελέσματά τους και τη σύγκρισή τους με τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι η ενσωμάτωση αυτή συμβάλει στη μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής με αντίστοιχη εξοικονόμηση πρώτων υλών αφ' ενός, καθώς μειώνονται τα περιθώρια ασφαλείας από τις προδιαγεγραμμένες τιμές και η αύξηση της αξιοπιστίας αφ' ετέρου εκτιμώντας καλύτερα τις μεταβολές της αυτεπαγωγής κατά το βραχυκύκλωμα εντός των προβλεπομένων από τους διεθνείς κανονισμούς (IEC) ορίων. Έτσι, αναδεικνύεται η δυνατότητα των αριθμητικών μεθόδων να αποτελέσουν ισχυρά υπολογιστικά εργαλεία για χρήση σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Εκτός από τα τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, παρουσιάζονται και μοντέλα μεικτών τεχνικών, τα οποία, λόγω της γεωμετρικής διαμόρφωσης του μετασχηματιστή (μεγάλες περιοχές με αέρα, περιοχές με μη γραμμικά υλικά) εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης της γεωμετρίας τους. Η χρήση τέτοιων μοντέλων σε περιπτώσεις μετασχηματιστών δε συναντάται στην τεχνική βιβλιογραφία, αποτελώντας έτσι ένα από τα σημεία καινοτομίας της διατριβής. Επιπλέον, πραγματοποιείται σύζευξη των μεικτών τεχνικών με κατάλληλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, για την επιλογή βέλτιστης διαμόρφωσης γεωμετρικών χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων μετασχηματιστών.

Τέλος, διερευνάται η κατάλληλη τροποποίηση των μοντέλων για θεώρηση του μαγνητικού κορεσμού, με στόχο την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου. Η διερεύνηση αυτή αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη ενός ενιαίου μοντέλου πρόβλεψης των χαρακτηριστικών των μετασχηματιστών ισχύος, με χρήση προηγμένων τεχνικών ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου.

1.4 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στα κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφονται οι τεχνικές ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων – οριακών στοιχείων και ο τρόπος με τον οποίο ενσωματώθηκαν στις καθιερωμένες προσεγγιστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται κατά τη σχεδίαση από την παραγωγική μονάδα. Τα μοντέλα συνδυάζονται με τεχνικές βελτιστοποίησης της γεωμετρίας των μετασχηματιστών ισχύος ενώ διερευνάται η ακρίβειά τους κατά την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου. Η δομή της διατριβής έχει ως εξής:

Στο **Κεφάλαιο 2**, δίνεται θεωρητική περιγραφή των αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου οι οποίες χρησιμοποιούνται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Η περιγραφή εστιάζει στον τρόπο μοντελοποίησης των ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, τον

τρόπο διακριτοποίησης των εξισώσεων του πεδίου και στον τρόπο με τον οποίο εξάγονται και αξιοποιούνται τα αποτελέσματα της πεδιακής ανάλυσης

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και μεικτής τεχνικής πεπερασμένων - οριακών στοιχείων του μετασχηματιστή. Η σύγκρισή τους οδηγεί στην επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου και την περαιτέρω ανάπτυξή του με στόχο τη λεπτομερέστερη αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας του μετασχηματιστή.

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφονται αναλυτικά όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με στόχο την πειραματική επιβεβαίωση του προτεινόμενου μοντέλου πεδιακής ανάλυσης του μετασχηματιστή.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιλαμβάνεται η διαδικασία γενίκευσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας για όλες τις σχεδιαστικές περιπτώσεις, μέσω εφαρμογής της σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών και τη σύγκρισή της με την υφιστάμενη μεθοδολογία υπολογισμού που ακολουθείται από τον κατασκευαστή και τις μετρήσεις κατά τον ποιοτικό έλεγχο.

Στο **Κεφάλαιο 6**, γίνεται αναλυτική περιγραφή εργαλείου λογισμικού το οποίο αναπτύχθηκε με βάση τη μεθοδολογία των προηγούμενων κεφαλαίων, με στόχο την ενσωμάτωσή του στην αυτοματοποιημένη σχεδιαστική διαδικασία της παραγωγικής μονάδας μετασχηματιστών.

Το **Κεφάλαιο 7** επεκτείνει την εφαρμογή των αριθμητικών τεχνικών ανάλυσης του μαγνητοστατικού πεδίου μετασχηματιστών ισχύος σε προβλήματα βελτιστοποίησης της γεωμετρίας τους. Η εφαρμογή του πεδιακού μοντέλου συνδυάζεται με τη χρήση αλγόριθμων βελτιστοποίησης και ανάλυση ευαισθησίας.

Το **Κεφάλαιο 8** εξετάζει την εφαρμογή του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3 και επιβεβαιώθηκε πειραματικά στο Κεφάλαιο 4, σε προβλήματα πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου. Πραγματοποιούνται οι κατάλληλες τροποποιήσεις για τη θεώρηση του μαγνητικού κορεσμού και τη λεπτομερή αναπαράσταση του υλικού του πυρήνα ενώ διερευνάται η ακρίβεια πρόβλεψης των απωλειών, μέσα από σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις μετρημένες τιμές απωλειών που δίνει ο κατασκευαστής.

Στο **Κεφάλαιο 9** δίνονται τα βασικά συμπεράσματα της ερευνητικής πορείας της διατριβής, η συμβολή της στην προαγωγή της επιστήμης καθώς και πιθανά σημεία περαιτέρω έρευνας.

Στο Παράρτημα περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο υλοποιούνται οι λειτουργίες της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στον κώδικα υπολογισμού της τάσης βραχυκύκλωσης (ο οποίος περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6 και αναπτύχθηκε με σκοπό την ενσωμάτωση της μεθόδου στη διαδικασία σχεδίασης μετασχηματιστών) και ο τρόπος αλληλεπίδρασης των υποπρογραμμάτων του.

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] P.S. Georgilakis, N.D. Doulamis, A.D. Doulamis, N.D. Hatziargyriou, S.D. Kollias, "A novel iron loss reduction technique for distribution transformers based on a combined genetic algorithm-neural network approach," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 31, no. 1, pp. 16-34, February 2001.
- [1.2] Π. Σ. Γεωργιλάκης, "Συμβολή Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης στη μείωση των Απωλειών Κενού Φορτίου Μετασχηματιστών Διανομής". Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2000.
- [1.3] IEC 76-1, Power Transformers Part 1: General, 1993
- [1.4] BS EN 60076-1, Power Transformers Part 1: General, 1997
- [1.5] P. Raitsios, "Leakage field of a transformer under conventional and superconducting condition," *Journal of Materials Processing Technology*, 102 (2001), pp. 246-252.
- [1.6] M. Djurovic, C. J. Carpenter, "3-Dimesional Computation of Transformer Leakage Fields And Associated Losses," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 11, No 5, pp. 1535-1537, Sep. 1975.
- [1.7] O. W. Anderson, "Transformer leakage flux programme based on finite element method," *IEEE Trans. PAS*, pp. 682-689, 1973.
- [1.8] K. Zakrzewski, B. Tomczuk: "Magnetic field analysis and leakage inductance calculation in current transformer by means of 3D integral method", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 32, no 3, pp. 1637-1640, 1996
- [1.9] Y. Higuchi, M. Koizumi, "Integral Equation Method with Surface Impedance Model for 3D Eddy Current Analysis in Transformers", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 36, Nr. 4, July 2000, pp. 774-779.
- [1.10] Y. Higuchi, M. Koizumi, S. Sato, "Three dimensional Eddy Current Calculation with Integral Equation Method for Transformers", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, Nr. 2, March 1997, pp. 1310-1313.
- [1.11] B. Tomczuk: "Analysis of 3D magnetic fields in high leakage reactance transformers", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 30, pp. 94-97, 1988.
- [1.12] S. Nakano, T. Nomura, M. Iwamoto, "Three-dimensional analysis of leakage field of power transformers," *IEE Japan*, Vol. 96, No 5, pp. 55-62, 1976.
- [1.13] J. Simkin, C. W. Trowbridge, "On the use of the total scalar potential in the numerical solution of field problems in electromagnetics," *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, Vol. 14, pp. 423-440, 1979.
- [1.14] J. H. McWhirter, R. J. Duffin, P. J. Brehm, J. J. Oravec, "Computational methods for solving static field and eddy current problems via Fredholm integral equations," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 15, pp. 1075-1084, 1979.
- [1.15] T. Sato, Y. Inui, "Calculation of three-dimensional static magnetic field by equivalent current of magnetization vector and its applications," *IEE Japan*, Vol. 160, No 2, pp. 49-56, 1980.
- [1.16] J. H. McWhirter, J. J. Oravec, R. W. Haack, "Computation of magnetostatic fields in three-dimensions based on Fredholm integral equations," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 18, pp. 373-377, 1982.
- [1.17] S. Salon, B. LaMattina, K. Sivasubramaniam, "Comparison of Assumptions in Calculation of Short Circuit Forces in Transformers", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 36, Nr. 5, Sept. 2000, pp. 3521-3523.
- [1.18] H. De Gersem and K. Hameyer, "A Finite Element Model for Foil Winding Simulation", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 37, Nr. 5, Sept. 2001, pp. 3427-3432.

- [1.19] C. Xiang, Y. Jinsha, Z. Guoquiang, Z. Yuanlu, H. Qifan, "Analysis of Leakage Magnetic Problems in Shell-Form Power Transformer," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, Nr. 2, pp. 2049-2051, Mar. 1997.
- [1.20] A.G. Kladas, M.P. Papadopoulos, J.A. Tegopoulos, "Leakage Flux and Force Calculation on Power Transformer Windings under short-circuit: 2D and 3D Models Based on the Theory of Images and the Finite Element Method Compared to Measurements," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, No. 5/2, pp. 3487 -3490, Sept. 1994.
- [1.21] K. Zakrzewski, M. Kukaniszyn, "Three-dimensional model of one- and three-phase transformer for leakage field calculation", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 28, Nr. 2, March 1992, pp. 1344-1347.
- [1.22] J. Turowski, M. Turowski, M. Kopec, "Method of Three-Dimensional Network Solution of Leakage Field of Three-Phase Transformers," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 26, No 5, pp. 2911-2919, Sept. 1990.
- [1.23] J. Lu, J. Yuan, L. Chen, J. Sheng, X. Ma, "Calculation of the Short-Circuit Reactance of Transformers by a Line Integral based on Surface Magnetic Charges", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 34, Nr. 5, 1998, pp. 3483-3486.
- [1.24] I. Nahas, B. Szabados, M. Poloujadoff, R. Findlay, X. Wu, "A Three-Dimensional Electromagnetic Field Analysis Technique Utilizing the Magnetic Charge Concept," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 23, No 5, pp. 3853-3859, Sept. 1987.
- [1.25] P. Silvester, "High-Order Polynomial Triangular Finite Elements for Potential Problems," *Int. J. Engng. Sci.*, Vol. 7, pp. 849-861, 1969.
- [1.26] P. Silvester, "A General High-Order Finite-Element Waveguide Analysis Program," *IEEE Tran. MTT*, Vol. 17, No 4, pp. 204-210, 1969.
- [1.27] O C. Zienkiewicz, "The finite element method-from intuition to generality," *Appl. Mech. Rev.* Vol. 23, pp. 249-56, 1970.
- [1.28] J. Simkin, C. W. Trowbridge, "Three-Dimensional Nonlinear Electromagnetic Field Calculations, using Scalar Potentials," *IEE Proceedings*, Vol. 127B, No 6, pp. 368-374, 1980.
- [1.29] C. W. Trowbridge, "Three-Dimensional Field Computation," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 18, No 1, pp. 293-297, 1982.
- [1.30] E. E. Kriezis, T. D. Tsiboukis, S. M. Panas, J. A. Tegopoulos, "Eddy Currents: Theory and Applications," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 80, No 10, pp. 1559-1589, Oct. 1992.
- [1.31] Ν. Α. Γκόλιας, "Ενιαία Αντιμετώπιση 3-Διάστατων Προβλημάτων του Η/Μ Πεδίου με Αυτοβελτιούμενες Τεχνικές της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων". Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 1993.
- [1.32] N. A. Golias, T. D. Tsiboukis, "3D Eddy-Current Computation with a Self-Adaptive Refinement Technique," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 31, No 3, pp. 2261-2268, May 1995.
- [1.33] D. Pavlik, D. C. Johnson, R. S. Girgis, "Calculation and reduction of stray and eddy losses in core-form transformers using a highly accurate finite element modelling technique," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 1, pp. 239-245, Jan. 1993.
- [1.34] J. Turowski, A. Pelikant: "Eddy current losses and hot spot evaluation in cover plates of power transformers", *IEE Proc. Electric Power Applications*, Vol. 144, no 6, pp. 435-440, 1997.
- [1.35] A. J. Moses, "Comparison of transformer loss prediction from computed and measured flux density distribution," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 34, No. 4, pp. 1186-1188, 1998.
- [1.36] H. Wang, K. L. Butler, "Finite element analysis of internal

winding faults in distribution transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 16, No. 3, pp. 422-428, Jul. 2001.

- [1.37] S. Lu, Y. Liu, "FEM analysis of DC saturation to assess transformer susceptibility to geomagnetically induced currents," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp. 1367-1376, Jul. 1993.
- [1.38] J. Driesen, R. Belmans, K. Hameyer, "The computation of the effects of harmonic currents on transformers using a coupled electromagnetic-thermal FEM approach," *IEEE Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, Vol 2, pp. 720-725, Oct. 2000.
- [1.39] K. Wen, Y. Zhou, J. Fu, T. Jin, "A calculation method and some features of transient field under polarity reversal voltage in HVDC insulation," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol., No. 1, pp. 223-230, Jan. 1993.
- [1.40] S. Chiping, N. H. Kutkut, D. W. Novotny, D. M. Divan, "General equivalent circuit of a multi-winding co-axial winding transformer," *Thirtieth IEEE IAS Annual Meeting (IAS '95)*, pp. 2507-2514, Vol.3, Oct. 1995.
- [1.41] C. Qing, F. C. Lee, Z. J. Jian, M. M. Jovanovic, "A new model for multiple-winding transformer," 25th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '94), Vol 2, pp. 864-871, Jun. 1994.
- [1.42] G. F. Mechler, R. S. Girgis, "Calculation of spatial loss distribution in stacked power and distribution transformer cores," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 13, No. 2, pp. 532-537, Apr. 1998.
- [1.43] G. E. Mechler, R. S. Girgis, "Magnetic flux distributions in transformer core joints," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 198-203, Jan. 2000.
- [1.44] E. G. teNyenhuis, G. F. Mechler, R. S. Girgis, "Flux distribution and core loss calculation for single phase and five limb three phase transformer core designs," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 204-209, Jan 2000.
- [1.45] L. W. Pierce, "Predicting hottest spot temperatures in ventilated dry type transformer windings," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 9, No. 2, pp. 1160-1172, Apr. 1994.
- [1.46] D. A. Koppikar, S. V. Kulkarni, P. N. Srinivas, S. A. Khaparde, R. Jain, "Evaluation of flitch plate losses in power transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 14, No. 3, pp. 996-1001, Jul. 1999.
- [1.47] C. Lin, C. Xiang, Z. Yanlu, C. Zhingwang, Z. Guoqiang, Z. Yinhan, "Losses calculation in transformer tie plate using the finite element method," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 34, No. 5, pp. 3644-3647, 1998.
- [1.48] I.L. Nahas, B. Szabados, R.D. Findlay, M. Poloujadoff, S. Lee, P. Burke, D. Perco, "Three dimensional flux calculation on a three-phase transformer," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 1, No. 3, pp. 156-160, 1986.
- [1.49] O. Mohammed, N. Demerdash, "A 3-D finite element perturbational method for determining saturated values of transformer winding including experimental verification," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 21, No. 5, pp.1877-1879, Sep 1985.
- [1.50] M. Enokizono, N. Soda, "Finite element analysis of transformer model core with measured reluctivity tensor," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, No. 5, pp. 4110-4112, Sept. 1997.
- [1.51] J. Prousalidis, N. D. Hatziargyriou, 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.
- [1.52] S. Bouissou, F. Piriou, C. Kieny, G. Tanneau, "Numerical simulation of a power transformer using 3D finite element method coupled to circuit equation," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, No. 5, pp. 3224-3227, Sep 1994.

- [1.53] A.A. Arkadan, R.H. VanderHeiden, "Three-dimensional nonlinear finite element modeling of a voltage source excited transformer feeding a rectifier load," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No. 5, pp. 2265-2267, Sep 1992.
- [1.54] K. Shima, K. Ide, M. Takahashi, Y. Yoshinari, M. Nitobe, "Calculation of Leakage Inductances of a Salient-Pole Synchronous Machine Using Finite Elements," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, pp. 1156-1161, Dec. 1999.
- [1.55] S. Williamson, D.R. Gersh, "Finite element calculation of double-cage rotor equivalent circuit parameters," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 11, No. 1, pp. 41-48, Mar. 1996.
- [1.56] T. F. Chan, L. L. Lai, Lie-Tong Yan, "Finite Element Analysis of a Single-Phase Grid-Connected Induction Generator with the Steinmetz Connection," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 18, No. 2, pp. 321-329, Jun. 2003.
- [1.57] F. Colamartino, C. Marchand, A. Razek, "Torque ripple minimization in permanent magnet synchronous servodrive," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 616-621, Sept. 1999.
- [1.58] D. Pavlik, V. K. Garg, J. R. Repp, J. Weiss, "A finite element technique for calculating the magnet sizes and inductances of permanent magnet machines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 3, No. 1, pp. 116-122, Mar. 1998.
- [1.59] M. Moallem, C. M. Ong, "Predicting the torque of a switched reluctance machine from its finite element field solution," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol 5, No. 4, pp. 733-739, Dec. 1990.
- [1.60] C. A. Brebbia, "The Boundary Element Method for Engineers". Pentech Press, London, 1984.
- [1.61] C. A. Brebbia, R. Magureanu, "The boundary element method for electromagnetic problems", *Engineering Analysis*, Vol. 4, Nr. 4, 1987.
- [1.62] G. Meunier, J.L. Coulomb, S.J. Salon, L. Krahenbul, "Hybrid Finite Element Boundary Element Solutions for three dimensional scalar potential problems", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 22, Nr. 5, Sept. 1986, pp. 1040-1042.
- [1.63] S.J. Salon, J. D'Angelo, "Applications of the hybrid finite element boundary element method in electromagnetics", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 24, Nr. 1, Jan. 1988, pp. 80-85.
- [1.64] M. Kuhn, "The application of coupled FE/BE formulation in technical magnetic field computations", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 157(1998), pp. 193-204.
- [1.65] F. Matsuoka, A. Kameari, "Calculation of three-dimensional eddy current by FEM-BEM coupling method", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 24, Nr. 1, January 1998, pp. 182-185.
- [1.66] K.Satake, M. Tanaka, N. Shumizu, Y. Araki, K. Morimoto, "Three-dimensional analysis on Eddy Current Testing for S/G Tubes", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 28, Nr. 2, March 1992, pp. 1466-1468.
- [1.67] C. S. Antonopoulos, T. D. Tsiboukis, E. E. Kriezis, "Field calculation in single- and multilayer coaxial cylindrical shells of infinite length by using a coupled T- Ω and boundary element method," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No 1, pp. 61-66, Jan 1992.
- [1.68] J. Fetzer, S. Kurz, G. Lehner, W. M. Rucker, P. Henninger, R. Rockelein, "Analysis of an actuator with eddy currents and iron saturation: Comparison between a FEM and a FEM-BEM coupling approach", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 35, Nr. 3, May 1999, pp. 1793-1796.
- [1.69] L. Pichon, A. Razek, "Force calculation in axisymmetric induction devices using a hybrid FEM-BEM technique", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 26, Nr. 2, March 1990, pp. 1050-1053.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν Κεφάλαιο δίνεται μία θεωρητική περιγραφή των τριών ειδών αριθμητικών τεχνικών πεδιακής ανάλυσης που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1, δηλαδή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, της μεθόδου των οριακών στοιχείων και της μεικτής μεθόδου των πεπερασμένων – οριακών στοιχείων. Δίνεται έμφαση στην τρισδιάστατη μοντελοποίηση, επειδή αυτή χρησιμοποιείται για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή στα επόμενα κεφάλαια. Επιπλέον, παρατίθενται οι εξισώσεις του πεδίου και ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιούνται σε κάθε μέθοδο, ενώ παρουσιάζονται και οι ειδικές μέθοδοι που υιοθετήθηκαν με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης των μεθόδων, από πλευράς υπολογιστικού κόστους και ακρίβειας.

2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ΜΠΣ)

Η επιστήμη των μηχανικών επιτρέπει την περιγραφή της συμπεριφοράς φυσικών συστημάτων με τη βοήθεια μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία από τις πλέον χρησιμοποιούμενες μεθόδους για την αποδοτική επίλυση αυτών των εξισώσεων. Είναι μία μέθοδος πολύ γενική, η οποία εφαρμόζεται στην πλειοψηφία των προβλημάτων που συναντώνται στην πράξη: προβλήματα στατικά και μη στατικά, γραμμικά και μη γραμμικά, ορισμένα σε γεωμετρικό χώρο μίας, δύο ή τριών διαστάσεων. Επιπλέον, προσαρμόζεται με μεγάλη ευκολία σε διάφορα ετερογενή προβλήματα τα οποία μπορεί να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός, [2.1].

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το εξεταζόμενο πεδίο αναπαρίσταται από μια ομάδα πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται με τρίγωνα ή τετράεδρα, εάν το πρόβλημα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο, αντίστοιχα. Έτσι, ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων με άγνωστες τιμές πεδίου στους κόμβους των κορυφών τους. Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος ανάγεται σε ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων και οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων μπορούν να ανακτηθούν με τη χρήση των υπολογισμένων τιμών των κορυφών τους. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω βημάτων, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εμπλέκει τους παρακάτω γνωστικούς τομείς:

- μεθόδους μοντελοποίησης που χρησιμοποιούνται στην επιστήμη του μηχανικού για την κατάστρωση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το εξεταζόμενο πρόβλημα,
- αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την κατάστρωση και επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων,
- προγραμματισμό Η/Υ για την αποδοτική εκτέλεση των υπολογισμών της μεθόδου.

Η σχεδίαση και κατασκευή ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων απαιτεί ακριβή γνώση των τιμών του πεδίου μέσα στο μαγνητικό κύκλωμα. Αν και οι εξισώσεις του Maxwell είναι γνωστές περισσότερο από έναν αιώνα, η διαδικασία υπολογισμού ενός μαγνητικού κυκλώματος προϋπέθετε κατά το παρελθόν την υιοθέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων απλοποιήσεων και παραδοχών, έτσι ώστε να ληφθούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα με τη λιγότερη δυνατή υπολογιστική απαίτηση. Ωστόσο, η τακτική αυτή μπορούσε να εφαρμοστεί κατά κύριο λόγο σε διατάξεις ή προβλήματα με απλοποιημένη γεωμετρία. Έτσι, η σχεδίαση ήταν μια διαδικασία που ακολουθούσε απλούς κανόνες, οι οποίοι προέκυπταν εμπειρικά [2.2].

Η συστηματική αύξηση της απόδοσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, σε συνδυασμό με την εξέλιξη των αριθμητικών τεχνικών ανάλυσης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων επιτρέπουν σήμερα τη λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου ηλεκτρικών μηχανών και μετασχηματιστών, με τη χρήση διαδεδομένων υπολογιστικών συστημάτων χαμηλού κόστους. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις αριθμητικές τεχνικές που έχουν επικρατήσει στην πεδιακή ανάλυση διατάξεων τρισδιάστατης γεωμετρίας που περιλαμβάνουν υλικά με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως οι μετασχηματιστές, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί σε εύλογο χρόνο χρησιμοποιώντας κατάλληλο προσωπικό υπολογιστή.

2.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

2.3.1 Εξισώσεις πεδίου

Μαγνητοστατικά είναι τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι χρονικά αμετάβλητο. Σ' αυτήν την περίπτωση, η ένταση (**H**) και η πυκνότητα (**B**) του μαγνητικού πεδίου (ή μαγνητική επαγωγή) ικανοποιούν τις σχέσεις, [2.3]:

$$\nabla x \mathbf{H} = \mathbf{J} (\delta ι α φορική μορφή νόμου Ampere)$$
(2.1)

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$
 (διαφορική μορφή νόμου Gauss) (2.2)

ενώ εν γένει συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση¹ :

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{H} \tag{2.3}$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, η οποία συνδέεται με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού μ₀ με τη σχέση:

$$\mu = \mu_r \mu_o \tag{2.4}$$

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

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}(\mathbf{B})} \tag{2.5}$$

Η επίλυση των εξισώσεων (2.1) και (2.2) στις δύο διαστάσεις γίνεται με χρήση του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού **A**, το οποίο ορίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{B} = \nabla \mathbf{x} \mathbf{A} \tag{2.6}$$

Με τη βοήθεια της παραπάνω σχέσης, η (2.1) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\nabla \mathbf{x} \left(\frac{1}{\mu} \nabla \mathbf{x} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \tag{2.7}$$

¹ Εκτός από την περίπτωση μονίμων μαγνητών

Για γραμμικά υλικά, η (2.7) καταλήγει στη σχέση:

$$-\frac{1}{\mu}\nabla^{2}\mathbf{A} = \vec{\mathbf{J}} \Longrightarrow \nabla^{2}\mathbf{A} = -\mu\mathbf{J}$$
(2.8)

Έτσι, ο υπολογισμός του διανυσματικού δυναμικού **A** ανάγεται στην επίλυση μιας μερικής διαφορικής εξίσωσης ελλειπτικού τύπου. Στη συνέχεια, οι τιμές των **B** και **H** μπορούν να προκύψουν με διαφόριση του **A**.

Στην περίπτωση του βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού Φ (το οποίο, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 2.4.1, χρησιμοποιείται συνήθως στην επίλυση τρισδιάστατων προβλημάτων) ο τρόπος υπολογισμού του εξαρτάται από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, όπως θα φανεί στις Παραγράφους 2.4.1.1 έως 2.4.1.4.

2.3.2 Οριακές συνθήκες

2.3.2.1 Διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό

Η μοναδικότητα της λύσης που προκύπτει από τις Μ.Δ.Ε. (2.7) ή (2.8) εξασφαλίζεται με ορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών, των τιμών δηλαδή του A ή της κάθετης παραγώγου του $\frac{\partial A}{\partial n}$ στο σύνορο του εξεταζόμενου πεδίου. Οι οριακές συνθήκες μπορεί να είναι τριών ειδών:

- Dirichlet: όταν ορίζεται η τιμή του διανυσματικού δυναμικού A στο σύνορο. Η συνθήκη 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 $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}}$ στο σύνορο. Θέτοντας

 $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n} = 0$ (φυσική συνθήκη Neumann) σε ένα σύνορο περιγράφεται ένα πεδίο το οποίο

διαπερνά κάθετα το σύνορο αυτό. Μια 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).

 Robin (ή μεικτές): όταν ορίζεται μια σχέση μεταξύ της τιμής του A και της κάθετης παραγώγου του ^{∂A}/_{∂n} σε διάφορα σημεία του συνόρου. Τέτοιες οριακές συνθήκες εμφανίζονται συχνά σε προβλήματα δινορρευμάτων.

εμφανιζονται συχνα σε προρληματα σινορρεσματι

2.3.2.2 Βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό, οι οριακές συνθήκες που περιγράφηκαν στην Παράγραφο 2.3.2.1 ορίζονται ως εξής:

- Dirichlet: στην περίπτωση του βαθμωτού δυναμικού, η επιβολή αυτής της συνθήκης σε ένα σύνορο περιγράφεται με την επιβολή μηδενικής τιμής για το δυναμικό (Φ=0) πάνω σε αυτό το σύνορο.
- 2. Neumann: η οριακή συνθήκη Neumann επιβάλλεται με μηδενισμό της κάθετης παραγώγου του βαθμωτού δυναμικού στο αντίστοιχο σύνορο ($\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$).

3. Robin (ή μεικτές): αποτελεί συνδυασμό των παραπάνω συνθηκών, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.3.2.1.

2.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.4.1 Χρήση βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού κατά την επίλυση τρισδιάστατων μαγνητοστατικών προβλημάτων

Η ανάλυση τρισδιάστατων μαγνητοστατικών πεδίων είναι γενικά πολύ πιο δύσκολη και περίπλοκη από την ανάλυση δισδιάστατων συστημάτων (συμπεριλαμβανομένης της αξονικής συμμετρίας και της περιφερειακής περιοδικότητας). Στη διασδιάστατη περίπτωση, το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό περιλαμβάνει μία μόνο συνιστώσα, επιτρέποντας έτσι τη λεπτομερή ανάλυση διατάξεων με πηγές (διεγέρσεις) και επαγόμενα ρεύματα (εφόσον υπάρχουν). Όταν το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό χρησιμοποιείται για την επίλυση τρισδιάστατων προβλημάτων, εμφανίζονται και οι τρεις συνιστώσες του, καταλήγοντας έτσι στην εισαγωγή τριών αγνώστων ανά κόμβο πλέγματος, αντί του ενός, που εμφανίζεται κατά τη χρήση του βαθμωτού δυναμικού. Για το σκοπό αυτό, κατά την επίλυση των τρισδιάστατων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, έχουν κατά καιρούς υιοθετηθεί μέθοδοι βασισμένες σε βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό, οι σημαντικότερες από τις οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια, [2.4, 2.5].

2.4.1.1 Μέθοδος βασισμένη σε «ολικό» (total) βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό

Ο όρος «ολικό» (total) χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτής της μεθόδου για να τη διαχωρίσει από τη μέθοδο της επόμενης παραγράφου, όπου γίνεται λόγος για «ανηγμένο» (reduced) μαγνητικό δυναμικό. Η βασική εξίσωση που περιγράφει το μαγνητοστατικό πρόβλημα είναι η εξίσωση Laplace:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \tag{2.9}$$

όπου Φ είναι το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό.

Η μέθοδος αυτή δεν επιτρέπει τη λεπτομερή αναπαράσταση των ρευμάτων σε πηνία, αλλά, σε διάφορες περιπτώσεις προβλημάτων, η χρήση «κελύφους» με προδιαγεγραμμένες διαφορές δυναμικού επί της επιφάνειάς του, μπορεί να αποτελέσει μία αποδεκτή προσέγγιση.

2.4.1.2 Μέθοδος βασισμένη σε «ανηγμένο» (reduced) βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση των πηγών του μαγνητικού πεδίου με τη χρήση δύο διαφορετικών συνιστωσών πεδίου:

- του πεδίου των πηγών, H_s, το οποίο παράγεται από τις πηγές ρεύματος
- \bullet του πεδίου στο χώρο εκτός των πηγών, \mathbf{H}_m , το οποίο παράγεται από τον επαγόμενο μαγνητισμό

To pedío H_m prokúptei apó th scésh

$$\mathbf{H}_{\mathbf{m}} = -\mathrm{grad}\Phi \tag{2.10}$$

Το πεδίο H_s προκύπτει με τη χρήση του νόμου Biot-Savart, σύμφωνα με την εξίσωση,

$$\mathbf{H}_{s} = \frac{1}{4\pi} \int_{V} \frac{\mathbf{J} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r})}{\left|\mathbf{r} - \mathbf{r}\right|^{3}} dV$$
(2.11)

όπου J είναι το διάνυσμα της πυκνότητας ρεύματος των πηγών, r και r' είναι τα διανύσματα θέσης των σημείων του πεδίου και της πηγής αντίστοιχα, και η περιοχή ολοκλήρωσης καλύπτει τον όγκο όλων των ρευματοφόρων στοιχείων του αγωγού. Ωστόσο, αυτός ο τρόπος προσδιορισμού των πηγών είναι χρονοβόρος (δεδομένου ότι απαιτεί τον υπολογισμό τριπλού ολοκληρώματος στο χώρο των πηγών).

Έτσι, η ολική ένταση του μαγνητικού πεδίου προκύπτει ως η επαλληλία της έντασης του μαγνητικού πεδίου πηγής \mathbf{H}_{s} και του μαγνητικού πεδίου αντίδρασης των μαγνητικών υλικών, \mathbf{H}_{m} , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_{\mathbf{s}} + \mathbf{H}_{\mathbf{m}} = \mathbf{H}_{\mathbf{s}} - \nabla\Phi \tag{2.12}$$

Ωστόσο, επειδή το H_m και H_s είναι αντίθετης φοράς, και μέσα σε μαγνητικά υλικά έχουν παρόμοια τιμή, η διαίρεση αυτή του πεδίου σε δύο συνιστώσες παρουσιάζει σε πολλές περιπτώσεις σημαντική μείωση της ακρίβειας λόγω σφαλμάτων αλληλουεξουδετέρωσης (cancellation errors) των συνιστωσών αυτών.

2.4.1.3 Μέθοδος βασισμένη σε συνδυασμό «ολικού» (total) και «ανηγμένου» (reduced) βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού

Η μέθοδος αυτή έχει στόχο να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων μεθόδων, χωρίς να χαρακτηρίζεται από τα μειονεκτήματά τους. Ο εξεταζόμενος χώρος διαιρείται σε δύο υπο-περιοχές:

- την περιοχή που περιλαμβάνει πηγές ρεύματος, όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος που βασίζεται στο «ανηγμένο» βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό,
- τον υπόλοιπο χώρο του προβλήματος, όπου υιοθετείται η μέθοδος που βασίζεται στο «ολικό» βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό.

Οι δύο τύποι δυναμικού συνδέονται στα σύνορα των δύο περιοχών με τη χρήση των συνθηκών συνέχειας για την κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής (B_n) και την εφαπτομενική συνιστώσα της έντασης του μαγνητικού πεδίου (H_t) .

2.4.1.4 Μέθοδος βασισμένη σε συνδυασμό διανυσματικού ηλεκτρικού δυναμικού και βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ορίζεται το διανυσματικό ηλεκτρικό δυναμικό \mathbf{T} , το οποίο σχετίζεται με τα μεγέθη \mathbf{J} και \mathbf{H} ως εξής:

$$\mathbf{J} = \nabla \mathbf{T}$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{T} \cdot \nabla \Phi$$
 (2.13)

Το μέγεθος **T** μπορεί να θεωρηθεί ως το ηλεκτρικό ανάλογο του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού **A** (μέσω της ομοιότητας που υπάρχει στη σχέση $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$).

Η χρήση του **T** σε περιοχές με ρευματοφόρους αγωγούς επιτρέπει την καλή αναπαράσταση των κατανομών ρεύματος, ενώ η χρήση του βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού στον υπόλοιπο χώρο οδηγεί σε μείωση του συνολικού υπολογιστικού κόστους.
2.4.2 Εξισώσεις πεδίου με τη χρήση ειδικής μεθόδου βασισμένης στο βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό

Από τους τρόπους επίλυσης που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 2.4.1, φάινονται τα πλεονεκτήματα χρήσης του «ανηγμένου» βαθμωτού δυναμικού, ιδιαίτερα στην περίπτωση της μεθόδου της Παραγράφου 2.4.1.3, η οποία παρουσιάζει το πλεονέκτημα του αποδοτικού συνδυασμού δύο μεθόδων επίλυσης. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή προαπαιτεί τον υπολογισμό του πεδίου των πηγών με τη χρήση του νόμου Biot-Savart, γεγονός το οποίο συνεπάγεται σημαντική υπολογιστική επιβάρυνση.

Στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε για την επίλυση του μαγνητοστατικού πεδίου του μετασχηματιστή, υιοθετήθηκε μια ειδική μέθοδος βασισμένη σε βαθμωτό δυναμικό, σύμφωνα με την οποία, η ένταση του μαγνητικού πεδίου Η χωρίζεται σε μία περιστροφική και μία μη περιστροφική συνιστώσα, ως εξής:

$$\mathbf{H} = \mathbf{K} - \nabla \Phi \tag{2.14}$$

όπου το Φ είναι το βαθμωτό δυναμικό σε όλο το χώρο του εξεταζόμενου προβλήματος, ενώ το **K** είναι ένα διάνυσμα (εικονική κατανομή πεδίου), το οποίο ικανοποιεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις [2.6]:

- το K είναι περιορισμένο σε απλά συνδεδεμένο υποχώρο του προβλήματος, ο οποίος περιλαμβάνει τον αγωγό (που αποτελεί την πηγή του μαγνητικού πεδίου),
- 2) $\nabla x \mathbf{K} = \mathbf{J}$ μέσα στον αγωγό και $\nabla x \mathbf{K} = 0$ εκτός αυτού,
- 3) το Κ είναι κάθετο στα σύνορα του υποχώρου.

Tο παραπάνω διάνυσμα ικανοποιεί το νόμο του Ampere \oint Kdl = NI, για

οποιαδήποτε τυχαία διαδρομή εντός του υποχώρου (οπότε και δεν υπάρχει ανάγκη υπολογισμού του πεδίου των πηγών με το νόμο Biot-Savart).

Επιπλέον, ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η επιλογή του **K** μπορεί να συμβάλλει στην αποφυγή των σφαλμάτων αλληλοεξουδετέρωσης τα οποία περιγράφηκαν στην Παράγραφο 2.4.1.2 (με την επιλογή κατανομής συμβατής με το διακριτό σχήμα των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.4.1 του Κεφαλαίου 3)

2.4.3 Διακριτοποίηση των εξισώσεων πεδίου και αναπαράσταση τους στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

2.4.3.1 Συναρτήσεις μορφής

Στην ανάλυση που περιγράφεται στη συνέχεια, χρησιμοποιείται τρισδιάστατο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, ενώ το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται ότι αποτελείται από τετραεδρικά στοιχεία πρώτου βαθμού, όπως αυτό του Σχήματος 2.1. Οι κορυφές i, j, k και l του τετραέδρου αποτελούν κόμβους του πλέγματος, με δυναμικά Φ_i, Φ_j, Φ_k και Φ₁ αντίστοιχα (τετραεδρικό κομβικό στοιχείο). Για τον υπολογισμό του δυναμικού στα υπόλοιπα σημεία του τετραέδρου πρέπει να προσδιοριστεί η μεταβολή του πάνω σε αυτό. Η συνάρτηση μορφής αναπαρίσταται από πολυωνυμική προσέγγιση σύμφωνα με τον αριθμό των κορυφών του τετραέδρου και τα αντίστοιχα δυναμικά. Έτσι, στην περίπτωση του τετραέδρου και τα αντίστοιχα δυναμικά. Έτσι, στην περίπτωση του τετραέδρου βαθμού). Το δυναμικό σε οποιοδήποτε σημείο του τετραέδρου βαθμού.

όπου οι συντελεστές a_1 , a_2 , a_3 και a_4 εξαρτώνται από τα δυναμικά Φ_i , Φ_j , Φ_k και Φ_l και τις συντεταγμένες των αντίστοιχων κορυφών. Ο προσδιορισμός τους γίνεται μέσω των σχέσεων:

$$\Phi_{i}=\alpha_{1}+\alpha_{2}x_{i}+\alpha_{3}y_{i}+\alpha_{4}z_{i}$$

$$\Phi_{j}=\alpha_{1}+\alpha_{2}x_{j}+\alpha_{3}y_{j}+\alpha_{4}z_{j}$$

$$\Phi_{k}=\alpha_{1}+\alpha_{2}x_{k}+\alpha_{3}y_{k}+\alpha_{4}z_{k}$$

$$\Phi_{l}=\alpha_{1}+\alpha_{2}x_{l}+\alpha_{3}y_{k}+\alpha_{4}z_{l}$$
(2.16)

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (2.16) οδηγεί στις ακόλουθες εκφράσεις για τα α_1 , α_2 , α_3 και α_4 :

$$\alpha_{1} = \frac{\alpha_{i}\Phi_{i} + \alpha_{j}\Phi_{j} + \alpha_{k}\Phi_{k} + \alpha_{1}\Phi_{1}}{6V}$$

$$\alpha_{2} = \frac{b_{i}\Phi_{i} + b_{j}\Phi_{j} + b_{k}\Phi_{k} + b_{1}\Phi_{1}}{6V}$$

$$\alpha_{3} = \frac{c_{i}\Phi_{i} + c_{j}\Phi_{j} + c_{k}\Phi_{k} + c_{1}\Phi_{1}}{6V}$$

$$\alpha_{4} = \frac{d_{i}\Phi_{i} + d_{j}\Phi_{j} + d_{k}\Phi_{k} + d_{1}\Phi_{1}}{6V}$$
(2.17)

όπου V ο όγκος του τετραέδρου, ο οποίος υπολογίζεται μέσω της Σχέσης (2.18), ενώ οι συντελεστές α_i , b_i , c_i και d_i δίνονται από τις Σχέσεις (2.19) έως (2.22).

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_i & x_j & x_k & x_1 \\ y_i & y_j & y_k & y_1 \\ z_i & z_j & z_k & z_1 \end{vmatrix}$$
(2.18)

$$\alpha_{i} = \begin{vmatrix} x_{j} & y_{j} & z_{j} \\ x_{k} & y_{k} & z_{k} \\ x_{1} & y_{1} & z_{1} \end{vmatrix}$$
(2.19)

$$b_{i} = -\begin{vmatrix} 1 & y_{j} & z_{j} \\ 1 & y_{k} & z_{k} \\ 1 & y_{1} & z_{1} \end{vmatrix}$$
(2.20)

$$c_{i} = \begin{vmatrix} x_{j} & 1 & z_{j} \\ x_{k} & 1 & z_{k} \\ x_{1} & 1 & z_{1} \end{vmatrix}$$
(2.21)

$$d_{i} = -\begin{vmatrix} x_{j} & y_{j} & 1 \\ x_{k} & y_{k} & 1 \\ x_{1} & y_{1} & 1 \end{vmatrix}$$
(2.22)

Οι συντελεστές για j, k και l προκύπτουν από τους παραπάνω τύπους με ωρολογιακή μετάθεση δεικτών, όπως περιγράφεται στην (2.23):

στο 1° μέλος των (2.19) - (2.22)
$$\begin{cases} i \Rightarrow j, k, 1 \\ j \Rightarrow k, l, i \\ k \Rightarrow l, i, j \\ l \Rightarrow i, j, k \end{cases}$$
 στο 2° μέλος των (2.19) - (2.22) (2.23)

Με αντικατάσταση των α_1 , α_2 , α_3 και α_4 μέσω της (2.17) και των (2.19) έως (2.22), η εξίσωση (2.15) γίνεται:

$$\Phi(x, y, z) = \sum_{i=i, j, k, l} \frac{1}{6V} (\alpha_i + b_i x + c_i y + d_i z) \Phi_i$$
(2.24)

όπου ο συντελεστής του Φ_i είναι γνωστός ως συνάρτηση μορφής.



Σχήμα 2.1: Τετραεδρικό πεπερασμένο στοιχείο πρώτου βαθμού

Η Σχέση (2.14), η οποία δίνει την ένταση του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του μαγνητικού βαθμωτού δυναμικού στην περίπτωση της μεθόδου που υιοθετήθηκε στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε μπορεί να γραφεί με τη μορφή της (2.25):

$$H_{x} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{x}$$

$$H_{y} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} + K_{y}$$

$$H_{z} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} + K_{z}$$
(2.25)

Συνδυάζοντας τις (2.24) και (2.25) προκύπτει ότι:

$$H_{x} = -\sum_{i=i,j,k,l} \frac{1}{6 \cdot V} b_{i} \Phi_{i} + K_{x}$$

$$H_{y} = -\sum_{i=i,j,k,l} \frac{1}{6 \cdot V} c_{i} \Phi_{i} + K_{y}$$

$$H_{z} = -\sum_{i=i,j,k,l} \frac{1}{6 \cdot V} d_{i} \Phi_{i} + K_{z}$$
(2.26)

Δεδομένου ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου Η δίνεται από τη σχέση (2.26) και το δυναμικό μεταβάλλεται γραμμικά στο στοιχείο, για σταθερή εικονική κατανομή πεδίου Κ

εντός του τετραέδρου, η ένταση του μαγνητικού πεδίου και η μαγνητική επαγωγή \mathbf{B} (σε περίπτωση ομογενούς μ_r στο στοιχείο) είναι σταθερή σε όλα τα σημεία του τετραέδρου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι:

- Παρά το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο τύπο στοιχείου θεωρήθηκε γραμμική συνάρτηση μορφής, είναι δυνατή η θεώρηση άλλου τύπου συνάρτησης. Για παράδειγμα, εάν το τετράεδρο περιλαμβάνει κόμβους του πλέγματος κατά μήκος των ακμών του, μπορεί να ληφθεί συνάρτηση μορφής δευτέρου βαθμού, η οποία αντιστοιχεί σε γραμμική μεταβολή της έντασης Η του μαγνητικού πεδίου μέσα στο στοιχείο.
- Σε γενικές γραμμές, η χρήση συνάρτησης μορφής ανωτέρου βαθμού θα δώσει μεγαλύτερη ακρίβεια επίλυσης για τον ίδιο αριθμό στοιχείων (τετραέδρων) του πλέγματος. Ωστόσο, στην περίπτωση μη γραμμικών προβλημάτων, η μεταβολή της έντασης του μαγνητικού πεδίου και κατ'επέκταση της μαγνητικής διαπερατότητας εντός των στοιχείων που αναπαριστούν περιοχές σιδήρου περιπλέκει σημαντικά το μοντέλο, και απαιτεί αριθμητική ολοκλήρωση κατά την εκτέλεση των υπολογισμών.

2.4.3.2 Αριθμητική προσέγγιση των εξισώσεων του πεδίου

Η πιο γενική αριθμητική προσέγγιση των εξισώσεων του πεδίου στηρίζεται στον προσδιορισμό των ακροτάτων του συστήματος μαγνητικής ενέργειας – συνενέργειας (μέθοδος μεταβολών – variational principle). Η ποσότητα που σχετίζεται με την ενέργεια του μαγνητικού πεδίου αποκαλείται συνήθως και συναρτησιακή (functional), επειδή είναι συνάρτηση τόσο του δυναμικού όσο και της παραγώγου του, όπως θα φανεί στη συνέχεια. Η απαιτούμενη λύση λαμβάνεται όταν η κατανομή των δυναμικών στους κόμβους του πλέγματος είναι τέτοια ώστε ο ρυθμός μεταβολής της συναρτησιακής είναι μηδέν για μικρές μεταβολές του δυναμικού. Έτσι, η προσέγγιση πραγματοποιείται εξάγοντας μία αναλυτική εκφραση για τη συναρτησιακή, παραγωγίζοντάς την ως προς το δυναμικό και εξισώνοντας την παράγωγο με μηδέν.

Α. Ενέργεια και συνενέργεια

Σε αυτήν την παράγραφο δίνεται συνοπτικά η έννοια της ενέργειας και της συνενέργειας σε διατάξεις με μαγνητικά υλικά, η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια στον υπολογισμό της συναρτησιακής και την εξαγωγή του συστήματος εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων.

Θεωρείται ένα πηνίο με πυρήνα σιδήρου, το οποίο τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα αυξανόμενο από την τιμή 0 μέχρι Ι, τέτοια ώστε να προκαλέσει κορεσμό του μαγνητικού υλικού. Οι καμπύλες μαγνήτισης που αντιστοιχούν σε αυτήν την περίπτωση φαίνονται στο Σχήμα 2.2.

Ο όρος ενέργεια αναφέρεται στην ενέργεια που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο και αντιστοιχεί στο εμβαδό της περιοχής W_e του Σχήματος 2.2, δίνεται δε από τη Σχέση (2.27), με ολοκλήρωση κατά μήκος του αγωγού και της περιοχής που τον περιβάλλει.

$$W_{e} = \int_{0}^{\Phi} i d\phi = \int_{0}^{B} h db \qquad (2.27)$$

Η περιοχή C_e αντιστοιχεί στη συνενέργεια, η οποία αντιστοιχεί στο ολοκλήρωμα (2.28).

$$C_e = \int_0^I \Phi di = \int_0^H b dh$$
 (2.28)

Η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια είναι ίση με την ενέργεια που παρέχεται από την πηγή. Το συνολικό εμβαδό W_e+C_e είναι ίσο με την ολοκλήρωση της ποσότητας J A κατά μήκος του αγωγού, όπου J και A είναι τα τελικά επίπεδα πυκνότητας ρεύματος και ροής. Όταν το πρόβλημα είναι γραμμικό (δηλαδή στην περίπτωση λειτουργίας στη γραμμική περιοχή των καμπυλών του Σχήματος 2.2), η μαγνητική ενέργεια και συνενέργεια είναι ίσες με την ενέργεια που παρέχεται, οπότε το πρόβλημα απλοποιείται σημαντικά.



Σχήμα 2.2: Καμπύλες μαγνήτισης.

Β. Εξαγωγή τύπου και παραγώγιση συναρτησιακής

Η συνολική αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια, η οποία ορίζεται και ως συναρτησιακή F_e σε ένα σύστημα μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση του ολοκληρώματος (2.29):

$$F_e = W_e = \iint_{V_0}^{B} h(b) db dx dy dz = \iint_{V_0}^{H} \mu(h) h dh dx dy dz$$
(2.29)

Εάν θεωρηθεί ότι η μαγνητική διαπερατότητα είναι σταθερή, η παραπάνω σχέση οδηγεί στη σχέση (2.30) για τη συναρτησιακή F_e εντός πεπερασμένου στοιχείου:

$$F_{e} = W_{e} = \int_{V} \mu \left[\frac{h^{2}}{2} \right]_{0}^{H} dx dy dz = \int_{V} \frac{\mu}{2} H^{2} dx dy dz$$
(2.30)

Από τις Σχέσεις (2.25) και (2.30), προκύπτει ότι:

$$F_{e} = W_{e} = \int_{V} \frac{\mu}{2} \left[\left(-\frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{x} \right)^{2} + \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial y} + K_{y} \right)^{2} + \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial z} + K_{z} \right)^{2} \right] dx dy dz$$
(2.31)

όπου, V ο όγκος του στοιχείου. Έτσι, η συμβολή στο ρυθμό μεταβολής της συναρτησιακής ενός στοιχείου ως προς το δυναμικό Φ από τη μεταβολή του δυναμικού του κόμβου i του θεωρούμενου στοιχείου, είναι:

$$\frac{\partial F_{e}}{\partial \Phi_{i}} = \int_{V} \frac{\mu}{2} \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left[\left(-\frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{x} \right)^{2} + \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial y} + K_{y} \right)^{2} + \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial z} + K_{z} \right)^{2} \right] dx dy dz$$
(2.32)

Για τους επιμέρους όρους του παραπάνω ολοκληρώματος ισχύει:

$$\frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{x} \right)^{2} = \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^{2} - 2 \frac{\partial \Phi}{\partial x} K_{x} + K_{x}^{2} \right] \\ = 2 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) - 2 \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) K_{x} + \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} (K_{x}^{2})$$
(2.33)

$$\frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial y} + K_{y} \right)^{2} = \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^{2} - 2 \frac{\partial \Phi}{\partial y} K_{y} + K_{y}^{2} \right] \\ = 2 \frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) - 2 \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) K_{y} + \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} (K_{y}^{2})$$
(2.34)

$$\frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial z} + K_{z} \right)^{2} = \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^{2} - 2 \frac{\partial \Phi}{\partial z} K_{z} + K_{z}^{2} \right] \\ = 2 \frac{\partial \Phi}{\partial z} \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) - 2 \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) K_{z} + \frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} (K_{z}^{2})$$
(2.35)

Με τη βοήθεια της (2.26), οι (2.33) έως (2.35) καταλήγουν στις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{x} \right)^{2} = \frac{b_{i}}{6V} \frac{(b_{i}\Phi_{i} + b_{j}\Phi_{j} + b_{k}\Phi_{k} + b_{l}\Phi_{l})}{6V} - 2\frac{b_{i}}{6V}K_{x}$$
(2.36)

$$\frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial y} + K_{y} \right)^{2} = \frac{c_{i}}{6V} \frac{(c_{i} \Phi_{i} + c_{j} \Phi_{j} + c_{k} \Phi_{k} + c_{l} \Phi_{l})}{6V} - 2\frac{c_{i}}{6V} K_{y}$$
(2.37)

$$\frac{\partial}{\partial \Phi_{i}} \left(-\frac{\partial \Phi}{\partial z} + K_{z} \right)^{2} = \frac{d_{i}}{6V} \frac{(d_{i}\Phi_{i} + d_{j}\Phi_{j} + d_{k}\Phi_{k} + d_{l}\Phi_{l})}{6V} - 2\frac{d_{i}}{6V}K_{z}$$
(2.38)

Έτσι, το ολοκλήρωμα (2.32) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\frac{\partial F_{e}}{\partial \Phi_{i}} = \frac{\mu}{2} \int_{V} 2 \begin{bmatrix} \frac{b_{i}}{6V} \frac{(b_{i}\Phi_{i} + b_{j}\Phi_{j} + b_{k}\Phi_{k} + b_{l}\Phi_{l})}{6V} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{(c_{i}\Phi_{i} + c_{j}\Phi_{j} + c_{k}\Phi_{k} + c_{l}\Phi_{l})}{6V} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{(c_{i}\Phi_{i} + c_{j}\Phi_{j} + c_{k}\Phi_{k} + c_{l}\Phi_{l})}{6V} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{1}{6V} \frac{1}{6V} K_{x} + \frac{b_{i}}{2} \int_{V} 2\begin{bmatrix} \frac{b_{i}}{6V} K_{x} + \frac{b_{i}}{6V} K_{x} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{1}{6V} K_{x} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{1}{6V} K_{x} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{1}{6V} \frac{1}{6V} K_{x} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{1}{6V} K_{x} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{1}{6V} \frac{1}{6V} K_{x} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{1}{6V} \frac{1}{6V} K_{x} + \frac{b_{i}}{6V} \frac{1}{6V} \frac{$$

Ο υπολογισμός των ολοκληρωμάτων της (2.39) οδηγεί στη σχέση (2.40), η οποία δίνεται σε μορφή πίνακα. Ο πρώτος πίνακας της Σχεσης (2.40) είναι συμμετρικός ως προς την κύρια διαγώνιο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η Σχέση (2.40) δίνει τη συμβολή στο ρυθμό μεταβολής της συναρτησιακής στοιχείου (F_e) ως προς το δυναμικό Φ από τη μεταβολή του δυναμικού του κόμβου i του θεωρούμενου στοιχείου. Ωστόσο, για να ληφθεί ο συνολικός ρυθμός μεταβολής της συναρτησιακής F του συστήματος ως προς το δυναμικό Φ από τη μεταβολή του δυναμικού του κόμβου i, πρέπει να αθροιστούν οι συμβολές από όλα τα γειτονικά στοιχεία, δηλαδή τα στοιχεία που έχουν κορυφή των κόμβο i. Έτσι, ο συνολικός ρυθμός μεταβολής της συναρτησιακής F του συστήματος ως προς το δυναμικό Φ από τη

μεταβολή του δυναμικού του κόμβου i υπολογίζεται από τη Σχέση (2.41), όπου το άθροισμα Σεκφράζει το άθροισμα των συνεισφορών όλων των τετραέδρων που έχουν κορυφή το i.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_{e}}{\partial \Phi_{i}} \\ \frac{\partial F_{e}}{\partial \Phi_{j}} \\ \frac{\partial F_{e}}{\partial \Phi_{k}} \\ \frac{\partial F_{e}}{\partial \Phi_{l}} \end{bmatrix} = \frac{\mu}{36V} \begin{bmatrix} b_{i}^{2} + c_{i}^{2} + d_{i}^{2} & b_{i}b_{j} + c_{i}c_{j} + d_{i}d_{j} & b_{i}b_{k} + c_{i}c_{k} + d_{i}d_{k} & b_{i}b_{l} + c_{i}c_{l} + d_{i}d_{l} \\ b_{j}b_{i} + c_{j}c_{i} + d_{j}d_{i} & b_{j}^{2} + c_{j}^{2} + d_{j}^{2} & b_{j}b_{k} + c_{j}c_{k} + d_{j}d_{k} & b_{j}b_{l} + c_{j}c_{l} + d_{j}d_{l} \\ b_{k}b_{i} + c_{k}c_{i} + d_{k}d_{i} & b_{k}b_{j} + c_{k}c_{j} + d_{k}d_{j} & b_{k}^{2} + c_{k}^{2} + d_{k}^{2} & b_{k}b_{l} + c_{k}c_{l} + d_{k}d_{l} \\ b_{l}b_{i} + c_{l}c_{i} + d_{l}d_{i} & b_{l}b_{j} + c_{l}c_{j} + d_{l}d_{j} & b_{l}b_{k} + c_{l}c_{k} + d_{l}d_{k} & b_{l}^{2} + c_{l}^{2} + d_{l}^{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{i} \\ \Phi_{j} \\ \Phi_{k} \\ \Phi_{l} \end{bmatrix}$$

$$-\frac{\mu}{6V}\frac{1}{4}\begin{bmatrix} b_{i}K_{x} + c_{i}K_{y} + d_{i}K_{z} \\ b_{j}K_{x} + c_{j}K_{y} + d_{j}K_{z} \\ b_{k}K_{x} + c_{k}K_{y} + d_{k}K_{z} \\ b_{l}K_{x} + c_{l}K_{y} + d_{l}K_{z} \end{bmatrix}$$
(2.40)

$$\left\lfloor \frac{\partial F}{\partial \Phi_i} \right\rfloor = \sum_{e} \frac{\partial F_e}{\partial \Phi_i}$$
(2.41)

Με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που περιγράφηκε προηγουμένως, προκύπτουν πίνακες που δίνουν την παράγωγο της συναρτησιακής ως προς μεταβολές του δυναμικού όλων των κόμβων που αποτελούν το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων του εξεταζόμενου χώρου. Έτσι, εξισώνοντας τις παραγώγους με μηδέν, προκύπτει σύστημα της μορφής:

$$[S][\Phi] = [F]$$
 (2.42)

όπου [S] είναι τετραγωνικός πίνακας, διάστασης ίσης με τον αριθμό των κόμβων του πλέγματος, ο οποίος καλείται πίνακας ακαμψίας, ενώ [Φ] είναι το διάνυσμα των τιμών του δυναμικού στους κόμβους και [F] το διάνυσμα των πηγών. Ο πρώτος πίνακας της Σχέσης (2.40) αποτελεί αντίστοιχα τον στοιχειώδη πίνακα ακαμψίας [Se], διάστασης 4x4 (όσος είναι και ο αριθμός των κόμβων του θεωρούμενου τετραέδρου). Ο συνολικός πίνακας [S] προκύπτει με τοποθέτηση των στοιχείων του στοιχειώδους πίνακα στις γραμμές και στήλες που αντιστοιχούν στον αύξοντα αριθμό κόμβων του πλέγματος. Έτσι, ανάλογα με τη συνδετικότητα των κόμβων του πλέγματος, η υπέρθεση των στοιχειωδών πινάκων οδηγεί σε άθροιση των συμβολών όλων των γειτονικών τετραέδρων του πλέγματος στην παράγωγο της συναρτησιακής ως προς τη μεταβολή του δυναμικού ενός κόμβου (όπως περιγράφεται στη Σχέση (2.41)). Αντίστοιχα, ο δεύτερος πίνακας της Σχέσης (2.40) είναι το στοιχειώδες διάνυσμα των πηγών του τετραέδρου [Fe], από το οποίο προκύπτει το συνολικό διάνυσμα [F]. Ο πίνακας ακαμψίας [S] είναι αραιός, καθώς υπάρχει συσχέτιση του κάθε κόμβου του πλέγματος μόνο με τους κόμβους που συνδέονται άμεσα με αυτόν. Επιπλέον, για τους κόμβους οι οποίοι βρίσκονται πάνω σε επιφάνειες με επιβεβλημένες οριακές συνθήκες τύπου Dirichlet, το δυναμικό θα είναι γνωστό.

Η γενική μορφή των στοιχείων του πίνακα $[S_e]$ μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$S_{ij}^{e} = \frac{\mu}{36 \cdot V} (b_{i}b_{j} + c_{i}c_{j} + d_{i}d_{j}) \quad \gamma \iota \alpha \quad i = i, j, k, l \quad \kappa \alpha \iota j = i, j, k, l \quad (2.43)$$

Αντίστοιχα, η γενική μορφή των στοιχείων του πίνακα [Fe] μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$F_{i}^{e} = \frac{\mu}{6 \cdot V} \frac{(b_{i}K_{x} + c_{i}K_{y} + d_{i}K_{z})}{4} \gamma \iota \alpha \quad i = i, j, k, l$$
(2.44)

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την εξαγωγή της αριθμητικής προσέγγισης των εξισώσεων του πεδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μέθοδοι, όπως η μέθοδος ισορρόπισης ολοκληρωτικών υπολοίπων (weighted residual method) καταλήγωντας στην ίδια έκφραση για τις εξισώσεις (2.42) έως (2.44).

2.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (ΜΟΣ)

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η μέθοδος των οριακών στοιχείων έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών και έχει γίνει μία από τις επικρατέστερες αριθμητικές τεχνικές επίλυσης μιας σειράς φυσικών προβλημάτων. Η μέθοδος των οριακών στοιχείων προκύπτει από διακριτοποίηση της ολοκληρωτικής εξίσωσης η οποία είναι μαθηματικά ισοδύναμη με την αρχική μερική διαφορική εξίσωση (ΜΔΕ) που περιγράφει το εξεταζόμενο πρόβλημα. Ο μετασχηματισμός αυτής της διαφορικής εξίσωσης οδηγεί σε διατύπωση μίας ολοκληρωτικής εξίσωσης πάνω στο σύνορο του εξεταζόμενου χώρου και ενός ολοκληρώματος το οποίο συσχετίζει τη λύση στο σύνορο με τη λύση στα υπόλοιπα σημεία του χώρου. Ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο για συγκεκριμένες κατηγορίες ΜΔΕ. Έτσι, η μέθοδος των οριακών στοιχείων (ΟΣ) δε μπορεί να εφαρμοστεί σε τόσο ευρύ φάσμα εφαρμογών, όσο η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχειων. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που η μέθοδος των οριακών στοιχείων μπορεί να εφαρμοστεί, αποτελεί συνήθως μία αριθμητική μέθοδο πιο εύχρηστη και υπολογιστικά αποδοτική από τη ΜΠΣ.

Τα προτερήματα της μεθόδου οριακών στοιχείων συνίστανται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι απαιτεί διακριτοποίηση μόνο του συνόρου (ή των συνόρων) του πεδίου ορισμού της ΜΔΕ (ενώ στην περίπτωση της ΜΠΣ απαιτείται διακριτοποίηση όλου του πεδίου ορισμού της ΜΔΕ). Έτσι, το εξεταζόμενο πρόβλημα μειώνεται αποδοτικά κατά μία διάσταση: για παράδειγμα, μία εξίσωση που περιγράφει ένα τρισδιάστατο πρόβλημα μετασχηματίζεται σε ολοκληρωτική εξίσωση πάνω στην εξωτερική του επιφάνεια, μετατρέποντας έτσι το πρόβλημα σε δισδιάστατο. Σε περιπτώσεις που το εξεταζόμενο πεδίο είναι εξωτερικό του συνόρου, η έκταση του πεδίου είναι άπειρη και τα πλεονεκτήματα της χρήσης οριακών στοιχείων γίνονται ακόμη πιο εμφανή, καθώς η εξίσωση που περιγράφει τον άπειρο χώρο μετασχηματίζεται σε εξίσωση πάνω στο πεπερασμένο σύνορο.

2.6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.6.1 Εξαγωγή ολοκληρωτικής εξίσωσης

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.5, η μέθοδος των οριακών στοιχείων προκύπτει από διακριτοποίηση της ολοκληρωτικής εξίσωσης η οποία είναι μαθηματικά ισοδύναμη με την αρχική ΜΔΕ που περιγράφει το εξεταζόμενο πρόβλημα. Στην περίπτωση των μαγνητοστατικών προβλημάτων, η ΜΔΕ αυτή είναι η εξίσωση του Laplace, (2.9). Έστω Ω το (τρισδιάστατο) πεδίο ορισμού του εξεταζόμενου προβλήματος και Γ το (δισδιάστατο) σύνορό του (Σχήμα 2.3). Για τη διακριτοποίηση της ΜΔΕ Laplace και την επίλυσή της στη μέθοδο των οριακών στοιχείων χρησιμοποιείται η μέθοδος ισορρόπησης των ολοκληρωτικών υπολοίπων (weighted residual method) η οποία περιγράφεται στην αναφορά [2.7].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, το σύνορο Γ διαιρείται σε δύο τμήματα, το τμήμα Γ_1 στο οποίο επιβαλλεται οριακή συνθήκη Dirichlet με επιβεβλημένη τιμή δυναμικού $\overline{\phi}$ και το τμήμα Γ_2 , στο οποίο επιβάλλεται οριακή συνθήκη Neumann, με επιβεβλημένη τιμή κάθετης παραγώγου δυναμικού \overline{q} (χάριν γενικότητας θεωρούνται και τα δύο είδη οριακής συνθήκης). Θεωρείται μία συνάρτηση βάρους Φ^* , με συνεχείς παραγώγους στο Ω, η οποία ικανοποιεί τη MΔE (2.9). Σύμφωνα με το θεώρημα του Green, ισχύει:



Σχήμα 2.3: Τομή (επίπεδο xy) ενός τρισδιάστατου πεδίου ορισμού μαγνητοστατικού προβλήματος και ορισμοί βασικών μεγεθών.

Αφού η ζητούμενη συνάρτηση Φ ικανοποιεί την MΔE Laplace, ο πρώτος όρος του ολοκληρώματος του πρώτου μέλους της (2.45) μηδενίζεται. Ως συνάρτηση βάρους $Φ^*$ στην εξίσωση (2.45) επιλέγεται η θεμελιώδης συνάρτηση του Green, η οποία επαληθεύει την εξίσωση Laplace στις τρεις διαστάσεις. Ο τύπος της συνάρτησης Green είναι:

$$\Phi^* = \frac{1}{4\pi r} = \frac{1}{4\pi \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$
(2.46)

Για την Φ^* σε κόμβο i ισχύει η Σχέση (2.47), όπου δ(i) η συνάρτηση Dirac στον κόμβο i.

$$\nabla^2 \Phi^*(\mathbf{i}) = -\delta(\mathbf{i}) \tag{2.47}$$

Είναι ωστόσο γνωστό ότι:

$$\int_{\Omega} \delta(i) dv = c(i) = \begin{cases} 0.5, & \epsilon \dot{\alpha} v & i \in \Gamma(\lambda \epsilon i \sigma \ \sigma \dot{v} v \circ \rho \sigma) \\ & 1, & \epsilon \dot{\alpha} v & i \in \Omega \\ & 0, & \epsilon \dot{\alpha} v & i \notin \Omega \end{cases}$$
(2.48)

Έτσι, με βάση τα παραπάνω, η εξίσωση (2.45) για κόμβο i του πλέγματος των οριακών στοιχείων μετασχηματίζεται στη (2.49):

$$c(i)\Phi(i) = \int_{\Gamma} \left(\Phi^{*}(i) \frac{\partial \Phi(i)}{\partial n} - \Phi(i) \frac{\partial \Phi^{*}(i)}{\partial n} \right) ds \Rightarrow$$

$$c(i)\Phi(i) + \int_{\Gamma} \left(\Phi(i) \frac{\partial \Phi^{*}(i)}{\partial n} - \Phi^{*}(i) \frac{\partial \Phi(i)}{\partial n} \right) ds = 0$$
(2.49)

2.6.2 Διακριτοποίηση ολοκληρωτικής εξίσωσης

Η εξίσωση (2.49) εφαρμόζεται στο σύνορο του εξεταζόμενου χώρου. Το σύνορο του τρισδιάστατου χώρου θεωρείται ότι χωρίζεται σε n οριακά στοιχεία, δηλαδή σε τρίγωνα με άγνωστες τιμές δυναμικού στις κορυφές του (οι οποίες αποτελούν τους κόμβους του πλέγματος). Οι τιμές του δυναμικού και της κάθετης παραγώγου του θεωρείται ότι μεταβάλλονται γραμμικά σε κάθε τρίγωνο του πλέγματος (οριακά στοιχεία πρώτου βαθμού). Μπορούν επίσης να ληφθούν άλλοι τύποι οριακών στοιχείων (π.χ. τετράγωνα ή πολύγωνα με καμπυλότητα, ανάλογα με την εφαρμογή), ωστόσο η ανάλυση που ακολουθεί εστιάζει στη χρήση τριγωνικών οριακών στοιχείων. Έστω ότι n_1 από τα θεωρούμενα οριακά στοιχεία ανήκουν στο σύνορο Γ_1 και n_2 ανήκουν στο σύνορο Γ_2 . Η διακριτή μορφή της εξίσωσης (2.49) για τον κόμβο i του πλέγματος έχει τη μορφή της (2.50):

$$c(i)\Phi(i) + \sum_{j=l}^{n} \int_{\Gamma_{j}} \Phi(i) \frac{\partial \Phi^{*}(i)}{\partial n} d\Gamma - \sum_{j=l}^{n} \int_{\Gamma_{j}} \Phi^{*}(i) \frac{\partial \Phi(i)}{\partial n} d\Gamma = 0$$
(2.50)

Θεωρείται ότι το τρίγωνο του Σχήματος 2.4 είναι το πρώτο τριγωνικό στοιχείο του πλέγματος των οριακών στοιχείων, με κορυφές τους κόμβους 1, 2 και 3 του πλέγματος, βαρύκεντρο το σημείο C, ενώ j είναι ένα τυχαίο τρίγωνο του πλέγματος. Οι τιμές του δυναμικού και της κάθετης παραγώγου του σε κάθε σημείο του στοιχείου του Σχήματος 2.4 μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των αντίστοιχων τιμών στις κορυφές του, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Phi(\mathbf{x}_{i}, \mathbf{y}_{i}, \mathbf{z}_{i}) = (1 - \xi_{1} - \xi_{2})\Phi_{1} + \xi_{1}\Phi_{2} + \xi_{2}\Phi_{3}$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\mathbf{n}}(\mathbf{x}_{i}, \mathbf{y}_{i}, \mathbf{z}_{i}) = (1 - \xi_{1} - \xi_{2})\frac{\partial\Phi_{1}}{\partial\mathbf{n}} + \xi_{1}\frac{\partial\Phi_{2}}{\partial\mathbf{n}} + \xi_{2}\frac{\partial\Phi_{3}}{\partial\mathbf{n}}$$
(2.51)

όπου το $\xi = \{1-\xi_1-\xi_2, \xi_1, \xi_2\}$ είναι το διάνυσμα αδιάστατων συντεταγμένων, με τη χρήση του οποίου πραγματοποιείται κανονικοποίηση των συντεταγμένων των κορυφών του τριγώνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4: Τριγωνικό στοιχείο (πρώτου βαθμού) πλέγματος οριακών στοιχείων.



Σχήμα 2.5: Χρήση διανύσματος αδιάστατων συντεταγμένων ξ={1-ξ₁-ξ₂, ξ₁, ξ₂} για την κανονικοποίηση των συντεταγμένων των κορυφών του τριγωνικού στοιχείου του Σχήματος 2.4.

Με βάση τις Σχέσεις (2.51), τα ολοκληρώματα της Σχέσης (2.50) μετασχηματίζονται ως εξής:

$$\int_{\Gamma_{j}} \Phi(i) \frac{\partial \Phi^{*}(i)}{\partial n} d\Gamma = \int_{\Gamma_{j}} [1 - \xi_{1} - \xi_{2} \quad \xi_{1} \quad \xi_{2}] \frac{\partial \Phi^{*}(i)}{\partial n} d\Gamma \begin{bmatrix} \Phi_{1} \\ \Phi_{2} \\ \Phi_{3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{i1} \quad h_{i2} \quad h_{i3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{1} \\ \Phi_{2} \\ \Phi_{3} \end{bmatrix}$$
(2.52)

$$\int_{\Gamma_{j}} \Phi^{*}(i) \frac{\partial \Phi(i)}{\partial n} d\Gamma = \int_{\Gamma_{j}} [1 - \xi_{1} - \xi_{2} \quad \xi_{1} \quad \xi_{2}] \Phi^{*}(i) d\Gamma \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{1}}{\partial n} \\ \frac{\partial \Phi_{2}}{\partial \Phi_{3}} \\ \frac{\partial \Phi_{3}}{\partial n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{i1} \quad g_{i2} \quad g_{i3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{1}}{\partial n} \\ \frac{\partial \Phi_{2}}{\partial \Phi_{2}} \\ \frac{\partial \Phi_{3}}{\partial \Phi_{3}} \\ \frac{\partial \Phi_{3}}{\partial \Phi_{3}} \end{bmatrix}$$
(2.53)

με Γ_j την επιφάνεια τυχαίου τριγώνου j του πλέγματος,

$$\begin{split} \mathbf{h}_{i1} &= \int_{\Gamma_j} \Phi_1 \frac{\partial \Phi^*}{\partial n} d\Gamma , \ \mathbf{h}_{i2} &= \int_{\Gamma_j} \Phi_2 \frac{\partial \Phi^*}{\partial n} d\Gamma , \ \mathbf{h}_{i3} &= \int_{\Gamma_j} \Phi_3 \frac{\partial \Phi^*}{\partial n} d\Gamma \text{ Kan} \\ \mathbf{g}_{i1} &= \int_{\Gamma_j} \Phi^* \frac{\partial \Phi_1}{\partial n} d\Gamma , \ \mathbf{g}_{i2} &= \int_{\Gamma_j} \Phi^* \frac{\partial \Phi_2}{\partial n} d\Gamma , \ \mathbf{g}_{i3} &= \int_{\Gamma_j} \Phi^* \frac{\partial \Phi_3}{\partial n} d\Gamma . \end{split}$$

Ο υπολογισμός των ολοκληρωμάτων (2.52) και (2.53) γίνεται με χρήση της αριθμητικής ολοκλήρωσης Gauss, επιλέγοντας κατάλληλους συντελεστές για το διάνυσμα ξ, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια. Η άθροιση των ολοκληρωμάτων (2.52) και (2.53) για όλα τα στοιχεία j του πλέγματος και η αντικατάστασή τους στην εξίσωση (2.50) οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση για τον κόμβο i:

$$\mathbf{c}(\mathbf{i})\Phi(\mathbf{i}) + \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{H}}_{\mathbf{i}1} & \hat{\mathbf{H}}_{\mathbf{i}2} & \dots & \hat{\mathbf{H}}_{\mathbf{i}n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \dots \\ \Phi_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\mathbf{i}1} & \mathbf{G}_{\mathbf{i}2} & \dots & \mathbf{G}_{\mathbf{i}n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial \mathbf{n}} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial \mathbf{n}} \\ \frac{\partial \Phi_n}{\partial \mathbf{n}} \end{bmatrix} = 0$$
(2.54)

όπου

$$\hat{H}_{ij} = h_{i1} + h_{i2} + h_{i3} G_{ij} = g_{i1} + g_{i2} + g_{i3}$$
, gia to stoiceío j (2.55)

Για να ενταχθεί και ο όρος c(i)
Φ(i) στους πίνακες της Σχέσης (2.54), ορίζεται πίνακας
 $\rm H_{ij}$ τέτοιος ώστε

$$\begin{split} H_{ij} &= \hat{H}_{ij}, \qquad \gamma \iota \alpha \quad i \neq j \\ H_{ij} &= \hat{H}_{ij} + 1/2, \qquad \gamma \iota \alpha \quad i = j \end{split} \tag{2.56}$$

Στη (2.56) λαμβάνεται υπόψη ότι ο κόμβος i ανήκει στο σύνορο του εξεταζόμενου χώρου, οπότε, σύμφωνα με τη (2.48), c(i)=0.5. Με τη χρήση της (2.56), η (2.54) παίρνει τη μορφή της (2.57).

$$\begin{bmatrix} H_{i1} & H_{i2} & \dots & H_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \dots \\ \Phi_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_{i1} & G_{i2} & \dots & G_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial n} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial n} \\ \frac{\partial \Phi_n}{\partial n} \end{bmatrix} = 0$$
(2.57)

η οποία μπορεί να γραφεί με τη μορφή της (2.58):

$$\sum_{j=l}^{n} H_{ij} \Phi_{j} = \sum_{j=l}^{n} G_{ij} \frac{\partial \Phi_{j}}{\partial n}$$
(2.58)

Η (2.58) γράφεται ως σύστημα εξισώσεων με μορφή πινάκων, σύμφωνα με τη (2.59), όπου [Η] και [G] οι πίνακες με τα ολοκληρώματα (2.52) και (2.53), αντίστοιχα, διαστάσεων *nxn* και [Φ], $\left[\frac{\partial \Phi}{\partial n}\right]$ οι πίνακες με τις τιμές του δυναμικού και τις τιμές κάθετης παραγώγου δυναμικού των κόμβων, αντίστοιχα, διαστάσεων *nx1*.

$$[H][\Phi] = [G] \left[\frac{\partial \Phi}{\partial n}\right]$$
(2.59)

Στην περίπτωση που το σύνορο Γ δεν είναι λείο, δεν ισχύει η ισότητα c(i)=0.5. Τότε, ο υπολογισμός των διαγώνιων στοιχείων του πίνακα [H] μπορεί να γίνει με βάση το γεγονός ότι όταν επιβάλλεται σταθερό δυναμικό σε όλο το σύνορο, οι τιμές της κάθετης παραγώγου του δυναμικού στο σύνορο είναι μηδενικές. Έτσι, η εξίσωση (2.59) γίνεται:

$$[H][\Phi]=0 (2.60)$$

Σύμφωνα με τη (2.60), το άθροισμα όλων των στοιχείων σε κάθε γραμμή του πίνακα [Η] πρέπει να δίνει τιμή μηδέν, οπότε η τιμή των διαγώνιων στοιχείων του πίνακα μπορεί να προκύψει από τις τιμές των μη διαγώνιων στοιχείων του, σύμφωνα με τη (2.61):

$$h_{ii} = -\sum_{\substack{j=1\\j \neq i}}^{n} h_{ij}$$
 (2.61)

Σε αντίθεση με τον πινακα ακαμψίας [S] των πεπερασμένων στοιχείων, ο οποίος, όπως προαναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.4.3.2, είναι αραιός λόγω της συνδετικότητας του πλέγματος, οι πίνακες [H] και [G] δεν έχουν πολλά μηδενικά στοιχεία. Το γεγονός αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον αλγόριθμο επίλυσης του συστήματος εξισώσεων που επιλέγεται για κάθε μέθοδο.

Οι τιμές του δυναμικού στο εσωτερικό του χώρου Ω υπολογίζονται με βάση τις αντίστοιχες τιμές των κόμβων του πλέγματος στο σύνορο Γ, με τη χρήση της (2.50), η οποία για σημεία εντός του χώρου Ω (c(i)=1) γίνεται:

$$\Phi(i) = \sum_{j=1}^{n} \int_{\Gamma_{j}} \Phi^{*}(i) \frac{\partial \Phi(i)}{\partial n} d\Gamma - \sum_{j=1}^{n} \int_{\Gamma_{j}} \Phi(i) \frac{\partial \Phi^{*}(i)}{\partial n} d\Gamma = 0 \Longrightarrow$$

$$\Phi(i) = \sum_{j=1}^{n} G_{ij} \frac{\partial \Phi_{j}}{\partial n} - \sum_{j=1}^{n} \hat{H}_{ij} \Phi_{j}$$
(2.62)

2.7 ΜΕΙΚΤΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ – ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Οι αριθμητικές μέθοδοι που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αποτελούν τις δύο πλέον δημοφιλείς μεθόδους επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον και για τις δύο μεθόδους έχει οδηγήσει σε σημαντική πρόοδο στην εφαρμογή τους σε μία ποικιλία πεδιακών προβλημάτων. Η απόφαση για την επιλογή της μίας ή της άλλης μεθόδου γίνεται συνήθως με βάση τη φύση του προβλήματος, από την οποία εξαρτάται ποια μέθοδος είναι πλεονεκτικότερη, [2.8].

2.7.1 Σύγκριση μεθόδων πεπερασμένων – οριακών στοιχείων

Η παράθεση των βασικότερων διαφορών μεταξύ των δύο αυτών αριθμητικών μεθόδων επιτρέπει τη σύγκρισή τους ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, δεδομένου ότι κάποιες από αυτές τις διαφορές μπορούν να θεωρηθούν είτε πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα κατά την επίλυση κάποιου προβλήματος, [2.9].

- Μείωση διάστασης πλέγματος: Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων απαιτείται διακριτοποίση όλου του εξεταζόμενου χώρου, ενώ στη μέθοδο των οριακών στοιχείων διακριτοποιείται μόνο το σύνορό του. Η μείωση του μεγέθους του πλέγματος αυξάνει σημαντικά την ευελιξία κατά την επίλυση του προβλήματος, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο ΟΣ προτιμότερη στην περίπτωση που εξετάζονται περίπλοκες τρισδιάστατες διατάξεις.
- Τρόπος υπολογισμού των τιμών του πεδίου: Στα πεπερασμένα στοιχεία, το δυναμικό στο εσωτερικό του εξεταζόμενου χώρου υπολογίζεται κατά τη διάρκεια της επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων της μεθόδου. Αντίθετα, στα οριακά στοιχεία, η λύση στο εσωτερικό του εξεταζόμενου πεδίου πρέπει να υπολογιστεί με βάση το δυναμικό και την κάθετη παράγωγό του στο σύνορο, σε ξεχωριστό βήμα μετά την επίλυση των εξισώσεων. Σε διάφορες κατηγορίες προβλημάτων ενδιαφέρουν οι τιμές του πεδίου μόνο στο σύνορο,

ενώ σε άλλα επικεντρώνονται σε συγκεκριμένες περιοχές στο εσωτερικό του πεδίου, οπότε δε χρειάζεται υπολογισμός όλων των τιμών στο εσωτερικό του. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, η μέθοδος των οριακών στοιχείων ενδέχεται να υστερεί λόγω της ανάγκης διεξαγωγής επιπλέον υπολογισμών για την ανάκτηση των τιμών του πεδίου στο εσωτερικό του πεδίου ορισμού του εξεταζόμενου προβλήματος.

- Ακρίβεια: Στην περίπτωση των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται προσέγγιση της ΜΔΕ που περιγράφει το πρόβλημα, ενώ στα οριακά στοιχεία, προσεγγίζονται μόνο οι οριακές συνθήκες. Η χρήση του θεωρήματος Green και η θεμελιώδης λύση συνεπάγεται ότι η μέθοδος ΟΣ δεν εμπλέκει προσέγγιση της ΜΔΕ στο εσωτερικό του πεδίου ορισμού, παρά μόνο των οριακών συνθηκών της, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμού των τιμών του πεδίου στο εσωτερικό.
- Μορφή του συστήματος εξισώσεων: Στη ΜΠΣ, ο παραγόμενος πίνακας ακαμψίας είναι συμμετρικός και αραιός, ενώ οι μήτρες των οριακών στοιχείων είναι πυκνές και μη συμμετρικές. Οι μήτρες είναι ωστόσο διαφορετικού μεγέθους λόγω της διαφοράς στο μέγεθος του πλέγματος που απαιτείται σε κάθε μέθοδο. Υπάρχουν προβλήματα στα οποία μία από τις δύο μεθόδους μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερο σύστημα εξισώσεων και γρηγορότερη επίλυση, ανάλογα με το λόγο όγκου – επιφάνειας του εξεταζόμενου χώρου. Σε προβλήματα με άπειρο πεδίο ορισμού, η μέθοδος ΟΣ υπερέχει σημαντικά.
- Ευκολία υπολογισμών: Τα στοιχειώδη ολοκληρώματα της ΜΠΣ υπολογίζονται πιο εύκολα από αυτά της μεθόδου ΟΣ, στην οποία εμφανίζονται και ολοκληρώματα με αοριστία. Τα αόριστα ολοκληρώματα είναι στις περισσότερες περιπτώσεις αυτά που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια επίλυσης, γι αυτό και πρέπει να υπολογιστούν όσο το δυνατόν ακριβέστερα.
- Εύρος εφαρμογής: Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει πολύ μεγάλο εύρος εφαρμογής, το οποίο περιλαμβάνει προβλήματα με μη γραμμικά υλικά. Η μέθοδος των οριακών στοιχείων, αντίθετα, δε μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα είδη προβλημάτων, δεδομένου ότι, πριν την εφαρμογή της, πρέπει να προσδιοριστεί θεμελιώσης λύση (ή τουλάχιστον μία προσέγγισή της), η οποία δεν υφίσταται σε πολλές περιπτώσεις (ακόμη και γραμμικών) προβλημάτων (π.χ. πρόβλημα που περιγράφεται από οποιαδήποτε μη ομογενή εξίσωση). Η δυσκολία αυτή περιορίζει την εφαρμοστμότητά της, παρά το γεγονός ότι στις περιπτώσεις που μπορεί να εφαρμοστεί μπορεί να αποδειχτεί ανώτερη της ΜΠΣ.
- Ευκολία υλοποίησης: Η ΜΠΣ υλοποιείται σε γενικές γραμμές αρκετά ευκολότερα από τη μέθοδο ΟΣ, κυρίως λόγω της ανάγκης υπολογισμού ολοκληρωμάτων (τα οποία, όπως προαναφέρθηκε, συχνά εμφανίζουν αοριστία) που απαιτεί η τελευταία, η οποία αυξάνει το βαθμό δυσκολίας κατά την κατάστρωση του συστήματος εξισώσεών της.

2.7.2 Πλεονεκτήματα συνδυασμού μεθόδων πεπερασμένων – οριακών στοιχείων

Υπάρχουν περιπτώσεις προβλημάτων στις οποίες κάποια χαρακτηριστικά του προβλήματος αντιμετωπίζονται πιο εύκολα με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, ενώ κάποια άλλα αναπαρίστανται πιο αποδοτικά από τη μέθοδο των οριακών στοιχείων. Σε αυτές τις περιπτώσεις η χρήση μιας υβριδικής τεχνικής, η οποία χρησιμοποιεί και τις δύο μεθόδόυς είναι η πλέον κατάλληλη. Μια τέτοια μεικτή τεχνική επιτρέπει στο χρήστη την επιλογή περιοχών του προβλήματος που θα μοντελοποιηθούν με τη χρήση πεπερασμένων ή οριακών στοιχείων.

Η δυνατότητα εφαρμογής και των δύο μεθόδων στο ίδιο πρόβλημα αυξάνει σημαντικά την αποδοτικότητα των υπολογισμών. Προβλήματα με περίπλοκα σύνορα, μεγάλες αναλογίες διαστάσεων, μη γραμμικά υλικά ή περιοχές όπου η συμπεριφορά στο σύνορο παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, μπορούν να μοντελοποιηθούν με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Αντίθετα, περιοχές στις οποίες δεν απαιτούνται πληροφορίες για το πεδίο, όπως ο χώρος μεταξύ σωμάτων που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση, περιοχές με ανοιχτά σύνορα, υλικά που εκτείνονται στο άπειρο, απομακρυσμένα πεδία ή προβλήματα στα οποία η ομαλότητα του πεδίου παίζει σημαντικό ρόλο μπορούν να αναπαρασταθούν με τη χρήση οριακών στοιχείων. Επιπλέον, τα ζητήματα που αφορούν στην υπολογιστική απόδοση των δύο μεθόδων, σχετιζόμενα με τη μορφή των πινάκων, το μέγεθος του πλέγματος και την ευκολία υλοποίησης επηρεάζουν σε εξίσου σημαντικό βαθμό την επιλογή της κάθε μεθόδου.

Η μεικτή τεχνική αυξάνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου ΟΣ, μέσω της δυνατότητας μοντελοποίησης των επιμέρους περιοχών με μη γραμμικά υλικά και πηγές του μαγνητικού πεδίου με πεπερασμένα στοιχεία, χωρίς την αύξηση του συνολικού αριθμού των αγνώστων του προβλήματος. Η υβριδική μέθοδος είναι επίσης κατάλληλη για παραμετρικές μελέτες σχεδίασης λόγω της «ανεξαρτησίας» στην κατασκευή του πλέγματος της κάθε μεθόδου: εάν ο σχεδιαστής επιθυμεί να μελετήσει μεταβολή σε κάποιο τμήμα, χωρίς να μεταβάλλει την υπόλοιπη σχεδίαση ή να μελετήσει τη μετακίνηση ή περιστροφή ορισμένων τμημάτων της συνολικής διάταξης μπορεί να προσθέσει μία περιοχή οριακών στοιχείων στο εξωτερικό τμήμα της διάταξης και να μοντελοποιήσει τις σχετικές αλλαγές χωρίς να διαφοροποιήσει τις υπόλοιπες προδιαγραφές του προβλήματος. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά την υβριδική τεχνική εύχρηστο εργαλείο σε προβλήματα βελτιστοποίησης της σχεδίασης ηλέκτρομαγνητικών διατάξεων, πλεονέκτημα το οποίο αναδεικνύεται και σε επόμενο Κεφάλαιο της διατριβής.

Η πρώτη εμφάνιση της υβριδικής μεθόδου γίνεται στην αναφορά [2.10], ενώ στη [2.11] παρουσιάζεται η ανάπτυξη δισδιάστατου λογισμικού για την επίλυση γραμμικών προβλημάτων. Η μέθοδος επεκτάθηκε για να συμπεριλάβει περιοχές με μη γραμμικά υλικά στην αναφορά [2.12], ενώ στις αναφορές [2.13] και [2.14] εφαρμόζεται σε αξισυμμετρικά προβλήματα διανυσματικού και βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού, αντίστοιχα. Επεκτάσεις της μεθόδου σε εξωτερικά μη ομογενή προβλήματα που περιγράφονται από την εξίσωση Laplace και προβλήματα με μη ομογενές περιοχές με δινορρεύματα εμφανίζονται στις αναφορές [2.15] και [2.16], αντίστοιχα. Η εφαρμογή της μεικτής τεχνικής σε τρισδιάστατα προβλήματα περιλαμβάνει κυρίως τη χρήση βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού ([2.17], [2.8]).

2.8 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΙΚΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ – ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στην Παράγραφο 2.3.1 περιγράφηκαν οι εξισώσεις υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου. Όπως περιγράφηκε στη συνέχεια, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιλύει τις παραπάνω εξισώσεις σε μορφή πινάκων, διακριτοποιώντας το πεδίο ορισμού του μαγνητοστατικού προβλήματος με τη χρήση τρισδιάστατου τετραεδρικού πλέγματος και υπολογίζοντας τις τιμές του δυναμικού στις κορυφές των τετραέδρων που το αποτελούν, ενώ η μέθοδος των οριακών στοιχείων διακριτοποιεί μόνο το σύνορο του εξεταζόμενου χώρου και υπολογίζει το πεδίο στο εσωτερικό του χώρου με βάση τις τιμές στις κορυφές του πλέγματος του συνόρου.

Καθώς το πεδίο ορισμού του μαγνητοστατικού προβλήματος κατά την προσομοίωση της δοκιμής βραχυκύκλωσης ενός μετασχηματιστή περιλαμβάνει μεγάλες περιοχές αέρα, η υιοθέτηση της οριακής τεχνικής για την αναπαράσταση των περιοχών αυτών μειώνει την πολυπλοκότητα του πλέγματος. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ενδείκνυται για τη μοντελοποίηση του ενεργού μέρους, το οποίο περιλαμβάνει τις πηγές του μαγνητικού πεδίου (πηνία) και υλικά με μη γραμμικότητα (πυρήνας).

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων (πεπερασμένα - οριακά στοιχεία) για τη μοντελοποίηση ενός τρισδιάστατου μαγνητοστατικού προβλήματος μπορεί να υλοποιηθεί ως εξής:

Θεωρείται ένα τρισδιάστατο μεικτό πλέγμα πεπερασμένων - οριακών στοιχείων, αποτελούμενο από m κόμβους πεπερασμένων στοιχείων, n κόμβους οριακών στοιχείων και k κοινούς κόμβους στο κοινό σύνορο των δύο επιφανειών. Ο συνολικός αριθμός κόμβων είναι ίσος με: N=m+n-k. Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από i_{FEM} τετράεδρα ενώ το πλέγμα των οριακών στοιχείων περιλαμβάνει i_{BEM} τρίγωνα. Ο πίνακας των εξισώσεων που αντιστοιχεί στην παραπάνω διάταξη έχει τη μορφή της σχέσης (2.63) όπου $Φ_i$ και

 $\frac{\partial \Phi_i}{\partial n}$ είναι οι τιμές δυναμικού και κάθετης παραγώγου δυναμικού του κόμβου i αντίστοιχα.

Το αριστερό μέλος της αποτελείται από πέντε "υπο-πίνακες": [S], [F], [G], [H] και [T] οι οποίοι αντιστοιχούν στους πίνακες της μεθόδου των πεπερασμένων και των οριακών στοιχείων:

- Ο πίνακας [S] είναι ο πίνακας ακαμψίας και ο πίνακας [F] το διάνυσμα πηγών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και αντιστοιχούν στις εξισώσεις (2.40) και (2.42).
- Οι πίνακες [H] και [G] είναι οι πίνακες της μεθόδου των οριακών στοιχείων και αντιστοιχούν στις εξισώσεις (2.58) και (2.59).
- Ο πίνακας [Τ] περιλαμβάνει τους όρους που χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν την περιοχή των πεπερασμένων στοιχείων με την περιοχή των οριακών στοιχείων (εμπλέκοντας τις τιμές του δυναμικού και της κάθετης παραγώγου του δυναμικού στους κόμβους του συνόρου των δύο περιοχών). Η γενική μορφή του δίνεται από τη Σχέση (2.64), στην οποία α_i και α_j είναι οι συναρτήσεις μορφής (Παράγραφος 2.4.3.1) των κόμβων i και j αντίστοιχα. Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται το κοινό σύνορο μεταξύ των πλεγμάτων των δύο μεθόδων, στο οποίο θεωρείται ότι ανήκουν οι k κοινοί κόμβοι των δύο περιοχών.



 $T_{ij} = \int_{S \sigma \tau o t \gamma \epsilon i \sigma v} \alpha_i \alpha_j dS$ (2.64)



Σχήμα 2.6: Σύζευξη πλέγματος πεπερασμένων – οριακών στοιχείων.

Σύμφωνα με την παραπάνω διαμόρφωση, οι πηγές του μαγνητικού πεδίου βρίσκονται στην περιοχή των πεπερασμένων στοιχείων (F_i , $1 \le i \le m$). Έτσι, μπορούν να περιγραφούν από την εικονική κατανομή πεδίου **K** της εξίσωσης (2.14).

Οι μοναδιαίοι διαγώνιοι όροι που εμφανίζονται μεταξύ των σειρών m+1 και N του αριστερού μέλους της (2.63) αντιστοιχούν στις επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες του προβλήματος. Θεωρούν ότι η τιμή της κάθετης παραγώγου των αντίστοιχων κόμβων είναι γνωστή. Η ίδια θεώρηση μπορεί να γίνει για την τιμή του δυναμικού των κόμβων (σύμφωνα με τη φύση του προβλήματος που επιλύεται) μετακινώντας τις στήλες των διαγώνιων όρων, [2.18].

2.9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] G. Dhatt, G. Touzot, "Une presentation de la methode des elements finis". Collection Universite de Compiegne, Maloine editeur, Paris, 1984.
- [2.2] K. Hameyer, R. Belmans, "*Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices*". WIT Press, 1999.
- [2.3] Χ. Δικαιάκος, Κ. Μόφορη, "Σχεδίαση Μετασχηματιστή Τυλιχτού Πυρήνα και Μελέτη Δυνάμεων σε Βραχυκύκλωμα". ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2001.
- [2.4] A. B. J. Reece, T. W. Preston, *"Finite Element Methods in Electrical Power Engineering"*. Oxford University Press, May 2000.
- [2.5] K. J. Binns, P. J. Lawrenson, C. W. Trowbridge, "*The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields*". Wiley, Chichester, 2002.
- [2.6] 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.
- [2.7] C. A. Brebbia, "The Boundary Element Method for Engineers". Pentech Press, London, 1984.
- [2.8] S.J. Salon, J. D'Angelo, "Applications of the hybrid finite element boundary element method in electromagnetics", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 24, Nr. 1, Jan. 1988, pp. 80-85.
- [2.9] P. Hunter, A. Pullan, "*FEM / BEM Notes*". Dept. of Engineering Science, Univ. of Auckland, N. Zealand, February 2001.
- [2.10] B. H. McDonald, A. Wexler, "Finite Element Solution of Unbounded Field Problems," *IEEE Transactions*, Vol. MTT-20, No. 12, pp. 1267-1270, Dec. 1972.
- [2.11] S. J. Salon, J. M. Schneider, "A Hybrid Finite Element Boundary Integral Formulation of Poisson's Equation," *IEEE Trans. Magn*, Vol. 17, No. 6, pp. 2574-2576, Nov. 1981.
- [2.12] S. J. Salon, J. M. Schneider, "A Hybrid Finite Element Boundary Integral Formulation of the Eddy Current Problem," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 18, No. 2, pp.461-466, Mar. 1982.
- [2.13] S. J. Salon, J. P. Peng, "Hybrid Finite Element Boundary Element Solutions to Axisymmetric Scalar Potential Problems," Computational Electromagnetics. Elsevier Science Publishers, B. V. (North Holland) IMACS 1986, Z. J. Cendes (editor), pp.251-261.
- [2.14] S. J. Salon, J. P. Peng, "A Hybrid Finite Element Boundary Element Formulation of Poisson's Equation for Axisymmetric Vector Potential Problems," *Journal of Applied Physics*, Vol. 53, No. 11, pp. 8420-8422, Nov. 1982.
- [2.15] J. P. Peng, S. J. Salon, "Hybrid Finite Element Boundary Element Solutions Using Half Space Green's Functions," *Journal of Applied Physics*, Vol. 55, No. 6, pp. 2198-2200, Mar. 1984.
- [2.16] J. P. Peng, "Solution of Two and Three Dimensional Electromagnetics Problems Using Numerical Methods," PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N.Y., 1984.
- [2.17] G. Meunier, J.L. Coulomb, S.J. Salon, L. Krahenbul, "Hybrid Finite Element Boundary Element Solutions for three dimensional scalar potential problems", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 22, Nr. 5, Sept. 1986, pp. 1040-1042.
- [2.18] M.A. Tsili, A.G. Kladas, P.S. Georgilakis, A.T. Souflaris, C.P. Pitsilis, J.A. Bakopoulos, D.G. Paparigas, "Hybrid Numerical Techniques for Power Transformer Modeling: A Comparative Analysis Validated by Measurements," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 40, No 2, pp. 842-845, Mar. 2004.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τρισδιάστατη (3Δ) μοντελοποίηση ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων αποτελεί μία από τις πλέον αποδοτικές μεθόδους ανάλυσής τους, απαιτεί ωστόσο προσεκτική διερεύνηση κατά την επιλογή του πλέον αποδοτικού τρόπου αναπαράστασης και επίλυσης του εξεταζόμενου πεδίου, με γνώμονα το υπολογιστικό κόστος και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η θεώρηση απλοποιήσεων της γεωμετρίας των μετασχηματιστών είναι κοινή πρακτική, η οποία έχει στόχο τη μείωση της πολυπλοκότητας κατά την κατασκευή 3Δ μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, εξαιτίας αυτών των απλοποιήσεων, ενδέχεται να παρατηρηθούν σημαντικές αποκλίσεις από τις αντίστοιχες μετρήσεις και μπορεί να απαιτηθούν τροποποιήσεις του εκάστοτε μοντέλου για την ακριβέστερη πρόβλεψη των εξεταζόμενων χαρακτηριστικών. Το ζήτημα αυτό μελετάται στην αναφορά [3.1], όπου οι συγγραφείς εξετάζουν την επίπτωση των απλοποιήσεων της γεωμετρίας των τυλιγμάτων στην ακρίβεια υπολογισμού δυνάμεων σε μονοφασικό μετασχηματιστή τύπου κελύφους, ενώ στην αναφορά [3.2] αναπτύσσεται μια μέθοδος κατασκευής λεπτομερούς 3Δ μοντέλου τυλίγματος μετασχηματιστή.

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η πολυπλοκότητα του πλέγματος που απαιτείται για ακριβείς υπολογισμούς, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις 3Δ διαμορφώσεων, η οποία οδηγεί σε σημαντική αύξηση του συνολικού χρόνου υπολογισμών. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, διάφοροι ερευνητές έχουν κατά καιρούς προτείνει εναλλακτικά μοντέλα υπολογισμού του πεδίου σκέδασης (π.χ. [3.3], [3.4]), παρέχοντας ακριβή και αποδοτική (από πλευράς υπολογιστικού κόστους) επίλυση. Η χρήση των οριακών στοιχείων ή της μεικτής τεχνικής οριακών-πεπερασμένων στοιχείων, η οποία συμβάλλει στη μείωση της πολυπλοκότητας των τρισδιάστατων πλεγμάτων έχει επίσης υιοθετηθεί για τη μελέτη διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.

Στο παρόν Κεφάλαιο δίνονται τα βήματα ανάπτυξης ενός αποδοτικού τρισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου, από πλευράς ακρίβειας και υπολογιστικής επιβάρυνσης, το οποίο θα μπορέσει να αποτελέσει τη βάση για τη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου περιβάλλοντος υπολογισμού του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα, σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Αρχικά, διερευνάται η εφαρμογή της μεικτής τεχνικής πεπερασμένων – οριακών στοιχείων στην περίπτωση των εξεταζόμενων μετασχηματιστών. Δεδομένου ότι η σύγκρισή της με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αποδεικνύει ότι δε συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της πολυπλοκότητας του πλέγματος και του χρόνου επίλυσης, η ανάλυση επικεντρώνεται στην εξαγωγή κατάλληλου 3Δ μοντέλου αμιγώς πεπερασμένων στοιχείων. Πριν την παρουσίαση του μοντέλου, πραγματοποιείται θεωρητική επιβεβαίωση της προτεινόμενης μεθόδου ΠΣ στηριζόμενη στο βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό (Παράγραφος 2.4.2), η οποία χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή. Η επιβεβαίωση γίνεται με τη χρήση της μεθόδου των ειδώλων, τα αποτελέσματα της οποίας συγκρίνονται με αυτά της προτεινόμενης μεθόδου σε διάταξη που προσεγγίζει τη γεωμετρία του μετασχηματιστή. Ακολουθεί η παρουσίαση του μοντέλου που αναπτύχθηκε, κατά την οποία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο υπολογισμού της επαγωγικής πτώσης τάσης, στον τρόπο αναπαράστασης των πηγών του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή και τη λεπτομερή αναπαράσταση της γεωμετρίας των τυλιγμάτων του.

3.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΙΚΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Η μέθοδος που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.8 του Κεφαλαίου 2 εφαρμόστηκε σε απλοποιημένη διάταξη η οποία προσομοιώνει το μετασχηματιστή και τα αποτελέσματά της συγκρίθηκαν με αυτά της απλής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να διερευνηθεί εάν παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια και μείωση του χρόνου επίλυσης (Σχήμα 3.1).

Η διάταξη αποτελείται από πυρήνα σιδήρου ο οποίος περιβάλλεται από δύο πηνία αποτελούμενα από ίσα και αντίθετα αμπερελίγματα. Με τον τρόπο αυτό προσεγγίζεται το πραγματικό μαγνητοστατικό πρόβλημα του μετασχηματιστή σε συνθήκες βραχυκυκλώματος.

Το πεδίο ορισμού του προβλήματος περιορίζεται στο ένα όγδοο της διάταξης και διαιρείται σε δύο περιοχές: την περιοχή πεπερασμένων στοιχείων, η οποία περιλαμβάνει το τμήμα του πυρήνα και τα πηνία, και την περιοχή οριακών στοιχείων η οποία αντιπροσωπεύει τον αέρα που περιβάλλει το ενεργό μέρος. Οι συμμετρίες του προβλήματος λαμβάνονται υπόψη με την επιβολή οριακής συνθήκης Dirichlet (Φ=0) στο επίπεδο xy και οριακής συνθήκης Neumann ($\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$) στις υπόλοιπες τρεις εξωτερικές επιφάνειες.



Σχήμα 3.1: Απλοποιημένη διάταξη μετασχηματιστή που επιλύεται με τη μεικτή μέθοδο των πεπερασμένων - οριακών στοιχείων.

Το μεικτό πλέγμα πεπερασμένων - οριακών στοιχείων (ΠΣ - ΟΣ) αποτελείται από 276 κόμβους, 180 στην περιοχή των πεπερασμένων στοιχείων, 132 στην περιοχή των οριακών στοιχείων και 36 στο κοινό σύνορο (επίπεδο z=4). Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από 600 τετράεδρα και των οριακών στοιχείων από 260 τρίγωνα (Σχήμα 3.2).

Το αντίστοιχο πλέγμα αμιγώς πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση με τη μεικτή τεχνική, αποτελείται από 360 κόμβους και 1200 τετράεδρα. Στα Σχήματα 3.3 και 3.4 συγκρίνεται το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της γραμμής AB και AC του Σχήματος 3.1 όπως υπολογίστηκε με τις δύο μεθόδους.



Σχήμα 3.2: Μεικτό πλέγμα πεπερασμένων - οριακών στοιχείων της διάταξης του Σχήματος 3.1.

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.3 και 3.4, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων βρίσκονται πολύ κοντά. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο μεικτής τεχνικής παρέχει παρόμοια ακρίβεια με το μοντέλο αμιγώς πεπερασμένων στοιχείων, ακόμη και για μικρή διακριτότητα, όπως αυτή των προηγούμενων πλεγμάτων. Ο χρόνος επίλυσης των δύο μεθόδων είναι της ίδιας τάξης, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η μεικτή τεχνική δεν υπερτερεί σημαντικά έναντι της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην ανάλυση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή. Κατά συνέπεια, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγεται ως η καταλληλότερη για την προσομοίωση του μετασχηματιστή, γι αυτό και η ανάλυση που περιλαμβάνεται στη συνέχεια του Κεφαλαίου επικεντρώνεται σε αυτήν.

3.3 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΕΙΔΩΛΩΝ

Σε πολλές περιπτώσεις, προκειμένου να εκτιμηθεί η ακρίβεια μιας προτεινόμενης μεθόδου πεδιακής ανάλυσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί υπολογισμός του πεδίου σε απλοποιημένες διατάξεις, οι οποίες προσεγγίζουν τη γεωμετρία του μετασχηματιστή, με τη χρήση της θεωρίας των ειδώλων, [3.5].

Μία τυπική απλοποιημένη γεωμετρία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πεδίου σκέδασης των τυλιγμάτων φαίνεται στο Σχ. 3.5(α), η οποία προσομοιώνει το τμήμα ενός τυλίγματος έξω από το παράθυρο του πυρήνα. Αποτελείται από ένα κυκλικό τύλιγμα τετραγωνικής διατομής κοντά σε τείχος σιδήρου άπειρης μαγνητικής διαπερατότητας.



Μέτρο μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής AB

Σχήμα 3.3: Σύγκριση καμπυλών πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων – οριακών στοιχείων, για τη μεταβολή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΑΒ του Σχήματος 3.1.

Μέτρο μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΑC



Σχήμα 3.4: Σύγκριση καμπυλών πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων – οριακών στοιχείων, για τη μεταβολή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής AC του Σχήματος 3.1.

Σύμφωνα με τη μέθοδο των ειδώλων, το μαγνητικό πεδίο στον αέρα (πεδίο σκέδασης) μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας το είδωλο του πηνίου ως προς το σύνορο σιδήρου-αέρα, το οποίο διαρρέεται από ρεύμα ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4(β). Η παραδοχή αυτή προσεγγίζει την οριακή συνθήκη H_t=0 κατά μήκος του συνόρου σιδήρου-αέρα. Σε αυτήν την περίπτωση, ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου είναι «κλειστού τύπου», [3.6].



Σχήμα 3.5: Γεωμετρία απλοποιημένου προβλήματος που μελετάται με τη μέθοδο των ειδώλων
 (α): κυκλικό τύλιγμα κοντά σε τείχος σιδήρου άπειρης διαπερατότητας
 (β): ισοδύναμη αναπαράσταση για τον υπολογισμό του πεδίου στον αέρα σύμφωνα με τη μέθοδο των ειδώλων

Η διάταξη του Σχήματος 3.5 χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 2.4.2 του Κεφαλαίου 2 με τη μέθοδο των ειδώλων. Τα Σχήματα 3.6(α) και (β) δείχνουν τη μεταβολή της συνιστώσας B_z κατά μήκος του άξονα y, όπως υπολογίστηκε με τις δύο μεθόδους, [3.7]. Όπως προκύπτει από τα σχήματα, η προτεινόμενη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δίνει καλή ακρίβεια στον υπολογισμό της κατανομής του πεδίου σκέδασης του τυλίγματος σε σχέση με μια λύση «κλειστού τύπου». Έτσι, είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης των εξεταζόμενων μετασχηματιστών, η ακρίβεια της οποίας εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια εκτίμησης του πεδίου σκέδασης των τυλιγμάτων τους.

3.4 ΕΞΑΓΩΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

3.4.1 Πραγματική γεωμετρία μετασχηματιστή

Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται η προοπτική όψη του ενεργού μέρους του εξεταζόμενου τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα. Το δευτερεύον τύλιγμα (τύλιγμα Χαμηλής Τάσης - ΧΤ) βρίσκεται πλησιέστερα στον πυρήνα και αποτελείται συνήθως από

43

ταινία χαλκού, μπορεί ωστόσο σε κάποιες περιπτώσεις να κατασκευαστεί και από σύρμα χαλκού. Το εξωτερικό τύλιγμα είναι το πρωτεύον τύλιγμα (τύλιγμα Υψηλής Τάσης - ΥΤ) και αποτελείται κατά κανόνα από σύρμα χαλκού κατάλληλης διατομής. Οι εξεταζόμενοι μετασχηματιστές μπορεί να είναι διπλού επιπέδου ΥΤ (π.χ. 20-15 kV), οπότε και απαιτείται ειδική σύνδεση τμημάτων του πρωτεύοντος τυλίγματος για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου ΥΤ. Το μαγνητικό κύκλωμα είναι τύπου τυλιχτού πυρήνα και αποτελείται από δύο μικρούς και δύο μεγάλους πυρήνες, οι διαστάσεις των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.6: Υπολογισμένη συνιστώσα μαγνητικής επαγωγής Βz κατά μήκος του άξονα y (α): λύση με τη χρήση της θεωρίας των ειδώλων (β): προτεινόμενη 3Δ μέθοδος ΠΣ

3.4.2 Γεωμετρία μοντέλου μετασχηματιστή

Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται το μοντέλο που διαμορφώθηκε για την αναπαράσταση της γεωμετρίας των πραγματικών τριφασικών μετασχηματιστών. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα τυλίγματα ΥΤ και ΧΤ μιας φάσης, καθώς και το μικρό και μεγάλο πυρήνα που τα περιβάλλει.

Το ενεργό μέρος περικλείεται σε κουτί αέρα, με διαστάσεις ίσες με αυτές του κελύφους του μετασχηματιστή, περιορίζοντας έτσι τον υπολογισμό του πεδίου σε αυτό το χώρο. Το επίπεδο xy του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων είναι το επίπεδο συμμετρίας του προβλήματος, ενώ ο άξονας z διέρχεται από το επίπεδο συμμετρίας των πυρήνων. Λόγω των συμμετριών του προβλήματος, το πεδίο ορισμού μειώνεται στο ένα όγδοο της διάταξης. Οι συμμετρίες λαμβάνονται υπόψη με την επιβολή της οριακής συνθήκης Dirichlet (Φ=0) κατά μάνος που αποτόξου να και Νουπορη ($\frac{\partial \Phi}{\partial t}$

μήκος του επιπέδου xy και Neumann $\left(\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0\right)$ κατά μήκος των επιπέδων yz, xz και των

τριών εξωτερικών όψεων του κουτιού αέρα. Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του σιδήρου θεωρήθηκε ότι η καμπύλη μαγνήτισής του B-H είναι γραμμική με τιμή σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας $\mu_r = 1.000$. Η παραδοχή της γραμμικότητας είναι απόλυτα δικαιολογημένη δεδομένου ότι κατά το βραχυκύκλωμα η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του γόνατου κορεσμού της χαρακτηριστικής του σιδήρου, [3.8], ενώ η τιμή μαγνητικής διαπερατότητας που χρησιμοποιείται είναι τυπική για την περίπτωση βραχυκυκλώματος.



Σχήμα 3.7: Ενεργό μέρος τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα.



Σχήμα 3.8: Διαστάσεις μικρού και μεγάλου πυρήνα μετασχηματιστή.





Η χρήση αυτού του μοντέλου έναντι του συνολικού τριφασικού μετασχηματιστή έγινε για δύο λόγους:

- 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)
- Με την αναπαράσταση της μίας μόνο φάσης δε μειώνεται σημαντικά η ακρίβεια στον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος.

Το τύλιγμα υψηλής τάσης έχει χωριστεί σε 4 υποπηνία. Η διαίρεση αυτή επιλέχθηκε σκόπιμα, καθώς μπορεί να αναπαραστήσει όλες τις δυνατές συνδέσεις των τυλιγμάτων ΥΤ για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης. Επιπλέον, η χρήση του μοντέλου ΠΣ του Σχήματος 3.9 επιτρέπει την αναπαράσταση μετασχηματιστών διαφόρων επιπέδων ισχύος και τάσης πρωτεύοντος ή δευτερεύοντος ενώ η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων (τρίγωνο, αστέρας ή τεθλασμένος αστέρας) δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του μοντέλου.

3.4.2.1 Διαστάσεις μοντέλου

Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά όλες οι διαστάσεις του μοντέλου του Σχήματος 3.9, ενώ γίνεται μια σύντομη επεξήγηση του τρόπου με τον οποίο υπολογίστηκαν οι διαστάσεις του πηνίου χαμηλής τάσης και των υποπηνίων υψηλής τάσης. Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται η κάτοψη του μοντέλου του μετασχηματιστή, ενώ στο Σχήμα 3.11 φαίνεται αντίστοιχα η πίσω όψη του. Στα σχήματα αυτά διακρίνονται οι λεπτομέρειες της γεωμετρίας του ενεργού μέρους οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.



Σχήμα 3.10: Κάτοψη μοντέλου μετασχηματιστή.

Πηνίο Χαμηλής Τάσης

Το ύψος του πηνίου χαμηλής τάσης του μοντέλου είναι ίσο με το μισό του πραγματικού του ύψους. Το πάχος του μέσα στο παράθυρο του πυρήνα (Πάχος 1) δίνεται από τη μελέτη, και προκύπτει από το άθροισμα του πάχους των σπειρών και των μονωτικών χαρτιών προσαυξημένο κατά ένα παράγοντα της τάξης του 10% για να ληφθεί υπόψη η χαλαρότητα κατά την τύλιξη του πηνίου. Το πάχος της κεφαλής του πηνίου χαμηλής τάσης που βγαίνει από τους πυρήνες (Πάχος 2) υπολογίζεται προσθέτοντας το πάχος των καναλιών χαμηλής τάσης και το πάχος των μπαρών στο Πάχος 1, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

Πάχος 2 πηνίου XT = Πάχος 1 πηνίου XT + (Αρ. Καναλιών XT)* (Πάχος (3.1) Καναλιών XT)+(Πάχος Μπαρών XT)

Πηνίο Υψηλής Τάσης

Το ύψος του πηνίου υψηλής τάσης του μοντέλου είναι ίσο με το μισό του πραγματικού του ύψους. Το πάχος του μέσα στο παράθυρο του πυρήνα (Πάχος 1) δίνεται από τη μελέτη, και προκύπτει από το άθροισμα του πάχους των σπειρών και των μονωτικών χαρτιών. Το πάχος της κεφαλής του πηνίου υψηλής τάσης που βγαίνει από τους πυρήνες (Πάχος 2) υπολογίζεται προσθέτοντας το πάχος των καναλιών υψηλής τάσης στο Πάχος 1, σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο (οι λήψεις της υψηλής τάσης δε λαμβάνονται υπόψη αφού μοντελοποιείται το τμήμα των πηνίων όπου βρίσκονται οι μπάρες της χαμηλής τάσης, στο οποίο δεν υπάρχουν λήψεις υψηλής τάσης):

Πάχος 2 πηνίου YT = Πάχος 1 πηνίου YT +(Aρ. Καναλιών YT)*(Πάχος (3.2) Καναλιών YT)

47

Υποπηνία Υψηλής Τάσης

48

Το Πάχος 1 του κάθε υποπηνίου προκύπτει από τη σχέση (3.3): Πάχος 1 υποπηνίου YT = (διάσταση μονωμένου αγωγού + πάχος (3.3) μόνωσης)*στρώσεις υποπηνίου + μόνωση λήψεων υποπηνίου

Το Πάχος 2 του κάθε υποπηνίου προκύπτει αντίστοιχα από τον τύπο:





Σχήμα 3.11: Πίσω όψη μοντέλου μετασχηματιστή.

Ο αριθμός των στρώσεων του κάθε υποπηνίου καθώς και τα υπόλοιπα στοιχεία (πάχος λήψεων, αριθμός καναλιών) λαμβάνονται με βάση τα δεδομένα της μελέτης του μετασχηματιστή.

Αθροίζοντας τα πάχη των υποπηνίων προκύπτει το συνολικό Πάχος 1 (και Πάχος 2) αντίστοιχα του πηνίου υψηλής τάσης, με κάποια μικρή απόκλιση η οποία οφείλεται σε παραδοχές κατά τον υπολογισμό των διαστάσεων.

Υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία

Τα υπόλοιπα στοιχεία της γεωμετρίας του μετασχηματιστή (πάχος, πλάτος, ύψος πυρήνα, πλάτος μεγάλου παραθύρου, αποστάσεις ενεργού μέρους από κέλυφος, διάκενα μεταξύ πηνίων και μεταξύ πηνίων και πυρήνα) λαμβάνονται από τα αρχεία μελέτης των μετασχηματιστών. Το πλάτος του μικρού παραθύρου μπορεί να ληφθεί απευθείας από τη μελέτη ή να υπολογιστεί με τη χρήση του παρακάτω τύπου:

3.4.3 Τρόπος υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης με τη χρήση του μοντέλου ΠΣ

Ο υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης γίνεται με βάση τη μαγνητική ενέργεια του μοντέλου. Η συνολική μαγνητική ενέργεια του μοντέλου προκύπτει από την ένταση του μαγνητικού πεδίου (Η) και τη μαγνητική επαγωγή (Β) σε κάθε τετράεδρο του πλέγματος αθροίζοντας το γινόμενο $\frac{1}{2}$ B·H·V_{τετραέδρου} όλων των τετραέδρων (πραγματοποιώντας έτσι ουσιαστικά ολοκλήρωση της στοιχειώδους πυκνότητας μαγνητικής ενέργειας $\frac{dW_m}{dV}$ σε όλο τον όγκο του πλέγματος).

Στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος ισχύει:

$$W_{m} = \frac{1}{2} \left(L_{\sigma 1} I_{1}^{2} + L_{\sigma 2} I_{2}^{2} \right)$$
(3.6)

όπου W_m η συνολική αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια, I_1 και I_2 τα ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος και $L_{\sigma 1}$ και $L_{\sigma 2}$ οι αντιδράσεις σκέδασης του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος αντίστοιχα. Αν α=n₁/n₂ είναι ο λόγος σπειρών πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος, η (3.6) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$W_{m} = \frac{1}{2} \left(L_{\sigma 1} \frac{I_{2}^{2}}{n_{1}^{2} / n_{2}^{2}} + L_{\sigma 2} I_{2}^{2} \right)$$
(3.7)

καταλήγοντας έτσι στη μορφή

$$\frac{2W_{m}}{n_{2}^{2}I_{2}^{2}} = \frac{L_{\sigma 1}}{n_{1}^{2}} + \frac{L_{\sigma 2}}{n_{2}^{2}}$$
(3.8)

Αν ΝΙ είναι τα αμπερελίγματα του πηνίου χαμηλής τάσης (ίσα με τα αμπερελίγματα του πηνίου υψηλής τάσης στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος), η (3.8) γράφεται ως εξής:

$$\frac{2W_{\rm m}}{(\rm NI)^2} = \frac{L_{\sigma 1}}{n_1^2} + \frac{L_{\sigma 2}}{n_2^2}$$
(3.9)

οπότε η συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης των τυλιγμάτων δίνεται από την (3.10):

$$\frac{2W_{\rm m}}{\left(\rm NI\right)^2} = L_{\sigma o \lambda} \tag{3.10}$$

Έχοντας υπολογίσει τη συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης των τυλιγμάτων, η αντίστοιχη επαγωγική πτώση τάσης (ανηγμένη στο δευτερεύον τύλιγμα) δίνεται από τη σχέση:

$$IX(\%) = \frac{I_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot n_2^2 \cdot L_{\sigma o \lambda}}{V_2}$$
(3.11)

οπότε η τάση βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την (3.12):

$$U_k(\%) = \sqrt{(IX)^2 + (IR)^2}$$
 (3.12)

3.4.4 Αναπαράσταση των πηγών του μαγνητικού πεδίου (τυλιγμάτων)

3.4.4.1 Απλοποιημένη αναπαράσταση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή

Η αναπαράσταση των πηγών του μαγνητικού πεδίου, δηλ. του ρεύματος των τυλιγμάτων (που είναι οι πηγές στην περίπτωση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή), πραγματοποιείται με τη χρήση της εικονικής κατανομής πεδίου **K**, η οποία πρέπει να ικανοποιεί τις συνθήκες που περιγράφονται στην Παράγραφο 2.4.2 του Κεφαλαίου 2. Για τον υπολογισμό του **K**, πρέπει να προσδιοριστεί ένας απλά συνδεδεμένος υποχώρος για κάθε τύλιγμα, ο οποίος να συμπεριλαμβάνει τους αγωγούς του. Το Σχήμα 3.12 δείχνει την κάτοψη του υποχώρου που αντιστοιχεί στο τύλιγμα Χαμηλής Τάσης του Σχήματος 3.9. Ο υποχώρος αυτός διαιρείται σε 4 περιοχές ($\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ και Ω_4), έτσι ώστε να διευκολυνθεί ο υπολογισμός. Τα σύμβολα που εμφανίζονται στο Σχήμα 3.12 έχουν την ακόλουθη εξήγηση:

 X_{W11MIN}, X_{W11MAX} : σύνορα του πηνίου κατά τον άξονα x μέσα στο μικρό παράθυρο πυρήνα, X_{W1MIN}, X_{W1MAX} : σύνορα του πηνίου κατά τον άξονα x μέσα στο μεγάλο παράθυρο πυρήνα, Y_{W1MIN}, Y_{W1MAX} : σύνορα του πηνίου κατά τον άξονα y,

 J_x, J_y : x, y συνιστώσες της πυκνότητας ρεύματος του πηνίου,

X_C: x-συντεταγμένη του κέντρου του τυλίγματος.



Σχήμα 3.12: Περιοχές (επίπεδο xy) του υποχώρου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εικονικής κατανομής πεδίου K_z που αντιστοιχεί στο τύλιγμα XT (ορθογωνική προσέγγιση των γωνιών του πηνίου).

Ο υπολογισμός του ${\bf K}$ είναι αρκετά απλός, δεδομένων των διαστάσεων του τυλίγματος κατά μήκος των αξόνων x, y και z:

Περιοχή Ω₁: Σε αυτήν την περιοχή, J_x=J_z=0. Η πυκνότητα ρεύματος J_y δίνεται από τη σχέση:

$$J_{y} = NI \cdot \frac{Z}{X_{W11MAX} - X_{W11MIN}}$$
(3.13)

όπου ΝΙ τα αμπερελίγματα του πηνίου ΧΤ.

Η κατανομή **Κ** πρέπει να είναι κάθετη στο σύνορο της περιοχής Ω_1 (τρίτη συνθήκη που περιγράφεται στην Παράγραφο 2.4.2). Έτσι, αποτελείται μόνο από τη συνιστώσα K_z, ενώ

 $K_x=K_y=0$. Η δεύτερη συνθήκη που περιγράφεται στην Παράγραφο 2.4.2 οδηγεί στη σχέση:

$$\nabla \times \mathbf{K} = \mathbf{J} \Longrightarrow \mathbf{K}_{z} = -\int_{\Omega_{1}} \mathbf{J}_{y} d\mathbf{x} \Longrightarrow \quad \mathbf{K}_{z} = \mathbf{NI} \cdot \mathbf{Z} \cdot \frac{\mathbf{X}_{W11MIN} - \mathbf{X}}{\mathbf{X}_{W11MIN} - \mathbf{X}_{W11MAX}}$$
(3.14)

2) Περιοχή Ω_2 : Σε αυτήν την περιοχή, $J_x=J_z=0$ και

$$J_{y} = -NI \cdot \frac{Z}{X_{W1MAX} - X_{W1MIN}}$$
(3.15)

ενώ η συνιστώσα Kz υπολογίζεται ως εξής:

$$K_{z} = -\int_{\Omega_{2}} J_{y} dx = NI \cdot Z \cdot \frac{X_{WIMAX} - X}{X_{WIMAX} - X_{WIMIN}}$$
(3.16)

3) Περιοχή $Ω_3$: Σε αυτήν την περιοχή, $J_y=J_z=0$ και

$$J_{x} = NI \cdot \frac{Z}{Y_{WIMAX} - Y_{WIMIN}}$$
(3.17)

Κατά συνέπεια, η συνιστώσα Kz δίνεται από τη σχέση:

$$K_{z} = \int_{\Omega_{3}} J_{x} dy = NI \cdot Z \cdot \frac{Y_{WIMAX} - Y}{Y_{WIMAX} - Y_{WIMIN}}$$
(3.18)

 Περιοχή Ω₄: η εφαρμογή της συνθήκης συνέχειας για τη συνιστώσα K_z μεταξύ των περιοχών Ω₃ και Ω₄ οδηγεί στις ακόλουθες σχέσεις:

$$K_{z}(Y = Y_{W1MIN}) = K_{z}(Y = Y_{W1MIN}) \Longrightarrow K_{z}(Y = Y_{W1MIN}) = NI \cdot Z$$
(3.19)

Η εφαρμογή της συνθήκης συνέχειας μεταξύ των περιοχών Ω_1 και Ω_4 ή Ω_2 και Ω_4 καταλήγει στην ίδια εξίσωση για τη συνιστώσα K_z στην περιοχή Ω_4 .

Έτσι, η συνολική εξίσωση η οποία περιγράφει την εικονική κατανομή πεδίου που αντιστοιχεί στο τύλιγμα XT είναι της μορφής:

$$K_{z} = \begin{cases} NI \cdot Z \cdot \frac{X_{W11MIN} - X}{X_{W11MIN} - X_{W11MAX}}, & \pi \epsilon \rho \log \dot{\eta} & \Omega_{1} \\ NI \cdot Z \cdot \frac{X_{W1MAX} - X}{X_{W1MAX} - X_{W1MIN}}, & \pi \epsilon \rho \log \dot{\eta} & \Omega_{2} \\ NI \cdot Z \cdot \frac{Y_{W1MAX} - Y}{Y_{W1MAX} - Y_{W1MIN}}, & \pi \epsilon \rho \log \dot{\eta} & \Omega_{3} \\ & NI \cdot Z, & \pi \epsilon \rho \log \dot{\eta} & \Omega_{4} \end{cases}$$

$$(3.20)$$

Το Σχήμα 3.13 δίνει την τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση της συνιστώσας K_z που αντιστοιχεί στο τύλιγμα XT. Το σύμβολο Z_{WIMAX} που εμφανίζεται στο Σχήμα 3.13 αντιστοιχεί στο σύνορο της περιοχής του πηνίου κατά μήκος του άξονα z. Το Σχήμα 3.14 δείχνει την κατανομή της συνιστώσας K_z πάνω σε επίπεδο παράλληλο στον άξονα y, το οποίο διέρχεται από το κέντρο X_c του τυλίγματος.



Σχήμα 3.13: 3Δ γραφική απεικόνιση της εικονικής κατανομής πεδίου που αντιστοιχεί στο τύλιγμα ΧΤ του Σχήματος 3.9 (ορθογωνική προσέγγιση των γωνιών του πηνίου).



Σχήμα 3.14: Εικονική κατανομή πεδίου που αντιστοιχεί στο τύλιγμα XT κατά μήκος του επιπέδου X=X_c του Σχήματος 3.12.

Η εξαγωγή της κατανομής **K** για το τύλιγμα YT είναι παρόμοια και καταλήγει σε εξίσωση παρόμοια με την (3.20), με τα αντίστοιχα σύνορα του τυλίγματος κατά μήκος των αξόνων x, y και z. Η αναπαράσταση των πηγών ρεύματος μέσω της κατανομής **K** παρουσιάζει το πλεονέκτημα της συμβατότητας με το διακριτό σχήμα των τετραεδρικών πεπερασμένων στοιχείων πρώτου βαθμού, γι αυτό και δεν παρουσιάζει σφάλματα αλληλοεξουδετέρωσης (cancellation errors), τα οποία εμφανίζονται κατά τη χρήση του νόμου Biot-Savart για τον προσδιορισμό της κατανομής του πεδίου των πηγών.

3.4.4.2 Λεπτομερής αναπαράσταση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή

Η κατασκευή του μοντέλου του μετασχηματιστή με λεπτομερή αναπαράσταση της γεωμετρίας των τυλιγμάτων του πραγματοποιείται σε δύο στάδια: αρχικά, υιοθετείται προσέγγιση των γωνιών των πηνίων με ελλείψεις και στη συνέχεια εισάγονται στο μοντέλο τα κανάλια ψύξης των πηνίων.

Η ευκολία υπολογισμού της εικονικής κατανομής του πεδίου των πηγών που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.4.4.1 έγκεται κατά κύριο λόγο στην ορθογωνική προσέγγιση των γωνιών των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Ωστόσο, η πραγματική γεωμετρία των τυλιγμάτων είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Η ορθογωνική προσέγγιση των γωνιών των πηνίων, οι οποίες είναι στην πραγματικότητα καμπύλες, ενδέχεται να οδηγήσει σε σημαντική υπερεκτίμηση της πυκνότητας ρεύματος και της έντασης του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα.

Για μία πιο λεπτομερή αναπαράσταση της γεωμετρίας των πηνίων, θεωρήθηκε ότι οι γωνίες τους αποτελούν τμήματα ελλείψεων με γνωστές συντεταγμένες κέντρου. Η υιοθέτηση αυτής της προσέγγισης οδηγεί στην εικονική κατανομή πεδίου (για το πηνίο XT) του Σχήματος 3.15.

Ο υπολογισμός της συνιστώσας K_z που φαίνεται στο Σχήμα 3.15 είναι πιο περίπλοκος: ο υποχώρος που περιλαμβάνει το τύλιγμα XT πρέπει να διαιρεθεί σε έξι περιοχές, των οποίων η κάτοψη φαίνεται στο Σχήμα 3.16: στις περιοχές $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ και Ω_4 (που χρησιμοποιούνται και στον υπολογισμό που περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.4.1) και στις περιοχές Ω_5 και Ω_6 , οι οποίες αντιστοιχούν στις γωνίες των πηνίων και οριοθετούνται από τις εσωτερικές ελλείψεις (ε_2), (ε_2 ') και τις εξωτερικές ελλείψεις (ε_1), (ε_1 '), οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 3.17.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17, το σημείο (X_o, Y_o) είναι το κέντρο των (ϵ_1) και (ϵ_2) ενώ το σημείο (X_o', Y_o) είναι το κέντρο των (ϵ_1') και (ϵ_2') . Οι συντεταγμένες X_o, X_o' και Y_o προκύπτουν από τα διαστάσεις του μετασχηματιστή και μπορούν να υπολογιστούν εύκολα. Οι εξισώσεις των εσωτερικών και εξωτερικών ελλείψεων είναι:

$$(\varepsilon_{1}): \frac{(X - X_{o})^{2} + (Y - Y_{o})^{2}}{(X_{W11MIN} - X_{o})^{2} + (Y_{W1MAX} - Y_{o})^{2}} = 1$$
(3.21)

$$(\varepsilon_{2}): \frac{(X - X_{o})^{2} + (Y - Y_{o})^{2}}{(X_{W1IMAX} - X_{o})^{2} + (Y_{W1MIN} - Y_{o})^{2}} = 1$$
(3.22)

$$(\varepsilon_{1}'): \frac{(X - X_{o}')^{2} + (Y - Y_{o})^{2}}{(X_{WIMAX} - X_{o}')^{2} + (Y_{WIMAX} - Y_{o})^{2}} = 1$$
(3.23)

$$(\varepsilon_{2}'): \frac{(X - X_{o}')^{2} + (Y - Y_{o})^{2}}{(X_{W1MIN} - X_{o}')^{2} + (Y_{W1MIN} - Y_{o})^{2}} = 1$$
(3.24)



Σχήμα 3.15: 3Δ γραφική απεικόνιση της εικονικής κατανομής πεδίου που αντιστοιχεί στο τύλιγμα XT του Σχήματος 3.9 (προσέγγιση των γωνιών του πηνίου με ελλείψεις).



Σχήμα 3.16: Περιοχές (επίπεδο xy) του υποχώρου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εικονικής κατανομής πεδίου K_z που αντιστοιχεί στο τύλίγμα XT (προσέγγιση των γωνιών του πηνίου με ελλείψεις).

Η εξίσωση που περιγράφει τη συνιστώσα K_z είναι η (3.25). Τα σύμβολα των ελλείψεων που εμφανίζονται στη (3.25) αντιστοιχούν στα σύμβολα που εμφανίζονται στο αριστερό μέλος των εξισώσεων (3.21) έως (3.24), έκφραση η οποία χρησιμοποιείται χάριν απλότητας της εξίσωσης.



Σχήμα 3.17: Προσέγγιση γωνιών πηνίου Σχήματος 3.16 με τμήματα έλλειψης.
Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι, παρά το γεγονός ότι οι γωνίες των πηνίων προσεγγίζονται με ελλείψεις, το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων εξακολουθεί να έχει τη μορφή του Σχήματος 3.9, στην οποία τα πηνία απεικονίζονται με ορθογωνική προσέγγιση των γωνιών τους. Η προσέγγιση των ελλείψεων υιοθετείται στον τρόπο υπολογισμού των πηγών του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή στην εικονική κατανομή που επιβάλλεται στις αντίστοιχες περιοχές των πηνίων. Έτσι, παρά το γεγονός ότι στο μοντέλο (και το αντίστοιχο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων) τα πηνία είναι ορθογωνικά, κατά τον υπολογισμό του πεδίου, ο χώρος μεταξύ των ελλείψεων που χρησιμοποιούνται για το πεδίο των πηγών και των ορθών γωνιών των πηνίων που εικονίζονται στο Σχήμα 3.9 θεωρείται ότι δε διαρρέεται από ρεύμα. Η αναπαράσταση αυτή αποτελεί μία ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικής γεωμετρίας των πηνίων, για να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα λόγω ασυμβατότητας μεταξύ της γεωμετρίας των πηνίων του μοντέλου και των επιβαλλόμενων πηγών. Η ασυμβατότητα αυτή απεικονίζεται καλύτερα στο Σχήμα 3.18, στο οποίο φαίνεται το τρισδιάστατο πλέγμα του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή.



Γμηματά πλεγματός μεταξύ των εξωτερικών ελλειψεών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των πηγών και των γωνιών των πηνίων του μοντέλου (με μηδενική πυκνότητα ρεύματος)

Σχήμα 3.18: Τρισδιάστατο πλέγμα ενεργού μέρους μετασχηματιστή.

Η εξίσωση (3.25) προκύπτει με την παραδοχή ότι όλη η περιοχή του εξεταζόμενου τυλίγματος διαρρέεται από ρεύμα. Ωστόσο, η παραδοχή αυτή δε λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη καναλιών ψύξης στην περιοχή των κεφαλών των τυλιγμάτων (των τμημάτων δηλαδή που βρίσκονται έξω από τα παράθυρα του πυρήνα), όπου η πυκνότητα ρεύματος είναι στην πραγματικότητα μηδενική, εξαιτίας του λαδιού που κυκλοφορεί σε αυτά. Η απλοποίηση αυτή συνιστά έναν ακόμη παράγοντα υπερεκτίμησης του μαγνητικού πεδίου, καθώς αυξάνει το συνολικό χώρο των πηγών του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, η ύπαρξη των καναλιών ψύξης πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την ανάλυση για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Ωστόσο, εάν και η επίδραση των καναλιών ψύξης έχει αναλυθεί διεξοδικά στην περίπτωση

της κατανομής θερμοκρασίας μετασχηματιστή, [3.9] και την εξαγωγή θερμικού μοντέλου, [3.10], δε συναντάται στην τεχνική βιβλιογραφία παρόμοια ανάλυση κατά την εκτίμηση του πεδίου σκέδασης.

Η μοντελοποίηση των καναλιών επηρεάζει τόσο τον υπολογισμό της εικονικής κατανομής πεδίου K_z όσο και την κατασκευή του πλέγματος του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.19 και 3.20. Κατά την κατασκευή του πλέγματος στο οποίο λαμβάνονται υπόψη τα κανάλια ψύξης, το τμήμα του πηνίου το οποίο βγαίνει από το παράθυρο του πυρήνα πρέπει να χωριστεί σε περισσότερες στρώσεις πεπερασμένων στοιχείων, κάποιες από τις οποίες θα αναπαριστούν το χώρο των καναλιών.



Σχήμα 3.19: Πλέγμα μετασχηματιστή με αναπαράσταση των καναλιών.



Σχήμα 3.20: Πλέγμα πηνίων με αναπαράσταση των καναλιών.

Κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 3.16, τα κανάλια βρίσκονται στην περιοχή Ω_3 του τυλίγματος: έτσι, η εικονική κατανομή πεδίου πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου μόνο σε αυτήν την περιοχή. Η νέα κάτοψη των πηνίων XT και YT φαίνεται στο Σχήμα 3.21. Το πηνίο XT περιλαμβάνει 4 κανάλια ψύξης, ενώ κάθε ένα από τα υποπηνία YT περιλαμβάνει ένα κανάλι ψύξης. Όλα τα κανάλια έχουν το ίδιο πάχος, ίσο με W_{DUCT}.



Σχήμα 3.21: Διαίρεση των περιοχών των πηνίων που χρησιμοποιείται κατά την αναπαράσταση των καναλιών ψύξης (επίπεδο xy).



Σχήμα 3.22: Εικονική κατανομή πεδίου που αντιστοιχεί στο τύλιγμα ΧΤ κατά μήκος του επιπέδου X=X_c του Σχήματος 3.21 (κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 3.14 με θεώρηση των καναλιών ψύξης).

Η περιοχή Ω_3 του τυλίγματος XT χωρίζεται σε 9 υπο-περιοχές: πέντε υπο-περιοχές πηνίου και τέσσερεις υπο-περιοχές καναλιών. Η κατανομή K_z στην περιοχή Ω_3 που αντιστοιχεί στο τύλιγμα XT φαίνεται στο Σχήμα 3.22, το οποίο απεικονίζει την κατανομή K_z σε επίπεδο παράλληλο στον άξονα y, που διέρχεται από το κέντρο X_c του τυλίγματος (κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 3.14).

Η εξίσωση που δίνει την κατανομή K_z για την περιοχή Ω_3 του πηνίου XT (Σχήμα 3.21) δίνεται από τη Σχέση (3.26). Ο πρώτος κλάδος της (3.26) αντιστοιχεί σε υπο-περιοχή πηνίου, ενώ ο δεύτερος κλάδος αναφέρεται σε υπο-περιοχές καναλιών.

$$\frac{K_{z}}{NI \cdot Z} = \begin{cases} -\frac{1}{5 \cdot W_{1}} \left[Y + Y_{W1MIN} + j \cdot W_{1} + (j-1) \cdot W_{DUCT} \right] + \frac{|j-5|}{5}, \quad j = 1, ..., 5\\ \frac{|j-5|}{5}, \quad j = 1, ..., 4 \end{cases}$$
(3.26)

όπου W_1 είναι το πλάτος κάθε υπο-περιοχής πηνίου, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$W_1 = \frac{LV \text{ Width}}{5}$$
(3.27)

όπου LVWidth είναι το πλάτος του τυλίγματος ΧΤ μέσα στα παράθυρα του πυρήνα.

Αντίστοιχα, η περιοχή Ω_3 του πρώτου υποπηνίου ΥΤ χωρίζεται σε 3 υπο-περιοχές: δύο υπο-περιοχές πηνίου και μία υπο-περιοχή καναλιού. Η αντίστοιχη εξίσωση για το K_z είναι:

$$\frac{K_{z}}{NI \cdot Z} = \begin{cases} -\frac{1}{3 \cdot W_{2}} \left[Y + Y_{W2MIN} + j \cdot W_{2} + (j-1) \cdot W_{DUCT} \right] + \frac{|j-3|}{3}, j = 1, ..., 3\\ \frac{|j-3|}{3}, j = l \end{cases}$$
(3.28)

όπου W2 είναι το πλάτος κάθε υπο-περιοχής πηνίου, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$W_2 = \frac{HVWidth1}{3}$$
(3.29)

όπου HVWidth1 είναι το πλάτος του πρώτου υποπηνίου ΥΤ μέσα στα παράθυρα του πυρήνα. Ο πρώτος κλάδος της (3.28) αναφέρεται στις υπο-περιοχές πηνίου, ενώ ο δεύτερος αντιστοιχεί στην υπο-περιοχή του καναλιού. Η μορφή των εξισώσεων για K_z των επόμενων τριών υποπηνίων ΥΤ είναι πανομοιότυπη με αυτή της (3.28) με τα αντίστοιχα σύνορα των υποπηνίων κατά μήκος των αξόνων x, y και z.

Εάν ο αριθμός καναλιών N_{DUCT}^{LV} που περιλαμβάνει το πηνίο XT είναι μεγαλύτερος ή μικρότερος από 4 κανάλια, ακολουθείται η ίδια μέθοδος ανάλυσης, με τη διαφορά ότι λαμβάνεται ισοδύναμο πάχος καναλιών W_{DUCT}^{LV} , έτσι ώστε το συνολικό πάχος των 4 καναλιών που προβλέπονται κατά τον υπολογισμό να είναι ίσο με το συνολικό πάχος του πραγματικού αριθμού καναλιών του εξεταζόμενου μετασχηματιστή. Το ισοδύναμο αυτό πάχος υπολογιζεται από τη Σχέση (3.30):

$$W_{DUCT}^{LV} = \frac{N_{DUCT}^{LV} \cdot W_{DUCT}}{4}$$
(3.30)

Αντίστοιχα, εάν ο αριθμός καναλιών N_{DUCT}^{HV} που περιλαμβάνει το πηνίο YT είναι μεγαλύτερος του ενός, λαμβάνεται ισοδύναμο πάχος καναλιών W_{DUCT}^{HV} , έτσι ώστε το συνολικό πάχος του ενός καναλιού που προβλέπεται κατά τον υπολογισμό να είναι ίσο με το συνολικό πάχος του πραγματικού αριθμού καναλιών του πηνίου YT του εξεταζόμενου μετασχηματιστή, σύμφωνα με τη Σχέση (3.31):

$$W_{DUCT}^{HV} = N_{DUCT}^{HV} \cdot W_{DUCT}$$
(3.31)

3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκε ο τρόπος μοντελοποίησης του μετασχηματιστή με τη χρήση των τρισδιάστατων αριθμητικών μεθόδων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Προκειμένου να διαπιστωθεί ποια από τις μεθόδους αυτές είναι καταλληλότερη, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση σε απλοποιημένη γεωμετρία μετασχηματιστή. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι το μοντέλο μεικτής τεχνικής πεπερασμένων - οριακών στοιχείων δίνει παρόμοια ακρίβεια και χρόνο εκτέλεσης με το αντίστοιχο των πεπερασμένων στοιχείων, γι' αυτό και τελικά δεν υιοθετείται για την προσομοίωση του μετασχηματιστή. Έτσι το μοντέλο στηρίχτηκε στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία χρησιμοποιεί το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό, βάσει των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 2.4.2. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε προκαταρκτική επιβεβαίωση της μεθόδου με σύγκριση των αποτελεσμάτων της με αυτά που δίνει η μέθοδος των ειδώλων σε απλοποιημένη γεωμετρία μετασχηματιστή.

Προκειμένου να ξεπεραστούν οι δυσκολίες που οφείλονται στην πολυπλοκότητα του πλέγματος και της επακόλουθης αύξησης του χρόνου επίλυσης της τρισδιάστατης μεθόδου ΠΣ, κατά την ανάπτυξη του μοντέλου του μετασχηματιστή δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη λεπτομερή αναπαράσταση της γεωμετρίας του, με έμφαση στην περιοχή των πηνίων, η οποία επηρεάζει στο μεγαλύτερο ποσοστό το πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου με πειραματικά δεδομένα, η οποία παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο θα οδηγήσει σε συμπεράσματα για την καταλληλότητα του μοντέλου και τη βέλτιστη διαμόρφωσή του προκειμένου να δίνει ακριβή αποτελέσματα στον ελάχιστο δυνατό χρόνο επίλυσης.

3.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] S. Salon, B. LaMattina, K. Sivasubramaniam, "Comparison of Assumptions in Calculation of Short-circuit Forces in Transformers," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 36, No. 5, pp. 3521-3523, Sept. 2000.
- [3.2] H. De Gersem and K. Hameyer, "A Finite Element Model for Foil Winding Simulation," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 37, No. 5, pp. 3427-3432, Sept. 2001.
- [3.3] J. Turowski, M. Turowski, M. Kopec, "Method of Three-Dimensional Network Solution of Leakage Field of Three-Phase Transformers," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 26, No. 5, pp. 2911-2919, Sept. 1990.
- [3.4] F. de Leon, A. Semlyen, "Efficient calculation of elementary parameters of transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, pp. 376-383, Jan. 1992.
- [3.5] A.G. Kladas, M.P. Papadopoulos, J.A. Tegopoulos, "Leakage Flux and Force Calculation on Power Transformer Windings under short-circuit: 2D and 3D Models Based on the Theory of Images and the Finite Element Method Compared to Measurements", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, Nr. 5/2, pp. 3487 -3490, Sept. 1994.
- [3.6] Z.X. Feng, "The treatment of singularities in calculation of magnetic field by using integral method", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 21, Nr. 6, pp. 2207-2210, Nov. 1985.
- [3.7] M. Tsili, C. Dikaiakos, A. Kladas, P. Georgilakis, A. Souflaris, C. Pitsilis, J. Bakopoulos, D. Paparigas, "Advanced 3D numerical methods for power transformer analysis and design," *Proc. IEE MEDOWER'2002*, Athens, Greece, November 2002.
- [3.8] Χ. Δικαιάκος, Κ. Μόφορη, "Σχεδίαση Μετασχηματιστή Τυλιχτού Πυρήνα και Μελέτη Δυνάμεων σε Βραχυκύκλωμα". ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2001.
- [3.9] L. W. Pierce, "An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 7, No. 3, pp. 1347-1358, Jul. 1992.
- [3.10] L. W. Pierce, T. Holifield, "A thermal model for optimized distribution and small power transformer design," *IEEE Transmission and Distribution Conf.*, Vol. 2, pp. 925-929, Apr. 1999.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι πεδιακές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε τρεις περιπτώσεις τριφασικών μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα. Σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν η πειραματική επιβεβαίωση των αναπτυσσόμενων τρισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε να διαπιστωθεί η ακρίβειά τους και να προκύψουν συμπεράσματα για τη βελτίωσή τους. Η πειραματική επιβεβαίωση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια, τα οποία στη συνέχεια του κεφαλαίου αναφέρονται ως πρώτη και δεύτερη σειρά μετρήσεων. Ο κύριος λόγος που πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων, όπως φαίνεται στη συνέχεια του κεφαλαίου, συνίσταται στο ότι η πρώτη σειρά, πέρα από τις ανάγκες βελτίωσης των μοντέλων, ανέδειξε και τις πρακτικές δυσκολίες της μέτρησης του πεδίου οι οποίες έπρεπε να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στις μετρημένες τιμές. Για κάθε σειρά μετρήσεων παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την πεδιακή ανάλυση των μετασχηματιστών και τα αποτελέσματα που έδωσε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η σύγκριση μετρημένων και θεωρητικών τιμών πεδίου και τάσης βραχυκύκλωσης, από την οποία εξάγονται συμπεράσματα για την ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου.

4.2 ΠΡΩΤΗ ΣΕΙΡΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.2.1 Μετασχηματιστές που χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη σειρά μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο μετασχηματιστές, ισχύος 400 kVA (κωδικός μελέτης 400/99008) και 1000 kVA (κωδικός μελέτης 1000/99003) αντίστοιχα, δύο επιπέδων τάσης πρωτεύοντος 20-15 kV και τάσης δευτερεύοντος 400 V, συνδεσμολογίας Dyn11. Στη συνέχεια της μελέτης, το πρωτεύον τύλιγμα αναφέρεται και ως τύλιγμα υψηλής τάσης ενώ το δευτερεύον ως τύλιγμα χαμηλής τάσης αντίστοιχα

4.2.2 Περιγραφή μετρήσεων

Οι πεδιακές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής βραχυκύκλωσης σε ποσοστό της ονομαστικής φόρτισης (για να αποφευχθεί η θερμική καταπόνηση του μετασχηματιστή ο οποίος βρισκόταν εκτός λαδιού). Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε πεδιόμετρο τοποθετημένο στα σημεία του Σχήματος 4.1. Με τον τρόπο αυτό μετρήθηκε η κάθετη στην επιφάνεια των τυλιγμάτων συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής B_n . Τα σημεία μέτρησης επιλέχθηκαν έτσι ώστε να προκύψουν καμπύλες μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος των τυλιγμάτων συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο τους. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και για τα δύο επίπεδα τάσης πρωτεύοντος.

4.2.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

Στους Πίνακες 4.1 και 4.2 περιλαμβάνονται οι τιμές του πεδίου στα σημεία του Σχήματος 4.1 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και τα 15 kV. Σε κάθε περίπτωση, αναγράφεται και η τιμή του ρεύματος στα τυλίγματα ΥΤ καθώς και η μετρούμενη ισχύς.

Μετά τη διεξαγωγή των μετρήσεων στον πρώτο μετασχηματιστή πραγματοποιήθηκε και μία μέτρηση της τάσης βραχυκύκλωσης στα 20 kV. Η τάση πρωτεύοντος που μετρήθηκε στην περίπτωση του 400/99008 ήταν ίση με **1245** V, δίνοντας έτσι τιμή τάσης βραχυκύκλωσης ίση με **6.23%**.

Στην περίπτωση του δεύτερου μετασχηματιστή (1000/99003) η τάση πρωτεύοντος που μετρήθηκε κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 kV ήταν ίση με **1210 V**, δίνοντας έτσι τιμή τάσης βραχυκύκλωσης ίση με **6.05%**.



Σχήμα 4.1: Σημεία μέτρησης μαγνητικής επαγωγής κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης (πρώτη σειρά μετρήσεων).

	20 kV	15 kV
	4,66 A	4,66A
	970W, 500V	570W, 226,8V
Σημείο	B	(mT)
Μέτρησης		()
1	10	7,2
2	6,7	4,9
3	4,8	0
4	8,5	6,2
5	5,1	0
6	5,3	0
7	8,2	5,8
8	5,7	0
9	9,2	6,8
10	5,7	4,8
11	5,7	0
12	0	0
13	6,7	6,5
14	8	5,6
15	0	0
16	0	0
17	10,3	5,2
21	9,3	7,2
22	7,1	5,2
23	4,7	0
24	8,8	6,2
25	6,3	4,8
26	4,7	0
27	6,7	4,6
28	9.05	6.7
29	7.2	6.3
30	6.6	5.2
31	4.8	0
32	5	0
33	7,8	5
34	5.5	5.8
35	0	0
36	0	0
37	0	0

	20 kV	15 kV				
	13A	15 KV				
	544V.	13,2A				
	2340W	300V				
Σημείο	B (m	T)				
μέτρησης	D (III	11)				
1	11,7	8,3				
2	7,5	6,7				
3	5	5,1				
4	11,8	8,2				
5	7,6	4,8				
6	7,3	4,9				
7	10,8	7				
8	6,7	4,7				
9	6,4	4,7				
10	9,2	6,3				
11	6,7	5,2				
12	7,5	5,3				
13	11	5,6				
14	8,4	6,2				
15	6	4,8				
16	0	0				
17	7	5,5				
21	11,9	8,7				
22	7,9	6,5				
23	5,6	5,2				
24	10,5	7,2				
25	6,8	6,2				
26	5,2	4,6				
27	6,3	4,8				
28	10,6	7,5				
29	9,9	5,9				
30	6,1	5,9				
31	6,3	5,2				
32	5,2	5				
33	10,3	6,3				
34	7,8	7,3				
35	6	4,8				
36	0	0				
37	5,2	0				

Πίνακας 4.1: Πεδιακές μετρήσεις στο μετασχηματιστή 400 kVA κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης. Πίνακας 4.2: Πεδιακές μετρήσεις στο μετασχηματιστή 1000 kVA κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης.

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΩΤΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για την πεδιακή ανάλυση των μετασχηματιστών που μετρήθηκαν, χρησιμοποιείται το μοντέλο του Σχήματος 3.9 του Κεφαλαίου 3, με την απλοποιημένη αναπαράσταση της γεωμετρίας των τυλιγμάτων, που περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.4.1. Στον Πίνακα 4.3 φαίνονται τα στοιχεία του μετασχηματιστή 400 kVA που χρησιμοποιούνται κατά την εξαγωγή του μοντέλου του, ενώ στο Σχήμα 4.2 φαίνονται οι ακριβείς διαστάσεις του μοντέλου. Αντίστοιχα, στον Πίνακα 4.4 δίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία του μετασχηματιστή

1000 kVA που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή του μοντέλου του, ενώ οι ακριβείς διαστάσεις του μοντέλου του φαίνονται στο Σχήμα 4.3.

Οι μετρημένες τιμές του πεδίου που ελήφθησαν κατά τη διεξαγωγή της πρώτης σειράς μετρήσεων συγκρίθηκαν με αυτές που προέκυψαν από την επίλυση του μαγνητικού πεδίου των μετασχηματιστών κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος. Πρόκειται για ένα πλέγμα αρκετά πυκνό (περίπου 92000 κόμβοι), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ικανοποιητική ακρίβεια στους υπολογισμούς των πεπερασμένων στοιχείων.

Πηνίο Χαμηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	112
Πάχος 1 (mm)	19.6
Πάχος 2 (mm)	62.47
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	93
Πάχος 1 (mm)	32.7
Πάχος 2 (mm)	69.03
Πάχος 1 Υποπηνίου 1 (mm)	9.52
Πάχος 1 Υποπηνίου 2 (mm)	9.32
Πάχος 1 Υποπηνίου 3 (mm)	5.94
Πάχος 1 Υποπηνίου 4 (mm)	7
Πάχος 2 Υποπηνίου 1 (mm)	22.84
Πάχος 2 Υποπηνίου 2 (mm)	15.98
Πάχος 2 Υποπηνίου 3 (mm)	12.6
Πάχος 2 Υποπηνίου 4 (mm)	16.99
Υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία	
Eu (mm)	81
G/2 (mm)	115
(D1+D2)/2 (mm)	95
K (mm)	8
F1 (mm)	66
F2 (mm)	132
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα (mm)	3
Διάκενο XT-YT(mm)	6.9
Εξωτερικό διάκενο (mm)	3.6
Απόσταση ενεργού μέρους από κέλυφος κατά πλάτος (mm)	53.6
Απόσταση ενεργού μέρους από κέλυφος κατά ύψος (mm)	154
Απόσταση ενεργού μέρους από κέλυφος κατά μήκος (mm)	20

Πίνακας 4.3 : Διαστάσεις μοντέλου μετασχηματιστή 400 kVA

Οι δύο μετασχηματιστές της πρώτης σειράς μετρήσεων είναι διπλού επιπέδου τάσης πρωτεύοντος, γεγονός που συνεπάγεται ειδική σύνδεση των στρώσεων υψηλής τάσης για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος. Στην περίπτωση του 400/99008, τα δύο ενδιάμεσα υποπηνία (υποπηνία 2 και 3 του Σχήματος 3.9) συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους και στη συνέχεια σε σειρά με τα υπόλοιπα υποπηνία (υποπηνία 1 και 4) για να ληφθεί το δεύτερο επίπεδο YT (15 kV). Έτσι, για να μοντελοποιηθεί αυτή η σύνδεση, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι σπείρες των υποπηνίων 2 και 3 διαρρέονται από το μισό του ρεύματος το οποίο διαρρέει τις σπείρες των υποπηνίων 1 και 4. Στην περίπτωση του 1000/99003, το δεύτερο από τα τέσσερα υποπηνία αποτελείται από δύο τμήματα (κατά ύψος) με τον ίδιο αριθμό σπειρών. Όταν τα τμήματα αυτά συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους και στη συνέχεια σε σειρά με τα υπόλοιπα υποπηνία, παράγεται το δεύτερο (μικρότερο) επίπεδο YT (15 kV), ενώ για την παραγωγή του υψηλότερου επιπέδου τάσης (20 kV), τα δύο τμήματα του υποπηνίου 2 συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους και σε σειρά με τα υπόλοιπα υποπηνία. Έτσι, στην περίπτωση του πρώτου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος (20 kV) όλα τα υποπηνία διαρρέονται από ρεύμα ίσο με το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος, ενώ στην περίπτωση του δεύτερου επιπέδου (15 kV), το ρεύμα του υποπηνίου 2 είναι το μισό του ρεύματος που διαρρέει τα υποπηνία 1, 3 και 4.

Για την προσομοίωση της δοκιμής βραχυκύκλωσης θεωρείται ότι τα πηνία χαμηλής τάσης και υψηλής τάσης αποτελούνται από ίσα και αντίθετα αμπερελίγματα (με την παραδοχή αυτή αμελείται το ρεύμα μαγνήτισης, το οποίο είναι πολύ μικρό κατά το βραχυκύκλωμα). Έτσι, για την περίπτωση των 20 και 15 kV, τα ονομαστικά αμπερελίγματα των πηνίων των μετασχηματιστών 400 και 1000 kVA είναι ίσα με αυτά που παρατίθενται στους Πίνακες 4.5 και 4.6 αντίστοιχα. Στους πίνακες αυτούς φαίνεται ότι στην περίπτωση της συνδεσμολογίας που δίνει το δεύτερο επίπεδο τάσης (15 kV) στο μετασχηματιστή 1000/99003 μόνο το δεύτερο υποπηνίο διαρρέεται από μισό ρεύμα (σε αντίθεση με τον μετασχηματιστή 400/99008, όπου τα δύο μεσαία υποπηνία διαρρέονται από μισό ρεύμα). Πρόκειται για τις συνδεσμολογίες παραλληλισμού που περιγράφηκαν προηγουμένως για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος. Οι συνδεσμολογίες αυτές περιγράφονται παραστατικότερα στα Σχήματα 4.5 και 4.6, όπου φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο χωρίζονται σε υποπηνία οι στρώσεις του πηνίου υψηλής τάσης. Στα σχήματα αυτά περιλαμβάνονται επιπλέον επεξηγήσεις των συμβόλων και των διαστάσεων που εμφανίζονται (οι οποίες λαμβάνονται πάντα από τα φύλλα μελέτης των αντίστοιχων μετασχηματιστών).

Πηνίο Χαμηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	17.1
Πάχος 1 (mm)	20.3
_Πάχος 2 (mm)	70.89
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	158
Πάχος 1 (mm)	38.5
Πάχος 2 (mm)	71.8
Πάχος 1 Υποπηνίου 1 (mm)	12.05
Πάχος 1 Υποπηνίου 2 (mm)	16.21
Πάχος 1 Υποπηνίου 3 (mm)	3.88
Πάχος 1 Υποπηνίου 4 (mm)	6.53
Πάχος 2 Υποπηνίου 1(mm)	22.04
Πάχος 2 Υποπηνίου 2(mm)	32.86
Πάχος 2 Υποπηνίου 3(mm)	7.21
Πάχος 2 Υποπηνίου 4(mm)	9.86
Υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία	
Eu (mm)	86.6
G/2 (mm)	180
(D1+D2)/2 (mm)	127
K (mm)	10
F1 (mm)	72
F2 (mm)	144
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα (mm)	3
Διάκενο XT-YT(mm)	7.8
Εξωτερικό διάκενο (mm)	3.6
Απόσταση ενεργού μέρους από κέλυφος κατά πλάτος (mm)	25
Απόσταση ενεργού μέρους από κέλυφος κατά ύψος (mm)	83.4
Απόσταση ενεργού μέρους από κέλυφος κατά μήκος (mm)	40.6

Πίνακας 4.4: Διαστάσεις μοντέλου μετασχηματιστή 1000 kVA.



Σχήμα 4.2. Διαστάσεις μοντέλου μετασχηματιστή 400 kVA.



Σχήμα 4.3: Διαστάσεις μοντέλου μετασχηματιστή 1000 kVA.



Σχήμα 4.4: Πλέγμα μοντέλου μετασχηματιστών.

	Пол	Πηνίο ΧΤ			Πηνίο ΥΤ									
			Υποπηνίο Ι		Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4					
	Ν	Ι	N	Ι	N	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι				
20 kV	20	577,4	501	6,67	433	6,67	433	6,67	365	6,67				
15 kV	20		501	8,89		4,45		4,45		8,89				
	Συνολικά α	Συνολικά αμπερελίγματα												
20 kV	11	11553												
15 kV	11		11552											

Πίνακας 4.5: Ονομαστικά αμπερελίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή 400 kVA στα 20 και 15 kV.

	Ποιτί	Πηνίο ΧΤ			Πηνίο ΥΤ									
			Υποπηνίο Ι		Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4					
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι				
20 kV	14	1443.37	334	16.67	606	16.67	81	16.67	191	16.67				
15 kV	14			22.22		11.11		22.22		22.22				
	Συνολικά αμπερελίγματα				Συνολικά αμπερελίγματα									
20 kV	20207		20204											
15 kV						201	198							

Πίνακας 4.6: Ονομαστικά αμπερελίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή 1000 kVA στα 20 και 15 kV.

Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, οι δοκιμές βραχυκύκλωσης δεν πραγματοποιήθηκαν υπό ονομαστικό ρεύμα, αλλά σε ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος, το οποίο δίνεται στους Πίνακες 4.1 και 4.2 είναι ίσο με 4.66 Α (ρεύμα γραμμής) και για τα δύο επίπεδα υψηλής

τάσης για το μετασχηματιστή 400 kVA και 13.2 A και 13 A για τα δύο επίπεδα υψηλής τάσης για το μετασχηματιστή 1000 kVA. Τα αμπερελίγματα για τους δύο μετασχηματιστές που αντιστοιχούν στις παραπάνω διεγέρσεις φαίνονται στους Πίνακες 4.7 και 4.8 αντίστοιχα.

	Πηνίο ΧΤ		Πηνίο ΥΤ									
			Υποπηνίο I		Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4			
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι		
20 kV	20	232.9	501	2.69	433	2.69	433	2.69	365	2.69		
15 kV	20	174.8	201	2.69		1.345		1.345		2.69		
	Συνολικά ο	μπερελίγματα	ίγματα Συνολικά αμπερελίγματα									
20 kV	4	4659										
15 kV	3		3494									

Πίνακας 4.7: Αμπερελίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης που αντιστοιχούν στο ποσοστό της ονομαστικής φόρτισης στο οποίο πραγματοποιήθηκε η δοκιμή βραχυκύκλωσης των μετρήσεων του μετασχηματιστή 400 kVA στα 20 και 15 kV.



Σχήμα 4.5: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 400/99008.

	Παυίο	VT	Πηνίο ΥΤ									
	111/00	Υποπηνίο 1		Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4				
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι		
20 kV	14	649.8	224	7.5	606	7.5	81	7.5	191	7.5		
15 kV	14	494.8	554	7.62	000	3.81		7.62		7.62		
	Συνολικά αμπ	τερελίγματα			Συνο	λικά αμ	περελίγ	ιατα				
20 kV	909	9090										
15 kV	692	6927										

Πίνακας 4.8: Αμπερελίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης που αντιστοιχούν στο ποσοστό της ονομαστικής φόρτισης στο οποίο πραγματοποιήθηκε η δοκιμή βραχυκύκλωσης των μετρήσεων του μετασχηματιστή 1000 kVA στα 20 και 15 kV.



Σχήμα 4.6: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 1000/99003.

4.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το μετασχηματιστή 400 kVA

Στα Σχήματα 4.7 και 4.8 φαίνεται η κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής σε συνθήκες βραχυκυκλώματος στα 20 και 15 kV αντίστοιχα.



Σχήμα 4.7: Κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής για το M/Σ 400 kVA σε βραχυκύκλωμα στα 20 kV.



Σχήμα 4.8: Κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής για το M/Σ 400 kVA σε βραχυκύκλωμα στα 15 kV.

Στα Σχήματα 4.9 έως 4.16 αντιπαρατίθενται οι τιμές της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής όπως προέκυψαν από την πεδιακή ανάλυση με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές κατά μήκος διαφόρων τμημάτων της γεωμετρίας¹.

Στα Σχήματα 4.9 και 4.10 φαίνονται οι τιμές της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής για τη διαδρομή Ι (σημεία 14, 1, 2, 3 και 34, 21, 22, 23 των μετρήσεων) κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV αντίστοιχα. Στα Σχήματα 4.11 και 4.12 φαίνονται οι τιμές Bn για τη διαδρομή ΙΙ (σημεία 4, 5, 6 και 24, 25, 26 των μετρήσεων) κατά τη δραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV αντίστοιχα. Στα Σχήματα 4.13 και 4.14 φαίνονται οι τιμές Bn για τη διαδρομή ΙΙ (σημεία 9, 10, 11 και 29, 30, 31 των μετρήσεων) κατά τη δοκιμή

¹ Στα διαγράμματα αυτά οι καμπύλες «φάση b» και «φάση c» αντιστοιχούν στις μετρημένες τιμές πεδίου, ενώ η καμπύλη «3Δ Π.Σ. » στα αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV αντίστοιχα. Τέλος, στα Σχήματα 4.15 και 4.16 φαίνονται οι τιμές Bn για τη διαδρομή IV (σημεία 12, 13 και 32, 33 των μετρήσεων) κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV αντίστοιχα.

Η σύγκριση των καμπυλών οδηγεί στα εξής συμπεράσματα: Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τιμές που υπολογίζονται με την πεδιακή ανάλυση είναι υπερεκτιμημένες σε σχέση με τις μετρηθείσες, εμφανίζουν ωστόσο την ίδια μεταβολή κατά μήκος των εξεταζόμενων διαδρομών. Η απόκλιση αυτή οφείλεται σε μεγάλο βαθμό σε σφάλματα των μετρήσεων, τα οποία μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κατηγορίες:

α) τα σφάλματα κατά την εκτίμηση της απόστασης των σημείων (η οποία μετρήθηκε με το χέρι), η ακρίβεια της οποίας επιτρέπει την εκτίμηση του πεδίου σε περιοχές γύρω από την εξεταζόμενη καμπύλη και όχι στα ίδια τα σημεία της και

β) τα σφάλματα του οργάνου μέτρησης (πεδιόμετρου) το οποίο έδωσε μηδενικές ενδείξεις όταν το μετρούμενο πεδίο είχε πολύ μικρή τιμή (<5 mT), όπως συμβαίνει σε πολλά σημεία του μετασχηματιστή λόγω της μικρής ισχύος και της μικρής φόρτισης (περίπου 40% της ονομαστικής).

Τα σφάλματα αυτά εξηγούν και την απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ του πεδίου των δύο φάσεων του μετασχηματιστή (κυρίως στα Σχήματα 4.13, 4.14 και 4.15).

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες, η συσχέτιση των καμπυλών των επομένων σχημάτων είναι αρκετά ικανοποιητική. Ωστόσο, η διεξαγωγή μετρήσεων σε ονομαστική φόρτιση ενδέχεται να δώσει καλύτερη εκτίμηση για το πεδίο (ιδίως στην περίπτωση των 15 kV όπου και παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις).

Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό της τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης. Για να διαμορφωθεί μια γενική εικόνα της μεταβολής της ακρίβειας των υπολογισμών, χρησιμοποιήθηκαν και άλλα πλέγματα εκτός από αυτό των 92000 κόμβων με το οποίο έγινε ο υπολογισμός των τοπικών τιμών πεδίου. Στον Πίνακα 4.9 φαίνονται οι τάσεις βραχυκύκλωσης οι οποίες υπολογίστηκαν με χρήση των αποτελεσμάτων της πεδιακής ανάλυσης, καθώς και η σύγκρισή τους με τις υπολογισμένες για διάφορες πυκνότητες πλεγμάτων. Ο υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης έγινε σε κάθε περίπτωση με χρήση της τιμής συνολικής αποθηκευμένης μαγνητικής ενέργειας του μοντέλου, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.3 του Κεφαλαίου 3: Η σύγκριση έγινε με την τιμή τάσης βραχυκύκλωσης που μετρήθηκε στο δοκιμαστήριο μετά τη συναρμολόγηση του κελύφους του μετασχηματιστή (και όχι με την τιμή των μετρήσεων, όπου μετρούνταν μόνο το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή) Η τιμή της ωμικής πτώσης τάσης υπολογίστηκε με βάση τις μετρημένες απώλειες χαλκού με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$Ωμική πτώση τάσης IR(%) = \frac{Συνολικές απώλειες χαλκού (kW)}{Ονομαστική ισχύς (kVA)}$$
(4.1)

Η απόκλιση που εμφανίζεται στον Πίνακα 4.9 υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$\alpha \pi \acute{0} \kappa \lambda \iota \sigma \eta = \frac{|U_{k}^{\mu \epsilon \tau \eta \mu \acute{0} \eta} - U_{k}^{\nu \sigma \alpha \delta \sigma \gamma \iota \sigma \mu \acute{0} \eta}|}{U_{k}^{\mu \epsilon \tau \eta \eta \acute{0} \eta}} \cdot 100\%$$

$$(4.2)$$







Σχήμα 4.9: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής Ι για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 400 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.10: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής Ι για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 400 kVA στα 15 kV.



Σχήμα 4.11: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 400 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.12: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 400 kVA στα 15 kV.



Διαδρομή ΙΙΙ - 20 kV



Σχήμα 4.13: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 400 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.14: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 400 kVA στα 15 kV.



Διαδρομή IV - 20 kV



Σχήμα 4.15: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής IV για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 400 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.16: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής IV για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 400 kVA στα 15 kV.

400 kVA/ 99008	αριθμός κόμβων	IX (%)	IR(%)	U ^{υπολογισμένη} k (%)	U ^{μετρημένη} (%)	απόκλιση (%)
2 0 IA7	92081	6,53	1 006	6,80	6 37	6,80
20 K V	142514	6,49	1,900	6,76	0,37	6,16
15137	64277	6,25	1.05	6,55	(00	7,65
15 kV	92081	6,19	1,95	6,49	0,08	6,82

Πίνακας 4.9: Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης Μ/Σ 400 kVA για διάφορες πυκνότητες πλέγματος (υπολογισμός με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.1).

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, το σφάλμα στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης είναι μεγαλύτερο του 6,5% για πλέγμα της τάξης των 90.000 κόμβων, ενώ παραμένει μεγαλύτερο του 6% και μετά από σημαντική αύξηση της πυκνότητας (περίπου 140.000 κόμβοι). Μια τέτοια τιμή σφάλματος δεν είναι ικανοποιητική για την ακρίβεια του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη βελτίωσής του, έτσι ώστε να επιτευχθεί μικρότερο σφάλμα σε λιγότερο πυκνά και χρονοβόρα στην επίλυσή τους πλέγματα.

4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το μετασχηματιστή 1000 kVA

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πεδιακής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο μετασχηματιστή 1000 kVA με τον ίδιο τρόπο με τον μετασχηματιστή 400 kVA και η σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Στα Σχήματα 4.17 και 4.18 φαίνονται οι τιμές της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής για τη διαδρομή Ι (σημεία 14, 1, 2, 3 και 34, 21, 22, 23 των μετρήσεων) κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV αντίστοιχα. Στα Σχήματα 4.19 και 4.20 φαίνονται οι τιμές Bn για τη διαδρομή ΙΙ (σημεία 4, 5, 6 και 24, 25, 26 των μετρήσεων) κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV αντίστοιχα. Στα Σχήματα 4.21 και 4.22 φαίνονται οι τιμές Bn για τη διαδρομή ΙΙ (σημεία 9, 10, 11 και 29, 30, 31 των μετρήσεων) κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV αντίστοιχα. Τέλος, στα Σχήματα 4.23 και 4.24 φαίνονται οι τιμές Bn για τη διαδρομή ΙΙΙ (σημεία 9, 10, 11 και 29, 30, 31 των μετρήσεων) κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV αντίστοιχα. Τέλος, στα Σχήματα 4.23 και 4.24 φαίνονται οι τιμές Bn για τη διαδρομή ΙV (σημεία 12, 13 και 32, 33 των μετρήσεων) κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV αντίστοιχα.

Μια πρώτη παρατήρηση των καμπυλών δείχνει καλύτερη σύγκλιση των μετρημένων τιμών με τις υπολογισμένες, σε σχέση με τον πρώτο μετασχηματιστή, γεγονός που οφείλεται κατά ένα μέρος στις μεγαλύτερες τιμές του πεδίου (λόγω της μεγαλύτερης ισχύος του δοκιμίου) οι οποίες μπορούν να μετρηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια από το πεδιόμετρο.

Στον Πίνακα 4.10 φαίνονται οι τιμές τάσης βραχυκύκλωσης οι οποίες υπολογίστηκαν με χρήση των αποτελεσμάτων της πεδιακής ανάλυσης, καθώς και η σύγκρισή τους με τις υπολογισμένες. Σε αυτήν την περίπτωση δεν εξετάστηκαν διάφορες πυκνότητες πλεγμάτων, καθώς η ανάλυση του μετασχηματιστή 400 kVA, έδειξε ότι μια πυκνότητα της τάξης των 90.000 κόμβων μπορεί να δώσει γενική εικόνα για το σφάλμα στους υπολογισμούς παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος.



Σχήμα 4.17: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής Ι για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 1000 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.18: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής Ι για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 1000 kVA στα 15 kV.



Σχήμα 4.19: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 1000 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.20: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 1000 kVA στα 15 kV.



Διαδρομή ΙΙΙ - 20 kV



Σχήμα 4.21: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 1000 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.22: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 1000 kVA στα 15 kV.



Διαδρομή IV - 20 kV



Σχήμα 4.23: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής IV για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 1000 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.24: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής IV για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 1000 kVA στα 15 kV.

1000 kVA / 99003	IX(%)	IR(%)	U ^{υπολογισμένη} (%)	${f U}_k^{\mu \epsilon au ho \eta \mu \epsilon u \eta}$	απόκλιση (%)
20 kV	6,44	1,491	6,61	6,13	7,77
15 kV	6,28	1,491	6,45	5,95	8,47

Πίνακας 4.10: Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης για το μετασχηματιστή 1000 kVA (υπολογισμός με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.1).

Το σφάλμα εμφανίζεται λίγο μεγαλύτερο στην περίπτωση του μετασχηματιστή 1000 kVA (μεταξύ 7,5% και 8,5% για τα δύο επίπεδα τάσης), γεγονός που ενισχύει την ανάγκη βελτίωσης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης.

4.4 ΔΕΥΤΕΡΗ ΣΕΙΡΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.4.1 Μετασχηματιστής που χρησιμοποιήθηκε στη δεύτερη σειρά μετρήσεων

Η απόκλιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών πεδίου που διαπιστώθηκε κατά την επεξεργασία και σύγκριση της πρώτης σειράς μετρήσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, σε συνδυασμό με την ανάγκη γενίκευσης των αποτελεσμάτων σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών οδήγησε στη διεξαγωγή μιας δεύτερης σειράς μετρήσεων σε μετασχηματιστή ισχύος 630 kVA (κωδικός μελέτης 630/82008) δύο επιπέδων τάσης πρωτεύοντος 20-15 kV και τάσης δευτερεύοντος 400 V, συνδεσμολογίας.

4.4.2 Περιγραφή μετρήσεων

Τα καινούρια σημεία μέτρησης τα οποία επιλέχθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 4.25. Σε αυτήν την περίπτωση επιλέχθηκαν περισσότερα σημεία μέτρησης στα πηνία υψηλής τάσης, για να παρακολουθηθεί καλύτερα η μεταβολή του πεδίου στην περιοχή τους. Επιπλέον, η δοκιμή βραχυκύκλωσης πραγματοποιήθηκε σε ονομαστική φόρτιση (σε αντίθεση με την πρώτη σειρά μετρήσεων).

4.4.3 Αποτελέσματα μετρήσεων

Στον Πίνακα 4.11 περιλαμβάνονται οι τιμές του πεδίου στα σημεία του Σχήματος 4.25 κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και τα 15 kV. Σε κάθε περίπτωση, αναγράφεται και η τιμή του ρεύματος στα τυλίγματα υψηλής τάσης καθώς και η μετρούμενη ισχύς. Στις πρώτες δύο στήλες του πίνακα περιλαμβάνονται οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής στα σημεία της φάσης b του μετασχηματιστή, ενώ στις δύο επόμενες οι τιμές για τα αντίστοιχα σημεία της φάσης c. Όπως φαίνεται στον πίνακα, για τα σημεία 16-19 της φάσης b δεν υπάρχουν μετρήσεις, λόγω δυσκολίας πρόσβασης του πεδιόμετρου στα σημεία αυτά (οφειλόμενη στα παρεμβαλλόμενα μονωτικά χαρτιά μεταξύ των δύο φάσεων και στο γεγονός ότι τα σημεία αυτά βρίσκονται εσωτερικά μεταξύ των τυλιγμάτων των δύο φάσεων).

Μετά τη διεξαγωγή των παραπάνω μετρήσεων πραγματοποιήθηκε και μία μέτρηση της τάσης βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV.Η τάση που μετρήθηκε στην πλευρά υψηλής τάσης ήταν ίση με 1063 V και 775 V αντίστοιχα, δίνοντας έτσι τιμή τάσης βραχυκύκλωσης ίση με 5.31% και 5.17%.



Σχήμα 4.25: Σημεία μέτρησης μαγνητικής επαγωγής κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή ισχύος 630 kVA.

4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την πεδιακή ανάλυση του μετασχηματιστή της δεύτερης σειράς μετρήσεων είναι παρόμοιο με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη σειρά μετρήσεων, για τους μετασχηματιστές ισχύος 400 και 1000 kVA (Σχήμα 3.9). Λόγω των συμμετριών του προβλήματος, έχει ληφθεί υπόψη και σε αυτήν την περίπτωση μόνο το ένα όγδοο της γεωμετρίας.

Οι διαστάσεις των πυρήνων, των πηνίων και των διακένων καθώς και οι αποστάσεις του ενεργού μέρους από το κέλυφος του μετασχηματιστή ελήφθησαν από το αρχείο της μελέτης του. Ο χωρισμός του πηνίου υψηλής τάσης σε υποπηνία με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που περιγράφεται στην παράγραφο 4.3. Πιο συγκεκριμένα, τα πάχη των υποπηνίων υψηλής τάσης προέκυψαν με βάση τη διάταξη του πηνίου, όπως αυτή περιγράφεται στο αρχείο της μελέτης, και φαίνεται στο Σχήμα 4.26. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, το πηνίο χωρίζεται σε 4 υποπηνία, το δεύτερο από τα οποία διαιρείται σε δύο ίσα κατά ύψος τμήματα, αποτελούμενα από ίδιο αριθμό σπειρών. Για να προκύψει τάση πρωτεύοντος ίση με 15 kV τα τμήματα αυτά συνδέονται παράλληλα, διαρρεόμενα έτσι από το μισό του ονομαστικού ρεύματος (συνδεσμολογία παραλληλισμού παρόμοια με αυτή του μετασχηματιστή 1000/99003 της Παραγράφου 4.3, Σχήμα 4.6).

	Φά	ση c	Φά	ո ղ b			
	20 kV 18,14 A 7920 W 1063 V	15 kV 24,04 A 8230 W 775 V	20 kV 18,14 A 7920 W 1063 V	15 kV 24,04 A 8230 W 775 V			
σημείο	B (1	mT)	B (mT)				
1	21,83	21,5	21	19,5			
2	18,3	14	16	12,4			
3	13	8,5	8,5	7			
4	10	9,5	6,6	7,1			
5	5,5	5,4	9,5	5,4			
6	19	21	21,9	17,5			
7	17,6	15,6	18	9			
8	13,7	11,8	14,8	13			
9	9	9,1	11,1	12			
10	5,3	5	6,2	7			
11	10	11,3	10,6	10,2			
12	5,5	16,5	16,6	14,5			
13	11,7	11,5	13,7	11,9			
14	10,7	9,3	10	8			
15	7,3	6	6,7	6,7			
16	11	18,3	-	-			
17	15,3	22,7	-	-			
18	21,5	26	-	-			
19	13,7	12	-	-			
20	9,7	10	8,4	9,5			
21	8,9	8,5	8,6	8			
22	6,4	5,5	6,1	5			
23	0	0	0	0			
24	0	0	0	0			
25	0	0	0	0			

Πίνακας 4.11: Μετρημένες τιμές κάθετης συνιστώσας μαγνητικής επαγωγής (Bn) στο μετασχηματιστή 630kVA κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης.

Το πρώτο υποπηνίο αποτελείται από 3 στρώσεις σπειρών, το δεύτερο από 6, το τρίτο από 2 και το τέταρτο από 3. Το πάχος της κάθε στρώσης είναι ίσο με το άθροισμα του πάχους του μονωμένου αγωγού και του πάχους του μονωτικού χαρτιού. Έτσι, το πάχος του κάθε υποπηνίου μέσα στους πυρήνες υπολογίζεται αθροίζοντας το πάχος των στρώσεων και τη μόνωση των λήψεων (η οποία στο Σχήμα 4.26 διακρίνεται ανάμεσα στις στρώσεις με μορφή βελών, δίπλα στα οποία αναγράφεται το αντίστοιχο πάχος). Το πάχος των κεφαλών των υποπηνίων προκύπτει αν στα παραπάνω πάχη προστεθούν και τα πάχη των αντίστοιχων καναλιών (λαμβάνοντας υπόψη ότι το πάχος του κάθε καναλιού είναι ίσο με 3.33 mm). Ο αριθμός των σπειρών του κάθε υποπηνίου προκύπτει αθροίζοντας τις αντίστοιχες στρώσεις, αφού αφαιρεθούν οι επιπλέον σπείρες που αντιστοιχούν σε τάση 22 kV (και 17 kV), δηλαδή για θέση μεταγωγέα λήψεων 0%.

Με βάση τα παραπάνω και τα στοιχεία που αναγράφονται στη μελέτη του μετασχηματιστή ελήφθησαν οι διαστάσεις του Πίνακα 4.12 για το τρισδιάστατο μοντέλο του μετασχηματιστή. Οι ακριβείς διαστάσεις του μοντέλου φαίνονται στο Σχήμα 4.27.

	αριθμός αριθμός σπειρών στρώσης ανά στρώση												
υποπηνίο	vío 1 ¥ 113 ¥			11	3	₩ 0,28	mm		_1				
1 VT		2			113		226				K1	-	
1 1 1		3			113		339				K2	2	
			,,	• • • •	6*0,28r	nm					<u>(</u> K3)-		 κανάλι πηνίου
	1	56		56	K4	3	1	56	5	6	K3	5	•
	2	58		114	K5		2	58	11	4	K4		
υποπηνίο	3	58		172	K6		3	58	17	72	K5		
2 YT	4	58		230	K7		4	58	23	30	K6		
	5	58		288	K8		5	58	28	38	K7		
	6	58		346		4	6	58	34	16	_	6	
			1		6*0,28r	nm						_	
	1			113			11	113				7	λοιθμός
υποπηνίο					8		12	21			К9		Αμισμος
2 VT		2			34		15	55				8	σπειρων που
3 1 1		2		77	₩<		19	90				9	αφαιρείται
				≫≲		•••••			··-··-··		•:	10	επειδή
						<i>*</i>	4 4 3	*0,28n	ım		<u>!</u>	⊔∍	▲ αντιστοιχεί σε
				X	₩<		3	4			.i	12	+10% της
		1		77	黔		6	9				13	ονομαστικής
υποπηνίο		1			35		10)4				14	τάσης
4 YT					8		11	2			K10	15	
		2		1	13		22	25	K11			πάχος	
		3		4	43		26	58 <	0,28	smm	<u>></u>	16	μόνωσης

Σχήμα 4.26: Σπείρες πηνίου υψηλής τάσης μετασχηματιστή 630 kVA.

Πηνίο Χαμηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	114.5
Πάχος 1 (mm)	20.35
Πάχος 2 (mm)	63.22
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	125.5
Πάχος 1 (mm)	37.7
Πάχος 2 (mm)	74.33
Πάχος 1 Υποπηνίου 1 (mm)	9.34
Πάχος 1 Υποπηνίου 2 (mm)	14.94
Πάχος 1 Υποπηνίου 3 (mm)	5.76
Πάχος 1 Υποπηνίου 4 (mm)	7.66
Πάχος 2 Υποπηνίου 1(mm)	19.33
Πάχος 2 Υποπηνίου 2(mm)	31.59
Πάχος 2 Υποπηνίου 3(mm)	9.09
Πάχος 2 Υποπηνίου 4(mm)	14.32
Υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία	
Eu (mm)	83.6
G/2 (mm)	147.5
(D1+D2)/2 (mm)	118.5
K (mm)	5
F1 (mm)	72.55
F2 (mm)	144
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα (mm)	3
Διάκενο XT-YT(mm)	8
Εξωτερικό διάκενο (mm)	5.76
Απόσταση ενεργού μέρους από κέλυφος κατά πλάτος (mm)	58
Απόσταση ενεργού μέρους από κέλυφος κατά ύψος (mm)	193.9
Απόσταση ενεργού μέρους από κέλυφος κατά μήκος (mm)	55

Πίνακας 4.12: Διαστάσεις μοντέλου μετασχηματιστή 630 kVA.



Σχήμα 4.27: Διαστάσεις μοντέλου μετασχηματιστή 630 kVA.

Οι τιμές του πεδίου που μετρήθηκαν στο μετασχηματιστή της δεύτερης σειράς μετρήσεων συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του Σχήματος 3.9 του Κεφαλαίου 3.

Για να αποφευχθούν οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν κατά η σύγκριση με τις μετρήσεις της πρώτης σειράς, δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη διαμόρφωση του τετραεδρικού πλέγματος, δεδομένου ότι η ακρίβεια των υπολογισμών που πραγματοποιούνται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα και την ομοιομορφία [4.1]. Η κατασκευή του πλέγματος βοηθάει στον προσδιορισμό του πεδίου σε όλο το χώρο του μετασχηματιστή καθώς και στην εστίαση σε περιοχές που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος, όπως είναι ο χώρος που καταλαμβάνουν τα πηνία. Παράλληλα, η λεπτομέρεια στην ανάλυση του μαγνητικού πεδίου όπως αυτή εκφράζεται από την πυκνότητα του πλέγματος είναι όμεση εξάρτηση του χρόνου επίλυσης, οδηγώντας έτσι σε μεγάλους χρόνους επίλυσης για πολύ πυκνά πλέγματος για τη θεωρητική επιβεβαίωση των μετρήσεων, από τα αποτελέσματα των οποίων εξάχθηκαν σημαντικά συμπεράσματα για την ακρίβεια της μεθόδου και για αναγκαίες βελτιώσεις.

Μια δεύτερη τροποποίηση του μοντέλου συνίσταται στην υιοθέτηση της προσέγγισης της γεωμετρίας των γωνιών των πηνίων με ελλείψεις, όπως αυτή περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.4.2 του Κεφαλαίου 3. Όπως τονίστηκε στην παράγραφο αυτή, η γεωμετρία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του πλέγματος εξακολουθεί να είναι αυτή που εικονίζεται στο Σχήμα 3.9 (όπου τα πηνία είναι ορθογωνικά²). Για να ξεπεραστεί η ασυμβατότητα αυτή μεταξύ της γεωμετρίας του πλέγματος και της γεωμετρίας των επιβαλλόμενων πηγών, χρησιμοποιήθηκε διαμόρφωση πλεγμάτων με μεγαλύτερη πυκνότητα στις γωνίες των πηνίων, έτσι ώστε με τη λεπτομερέστερη ανάλυση του πεδίου στις περιοχές αυτές να ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα λόγω της ασυμβατότητας [4.2]. Επιπλέον, για να μην αυξηθεί πολύ ο συνολικός αριθμός κόμβων, η πυκνότητα του πλέγματος στους πυρήνες διατηρήθηκε σχετικά μικρή.

Στα Σχήματα 4.28 έως 4.31 εικονίζονται διάφορα μεγέθη πλεγμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή, το πυκνότερο από τα οποία χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των τοπικών τιμών του πεδίου με τις αντίστοιχες των μετρήσεων. Στο Σχήμα 4.28 φαίνεται το πιο αραιό πλέγμα (2613 κόμβοι), στο Σχήμα 4.29 ένα πυκνότερο πλέγμα (23696 κόμβοι), ενώ στα Σχήματα 4.30 και 4.31 εικονίζονται τα πλέγματα με μεγάλη πυκνότητα στις γωνίες των πηνίων. Στα δύο τελευταία πλέγματα, η πυκνότητα των κόμβων στους πυρήνες είναι περίπου ίδια, αυξάνεται ωστόσο σημαντικά η πυκνότητα στα πηνία, γεγονός στο οποίο οφείλεται η αύξηση του συνολικού αριθμού κόμβων.

Για την προσομοίωση της λειτουργίας του θεωρήθηκε ότι τα πηνία χαμηλής και υψηλής τάσης διαρρέονται από ίσα κατά μέτρο και αντίθετα σε φορά αμπερελίγματα, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 4.3. Ο αριθμός των σπειρών, οι ονομαστικές τιμές των ρευμάτων και τα αμπερελίγματα των πηνίων του μετασχηματιστή αναγράφονται στον Πίνακα 4.13 (χρησιμοποιούνται τα ονομαστικά αμπερελίγματα δεδομένου ότι αυτή η σειρά μετρήσεων πραγματοποιήθηκε σε ονομαστική φόρτιση).

² Η γεωμετρία των πηνίων του μοντέλου παρέμεινε ίδια για να καταστεί δυνατή η αλλαγή των διαστάσεων του πλέγματος για διάφορες γεωμετρίες μετασχηματιστών (παραμετροποίηση) όπως φαίνεται στο Παράρτημα της διατριβής.



Σχήμα 4.28: Πλέγμα 1 μετασχηματιστή 630 kVA (2613 κόμβοι).



Σχήμα 4.29: Πλέγμα 2 μετασχηματιστή 630 kVA (23696 κόμβοι).



Σχήμα 4.30. Πλέγμα 3 μετασχηματιστή 630 kVA (31818 κόμβοι).



Σχήμα 4.31: Πλέγμα 4 μετασχηματιστή 630 kVA (89603 κόμβοι).
	Πηνίο	Πηνίο ΧΤ	Πηνίο ΥΤ								
	111/000	ΔΙ	Υποπηνίο 1 Υπ		Υποπη	ηνίο 2	Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4		
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	
20 kV	16	000 22	220	10,5	602	10,5	= 155	10,5	199	10,5	
15 kV	10	909,55	339	14	092	7		14		14	
	Συνολικά αμπ	τερελίγματα			Συνο	λικά αμ	ιπερελίγ	ματα			
20 kV	145	14540		14543							
15 kV	1454	17		14546							

Πίνακας 4.13: Ονομαστικά αμπερελίγματα ΥΤ και ΧΤ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή 630 kVA στα 20 και 15 kV.

4.5.1 Αποτελέσματα πεδιακής ανάλυσης – σύγκριση με τις μετρήσεις

Στα Σχήματα 4.32 και 4.33 φαίνεται η μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής Ι του πηνίου υψηλής τάσης για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 kV και 15 kV. Οι μετρημένες και υπολογισμένες τιμές πεδίου (καμπύλες '3Δ Π.Σ.') βρίσκονται αρκετά κοντά, με εξαίρεση 2 σημεία της φάσης c (θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι, λόγω της ονομαστικής φόρτισης, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε περιορισμένο χρόνο, εμφανίζοντας έτσι σημαντικό σφάλμα σε 4 περιπτώσεις σημείων, όπως θα φανεί και στις επόμενες καμπύλες). Η προσέγγιση θεωρητικών-υπολογισμένων τιμών είναι το ίδιο καλή και στην περίπτωση των 15 kV, ενώ παρατηρείται καλύτερα η μεταβολή του πεδίου λόγω της διαφορετικής φόρτισης των παραλληλισμένων υποπηνίων υψηλής τάσης (σημείο 3 καμπύλης).

Στα Σχήματα 4.34 και 4.35 φαίνεται η μεταβολή της Bn κατά μήκος της διαδρομής II, για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV. Η μεταβολή είναι σχεδόν γραμμική και βρίσκεται αρκετά κοντά στη μεταβολή της καμπύλης που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα στα 15 kV, με εξαίρεση το σημείο 7 της φάσης c, στο οποίο εμφανίζεται μεγάλο σφάλμα μέτρησης (για τους λόγους που προαναφέρθηκαν).

Η μετρημένη μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙΙ στα 20 kV και 15 kV (Σχήματα 4.36 και 4.37) παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση από την υπολογισμένη: στο σημείο 12 της φάσης b εμφανίζεται μεγάλο σφάλμα μέτρησης ενώ στην αρχή των πηνίων το μετρημένο πεδίο παρουσιάζει μείωση και στη συνέχεια αύξηση, σε αντίθεση με τις υπολογισμένες τιμές. Δεδομένου ότι η μορφή της μετρημένης καμπύλης δε συμφωνεί με τη θεωρητικά αναμενόμενη (έπρεπε να είναι αντίστοιχη με την καμπύλη της διαδρομής ΙΙ), εκτιμάται ότι οι διαφορές οφείλονται σε σφάλμα μέτρησης.

Στα Σχήματα 4.38 και 4.39 φαίνεται η μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής όπως αυτή υπολογίστηκε και μετρήθηκε στη διαδρομή IV της φάσης c (όπως προαναφέρθηκε, στη φάση b δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις λόγω δυσκολίας προσέγγισης των σημείων της). Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται αξιοσημείωτη απόκλιση, οφειλόμενη τόσο σε σφάλμα μέτρησης (τα σημεία αυτά βρίσκονται σε θέση όπου η διεύθυνση των μαγνητικών δυναμικών γραμμών δεν είναι κάθετη στην επιφάνεια των πηνίων, σε αντίθεση με την πλειοψηφία των σημείων στις προηγούμενες διαδρομές) όσο και στο μικρό αριθμό των σημείων μέτρησης.



Διαδρομή Ι 20 kV



Σχήμα 4.32: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής Ι για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 630 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.33: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής Ι για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 630 kVA στα 15 kV.



Σχήμα 4.34: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 630 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.35: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 630 kVA στα 15 kV.



Διαδρομή ΙΙΙ 20 kV



Σχήμα 4.36: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 630 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.37: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής ΙΙΙ για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 630 kVA στα 15 kV.



Διαδρομή IV 20 kV



Σχήμα 4.38: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής IV για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 630 kVA στα 20 kV.



Σχήμα 4.39: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής IV για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 630 kVA στα 15 kV.



Διαδρομή V 20 kV



Σχήμα 4.40: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής V για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 630 kVA στα 20 kV.





Σχήμα 4.41: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής V για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του M/Σ 630 kVA στα 15 kV.

Στα Σχήματα 4.40 και 4.41 φαίνεται η μεταβολή της Bn κατά μήκος της διαδρομής V των πηνίων. Η σημαντική εμφανιζόμενη απόκλιση οφείλεται σε αδυναμία του πεδιόμετρου να μετρήσει μικρές τιμές πεδίου (κάτω από 5 mT), δίνοντας έτσι μηδενική ένδειξη στα σημεία αυτά. Για το λόγο αυτό, η μετρημένη μεταβολή του πεδίου κατά μήκος της διαδρομής αυτής δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αξιόπιστο κριτήριο για την εκτίμηση της ακρίβειας των υπολογισμένων τιμών.

Τα παραπάνω τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν και για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή 630 kVA. Ο υπολογισμός έγινε με τη χρήση της συνολικής αποθηκευμένης μαγνητικής ενέργειας W_m των μοντέλων, με τον τρόπο που περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.3 του Κεφαλαίου 3.

Για την εκτίμηση της ακρίβειας της υπολογισμένης τιμής τάσης βραχυκύκλωσης πραγματοποιήθηκε σύγκρισή της με τη μέση τιμή της μετρημένης τάσης βραχυκύκλωσης 19 μετασχηματιστών με χαρακτηριστικά της μελέτης 630/82008, έτσι ώστε να προκύψουν γενικά συμπεράσματα ως προς την ακρίβεια του θεωρητικού μοντέλου σε σχέση με τις τελικές τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης. Οι υπολογισμένες τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης καθώς και η απόκλισή τους από τη μέση τιμή των παραπάνω μετρήσεων για τα 4 πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 4.14 (με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2 του Κεφαλαίου 3, αλλά χωρίς θεώρηση των καναλιών ψύξης). Οι μετρημένες αυτές τιμές τάσης βραχυκύκλωσης και απωλειών χαλκού (από τις οποίες προκύπτει μέση τιμή για την ωμική πτώση τάσης των τυλιγμάτων) συνοψίζονται στον Πίνακα 4.15.

630/ 82008	Κόμβοι πλέγματος	IX (%)	IR (%)	U ^{υπολογισμένη} k (%)	U ^{μετρημένη} (μέση) (%)	απόκλιση (%)
	2613	5,78		5,97		6,73
20 kV	23696	5,76	1 / 9	5,95	5 50	6,37
	31818	5,58	1,40	5,77	3,37	3,27
	89603	5,54		5,73		2,58
	2613	5,63		5,82		6,42
15 I-V	23696	5,56	1 / 8	5,75	5 17	5,15
15 KV	31818	5,43	1,40	5,63	3,47	2,84
	89603	5,42		5,62		2,71

Πίνακας 4.14: Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης για το μετασχηματιστή 630 kVA (υπολογισμός με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2, χωρίς την αναπαράσταση των καναλιών ψύξης).

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.14, το σφάλμα στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης μειώνεται αισθητά με την αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος. Επιπλέον, η τάξη μεγέθους του είναι ίδια στα 20 και 15 kV. Ωστόσο, για τον υπολογισμό τιμής τάσης βραχυκύκλωσης με μικρό σφάλμα πρέπει να χρησιμοποιηθεί πλέγμα άνω των 40000 κόμβων, το οποίο απαιτεί μεγάλο χρόνο επίλυσης.

Η μεγάλη πυκνότητα του πλέγματος είναι επιβαρυντικός παράγοντας στο χρόνο επίλυσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, καθιστώντας τη δύσχρηστη για εφαρμογές στη σχεδίαση μιας βιομηχανικής μονάδας [4.3]. Για την εκτίμηση της επιβάρυνσης του χρόνου των υπολογισμών σε συνάρτηση με την πυκνότητα του πλέγματος παρατίθενται ενδεικτικά στον Πίνακα 4.16 χρόνοι επίλυσης για δύο διαφορετικά υπολογιστικά συστήματα και διάφορα μεγέθη πλέγματος.

Δήξων	Απώλειες ναλκού στα	U _k (%) στα			
αριθμός Μ/Σ	20kV (W)	20 kV	15 kV		
1	9214,87	5,58	5,48		
2	9275,7	5,57	5,47		
3	9255,41	5,56	5,45		
4	9222,71	5,59	5,47		
5	9223,7	5,58	5,46		
6	9380,77	5,64	5,53		
7	9384,26	5,58	5,46		
8	9416,04	5,54	5,42		
9	9360,71	5,6	5,46		
10	9319,27	5,6	5,48		
11	9270,26	5,59	5,45		
12	9256,3	5,59	5,48		
13	9319,34	5,6	5,49		
14	9275,59	5,66	5,53		
15	9246,75	5,55	5,45		
16	9233,12	5,58	5,46		
17	9347,48	5,6	5,49		
18	9310,6	5,56	5,46		
19	9326,18	5,61	5,49		
	Μέσες απώλειες χαλκού	Μέση U _k (20kV)	Μέση U _k (15kV)		
	9296,79				
	Μέση IR	5,59	5,47		
	1,48				

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ Τ630/82008

Πίνακας 4.15: Μετρήσεις τάσης βραχυκύκλωσης και απωλειών χαλκού σε 20 μετασχηματιστές μελέτης 630/82008.

Αριθμός κόμβων πλέγματος	H/Y Pentium, 225 MHz, 80 MB RAM	H/Y Pentium II, 1 GHz, 512 MB RAM
2613	5 min	3 min
23696	1 h	20 min
31818	1:30 h	35 min
55473	4:30h	2:20h
89603	7h	3:10 h

Πίνακας 4.16: Χρόνοι επίλυσης μαγνητοστατικού προβλήματος μετασχηματιστή για διάφορα μεγέθη πλέγματος.

Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια σε μικρότερα μεγέθη πλεγμάτων ενσωματώθηκε μία ακόμη βελτίωση στο μοντέλο των

πεπερασμένων στοιχείων, η οποία στηρίζεται σε λεπτομερέστερη αναπαράσταση της γεωμετρίας των πηνίων με προσθήκη των καναλιών τους, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.4.2 του Κεφαλαίου 3. Στον Πίνακα 4.17 φαίνονται τα αποτελέσματα της τάσης βραχυκύκλωσης για διάφορες πυκνότητες πλέγματος με κανάλια καθώς και η αντίστοιχη απόκλιση από τη μετρημένη τιμή.

630/ 82008	Κόμβοι πλέγματος	IX(%)	IR(%)	U ^{υπολογισμένη} (%) k	U ^{μετρημένη} (%) (μέση)	απόκλιση (%)
	3260	5 49		5 69	(μεση)	1 72
	24862	5.58		5.77		3.27
20 kV	32555	5,58	1,48	5,77	5,59	3,27
	44660	5,61		5,80		3,76
	99567	5,47		5,67		1,42
	3260	5,36		5,56		1,66
	24862	5,45		5,65		3,24
15 kV	32555	5,43	1,48	5,63	5,47	2,84
	44660	5,48		5,68		3,84
	99567	5,36		5,56		1,64

Πίνακας 4.17: ΄	Γάση βραχ	υκύκλωσης	; μετασχηματ	ιστή 630 k	VA (υπο	λογισμός	με χρήα	5η του
	μοντέλου	της Παραγρ	ράφου 3.4.4.2	, με αναπο	ιράσταση	των κανα	ιλιών ψ	νύξης).

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, το σφάλμα στην τάση βραχυκύκλωσης ξεκινά από μικρή τιμή για αραιό πλέγμα για να αυξηθεί με την αύξηση της πυκνότητας και να συγκλίνει στην ίδια τιμή με την αντίστοιχη της τιμής του μοντέλου χωρίς κανάλια για σχετικά μεγάλη πυκνότητα πλέγματος (>30000 κόμβοι). Αυτό σημαίνει ότι το πραγματικό ελάχιστο σφάλμα που μπορεί να δώσει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης είναι αυτό που αντιστοιχεί στο κοινό σφάλμα των δύο μοντέλων. Ωστόσο, με την προσθήκη των καναλιών, ο υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης φαίνεται να δίνει πολύ καλή ακρίβεια σε αραιό πλέγμα. Έτσι, η μοντελοποίηση των καναλιών ενδείκνυται για μια πρώτη γρήγορη και ικανοποιητικά ακριβή εκτίμηση της τάσης βραχυκύκλωσης σε αραιό πλέγμα, διαπίστωση η οποία πρέπει να γενικευτεί με τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης σε διάφορα είδη μετασχηματιστών (εφαρμογή που περιλαμβάνεται σε επόμενη παράγραφο).

Τάση βραχυκύκλωσης 630 kVA στα 20 kV



Σχήμα 4.42: Υπολογισμός τάσης βραχυκύκλωσης (20 kV) μετασχηματιστή 630 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.

Τα παραπάνω συμπεράσματα επαληθεύονται με τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.42 έως 4.45, όπου εικονίζεται η μεταβολή της υπολογισμένης τιμής τάσης βραχυκύκλωσης και η απόκλιση από τη μετρημένη τιμή για μοντέλα μετασχηματιστή με και χωρίς κανάλια.



Σχήμα 4.43: Υπολογισμός τάσης βραχυκύκλωσης (15 kV) μετασχηματιστή 630 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.



Σχήμα 4.44: Σφάλμα στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης (20 kV) μετασχηματιστή 630 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.



Σφάλμα υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης 630 kVA στα 15 kV

Σχήμα 4.45: Σφάλμα στον υπολογισμό τάσης βραχυκύκλωσης (15 kV) μετασχηματιστή 630 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.

4.5.2 Εφαρμογή των βελτιώσεων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στους μετασχηματιστές της πρώτης σειράς μετρήσεων

Μετά τα αποτελέσματα της προηγούμενης παραγράφου, και προκειμένου να διαπιστωθεί η γενικότητα της ισχύος των βελτιώσεων της μεθοδολογίας πραγματοποιήθηκε εκ νέου υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης των μετασχηματιστών της πρώτης σειράς μετρήσεων (1000/99003 και 400/99008). Στον υπολογισμό αυτό ενσωματώθηκαν όλες οι βελτιώσεις της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκαν στα τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή 630 kVA της δεύτερης σειράς μετρήσεων.

Στα Σχήματα 4.46 έως 4.53, εικονίζεται η μεταβολή της υπολογισμένης τιμής τάσης βραχυκύκλωσης και η απόκλιση από τη μετρημένη τιμή για τα μοντέλα των μετασχηματιστών αυτών με και χωρίς κανάλια. Από τα σχήματα αυτά εξάγονται τα συμπεράσματα αντίστοιχα με αυτά της προηγούμενης παραγράφου ως προς την ακρίβεια των υπολογισμών σε συνάρτηση με την πυκνότητα του πλέγματος.

Στην περίπτωση του πρώτου μετασχηματιστή της πρώτης σειράς μετρήσεων (400/99008), η πρώτη μέθοδος (χωρίς κανάλια) ξεκινά με σημαντικό σφάλμα σε αραιό πλέγμα, για να προσεγγίσει πολύ καλά τη μετρημένη τιμή σε αρκετά πυκνό πλέγμα (~90000 κόμβοι). Αντίθετα, το μοντέλο με τα κανάλια δίνει πολύ μικρή απόκλιση στο αραιό πλέγμα η οποία στη συνέχεια αυξάνεται με την αύξηση του πλέγματος για να ξαναμειωθεί και να συγκλίνει στο σφάλμα της πρώτης μεθόδου για παρόμοια πυκνότητα πλέγματος (Σχήματα 4.46 και 4.48). Στο δεύτερο επίπεδο τάσης (15 kV) το μοντέλο με τα κανάλια δίνει στο αραιό πλέγμα πολύ μικρότερη τιμή σφάλματος σε σχέση με το μοντέλο χωρίς κανάλια, ενώ και τα δύο μοντέλα συγκλίνουν και πάλι σε κοντινό σφάλμα για μεγάλη πυκνότητα πλέγματος (Σχήματος (Σχήματα 4.47 και 4.49).

Τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στις καμπύλες των Σχημάτων 4.46 έως 4.49 παρατίθενται και στους Πίνακες 4.18 (αποτελέσματα υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2 – χωρίς μοντελοποίηση των καναλιών ψύξης)

και 4.19 (αποτελέσματα υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2 – με μοντελοποίηση των καναλιών ψύξης).



Τάση βραχυκύκλωσης 400 kVA στα 20 kV

Σχήμα 4.46: Υπολογισμός τάσης βραχυκύκλωσης (20 kV) μετασχηματιστή 400 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.



Τάση βραχυκύκλωσης 400 kVA στα 15 kV

Σχήμα 4.47: Υπολογισμός τάσης βραχυκύκλωσης (20 kV) μετασχηματιστή 400 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.



Σχήμα 4.48: Σφάλμα στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης (20 kV) μετασχηματιστή 400 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.





Σχήμα 4.49: Σφάλμα στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης (15 kV) μετασχηματιστή 400 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.

400 / 99008	Κόμβοι πλέγματος	IX (%)	IR (%)	U ^{υπολογισμένη} (%)	U ^{μετρημένη} (%)	απόκλιση (%)
	3260	6,20		6,49		1,88
20 kV	17570	6,23		6,23	6,37	2,20
	24862	6,22	1,91	6,22		2,35
	38260	6,22		6,22		2,35
	92141	6,27	$\begin{array}{c c c c c c c c } & U_{k}^{\upsilon \pi o \lambda o \gamma \iota \sigma \mu \acute{e} \nu \eta} & U_{k}^{\mu \epsilon \tau \rho \eta \mu \acute{e} \nu \eta} \\ \hline & & & & & \\ \hline & & & & & \\ \hline & & & &$	1,57		
	3260	6,00		6,31		3,78
	17570	5,97		5,97		1,81
15 kV	24862	5,97	1,95	5,97	6,08	1,81
	38260	5,98		5,98		1,64
	92141	5,99		5,99		1,48

Πίνακας 4.18: Τάση βραχυκύκλωσης μετασχηματιστή 400 kVA (υπολογισμός με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2, χωρίς αναπαράσταση των καναλιών ψύξης).

400 / 99008	Κόμβοι πλέγματος	IX (%)	IR (%)	U ^{υπολογισμένη} (%)	${f U}_k^{\mu \epsilon au ho \eta \mu \epsilon u \eta} _k$ (%)	απόκλιση (%)
	2343	6,00		6,30		1,10
20 kV	15090	6,28		6,28	6,37	1,41
	24862	6,27	1,91	6,27		1,57
	45125	6,22		6,22		2,35
	91786	6,29		6,29		1,26
	2343	5,62		5,95		2,14
	15090	5,99		5,99		1,48
15 kV	24862	6,02	1,95	6,02	6,08	0,99
	45125	6,00		6,00		1,32
	91786	5,98		5,98		1,71

Πίνακας 4.19: Τάση βραχυκύκλωσης μετασχηματιστή 400 kVA (υπολογισμός με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2, με αναπαράσταση των καναλιών ψύξης).

Στην περίπτωση του δεύτερου μετασχηματιστή της πρώτης σειράς μετρήσεων (1000/99003), η πρώτη μέθοδος (χωρίς κανάλια) ξεκινά με σφάλμα μεγαλύτερο του 4% σε αραιό πλέγμα, για να πέσει σε σφάλμα κοντά στο 1% σε αρκετά πυκνό πλέγμα (~80000 κόμβοι). Αντίθετα, το μοντέλο με τα κανάλια δίνει σφάλμα μικρότερο του 1% στο αραιό πλέγμα το οποία στη συνέχεια αυξάνεται με την αύξηση του πλέγματος για να ξαναμειωθεί και να συγκλίνει στο σφάλμα της πρώτης μεθόδου για παρόμοια πυκνότητα πλέγματος (Σχήματα 4.50 και 4.52). Αντίστοιχη είναι η μεταβολή της απόκλισης μεταξύ μετρημένης και υπολογισμένης τιμής τάσης βραχυκύκλωσης για το δεύτερο επίπεδο τάσης (15 kV), όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.51 και 4.53.

Τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στις καμπύλες των Σχημάτων 4.50 έως 4.53 παρατίθενται και στους Πίνακες 4.20 (αποτελέσματα υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2 – χωρίς μοντελοποίηση των καναλιών ψύξης) και 4.21 (αποτελέσματα υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2 – με μοντελοποίηση των καναλιών ψύξης).



Τάση βραχυκύκλωσης 1000 kVA στα 20 kV

Σχήμα 4.50: Υπολογισμός τάσης βραχυκύκλωσης (20 kV) μετασχηματιστή 1000 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.



Τάση βραχυκύκλωσης 1000 kVA στα 15 kV

Σχήμα 4.51: Υπολογισμός τάσης βραχυκύκλωσης (15 kV) μετασχηματιστή 1000 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.



Σφάλμα υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης 1000 kVA στα 20 kV

Σχήμα 4.52: Σφάλμα στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης (20 kV) μετασχηματιστή 1000 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.



Σφάλμα υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης 1000 kVA στα 15 kV

Σχήμα 4.53: Σφάλμα στον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης (15 kV) μετασχηματιστή 1000 kVA για μοντελοποίηση με και χωρίς κανάλια.

1000 / 99003	Κόμβοι πλέγματος	IX (%)	IR(%)	U ^{υπολογισμένη} (%)	U ^{μετρημένη} (%)	απόκλιση (%)
	2343	6,21		6,39		4,24
20 kV	14491	6,34		6,34	6,13	3,43
	25132	6,32	1,49	6,32		3,10
	49047	6,22		6,22		1,47
	81855	6,19		6,19		0,98
	2343	5,95		6,13		3,03
	14491	6,13		6,13	5,95	3,01
15 kV	25132	6,11	1,49	6,11		2,69
20 kV 15 kV	49047	6,09		6,09		2,30
	81855	5,97		5,97		0,34

Πίνακας 4.20: Τάση βραχυκύκλωσης μετασχηματιστή 1000 kVA (υπολογισμός με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2, χωρίς αναπαράσταση των καναλιών ψύξης).

1000 / 99003	Κόμβοι πλέγματος	IX(%)	IR (%)	U ^{υπολογισμένη} (%)	U ^{μετρημένη} (%)	απόκλιση (%)
	3260	5,90		6,09		0,65
20 kV	15201	6,19		6,19	6,13	0,98
	24862	6,25	1,49	6,25		1,96
	48923	6,22		6,22		1,47
	78895	6,19		6,19		0,98
	3260	5,67		5,86		1,51
	15201	5,85		5,85	5,95	1,68
15 kV	24862	5,88	1,49	5,88		1,18
	48923	5,89		5,89		1,01
	78895	6,00]	6,00		0,84

Πίνακας 4.21: Τάση βραχυκύκλωσης μετασχηματιστή 1000 kVA (υπολογισμός με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2, με αναπαράσταση των καναλιών ψύξης).

4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφηκε η πραγματοποίηση δύο σειρών πεδιακών μετρήσεων σε τριφασικούς μετασχηματιστές τύπου τυλιχτού πυρήνα, οι οποίες έγιναν για την πειραματική επιβεβαίωση των τρισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Η σύγκριση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα των μοντέλων, τόσο ως προς τις τοπικές τιμές πεδίου όσο και ως προς την τάση βραχυκύκλωσης οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα.

4.6.1 Πρώτη σειρά μετρήσεων

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των πρώτων λεπτομερών μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή και της αριθμητικής προσομοίωσής του μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων κρίνεται ικανοποιητική. Και για τους δύο μετασχηματιστές που διεξήχθησαν μετρήσεις (ισχύος 400 και 1000 kVA αντίστοιχα) οι

τοπικές τιμές της μαγνητικής επαγωγής παρουσιάζουν αντίστοιχες χωρικές μεταβολές ενώ οι τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης προσεγγίζονται αρκετά καλά.

Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης δικαιολογούνται από:

- τις σχετικά μικρές τιμές που εμφανίζει το μαγνητικό πεδίο σκέδασης στον αέρα (μέγιστη επαγωγή μερικών mT)
- την πρακτική δυσκολία μέτρησης μίας μόνο συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής με το αισθητήριο της γεννήτριας Hall και την δυσχέρεια προσδιορισμού της ακριβούς θέσης του καθώς εμφανίζονται έντονες μεταβολές του μαγνητικού πεδίου για μικρές σχετικά μετακινήσεις
- τις προσεγγίσεις της γεωμετρίας που υιοθετήθηκαν κατά την μοντελοποίηση προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος για τα διάφορα υπό εξέταση μοντέλα.

Οι αποκλίσεις αυτές κατέδειξαν την ανάγκη διεξαγωγής δεύτερης σειράς μετρήσεων στις οποίες λαμβάνονται υπόψη οι πρακτικές δυσκολίες της πρώτης σειράς (μη ονομαστική φόρτιση, επιλογή σημείων μέτρησης) και οι οποίες επιτρέπουν, τόσο τον προσδιορισμό των καταλληλότερων αριθμητικών μοντέλων, όσο και την απαιτούμενη διακριτότητα που πρέπει να υιοθετηθεί ώστε τα αποτελέσματα να έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια.

4.6.2 Δεύτερη σειρά μετρήσεων

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της δεύτερης σειράς μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή και της αριθμητικής προσομοίωσής του μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι βελτιωμένη σε σχέση με την πρώτη σειρά μετρήσεων. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε μετασχηματιστή 630 kVA με δυνατότητα σύνδεσής του σε δύο επίπεδα YT (20 kV και 15 kV, αντίστοιχα). Οι τοπικές μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου εμφανίζουν αποδεκτή συσχέτιση με τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης (οι παρατηρούμενες αποκλίσεις είναι συγκρίσιμες με τις διακυμάνσεις μεταξύ μετρήσεων σε διαφορετικές φάσεις του μετασχηματιστή). Οι βελτιώσεις στα αριθμητικά μοντέλα προέκυψαν από δύο κυρίως παρεμβάσεις στα μοντέλα:

- την καλύτερη αναπαράσταση της γεωμετρίας των τμημάτων των τυλιγμάτων που βρίσκονται έξω από τα "παράθυρα" του πυρήνα (καμπύλα τμήματα ελλειψοειδούς γεωμετρίας)
- την θεώρηση των καναλιών ψύξης στην κατανομή των αμπερελιγμάτων στα τυλίγματα

Οι βελτιώσεις αυτές παρατηρήθηκαν και στην περίπτωση των δύο μετασχηματιστών (ισχύος 400 και 1000 kVA αντίστοιχα) για τους οποίους είχαν διεξαχθεί μετρήσεις στην πρώτη σειρά μετρήσεων.

Οι προαναφερόμενες τροποποιήσεις των μοντέλων βελτίωσαν και την ακρίβεια των υπολογιζόμενων παραμέτρων των μετασχηματιστών (τάση βραχυκύκλωσης) ιδιαιτέρως στην περίπτωση χρησιμοποίησης σχετικά αραιών πλεγμάτων. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την ικανότητα ικανοποιητικής πρόβλεψης παραμέτρων με μοντέλα μειωμένης διακριτότητας (μερικών χιλιάδων κόμβων) και επομένως περιορισμένου χρόνου εκτέλεσης (μερικών λεπτών) σε συμβατικό προσωπικό υπολογιστή, γεγονός ιδιαίτερης σημασίας για την δυνατότητα ενσωμάτωσής τους στην σχεδιαστική διαδικασία.

4.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] P. Hunter, A. Pullan, "*FEM / BEM Notes*". Dept. of Engineering Science, Univ. of Auckland, N. Zealand, February 2001.
- [4.2] M. Tsili, A. Kladas, P. Georgilakis, A. Souflaris, D. Paparigas, "Numerical Techniques for Design and Modeling of Distribution Transformers". *Journal* of *Materials Processing technology*, Vol. 161, No 1-2, pp. 320-326, Apr. 2005.
- [4.3] K. Baldwin, "Modern Methods for Automatic Finite Element Mesh Generation". American Society of Civil Engineers, January 1986
- [4.4] A. B. J. Reece, T. W. Preston, *"Finite Element Methods in Electrical Power Engineering"*. Oxford University Press, May 2000.
- [4.5] J. Bastos, "*Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*". Marcel Dekker, April 2003.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΓΕΝΙΚΕΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βελτίωση της ακρίβειας η οποία διαπιστώθηκε μετά την ενσωμάτωση των βελτιώσεων στη μεθοδολογία υπολογισμού της τάσης βραχυκύκλωσης (βελτίωση τρισδιάστατου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, καλύτερη αναπαράσταση των πηγών του μαγνητικού πεδίου) οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η μεθοδολογία αυτή αποτελεί ένα κατάλληλο εργαλείο για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος του μετασχηματιστή. Ωστόσο, για τη γενίκευση της ισχύος της κρίθηκε σκόπιμη η εφαρμογή της σε διάφορες περιπτώσεις μετασγηματιστών και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις σε κάθε περίπτωση. Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει αναλυτικά τη γενίκευση αυτή, μέσω εφαρμογής της σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών διαφορετικής ισχύος και συνδεσμολογίας, οι οποίοι μελετήθηκαν, κατασκευάστηκαν και μετρήθηκαν στη μονάδα παραγωγής, σε συνέχεια αντίστοιχων τρεχουσών παραγγελιών πελατών. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται η δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού της τάσης βραχυκύκλωσης η οποία παρέχεται από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, ενώ αναδεικνύεται η χρησιμότητά του για την πρόβλεψη της των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μετασχηματιστών κατά τη φάση της σχεδίασης.

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Η χρήση του λεπτομερούς μοντέλου ΠΣ που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 3.4.4.2 επιτρέπει την αναπαράσταση μετασχηματιστών διαφόρων επιπέδων ισχύος και τάσης πρωτεύοντος ή δευτερεύοντος. Μπορεί επιπλέον να χρησιμοποιηθεί σε μετασχηματιστές ενός ή δύο επιπέδων τάσης πρωτεύοντος (υψηλής τάσης), ενώ η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων (τρίγωνο, αστέρας ή τεθλασμένος αστέρας) δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του μοντέλου. Η αρχική διαίρεση του πηνίου ΥΤ σε τέσσερα υποπηνία επιλέχθηκε σκόπιμα, καθώς μπορεί να αναπαραστήσει όλες τις δυνατές συνδέσεις των τυλιγμάτων ΥΤ για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης. Στη συνέχεια, περιγράφονται τέσσερις τρόποι σύνδεσης οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην πράξη, [5.1], [5.2] και ο τρόπος με τον οποίο αναπαριστώνται στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται και οι τρόποι σύνδεσης που συναντήθηκαν στις περιπτώσεις των τριών μετασχηματιστών του Κεφαλαίου 4, οι οποίοι επαναλαμβάνονται εδώ για την πληρότητα της περιγραφής).

Το δεύτερο από τα τέσσερα υποπηνία αποτελείται από δύο τμήματα (ΥΤ2α, ΥΤ2β) με τον ίδιο αριθμό σπειρών. Όταν τα τμήματα αυτά συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους και στη συνέχεια σε σειρά με τα υπόλοιπα υποπηνία, παράγεται το δεύτερο (μικρότερο) επίπεδο ΥΤ (π.χ. 15 kV σε μετασχηματιστές 20-15/0.4 kV). Για την παραγωγή του υψηλότερου επιπέδου τάσης (20 kV), τα δύο τμήματα ΥΤ2α και ΥΤ2β συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους και σε σειρά με τα υπόλοιπα υποπηνία. Έτσι, στην παράγεται του πρώτου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος (20 kV) όλα τα υποπηνία διαρρέονται από ρεύμα ίσο με το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος, ενώ στην περίπτωση του δεύτερου επιπέδου (15 kV), το ρεύμα του υποπηνίου ΥΤ2 (τα

τμήματα ΥΤ2α και ΥΤ2β του οποίου συνδέονται παράλληλα) είναι το μισό του ρεύματος που διαρρέει τα υποπηνία ΥΤ1, ΥΤ3 και ΥΤ4. Η σύνδεση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 5.1, και είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο μετασχηματιστή 1000/99003 της Παραγράφου 4.3 (Σχήμα 4.6) και 630/82008 της Παραγράφου 4.4.1, (Σχήμα 4.26).



- Σχήμα 5.1: Σύνδεση τυλιγμάτων (επίπεδο yz του μοντέλου ΠΣ) για την παραγωγή επιπέδων τάσης πρωτεύοντος 20-15 kV.
 - 2) Ένας εναλλακτικός τρόπος για την παραγωγή επιπέδων ΥΤ ίσων με 20-15 kV απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2. Σε αυτήν την περίπτωση, τα δύο ενδιάμεσα υποπηνία (YT2, YT3) συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους και στη συνέχεια σε σειρά με τα υπόλοιπα υποπηνία (YT1, YT4) για να ληφθεί το δεύτερο επίπεδο YT (15 kV). Έτσι, για να μοντελοποιηθεί αυτή η σύνδεση, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τα υποπηνία YT2 και YT3 διαρρέονται από το μισό του ρεύματος το οποίο διαρρέει τα YT1 και YT4. Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται στο μετασχηματιστή 400/99008 της Παραγράφου 4.3 και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 5.2: Εναλλακτική σύνδεση τυλιγμάτων (επίπεδο yz του μοντέλου ΠΣ) για την παραγωγή επιπέδων τάσης πρωτεύοντος 20-15 kV.

3) Το Σχήμα 5.3 δείχνει τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων με τον οποίο παράγονται επίπεδα ΥΤ ίσα με 20-10 kV. Σε αυτήν την περίπτωση, το πηνίο ΥΤ διαιρείται μόνο σε δύο υποηνία (ΥΤ1 και ΥΤ2), τα οποία αποτελούνται από δύο τμήματα (ΥΤ1α-ΥΤ1β και ΥΤ2α-ΥΤ2β) συνδεδεμένα παράλληλα για την παραγωγή του χαμηλότερου επίπεδου ΥΤ (10 kV). Κατά συνέπεια, για επίπεδο πρωτεύοντος ίσο με 10 kV, τα υποπηνία ΥΤ1 και ΥΤ2 διαρρέονται από το μισό του ονομαστικού ρεύματος. Για να μοντελοποιηθεί η παραπάνω σύνδεση, οι τέσσερις υποπεριοχές του πηνίου ΥΤ του μοντέλου ΠΣ χρησιμοποιούνται ως εξής: οι δύο πρώτες υποπεριοχές αναπαριστούν το υποπηνίο ΥΤ1, ενώ οι δύο τελευταίες το υποπηνίο ΥΤ2.



Σχήμα 5.3: Σύνδεση τυλιγμάτων (επίπεδο yz του μοντέλου ΠΣ) για την παραγωγή επιπέδων τάσης πρωτεύοντος 20-10 kV.

 Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης των υποπηνίων ΥΤ ο οποίος δίνει επίπεδα ΥΤ ίσα με 20-6.6 kV. Η σύνδεση αυτή μοιάζει με αυτήν του Σχήματος 5.3, με τη διαφορά ότι τα υποπηνία ΥΤ1 και ΥΤ2 διαιρούνται σε 3 τμήματα. Έτσι, για επίπεδο τάσης πρωτεύοντος ίσο με 6.6 kV, τα υποπηνία ΥΤ1 και ΥΤ2 διαρρέονται από το ένα τρίτο του ονομαστικού ρεύματος.



Σχήμα 5.4: Σύνδεση τυλιγμάτων (επίπεδο yz του μοντέλου ΠΣ) για την παραγωγή επιπέδων τάσης πρωτεύοντος 20-6.6 kV.

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 εφαρμόστηκε αρχικά σε έντεκα περιπτώσεις μετασχηματιστών. Ο υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης έγινε με χρήση του μοντέλου της Παραγράφου 3.4.4.2, στο οποίο λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη των καναλιών, αφού από την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου προέκυψε ότι δίνει μικρή απόκλιση από τη μετρημένη τιμή για μικρές πυκνότητες πλεγμάτων.

Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται τα βασικά ηλεκτρικά και γεωμετρικά στοιχεία του κάθε μετασχηματιστή και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα υποπηνία YT για την παραγωγή δευτέρου επιπέδου τάσης (εφόσον υπάρχει). Επιπλέον δίνονται σε πίνακα οι σπείρες του κάθε πηνίου και το ρεύμα που θεωρείται ότι το διαρρέει κατά την προσομοίωση της δοκιμής βραχυκύκλωσης για το πρώτο και δεύτερο (εάν υπάρχει) επίπεδο υψηλής τάσης. Ο κάθε μετασχηματιστής αναφέρεται με το όνομα του κωδικού της μελέτης του, όπως αυτό ανατίθεται από τον κατασκευαστή. Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα για την τάση βραχυκύκλωσης και τις αντίστοιχες αποκλίσεις από τις μετρημένες τιμές της για όλες τις περιπτώσεις. Η σύγκριση έγινε με βάση τη μέση μετρημένη τιμή της παρτίδας μετασχηματιστών που κατασκευάστηκαν με βάση την εκάστοτε μελέτη (σε όσες περιπτώσεις μετασχηματιστών υπήρχαν στοιχεία για ολόκληρη παρτίδα).

5.3.1 Στοιχεία μετασχηματιστών που μελετήθηκαν

5.3.1.1 Μετασχηματιστής 1000/01054

Ο Πίνακας 5.1 περιλαμβάνει τα βασικά ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή της μελέτης 1000/01054. Στον πίνακα αυτό, όπως και στους αντίστοιχους πίνακες των υπόλοιπων μετασχηματιστών, δε δίνονται οι αποστάσεις του ενεργού μέρους από το κέλυφος. Αυτό συμβαίνει γιατί οι αποστάσεις αυτές έχουν ληφθεί ίδιες για όλους τους μετασχηματιστές (50 mm κατά πλάτος και μήκος και 100 mm κατά ύψος), δεδομένου ότι η αυξομείωσή τους δεν επηρεάζει ουσιαστικά την υπολογιζόμενη τάση βραχυκύκλωσης. Επιπλέον, η τιμή για την ωμική πτώση τάσης που δίνεται στο τέλος του πίνακα αντιστοιχεί στη μέση τιμή της παρτίδας των μετασχηματιστών που κατασκευάστηκαν με βάση τη μελέτη 1000/01054. Ο Πίνακας 5.1 περιλαμβάνει και αναλυτικά στοιχεία για τον αριθμό στρώσεων, καναλιών και τις διαστάσεις των αγωγών των υποπηνίων ΥΤ. Στον Πίνακα 5.2 δίνονται οι τιμές των ρευμάτων και των σπειρών των πηνίων υψηλής και χαμηλής τάσης. Οι τιμές αυτές δίνονται και για τα δύο επίπεδα τάσης πρωτεύοντος, δεδομένου ότι η τιμή τος παρτίδας των αγωρών των που τάσου γτο μαριθμό τημος του ρεύματος που διαρρέει τα υποπηνία ΥΤ είναι διαφορετική για κάθε επίπεδο ΥΤ.

Ignic (kVA)	1000
Τάση Ποωτεύοντος (kV)	20-15
Τάση Λευτερεύοντος (kV)	04
Συνδεσμολογία	Dvn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	Dynii
Υνος (mm)	165 5
$\Pi \dot{\alpha} \gamma_{0} c 1 (mm)$	27.3
Αοιθμός καναλιών	8
Πάγος μπαρών	4
Πηνίο Υψηλής Τάσης	·
<u>Υνος (mm)</u>	146.5
Διάσταση μονωμένου αγωγού	2.75
Στρώσεις Υποπηνίου 1	2
Στρώσεις Υποπηνίου 2	6
Στρώσεις Υποπηνίου 3	2
Στρώσεις Υποπηνίου 4	2
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	1
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	5
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 3	1
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 4	1
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	1.68
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	1.4
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 3 (mm)	0.56
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 4 (mm)	0.28
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.41
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	ΥΤ2α, ΥΤ2β
Πυρήνες	
Eu (mm)	105
G/2 (mm)	168.5
(D1+D2)/2 (mm)	127
K (mm)	11
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	7
Εξωτερικό διάκενο	4
Παράθυρα	
F2 (mm)	162
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (παρτίδα 12 Μ/Σ)	
IR(%)	1.034

Πίνακας 5.1: Δεδομένα μετασχηματιστή 1000/01054.

	Παυίο	Πηνίο ΥΤ									
	1111/10 A1		Υποπηνίο Ι Υπ		Υποπ	Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4	
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	
20 kV	13	1443 4	208	16,7	564	16,7	180	16,7	174	16,7	
15 kV	13	1443,4	200	22,2	304	11,1	100	22,2	1/4	22,2	

Πίνακας 5.2: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 1000/01054.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται η διάταξη των στρώσεων του πηνίου ΥΤ, όπως δίνονται από το φύλλο μελέτης του μετασχηματιστή. Στην περίπτωση αυτού του μετασχηματιστή, το δεύτερο επίπεδο ΥΤ προκύπτει με τη χρήση του πρώτου τρόπου παραλληλισμού που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.2. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται τα υποπηνία ΥΤ1, ΥΤ2α-ΥΤ2β, ΥΤ3 και ΥΤ4, κατ' αντιστοιχία με το Σχήμα 5.1 (με μοναδική διαφορά ότι στο Σχήμα 5.1 τα υποπηνία διατάσσονται από αριστερά προς τα δεξιά ενώ στο Σχήμα 5.5 από πάνω προς τα κάτω). Στο Σχήμα 5.5 δίνονται επιπλέον διευκρινίσεις για τα σύμβολα που εμφανίζονται στο φύλλο μελέτης (τα οποία εμφανίζονται και στα αντίστοιχα σχήματα των μετασχηματιστών που ακολουθούν), ενώ από τις στρώσεις του πηνίου ΥΤ έχουν διαγραφεί εκείνες που αντιστοιχούν στις σπείρες που συνδέονται (μέσω των λήψεων του μετασχηματιστή) για ανύψωση της τάσης πρωτεύοντος κατά 10% (έτσι ώστε ο συνολικός αριθμός σπειρών δευτερεύοντος να αντιστοιχεί σε τάση ίση με το 100% της ονομαστικής).



Σχήμα 5.5: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 1000/01054.

5.3.1.2 Μετασχηματιστής 630/99039

Στον Πίνακα 5.3 εμφανίζονται τα δεδομένα του μετασχηματιστή 630/99039 ενώ στον Πίνακα 5.4 δίνεται αριθμός σπειρών των πηνίων του και το ρεύμα που τα διαρρέει για τα δύο επίπεδα ΥΤ.

Στο Σχήμα 5.6 δίνεται η διάταξη των υποπηνίων ΥΤ του μετασχηματιστή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα αυτό, επειδή το τέταρτο υποπηνίο ΥΤ που εμφανίζεται στη μελέτη περιλαμβάνει πολύ μικρό αριθμό σπειρών, θεωρείται ότι οι σπείρες αυτές προστίθενται στο πρώτο υποπηνίο και δεν υπάρχει τέταρτο υποπηνίο ΥΤ. Το δεύτερο επίπεδο τάσης (15 kV) προκύπτει με το δεύτερο τρόπο παραλληλισμού που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.2 (Σχήμα 5.2), με τη διαφορά ότι δεν υπάρχει υποπηνίο ΥΤ4. Ωστόσο, αυτό δεν επηρεάζει το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, δεδομένου μπορεί να προσομοιωθεί θεωρώντας ότι η τέταρτη υποπεριοχή του πηνίου ΥΤ του μοντέλου δε διαρρέεται από ρεύμα.

Ισχύς (kVA)	630
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	20-15
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.4
Συνδεσμολογία	Dyn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	164.5
Πάχος 1 (mm)	17.8
Αριθμός καναλιών	6
Πάχος μπαρών	4
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	145.5
Διάσταση μονωμένου αγωγού	2.46
Στρώσεις Υποπηνίου 1	6
Στρώσεις Υποπηνίου 2	3
Στρώσεις Υποπηνίου 3	3
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	4
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	1
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 3	0
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	1.23
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	1.64
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 3 (mm)	0.41
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 4 (mm)	0.
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.41
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	YT2, YT3
Πυρήνες	
Eu (mm)	99.7
G/2 (mm)	167.5
(D1+D2)/2 (mm)	118.5
K (mm)	11
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	7
Εξωτερικό διάκενο	4
Παράθυρα	
F2 (mm)	138
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (παρτίδα 30 Μ/Σ)	
IR(%)	1.032

Πίνακας 5.3: Δεδομένα μετασχηματιστή 630/99039	Ιίνακας 5.3:	Δεδομένα	μετασχηματιστή	630/99039.
--	--------------	----------	----------------	------------

	Παιτία			Πην	ío YT				
	Πηνιο ΧΙ		Υποπηνίο 1		Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	
20 kV	15	909,33	000 22	640	10.5	225	10,5	225	10,5
15 kV			049	14	525	7	325	7	

Πίνακας 5.4. Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 630/99039.

						1
	1	113		113	🖌 <u>0.41mm</u> K1	
	2	114		227	К2	
	3	114		341	К3	
		48		389		2
	4	. 32		421		3
Ŧ,		\sim		454		4
⋝	$\downarrow\downarrow$	2x0.41 n	nm			5
		X		32		6
	1	33		65		7
		48		113	К4	
	2	113		226		
		17		243		8
	3	97		340		
E	4	114		454	К5	
-		114		568		9
	$\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow$	4x0.41 n	nm			10
~	1	114		114		
Ë	2	114		228		
-	3	<u>9</u> 7		325		11
		-(17		342	▲ 0.41mm	12

Σχήμα 5.6: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 630/99039.

5.3.1.3 Μετασχηματιστής 100/98029

Τα στοιχεία του μετασχηματιστή 100/98029 δίνονται στους Πίνακες 5.5 και 5.6, ενώ η σύνδεση των υποπηνίων υψηλής τάσης φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου υψηλής τάσης χρησιμοποιείται ο δεύτερος τρόπος παραλληλισμού που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.2 (Σχήμα 5.2).

Ισχύς (kVA)	100
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	20-15
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.4
Συνδεσμολογία	Yzn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	99.5
Πάχος 1 (mm)	19.4
Αριθμός καναλιών	4
Πάχος μπαρών	2
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	80.5
Διάσταση μονωμένου αγωγού	1.33
Στρώσεις Υποπηνίου 1	4
Στρώσεις Υποπηνίου 2	4
Στρώσεις Υποπηνίου 3	4
Στρώσεις Υποπηνίου 4	5
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	1
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	1
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 3	1
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 4	1
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	0.28
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	1.4

Πίνακας 5.5.1: Δεδομένα μετασχηματιστή 100/98029.

Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 3 (mm)	0.
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 4 (mm)	1.12
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.28
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	YT2 , YT3
Πυρήνες	
Eu (mm)	49.6
G/2 (mm)	102.5
(D1+D2)/2 (mm)	95
K (mm)	9
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	7
Εξωτερικό διάκενο	4
Παράθυρα	
F2 (mm)	117
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (παρτίδα 50 Μ/Σ)	
IR(%)	1.756

Πίνακας 5.5.2: Δεδομένα μετασχηματιστή 100/98029.

	Παινία				Πηνί	o YT				
	Πηνιο Χ Ι		Υποπ	ηνίο Ι	Υποπι	ηνίο 2	Υποπι	γνίο 3	Υποπη	ηνίο 4
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι
20 kV	44	144,3	472	2,89	176	2,89	176	2,89	400	2,89
15 kV			4/2	3,85	4/0	1,93	4/0	1,93	400	3,85

Πίνακας 5.6: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 100/98029.

	1	110		110	(20mm		— 1
_	1	110		110	←.2011111		I
TT.	2	118		236			
Y	3	118		354		K1	
	4	118		472			_2
	5	119		591			
T2	6	119		710			
Y	7	119		829		K2	
	8	119		948			
	I						3
	\checkmark	$\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow$	5X.28 m	ım			
	1	119		119			4
T3	2	119		238			
Υ	3	119		357		К3	
	4	119		476			
	5	118		594			5
		22		616			_
	6	48		664			6
		X		712			7
4							8
ΥT		$\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow$	3X.28m	m			_
		× ₹		48			9
	1	48		96			10
		22		118			-11
	2	118		236	\leftarrow	K4	
	3	104		340	.28mm		_
							12

Σχήμα 5.7: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 100/98029.

5.3.1.4 Μετασχηματιστής 100/98022

Ο μετασχηματιστής αυτός, τα στοιχεία του οποίου δίνονται στους Πίνακες 5.7 και 5.8 και στο Σχήμα 5.8, δίνει ένα μόνο επίπεδο μέσης τάσης (20 kV), δεν είναι δηλαδή αναγκαία παράλληλη σύνδεση υποπηνίων ΥΤ για την παραγωγή δεύτερου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος. Έτσι, το πηνίο υψηλής τάσης δε χρειάζεται να διαιρεθεί σε περισσότερα των δύο υποπηνίων. Η διαίρεση αυτή (σε αριθμό υποπηνίων μικρότερο των 4 που είχε αρχικά προβλεφθεί) μπορεί να αναπαρασταθεί θεωρώντας ότι ο χώρος των δύο πρώτων υποπηνίων αναπαριστά το υποπηνίο ΥΤ1 ενώ ο χώρος των δύο τελευταίων αποτελεί το πηνίο ΥΤ2.

Ισχύς (kVA)	100
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	20
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.4
Συνδεσμολογία	Yzn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	99.5
Πάχος 1 (mm)	19.4
Αριθμός καναλιών	3
Πάχος μπαρών	2
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	80.5
Διάσταση μονωμένου αγωγού	1.33
Στρώσεις Υποπηνίου 1	9
Στρώσεις Υποπηνίου 2	8
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	2
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	1
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	1.12
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	0. 28
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 3 (mm)	0.
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 4 (mm)	0.
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.28
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	-
Πυρήνες	
Eu (mm)	49.6
G/2 (mm)	102.5
(D1+D2)/2 (mm)	95
K (mm)	9
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	7
Εξωτερικό διάκενο	4
Παράθυρα	
F2 (mm)	117
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (παρτίδα 33 Μ/Σ)	
IR(%)	1.721

Πίνακας 5.7: Δεδομένα μετασχηματιστή 100/98022.

	Πουία		Πηνί	o YT		
	111/00	ΔΙ	Υποπη	γνίο Ι	Υποπι	γνίο 2
	Ν	Ι	N	Ι	Ν	Ι
20 kV	44	144,3	1014	2,89	890	2,89

Πίνακας 5.8: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 100/98022.



Σχήμα 5.8: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 100/98022.

5.3.1.5 Μετασχηματιστής 250/02030

Στους Πίνακες 5.9 και 5.10 περιλαμβάνονται τα στοιχεία του μετασχηματιστή 250/02030, ενώ στο Σχήμα 5.9 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο παραλληλίζονται τα υποπηνία ΥΤ για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος.

Το δεύτερο επίπεδο υψηλής τάσης (6,6 kV) σε αυτόν το μετασχηματιστή προκύπτει με τον τέταρτο τρόπο παραλληλισμού που παρουσιάζεται στην Παράγραφο 5.2 (Σχήμα 5.4): το πηνίο υψηλής τάσης αποτελείται από δύο υποπηνία, και κάθε υποπηνίο χωρίζεται σε τρία ίσα κατά ύψος και αριθμό σπειρών τμήματα (ΥΤΙα-ΥΤΙβ-ΥΤΙγ και ΥΤ2α-ΥΤ2β-ΥΤ2γ). Κατά τον παραλληλισμό τους, τα τμήματα αυτά διαρρέονται από ρεύμα ίσο με το ένα τρίτο του ονομαστικού ρεύματος δίνοντας έτσι τάση ίση με το δεύτερο επίπεδο των 6,6 kV. Επιπλέον, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.10, τα ελίγματα των υποπηνίων ΥΤ2α, ΥΤ2β και ΥΤ2γ δεν είναι ίδια και για τα δύο επίπεδα τάσης αλλά διαφέρουν κατά 7 σπείρες (οι σπείρες αυτές βραχυκυκλώνονται επειδή η τάση 6,6 είναι λίγο μικρότερη από το 1/3 των 20 kV, οπότε και οι σπείρες πρέπει να είναι λίγο μικρότερες από το 1/3, τόσο ώστε να δίνουν ακριβώς 6,6 kV στο δεύτερο τρόπο σύνδεσης). Έτσι, κατά τον παραλληλισμό, τα συνολικά αμπερελίγματα του πηνίου υψηλής τάσης είναι περίπου ίσα με αυτά που αντιστοιχούν σε τάση 20 kV (με πολύ μικρή διαφορά, λόγω των 7 σπειρών των υποπηνίων ΥΤ2α, ΥΤ2β και ΥΤ2γ που βραχυκυκλώνονται), πρόκειται δηλαδή για ίδιο μαγνητοστατικό πρόβλημα και στα δύο επίπεδα τάσης. Αυτός είναι και ο λόγος που τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην τάση βραχυκύκλωσης (τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές) είναι παρόμοια.

Ισχύς (kVA)	250
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	20-6.6
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.4
Συνδεσμολογία	Dyn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	129.5
Πάχος 1 (mm)	18.
Αριθμός καναλιών	3
Πάχος μπαρών	2
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	110.5
Διάσταση μονωμένου αγωγού	1.4
Στρώσεις Υποπηνίου 1	9
Στρώσεις Υποπηνίου 2	9
Στρώσεις Υποπηνίου 3	0
Στρώσεις Υποπηνίου 4	0
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	3
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	3
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	1.12
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	0. 28
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.28
Vποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	ΥΤ1α-ΥΤ1β-ΥΤ1γ ,
	ΥΤ2α-ΥΤ2β-ΥΤ2γ
Πυρήνες	
Eu (mm)	76.5
G/2 (mm)	132.5
(D1+D2)/2 (mm)	95
K (mm)	9
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	7
Εξωτερικό διάκενο	4
Παράθυρα	
F2 (mm)	120
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (παρτίδα 10 Μ/Σ)	
IR(%)	1.299

Πίνακας 5.9: Δεδομένα μετασχηματιστή 250/02030.

	Παινίο		Πηνί	o YT		
	111/00	Υποπη	γνίο Ι	Υποπι	γνίο 2	
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι
20 kV	24	360,9	1050	4,17	1029	4,17
6.6 kV				12,6	1008	12,6

Πίνακας 5.10: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 250/02030.



Σχήμα 5.9: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 250/02030.

5.3.1.6 Μετασχηματιστής 630/01015

Στους Πίνακες 5.11 και 5.12 περιλαμβάνονται τα στοιχεία του μετασχηματιστή 630/01015. Η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων ΥΤ (Σχήμα 5.10) και ο τρόπος παραλληλισμού για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος είναι παρόμοια με αυτή του μετασχηματιστή της Παραγράφου 5.3.1.5.



σπείρες που βραχυκυκλώνονται για την παραγωγή των 6,6 kV

Σχήμα 5.10: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 630/01015.

Ισχής (kVA)	630		
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	20-6.6		
Τάση Λευτεοεύοντος (kV)	0.4		
Σονδεσιολονία	Dvn11		
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	Dynn		
Ywoc (mm)	192		
Πάχος 1 (mm)	19.4		
Αριθμός καναλιών	5		
Πάχος μπαρών	4		
Πηνίο Υψηλής Τάσης			
Ύψος (mm)	172		
Διάσταση μονωμένου αγωγού	2.34		
Στρώσεις Υποπηνίου 1	6		
Στρώσεις Υποπηνίου 2	6		
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	3		
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	3		
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	1.23		
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	0. 41		
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 3 (mm)	0.		
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 4 (mm)	0.		
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.41		
	ΥΤ1α-ΥΤ1β-ΥΤ1γ,		
י אסארויזע טעוראןג זעסוןג זע סאסוע אעסעגגווגנסידענ	ΥΤ2α-ΥΤ2β-ΥΤ2γ		
Πυρήνες			
Eu (mm)	94.5		
G/2 (mm)	195		
(D1+D2)/2 (mm)	118.5		
K (mm)	11		
Διάκενα			
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3		
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	7.5		
Εξωτερικό διάκενο	4		
Παράθυρα			
F2 (mm)	132		
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (παρτίδα 15 Μ/Σ)			
IR(%)	1.044		

Πίνακας 5.11: Δεδομένα μετασχηματιστή 630/01015.

	Παυίο	Πηνίο ΥΤ				
	Πηνίο ΧΙ		Υποπηνίο 1		Υποπηνίο 2	
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι
20 kV	16	909,33	705	10.5	684	10,5
6,6 kV				31,8	669	31,8

Πίνακας 5.12: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 630/01015.

5.3.1.7 Μετασχηματιστής 160/01046

Όπως φαίνεται στους Πίνακες 5.13 και 5.14, πρόκειται για ειδική περίπτωση μετασχηματιστή, στον οποίο το δεύτερο επίπεδο υψηλής τάσης (5.5 kV) δεν προκύπτει με παραλληλισμό υποπηνίων YT, αλλά με βραχυκύκλωση των σπειρών του δευτέρου υποπηνίου YT (YT2). Έτσι, με αλλαγή της θέσης του μεταγωγέα τάσεων συνδέεται μόνο το υποπηνίο YT1, δίνοντας λόγο σπειρών ο οποίος αντιστοιχεί σε τάση πρωτεύοντος ίση με 5.5 kV. Στην περίπτωση αυτή το υποπηνίο YT1 διαρρέεται από μεγαλύτερο ρεύμα (ενώ το YT2 είναι βραχυκυκλωμένο), γι αυτό και η διατομή των σπειρών του είναι μεγαλύτερη από αυτή του υποπηνίου YT2. Η ειδική αυτή περίπτωση αναπαρίσταται στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων θεωρώντας απλά ότι στην περίπτωση των 5.5 kV το δεύτερο υποπηνίο δε διαρρέεται από ρεύμα.

Ισχύς (kVA)	160
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	20-5.5
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.4
Συνδεσμολογία	Yzn11-Dzn0
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	94.5
Πάχος 1 (mm)	17.6
Αριθμός καναλιών	7
Πάχος μπαρών	2
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	73.5
Διάσταση μονωμένου αγωγού ΥΤ1	2.
Διάσταση μονωμένου αγωγού ΥΤ2	1.42
Στρώσεις Υποπηνίου 1	9
Στρώσεις Υποπηνίου 2	7
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	4
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	2
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 3	0
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 4	0
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	1.12
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	1.12
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.28
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	-
Πυρήνες	
Eu (mm)	62.4
G/2 (mm)	97.5
(D1+D2)/2 (mm)	95.
K (mm)	9
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	9
Εξωτερικό διάκενο	4
Παράθυρα	
F2 (mm)	126
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (2 Μ/Σ)	
IR(%)	1.454

Πίνακας 5.13: Δεδομένα μετασχηματιστή 160/01046.

	Πουία	Πηνίο ΥΤ					
	Πηνιο ΧΙ			Υποπηνίο 1		Υποπηνίο 2	
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	
20 kV	30	230,9	618	4,62	682	4,62	
5,5 kV				9.69	0	0	

Πίνακας 5.14: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 160/01046.

	1	70		70	🖌 0.28 K1	
	2	71		141	K2	
	3	71		212		
	4	54		266		
		X		276		
Ե	₫ 🖌 🖌 3X0.28 mm					
≻	1	16		16		
		54		70		
	2	71		141	<u>K</u> 3	
	3	71		212	K4	
	4	70		282		
	5	70		352		
	6	100		452	K5	
	7	100		552		
	8	84		636		
		16		652		
12	✓ ✓ 3X0.28mm					
≻	1	X		16		
		84		100		
	2	100		200	<u> </u>	
	3	100		300		
	4	98		398	🗡 0.28mm	

Σχήμα 5.11: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 160/01046.

5.3.1.8 Μετασχηματιστής 100/03017

Στους Πίνακες 5.15 και 5.16 και το Σχήμα 5.12 περιλαμβάνονται τα στοιχεία του μετασχηματιστή 100/03017. Πρόκειται για περίπτωση μετασχηματιστή παρόμοια με αυτή των Παραγράφων 5.3.1.5 και 5.3.1.6.

Ισχύς (kVA)	100
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	20-6.6
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.4
Συνδεσμολογία	Yzn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	106
Πάχος 1 (mm)	19.5
Αριθμός καναλιών	4
Πάχος μπαρών	4
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	87
Διάσταση μονωμένου αγωγού	1.19
Στρώσεις Υποπηνίου 1	9
Στρώσεις Υποπηνίου 2	9

Πίνακας 5.15.1 : Δεδομένα μετασχηματιστή 100/03017.
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	2
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	2
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	1.12
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	0.28
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.28
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	ΥΤ1α-ΥΤ1β-ΥΤ1γ , ΥΤ2α-ΥΤ2β-ΥΤ2γ
Πυρήνες	
Eu (mm)	55.7
G/2 (mm)	109
(D1+D2)/2 (mm)	95.
K (mm)	9
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	7.5
Εξωτερικό διάκενο	4
Παράθυρα	
F2 (mm)	114
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (1 Μ/Σ)	
IR(%)	1.75

Πίνακας 5.15.2: Δεδομένα μετασχηματιστή 100/03017.



σπείρες που βραχυκυκλώνονται για την παραγωγή των 6,6 kV

Σχήμα 5.12: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 100/03017.

	Πουίο	VT	Πηνίο ΥΤ			
	111/00	Υποπη	γνίο Ι	Υποπι	ηνίο 2	
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι
20 kV	42	144.2	019	2,89	900	2,89
6,6 kV	42	144,5	910	8,75	882	4,38

Πίνακας 5.16: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 100/03017.

5.3.1.9 Μετασχηματιστής 50/03003

Τα στοιχεία του μετασχηματιστή αυτού παρατίθενται στους Πίνακες 5.17 και 5.18. Δεδομένου ότι ο μετασχηματιστής αυτός είναι ενός επιπέδου τάσης (33 kV), ο τρόπος με τον οποίο χωρίστηκαν τα υποπηνία υψηλής τάσης (Σχήμα 5.13) είναι παρόμοιος με αυτόν του μετασχηματιστή 100/98022.

Ισχύς (kVA)	50
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	33
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.433
Συνδεσμολογία	Dyn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	U
Ύψος (mm)	270
Πάχος 1 (mm)	8.5
Αριθμός καναλιών	1
Πάχος μπαρών	0
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	250
Διάσταση μονωμένου αγωγού	0.5
Στρώσεις Υποπηνίου 1	14
Στρώσεις Υποπηνίου 2	14
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	2
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	1
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 3	0
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 4	0
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	2.52
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	1.68
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.28
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	-
Πυρήνες	
Eu (mm)	46
G/2 (mm)	140
(D1+D2)/2 (mm)	110
K (mm)	9
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	10.68
Εξωτερικό διάκενο	8
Παράθυρα	
F2 (mm)	108
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (4 Μ/Σ)	
IR(%)	2,39

Πίνακας 5.17: Δεδομένα μετασχηματιστή 50/03003.

Όπως φαίνεται στο συγκεντρωτικό πίνακα αποτελεσμάτων (Πίνακας 5.24) η υπολογισμένη τάση βραχυκύκλωσης είναι κατά πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη μετρημένη. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στην κατασκευαστική ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου μετασχηματιστή, το πηνίο υψηλής τάσης του οποίου αποτελείται από σύρμα μικρής διατομής η οποία προκαλεί σημαντική χαλαρότητα κατά την τύλιξη των σπειρών του. Επιπλέον, το υψηλό επίπεδο τάσης (>30 kV) δημιουργεί την ανάγκη ενίσχυσης των μονωτικών στην πλευρά υψηλής τάσης. Κατά συνέπεια, οι διαστάσεις του πραγματικού μετασχηματιστή παρουσιάζουν απόκλιση από τις σχεδιασμένες, γεγονός το οποίο οδηγεί στην εμφανιζόμενη απόκλιση της υπολογισμένης τιμής τάσης βραχυκύκλωσης. Η προσαύξηση της τιμής αυτής κατά ένα συντελεστή 10% οδηγεί σε καλή προσέγγιση της πραγματικής μετρημένης τιμής, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.24. Πρόκειται βέβαια για έναν εμπειρικό συντελεστή, η τιμή του οποίου δε δίνεται από κάποιο τύπο, δεδομένου ότι οι κατασκευαστικές αποκλίσεις είναι δύσκολο να αποδοθούν με ακρίβεια στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων. Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η προσέγγιση αυτή είναι ικανοποιητική εξετάστηκαν δύο παρόμοιες περιπτώσεις μετασχηματιστών διαφορετικής ισχύος (5.3.1.10-5.3.1.11). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.24, παρατηρείται παρόμοια απόκλιση στην τάση βραχυκύκλωσης, η οποία δικαιολογεί τη χρήση της προαναφερόμενης προσαύξησης.

	1	337		337	6*0.28mm
	2	337		674	
	3	337		1011	
	4	337		1348	K1
	5	337		1685	
	6	337		2022	
	7	337		2359	
, H	8	337		2696	
¥	9	337		3033	
	10	337		3370	
	11	337		3707	К2
	12	337		4044	
	13	226		4270	
	_	111		4381	
	14	113		4494	r
	17	~274		4718	
		\sim		-	
		3x0.28 r	nm		
		3x0.28 r	nm	225	
	× ×	3x0.28 r >225	nm	225	
	1	3x0.28 r >225 112 113	nm	225 337 450	
	1	3x0.28 r >225 112 113 224	nm	225 337 450 674	
	1 2 3	3x0.28 r 225 112 113 224 337	nm 	225 337 450 674 1011	
	1 2 3 4	3x0.28 r >225 112 113 224 337 337	nm 	225 337 450 674 1011 1348	
	1 2 3 4 5	3x0.28 r >225 112 113 224 337 337 337	nm	225 337 450 674 1011 1348 1685	
12	1 2 3 4 5 6	3x0.28 r >225 112 113 224 337 337 337 337	nm	225 337 450 674 1011 1348 1685 2022	КЗ
YT2	1 2 3 4 5 6 7	3x0.28 r >225 112 113 224 337 337 337 337 337 337		225 337 450 674 1011 1348 1685 2022 2359	КЗ
YT2	1 2 3 4 5 6 6 7 8	3x0.28 r >225 112 113 224 337 337 337 337 337 337 337	nm	225 337 450 674 1011 1348 1685 2022 2359 2696	K3
YT2	1 2 3 4 5 6 6 7 7 8 8 9	3x0.28 r >225 112 113 224 337 337 337 337 337 337 337 33	nm	225 337 450 674 1011 1348 1685 2022 2359 2696 3033	КЗ
YT2	1 2 3 4 5 6 6 7 7 8 9 9 10	3x0.28 r 225 112 113 224 337 337 337 337 337 337 337 33		225 337 450 674 1011 1348 1685 2022 2359 2696 3033 3370	K3
YT2	1 2 3 4 5 6 6 7 8 8 9 9 10 11	3x0.28 r >225 112 113 224 337 337 337 337 337 337 337 33		225 337 450 674 1011 1348 1685 2022 2359 2696 3033 3370 3707	K3
YT2	1 2 3 4 4 5 6 6 7 7 8 9 9 10 11 12	3x0.28 r 225 112 113 224 337 337 337 337 337 337 337 33	nm	225 337 450 674 1011 1348 1685 2022 2359 2696 3033 3370 3707 4044	K3
YT2	1 2 3 4 5 6 7 7 8 9 10 111 12 13	3x0.28 r 225 112 113 224 337 337 337 337 337 337 337 33	nm	225 337 450 674 1011 1348 1685 2022 2359 2696 3033 3370 3707 4044 4381	КЗ

Σχήμα 5.13: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 50/03003.

	Πουίο	VT		Πηνί	o YT	
	111/00	λΙ	Υποπηνίο Ι		Υποπηνίο 2	
	Ν	Ι	N	Ι	Ν	Ι
33 kV	68	66,7	4494	0,51	4482	0,51

Πίνακας 5.18: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 50/03003.

5.3.1.10 Μετασχηματιστής 100/03005

Τα στοιχεία του μετασχηματιστή αυτού, ο οποίος είναι παρόμοιος με αυτόν της Παραγράφου 5.3.1.9, παρατίθενται στους Πίνακες 5.19 και 5.20 και το Σχήμα 5.14.

Ισχύς (kVA)	100
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	33
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.433
Συνδεσμολογία	Dyn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	•
Ύψος (mm)	220
Πάχος 1 (mm)	14.2
Αριθμός καναλιών	3
Πάχος μπαρών	2
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	124
Διάσταση μονωμένου αγωγού	0.66
Στρώσεις Υποπηνίου 1	14
Στρώσεις Υποπηνίου 2	14
Στρώσεις Υποπηνίου 3	0
Στρώσεις Υποπηνίου 4	0
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	3
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	2
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	2.52
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	1.68
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.28
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	-
Πυρήνες	
Eu (mm)	61
G/2 (mm)	115
(D1+D2)/2 (mm)	76
K (mm)	9
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	10.68
Εξωτερικό διάκενο	8
Παράθυρα	
F2 (mm)	126
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (1 Μ/Σ)	
IR(%)	1,78

Πίνακας 5.19: Δεδομένα μετασχηματιστή 100/03005.

	Παιτία					
	111/00	ΔΙ	Υποπηνίο Ι		Υποπηνίο 2	
	N I		N	Ι	Ν	Ι
33 kV	37	133,3	2451	1,01	2433	1,01

Πίνακας 5.20: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 100/03005

	1	182		182	6*0.28mm
	2	184		366	▲
	3	184		550	
	4	184		734	К1
	5	184		918	
	6	184		1102	
	7	184		1286	K2
<u>, -</u>	8	184		1470	
לן	9	184		1654	
	10	184		1838	
	11	184		2022	К3
	12	184		2206	
	13	123		2329	
		60		2389	
	14	62		2451	
		>122		2573	
		3x0.28 r	nm		
		3x0.28 r	nm	122	
	* *	3x0.28 r >t22 62	nm	122 184	
	1	3x0.28 r >t22 62 60	nm	122 184 244	
	1 2	3x0.28 r >t22 62 60 123	nm	122 184 244 367	
	1 2 3	3x0.28 r >+22 62 60 123 184	nm	122 184 244 367 551	<u></u> K4
	1 2 3 4	3x0.28 r >+22 62 60 123 184 184	nm	122 184 244 367 551 735	K4
	1 2 3 4 5	3x0.28 r 222 62 60 123 184 184 184		122 184 244 367 551 735 919	K4
12	1 2 3 4 5 6	3x0.28 r >422 62 60 123 184 184 184 184		122 184 244 367 551 735 919 1103	K4
YT2	1 2 3 4 5 6 7	3x0.28 r >422 62 60 123 184 184 184 184 184 184		122 184 244 367 551 735 919 1103 1287	K4
YT2	1 2 3 4 4 5 6 6 7 7 8	3x0.28 r >422 62 60 123 184 184 184 184 184 184 184		122 184 244 367 551 735 919 1103 1287 1471	K4
YT2	1 2 3 4 5 6 7 8 8 9 9	3x0.28 r >422 62 60 123 184 184 184 184 184 184 184 184		122 184 244 367 551 735 919 1103 1287 1471 1655	K4 K5
YT2	1 2 3 4 5 6 6 7 8 8 9 9 10	3x0.28 r >422 62 60 123 184 184 184 184 184 184 184 184		122 184 244 367 551 735 919 1103 1287 1471 1655 1839	K4
YT2	1 2 3 4 5 6 6 7 8 9 9 10 11	3x0.28 r 22 62 60 123 184 184 184 184 184 184 184 184		122 184 244 367 551 735 919 1103 1287 1471 1655 1839 2023	K4 K5
YT2	1 2 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8 9 9 10 11 11 12	3x0.28 r 22 62 60 123 184 184 184 184 184 184 184 184		122 184 244 367 551 735 919 1103 1287 1471 1655 1839 2023 2207	K4
YT2	1 2 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 8 9 9 10 11 11 12 13	3x0.28 r >422 62 60 123 184 184 184 184 184 184 184 184		122 184 244 367 551 735 919 1103 1287 1471 1655 1839 2023 2207 2391	K4 K5

Σχήμα 5.14: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 100/03005.

5.3.1.11 Μετασχηματιστής 400/02042

Τα στοιχεία του μετασχηματιστή αυτού παρατίθενται στους Πίνακες 5.21 και 5.22 και το Σχήμα 5.15. Ο μετασχηματιστής αυτός είναι ενός επιπέδου τάσης πρωτεύοντος, μεγαλύτερου των 30 kV, όπως και οι μετασχηματιστές που παρουσιάστηκαν στις Παραγράφους 5.3.1.9 και 5.3.1.10.

Ισχύς (kVA)	400
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	35
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.433
Συνδεσμολογία	Dyn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	-
Ύψος (mm)	345
Πάχος 1 (mm)	16.9
Αριθμός καναλιών	6
Πάχος μπαρών	3
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	249
Διάσταση μονωμένου αγωγού	1.2
Στρώσεις Υποπηνίου 1	8
Στρώσεις Υποπηνίου 2	8
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1	4
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	5
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm)	2.52
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	1.68
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 3 (mm)	0.
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 4 (mm)	0.
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.28
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	-
Πυρήνες	
Eu (mm)	70
G/2 (mm)	177.5
(D1+D2)/2 (mm)	110
K (mm)	11
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	10.65
Εξωτερικό διάκενο	10.65
Παράθυρα	
F2 (mm)	144
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (1 Μ/Σ)	
IR(%)	1,51

Πίνακας 5.22: Δεδομένα μετασχηματιστή 400/02042.

	Παυία	VT		Πηνί	o YT	
	111/00	ΔΙ	Υποπηνίο Ι		Υποπηνίο 2	
	Ν	Ι	Ν	Ι	N	Ι
35 kV	21	549,9	1525	3,81	1506	3,81

Πίνακας 5.23: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 400/02042.

	1	202		202	6*0.28mm	K1
	2	202		404	≮	
	3	202		606		K2
	4	202		808		-
Ե	5	202		1010		K3
F	6	202		1212		K4
	7	202		1414		-
	8	20		1434		
		91		1525		
		\searrow		1616		
		3x0.28 r	nm			
) \$		91		
		91		182		
	1	20		202		
	2	202		404		K5
E	3	202		606		K6
~	4	202		808		K7
	5	202		1010		K8
	6	202		1212		К9
	•	-				
	7	202		1414	*	

Σχήμα 5.15: Υποπηνία υψηλής τάσης μετασχηματιστή 400/02042.

5.3.2 Αποτελέσματα της μεθοδολογίας

Στον Πίνακα 5.24 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας για την τάση βραχυκύκλωσης των 11 μετασχηματιστών που παρουσιάστηκαν στις Παραγράφους 5.3.1.1 έως 5.3.1.11. Η υπολογισμένη τιμή τάσης βραχυκύκλωσης προέκυψε σε όλες τις περιπτώσεις με τη χρήση αραιού πλέγματος, της τάξης των 3000 κόμβων. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη μέση μετρημένη τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης και παρατίθεται η αντίστοιχη απόκλιση, με βάση τη Σχέση (5.1).

$$\alpha \pi \acute{0} \kappa \lambda \iota \sigma \eta = \frac{\left| \frac{U_{k}^{\mu \varepsilon \tau \rho \eta \mu \acute{e} \nu \eta} - U_{k}^{\upsilon \pi \circ \lambda \circ \gamma \iota \sigma \mu \acute{e} \nu \eta}}{U_{k}^{\mu \varepsilon \tau \rho \eta \mu \acute{e} \nu \eta}} \cdot 100\%$$
(5.1)

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.24, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έδωσε αποτελέσματα με καλή προσέγγιση (απόκλιση μικρότερη του 4%, η οποία προσεγγίζει τα θεωρητικά όρια της μεθοδολογίας) στις μετρημένες τιμές για διάφορες ισχείς (από 50 έως 1000 kVA), συνδεσμολογίες (Dyn, Yzn) και συνδέσεις των τυλιγμάτων υψηλής τάσης για την παραγωγή του δεύτερου επιπέδου υψηλής τάσης (20-15 kV, 20-6,6 kV, 20-5,5 kV). Επιπλέον, τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν προέκυψαν με τη χρήση μοντέλου μικρής πυκνότητας πλέγματος και κατά συνέπεια μικρού χρόνου εκτέλεσης των υπολογισμών, καθιστώντας τη μέθοδο αρκετά εύχρηστη και ευέλικτη ακόμη και σε υπολογισμών, καθιστώντας τη μέθοδο αρκετά εύχρηστη και ευέλικτη ακόμη και σε υπολογιστές με μικρή υπολογιστική ικανότητα. Στις τρεις τελευταίες περιπτώσεις του Πίνακα 5.24, η υπολογισμένη τιμή U_k προσαυξάνεται κατά 10% προκειμένου να συγκριθεί με την αντίστοιχη μετρημένη τιμή για τους λόγους που αναφέρονται στην Παράγραφο 5.3.1.9 (η προσαύξηση λαμβάνει υπόψη την αύξηση του πάχους του πηνίου υψηλής τάσης λόγω των ενισχύσεων της μόνωσης σε μετασχηματιστές με επίπεδο τάσης πρωτεύοντος μεγαλύτερο των 30 kV).

Μ/Σ	Επίπεδο ΥΤ	Υπολογισμένη Τιμή Uk	Μετρημένη Τιμή Uk	Απόκλιση (%)
1000/01054	20 kV	6.26	6.27	0.16
1000/01054	15 kV	6.30	6.17	2.11
100/98029	20 kV	4.27	4.16	2.64
100/90029	15 kV	4.19	4.17	0.48
630/00030	20 kV	3.98	4.12	3.40
030/33033	15 kV	3.55	3.66	3.00
100/98022	20 kV	4.06	4.05	0.25
250/02030	20 kV	3.81	3.65	4.38
250/02030	6.6 kV	3.80	3.64	4.40
(20/01015	20 kV	3.83	3.77	1.59
030/01015	6.6 kV	3.81	3.75	1.60
160/01046	20 kV	4.47	4.41	1.36
100/01040	5.5 kV	3.60	3.81	5.51
100/02017	20 kV	4.02	-	-
100/0301/	6.6 kV	3.97	-	-
50/03003	33 kV	3.73 * 110% = 4.10	4.28	4.21
100/03005	33 kV	3.71* <i>110%</i> = 4.08	4.14	1.45
400/02042	35 kV	4.07* <i>110%</i> = 4.48	4.62	3.03

Πίνακας 5.24: Αποτελέσματα τάσης βραχυκύκλωσης και απόκλιση από μετρημένες τιμές για τους μετασχηματιστές 5.3.1.1-5.3.1.11.

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗ

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της υπολογισμένης τιμής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με αυτή που δίνει η μεθοδολογία του κατασκευαστή και με τις μετρήσεις μιας παρτίδας μετασχηματιστών, έτσι ώστε να προκύψει ένα γενικότερο συμπέρασμα για τη συμβολή του μοντέλου στην αύξηση της ακρίβειας, σε σχέση με την υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης. Στις επόμενες παραγράφους δίνονται ιστογράμματα με τις μετρήσεις κάθε παρτίδας μετασχηματιστών που κατασκευάστηκαν με βάση τις μελέτες που περιγράφηκαν στις Παραγράφους 5.3.1.1 έως 5.3.1.6. Για τις μελέτες των υπολοίπων παραγράφων δεν υπήρχαν στοιχεία για ολόκληρη παρτίδα, αλλά για μεμονωμένους μετασχηματιστές, γι αυτό και δε συμπεριλαμβάνονται στα συγκριτικά αποτελέσματα των επόμενων παραγράφων. Όλες οι κατανομές που ακολουθούν αναφέρονται σε επίπεδο υψηλής τάσης 20 kV.

5.4.1 Παρτίδα 12 μετασχηματιστών μελέτης 1000/01054

Το Σχήμα 5.16 δείχνει την κατανομή της μετρημένης τάσης βραχυκύκλωσης σε 12 μετασχηματιστές της μελέτης 1000/01054, μαζί με την εγγυημένη τιμή και τις τιμές που υπολογίστηκαν από την υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης και το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων. Όπως φαίνεται από το ιστόγραμμα του Σχήματος, η χρήση του μοντέλου ΠΣ μειώνει την απόκλιση στην εκτίμηση της τάσης βραχυκύκλωσης από 2.23% σε 0.16%.





5.4.2 Παρτίδα 30 μετασχηματιστών μελέτης 100/98029

Στο Σχήμα 5.17 φαίνεται η κατανομή της μετρημένης τάσης βραχυκύκλωσης σε 30 μετασχηματιστές της μελέτης 100/98029, μαζί με την εγγυημένη τιμή και τις τιμές που υπολογίστηκαν από την υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης και το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων. Σε αυτήν την περίπτωση η απόκλιση του μοντέλου ΠΣ (2.64%) είναι μεγαλύτερη από αυτή που δίνει η υφιστάμενη μεθοδολογία του κατασκευαστή (1.44%). Επιπλέον, η τιμή που προβλέπεται από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων είναι μεγαλύτερη από τη μέση μετρημένη τιμή, ενώ η υφιστάμενη μεθοδολογία προβλέπει τιμή κάτω από τη μέση μετρημένη τιμή της παρτίδας.

5.4.3 Παρτίδα 50 μετασχηματιστών μελέτης 630/99039

Στο Σχήμα 5.18 φαίνεται η κατανομή της μετρημένης τάσης βραχυκύκλωσης σε 50 μετασχηματιστές της μελέτης 630/99039, μαζί με την εγγυημένη τιμή και τις τιμές που υπολογίστηκαν από την υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης και το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων. Σε αυτήν την περίπτωση η χρήση του μοντέλου ΠΣ μειώνει την απόκλιση στην πρόβλεψη της τάσης βραχυκύκλωσης από 6.31% (απόκλιση που δίνει η υφιστάμενη μέθοδος πρόβλεψης) σε 3.40%.



Σχήμα 5.17: Κατανομή μετρημένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης 30 μετασχηματιστών, μελέτης 100/98029 (επίπεδο YT 20 kV).



Σχήμα 5.18: Κατανομή μετρημένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης 50 μετασχηματιστών, μελέτης 630/99039 (επίπεδο YT 20 kV).

5.4.4 Παρτίδα 33 μετασχηματιστών μελέτης 100/98022

Στο Σχήμα 5.19 φαίνεται η κατανομή των μετρημένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης σε παρτίδα 33 μετασχηματιστών της μελέτης 100/98022. Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο ΠΣ δίνει τιμή τάσης βραχυκύκλωσης 4.06% (απόκλιση 0.25% από τη μέση μετρημένη τιμή), ενώ η μέθοδος του κατασκευαστή προβλέπει τιμή τάσης βραχυκύκλωσης ίση με 4.1% (με απόκλιση 1.23%).

5.4.5 Παρτίδα 10 μετασχηματιστών μελέτης 250/02030

Το Σχήμα 5.20 δίνει την κατανομή της μετρημένης τάσης βραχυκύκλωσης σε 10 μετασχηματιστές της μελέτης 250/02030. Στην περίπτωση αυτή, η υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης δίνει τιμή τάσης βραχυκύκλωσης 17.81% μεγαλύτερη από τη μέση μετρημένη τιμή, ενώ η αντίστοιχη πρόβλεψη του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων είναι 4.68% μικρότερη της μέσης μετρημένης τιμής.



Μετρημένη τιμή τάσης βραχυκύκλωσης 33 μετασχηματιστών

Σχήμα 5.19: Κατανομή μετρημένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης 33 μετασχηματιστών, μελέτης 100/98022 (επίπεδο YT 20 kV).

5.4.6 Παρτίδα 15 μετασχηματιστών μελέτης 630/01015

Στο Σχήμα 5.21 φαίνεται η κατανομή των μετρημένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης σε παρτίδα 15 μετασχηματιστών της μελέτης 630/01015. Η χρήση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε μείωση της απόκλισης μεταξύ της προβλεπόμενης και μετρημένης U_k από 6.1% (με τη χρήση της υφιστάμενης μεθοδολογίας) σε 1.59%.



Σχήμα 5.20: Κατανομή μετρημένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης 10 μετασχηματιστών, μελέτης 250/02030 (επίπεδο YT 20 kV).



Σχήμα 5.21: Κατανομή μετρημένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης 15 μετασχηματιστών, μελέτης 630/01015 (επίπεδο YT 20 kV).

Μετρημένη τιμή τάσης βραχυκύκλωσης 15 μετασχηματιστών

5.5 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΥΠΟΠΗΝΙΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΤΑΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ

Οι διατάξεις των υποπηνίων Υψηλής Τάσης των Σχημάτων 5.1 έως 5.4 μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παραγωγή άλλων επιπέδων τάσης πρωτεύοντος εκτός από τα 20, 15, 6.6 και 10 kV, ανάλογα με τις ανάγκες της σχεδίασης. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίπτωση στη διακύμανση της τάσης βραχυκύκλωσης των διαφόρων εναλλακτικών τρόπων σύνδεσης των υποπηνίων ΥΤ για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος, και η δυνατότητα να προβλεφθεί με ακρίβεια από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, μελετήθηκε μία ακόμη περίπτωση μετασχηματιστή δύο επιπέδων υψηλής τάσης, ισχύος 630 kVA με κωδικό μελέτης 630/88012. Τα ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δίνονται στον Πίνακα 5.25.

Το επίπεδο τάσης των 15 kV προκύπτει με το δεύτερο τρόπο παραλληλισμού που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.2 (Σχήμα 5.2). Εξετάζονται τρεις διαφορετικές τοπολογίες των υποπηνίων που συνδέονται παράλληλα (ΥΤ2, ΥΤ3), οι οποίες απεικονίζονται στο Σχήμα 5.22. Η βασική διαφορά τους συνίσταται στην απομάκρυνση των σπειρών που παραλληλίζονται από τον πυρήνα, καταλήγοντας στην περίπτωση (γ) σε κατάργηση του τέταρτου υποπηνίου υψηλής τάσης. Ο αναλυτικός τρόπος σύνδεσης των σπειρών των υποπηνίων ΥΤ (σύμφωνα με τα φύλλα της αντίστοιχης μελέτης) δίνεται στα Σχήματα 5.23, 5.24 και 5.25 για τις περιπτώσεις (α), (β) και (γ) του Σχήματος 5.22, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.22: Διαφορετικές τοπολογίες παραλληλισμού υποπηνίων ΥΤ (επίπεδο yz) για την παραγωγή επιπέδου τάσης πρωτεύοντος 15 kV: (a) Πρώτη τοπολογία,

- (β) Δεύτερη τοπολογία,
- (γ) Τρίτη τοπολογία.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.25, ο αριθμός των στρώσεων (άρα και των σπειρών, του αριθμού των καναλιών και των μονώσεων λήψεων και άκρων) των δύο υποπηνίων που παραλληλίζονται (YT2 και YT3) παραμένει σταθερός, ανεξάρτητα από την τοπολογία παραλληλισμού. Αντίθετα, πραγματοποιείται αναδιάταξη στρώσεων μεταξύ των υποπηνίων

ΥΤ1 και ΥΤ4, έτσι ώστε ο συνολικός αριθμός σπειρών να παραμένει σταθερός. Αυτό φαίνεται και στον Πίνακα 5.26, όπου δίνονται τα στοιχεία για το ρεύμα και τις σπειρες των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης και για τις τρεις τοπολογίες του Σχήματος 5.22. Επιπλέον, όπως φαίνεται στην τελευταία γραμμή του Πίνακα 5.25, για το συγκεκριμένο μετασχηματιστή υπάρχουν στοιχεία για τη μετρημένη ωμική πτώση τάσης και για τα δύο επίπεδα τάσης πρωτεύοντος (σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές της Παραγράφου 5.3.1, όπου λαμβανόταν κοινή τιμή ωμικής πτώσης τάσης για τα δύο επίπεδα υψηλής τάσης).

Ισχύς (kVA)	630
Τάση Πρωτεύοντος (kV)	20-15
Τάση Δευτερεύοντος (kV)	0.4
Συνδεσμολογία	Dyn11
Πηνίο Χαμηλής Τάσης	2
Ύψος (mm)	382
Πάχος 1 (mm)	20.2
Αριθμός καναλιών	5
Πάχος μπαρών	4
Πηνίο Υψηλής Τάσης	
Ύψος (mm)	356
Διάσταση μονωμένου αγωγού	2.46
Στρώσεις Υποπηνίου 1 (α) - (β) - (γ)	1 - 4 - 5
Στρώσεις Υποπηνίου 2	3
Στρώσεις Υποπηνίου 3	3
Στρώσεις Υποπηνίου 4 (α) - (β) - (γ)	4 - 1 - 0
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 1 (α) - (β) - (γ)	1 - 3 - 3
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 2	1
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 3	1
Αριθμός καναλιών Υποπηνίου 4 (α) - (β) - (γ)	2 - 0 - 0
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 1 (mm) (α) - (β) - (γ)	0.41 - 1.23 - 1.23
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 2 (mm)	2.05
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 3 (mm)	0
Πάχος μονώσεων λήψεων και άκρων Υποπηνίου 4 (mm) (α) - (β) - (γ)	1.23 – 0.41 - 0
Μόνωση αγωγού υψηλής τάσης	0.41
Υποπηνία υψηλής τάσης τα οποία παραλληλίζονται	YT2, YT3
Πυρήνες	
Eu (mm)	98.7
G/2 (mm)	200
(D1+D2)/2 (mm)	110
K (mm)	5
Διάκενα	
Διάκενο ΧΤ-πυρήνα	3
Διάκενο ΧΤ-ΥΤ	7
Εξωτερικό διάκενο	7
Παράθυρα	
F2 (mm)	144
Μέση μετρημένη ωμική πτώση τάσης (1 Μ/Σ)	
IR(%) στα 20 kV (α) - (β) - (γ)	1 - 1 - 1.012
IR(%) στα 15 kV (α) - (β) - (γ)	1.28 - 1.09 - 1.06

Πίνακας 5.25: Δεδομένα μετασχηματιστή 630/82008 (αναγράφονται ξεχωριστά όσα στοιχεία μεταβάλλονται λόγω διαφορετικής τοπολογίας παραλληλισμού των πηνίων ΥΤ, σύμφωνα με το Σχήμα 5.22 (α) – (β) – (γ)).

	Πουίο				Πηνί	o YT				
	וווןענ		Υποπ	ηνίο Ι	Υποπι	γνίο 2	Υποπη	γνίο 3	Υποπι	ηνίο 4
	Ν	Ι	N I		Ν	Ι	N	Ι	Ν	Ι
20 kV				10,5		10,5		10,5		10,5
(α)	17	000.3	194		368		368		542	
15 kV (β)	17	909,5	542	14	368	7	368	7	194	14
(γ)			736		368		368		0	

Πίνακας 5.26: Σπείρες και ρεύμα πηνίων ΧΤ και ΥΤ μετασχηματιστή 630/82008 (αναγράφονται ξεχωριστά οι σπείρες των υποπηνίων ΥΤ για κάθε τοπολογία παραλληλισμού των πηνίων ΥΤ, σύμφωνα με το Σχήμα 5.22 (α) $-(\beta) - (\gamma)$).

Στα Σχήματα 5.23 έως 5.25 δίνεται η διάταξη των υποπηνίων ΥΤ του μετασχηματιστή που αντιστοιχούν στις τρεις τοπολογίες παραλληλισμού του Σχήματος 5.22. Στα Σχήματα αυτά φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο τα παράλληλα υποπηνία απομακρύνονται από τον πυρήνα. Στο Σχήμα 5.25, επειδή το τέταρτο υποπηνίο ΥΤ που εμφανίζεται στη μελέτη περιλαμβάνει πολύ μικρό αριθμό σπειρών, θεωρείται ότι οι σπείρες αυτές προστίθενται στο πρώτο υποπηνίο και δεν υπάρχει τέταρτο υποπηνίο ΥΤ.

Στον Πίνακα 5.26 παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τις τρεις τοπολογίες παραλληλισμού, μαζί με τις μετρημένες τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης και τη μεταξύ τους απόκλιση. Η εξέταση των αποτελεσμάτων του πίνακα δείχνει ότι το μοντέλο ΠΣ προβλέπει την αύξηση στην τάση βραχυκύκλωσης στα 20 kV και τη μείωσή της στα 15 kV η οποία προκαλείται από την απομάκρυνση των υποπηνίων που παραλληλίζονται από τον πυρήνα. Η μέση απόκλιση μεταξύ των υπολογισμένων και μετρημένων τιμών βραχυκύκλωσης είναι περίπου ίση με 1.5%. Η μέγιστη απόκλιση εμφανίζεται στην περίπτωση της πρώτης τοπολογίας, για το χαμηλότερο επίπεδο τάσης πρωτεύοντος.

Γ1	1	140		140	▲ .41mm K1	1
.≺	2	54		194		2
2	2	86		280		
Ľ	3	141		421	K2	
•	4	141		562		3
		* * * * *	5X.41 mm			
З	1	141		141		4
Ϋ́	2	141		282	К3	
	2	86		368		
	5	55		423		5
	4	141		564	K4	
		66		630		6
	5	37		667		7
T 4		X		704		8
≻		* *	2X.41mm			
		X		37		9
	1	37		74		10
		66		140	K5	11
	2	140		280	🔺 .41mm	
						12

Σχήμα 5.23: Σύνδεση υποπηνίων υψηλής τάσης μετασχηματιστή 630/88012, η οποία αντιστοιχεί στην τοπολογία (α) του Σχήματος 5.22.

	1	1.40		1.40		<u> </u>
	I	140		140	<u>• .41mm KI</u>	I
		66		206		2
	2	37		243		3
		X		280		4
11		+ +	2X.41 mm			5
≻		X		37		6
	1	37		74		7
		66		140	К2	
	2	141		281	К3	
	2	55		336		8
2	3	86		422		
E	4	141		563	K4	
	5	141		704		9
-		+ + + + +	5X.41mm			
~	1	141		141		10
Ë	2	141		282	К5	
	2	86		368		
Τ4	3	54		422		11
►	4	140		562	.41mm	
						12

Σχήμα 5.24: Σύνδεση υποπηνίων υψηλής τάσης μετασχηματιστή 630/88012, η οποία αντιστοιχεί στην τοπολογία (β) του Σχήματος 5.22.

		1	140		140	▲ .41mm	K1	1
			140		280		К2	
			66		346			2
		2	37		383			3
-	1		X		420			4
	Ľ		* *	2X.41 mm				5
			X		37			6
		1	37		74			7
			66		140		K2	
		2	141		281			
			55		336			8
	2	5	86		422		K4	
	Ľ	4	141		563			
		5	141		704			9
			* * * * *	5X.41mm				
	3	1	141		141			10
	Ľ	2	141		282		К5	
		2	86		368	🛶 .41mm		11
		3	-(54)		422			12

Σχήμα 5.25: Σύνδεση υποπηνίων υψηλής τάσης μετασχηματιστή 630/88012, η οποία αντιστοιχεί στην τοπολογία (γ) του Σχήματος 5.22.

	Πρώτη τα παραλλι υποπηνίων 5.22	οπολογία ηλισμού ΥΤ (Σχήμα (α))	Δεύτερη τ παραλλι υποπηνίων 5.22	οπολογία γλισμού ΥΤ (Σχήμα (β))	Τρίτη το παραλλι υποπην (Σχήμα :	πολογία ηλισμού ίων ΥΤ 5.22 (γ))
	20 kV	15 kV	20 kV	15 kV	20 kV	15 kV
U ^{υπολογισμένη} (%)	4.08	4.25	4.18	3.92	4.21	3.81
U ^{μετρημένη} (%)	3.99	4.1	4.19	3.85	4.24	3.82
απόκλιση(%)	2.26	3.66	0.23	1.81	0.71	0.26

Πίνακας 5.26: Αποτελέσματα τάσης βραχυκύκλωσης μετασχηματιστή 630/88012, για τις τρεις τοπολογίες παραλληλισμού του Σχήματος 5.22 και απόκλιση από τις μετρημένες τιμές.

5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3 και επιβεβαιώθηκε πειραματικά στο Κεφάλαιο 4, σε διάφορες περιπτώσεις τριφασικών μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα. Οι υπολογισμένες τιμές τάσης βραχυκύκλωσης προσέγγισαν τις αντίστοιχες μετρημένες με ικανοποιητική ακρίβεια και η μέση απόκλιση που παρατηρήθηκε ήταν μικρότερη του 3%. Το μοντέλο είναι ιδιαίτερα αποδοτικό, καθώς η υψηλή αυτή ακρίβεια επιτυγγάνεται με γρήση γαμηλής πυκνότητας πλέγματος, απαιτώντας έτσι μικρό γρόνο για την εκτέλεση των υπολογισμών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της υφιστάμενης μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται από τον κατασκευαστή για την πρόβλεψη της τάσης βραχυκύκλωσης και με μετρήσεις σε διάφορες παρτίδες μετασχηματιστών έδειξε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η χρήση του μοντέλου οδηγεί σε αύξηση της ακρίβειας πρόβλεψης. Τέλος, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της ευαισθησίας της τάσης βραχυκύκλωσης σε αλλαγές του τρόπου σύνδεσης των τυλιγμάτων υψηλής τάσης για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος, μέσω της οποίας αποδείχθηκε η δυνατότητα του μοντέλου να προβλέπει την αντίστοιχη μετρημένη διακύμανση. Τα παραπάνω αποτελέσματα γενικεύουν την ισχύ το μοντέλου Π Σ , καθιστώντας το έτσι αξιόπιστο και αποδοτικό εργαλείο υπολογισμού του πεδίου σκέδασης και πρόβλεψης της τάσης βραχυκύκλωσης μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα.

5.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] J. A. Ebert, "Criteria for reliable dual voltage power transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, pp. 845-852, Apr. 1995.
- [5.2] S. H. Digby, H. J. Sim, "Transformer design for dual-voltage applications," 2002 *IEEE Rural Electric Power Conf.*, pp. A1-A1_9, May 2002.

КЕФАЛАІО 6

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική περιγραφή του εργαλείου λογισμικού που αναπτύχθηκε με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης μετασχηματιστή. Το λογισμικό προσαρμόστηκε στα χαρακτηριστικά του τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα και σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μην απαιτεί από το χρήστη ειδικές γνώσεις για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για το σκοπό αυτό, τα αναγκαία δεδομένα εισόδου περιορίζονται στα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη μετασχηματιστή, ενώ επιλέχθηκε περιβάλλον λειτουργίας εύχρηστο και λειτουργικό. Αυτά τα χαρακτηριστικά του λογισμικού, σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα του μοντέλου της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια καθιστούν δυνατή την ενσωμάτωσή του στη βιομηχανική διαδικασία σχεδίασης μετασχηματιστών, οδηγώντας έτσι σε σημαντικά οφέλη μέσω της αύξησης στην ακρίβεια πρόβλεψης των χαρακτηριστικών τους και της μείωσης του βιομηχανικού κύκλου λειτουργίας και του συνολικού κόστους παραγωγής.

6.2 ΑΝΑΓΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ Μ/Σ ΙΣΧΥΟΣ

Η εφαρμογή της ΜΠΣ σε όλο και ευρύτερο φάσμα βιομηγανικών και ερευνητικών προβλημάτων δημιούργησε την ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικών εργαλείων λογισμικού για την υλοποίησή της σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μεγάλο πλήθος εμπορικών πακέτων ΜΠΣ είναι διαθέσιμος στην αγορά με σημαντικές δυνατότητες σε υπολογισμό και μοντελοποίηση. Ωστόσο, η χρήση τους απαιτεί συχνά προηγούμενη γνώση ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και εξοικείωση με περίπλοκες λεπτομέρειες των αριθμητικών μεθόδων. Για να αποφευχθούν αυτά τα μειονεκτήματα, ένα μεγάλο μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας στο χώρο των πεπερασμένων στοιχείων έχει δώσει έμφαση στην ανάπτυξη περιβάλλοντος λειτουργίας φιλικού προς το χρήστη και προγραμμάτων προσανατολισμένων σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Η τεχνική βιβλιογραφία περιλαμβάνει διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες επικεντρώνονται σε ειδικές λειτουργίες της ΜΠΣ όπως την υλοποίηση εργαλείων μετεπεξεργασίας με τη βοήθεια γραφικών υπολογιστή [6.1] ή αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού [6.2]. Η δισδιάστατη και τρισδιάστατη σχεδίαση εργαλείων μετεπεξεργασίας συναντάται στις αναφορές [6.3], [6.4] και [6.5], ενώ στην [6.6], ο αντικειμενοστραφής προγραμματισμός γρησιμοποιείται για την προ-επεξεργασία και επίλυση συζευγμένων προβλημάτων. Η παραμετροποίηση υφιστάμενων εμπορικών πακέτων λογισμικού ΜΠΣ υιοθετείται επίσης ως μέθοδος απλοποίησής τους για μη εξειδικευμένους χρήστες [6.7], [6.8]. Η σχεδίαση μη εμπορικών ολοκληρωμένων πακέτων λογισμικού ΜΠΣ συναντάται λιγότερο συχνά και εμπλέκει κυρίως δισδιάστατη μοντελοποίηση: στην αναφορά [6.9], αναπτύσσεται δισδιάστατο πακέτο ΜΠΣ για την επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων και προβλημάτων με δινορρεύματα, το οποίο απαιτεί αλληλεπίδραση του χρήστη κατά την εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων του προβλήματος και στην αναφορά [6.10] παρουσιάζεται πακέτο ΜΠΣ, κατάλληλο για βιομηχανική χρήση, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης συζευγμένων προβλημάτων.

Η παραγωγή κατάλληλου πλέγματος αποτελεί μία από τις δυσκολότερες διαδικασίες κατά την επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, έχουν γίνει κατά καιρούς και εξακολουθούν να γίνονται πολλές προσπάθειες για να αυτοματοποιηθεί η διαδικασία παραγωγής πλέγματος [6.11–6.16]. Στις αναφορές [6.17, 6.18] προτείνεται η λύση των αυτοβελτιούμενων αλγορίθμων, οι οποίοι αυτοματοποιούν τη διαδικασία πλεγματοποίησης, παράγοντας ταυτόχρονα βέλτιστο πλέγμα, ενώ σε εργασίες όπως οι [6.19, 6.20] διερευνάται η χρήση διαφόρων ειδών πεπερασμένων στοιχείων (ακμικά στοιχεία, στοιχεία δευτέρας και τρίτης τάξης) σε περιπτώσεις ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων.

Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας σχεδίασης μετασχηματιστών απαιτεί ένα γρήγορο, αξιόπιστο και ακριβές εργαλείο λογισμικού για την εφαρμογή της ΜΠΣ. Προγράμματα τα οποία απαιτούν μεγάλο βαθμό απασχόλησης κατά την εφαρμογή και την κατανόησή τους έχουν πολύ μικρές πιθανότητες να υιοθετηθούν από τους μηχανικούς μιας βιομηχανίας κατασκευής μετασχηματιστών. Επιπλέον, η επίτευξη μεγάλης ακρίβειας απαιτεί συνήθως την κατασκευή πυκνών πλεγμάτων, τα οποία οδηγούν αντίστοιχα σε συστήματα εξισώσεων με πολλές χιλιάδες αγνώστους, η επίλυσή των οποίων απαιτεί μεγάλο χρόνο και υψηλές δυνατότητες των χρησιμοποιούμενων υπολογιστικών συστημάτων [6.21]. Η επιλογή κατάλληλου μοντέλου ΜΠΣ, η οποία μπορεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα με τις ελάχιστες δυνατές υπολογιστικές απαιτήσεις, ενσωματωμένη σε περιβάλλον λειτουργίας φιλικό προς το χρήστη, με τις λιγότερες δυνατές απαιτήσεις αλληλεπίδρασης μπορεί να παράσχει τη λύση στα παραπάνω μειονεκτήματα και να επιτρέψει στους μηχανικούς σχεδίασης να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου τρισδιάστατου πακέτου πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης μετασχηματιστή, κατάλληλου για χρήση στη βιομηχανική μονάδα παραγωγής μετασχηματιστών. Το πακέτο περιλαμβάνει αυτοματοποιημένο προ-επεξεργαστή, μαγνητοστατικό επιλύτη και εργαλείο μετεπεξεργασίας. Ο προ-επεξεργαστής βασίζεται στη διαδικασία παραμετροποίησης υπαρχόντων πλεγμάτων που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα, καταργώντας έτσι την ανάγκη δημιουργίας 3Δ μοντέλου και πλεγματοποίησής του. Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων της ΜΠΣ γίνεται με κατάλληλο αλγόριθμο, προκειμένου να αυξηθεί η αποδοτικότητα του επιλύτη. Για την είσοδο των δεδομένων και την έξοδο των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται παραθυρικό γραφικό περιβάλλον. Κατά την ανάπτυξη του πακέτου δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα παρακάτω τρία σημεία:

- Υιοθέτηση του 3Δ μοντέλου ΜΠΣ που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, το οποίο παρέχει υψηλό βαθμό ακρίβειας και χαμηλό υπολογιστικό κόστος,
- Ελαχιστοποίηση της αλληλεπίδρασης του χρήστη μέσω αυτοματοποίησης των λειτουργιών προ και μετεπεξεργασίας,
- 3) Ευκολία στη διαχείριση των δεδομένων εισόδου και εξόδου.

Στη συνέχεια, αναλύονται τα πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης του λογισμικού αυτού στη διαδικασία σχεδίασης της βιομηχανίας παραγωγής μετασχηματιστών τα οποία συνίστανται κατά κύριο λόγο στην αύξηση της ακρίβειας πρόβλεψης της τάσης βραχυκύκλωσης, οδηγώντας έτσι σε αύξηση της αξιοπιστίας και μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής.

6.3 ΔΟΜΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η δομή του προγράμματος απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 6.1. Κατά την ανάπτυξή του, χρησιμοποιήθηκαν δύο γλώσσες προγραμματισμού: η γλώσσα Fortran, για την υλοποίηση των λειτουργιών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (προεπεξεργασία, επίλυση και μετεπεξεργασία) και η γλώσσα Visual Basic για την κατασκευή γραφικού περιβάλλοντος φιλικού προς το χρήστη, για τη διαχείριση των δεδομένων εισόδου και εξόδου. Η Fortran προτιμήθηκε για την εκτέλεση των υπολογισμών της ΜΠΣ, λόγω της μεγαλύτερης ευρωστίας που παρουσιάζει στη διαχείριση μεγάλων πινάκων, οι οποίοι προκύπτουν κατά την επίλυση των συστημάτων εξισώσεων της μεθόδου.

Το τμήμα του κώδικα Fortran μπορεί να χωριστεί σε δύο επιμέρους υποπρογράμματα:

- το υποπρόγραμμα το οποίο εκτελεί τους υπολογισμούς για την παραμετροποίηση του πλέγματος με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη μετασχηματιστή, με βάση τις εξισώσεις που περιγράφονται στο Παράρτημα,
- το υποπρόγραμμα που εκτελεί τους υπολογισμούς της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Ωστόσο, το περιβάλλον λειτουργίας της Fortran δεν παρέχει στο χρήστη ευελιξία κατά την εισαγωγή δεδομένων και την ανάκτηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου, γεγονός που οδήγησε στην επιλογή της Visual Basic για τη δημιουργία της τελικής μορφής του εργαλείου λογισμικού. Για να αποφευχθεί η εξ' ολοκλήρου μετατροπή του κώδικα από τη μία γλώσσα προγραμματισμού στην άλλη, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες εντολές οι οποίες επιτρέπουν στο εκτελέσιμο αρχείο της Visual Basic να καλεί το πρόγραμμα της Fortran ως ανεξάρτητο εκτελέσιμο αρχείο και να παίρνει τα αποτελέσματα μετά την επίλυση των υπολογισμών των δύο υποπρογραμμάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Έτσι, η Visual Basic χρησιμοποιέται μόνο για την εισαγωγή των δεδομένων και την απεικόνιση ή αποθήκευση των αποτελεσμάτων, ενώ όλοι οι υπολογισμοί εκτελούνται από τον αρχικό κώδικα της Fortran.





Η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic (VB) επιλέχθηκε για την υλοποίηση του γραφικού περιβάλλοντος εισόδου/εξόδου του λογισμικού ΜΠΣ, καθώς τα εργαλεία ActiveX που παρέχει διευκολύνουν τη δημιουργία παραθυρικού περιβάλλοντος λειτουργίας, το οποίο ενσωματώνει την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων και ενισχύει τη δυνατότητα του χρήστη να την εντάξει στη διαδικασία σχεδίασης μετασχηματιστών.

Στο Παράρτημα δίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου υλοποίησης των λειτουργιών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων από τον κώδικα Fortran καθώς και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η αλληλεπίδρασή του με τον κώδικα Visual Basic για τη διαμόρφωση του εργαλείου λογισμικού.

Κατά τη σχεδίαση του γραφικού περιβάλλοντος, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην ευκολία διαχείρισης των δεδομένων εισόδου/εξόδου και τη δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων από υπάρχοντα αρχεία της βάσης δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, ο μηχανικός σχεδίασης είναι σε θέση να χρησιμοποιήσει το λογισμικό χωρίς να ασχοληθεί με λεπτομέρειες της λειτουργίας του (κατασκευή μοντέλου, επίλυση εξισώσεων, μετεπεξεργασία) και με την ελάχιστη δυνατή προσπάθεια. Ένα τέτοιο περιβάλλον χρήσης είναι κατάλληλο ιδιαίτερα για τους μηχανικούς της παραγωγικής μονάδας, όπου η διαδικασία σχεδίασης απαιτεί μεγάλη ταχύτητα, ακρίβεια και αποδοτικότητα. Επιπλέον, δεν απαιτεί προηγούμενη εμπειρία ή γνώση ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, η έλλειψη της οποίας εμποδίζει τη βέλτιστη αξιοποίηση των αποτελεσμάτων τα οποία παρέχονται από τα υφιστάμενα εμπορικά πακέτα ΜΠΣ.

Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται η κύρια φόρμα του προγράμματος ΜΠΣ για τη διαχείριση των δεδομένων εισόδου και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων εξόδου. Γραφικά στοιχεία όπως τα κουμπιά εντολών και λίστες μενού δίνουν τον πλήρη έλεγχο στη διαχείριση των δεδομένων (άνοιγμα υπαρχόντων αρχείων δεδομένων, δημιουργία νέων αρχείων, τροποποίηση υπαρχόντων δεδομένων και αποθήκευση).

Τα δεδομένα εισόδου ομαδοποιούνται σε τρεις φόρμες, η εμφάνιση των οποίων μπορεί να γίνει μέσω αντίστοιχων κουμπιών ή μενού:

- Η πρώτη φόρμα αναφέρεται στα γενικά δεδομένα του μετασχηματιστή (διαστάσεις πυρήνα, ονομαστική ισχύς, συχνότητα και ωμική πτώση τάσης). Σε αυτή τη φόρμα, ο χρήστης πρέπει επιπλέον να προσδιορίσει την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς της ΜΠΣ,
- 2) Η δεύτερη φόρμα περιλαμβάνει τα στοιχεία του πηνίου χαμηλής τάσης, τα οποία περιλαμβάνουν την ονομαστική τάση, τη συνδεσμολογία, το πάχος, τον αριθμό καναλιών, το πάχος των μπαρών, το ύψος του πηνίου και τον αριθμό των σπειρών,
- 3) Στην τρίτη φόρμα προσδιορίζονται τα δεδομένα του πηνίου υψηλής τάσης: ονομαστική τάση, συνδεσμολογία, διαστάσεις αγωγών, διαστάσεις μόνωσης, ύψος πηνίου, αριθμός στρώσεων και καναλιών. Εκτός από τα δεδομένα αυτά, πρέπει να δοθούν πληροφορίες αναγκαίες για τον τρόπο παραγωγής του δευτέρου επιπέδου τάσης (εάν υπάρχει). Οι πληροφορίες αυτές αφορούν στην τοπολογία των τμημάτων του πηνίου τα οποία συνδέονται παράλληλα για να προκύψει το δεύτερο επίπεδο τάσης.

Οι φόρμες των δεδομένων εισόδου οργανώνονται με τρόπο ο οποίος ελαχιστοποιεί τον απαιτούμενο αριθμό δεδομένων εισόδου: πρέπει να δοθούν οι λιγότερες δυνατές παράμετροι και το πρόγραμμα αναλαμβάνει τον υπολογισμό των υπολοίπων στοιχείων που εμφανίζονται στα φύλλα μελέτης των μετασχηματιστών. Το Σχήμα 6.3 απεικονίζει ένα τυπικό φύλλο μελέτης πηνίου υψηλής τάσης ενός μετασχηματιστή δύο επιπέδων τάσης, το οποίο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για την κατασκευή του. Σε αυτό το φύλλο εμφανίζεται ένας μεγάλος αριθμός παραμέτρων, οι οποίες επηρεάζουν την κατασκευή του μοντέλου ΠΣ. Ο χρήστης πρέπει να προσδιορίσει μόνο το συνολικό αριθμό καναλιών, το συνολικό πάχος μόνωσης, τη διάσταση του αγωγού και τη στρώση του πηνίου από την οποία ξεκινά ο παραλληλισμός. Η διαίρεση σε υποπηνία και η διαμόρφωση των τμημάτων των πηνίων τα οποία συνδέονται παράλληλα υπολογίζονται από το πρόγραμμα, έτσι ώστε ο σχεδιαστής να μη γρειαστεί να εμπλακεί σε περίπλοκη διαδικασία εισόδου δεδομένων.



Σχήμα 6.2: Κύρια οθόνη λογισμικού ΜΠΣ.



Σχήμα 6.3: Τυπικό φύλλο μελέτης πηνίου ΥΤ μετασχηματιστή δύο επιπέδων τάσης.

6. 4 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΠΣ

Η αποδοτικότητα του λογισμικού που αναπτύχθηκε συνίσταται στα δύο βασικά πλεονεκτήματά του: το χαμηλό υπολογιστικό κόστος που απαιτείται για την επίτευξη αποτελεσμάτων υψηλής ακρίβειας και τη σημαντική μείωση της αλληλεπίδρασης του χρήστη σε σύγκριση με τα εμπορικά πακέτα ΜΠΣ.

Δεδομένου ότι η ακρίβεια που παρέχεται από το αραιό πλέγμα είναι ισοδύναμη με αυτή ενός πλέγματος αρκετών χιλιάδων κόμβων, το πλέγμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί συστηματικά για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης. Ο Πίνακας 4.16 του Κεφαλαίου 4 παρέχει σύγκριση των χρόνων επίλυσης που απαιτούνται για διάφορες πυκνότητες πλέγματος στην περίπτωση υπολογιστικού συστήματος μέσης και υψηλής απόδοσης. Η χρήση μικρής πυκνότητας πλέγματος μειώνει το χρόνο επίλυσης σε μερικά λεπτά, επιτρέποντας έτσι τη χρήση της μεθόδου στα πλαίσια της αυτοματοποιημένης διαδικασίας σχεδίασης.

Πέρα από τη σημαντική μείωση του χρόνου επίλυσης του συστήματος εξισώσεων ΜΠΣ, η αυτοματοποίηση των λειτουργιών προ- και μετεπεξεργασίας που επιτυγχάνεται από το λογισμικό που αναπτύχθηκε συμβάλει στην αύξηση της συνολικής απόδοσης του λογισμικού. Ο Πίνακας 6.1 καταγράφει τις βασικές λειτουργίες προ- και μετεπεξεργασίας που απαιτούν αλληλεπίδραση από το χρήστη κατά τη χρήση εμπορικών πακέτων ΜΠΣ για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης. Σε κάθε λειτουργία ανατίθεται κάποιο ποσοστό αλληλεπίδραση του χρήστη, όπως αυτό εκτιμάται για χρήστες μέσης εμπειρίας στις τεχνικές ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1, ο υπολογισμός των διαστάσεων του μοντέλου του μετασχηματιστή και η λειτουργία πλεγματοποίησης αντικαθιστώνται από την εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων και την επιλογή πυκνότητας πλέγματος. Η κατασκευή του μοντέλου και η μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων του μαγνητικού πεδίου είναι πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες και δε χρειάζονται καμία παρέμβαση από το χρήστη. Έτσι, επιτυγχάνεται συνολική μείωση της αλληλεπίδρασης χρήστη κατά 85%, αυξάνοντας την ευκολία ενσωμάτωσης του λογισμικού σε αυτοματοποιημένο περιβάλλον σχεδίασης. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.1 απεικονίζονται στο ιστόγραμμα του Σχήματος 6.4, όπου σχεδιάζονται τα απαιτούμενα ποσοστά της αλληλεπίδρασης με το χρήστη για κάθε λειτουργία προ- και μετεπεξεργασίας για την περίπτωση εμπορικών πακέτων ΜΠΣ και του λογισμικού ΜΠΣ που αναπτύχθηκε.

	Λειτουργία	Εμπορικά πακέτα ΜΙ	ΙΣ	Λογισμικό ΜΠΣ που αναπτύχθηκε	
επεξεργασία	a	Υπολογισμός διαστάσεων μοντέλου σύφωνα με τα γεωμετρικά δεδομένα του εξεταζόμενου μετασχηματιστή	20%	Εισαγωγή δεδομένων μετασχηματιστή	10%
3-0C	b	Κατασκευή μοντέλου	45%	-	
Π	с	Πλεγματοποίηση	15%	Επιλογή πυκνότητας πλέγματος	5%
ργασία	d	Υπολογισμός ΙΧ και Uk σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεθόδου	5%	-	
Μετ-επεξε	e	Προσδιορισμός επιφανειών για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μαγνητικού πεδίου	15%	-	
		Συνολική Αλληλεπίδραση Χρήστη	100%	Συνολική Αλληλεπίδραση Χρήστη	15%

Πίνακας 6.1: Λειτουργίες Προ- και Μετ-Επεξεργασίας που αυτοματοποιούνται από το λογισμικό ΜΠΣ που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 6.4: Εκτιμώμενο ποσοστό αλληλεπίδρασης χρήστη που απαιτείται για την εκτέλεση των λειτουργιών προ- και μετ-επεξεργασίας σε εμπορικά πακέτα ΜΠΣ και στο λογισμικό που αναπτύχθηκε (οι λειτουργίες a, b, c, d και e ορίζονται στον Πίνακα 6.1).

6.5 ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΣΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Το λογισμικό ΜΠΣ το οποίο αναπτύχθηκε ενσωματώθηκε στη διαδικασία σχεδίασης της παραγωγικής μονάδας μετασχηματιστών. Ειδικότερα, συνδέθηκε με το υπάρχον λογισμικό σχεδίασης μετασχηματιστών της βιομηχανικής μονάδας, ως εργαλείο πρόβλεψης της τάσης βραχυκύκλωσης. Στη συνέχεια δίνεται μια γενική περιγραφή του βιομηχανικού κύκλου λειτουργίας της παραγωγικής μονάδας, υποδεικνύοντας το τμήμα του στο οποίο παρεμβαίνει το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος μετασχηματιστή (αυτεπαγωγή σκέδασης, επαγωγική πτώση τυλιγμάτων). Αναλύονται επίσης διεξοδικά τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής της μεθόδου, τα οποία συνίστανται κυρίως στην επίτευξη υψηλής ακρίβειας πρόβλεψης των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, τη μείωση του βιομηχανικού κύκλου λειτουργίας και του συνολικού κόστους παραγωγής.

6.5.1 Περιγραφή του βιομηχανικού κύκλου

Ο βιομηχανικός κύκλος λειτουργίας της παραγωγικής μονάδας των μετασχηματιστών ισχύος περιλαμβάνει κυρίως τις φάσεις μελέτης, σχεδίασης και κατασκευής, [6.22]:

Η μελέτη του μετασχηματιστή πραγματοποιείται, με βάση τα δεδομένα που περιλαμβάνονται στην προδιαγραφή του πελάτη (ονομαστική ισχύς, ονομαστική τάση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τάση βραχυκύκλωσης, απώλειες, απαιτούμενα εξαρτήματα). Στη συνέχεια, κατασκευάζονται τα φύλλα μελέτης του μετασχηματιστή με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος υπολογιστή. Τα φύλλα αυτά αποστέλλονται στο τμήμα Βιομηχανικής Σχεδίασης, το οποίο σχεδιάζει τα φύλλα κατασκευής του μετασχηματιστή (με τη χρήση περιβάλλοντος AUTOCAD) και της λίστας υλικών. Τα φύλλα μελέτης, κατασκευής και η λίστα υλικών στέλνονται κατόπιν α) στο Τμήμα Αγορών για τη διαχείριση των απαιτούμενων για την κατασκευή υλικών, και β) στο Τμήμα Παραγωγής Μετασχηματιστών έτσι ώστε να προχωρήσει η κατασκευή μετασχηματιστών. Μετά την ολοκλήρωση της παραγωγής, το Τμήμα Ποιοτικού Ελέγχου υποβάλλει τους μετασχηματιστές σε διάφορες δοκιμές και, μετά την επιβεβαίωση ότι πληρούν τις προδιαγραφές, παραδίδονται στον πελάτη.

6.5.2 Διαδικασία σχεδίασης μετασχηματιστών

6.5.2.1 Τεχνικές προδιαγραφές

Κατά τη φάση σχεδίασης μετασχηματιστών, ο μηχανικός σχεδίασης πρέπει να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του πελάτη για ένα συγκεκριμένο τύπο μετασχηματιστή, παράγοντας σχεδίαση η οποία πληροί τις απαιτήσεις του πελάτη και τις διεθνείς τεχνικές προδιαγραφές. Οι προδιαγραφές που σχετίζονται με την κατασκευή μετασχηματιστών φαίνονται στον Πίνακα 6.2. Οι προδιαγραφές αυτές σχετίζονται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τα εξαρτήματα μετασχηματιστών. Η προδιαγραφή IEC 60076 (1–2–3–5) περιγράφει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τις δοκιμές που σχετίζονται με δυναμική, θερμική και ηλεκτρική καταπόνηση των μετασχηματιστών. Η προδιαγραφή DIN προσδιορίζει τις απώλειες και τα εξαρτήματα των μετασχηματιστών, ενώ η προδιαγραφή CENELEC συνδυάζει δεδομένα διαφόρων προδιαγραφών.

Ο Πίνακας 6.3 παρουσιάζει τις ανοχές κατά IEC 60076-1 που εφαρμόζονται σε διάφορα ονομαστικά μεγέθη όταν υπόκεινται σε εγγυήσεις του κατασκευαστή.

6.5.2.2 Πρόγραμμα μελέτης μετασχηματιστή

Για την πραγματοποίηση της φάσης σχεδίασης των μετασχηματιστών, η παραγωγική μονάδα έχει αναπτύξει πρόγραμμα υπολογιστή, το οποίο χρησιμοποιεί αλγόριθμο εύρεσης βέλτιστης λύσης, [6.23]. Ο μηχανικός σχεδίασης εισάγει τα δεδομένα στο λογισμικό, το οποίο υπολογίζει εάν μπορούν να προκύψουν αποδεκτές λύσεις από τα προδιαγραφόμενα δεδομένα.

A/A	Προδιαγραφή	Περιγραφή
1	IEC 60076 - 1	Μ/Σ ισχύος - γενικά
2	IEC 60076 - 2	Μ/Σ ισχύος – Μέρος 2: Ανύψωση θερμοκρασίας
3	IEC 60076 - 3	Μ/Σ ισχύος – Μέρος 3: Επίπεδα μόνωσης – διηλεκτρικές δοκιμές
4	IEC 60076 - 4	Μ/Σ ισχύος – Μέρος 4: Λήψεις - συνδεσμολογίες
5	IEC 60076 - 5	Μ/Σ ισχύος – Μέρος 5: Δυνατότητα αντοχής στο βραχυκύκλωμα
6	IEC 60137: 2003	Διαπεραστήρες για εναλλασσόμενες τάσεις πάνω από 1000 V
7	IEC 60354: 1991	Οδηγός φόρτισης Μ/Σ λαδιού
8	IEC 60076 – 11	Μ/Σ ισχύος ξηρού τύπου
9	IEC 60905: 1987	Οδηγός φόρτισης Μ/Σ ξηρού τύπου

Πίνακας 6.2: Προδιαγραφές μετασχηματιστών κατά ΙΕС.

Κατά την ανάπτυξη του προγράμματος μελέτης, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν επτά ομάδες μεταβλητών για τη σχεδίασης τριφασικών μετασχηματιστών διανομής:

- Περιγραφικές μεταβλητές (π.χ., ονομαστική ισχύς, ονομαστική τάση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος, συχνότητα, υλικό πηνίου ΥΤ και ΧΤ, συνδεσμολογία ΥΤ και ΧΤ, ...)
- Μεταβλητές δύσκολα μεταβαλλόμενες (π.χ., επίπεδα μόνωσης XT και YT, core space factor, turns direction space factor, συντελεστής βραχυκύκλωσης, ...)
- Μεταβλητές με προκαθορισμένες τιμές (π.χ., λήψεις ΧΤ και ΥΤ, εγγυημένες τιμές και ανοχές για απώλειες φορτίου, απώλειες πυρήνα και τάση βραχυκύκλωσης, ...)
- Μεταβλητές κόστους (π.χ., κόστος ανά μονάδα βάρους για αγωγό XT και YT, μαγνητική λαμαρίνα, λάδι, μονωτικό χαρτί, πανέλα, ...)
- Προαιρετικές μεταβλητές (π.χ., μεταβλητές που μπορούν είτε να υπολογιστούν από το πρόγραμμα ή να προσδιοριστούν από το χρήστη)
- Διάφορες μεταβλητές (π.χ., είδος αγωγού XT και YT, αριθμός καναλιών ψύξης XT και YT, μέγιστο διαφορικό θερμοκρασίας λαδιού και αγωγών XT και YT, μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, μέγιστη θερμοκρασία τυλιγμάτων, ...)
- Μεταβλητές για τον υπολογισμό της διατομής αγωγών (οι διατομές των αγωγών XT και YT μπορούν να προσδιοριστούν είτε από το χρήστη ή να υπολογιστούν με τη χρήση της πυκνότητας ρεύματος ή τη θερμική δοκιμή βραχυκύκλωσης)

Μεταβλητές επαναληπτικών δοκιμών (π.χ., σπείρες ΧΤ, διαστάσεις πυρήνα, μαγνητική επαγωγή, διατομή ΧΤ και ΥΤ)

Με τη χρήση αυτού του προγράμματος, και δίνοντας αρκετές εναλλακτικές τιμές στις μεταβλητές επαναληπτικών δοκιμών, προκύπτουν αρκετές υποψήφιες λύσεις. Για κάθε μία από τις υποψήφιες λύσεις, ελέγχεται εάν πληρούνται οι προδιαγραφές (όρια) και, εφόσον πληρούνται, εκτιμάται το κόστος και η λύση χαρακτηρίζεται ως αποδεκτή. Από την άλλη πλευρά, οι υποψήφιες λύσεις που παραβιάζουν τις προδιαγραφές χαρακτηρίζονται ως μη αποδεκτές λύσεις. Τελικά, μεταξύ των αποδεκτών λύσεων, επιλέγεται ο μετασχηματιστής με το ελάχιστο κόστος, ο οποίος είναι ο τεχνικά και οικονομικά βέλτιστος μετασχηματιστής.

Δίνοντας n_{LV} διαφορετικές τιμές για τις σπείρες του τυλίγματος χαμηλής τάσης, n_D τιμές για τη διάσταση D του πυρήνα (πλάτος σκέλους πυρήνα), n_{FD} δοκιμές για την πυκνότητα μαγνητικής ροής, n_G διαφορετικές τιμές για τη διάσταση G του πυρήνα (ύψος παραθύρου πυρήνα), cs_{LV} διαφορετικές τιμές για τον υπολογισμό της διατομής του πηνίου χαμηλής τάσης και cs_{HV} διαφορετικές τιμές για τον υπολογισμό της διατομής του πηνίου υψηλής τάσης, το σύνολο των υποψήφιων λύσεων (επαναλήψεων για το πρόγραμμα), n_{loops}, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_{\text{loops}} = n_{\text{LV}} * n_{\text{D}} * n_{\text{FD}} * n_{\text{G}} * cs_{\text{LV}} * cs_{\text{HV}}$$
(6.1)

Ο αλγόριθμος επίλυσης του τεχνικά και οικονομικά βέλτιστου μετασχηματιστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5.

6.5.2.3 Σύνδεση της ΜΠΣ με το πρόγραμμα μελέτης μετασχηματιστή

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό ΜΠΣ που αναπτύχθηκε με βάση το μοντέλο αυτό ενσωματώθηκαν στη διαδικασία σχεδίασης μέσω σύνδεσης με το υφιστάμενο πρόγραμμα σχεδίασης. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης των υποψήφιων λύσεων, έτσι ώστε να διαπιστωθεί εάν η τρέχουσα λύση ικανοποιεί τις τεχνικές προδιαγραφές. Έτσι, ο τρόπος υπολογισμού της τάσης βραχυκύκλωσης είναι σύνθετος (με τη χρήση τόσο των αναλυτικών σχέσεων της υφιστάμενης μεθοδολογίας σχεδίασης όσο και της προτεινόμενης μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων), επωφελούμενος από την υψηλή ακρίβεια που παρέχει ο υπολογισμός με τη βοήθεια της ΜΠΣ.

Η ενσωμάτωση του λογισμικού των πεπερασμένων στοιχείων περιγράφεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 6.6. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του λογισμικού σχεδίασης και του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων απεικονίζεται στο Σχήμα 6.7.

Στο Σχήμα 6.8 απεικονίζεται το σημείο ενσωμάτωσης του λογισμικού ΜΠΣ στο συνολικό βιομηχανικό κύκλο λειτουργίας της παραγωγικής μονάδας μετασχηματιστών, τα επιμέρους τμήματα του οποίου περιγράφηκαν στην Παράγραφο 6.5.1.

ΜΕΓΕΘΟΣ	ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
α) Απόλειες α ₁) Συνολικές απώλειες (Fe+Cu) α ₂) Απώλειες Fe (απώλειες Cu)	 +10% των εγγυημένων συνολικών απωλειών (Fe+Cu) +15% των απωλειών Fe (απωλειών Cu) με την ποοϋπόθεση 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)	
γ1) 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%
γ2) 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 6.3: Ανοχές σύμφωνα με το IEC 60076 – 1.



Σχήμα 6.5: Αλγόριθμος προγράμματος μελέτης μετασχηματιστή, [6.24].



Σχήμα 6.6: Ενσωμάτωση του μοντέλου ΜΠΣ στο υφιστάμενο πρόγραμμα σχεδίασης μετασχηματιστών, [6.25].

6.6 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΜΠΣ ΣΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Τα πλεονεκτήματα από την ενσωμάτωση του μοντέλου ΜΠΣ στην υφιστάμενη διαδικασία σχεδίασης επηρεάζουν πολλά στάδια του βιομηχανικού κύκλου λειτουργίας και συνοψίζονται στα ακόλουθα:

 Αύξηση στην ακρίβεια υπολογισμού του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης, ειδικά σε περιπτώσεις μετασχηματιστών που δεν υπάγονται σε τυποποιημένες κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού του πεδίου σκέδασης (οι οποίες βασίζονται σε διορθωτικούς συντελεστές και απλοποιήσεις της πραγματικής γεωμετρίας) παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές του πεδίου, καθώς αφορούν σε συγκεκριμένες γεωμετρίες. Αντίθετα, η τρισδιάστατη ΜΠΣ επιτρέπει τη λεπτομερή αναπαράσταση της γεωμετρίας του μετασχηματιστή, η οποία επιδρά σημαντικά στην επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

- 2. Μείωση του βιομηχανικού κύκλου των μετασχηματιστών, καθώς η ακριβής πρόβλεψη των λειτουργικών τους χαρακτηριστικών καταργεί την ανάγκη κατασκευής πρωτοτύπου το οποίο χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώσει την ακρίβεια της σχεδίασης. Έτσι, μειώνεται σημαντικά ο συνολικός χρόνος παράδοσης, καθώς η κατασκευή μιας παρτίδας μετασχηματιστών μπορεί να προχωρήσει μόνο μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής και ποιοτικού ελέγχου του πρωτοτύπου. Επιπλέον, στην περίπτωση αστοχίας του πρωτοτύπου κατά τη διάρκεια των δοκιμών των μετασχηματιστών, η φάση σχεδίασης πρέπει να επαναληφθεί και ο βιομηχανικός κύκλος παρατείνεται σημαντικά. Επιπλέον, καταργείται η ανάγκη πραγματοποίησης δοκιμών βραχυκύκλωσης υπό ονομαστική τάση, οι οποίες είναι επίπονες και πολυέξοδες.
- 3. Μείωση του κόστους κατασκευής των μετασχηματιστών, ξεπερνώντας την ανάγκη υπερδιαστασιολόγησης των μετασχηματιστών προκειμένου να βρίσκονται εντός των προδιαγραφόμενων ορίων. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στη μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης της τάσης βραχυκύκλωσης, η οποία μειώνει τα περιθώρια σχεδίασης των μετασχηματιστών. Η δυνατότητα αυτή παρέχει σημαντική εξοικονόμηση του υλικού του πλαισίου των μετασχηματιστών, οι διαστάσεις του οποίου υπολογίζονται σύμφωνα με την προβλεπόμενη τάση βραχυκύκλωσης. Επιπλέον, η μείωση του περιθωρίου σχεδίασης επηρεάζει την τεχνο-οικονομική βελτιστοποίηση των μετασχηματιστών, η οποία συνίσταται στην εύρεση της σχεδίασης με λειτουργικά χαρακτηριστικά κοντά στα προδιαγεγραμμένα με το μικρότερο δυνατό κόστος,
- 4. Βελτίωση της μεθοδολογίας σχεδίασης, παρέχοντας κατάλληλα εργαλείο ανάλυσης και βελτιστοποίησης. Με το εργαλείο αυτό, ο σχεδιαστής δεν αναγκάζεται πλέον να στηρίζεται σε εμπειρικούς κανόνες ή στη διαίσθησή του, αποφεύγοντας έτσι πιθανές ανεπάρκειες στη σχεδίαση που οδηγούν σε ποινικές ρήτρες για το βάρος του εξοπλισμού, την απόδοση και άλλα λειτουργικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 6.7: Αλληλεπίδραση μεταξύ προγράμματος σχεδίασης μετασχηματιστή και μοντέλου ΜΠΣ, [6.25].



Σχήμα 6.8: Ενσωμάτωση του λογισμικού που αναπτύχθηκε στο βιομηχανικό κύκλο κατασκευής μετασχηματιστών.

6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η ανάπτυξη ενός αποδοτικού, ολοκληρωμένου εργαλείου λογισμικού ΜΠΣ για την εφαρμογή της μεθόδου σε τριφασικούς μετασχηματιστές τύπου τυλιχτού πυρήνα. Σε αυτό το πακέτο, ένας αυτοματοποιημένος προ-επεξεργαστής, ένας μαγνητοστατικός επιλύτης και ένας μετεπεξεργαστής, υλοποιημένοι σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran, συνδυάζονται με γραφικό περιβάλλον ανεπτυγμένο σε Visual Basic το οποίο ενισχύει και απλοποιεί την εφαρμογή της ΜΠΣ από χρήστες που δεν είναι προχωρημένοι γνώστες των λεπτομερειών της πεδιακής ανάλυσης. Επιπλέον, η επίτευξη μεγάλης ακρίβειας με χαμηλό υπολογιστικό κόστος, η οποία προσφέρεται από το 3Δ μοντέλο ΜΠΣ που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 καθιστούν το εργαλείο κατάλληλο για χρήση από τους μηχανικούς σχεδίασης μετασχηματιστών. Το λογισμικό ενσωματώθηκε στη διαδικασία σχεδίασης της βιομηχανικής μονάδας παραγωγής μετασχηματιστών, συμβάλλοντας στην αύξηση της ακρίβειας πρόβλεψης της τάσης βραχυκύκλωσης και παρέχοντας σημαντικά οικονομικά οφέλη στον κατασκευαστή μέσω της μείωσης του βιομηχανικού κύκλου λειτουργίας και του κόστους παραγωγής.

6.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] K. Preis, I. Bardi, O. Biro, R. Hoschek, M. Mayr, U. Peterlini, K. R. Richter, "Computer Animation of Electromagnetic Phenomena," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 31, No 3, pp. 1714-1717, May 1995.
- [6.2] H. De Gersem, U. Pahner, K. Hameyer, "Object-Oriented Implementation of an Interactive and Automatic Field-Processing Surface," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 36, No 4, pp. 1653-1658, Jul. 2000.
- [6.3] F. Schmoellebeck, H. Haas, "3-Dimensional, adaptive FE-preprocessing using a programmable CAD system," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 24, No 1, pp. 370-373, Jan. 1988.
- [6.4] N. Bamps, H. Hedia, A. Genon, W. Legros, A. Nicolet, M. Ume, "Graphical Language Interpreter and Meshing Tool for Electromagnetic Computations," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No 2, pp. 1771-1773, Mar. 1992.
- [6.5] F. G. Uler, O. A. Mohammed, "A 3-D Finite Element Mesh Generator for Complex Volumes," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, No 5, pp. 3539-3542, Sept. 1994.
- [6.6] W. Mai, G. Henneberger, "Object-Oriented Design of Finite Element Calculations with Respect to Coupled Problems," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 36, No 4, pp. 1677-1681, Jul. 2000.
- [6.7] C. F. Parker, J. K. Sykulski, S. C. Taylor, "Parametric Environment for EM Computer Aided Design," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 32, No 3, pp. 1433-1436, May 1996.
- [6.8] C. S. Biddlecombe, J. K. Sykulski, S. C. Taylor, "Design Environment Modules for Non-Specialist Users of EM Software," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, No 5, pp. 3625-3628, Sept. 1994.
- [6.9] N. Ida, "PCNDT An Electromagnetic Finite Element Package for Personal Computers,", IEEE Trans. Magn., Vol. 24, No 1, pp. 366-369, Jan. 1988.
- [6.10] T. W. Nehl, A. M. Pawlak, N. Mikhaeil Boules, "ANTIC85: A General Purpose Finite Element Package for Computer Aided Design and Analysis of Electromagnetic Devices," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 24, No 1, pp. 358-361, Jan. 1988.
- [6.11] J. C. Cavendish, D. A. Field, W. H. Frey, "An approach to automatic threedimensional finite element mesh generation," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 21, pp. 329-347, 1985.
- [6.12] L. P. George, F. Hecht, E. Saltel, "Automatic mesh generator with specified boundary," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp. 269-288, 1991.
- [6.13] B. A. Lewis, J. S. Robinson, "Triangulation of planar regions with applications," *Computer J.*, Vol. 21, o 4, pp.324-332, 1980.
- [6.14] S. H. Lo, "Delaunay triangulation of non-convex planar domains," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 28, pp. 2695-2707, 1989.
- [6.15] R. Perucchio, M. Saxena, A. Kela, "Automatic mesh generation from solid models based on recursive spatial decompositions," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 28, pp. 2469-2501, 1989.
- [6.16] J. Z. Cendes, N. D. Shenton, "Three-dimensional finite element mesh generation using Delaunay tesselation," IEEE Trans. Magn., Vol. 21, No 6, pp. 2535-2538, 1985.
- [6.17] N.A. Golias, T.D. Tsiboukis, "Adaptive refinement strategies in three dimensions," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 29, No 2, pp. 1886 – 1889, Mar. 1993.

- [6.18] N.A. Golias, T.D. Tsiboukis, "Three-dimensional automatic adaptive mesh generation," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No 2, pp. 1700-1703, Mar. 1992.
- [6.19] N.A. Golias, T.D. Tsiboukis, "Magnetostatics with edge elements: a numerical investigation in the choice of the tree," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, No 5, pp. 2877-2880, Sep. 1994.
- [6.20] T.V. Youltsis, T.D. Tsiboukis, "Development and implementation of second and third order vector finite elements in various 3-D electromagnetic field problems," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 33, No 2, pp. 1812 – 1815, Mar. 1997.
- [6.21] S.A. Holland, L. Haydock, G. P. O'Connell, "Power transformer design with finite elements-a company experience," *International Conference on Computation in Electromagnetics*, pp. 315–318, Nov. 1991.
- [6.22] P. S. Georgilakis, N. D. Hatziargyriou, S. S. Elefsiniotis, D. G. Paparigas, J. A. Bakopoulos, "Creation of an efficient computer-based environment for the reduction of transformer industrial cycle," Proc. IEE MEDPOWER '98, Nicosia, Cyprus, Nov. 1998.
- [6.23] Σ. Αρτεμάκη, Π. Γεωργιλάκης, Α. Σουφλάρης, Δ. Παπαρήγας, Εγχειρίδιο Μελέτης Τριφασικού Μετασχηματιστή Διανομής Τύπου Τυλιχτού Πυρήνα, Σνεντερ Ελεκτρικ ΑΕ, Οινοφυτα, Σεπτέμβριος 2000.
- [6.24] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris and D. G. Paparigas, "Wound Core Power Transformer Design: Classical Methodology and Advanced Magnetic Field Analysis Techniques," *Proc. ARWTR'2004*, Vigo, Spain, October 2004.
- [6.25] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris and D. G. Paparigas, "Incorporation of Advanced Numerical Field Analysis Techniques in the Industrial Transformer Design Process," *Proc. IEE MEDOWER'2004*, Lemesos, Cyprus, November 2004.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΣΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΚΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ-ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η επίδραση της γεωμετρίας μαγνητικής θωράκισης στο πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης μετασχηματιστών ισχύος. Ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου γίνεται με τη χρήση του μοντέλου πεπερασμένων – οριακών στοιχείων που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, καθώς αυτό διευκολύνει την παραμετρική διερεύνηση των επιπτώσεων της μαγνητικής θωράκισης μέσω της επιβολής κατάλληλων οριακών συνθηκών. Επιπλέον, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρικής διαμόρφωσης της θωράκισης, με στόχο την επίτευξη μιας επιθυμητής μεταβολής στην τάση βραχυκύκλωσης και τις απώλειες της θωράκισης, σε συνδυασμό με το μοντέλο ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή.

7.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

Η χρήση αριθμητικών τεχνικών ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου, σε συνδυασμό με αλγόριθμους βελτιστοποίησης για τη βέλτιστη σχεδίαση μηχανών και μετασχηματιστών συναντάται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνική βιβλιογραφία. Για το σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο η αμιγής μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων [7.1], [7.2] όσο και η μέθοδος των οριακών στοιχείων [7.3].

Σε περιπτώσεις όπου η διαφορά μεταξύ της πραγματικής (μετρημένης) και προδιαγεγραμμένης τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης δεν πληροί τις εγγυημένες προδιαγραφές και τους κανονισμούς που επιβάλλονται από τα διεθνή πρότυπα [7.4], πρέπει να γίνουν τροποποιήσεις της σχεδίασης έτσι ώστε να ικανοποιηθούν οι προδιαγραφές. Η μείωση της τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης μπορεί να επιτευχθεί μέσω προσθήκης ηλεκτρικής θωράκισης, η οποία εξασθενεί το πεδίο σκέδασης των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή. Αντίθετα, η προσθήκη μαγνητικής θωράκισης αυξάνει το πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή, αντίστοιχα. Η ηλεκτρική θωράκιση υλοποιείται με την προσθήκη φύλλων χαλκού στις εξωτερικές επιφάνειες του πυρήνα, πάνω από τα πηνία ή στο διάκενο μεταξύ πυρήνα και πηνίων. Η μαγνητική θωράκιση υλοποιείται με τοποθέτηση φύλλων σιδήρου (συνήθως φερρίτη) κατά μήκος των εσωτερικών τοιχωμάτων του κελύφους του μετασχηματιστή. Στην αναφορά [7.5] πραγματοποιείται η γεωμετρία τους με τη χρήση της 3Δ μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφηκε η ανάπτυξη ενός μεικτού μοντέλου πεπερασμένωνοριακών στοιχείων για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου των μετασχηματιστών ισχύος. Στο Κεφάλαιο αυτό η μέθοδος εφαρμόζεται στη βελτιστοποίηση του σχήματος και της
γεωμετρίας της μαγνητικής θωράκισης αυτών των μετασχηματιστών. Η μέθοδος αυτή συνδυάζεται ευκολότερα (σε σχέση με την αμιγή μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, που χρησιμοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια) με αλγόριθμους βελτιστοποίησης, καθώς μειώνει το συνολικό χρόνο υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου που απαιτείται σε κάθε αναγωγή των μεθόδων αυτών. Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας συνδυάζεται με ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος στη θωράκιση, οδηγώντας έτσι σε μείωση του συνολικού κόστους της μαγνητικής θωράκισης, [7.8].

7.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΙΚΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ - ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μεικτή μέθοδος είναι κατάλληλη για την εκτίμηση των παραμέτρων του μετασχηματιστή και το εξεταζόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης, καθώς επιτρέπει ευκολότερη αναπαράσταση της μετακίνησης της θωράκισης κατά μήκος των τοιχωμάτων του κελύφους του M/Σ , μέσω της μεθόδου των οριακών στοιχείων. Επιπλέον, η επιλογή του πλέγματος για το ενεργό μέρος είναι εντελώς ανεξάρτητη από αυτή της θωράκισης (εξωτερικού συνόρου), ενώ στην περίπτωση των αμιγώς πεπερασμένων στοιχείων είναι αναγκαία μία βαθμιαία αλλαγή του μεγέθους του πλέγματος (που αναπαριστά την περιοχή του αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους) σε κάθε μετακίνηση του συνόρου του μετασχηματιστή.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του μεικτού μοντέλου συνίσταται στον τρόπο αναπαράστασης της μαγνητικής θωράκισης, μέσω μεταβολής της οριακής συνθήκης στο σύνορο στο οποίο θεωρείται ότι αυτή τοποθετείται: Η μελέτη προβλημάτων θωράκισης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί ικανοποιητικά μεγάλη διακριτότητα μοντέλου, καθώς περιλαμβάνει μοντελοποίηση μεγάλων επιφανειών σιδήρου (στην περίπτωση της μαγνητικής θωράκισης) με πάχος πολύ μικρό σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του εξεταζόμενου χώρου [7.9]. Στην περίπτωση του μετασχηματιστή, ειδικότερα, οι διαστάσεις του πλήρους μοντέλου είναι της τάξης του μέτρου, ενώ οι διαστάσεις των τοιχωμάτων θωράκισης είναι της τάξης μερικών χιλιοστών. Έτσι, για να παρασταθεί ικανοποιητικά το μικρό πάχος της θωράκισης (με τουλάχιστον τρεις στρώσεις πεπερασμένων στοιχείων), θα πρέπει να κατασκευαστεί πλέγμα αρκετών χιλιάδων στοιχείων, αυξάνοντας έτσι σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης των υπολογισμών της μεθόδου. Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμη πιο έντονο στην περίπτωση των τρισδιάστατων μοντέλων, στα οποία ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται δραματικά με την αύξηση της διακριτότητας του μοντέλου. Η δυσκολία αυτή μπορεί να ξεπεραστεί με τη μέθοδο των οριακών στοιχείων, στην οποία η θωράκιση αναπαρίσταται ως επιφάνεια στην οποία εφαρμόζεται κατάλληλη οριακή συνθήκη, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίπτωση της θωράκισης στο μαγνητικό πεδίο του εσωτερικού του μετασχηματιστή.

7.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ

7.4.1 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος

Η γενική μαθηματική μορφή της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας της μαγνητικής θωράκισης συνίσταται στην ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης $F(X_i)$, όπου X_i είναι το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος. Στην περίπτωση της μαγνητικής θωράκισης, οι μεταβλητές σχεδίασης περιλαμβάνουν τις γεωμετρικές παραμέτρους της θωράκισης, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση καθορίζεται από την επιθυμητή μεταβολή στο πεδίο σκέδασης του μετασχηματιστή. Το διάνυσμα X_i υπόκειται σε περιορισμούς οι οποίοι επιβάλλονται από τη γεωμετρία του μετασχηματιστή (διαστάσεις ενεργού μέρους και κελύφους).

7.4.2 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης των διαστάσεων της μαγνητικής θωράκισης, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, [7.10]. Οι τέσσερις πρώτοι (Παράγραφοι 7.4.2.1 έως 7.4.2.4) είναι μέθοδοι που βασίζονται στη μεταβολή της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης (gradient-based), γνωστοί και ως μέθοδοι πρώτης τάξης, σύμφωνα με την τάξη της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης, που απαιτείται για να καθορίσει την κατεύθυνση αναζήτησης κατά τη διάρκεια κάθε αναγωγής.

7.4.2.1 Μέθοδος Πιο Απότομης Καθόδου (Steepest Descent)

Η μέθοδος Steepest Descent είναι μέθοδος βασισμένη στη μεταβολή της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλ. η κατεύθυνση αναζήτησης S_i για τη βέλτιστη λύση κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας την κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης. Η διεύθυνση της καθόδου εξάγεται με αντιστροφή της κλίσης σύμφωνα με τη Σχέση (7.1):

$$\mathbf{S}_{\mathbf{i}} = -\nabla F(\mathbf{X}_{\mathbf{i}}) \tag{7.1}$$

7.4.2.2 Μέθοδος Συζευγμένης Κλίσης (Conjugate Gradient Fletcher - Reeves - CG-FR)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί τροποποίηση της μεθόδου Steepest Descent, στην οποία η κατεύθυνση αναζήτησης της λύσης δίνεται από τη Σχέση (7.2):

$$\mathbf{S}_{i} = -\nabla F(\mathbf{X}_{i}) + \frac{\nabla F(\mathbf{X}_{i})^{T} \nabla F(\mathbf{X}_{i})}{\nabla F(\mathbf{X}_{i-1})^{T} \nabla F(\mathbf{X}_{i-1})}$$
(7.2)

Η παραπάνω τροποποίηση δίνει στη μέθοδο την ιδιότητα της τετραγωνικής σύγκλισης, σύμφωνα με την οποία ένα πρόβλημα η μεταβλητών συγκλίνει μετά από η αναγωγές κατά μέγιστο.

Μία σύγκριση μεταξύ της μεθόδου της πιο απότομης καθόδου και της CG αποκαλύπτει ότι η δεύτερη έχει έναν επιπλέον υπολογισμό και τη διαδοχική ρύθμιση της ΣΕ(**X**:)^TΣΕ(**X**:)

κατεύθυνσης αναζήτησης που ενσωματώνει αυτήν την τιμή. Ο όρος $\frac{\nabla F(\mathbf{X}_i)^T \nabla F(\mathbf{X}_i)}{\nabla F(\mathbf{X}_{i-1})^T \nabla F(\mathbf{X}_{i-1})}$

αντιπροσωπεύει την αναλογία του τετραγώνου του τρέχοντος διανύσματος κλίσης ως προς το τετράγωνο του προηγούμενου διανύσματος κλίσης. Ένας βαθμός ευρωστίας αυξάνεται στη μέθοδο από τις πληροφορίες που μεταφέρονται από την προηγούμενη επανάληψη, δεδομένου ότι οι συνθήκες πρώτης τάξης βασίζονται στο μήκος του διανύσματος κλίσης πλησιάζοντας στο μηδέν στη λύση. Εάν η προηγούμενη επανάληψη είναι κοντά στη λύση, τότε ο όρος

 $\frac{\nabla F(\mathbf{X}_{i})^{T} \nabla F(\mathbf{X}_{i})}{\nabla F(\mathbf{X}_{i-1})^{T} \nabla F(\mathbf{X}_{i-1})} \quad \text{einal megalog kai } \eta \text{ prognoupend eparticles final}$

σημαντικό ρόλο στην τρέχουσα επανάληψη. Αντίθετα, εάν ο όρος $\frac{\nabla F(\mathbf{X}_i)^T \nabla F(\mathbf{X}_i)}{\nabla F(\mathbf{X}_{i-1})^T \nabla F(\mathbf{X}_{i-1})}$ είναι

μικρός και η λύση είναι ακόμα μακριά, τότε η τρέχουσα τιμή της κλίσης καθορίζει τη νέα κατεύθυνση αναζήτησης.

7.4.2.3 Μέθοδος Davidon-Fletcher-Powell (DFP)

Η DFP είναι μία ημι-Newton (quasi-Newton), με μεταβλητές μετρικές (Variable-Metric - VM) μέθοδος. Οι ημι-Newton μέθοδοι VM έχουν και αυτές την ιδιότητα της τετραγωνικής σύγκλισης. Καθώς η λύση προσεγγίζεται, συμπεριφέρονται όπως η μέθοδος Newton (Μέθοδος Δεύτερης Τάξης).

Η βελτίωση της CG ως προς την Steepest Descent είναι δυνατή λόγω του συνυπολογισμού της ιστορίας από την προηγούμενη επανάληψη. Στις ημι-Newton μεθόδους, η ιστορία από όλες τις προηγούμενες αναγωγές είναι διαθέσιμη. Αυτές οι πληροφορίες συλλέγονται μέσα σε μια μήτρα nxn [A_i], αποκαλούμενη μετρική, η οποία ενημερώνεται με κάθε επανάληψη και χρησιμοποιείται για να καθιερώσει την κατεύθυνση αναζήτησης S_i ως εξής:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{i} = -[\mathbf{A}_{i}]\nabla F(\mathbf{X}_{i}) \\ \mathbf{Y} = \nabla F(\mathbf{X}_{i+1}) - \nabla F(\mathbf{X}_{i}) \\ \mathbf{Z} = [\mathbf{A}_{i}]\mathbf{Y} \\ [\mathbf{B}] = \frac{\Delta \mathbf{X} \Delta \mathbf{X}^{T}}{\Delta \mathbf{X}^{T} \mathbf{Y}} \\ [\mathbf{C}] = -\frac{\mathbf{Z} \mathbf{Z}^{T}}{\mathbf{Y}^{T} \mathbf{Z}} \\ [\mathbf{A}_{i+1}] = [\mathbf{A}_{i}] + [\mathbf{B}] + [\mathbf{C}] \end{cases}$$
(7.3)

Απαιτείται επίσης μία αρχική επιλογή για τη μετρική, η οποία πρέπει να είναι μία θετικά ορισμένη μήτρα. Για τη σύγκλιση της μεθόδου, η μετρική πρέπει να διατηρήσει την ιδιότητα της θετικά ορισμένης μήτρας κατά τη διάρκεια των αναγωγών. Στη μέθοδο DFP, η μετρική προσεγγίζει την αντίστροφη της αντικειμενικής συνάρτησης της Εσσιανής μήτρας στη λύση.

7.4.2.4 Μέθοδος Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)

Η BFGS είναι μία άλλη ημι-Newton, VM μέθοδος και η διαφορά της έναντι της DFP βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο ενημερώνεται η μετρική της. Αυτή η μετρική, σύμφωνα με τη σχέση (7.4), συγκλίνει στην Εσσιανή της αντικειμενικής συνάρτησης (και όχι στην αντίστροφη της Εσσιανής όπως στη μέθοδο DFP) καθώς προσεγγίζεται η λύση. Για τη σύγκλιση, η μετρική πρέπει να είναι θετικά ορισμένη. Μία αρχική επιλογή θετικά ορισμένης μήτρας για τη μετρική είναι συνήθως επαρκής για να εξασφαλίσει αυτήν την ιδιότητα για τα τετραγωνικά προβλήματα. Ο μοναδιαίος πίνακας είναι συνήθως η προκαθορισμένη επιλογή.

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{i} = -[\mathbf{A}_{i}]\nabla F(\mathbf{X}_{i}) \\ \mathbf{Y} = \nabla F(\mathbf{X}_{i+1}) - \nabla F(\mathbf{X}_{i}) \\ [\mathbf{B}] = \frac{\mathbf{Y}\mathbf{Y}^{\mathrm{T}}}{\mathbf{Y}^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{X}} \\ [\mathbf{C}] = -\frac{\nabla F(\mathbf{X}_{i})\nabla F(\mathbf{X}_{i})^{\mathrm{T}}}{\nabla F(\mathbf{X}_{i})^{\mathrm{T}}\mathbf{S}_{i}} \\ [\mathbf{A}_{i+1}] = [\mathbf{A}_{i}] + [\mathbf{B}] + [\mathbf{C}] \end{cases}$$
(7.4)

7.4.2.5 Μέθοδος Αναζήτησης Προτύπου (Pattern Search)

Οι μέθοδοι που δε βασίζονται στη μεταβολή της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης (non-gradient) αναφέρονται και ως μέθοδοι μηδενικής τάξης, σύμφωνα με την τάξη της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης, που απαιτείται για να επαληθεύσει την κατεύθυνση αναζήτησης κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης. Δεδομένου ότι δε χρησιμοποιούνται παράγωγοι, χρησιμοποιούνται μόνο οι τιμές της συνάρτησης για να καθιερώσουν το διάνυσμα αναζήτησης. Επομένως, οι συνθήκες πρώτης τάξης (που επιβάλλουν μηδενισμό της πρώτης παραγώγου της αντικειμενικής δυνάρτησης) δεν

εφαρμόζονται σε αυτές τις μεθόδους και μόνο οι αλλαγές στην αντικειμενική συνάρτηση ή οι μεταβλητές σχεδιασμού μπορούν να παρέχουν σύγκλιση ή / και κριτήρια τερματισμού.

Σε αυτήν τη μέθοδο βελτιστοποίησης, η κατεύθυνση αναζήτησης ανακυκλώνεται μέσω του αριθμού μεταβλητών n, διαδοχικά, και η n+1 κατεύθυνση αναζήτησης συναντάται ως γραμμικός συνδυασμός των προηγούμενων n κατευθύνσεων αναζήτησης σύμφωνα με τη Σχέση (7.5):

$$\mathbf{S}_{i} = \sum_{j=1}^{n} \alpha_{j} \hat{\mathbf{e}}_{j} \tag{7.5}$$

Έπειτα, υπολογίζεται ένα μονοδιάστατο βέλτιστο μέγεθος βήματος και αρχίζει ο επόμενος κύκλος επανάληψης. Η μέθοδος Pattern Search έχει μερικά επιπλέον κριτήρια τερματισμού, τα οποία είναι βασισμένα στο πόσο μειώνεται σε κάθε κύκλο η συνάρτηση και πόσο μεγάλη μεταβολή πραγματοποιείται στο διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης (μήκος της μεταβολής στο ίδιο το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης).

7.4.3 Εξαγωγή Αντικειμενικής Συνάρτησης

Για τον προσδιορισμό της πιο αποδοτικής διαμόρφωσης της μαγνητικής θωράκισης, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης πριν και μετά την τοποθέτηση μαγνητικής θωράκισης στο τοίχωμα του κελύφους που βρίσκεται πάνω και δίπλα από το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή (Σχήμα 7.1). Ο Πίνακας 7.1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της τάσης βραχυκύκλωσης (U_k) με τη χρήση ενός αραιού και πυκνού πλέγματος (με 2000 και 90000 κόμβους, αντίστοιχα). Η τάση βραχυκύκλωσης υπερεκτιμάται κατά 10% περίπου, όταν χρησιμοποιείται αραιό πλέγμα, διαφορά η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι, με τη χρήση αυτού του πλέγματος, ο χώρος των πηγών του μαγνητικού πεδίου (πηνία) δεν αναπαρίσταται με λεπτομέρεια, οδηγώντας έτσι σε σημαντική υπερεκτίμηση της πυκνότητας ρεύματος και της αντίστοιχης τάσης βραχυκύκλωσης που υπολογίζεται (καθώς χρησιμοποιείται για το ενεργό μέρος μοντέλο ΠΣ με απλοποιημένη γεωμετρία τυλιγμάτων, της Παραγράφου 3.4.4.1 του Κεφαλαίου 3). Η υπερεκτίμηση είναι σχεδόν σταθερή και για τις τρεις περιπτώσεις του Πίνακα 7.1, καθώς το πλέγμα του ενεργού μέρους είναι το ίδιο και η χαμηλή πυκνότητα του πλέγματος στην περιοχή των πηνίων επηρεάζει τα αποτελέσματα με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 7.1: Τοιχώματα του κελύφους του μετασχηματιστή στα οποία μοντελοποιήθηκε η προσθήκη μαγνητικής θωράκισης.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.1 υποδεικνύουν ότι η γεωμετρία της θωράκισης που τοποθετείται κοντά στο πηνίο YT είναι αυτή που επηρεάζει περισσότερο τη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης. Έτσι, ακολούθησε μία διερεύνηση της επίπτωσης της απόστασης από το πηνίο YT στην τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης, γι' αυτό το είδος της μαγνητικής θωράκισης, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο Σχήμα 7.3. Κατά τη διερεύνηση αυτή, η επιφάνεια της θωράκισης θεωρήθηκε ίση με την επιφάνεια του αντίστοιχου τοιχώματος του κελύφους.

	Uk	(%)
Γεωμετρία μαγνητικής θωράκισης	Αραιό πλέγμα	Πυκνό πλέγμα
Αρχική τιμή (χωρίς θωράκιση)	7.43	6.75
Μαγνητική θωράκιση στο τοίχωμα του κελύφους έξω από το		
πηνίο ΥΤ	7.60	6.92
Μαγνητική θωράκιση στα τοιχώματα του κελύφους έξω από		
το πηνίο ΥΤ και πάνω από τους πυρήνες	7.71	7.02

Πίνακας 7.1: Τιμή τάσης βραχυκύκλωσης πριν και μετά την τοποθέτηση μαγνητικής θωράκισης σε μετασχηματιστή 400 KVA, 20-15 KV/400 V.



Μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης

Σχήμα 7.3: Μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης συναρτήσει της απόστασης της μαγνητικής θωράκισης από το πηνίο ΥΤ.

Σύμφωνα με το Σχήμα 7.3, μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της τάσης βραχυκύκλωσης από 2% έως 4% πλησιάζοντας κατάλληλα τη μαγνητική θωράκιση στην εξωτερική επιφάνεια του πηνίου ΥΤ. Ωστόσο, σε μια τέτοια περίπτωση, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αύξηση στις απώλειες της θωράκισης, καθώς, όσο μειώνεται η απόσταση από τα πηνία, αυξάνονται οι απώλειες δινορρευμάτων στη θωράκιση, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση στις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή. Επιπλέον, αλλαγές στη γεωμετρία της θωράκισης (σε συνδυασμό με την απόστασή της από τα τυλίγματα) μπορεί να δώσουν διαφορετικά αποτελέσματα για τη μεταβολή της U_k, βελτιστοποιώντας έτσι το συνολικό υλικό της θωράκισης που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής μεταβολής στην τάση βραχυκύκλωσης. Κατά συνέπεια, η αναζήτηση της βέλτιστης διαμόρφωσης της μαγνητικής θωράκισης είναι μία σύνθετη διαδικασία, κατά την οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις τριών μεταβλητών: του πλάτους, του ύψους και της απόστασής της από το πηνίο ΥΤ. Η διαδικασία αυτή αντιμετωπίζεται στο παρόν κεφάλαιο ως ένα μη γραμμικό, πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

Κατά την εξαγωγή της αντικειμενικής συνάρτησης πρέπει να ληφθούν υπόψη οι τρεις παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως: επιθυμητή αύξηση στην τάση βραχυκύκλωσης, περιορισμός στην αύξηση των απωλειών ισχύος της θωράκισης και ελαχιστοποίηση του υλικού της θωράκισης. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζεται με τη χρήση του μεικτού μοντέλου ΠΣ-ΟΣ που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 και με το πυκνό πλέγμα. Δεδομένου ότι, όπως προαναφέρθηκε, το πάχος της θωράκισης είναι πολύ μικρό, σε σύγκριση με τις συνολικές διαστάσεις του μοντέλου του μετασχηματιστή (Σχήμα 7.4), η προσθήκη της θωράκισης προσομοιώνεται με την εφαρμογή κατάλληλης οριακής συνθήκης (Φ = 0) κατά μήκος της επιφάνειας της θωράκισης. Έτσι, το πάχος της θωράκισης θεωρείται σταθερό και το συνολικό υλικό της επηρεάζεται μόνο από την αλλαγή στην επιφάνειά της S_{shunt}. Η αναλυτική έκφραση της αντικειμενικής συνάρτησης δίνεται από τη σχέση (7.6):

$$F = w_1 \frac{|DU_k^{\text{calc}} - DU_k^{\text{spec}}|}{DU_k^{\text{spec}}} + w_2 \left| \frac{DP_{\text{shunt}}^{\text{calc}}}{DP_{\text{shunt}}^{\text{max}}} \right| + w_3 \frac{S_{\text{shunt}}^{\text{calc}}}{S_{\text{shunt}}^{\text{max}}}$$
(7.6)

όπου,

${\rm DU}_k^{\rm calc}$:	Υπολογισμένη αύξηση στην τάση βραχυκύκλωσης,
DU_k^{spec}	:	προδιαγεγραμμένη (επιθυμητή) αύξηση στη $\mathrm{U}_k,$
DP ^{calc} shunt	:	Υπολογισμένη αύξηση στις απώλειες ισχύος της θωράκισης (σε σύγκριση με τις απώλειες ισχύος της θωράκισης που αντιστοιχούν στη μέγιστη απόσταση από τα τυλίγματα του μετασχηματιστή),
DP ^{max} _{shunt}	:	Μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση στις απώλειες της θωράκισης,
$\mathbf{S}_{shunt}^{calc}$:	Επιφάνεια της θωράκισης που χρησιμοποιείται κατά την τρέχουσα αναγωγή,
S_{shunt}^{max}	:	Μέγιστη επιφάνεια της θωράκισης,
W_1, W_2, W_3	:	Συντελεστές βάρους των συνιστωσών της αντικειμενικής συνάρτησης.

Μια φυσική ερμηνεία των βαρών της σύνθετης αντικειμενικής συνάρτησης έγκειται στο ότι πρέπει να είναι ανάλογα της επίπτωσης της κάθε συνιστώσας στο συνολικό κόστος. Αυτή η προσέγγιση προτιμήθηκε από άλλες στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης, όπως οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (γενετικοί αλγόριθμοι), εξαιτίας του μεγαλύτερου αριθμού αναγωγών που απαιτούν. Αυτή η παράμετρος έχει σημαντική επίπτωση στην υπολογιστική απόδοση όταν χρησιμοποιούνται αντικειμενικές συναρτήσεις, ο υπολογισμός της τιμής των οποίων γίνεται με τη χρήση αριθμητικών τεχνικών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις 3Δ προβλημάτων, [7.9].

Οι περιορισμοί της γεωμετρίας του μετασχηματιστή επιβάλλουν στις μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος περιορισμούς της μορφής:

$$x_i^{\min} \le x_i \le x_i^{\max}, \qquad i = 1, 2, 3$$
 (7.7)

Ωστόσο, για τη διευκόλυνση των υπολογισμών, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να μετατραπεί σε πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο μετασχηματισμό [7.11], με βάση το άνω και κάτω όριο κάθε μεταβλητής.

$$x_{i} = x_{i}^{\min} + \frac{1}{2} (x_{i}^{\max} - x_{i}^{\min})(1 + \sin t_{i}), \qquad i = 1, 2, 3$$
(7.8)

Me th critical tou parapapanan metaschimatismoù, oi metablitec scediashc xi paraménoun entos two oriwn x_i^{min} kai x_i^{max} gia kabe timú the metablitec t_i .



Σχήμα 7.4: Γεωμετρία μαγνητικής θωράκισης και μεταβλητές σχεδίασης.

7.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 7.4.2 χρησιμοποιήθηκαν για την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (7.6) με DU_k^{spec} =4%, DP_{shunt}^{max} =100% και S_{shunt}^{max} =60000mm². Ο Πίνακας 7.2 συνοψίζει τα αποτελέσματα για τη βέλτιστη γεωμετρία της μαγνητικής θωράκισης, την υπολογισμένη αύξηση στην τάση βραχυκύκλωσης και τις απώλειες ισχύος (που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση που δίνεται από κάθε μέθοδο) και τον αριθμό των αναγωγών που απαιτείται για τη σύγκλιση κάθε μεθόδου. Το Σχήμα 7.5 δείχνει τη διακύμανση της διαφοράς μεταξύ της προδιαγεγραμμένης και της υπολογισμένης αύξησης στην τάση βραχυκύκλωσης συναρτήσει του αριθμού των αναγωγών των μεθόδων του Πίνακα 7.2, ενώ το Σχήμα 7.6 δείχνει την αντίστοιχη μεταβολή των απωλειών της θωράκισης.

Η παρατήρηση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 7.2 και των καμπυλών του Σχήματος 7.5 και 7.6 οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η μέθοδος αναζήτησης προτύπου είναι αυτή που συγκλίνει πιο γρήγορα, καθώς παρέχει τη βέλτιστη λύση στο μικρότερο αριθμό αναγωγών. Ωστόσο, η λύση αυτή είναι κατώτερη από αυτές που παρέχονται από τις μεθόδους που βασίζονται στις μεταβολές της κλίσης, καθώς αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη αύξηση απωλειών και επιφάνειας της θωράκισης.
- Μεταξύ των μεθόδων που βασίζονται στη μεταβολή της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης, η CG και η Steepest Descent συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση στο μικρότερο αριθμό αναγωγών. Η λύση που δίνει η CG είναι πιο αποδοτική από πλευράς κατασκευαστικού κόστους θωράκισης, καθώς αντιστοιχεί στη μικρότερη συνολική επιφάνεια, με πολύ μικρή διαφορά στις απώλειες.

- iii) Οι μέθοδοι CG και BFGS συγκλίνουν πρακτικά στο ίδιο ελάχιστο, με μοναδική διαφορά ανάμεσά τους το συνολικό αριθμό αναγωγών.
- iv) Ο Πίνακας 7.2 παρουσιάζει σημαντική διακύμανση του ύψους και της απόστασης της θωράκισης από το πηνίο YT, ανάμεσα στις λύσεις που δίνουν οι διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης. Οι μέθοδοι CG-FR και BFGS δίνουν τις μικρότερες αποστάσεις (0.43 και 0.19 mm, αντίστοιχα), οι οποίες αντιστοιχούν σε περιπτώσεις θωράκισης με μικρή βέλτιστη απόσταση και μειωμένες διαστάσεις θωράκισης.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παρατηρήσεις, η μέθοδος CG-FR αποδεικνύεται η πλέον αποδοτική για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της γεωμετρίας μαγνητικής θωράκισης.

	Βέλτιστη Γεωμετρία Θωράκισης			Απόσταση θωράκισης	DU_{k}^{calc}	DD ^{calc}	Αριθμός	
Μεθοδος	Πλάτος Ύψο (mm) (mm		Συνολική Επιφάνεια(mm²)	από το πηνίο ΥΤ (mm)	(%)	DP _{shunt} (%)	Αναγωγών	
Steep. Descent	350.00	68.3	23904	5.89	4.00	129.86	12	
CG-FR	342.46	58.1	19909	0.43	4.00	137.05	11	
DFP	349.99	57.7	20192	1.09	3.98	121.58	20	
BFGS	350.00	56.1	19643	0.19	4.00	121.58	34	
Pat.Search	350.00	86.9	30403	10.08	4.00	141.73	5	

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης (προδιαγεγραμμένη τιμή $DU_k=4\%$).

 Δ ιαφορά μεταξύ επιθυμητής και υπολογισμένης τιμής DU_k για τις



Σχήμα 7.5: Σύγκλιση στην επιθυμητή τιμή αύξησης της U_k για τις διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 7.2.



Διαφορά μεταξύ επιθυμητής και υπολογισμένης τιμής DP_{shunt} για τις διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης

Σχήμα 7.6:

Μεταβολή τιμών απωλειών θωράκισης για τις διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 7.2.

7.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Μία συνήθης δυσκολία που αντιμετωπίζεται κατά την επίλυση πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι το γεγονός ότι οι συνιστώσες της αντικειμενικής συνάρτησης είναι συνήθως αντικρουόμενες. Κατά κανόνα, καμία από τις δυνατές λύσεις ενός προβλήματος δε μπορεί να επιτρέψει ταυτόχρονη βέλτιστη τιμή για όλες τις συνιστώσες του. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται ότι οι μεμονωμένες βέλτιστες λύσεις για κάθε συνιστώσα του προβλήματος είναι συνήθως διαφορετικές από αυτές της βέλτιστης λύσης που προκύπτει για τη σύνθετη αντικειμενική συνάρτηση. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, στη διαδικασία βελτιστοποίησης της Παραγράφου 7.5 χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του αθροίσματος των συνιστωσών με τη χρήση συντελεστών βάρους, δηλ. οι τρεις συνιστώσες του προβλήματος συνδυάστηκαν σε μια σύνθετη αντικειμενική συνάρτηση F έτσι ώστε:

$$F(\mathbf{X}_{i}) = \sum_{i=1}^{3} w_{i} f_{i}(\mathbf{X}_{i}), \ 0 \le w_{i} \le 1, \ \sum_{i=1}^{3} w_{i} = 1$$
(7.9)

Για την επιλογή της κατάλληλης τιμής του διανύσματος των βαρών w_i και τη βέλτιστη ιεράρχηση κάθε συνιστώσας της αντικειμενικής συνάρτησης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας με τη χρήση του αλγόριθμου CG-FR, δηλαδή της πλέον αποδοτικής από τις ντετερμινιστικές μεθόδους βελτιστοποίησης που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 7.4.2. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική διερεύνηση της επίπτωσης των μεταβολών του συντελεστή βάρους w_i στη μεταβολή της F και των συνιστωσών της f₁(%), f₂ και f₃ για διάφορες τιμές του w_2 (η w_3 εξαρτάται από τις w_i και w_2 σύμφωνα με την (7.9)). Το Σχήμα 7.7 απεικονίζει τις διακυμάνσεις αυτές για $w_2 = 0.1$. Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 7.7, η αντικειμενική συνάρτηση παρουσιάζει τοπικά ελάχιστα για $w_i=0.1$, 0.6 και 0.8. Ωστόσο, για $w_i=0.1$, η απόκλιση από την προδιαγεγραμμένη τιμή αύξησης της U_k βρίσκεται κοντά στο 100%, ενώ οι λόγοι απωλειών και επιφάνειας είναι αρκετά μικροί ώστε να ελαχιστοποιήσουν τη συνολική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Για τιμές του w_i πάνω από 0.3, επιτυγχάνεται η επιθυμητή αύξηση στην τάση βραχυκύκλωσης με αποδεκτές ανοχές στις υπόλοιπες δύο συνιστώσες της αντικειμενικής συνάρτησης ενώ για $w_i>0.6$ οι συνιστώσες f₂ και f₃ αυξάνονται σημαντικά. Η εξαγωγή των καμπυλών του Σχήματος 7.7 για μεγαλύτερες τιμές του w_2 δίνει τιμές τοπικού ελαχίστου για την F μεγαλύτερες από αυτές που εμφανίζονται για w_2 =0.1 (Σχήματα 7.8, 7.9). Κατά συνέπεια, η επιλογή διανύσματος συντελεστών βάρους ίσου με (0.6, 0.1, 0.3) θεωρείται η πλέον κατάλληλη. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνεται με επανάληψη της παραπάνω ανάλυσης με διαγράμματα των διακυμάνσεων της ευαισθησίας των F, f₁, f₂ και f₃ σε μεταβολές των w_2 και w_3 .



Σχήμα 7.7: Ευαισθησία της αντικειμενικής συνάρτησης και των συνιστωσών της σε μεταβολές του συντελεστή βάρους w_1 (για. w_2 =0.1).



Σχήμα 7.8: Ευαισθησία της αντικειμενικής συνάρτησης και των συνιστωσών της σε μεταβολές του συντελεστή βάρους w_1 (για. $w_2=0.2$).



Σχήμα 7.9: Ευαισθησία της αντικειμενικής συνάρτησης και των συνιστωσών της σε μεταβολές του συντελεστή βάρους w_1 (για. w_2 =0.3).

7.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η εφαρμογή του μεικτού 3Δ μοντέλου ΠΣ-ΟΣ, το οποίο αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3, στη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας μαγνητικής θωράκισης σε μετασχηματιστές ισχύος. Η βελτιστοποίηση αντιμετωπίστηκε ως μη γραμμικό, πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς και το προτεινόμενο αριθμητικό μοντέλο συνδυάστηκε με διάφορους ντετερμινιστικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος CG-FR έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα από πλευράς ταχύτητας σύγκλισης και ποιότητας βέλτιστης λύσης. Για τη βέλτιστη ιεράρχηση των συνιστωσών της σύνθετης αντικειμενικής συνάρτησης πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, οδηγώντας στην κατάλληλη διαμόρφωση των βαρών τους.

7.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [7.1] J. A. Ramirez, E. M. Freeman, C. Chat-uthai, D. A. Lowther, "Sensitivity Analysis for the Automatic Shape Design of Electromagnetic Devices in 3D Using FEM," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, No 2, pp. 1856-1859, Mar. 1997.
- [7.2] J. M. Biedinger, D. Lemoine, "Shape Sensitivity Analysis of Magnetic Forces," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, No 3, pp. 2309-2316, May 1997.
- [7.3] Chang Seop Koh, O. A. Mohammed, Song-yop Hahn, "Nonlinear Shape Design Sensitivity Analysis of Magnetostatic Problems using Boundary Element Method," *IEEE Trans.Magn.*, vol.31,pp.1944-1947, May 1995.
- [7.4] IEC 60076-1, "Power transformers Part 1: General," 2000.
- [7.5] J. C. Olivares, Y. Liu, J. M. Canedo, R. Escarela-Perez, J. Driesen, P. Moreno, "Reducing Losses in Distribution Transformers," *IEEE Trans. PWRD.*, vol. 18, No 3, pp. 821-826, Jul. 2003.
- [7.6] N. Takahashi, T. Kitamura, M. Horii, J. Takehara, "Optimal Design of Tank Shield Model of Transformer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, No 4, pp. 1089-1093, Jul. 2000.
- [7.7] M. Horii, N. Takahashi, "3D Optimization of design Variables in x- y- and zdirections of Transformer Tank Shield Model," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, No 5, pp. 3631-3634, Sept. 2001.
- [7.8] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris and D. G. Paparigas, "Geometry Optimization of Magnetic Shunts in Power Transformers Based on a Particular Hybrid Finite Element - Boundary Element Model and Sensitivity Analysis," *IEEE Trans.Magn.*, Vol. 41, No 5, pp. 1776-1779, May 2005.
- [7.9] K. Hameyer, R. Belmans, "Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Drives," *WIT Press*, 1999.
- [7.10] P. Venkataraman, "Applied Optimization with MATLAB Programming," *Wiley-Interscience*, 2002.
- [7.11] X. Cui, G. Zhang, "Automatic Design of Impedance in Shell-Form Power Transformer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, No 4, pp. 1822-1825, Jul. 2000.

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

Στο παρόν Κεφάλαιο, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 και επιβεβαιώθηκε πειραματικά στο Κεφάλαιο 4, επεκτείνεται έτσι ώστε να εφαρμοστεί στην πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών ισχύος. Στην αρχή του Κεφαλαίου δίνεται ένα σύντομο θεωρητικό υπόβαθρο για τις απώλειες κενού φορτίου μετασχηματιστών και για τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψή τους τόσο από τους κατασκευαστές όσο και από τους ερευνητές που ασχολούνται με το θέμα. Στη συνέχεια περιγράφονται οι απαραίτητες τροποποιήσεις της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που είναι απαραίτητες για τη μελέτης της δοκιμής κενού φορτίου (δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος), με προσομοίωση της οποίας προκύπτουν οι απώλειες κενού φορτίου (σε αντίθεση με την τάση βραχυκύκλωσης, η οποία υπολογίστηκε με τα αποτελέσματα προσομοίωσης της δοκιμής βραχυκύκλωσης). Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο με τον οποίο αναπαριστώνται οι ιδιότητες του υλικού του πυρήνα, ο οποίος είναι καθοριστικός για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων της μεθόδου στις τρεις περιπτώσεις των μετασχηματιστών των δύο σειρών μετρήσεων του Κεφαλαίου 4 και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της με τις μετρημένες τιμές απωλειών που έδωσε ο κατασκευαστής.

8.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΟΥΣ

8.1.1 Είδη απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών

Οι απώλειες κενού φορτίου μετασχηματιστών συνίστανται στις απώλειες μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού του πυρήνα τους, γι αυτό και αναφέρονται και ως απώλειες πυρήνα.

Είναι γνωστό ότι ο τρόπος μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών υλικών δεν είναι ομογενής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1, η εσωτερική δομή ενός μαγνητισμένου σιδηρομαγνητικού υλικού μπορεί να χωριστεί σε περιοχές, οι οποίες διαφέρουν κατά τη διεύθυνση μαγνήτισης. Οι περιοχές αυτές οριοθετούνται με ένα είδος μαγνητικών «τοιχωμάτων» και οποιαδήποτε μεταβολή στη συνολική μαγνήτιση του υλικού μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη μετακίνηση αυτών των τοιχωμάτων. Έτσι, οι μεταβολές στη μαγνήτιση του υλικού έχουν έντονα τοπικό χαρακτήρα και μπορούν να θεωρηθούν διακριτές στο χώρο.

Η μη καθαρότητα και οι ατέλειες μέσα στο υλικό εμποδίζουν την κίνηση των τοιχωμάτων που προαναφέρθηκαν και προκαλούν άτακτες μετακινήσεις τους, καθιστώντας την ταχύτητα μετακίνησής τους όχι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής του εξωτερικού πεδίου και τη συνολική μεταβολή της μαγνήτισης διακριτή στο χρόνο.

Η χωρική και χρονική μεταβολή μαγνήτισης του υλικού συνεπάγεται γρήγορες τοπικές μεταβολές της, ακόμη και για απειροελάχιστα μικρό ρυθμό μεταβολών του εξωτερικού πεδίου. Οι αλλαγές αυτές στη μαγνήτιση σχετίζονται με τοπικές απώλειες ενέργειας, οφειλόμενες τόσο στη μεταβολή της φοράς μαγνήτισης των στοιχειωδών

μαγνητικών διπόλων που αποτελούν το υλικό (απώλειες υστέρησης), όσο και σε δινορρεύματα που αναπτύσσονται στο υλικό (απώλειες δινορρευμάτων). Οι απώλειες αυτές καθορίζονται από τη χωρική και χρονική κατανομή των μεταβολών μαγνήτισης. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει σαφής φυσικός διαχωρισμός μεταξύ των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Πρακτικά, υπάρχει ένα μόνο φυσικό αίτιο δημιουργίας των απωλειών μαγνήτισης, δηλαδή η δυσκολία στη μετακίνηση των τοιχωμάτων μαγνήτισης (λόγω των δινορρευμάτων και του φαινομένου υστέρησης), [8.1].





Σχήμα 8.1: Τοπικές μεταβολές μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού

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

$$P_m = P_h + P_e \tag{8.1}$$

Η παραπάνω προσέγγιση, αν και απλοποιεί σημαντικά τη μοντελοποίηση των απωλειών μαγνήτισης, μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα σφάλματα πρόβλεψης των πραγματικών τιμών απωλειών. Για την αποφυγή των σφαλμάτων αυτών, συναντάται συχνά στην τεχνική βιβλιογραφία η εισαγωγή μίας τρίτης «τεχνητής» συνιστώσας απωλειών, αναφερόμενη ως «απώλειες ανωμαλίας κατανομής δινορρευμάτων» (eddy current anomaly loss), P_a.

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν προσεγγίσεις για τον αναλυτικό προσδιορισμό των παραμέτρων P_h και P_e των απωλειών μαγνήτισης, [8.2], η δυσκολία πρόβλεψης της τρίτης συνιστώσας (η οποία ουσιαστικά οφείλεται στην απόκλιση λόγω σφαλμάτων στην πρόβλεψη των δύο άλλων συνιστωσών) έχει οδηγήσει σε αναζήτηση διαφορετικών μεθόδων πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου, οι οποίες συνδυάζουν πειραματική μελέτη των υλικών του πυρήνα.

8.1.2 Μέθοδοι πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών

Το έντονο ανταγωνιστικό περιβάλλον στην αγορά ενέργειας, σε συνδυασμό με την αύξηση του κόστους παραγωγής της, έχει δημιουργήσει έντονο ενδιαφέρον για την εξεύρεση τρόπων μείωσης των απωλειών που εμπλέκονται στο κόστος μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Μια μικρή μείωση των απωλειών πυρήνα των μετασχηματιστών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά οικονομικά οφέλη καθόλη τη διάρκεια ζωής τους. Η σωστή θεωρητική αναπαράσταση των απωλειών αυτών είναι ζωτικής σημασίας, απαιτεί δε την εκτενή γνώση της διαμόρφωσης και των κατασκευαστικών λεπτομερειών του πυρήνα, οι οποίες, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 8.1.1, επηρεάζουν σημαντικά την πραγματική τιμή απωλειών.

Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος πρόβλεψης που συναντάται στη βιομηχανική κατασκευή μετασχηματιστών είναι κατά βάση εμπειρική και εμπλέκει σταθερές της σχεδίασης που εξάγονται με βάση μετρήσεις σε ήδη κατασκευασμένους μετασχηματιστές, [8.3]. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει ικανοποιητικό βαθμό επιτυχίας για τυποποιημένες κατασκευές, όμως η ακρίβειά της μειώνεται όταν μελετώνται μη τυποποιημένες κατασκευές ή υλικά με νέα χαρακτηριστικά απωλειών συναρτήσει των τοπικών τιμών έντασης του μαγνητικού πεδίου. Έτσι, η έρευνα για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου επικεντρώνεται σε διαφορετικούς τρόπους ανάλυσης, οι οποίοι μπορούν να διακριθούν στις τρεις βασικές κατηγορίες που ακολουθούν.

8.1.2.1 Κυκλωματικά μοντέλα πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών

Πρόκειται για βελτιωμένες εκδοχές του κλασικού ισοδυνάμου κυκλώματος του μετασχηματιστή, στο οποίο οι απώλειες πυρήνα αναπαριστώνται από τον εγκάρσιο κλάδο μαγνήτισης. Παρά το γεγονός ότι οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης των μαγνητικών πεδίων των πυρήνων μετασχηματιστών προσφέρουν μεγάλο εύρος δυνατοτήτων, τα κυκλωματικά μοντέλα εξακολουθούν να αποτελούν αντικείμενο έρευνας ([8.4]-[8.9]) επειδή είναι πιο απλά στην εφαρμογή τους, δεδομένου ότι:

- εμπλέκουν μειωμένο αριθμό παραμέτρων, οι οποίες μπορούν να προσδιοριστούν από τις κλασικές δοκιμές ή από κάποια από τα γεωμετρικά δεδομένα των μετασχηματιστών,
- παρουσιάζουν γενικά μειωμένες υπολογιστικές απαιτήσεις σε σχέση με τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων,
- μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε προγράμματα προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, [8.10 - 8.12].

Μία κατηγορία κυκλωματικών μοντέλων θεωρεί τις συνιστώσες P_e και P_a των απωλειών ανάλογες του γινομένου $(fB_m)^2$ (όπου f η συχνότητα λειτουργίας των μετασχηματιστών και B_m η μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα τους) και την αναπαριστά με γραμμικές αντιστάσεις, [8.13-8.16].

Στο μοντέλο Bertotti, [8.17 - 8.19], πραγματοποιείται διαχωρισμός των P_e και P_a , λαμβάνοντας υπόψη ότι οι πρώτες είναι ανάλογες του $(fB_m)^2$ και οι τελευταίες ανάλογες του $(fB_m)^{1.5}$, οδηγώντας έτσι στην υιθέτηση μη γραμμικής αντίστασης για τον υπολογισμό τους.

Μια άλλη οικογένεια μοντέλων θεωρεί τις συνολικές απώλειες πυρήνα P_m και λαμβάνει υπόψη έναν παράγοντα προσαύξησης της τιμής που προκύπτει από τα εγγενή χαρακτηριστικά των ελασμάτων του υλικού του πυρήνα κατά 15-20%, ως αποτέλεσμα του τρόπου συναρμολόγησής τους, [8.20]. Ο παράγοντας αυτός χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τις συνέπειες της ανομοιογενούς κατανομής του μαγνητικού πεδίου στον πυρήνα, του τοπικού κορεσμού και της περιστροφικής συνιστώσας της ροής στις γωνίες του πυρήνα, [8.21 – 8.23], και της αλλοίωσης των αρχικών χαρακτηριστικών του υλικού λόγω της κατεργασίας του κατά την κατασκευή, [8.24].

Ωστόσο, τα περισσότερα κυκλωματικά μοντέλα αναπαριστούν παράγοντες όπως τη διαμόρφωση των πυρήνων, τη ροή σκέδασης και άλλες επιπλέον απώλειες που οφείλονται στον τρόπο κατασκευής των πυρήνων, ως εγγενείς παραμέτρους που προκύπτουν από μετρήσεις που πραγματοποιούνται στους μετασχηματιστές. Έτσι, δε μπορούν να

προβλεφθούν σωστά σε καταστάσεις λειτουργίας των μετασχηματιστών που δεν έχουν μελετηθεί πειραματικά. Στις αναφορές [8.25] και [8.26] γίνεται προσπάθεια θεωρητικής αναπαράστασης αυτών των παραγόντων με κατάλληλη τροποποίηση των μοντέλων.

Οι κατασκευαστικές αυτές λεπτομέρειες καθιστούν τα κυκλωματικά μοντέλα αρκετά περίπλοκα, αναιρώντας ως ένα βαθμό το πλεονέκτημα της απλότητας εφαρμογής τους. Αντίθετα, μπορούν να ενσωματωθούν πιο εύκολα σε μοντέλα αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης του πεδίου, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

8.1.2.2 Μοντέλα αριθμητικών τεχνικών ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου για την πρόβλεψη απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών

Όπως και στην περίπτωση της πρόβλεψης του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης, οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου των μετασχηματιστών μπορούν να προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια στην αναπαράσταση των απωλειών του πυρήνα και την ακριβή τους εκτίμηση, κυρίως λόγω της δυνατότητας λεπτομερούς αναπαράστασης της πραγματικής γεωμετρίας του πυρήνα.

Οι μέθοδοι αυτές συνδυάζουν συνήθως την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου με δεδομένα για τις απώλειες και τον τρόπο μαγνήτισης του υλικού του πυρήνα, μετρημένα σε ελάσματα του υλικού του. Έτσι, οδηγούν σε πρόβλεψη των απωλειών που δεν εξαρτάται από σταθερές σχεδίασης βασισμένες σε αποτελέσματα από παλαιότερες μετρήσεις σε συναρμολογημένους πυρήνες μετασχηματιστών. Ωστόσο, και αυτές οι μέθοδοι ενδέχεται να παρουσιάσουν σφάλμα στην εκτίμηση των απωλειών, εάν δε ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η τοπική κατανομή της ροής στον πυρήνα, η περιστροφική συνιστώσα της ροής στις γωνίες του πυρήνα, [8.27], ή η ροή που κυκλοφορεί μεταξύ των ελασμάτων του πυρήνα, [8.28].

Τα αριθμητικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια δίνουν ιδιαίτερη βαρύτητα στους παράγοντες που προαναφέρθηκαν, όπως φαίνεται ενδεικτικά και στις αναφορές [8.29] και [8.30]. Δίνεται επιπλέον ιδιαίτερη βαρύτητα στη μικροσκοπική αναπαράσταση των φαινομένων που διαδραματίζονται κατά τη μαγνήτιση του υλικού του πυρήνα. Στα πλαίσια αυτά, μελετάται η ενσωμάτωση μοντέλων υστέρησης μικροσκοπικής κλίμακας, όπως είναι τα ακόλουθα:

- το μοντέλο Jiles-Atherton, [8.31], το οποίο στηρίζεται στον υπολογισμό της ενέργειας σε μικροσκοπική κλίμακα. Συνίσταται στη χρήση διαφορικής εξίσωσης για την περιγραφή της στατικής συμπεριφοράς του σιδηρομαγνητικού υλικού,
- το μοντέλο Preisach, [8.32], το οποίο εισάγει στατιστική προσέγγιση για την περιγραφή της χωρικής και χρονικής κατανομής των περιοχών μαγνήτισης του υλικού, τα χαρακτηριστικά του οποίου περιγράφονται με συντελεστές βάρους. Το μοντέλο μπορεί να επεκταθεί για τη μοντελοποίηση δυναμικών φαινομένων, απαιτεί ωστόσο πολύ λεπτομερείς τοπικές μετρήσεις απωλειών.

8.1.2.3 Στοχαστικές μέθοδοι πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών

Στην κατηγορία των στοχαστικών μεθόδων εντάσσονται οι γενετικοί αλγόριθμοι και τα νευρωνικά δίκτυα, η χρήση των οποίων στην ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών και μετασχηματιστών έχει αυξηθεί δραματικά την τελευταία δεκαετία. Οι μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης, έχουν χρησιμοποιηθεί και για τη μελέτη απωλειών κενού φορτίου, προτείνοντας μοντέλα που είναι σε θέση να μειώσουν δραστικά το σφάλμα πρόβλεψής τους, [8.3], [8.33-8.34].

Για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί και οι τεχνικές γραμμικών στατιστικών μοντέλων, [8.36-8.39], στα οποία οι απώλειες πυρήνα

συνδέονται με τις γεωμετρικές παραμέτρους του και με την ποιότητα κατασκευής του, με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών.

Οι μέθοδοι που περιγράφηκαν στις Παραγράφους 8.1.2.1 έως 8.1.2.3 αποτελούν εργαλεία τα οποία χρησιμοποιούνται εκτενώς στην προσπάθεια αναζήτησης νέων υλικών και νέων μεθόδων κατασκευής των πυρήνων των μετασχηματιστών με στόχο τη μείωση των απωλειών τους. Οι προσπάθειες αυτές έχουν ενταθεί τα τελευταία χρόνια με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα, τουλάχιστον σε ερευνητικό επίπεδο (σε περιπτώσεις υλικών, η χρήση των οποίων δεν είναι ακόμη διαδεδομένη στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών). Για παράδειγμα, η χρήση του άμορφου σιδήρου στους μετασχηματιστές προσελκύει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών, [8.40-8.42], ενώ η επίδραση του τρόπου διαμόρφωσης των πυρήνων, [8.43] και των κατεργασιών του υλικού του είναι αντικείμενο έρευνας το οποίο οδηγεί στη διαρκή εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για νέους δυνατούς τρόπους μείωσης των απωλειών πυρήνα.

8.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Κατά την εξαγωγή και διακριτοποίηση των εξισώσεων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.4 του Κεφαλαίου 2, δε δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στο γεγονός ότι, λόγω των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα μ_r των μη γραμμικών υλικών του μοντέλου είναι συνάρτηση της θέσης του εξεταζόμενου σημείου. Σε όλη την ανάλυση υπονοήθηκε ότι οι τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας των υλικών είναι γνωστές, παραδοχή η οποία ήταν απόλυτα αποδεκτή για την προσομοίωση της δοκιμής βραχυκύκλωσης, κατά την οποία ο σίδηρος λειτουργεί στη γραμμική περιοχή (σε τιμές πολύ μικρότερες του γονάτου κορεσμού της καμπύλης μαγνήτισης). Ωστόσο, στην περίπτωση της μοντελοποίησης της λειτουργίας κενού φορτίου, κατά την οποία οι τιμές μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα βρίσκονται στη μη γραμμική περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης, πρέπει να ληφθεί υπόψη η τοπική εξάρτηση των τιμών της μαγνητικής διαπερατότητας από τις τιμές του πεδίου. Ο τρόπος με τον οποίο καταστρώθηκαν οι εξισώσεις των πεπερασμένων στοιχείων στην Παράγραφο 2.4, επιτρέπει μια τέτοια ανάλυση, με βασική διαφορά τον τρόπο προσδιορισμού της μαγνητικής διαπερατότητας, η οποία πλέον δε λαμβάνεται σταθερή κατά την επίλυση αλλά σχετίζεται με τις τοπικές τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου (σε περιπτώσεις μαγνητοστατικού προβλήματος) ή τις μέγιστες τιμές της (σε περιπτώσεις αρμονικών προβλημάτων). Ωστόσο, δεδομένου ότι οι τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου εξαρτώνται και αυτές από την κατανομή της μαγνητικής διαπερατότητας, η διαδικασία επίλυσης πρέπει να είναι επαναληπτική, καθιστώντας έτσι την προσομοίωση της λειτουργίας του μετασχηματιστή υπό συνθήκες κενού φορτίου μη γραμμικό πρόβλημα, [8.44].

8.2.1 Επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

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

- Επίλυση του προβλήματος με υποθετικές τιμές μαγνητικής διαπερατότητας, η οποία ακολουθείται από αναπροσαρμογή τους με βάση τις τιμές πεδίου που έδωσε η αρχική επίλυση. Έτσι, πραγματοποιείται συνεχής εφαρμογή ενός κύκλου επίλυσηςπροσαρμογής μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση.
- Εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson, η οποία χρησιμοποιεί το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος του μαγνητικού δυναμικού για την εκτίμηση των νέων τιμών δυναμικού (και μαγνητικής διαπερατότητας κατ' επέκταση) της βελτιωμένης λύσης.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και πάλι μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση. Η διαδικασία αυτή, εάν και πολυπλοκότερη από αυτή που περιγράφηκε παραπάνω, οδηγεί κατά κανόνα σε γρηγορότερη σύγκλιση.

Στη συνέχεια δίνεται λεπτομερέστερα η περιγραφή των παραπάνω μεθόδων και ο τρόπος με τον οποίο υλοποιούνται μέσω των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων.

8.2.1.1 Κυκλική αναπροσαρμογή των τιμών μαγνητικής διαπερατότητας

Η διαδικασία αυτή είναι απλή και αρκετά διαισθητική, καθώς στηρίζεται σε αυθαίρετη αρχική εκτίμηση των τιμών μαγνητικής διαπερατότητας. Υστερεί ωστόσο από πλευράς σύγκλισης, ο ρυθμός της οποίας είναι αρκετά αβέβαιος, εξαρτάται δε σε μεγάλο βαθμό από τις αρχικές τιμές διαπερατότητας και τις προσαρμοσμένες τιμές που ανατροφοδοτούνται στις επόμενες λύσεις. Είναι δυνατός ο προσδιορισμός κάποιων συντελεστών βάρους κατά την εκλογή των νέων τιμών διαπερατότητας, σύμφωνα με τη Σχέση (8.2):

$$\mu_{\text{new}} = \mu_{\text{old}} + W(\mu_{\text{calc}} - \mu_{\text{old}})$$
(8.2)

όπου μ_{new} οι νέες τιμές μαγνητικής διαπερατότητας για την επόμενη επίλυση, μ_{old} οι τιμές διαπερατότητας που χρησιμοποιήθηκαν κατά την τρέχουσα επίλυση, μ_{calc} οι τιμές διαπερατότητας που προέκυψαν από τις τιμές πεδίου της τρέχουσας επίλυσης και W ο συντελεστής βάρους, ο οποίος είναι συνήθως μικρότερος της μονάδας. Οι τιμές του συντελεστή βάρους της (8.2) εξαρτώνται από το εξεταζόμενο πρόβλημα, και μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το είδος του.

Οι υπόλοιπες εξισώσεις της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων παραμένουν ίδιες, γεγονός που απλοποιεί ιδιαίτερα την υλοποίηση αυτής της μεθόδου, παρότι είναι υποδεέστερη της Newton-Raphson ως προς την ταχύτητα σύγκλισης.

8.2.1.2 Μέθοδος Newton-Raphson

Η εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson είναι σε γενικές γραμμές απλή, η υλοποίησή της ωστόσο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αυξάνει το βαθμό πολυπλοκότητας της μεθόδου. Για την καθοδήγηση της μεθόδου στην τελική λύση χρησιμοποιείται η παράγωγος του σφάλματος υπολογισμού της τρέχουσας αναγωγής ως προς το μαγνητικό δυναμικό. Έτσι, εξασφαλίζεται η γρήγορη σύγκλιση, ανεξάρτητα από την ορθότητα της αρχικής επιλογής τιμών μαγνητικής διαπερατότητας.

Η αναγωγική μέθοδος Newton-Raphson εφαρμόζεται στην επίλυση των εξισώσεων της μη γραμμικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε μορφή πίνακα. Το σύστημα εξισώσεων της μεθόδου αντιστοιχεί στην εξίσωση (2.42) του Κεφαλαίου 2, η οποία επαναλαμβάνεται στην εξίσωση (8.3):

$$[S][\Phi] = [F] \tag{8.3}$$

Τα βήματα επίλυσης της (8.3) με τη χρήση της Newton-Raphson έχουν ως εξής:

Προσδιορισμός αρχικού διανύσματος μαγνητικού δυναμικού [Φ]₁, υποθέτοντας αρχικές τιμές της μαγνητικής διαπερατότητας κατά την εξαγωγή του πίνακα ακαμψίας [S]₁, σύμφωνα με τη Σχέση (8.4):

$$[\Phi]_{l} = [S]_{1}^{-1} [F]$$
(8.4)

Υπολογισμός αρχικού σφάλματος, σύμφωνα με τη Σχέση (8.5):

$$[E]_1 = [S]_2 [\Phi]_1 - [F]$$
(8.5)

όπου, $[S]_2$ ο πίνακας ακαμψίας που προκύπτει με χρήση των τιμών μαγνητικής διαπερατότητας που αντιστοιχούν στο διάνυσμα $[\Phi]_1$ και $[E]_1$ το διάνυσμα σφάλματος που αντιστοιχεί στην πρώτη αναγωγή,

Διόρθωση των αρχικών τιμών του δυναμικού σύμφωνα με τη Σχέση (8.6):

$$[\delta\Phi]_{1} = -\left[\frac{\partial E_{1}}{\partial \Phi}\right]_{1}^{-1} [E]_{1} = -[\text{Hessian}]_{1}^{-1} [E]_{1}$$
(8.6)

όπου, [Hessian]₁ η Εσσιανή (*Hessian*) μήτρα που αντιστοιχεί στην πρώτη αναγωγή (δε συμβολίζεται ως [H] για να μην υπάρξει σύγχυση με το διάνυσμα **H** της έντασης του μαγνητικού πεδίου).

Υπολογισμός του δεύτερου διανύσματος του δυναμικού [Φ]₂, το οποίο προκύπτει από το πρώτο διάνυσμα και το διάνυσμα [δΦ]₁ σύμφωνα με τη Σχέση (8.7):

$$[\Phi]_2 = [\Phi]_1 + [\delta \Phi]_1 \tag{8.7}$$

Η διαδικασία συνεχίζεται με επανάληψη των τριών τελευταίων βημάτων μέχρι να προκύψει διάνυσμα [δΦ] με τιμές αποδεκτά μικρές ώστε να θεωρηθεί ότι έχει επιτευχθεί σύγκλιση.

Ο υπολογισμός της παραγώγου του σφάλματος που εμφανίζεται στην εξίσωση (8.6) γίνεται παραγωγίζοντας την εξίσωση (8.5), στην οποία, για μαγνητοστατικά προβλήματα, η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ανεξάρτητη των τιμών του δυναμικού οπότε η παράγωγος του διανύσματος των πηγών [F] ως προς το δυναμικό Φ μπορεί να ληφθεί ίση με το μηδέν. Έτσι, παραγωγίζοντας την (8.4) ως προς το δυναμικό λαμβάνεται η (8.8):

$$[\text{Hessian}] = \frac{\partial}{\partial \Phi} [S][\Phi]$$
(8.8)

η οποία για ένα στοιχείο του πλέγματος μπορεί να γραφεί ως:

$$[\text{Hessian}_{e}] = \frac{\partial}{\partial \Phi_{e}} [S_{e}][\Phi_{e}]$$
(8.9)

όπου σύμφωνα με τις Σχέσεις (2.40) και (2.41) του Κεφαλαίου 2, $[S_e] = \frac{\partial F_e}{\partial \Phi_i}$ και $[\Phi_e] = \begin{vmatrix} \Phi_i \\ \Phi_j \\ \Phi_k \\ \Phi_1 \end{vmatrix}$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η παράγωγος των πηγών του μαγνητικού πεδίου (δηλαδή του διανύσματος Κ που εμφανίζεται στη Σχέση (2.40)) είναι μηδενική, η Σχέση (8.8) μπορεί να γραφεί με τη μορφή

$$[\text{Hessian}_{e}] = \frac{\partial}{\partial \Phi_{e}} \frac{\mu}{36V} [\xi_{e}] [\Phi_{e}]$$
(8.10)

όπου

$$[\xi_e] = \begin{bmatrix} b_i^2 + c_i^2 + d_i^2 & b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j & b_i b_k + c_i c_k + d_i d_k & b_i b_l + c_i c_l + d_i d_l \\ b_j b_i + c_j c_i + d_j d_i & b_j^2 + c_j^2 + d_j^2 & b_j b_k + c_j c_k + d_j d_k & b_j b_l + c_j c_l + d_j d_l \\ b_k b_i + c_k c_i + d_k d_i & b_k b_j + c_k c_j + d_k d_j & b_k^2 + c_k^2 + d_k^2 & b_k b_l + c_k c_l + d_k d_l \\ b_l b_i + c_l c_i + d_l d_i & b_l b_j + c_l c_j + d_l d_j & b_l b_k + c_l c_k + d_l d_k & b_l^2 + c_l^2 + d_l^2 \end{bmatrix}$$

Η (8.10) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$[\text{Hessian}_{e}] = \frac{1}{36V} \left(\frac{\partial \mu}{\partial \Phi_{e}} [\xi_{e}] [\Phi_{e}] + \mu \frac{\partial [\Phi_{e}]}{\partial \Phi_{e}} [\xi_{e}] \right)$$

$$= \frac{1}{36V} \left(\frac{\partial \mu}{\partial \Phi_{e}} [\xi_{e}] [\Phi_{e}] + \mu [\xi_{e}] \right)$$
(8.11)

Ισχύει ότι:

$$\frac{\partial \mu}{\partial \Phi_{\rm e}} = \frac{\partial \mu}{\partial \rm H} \frac{\partial \rm H}{\partial \Phi_{\rm e}} \tag{8.12}$$

Στην παραπάνω σχέση, η παράγωγος $\frac{\partial H}{\partial \Phi_e}$ προκύπτει μέσω της Σχέσης (2.26) του Κεφαλαίου

2, ενώ η παράγωγος $\frac{\partial \mu}{\partial H}$ μπορεί να υπολογιστεί με βάση την καμπύλη μαγνήτισης του υλικού. Έτσι, η Σχέση (8.12) μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$[\text{Hessian}_{e}] = \frac{1}{36V} \left(\frac{\partial \mu}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \Phi_{e}} [\xi_{e}] [\Phi_{e}] + \mu [\xi_{e}] \right)$$
(8.13)

Κατά την εξαγωγή της Σχέσης (8.13) χρησιμοποιήθηκε η παράγωγος της έντασης του μαγνητικού πεδίου για την εξαγωγή της Εσσιανής μήτρας. Στη βιβλιογραφία συναντώνται και άλλες διαμορφώσεις, οι οποίες μπορεί να εμπλέκουν την αντίστροφη τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας με την παράγωγο της μαγνητικής επαγωγής ή του τετραγώνου του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής. Η τελευταία παραλλαγή θεωρείται πολλές φορές προτιμότερη,

καθώς η χρήση της παραγώγου $\frac{\partial v}{\partial B^2}$ (όπου, ν το αντίστροφο της μαγνητικής

διαπερατότητας) έναντι της $\frac{\partial \mu}{\partial H}$ που απαιτεί η Σχέση (8.13) παρουσιάζει καλύτερη σύγκλιση

λόγω της ομαλότερης μορφής της καμπύλης μ-B² και της παραγώγου της σε σχέση με την καμπύλη ν-Η και μ-Β. Σε αυτό το σημείο αναδεικνύεται και η σημασία του τρόπου μοντελοποίησης των μαγνητικών ιδιοτήτων των εξεταζόμενων μη γραμμικών υλικών (δηλαδή της καμπύλης μαγνήτισής τους), η οποία περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

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

Η ανάλυση των μαγνητικών διατάξεων απαιτεί ακριβή γνώση των φυσικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών. Η μαγνήτιση ενός τμήματος σιδηρομαγνητικού υλικού σε μια αρχική τιμή H₁ και η μείωση του πεδίου στη συνέχεια σε τιμή -H₁, και η επανάληψη της διαδικασίας για μεγαλύτερες τιμές του H (H₃>H₂>H₁) οδηγεί στην εξαγωγή μιας οικογένειας καμπυλών μαγνήτισης οι οποίες αποτελούν τους βρόχους υστέρησης του υλικού (Σχήμα 8.2), οι οποίοι αναπαριστούν το φαινόμενο της υστέρησης κατά τη διαδικασία μαγνήτισής του (όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 8.1.1). Η σύνδεση των κορυφών των βρόχων υστέρησης του Σχήματος 8.2 δίνει την ονομαζόμενη χαρακτηριστική καμπύλη πρώτης μαγνήτισης του υλικού. Η καμπύλη αυτή χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των μη γραμμικών σιδηρομαγνητικών υλικών στα πεπερασμένα στοιχεία. Οι βρόχοι υστέρησης χρησιμοποιούνται μετά τον υπολογισμό του πεδίου, για τον υπολογισμό των απωλειών των σιδηρομαγνητικών υλικών, όπως θα περιγραφεί σε επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 8.2: Βρόχοι υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού, [8.45].

Η τυπική μορφή μιας καμπύλης πρώτης μαγνήτισης η οποία παρέχεται από τους κατασκευαστές σιδηρομαγνητικών υλικών φαίνεται στο Σχήμα 8.3. Η καμπύλη μπορεί να δίνεται είτε με τη μορφή της χαρακτηριστικής B-H ή με τη μορφή της χαρακτηριστικής μ-H ή και με τους δύο τρόπους σε κοινό διάγραμμα.

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 8.2.1.2, η μοντελοποίηση του τρόπου μεταβολής της μαγνητικής διαπερατότητας του υλικού, η οποία συνδέεται άμεσα με την καμπύλη μαγνήτισής του, παίζει σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες σύγκλισης της μεθόδου η οποία χρησιμοποιείται κατά την επίλυση ενός μη γραμμικού προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 8.3 (β), η μορφή της καμπύλης μ-Η σε μικρές τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου προκαλεί έντονες διακυμάνσεις της παραγώγου $\frac{\partial \mu}{\partial H}$ (η οποία χρησιμοποιείται στη Σχέση (8.13)), δυσχεραίνοντας έτσι τη σύγκλιση της αναγωγικής μεθόδου. Αντίθετα, η μορφή της ισοδύναμης καμπύλης ν-Β², η οποία φαίνεται στο Σχήμα 8.3, παρουσιάζει μεγαλύτερη ομαλότητα και μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα χαρακτηριστικά σύγκλισης της αναγωγικής μεθόδου.

Για τη μοντελοποίηση των καμπυλών των Σχημάτων 8.3 και 8.4, πραγματοποιείται προσέγγισή τους με ισοδύναμα ευθεία τμήματα πολύ μικρού μήκους. Τα δεδομένα των καμπυλών αντιπροσωπεύονται από μία ομάδα σημείων που περιγράφεται με ζεύγη τιμών μ-Η (ή v-B²) ενώ τα ενδιάμεσα σημεία υπολογίζονται με κάποιου είδους παρεμβολή. Ο απλούστερος τρόπος είναι η χρήση γραμμικής παρεμβολής, με την οποία η καμπύλη μαγνήτισης προσεγγίζεται με πολύγωνο. Ωστόσο, μια τέτοια παρεμβολή μπορεί να είναι ασυνεχής σε κάποια από τα σημεία της καμπύλης, ενώ η χρήση της μεθόδου Newton-Raphson απαιτεί τη συνέχεια της συνάρτησης μ(Η) (ή v(B²)). Γι αυτό το λόγο, τα ενδιάμεσα σημεία της καμπύλης με πολυώνυμα παρεμβολής τρίτου βαθμού, τύπου spline (cubic spline interpolating polynomials) ενώ τα σημεία εκτός του εύρους προσέγγισης της καμπύλης μπορούν να προσεγγιστούν γραμμικά. Στη συνέχεια δίνεται μία σύντομη περιγραφή του παραπάνω τρόπου παρεμβολής, [8.46].



Σχήμα 8.3: Τυπική μορφή καμπύλης πρώτης μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού. (α) σε άξονες Β-Η (β) σε άξονες μ-Η



Σχήμα 8.4: Ισοδύναμη μορφή καμπύλης πρώτης μαγνήτισης σιδηρομαγνητικού υλικού, σε άξονες ν-B².

Θεωρείται η συνάρτηση προς παρεμβολή μ=μ(H), στο διάστημα [H_{min},H_{max}] και τα σημεία H_i (i=1,...,n έτσι ώστε H_{min}=H₁<H₂....<H_n=H_{max}) για τα οποία υπάρχει ακριβής τιμή της μ_i=μ(H_i). Το πολυώνυμο παρεμβολής τύπου spline S(H) ορίζεται έτσι ώστε:

- to S(H) kai η paragraphic tou na eínai sunechis sto diásthma $[H_{min}, H_{max}]$,
- to S(H) se káde diásthma $[H_i, H_{i+1}]$ na dínetai apó poluώnumo trítou badmoú,
- τα σημεία $S(H_i)$ να είναι ίσα με $\mu_i = \mu(H_i)$,
- $\Lambda \alpha \mu \beta \alpha \nu \epsilon \tau \alpha \iota \eta$ or $\alpha \kappa \eta \sigma \nu \nu \theta \eta \kappa \eta \mu_1'' = \mu_n'' = 0$.

Με τη χρήση της προσέγγισης S(H)= μ = $a_i\mu_i + b_i\mu_{i+1} + c_i\mu''_i + d_i\mu''_{i+1}$, οι συντελεστές μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση των Σχέσεων (8.14) έως (8.17).

$$a_{i} = \frac{H_{i+1} - H}{H_{i+1} - H_{i}}$$
(8.14)

$$b_{i} = \frac{H - H_{i}}{H_{i+1} - H_{i}}$$
(8.15)

$$c_{i} = \frac{1}{6} (a_{i}^{3} - a_{i}) (H_{i+1} - H_{i})^{2}$$
(8.16)

$$d_{i} = \frac{1}{6} (b_{i}^{3} - b_{i})(H_{i+1} - H_{i})^{2}$$
(8.17)

Η πρώτη παράγωγος της S ως προς το μέγεθος Η είναι:

$$\frac{dS(H)}{dH} = \frac{d\mu}{dH} = \frac{\mu_{i+1} - \mu_i}{H_{i+1} - H_i} - \frac{3a_i^2 - 1}{6}(H_{i+1} - H_i)\mu_i'' + \frac{3b_i^2 - 1}{6}(H_{i+1} - H_i)\mu_i''$$
(8.18)

Ενώ η δεύτερη παράγωγος είναι:

$$\frac{d^2 S(H)}{dH^2} = \frac{d^2 \mu}{dH^2} = a_i \mu_i'' + b_i \mu_{i+1}''$$
(8.19)

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, ικανοποιείται η απαίτηση συνέχειας της δεύτερης παραγώγου της συνάρτησης στο διάστημα $[H_{i-1},H_i]$ και $[H_i,H_{i+1}]$. Η συνέχεια της πρώτης παραγώγου απαιτεί οι τιμές $\frac{dS}{dH}$ στο σημείο H_i των διαστημάτων $[H_{i-1},H_i]$ και $[H_i,H_{i+1}]$ να είναι ίσες. Έτσι, με υπολογισμό των τιμών στο $H=H_i$ για τα δύο διαστήματα και εξίσωση των αντίστοιχων τιμών προκύπτει ότι:

$$\frac{\mathbf{H}_{i} - \mathbf{H}_{i-1}}{6} \mu_{i-1}'' + \frac{\mathbf{H}_{i+1} - \mathbf{H}_{i-1}}{3} \mu_{i}'' + \frac{\mathbf{H}_{i+1} - \mathbf{H}_{i}}{6} \mu_{i+1}'' = \frac{\mu_{i+1} - \mu_{i}}{\mathbf{H}_{i+1} - \mathbf{H}_{i}} - \frac{\mu_{i} - \mu_{i-1}}{\mathbf{H}_{i} - \mathbf{H}_{i-1}}$$
(8.20)

Η εξίσωση (8.20) μπορεί να εφαρμοστεί για i=2,...,n-1 για κάθε διάστημα. Έτσι, προκύπτουν n-2 γραμμικά ανεξάρτητες εξισώσεις για τους n αγνώστους μ''_i στα σημεία του διαστήματος [H_{min},H_{max}]. Οι δύο επιπλέον αναγκαίες εξισώσεις προκύπτουν από την οριακή συνθήκη $\mu''_1 = \mu''_n = 0$. Γνωρίζοντας τις παραγώγους της συνάρτησης παρεμβολής, είναι πλέον γνωστοί και οι συντελεστές της.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης συναρτήσεων παρεμβολής τύπου spline επικεντρώνεται στο γεγονός ότι το γραμμικό σύστημα των εξισώσεων από το οποίο προκύπτουν οι συντελεστές της πρέπει να λυθεί μία μόνο φορά, για να ληφθούν οι τιμές της δεύτερης

παραγώγου της συνάρτησης παρεμβολής, ανεξάρτητα από τον απαιτούμενο αριθμό αναγωγών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, δεν υπάρχει σημαντική επιπλέον υπολογιστική επιβάρυνση για την πραγματοποίηση της παρεμβολής των τιμών της καμπύλης. Πρέπει ωστόσο να δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στη μονοτονία των σημείων της παρεμβαλλόμενης συνάρτησης μ=μ(H), η οποία είναι αναγκαία για την πραγματοποίηση της παραπάνω διαδικασίας.

8.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του Κεφαλαίου, για τον υπολογισμό των απωλειών κενού φορτίου προσομοιώνεται η δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος (κενού φορτίου) των μετασχηματιστών. Κατά τη δοκιμή αυτή, το πηνίο Υψηλής Τάσης (ΥΤ) ανοιχτοκυκλώνεται, ενώ στο πηνίο Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) επιβάλλεται τάση ίση με την ονομαστική. Έτσι, κατά την προσομοίωση της δοκιμής κενού φορτίου θεωρείται ότι το πηνίο ΧΤ διαρρέεται από το ρεύμα μαγνήτισης ενώ το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο ΥΤ λαμβάνεται ίσο με μηδέν. Με τη διαδικασία επίλυσης που περιγράφεται στην Παράγραφο 8.2 λαμβάνονται οι τιμές του πεδίου σε όλο το χώρο του μοντέλου του εξεταζόμενου μετασχηματιστή, από τις οποίες υπολογίζεται και η τιμή των απωλειών πυρήνα, με τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

Από την επίλυση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτει η τιμή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής $B_m(j)$ σε κάθε τετράεδρο j του πλέγματος (θεωρούνται και πάλι πεπερασμένα στοιχεία πρώτου βαθμού, στο εσωτερικό των οποίων, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.4.1 του Κεφαλαίου 2, η συνάρτηση μορφής μεταβάλλεται γραμμικά, δίνοντας μία τιμή μαγνητικής επαγωγής και έντασης του μαγνητικού πεδίου ανά τετράεδρο). Από την τιμή αυτή, μπορεί να προσδιοριστεί η αντίστοιχη τιμή ειδικών απωλειών SW_m(j) ενός τετραέδρου που ανήκει σε περιοχή πυρήνα, με βάση την καμπύλη του Σχήματος 8.5. Η καμπύλη αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή του υλικού του πυρήνα, για συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας του μετασχηματιστή. Περιλαμβάνει τις απώλειες δινορρευμάτων και υστέρησης και εξάγεται από μετρήσεις του κατασκευαστή στο υλικό. Η τιμή των ειδικών απωλειών, πολλαπλασιαζόμενη με τον όγκο του τετραέδρου V_i, και την πυκνότητα του υλικού του πυρήνα, ρ_c, δίνει τη στοιχειώδη απώλεια W(j) εντός του τετραέδρου, σύμφωνα με τη Σχέση (8.21). Έτσι, οι συνολικές απώλειες πυρήνα μπορούν να προκύψουν αθροίζοντας τις στοιχειώδεις απώλειες όλων των τετραέδρων που αναπαριστούν τον πυρήνα στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με τη Σχέση (8.22), όπου Ν, συνολικός αριθμός τετραέδρων που αποτελούν το υλικό του πυρήνα.

$$W(j) = SW_{m}(j) \cdot V_{j} \cdot \rho_{c}$$
(8.21)

$$W = \sum_{j=1}^{N} W(j)$$
 (8.22)

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται εποπτικά στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 8.6. Για την εξαγωγή των τιμών ειδικών απωλειών από την καμπύλη του Σχήματος 8.5 χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή. Η χρήση πιο περίπλοκης μεθόδου παρεμβολής, όπως αυτή που περιγράφεται στην Παράγραφο 8.2.1.3 δεν είναι αναγκαία, καθώς οι τιμές που λαμβάνονται από την παρεμβολή χρησιμοποιούνται μόνο για τη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, χωρίς να επηρεάζουν τη σύγκλιση της αναγωγικής μεθόδου που χρησιμοποιείται για την επίλυσή της.



Σχήμα 8.5: Καμπύλη ειδικών απωλειών σιδηρομαγνητικού υλικού (για δεδομένη συχνότητα λειτουργίας).



Σχήμα 8.6: Διάγραμμα ροής υπολογισμού απωλειών κενού φορτίου με βάση τις τοπικές τιμές πεδίου του πυρήνα.

Όπως φαίνεται από την περιγραφή του τρόπου υπολογισμού των απωλειών αλλά και του τρόπου διεξαγωγής της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 8.2, οι ιδιότητες του υλικού του πυρήνα αναπαριστώνται τόσο μέσω της καμπύλης πρώτης μαγνήτισης όσο και μέσω της καμπύλης ειδικών απωλειών. Η ακρίβεια αναπαράστασης των ιδιοτήτων αυτών είναι ζωτικής σημασίας για την εξαγωγή ακριβών αποτελεσμάτων απωλειών κενού φορτίου. Στον υπολογισμό των απωλειών που παρουσιάζεται στο παρόν Κεφάλαιο, τα στοιχεία αυτά στηρίζονται εξ'ολοκλήρου στα δεδομένα που παρέχει ο κατασκευαστής του υλικού (με τη μορφή των αντίστοιχων καμπυλών). Στην επόμενη παράγραφο δίνεται μία αναλυτικότερη περιγραφή των χαρακτηριστικών διαφόρων ειδών μαγνητικής λαμαρίνας που διατίθενται από τους κατασκευαστές για τη διαμόρφωση των πυρήνων μετασχηματιστών ισχύος, στα οποία γίνεται αναφορά στη συνέχεια του Κεφαλαίου, κατά την παρουσίαση της εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό των απωλειών κενού φορτίου σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών.

8.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΠΥΡΗΝΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥΣ

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

Για την εξασφάλιση της ομοιογένειας κατά την προδιαγραφή, παραγωγή και αγορά μαγνητικών λαμαρίνων, έχει καθιερωθεί η ταξινόμησή τους με βάση τις απώλειες πυρήνα. Ο χαρακτηρισμός του κάθε είδους δίνεται συνήθως από το χαρακτήρα *M*, ακολουθούμενο από κάποιο αριθμό. Ο χαρακτήρας *M* υποδηλώνει τον όρο μαγνητικό υλικό (magnetic material) ενώ ο αριθμός είναι ενδεικτικός των απωλειών πυρήνα του εκάστοτε είδους. Την εποχή που υιοθετήθηκε αυτός ο χαρακτηρισμός¹, ο αριθμός αυτός αντιστοιχούσε σε περίπου δέκα φορές την απώλεια πυρήνα (εκφρασμένη σε Watt/pound) για δεδομένο πάχος λαμαρίνας (29 gauge), μετρημένη σε μαγνητική επαγωγή 15 kilogauss και σε συχνότητα 60 Hz. Σήμερα, ωστόσο, ο αριθμός αυτός δεν αντιπροσωπεύει τις ίδιες απώλειες, δεδομένου ότι τα μαγνητικά υλικά έχουν βελτιωθεί σημαντικά και οι αντίστοιχες απώλειες πυρήνα έχουν μειωθεί δραστικά. Ωστόσο, οι αριθμοί αυτοί δεν αντιπροσωπεύουν μόνο την κλάση απωλειών του συγκεκριμένου υλικού, αλλά και τη σχετική μεταβολή της τιμής απωλειών μεταξύ των υλικών της ίδιας κλάσης.

Τα υλικά των μαγνητικών πυρήνων των μετασχηματιστών μπορούν να διαιρεθούν σε δύο βασικές κλάσεις με βάση τις κύριες μαγνητικές ιδιότητες του υλικού αλλά και τον τρόπο παραγωγής τους, [8.47]:

- Λαμαρίνες μη κατευθυνόμενων κόκκων: Σε αυτό το είδος λαμαρίνων, οι μαγνητικές ιδιότητες είναι πρακτικά ίδιες για όλες τις κατευθύνσεις μαγνήτισης. Ο όρος «μη κατευθυνόμενων κόκκων» χρησιμοποιείται για να τις διαφοροποιήσει από το άλλο είδος, το οποίο παράγεται με διεργασίες που δημιουργούν συγκεκριμένο προσανατολισμό ή κατεύθυνση των μαγνητικών ιδιοτήτων.
- Λαμαρίνες κατευθυνόμενων κόκκων: Ο όρος χρησιμοποιείται για να προδιαγράψει λαμαρίνες οι οποίες χαρακτηρίζονται από μαγνητικές ιδιότητες με έντονο προσανατολισμό σε σχέση με την κατεύθυνση της εξέλασής τους. Με τη διαδικασία

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

εξέλασης και ανόπτησης, κράματα κατάλληλης σύνθεσης μπορούν να αποκτήσουν μεταλλική κρυσταλλική δομή στην οποία οι κόκκοι του υλικού ευθυγραμμίζονται, έτσι ώστε οι μαγνητικές ιδιότητες να είναι πολύ μεγαλύτερες στην κατεύθυνση εξέλασης, σε σχέση με τις υπόλοιπες κατευθύνσεις.

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

8.4.1 Επίδραση μηχανικών καταπονήσεων και θερμικών κατεργασιών στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού του πυρήνα

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

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

Πρέπει ωστόσο να τονιστεί ότι, στην περίπτωση της λαμαρίνας κατευθυνόμενων κόκκων, η διαδικασία ελαχιστοποίησης των καταπονήσεων μέσω της ανόπτυσης δε μπορεί πάντα να οδηγήσει σε πλήρη ανάκτηση των μαγνητικών ιδιοτήτων. Έτσι, η επίδραση των μηχανικών καταπονήσεων και της θερμικής κατεργασίας του υλικού του πυρήνα επηρεάζει

τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του με τρόπο που μπορεί να προσδιοριστεί μόνο μέσω μετρήσεων μετά την τελική διαμόρφωση και ανόπτυση, δημιουργώντας έτσι ένα ποσοστό απόκλισης από τις καμπύλες που παρέχονται από τον κατασκευαστή της μαγνητικής λαμαρίνας. Αυτός είναι και ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των υπολογισμών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όπως θα φανεί και στη συνέχεια του Κεφαλαίου.

8.4.2 Εξαγωγή χαρακτηριστικών καμπυλών υλικού πυρήνα με μετρήσεις

Η εξαγωγή της καμπύλης πρώτης μαγνήτισης του υλικού του πυρήνα (Σχήμα 8.3) γίνεται από τον κατασκευαστή της λαμαρίνας με χρήση μηχανής Epstein, για DC διέγερση, σε δείγματα υλικού κομμένα σε διάφορες κατευθύνσεις ως προς την κατεύθυνση εξέλασης και μετά την υποβολή τους σε διαδικασία ανόπτυσης υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Με την ίδια διαδικασία προκύπτει και η καμπύλη ειδικών απωλειών (Σχήμα 8.5).

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

Στην Παράγραφο αυτή περιγράφεται η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τον προσδιορισμό των απωλειών κενού φορτίου σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών. Ειδικότερα, μελετώνται οι τρεις περιπτώσεις μετασχηματιστών της πρώτης και δεύτερης σειράς μετρήσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4 (ισχύος 400, 630 και 1000 kVA).

Για την πεδιακή ανάλυση των μετασχηματιστών σε συνθήκες κενού φορτίου, χρησιμοποιείται το μοντέλο του Σχήματος 3.9 του Κεφαλαίου 3, με την απλοποιημένη αναπαράσταση της γεωμετρίας των τυλιγμάτων, που περιγράφεται στην Παράγραφο 3.4.4.1. Επιλέγεται το μοντέλο με απλοποιημένη γεωμετρία τυλιγμάτων, δεδομένου ότι στην περίπτωση των απωλειών κενού φορτίου, η γεωμετρία των τυλιγμάτων δεν επηρεάζει ουσιαστικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της ροής διέρχεται μέσα από τους πυρήνες (σε αντίθεση με την περίπτωση της δοκιμής βραχυκυκλώματος, όπου το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής περνά μέσα από τα πηνία και η ακριβής αναπαράσταση της περιοχής των πυρήνων δεν είναι ζωτικής σημασίας).

Οι απώλειες κενού φορτίου που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνονται με τις μετρημένες τιμές απωλειών από τον κατασκευαστή (άθροισμα μετρημένων απωλειών τριών φάσεων).

8.5.1 Μετασχηματιστής 400 kVA πρώτης σειράς μετρήσεων

Τα στοιχεία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την πεδιακή ανάλυση του μετασχηματιστή 400 kVA σε συνθήκες κενού φορτίου παρατίθενται στον Πίνακα 4.3 και το Σχήμα 4.2 του Κεφαλαίου 4. Οι διαστάσεις και η συνολική γεωμετρική διαμόρφωση του μοντέλου είναι ίδια με αυτά του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της τάσης βραχυκύκλωσης. Οι δύο βασικές διαφορές του μοντέλου συνίστανται στον προσδιορισμό μη γραμμικής καμπύλης μαγνήτισης του υλικού του πυρήνα και στην επιβολή διαφορετικού ρεύματος στα πηνία XT και YT σύμφωνα με τις συνθήκες οι οποίες επικρατούν κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος του μετασχηματιστή.

Για την προσομοίωση της δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος θεωρείται ότι το πηνίο ΥΤ αποτελείται από μηδενικά αμπερελίγματα (δεδομένου ότι είναι ανοιχτοκυκλωμένο) ενώ το πηνίο ΧΤ αποτελείται από αμπερελίγματα που δίνονται από τον αριθμό των ελιγμάτων του, πολλαπλασιασμένο με το ρεύμα μαγνήτισης. Ως ρεύμα μαγνήτισης λαμβάνεται το ρεύμα της δοκιμής κενού φορτίου που έχει μετρηθεί από τον κατασκευαστή κατά τη διεξαγωγή της αντίστοιχης δοκιμής (ειδικότερα, λαμβάνεται η μέση τιμή του ρεύματος των τριών φάσεων). Τα αμπερελίγματα των πηνίων του μετασχηματιστή 400 kVA για τη δοκιμή κενού φορτίου παρατίθενται στον Πίνακα 8.1. Ο Πίνακας 8.1, όπως και όλα τα στοιχεία δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος και της αντίστοιχης προσομοίωσης με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αναφέρονται σε ένα επίπεδο ΥΤ αφού η δοκιμή πραγματοποιείται στη ΧΤ (εξάλλου, το τύλιγμα ΥΤ δε διαρρέεται από ρεύμα, οπότε η συνδεσμολογία των υποπηνίων του δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα).

Πηνίο ΧΤ		Πηνίο ΥΤ								
		Υποπηνίο Ι		Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4		
Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	N	Ι	
20	4.71	501	0	433	0	433	0	365	0	
Συνολικά α	Συνολικά αμπερελίγματα									
94.2		0								

Πίνακας	8.1:	Αμπερελίγματα	πηνίου	υψηλής	και	χαμηλής	τάσης	για	τη	δοκιμή
		ανοιχτού κυκλώ	ματος το	υ μετασχη	ματισ	στή 400 kV	A.			

Στα Σχήματα 8.7 και 8.8 δίνονται οι καμπύλες πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα του μετασχηματιστή 400 kVA. Πρόκειται για λαμαρίνα τύπου M4, πάχους ελασμάτων 0.27 mm. Οι καμπύλες των Σχημάτων 8.7 και 8.8 δίνονται από τον κατασκευαστή της μαγνητικής λαμαρίνας και αναφέρονται στο υλικό πριν την τελική του κατεργασία στη μονάδα παραγωγής μετασχηματιστών για τη διαμόρφωσή του σε τυλιχτούς πυρήνες.

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου, στην περίπτωση της δοκιμής κενού φορτίου, η μαγνητική ροή διέρχεται κυρίως από την περιοχή των πυρήνων, καθιστώντας έτσι την ακριβή αναπαράστασή τους σημαντικό παράγοντα για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, η κατασκευή του πλέγματος στην περίπτωση της δοκιμής ανοιχτού κυκλώματος έγινε με διαφορετικό τρόπο απ'ότι στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στην ομοιογένεια και πυκνότητα του πλέγματος στην περιοχή των πυρήνων. Στο Σχήμα 8.9 απεικονίζεται ένα από τα πυκνότερα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν, στο οποίο είναι εμφανής ο διαφορετικός βαθμός διακριτότητας που έχει υιοθετηθεί στην περιοχή των πηνίων και των πυρήνων. Στην περίπτωση των πλεγμάτων που κατασκευάστηκαν για τις προσομοιώσεις αυτού του Κεφαλαίου (σε αντίθεση με τα αντίστοιχα του Κεφαλαίου 4), το πλέγμα στην περιοχή των πυρήνων χωρίς πολύ μεγάλη αύξηση του συνολικού αριθμού κόμβων πλέγματος του μοντέλου.

Για τη διερεύνηση της επίπτωσης του αριθμού κόμβων του πλέγματος στην ακρίβεια προσδιορισμού των απωλειών κενού φορτίου, χρησιμοποιήθηκαν και πάλι διάφορες πυκνότητες πλέγματος, έως και 100000 κόμβους περίπου. Το Σχήμα 8.10 απεικονίζει την κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος, για το πυκνότερο από τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν. Στο Σχήμα αυτό φαίνεται ότι, όπως αναμένεται, στην περίπτωση της λειτουργίας κενού φορτίου, το σύνολο της μαγνητικής ροής διέρχεται από τους πυρήνες, ενώ η μαγνητική επαγωγή στα πηνία είναι πρακτικά αμελητέα.

Καμπύλη μαγνήτισης λαμαρίνας Μ4-0.27



Σχήμα 8.7: Καμπύλη μαγνήτισης υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 400 kVA.



Καμπύλη ειδικών απωλειών λαμαρίνας Μ4-0.27

Σχήμα 8.8: Καμπύλη ειδικών απωλειών υλικού πυρήνα μετασχηματιστή 400 kVA.

Στον Πίνακα 8.2 φαίνονται οι τιμές ρεύματος μαγνήτισης και απωλειών που μετρήθηκαν από τον κατασκευαστή κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος. Παρατίθενται οι τιμές και των τριών φάσεων, η διακύμανση των οποίων οφείλεται, εκτός από την ασυμμετρία του μαγνητικού κυκλώματος των τριών φάσεων του μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα, και στο γεγονός ότι οι τέσσερις πυρήνες που συναρμολογούνται για την κατασκευή του μετασχηματιστή εμφανίζουν έντονα διαφοροποιημένα μαγνητικά χαρακτηριστικά λόγω της κατεργασίας τους, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 8.4.1. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει

και τη δυσκολία πρόβλεψης της τιμής των απωλειών με βάση τις καμπύλες μαγνήτισης και ειδικών απωλειών που δίνονται από τον κατασκευαστή της μαγνητικής λαμαρίνας. Η δυσκολία αυτή είναι εμφανής στον Πίνακα 8.3, όπου φαίνονται τα αποτελέσματα απωλειών κενού φορτίου τα οποία υπολογίστηκαν με χρήση των αποτελεσμάτων της πεδιακής ανάλυσης, και η σύγκρισή τους με τις μετρημένες τιμές για διάφορες πυκνότητες πλεγμάτων. Η σύγκριση έγινε με το άθροισμα των απωλειών των τριών φάσεων του Πίνακα 8.2, το οποίο στην περίπτωση του μετασχηματιστή 400 kVA είναι ίσο με **818 W**. Η τιμή των απωλειών του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψε μετά την επίλυσή του, με τη διαδικασία της Παραγράφου 8.3 και την καμπύλη του Σχήματος 8.8 για συχνότητα λειτουργίας 50 Hz. Δεδομένου ότι το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη τις συμμετρίες του προβλήματος, αναπαριστά μόνο το 1/8 της πραγματικής γεωμετρίας του μετασχηματιστή, άρα και των πυρήνων του, οι απώλειες που υπολογίστηκαν από τη Σχέση (8.22) πολλαπλασιάστηκαν με συντελεστή 8 για την εξαγωγή των συνολικών απωλειών κενού φορτίου. Η απόκλιση η οποία εμφανίζεται στον Πίνακα 8.2 προέκυψε με τη χρήση της Σχέσης (8.23):

απόκλιση	= <u> Ρμετρημένες</u> - Ρυπολογισμένες κενού φορτίου - Ρκενού φορτίου Ρμετρημένες κενού φορτίου - Τ	100% (8.23)
Μετρήσεις δοκ	αμής κενού φορτίου για το μετα	ισχηματιστή 400 kVA
Φάση	Απώλειες πυρήνα (W)	Ρεύμα μαγνήτισης (Α)
А	252	5,04
В	198	4,34
С	368	4,72
	P _o ,=818	$I_m^{\mu\epsilon\sigma\sigma} = 4,70$





Σχήμα 8.9: Πλέγμα μοντέλου μετασχηματιστή 400 kVA για την προσομοίωση της λειτουργίας κενού φορτίου (πυκνότητας περίπου 100000 κόμβων).



Σχήμα 8.10: Κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής για το M/Σ 400 kVA σε δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος.

Τα δεδομένα του Πίνακα 8.3 απεικονίζονται γραφικά στα Σχήματα 8.11 και 8.12, στα οποία φαίνεται η μεταβολή της υπολογισμένης τιμής απωλειών κενού φορτίου συναρτήσει των κόμβων του πλέγματος, και η μεταβολή της απόκλισής της από τις μετρημένες τιμές.

Αριθμός κόμβων	Υπολογισμένη τιμή	Απόκλιση (%)
πλέγματος	απωλειών πυρήνα (W)	
3306	603,17	26,56
30956	635,38	22,33
53279	619,77	24,70
103514	615,99	24,23





Απώλειες κενού φορτίου Μ/Σ 400kVA μετρήσεων

Σχήμα 8.11: Μεταβολή της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το Μ/Σ 400 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.



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



Σχήμα 8.12: Μεταβολή της απόκλισης της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή για το M/Σ 400 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.

8.5.2 Μετασχηματιστής 1000 kVA πρώτης σειράς μετρήσεων

Τα στοιχεία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την πεδιακή ανάλυση του μετασχηματιστή 1000 kVA σε συνθήκες κενού φορτίου παρατίθενται στον Πίνακα 4.4 και το Σχήμα 4.3 του Κεφαλαίου 4. Τα αμπερελίγματα των πηνίων του μετασχηματιστή 1000 kVA για τη δοκιμή κενού φορτίου παρατίθενται στον Πίνακα 8.4.

	Παυίο ΥΤ			Πηνίο ΥΤ							
	Πηνίο ΧΤ		Υποπη	vío 1	Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4		
	Ν	Ι	N	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	
20 kV	14	7.54	334	0	606	0	81	0	191	0	
	Συνολικά αμπερελίγματα		Συνολικά αμπερελίγματα								
20 kV	106						0				

Πίνακας 8.4: Αμπερελίγματα πηνίου υψηλής και χαμηλής τάσης για τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος του μετασχηματιστή 1000 kVA.

Μετρήσεις δοκ	Μετρήσεις δοκιμής κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 1000 kVA							
Φάση	Φάση Απώλειες πυρήνα (W) Ρε							
А	426	7,90						
В	392	7,02						
С	610	7,70						
	P _{oλ} =1428	$I_m^{\mu\acute{e}\sigma o} = 7,54$						

Πίνακας 8.5: Μετρημένες απώλειες κενού φορτίου και ρεύμα μαγνήτισης τριών φάσεων για το μετασχηματιστή 1000 kVA.

Το υλικό του πυρήνα του μετασχηματιστή 1000 kVA είναι το ίδιο με αυτό του μετασχηματιστή 400 kVA (M4-0.27mm). Έτσι οι καμπύλες πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα είναι αυτές των Σχημάτων 8.7 και 8.8, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 8.5 δίνει τις τιμές ρεύματος μαγνήτισης και απωλειών που μετρήθηκαν από τον κατασκευαστή κατά τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος. Σε αυτήν την περίπτωση, οι τιμές των απωλειών των τριών φάσεων εμφανίζουν ακόμη μεγαλύτερη διακύμανση σε σχέση με τις αντίστοιχες του Πίνακα 8.2 Ο Πίνακας 8.6 δίνει τις υπολογισμένες τιμές απωλειών στο μετασχηματιστή 1000 kVA για διάφορες πυκνότητες πλέγματος και την απόκλισή τους από

τις αντίστοιχες συνολικές μετρημένες απώλειες, οι οποίες είναι ίσες με **1428** W. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται γραφικά στα Σχήματα 8.13 και 8.14, στα οποία φαίνεται η μεταβολή της υπολογισμένης τιμής απωλειών κενού φορτίου συναρτήσει των κόμβων του πλέγματος, και η μεταβολή της απόκλισής της από τις μετρημένες τιμές.

Αριθμός	Υπολογισμένη τιμή	Απόκλιση (%)
κόμβων πλέγματος	απωλειών πυρήνα (W)	
2015	1184,24	17,07
13978	1210,97	15,20
25970	1205,50	15,58
54203	1211,64	15,16
94981	1204,24	15,67

Πίνακας 8.6: Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών απωλειών κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 1000 kVA.









Απόκλιση υπολογισμένων από τις μετρημένες απώλειες κενού φορτίου M/Σ 1000kVA μετρήσεων

Σχήμα 8.14: Μεταβολή της απόκλισης της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή για το M/Σ 1000 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.

8.5.3 Μετασχηματιστής 630 kVA δεύτερης σειράς μετρήσεων

Τα στοιχεία του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την πεδιακή ανάλυση του μετασχηματιστή 630 kVA σε συνθήκες κενού φορτίου παρατίθενται στον Πίνακα 4.12 και το Σχήμα 4.27 του Κεφαλαίου 4. Τα αμπερελίγματα των πηνίων του μετασχηματιστή 630 kVA για τη δοκιμή κενού φορτίου παρατίθενται στον Πίνακα 8.7.

	Πηνίο ΧΤ		Πηνίο ΥΤ							
			Υποπη		vío 1	l Υποπηνίο 2		Υποπηνίο 3		Υποπηνίο 4
	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι	Ν	Ι
20 kV	16	9.26	339	0	692	0	155	0	199	0
	Συνολικά αμπερελίγματα		Συνολικά αμπερελίγματα							
20 kV	148.16						0			

Πίνακας 8.7: Αμπερελίγματα πηνίου υψηλής και χαμηλής τάσης για τη δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος του μετασχηματιστή 630 kVA.

Μετρήσεις δοκ	Μετρήσεις δοκιμής κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 630 kVA								
Φάση	Απώλειες πυρήνα (W)	Ρεύμα μαγνήτισης (Α)							
А	201	10,23							
В	210	8,04							
С	720	9,51							
	P _{oλ} =1131	$I_m^{\mu\acute{e}\sigma\sigma} = 9,26$							

Πίνακας 8.8: Μετρημένες απώλειες κενού φορτίου και ρεύμα μαγνήτισης τριών φάσεων για το μετασχηματιστή 630 kVA.

Το υλικό του πυρήνα του μετασχηματιστή 630 kVA είναι το ίδιο με αυτό των μετασχηματιστών 400 και 1000 kVA (M4-0.27mm). Έτσι οι καμπύλες πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα είναι αυτές των Σχημάτων 8.7 και 8.8, αντίστοιχα.

Ο Πίνακας 8.9 δίνει τις υπολογισμένες τιμές απωλειών στο μετασχηματιστή 1000 kVA για διάφορες πυκνότητες πλέγματος και την απόκλισή τους από τις αντίστοιχες μετρημένες απώλειες, οι οποίες είναι ίσες με **1131W**. Η τιμή αυτή είναι η συνολική τιμή των απωλειών των τριών φάσεων του Πίνακα 8.8.

Σε αυτήν την περίπτωση, δε χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των μετρήσεων σε 19 περιπτώσεις μετασχηματιστών της μελέτης 630/82008 (με βάση την οποία κατασκευάστηκαν οι εξεταζόμενοι μετασχηματιστές ισχύος 630 kVA), όπως έγινε στο Κεφάλαιο 4, με βάση τις τιμές του Πίνακα 4.15, επειδή δεν υπήρχαν αντίστοιχες μετρήσεις του ρεύματος μαγνήτισης στις περιπτώσεις αυτές. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε ως μέτρο σύγκρισης η δοκιμή κενού φορτίου για την οποία υπήρχαν δεδομένα ρεύματος μαγνήτισης των τριών φάσεων.

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 8.9 απεικονίζονται γραφικά στα Σχήματα 8.15 και 8.16, στα οποία φαίνεται η μεταβολή της υπολογισμένης τιμής απωλειών κενού φορτίου συναρτήσει των κόμβων του πλέγματος, και η μεταβολή της απόκλισής της από τις μετρημένες τιμές.
Αριθμός κόμβων	Υπολογισμένη τιμή	Απόκλιση (%)
πλέγματος	απωλειών πυρήνα (W)	
3605	930,32	17,74
7476	925,42	18,18
35084	946,43	16,32
51834	966,04	14,59

Πίνακας 8.9: Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών απωλειών κενού φορτίου για το μετασχηματιστή 630 kVA.



Σχήμα 8.15: Μεταβολή της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το Μ/Σ 630 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.





Σχήμα 8.16: Μεταβολή της απόκλισης της τιμής απωλειών κενού φορτίου που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από την αντίστοιχη μετρημένη τιμή για το M/Σ 630 kVA συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος.

8.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύγκριση των καμπυλών των Σχημάτων 8.11 έως 8.16, προκύπτει το γενικό συμπέρασμα ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προβλέπει τιμές απωλειών σιδήρου

μικρότερες κατά 15-20% περίπου σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρημένες. Η απόκλιση ξεκινά με ελαφρά μεγαλύτερο σφάλμα για μικρές πυκνότητες πλέγματος και σταθεροποιείται στην τελική τιμή της για πυκνότητες άνω των 40000 κόμβων. Σε γενικές γραμμές, το σφάλμα δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις κατά τον υπολογισμό των απωλειών (τουλάχιστον μέχρι τα πλέγματα πυκνότητας 100000 κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν). Η απόκλιση αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι, όπως περιγράφηκε στην Παράγραφο 8.4, η χρήση των καμπυλών πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα δε λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του κατά τη διαμόρφωσή του σε πυρήνες. Έτσι, χάνεται πολύ σημαντικό ποσοστό πληροφορίας για τα πραγματικά μαγνητικά χαρακτηριστικά της λαμαρίνας, τα οποία παρουσιάζουν έντονη διακύμανση στους τέσσερις πυρήνες του τριφασικού μετασχηματιστή, όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις των Πινάκων 8.2, 8.5 και 8.8 (με χαρακτηριστικότερη την περίπτωση του Πίνακα 8.8, όπου οι απώλειες της φάσης C είναι μεγαλύτερες από το τριπλάσιο των απωλειών των φάσεων Α και Β). Η μείωση του σφάλματος μπορεί να επιτευχθεί μόνο με κατάλληλη τροποποίηση των καμπυλών πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα, με πραγματοποίηση τοπικών μετρήσεων των χαρακτηριστικών των διαμορφωμένων πυρήνων σε ήδη κατασκευασμένους μετασγηματιστές.

Ένας σημαντικός παράγοντας αύξησης των απωλειών κενού φορτίου, ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αναπαράσταση του υλικού του πυρήνα είναι η ανομοιομορφία που παρουσιάζει η κατανομή της ροής στον πυρήνα λόγω των διακένων που δημιουργούνται μεταξύ των ελασμάτων του, λόγω της κοπής του μαγνητικού υλικού σε φύλλα. Τα διάκενα αυτά διατάσσονται κατά μήκος του σκέλους του πυρήνα με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 8.17. Τα διάκενα αυτά δημιουργούν ανομοιομορφία στην κατανομή της μαγνητικής ροής κατά μήκος του πυρήνα, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της τοπικής τιμής της, η οποία μπορεί να ξεπερνά έως και 20% τη μέση τιμή του μέτρου μαγνητικής επαγωγής στο υπόλοιπο τμήμα του πυρήνα, ([8.48] – [8.50]).



Σχήμα 8.17: Διάταξη διακένων μεταξύ των ελασμάτων του υλικού του πυρήνα, λόγω της κοπής του σε φύλλα.

Η διάταξη των ελασμάτων του πυρήνα του Σχήματος 8.17 δε λαμβάνεται υπόψη στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του παρόντος Κεφαλαίου, το οποίο θεωρεί ότι το υλικό του πυρήνα κατανέμεται ομοιόμορφα στην περιοχή των πυρήνων. Έτσι, η λεπτομερής αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας των πυρήνων θα επηρεάσει σημαντικά την ακρίβεια πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου (κατά τρόπο αντίστοιχο με την επίδραση της λεπτομερούς αναπαράστασης των πηνίων στην ακρίβεια πρόβλεψης του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης). Ένας ακόμη τρόπος μείωσης των αποκλίσεων που εμφανίστηκαν κατά τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι η συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού του πυρήνα με αναλυτικές μεθοδολογίες με σκοπό την προσαρμογή τους για την κατά περιοχές εφαρμογή τους σε μοντέλα μακροσκοπικής κλίμακας (όπως είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Μία τέτοια συστηματική μελέτη των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού μπορεί να γίνει με τη χρήση του μοντέλου υστέρησης Preisach-Neel. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση των ιδιοτήτων της μαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των πυρήνων των μετασχηματιστών, λαμβάνοντας υπόψη τα τοπικά μετρημένα χαρακτηριστικά των διαμορφωμένων πυρήνων σε κατασκευασμένους μετασχηματιστές έτσι ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω προσαρμογή του στα μακροσκοπικά μοντέλα προσδιορισμού των απωλειών κενού φορτίου.

8.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [8.1] J. Reinert, A. Brockmeyer, R. W. A. A. De Doncker, "Calculation of Losses in Ferro- and Ferrimagnetic Materials Based on the Modified Steinmetz Equation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, No 4, pp. 1055-1061, Jul. 2001.
- [8.2] Ι. Α. Τεγόπουλος, "Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β: Μόνιμη Κατάσταση". Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [8.3] Π. Σ. Γεωργιλάκης, "Συμβολή Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης στη μείωση των Απωλειών Κενού Φορτίου Μετασχηματιστών Διανομής". Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2000.
- [8.4] D. N. Ewart, "Digital computer simulation model of steel-core transformer," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 1, pp. 174-183, Jul. 1986.
- [8.5] R. Yacamini, "The calculation of inrush current in three-phase transformers," *IEE Proc.*, Pt. B, vol. 133, pp. 235-242, Jan. 1986.
- [8.6] M. A. Rahman, "Digital simulation of magnetizing inrush currents in three-phase transformers," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 1, pp. 235-242, Oct. 1986.
- [8.7] M. Elleuch, M. Poloujadoff, "Three phase, three limb transformer model for switching transient calculations. Part I: Parameter Definition and Identification," *Acta Technica Csav.*, no. 1, pp. 100-117, 1988.
- [8.8] R. C. Y. Ling, A. Basak, "Investigation of magnetizing inrush current in a single-phase transformer," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 24, pp. 3217-3222, 1988.
- [8.9] J. D. Greene, C. A. Gross, "Nonlinear modeling of transformer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 24, pp. 434-438, 1988.
- [8.10] Ι. Προυσαλίδης, «Συμβολή στην ανάπτυξη μαθηματικών εργαλείων για ψηφιακή εξομοίωση της συμπεριφοράς των μετασχηματιστών και διακοπτών ισχύος σε ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
- [8.11] J. Proussalidis, N. D. Hatziargyriou, 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.
- [8.12] J.M. Proussalidis, N.D. Hatziargyriou, B.C. Papadias, "Representation of hysteresis in 3-phase transformer models for electromagnetic transients," *IEE Proceedings in Electric Power Applications*, Vol. 143, pp. 331-338, 1996.
- [8.13] S. Ray, "Analysis of transient behaviour of power system circuits containing iron cored coils," *IEE Proc*, Pt. C, Vol. 138, pp. no. 4, pp. 275-282, Jul. 1991.
- [8.14] G. Swift, "Power transformer core behavior under transient conditions," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 90, pp. 2206-2210, 1971.
- [8.15] K. Foster, F. E. Werner, R. M. Vecchio, "Loss separation measurements for several electrical steels," *J. Appl. Phys.*, Vol. 35, no. 11 pp. 8308-8310, Nov. 1982.
- [8.16] D. S. Takach, R. L. Boggavarapu, "Distribution transformer no load losses," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 140, pp. 181-192, 1985.
- [8.17] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 24, pp. 621-630, Jan. 1988.
- [8.18] F. Fiorello and Novikov, "An improved approach to power loss in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveforms," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 26, pp. 2904-2910, Sept. 1990.
- [8.19] M. Amar, F. Protat, "A simple method for the estimation of power losses in silicon iron sheets under alternating pulse voltage excitation," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30,

204

pp. 942-944, Mar. 1994.

- [8.20] E. Giannatasio, J. F. Faltermeir, M. Scatte, "L' apport des materiaux dans l' evolution des transformateurs de distribution," *Revue Generale d' Electricite*, no. 11, pp. 13-18, Dec. 1989.
- [8.21] Z. Valkovic, "Influence of transformer core design on power losses," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 18, pp. 801-804, 1982.
- [8.22] T. Nakata, "Numerical analysis of flux and loss distribution in electrical machinery," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 20, pp. 1750-1755, Sept. 1984.
- [8.23] R. S. Albir, A. J. Moses, "Reduction in transformer losses achieved by staggering lamination layers," *Physica Scripta*, Vol. 39, pp. 629-638, 1989.
- [8.24] Z. Godec, "Influence on slitting on core losses and magnetization of grain-oriented electrical steels," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 13, pp. 1053-1057, July 1977.
- [8.25] M. Elleuch, M. Poloujadoff, "A contribution to the modeling of three phase transformers using reluctances," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 32, no. 2, pp. 335-343, Mar. 1996.
- [8.26] M. Elleuch, M. Poloujadoff, "New transformer model including joint air gaps and lamination anisotropy," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 34, no. 5, pp. 3701-3711, Sept. 1998.
- [8.27] A. J. Moses, B. Thomas, "Problems in the design of Power Transformers," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 10, no. 2, pp. 148-150, June 1974.
- [8.28] A. J. Moses, "Comparison of transformer loss prediction from computed and measured flux density distribution," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 34, no. 4, pp. 1186-1188, Jul. 1998.
- [8.29] A. Mae, K. Harada, Y. Ishihara, T. Todaka, "A study of characteristic analysis of the three-phase transformer with step-lap wound-core," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 38, no. 2, pp. 829-832, Mar. 2002.
- [8.30] A. Basak, C. H. Yu, G. Lloyd, "Efficient transformer design by computing core loss using a novel approach," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, no. 5, pp. 3725-3728, Sept. 1994.
- [8.31] D. C. Jiles, D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," J. Magn. Mater., vol. 61, pp. 48-60, 1986.
- [8.32] 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).
- [8.33] P.S. Georgilakis, N.D. Doulamis, A.D. Doulamis, N.D. Hatziargyriou, S.D. Kollias, "A novel iron loss reduction technique for distribution transformers based on a combined genetic algorithm-neural network approach," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 31, no. 1, pp. 16-34, Feb. 2001.
- [8.34] P. Georgilakis, N. Hatziargyriou, D. Paparigas, "AI Helps Reduce Transformer Iron Losses," *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 12, Nr. 4, pp. 41-46, 1999.
- [8.35] Δ. Παπαρήγας, Δ. Σπηλιόπουλος, Σ. Ελευσινιώτης, και Ι. Μπακόπουλος, "Εκτίμηση μαγνητικών υλικών για πυρήνες μετασχηματιστών," Πρακτικά Ευρωπαϊκού Συμποσίου THERMIE για τα Τεχνολογικά και Οικονομικά Πλεονεκτήματα από τη Χρησιμοποίηση Μετασχηματιστών Διανομής με Μειωμένες Απώλειες, 16 Μαΐου 1994, Αθήνα.
- [8.36] Κ. Μηλολιδάκης, "Στατιστικός ποιοτικός έλεγχος της γραμμής παραγωγής πυρήνων μετασχηματιστών," Πρώτη Αναφορά Ερευνητικού Έργου, 15 Απριλίου 1993, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

- [8.37] Κ. Μηλολιδάκης, "Στατιστικός ποιοτικός έλεγχος της γραμμής παραγωγής πυρήνων μετασχηματιστών," Δεύτερη Αναφορά Ερευνητικού Έργου, 25 Αυγούστου 1993, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [8.38] Κ. Μηλολιδάκης, "Στατιστικός ποιοτικός έλεγχος της γραμμής παραγωγής πυρήνων μετασχηματιστών," Τρίτη Αναφορά Ερευνητικού Έργου, 13 Σεπτεμβρίου 1993, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [8.39] Δ. Γκουνίδης, "Πρόβλεψη μαγνητικών απωλειών πυρήνων και μετασχηματιστών διανομής με τη χρήση στατιστικού γραμμικού μοντέλου", Διπλωματική Εργασία, Ιούλιος 1995, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [8.40] Πρακτικά Συμποσίου με θέμα "Τεχνολογικά και οικονομικά πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση μετασχηματιστών διανομής με μειωμένες απώλειες," Αθήνα, Μάϊος 1994.
- [8.41] Π. Σ. Γεωργιλάκης, Δ. Σ. Σπηλιόπουλος, Α. Τ. Σουφλάρης, Δ. Γ. Παπαρήγας, και Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, "Κατασκευή Μετασχηματιστών με Πυρήνα Άμορφου Σιδήρου στην Ελλάδα," Πρακτικά Ημερίδας ΔΕΗ για νέες Τεχνολογίες Μετασχηματιστών, Αθήνα, Φεβρουάριος 1999.
- [8.42] S. Sieradzki, "Apparent Core Losses and Core Losses in Five Limb Amorphous Trnasformer of 160 kVA," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 34, no. 4, pp. 1189-1191, Jul. 1998.
- [8.43] R. Findlay, R. Belmans, D. Mayo, "Influence on the stacking method on the iron losses in power transformer cores," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 26, no. 5, pp. 1990-1992, Sept. 1990.
- [8.44] A. B. J. Reece, *"Finite Element Methods in Electrical Power Engineering"*. Oxford University Press, May 2000.
- [8.45] S. J. Salon, "Finite element analysis of electrical machines," Kluwer Academic Publisher, Boston, London, 1995.
- [8.46] K. Hameyer, R. Belmans, "Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices". WIT Press, 1999.
- [8.47] *"Selection of Electrical Sheets for Magnetic Cores,"* Product Data Bulletin, 2000, AK Steel Corporation.
- [8.48] Ed G. teNyenhuis, R. S. Girgis, G. F. Mechler, "Other Factors Contributing to the Core Loss Performance of Power and Distribution Transformers," *IEEE Trans. PWRD*, Vol. 16, no. 4, pp. 648-653, Oct. 2001.
- [8.49] G. F. Mechler, R. S. Girgis, "Magnetic Flux Distributions in Transformer Core Joints," *IEEE Trans. PWRD*, Vol. 15, no. 1, pp. 198-203, Jan. 2000.
- [8.50] G. F. Mechler, R. S. Girgis, "Calculation of Spatial Loss Distribution in Stacked Power and Distribution Transformer Cores," *IEEE Trans. PWRD*, Vol. 13, no. 2, pp. 532-537, Apr. 1998.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τη διατριβή, και προτείνονται μερικά θέματα για επιπλέον διερεύνηση τα οποία θα ανέπτυσσαν περαιτέρω την εργασία η οποία έχει ήδη πραγματοποιηθεί.

9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πρώτα 6 Κεφάλαια της παρούσας διατριβής έγινε προσπάθεια ακριβούς πρόβλεψης της τάσης βραχυκύκλωσης τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιγτού πυρήνα μέσω αριθμητικών μεθόδων και εξαγωγής μοντέλου για τη χρήση του κατά τη σχεδιαστική διαδικασία παράλληλα με την υφιστάμενη μεθοδολογία. Για την επίτευξη αυτού του στόχου πραγματοποιήθηκε αρχικά θεωρητική διερεύνηση για την επιλογή της καταλληλότερης αριθμητικής μεθόδου υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου και την προσαρμογή της στους εξεταζόμενους μετασχηματιστές. Στη συνέχεια ακολούθησε πειραματική επιβεβαίωση της μεθόδου και γενίκευσή της έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες γεωμετρίες δίνοντας ακριβή αποτελέσματα. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν τα κατάλληλα βήματα για τη δημιουργία εύχρηστου και ευέλικτου εργαλείου λογισμικού με βάση τη μέθοδο που αναπτύχθηκε, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με την υφιστάμενη σχεδιαστική μεθοδολογία. Στη συνέχεια (Κεφάλαιο 7) επεκτάθηκε η χρήση των αριθμητικών μεθόδων στη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των εξεταζόμενων μετασχηματιστών, σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται τροποποιήσεις της σχεδίασης για τη βελτίωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους. Τέλος, τα μοντέλα αριθμητικών μεθόδων εφαρμόστηκαν και στην πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, με κατάλληλες τροποποιήσεις για τη θεώρηση του μαγνητικού κορεσμού. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την παραπάνω ερευνητική πορεία μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

Η ανάγκη καλύτερης αναπαράστασης της πραγματικής γεωμετρίας του μετασχηματιστή με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας οδήγησε στην υιοθέτηση τρισδιάστατης αριθμητικής μεθόδου για τη μοντελοποίησή του. Για την τρισδιάστατη μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι: η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και η μεικτή μέθοδος πεπερασμένων - οριακών στοιχείων. Η σύγκρισή τους σε απλοποιημένη γεωμετρία μετασχηματιστή έδειξε ότι η δεύτερη μέθοδος δεν υπερτερεί σημαντικά σε ακρίβεια και χρόνο επίλυσης γι' αυτό και τελικά προτιμήθηκε η χρήση των αμιγώς πεπερασμένων στοιχείων για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου του πραγματικού μετασχηματιστή. Το μοντέλο στηρίχθηκε σε ειδική μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων με βάση το ανηγμένο βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό. Κατά την εξαγωγή του μοντέλου δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη λεπτομερή αναπαράσταση της γεωμετρίας των πηνίων, η οποία επηρεάζει καθοριστικά το πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης.

Προκειμένου να διερευνηθεί η ακρίβεια του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων και να συγκριθούν τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας με πραγματικές τιμές τάσης βραχυκύκλωσης, πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές μετρήσεων σε τρεις τριφασικούς μετασχηματιστές τύπου τυλιχτού πυρήνα. Κατά τη διάρκειά τους ελήφθησαν τοπικές τιμές πεδίου κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης, έτσι ώστε να συγκριθούν με τις αντίστοιχες υπολογισμένες. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της πρώτης σειράς μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή και της αριθμητικής προσομοίωσής του μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ήταν ικανοποιητική, καθώς, και για τους δύο

μετασχηματιστές που διεξήχθησαν μετρήσεις (ισχύος 400 και 1000 kVA αντίστοιχα) οι τοπικές τιμές της μαγνητικής επαγωγής παρουσίασαν αντίστοιχες χωρικές μεταβολές ενώ οι τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης προσεγγίστηκαν αρκετά καλά. Ωστόσο, οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης (οφειλόμενες στις μικρές τιμές του πεδίου σκέδασης στον αέρα και τη δυσκολία μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής με το αισθητήριο της γεννήτριας Hall) κατέδειξαν την ανάγκη διεξαγωγής δεύτερης σειράς μετρήσεων στις οποίες λαμβάνονται υπόψη οι πρακτικές δυσκολίες της πρώτης σειράς (μη ονομαστική φόρτιση, επιλογή σημείων μέτρησης). Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της δεύτερης σειράς μετρήσεων (σε μετασχηματιστή 630 kVA δύο επιπέδων υψηλής τάσης) του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή και της αριθμητικής προσομοίωσής του μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ήταν βελτιωμένη σε σχέση με την πρώτη σειρά μετρήσεων. Η βελτίωση αυτή οφειλόταν, τόσο στην καλύτερο τρόπο διεξαγωγής των μετρήσεων, όσο και στη λεπτομερέστερη αναπαράσταση της γεωμετρίας των πηνίων, με βασικότερο χαρακτηριστικό τη μοντελοποίηση των καναλιών ψύξης τους.

Μετά την πειραματική επιβεβαίωση του μοντέλου που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση του μετασχηματιστή, εμφανίστηκε η ανάγκη γενίκευσης της μεθοδολογίας για διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών. Για το σκοπό αυτό το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε σε διάφορες γεωμετρίες τριφασικών μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα. Με τη βοήθεια της διαδικασίας αυτής η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε 11 περιπτώσεις μετασχηματιστών, δίνοντας αποτελέσματα με καλή προσέγγιση (απόκλιση μικρότερη του 4%, η οποία προσεγγίζει τα θεωρητικά όρια της μεθοδολογίας) στις μετρημένες τιμές για διάφορες ισχείς (από 50 έως 1000 kVA), συνδεσμολογίες (Dyn, Yzn) και συνδέσεις των τυλιγμάτων υψηλής τάσης για την παραγωγή του δεύτερου επιπέδου υψηλής τάσης (20-15 kV, 20-6,6 kV, 20-5,5 kV). Επιπλέον, τα αποτελέσματα προέκυψαν με τη χρήση μοντέλου μικρής πυκνότητας πλέγματος και κατά συνέπεια μικρού χρόνου εκτέλεσης των υπολογισμών, καθιστώντας τη μέθοδο αρκετά εύχρηστη και ευέλικτη ακόμη και σε υπολογιστές με μικρή υπολογιστική ικανότητα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με την υφιστάμενη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από τον κατασκευαστή, σε διάφορες παρτίδες μετασχηματιστών. Η σύγκριση έδειξε τη δυνατότητα τις μεθόδου να προσεγγίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη μέση μετρημένη τιμή τάσης βραχυκύκλωσης της εκάστοτε παρτίδας, καθιστώντας την έτσι αξιόπιστο εργαλείο για την πρόβλεψή της κατά τη σχεδιαστική διαδικασία. Τέλος, πιστοποιήθηκε η δυνατότητα της μεθόδου να προβλέψει τη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης ως συνάρτηση του τρόπου παραλληλισμού των υποπηνίων υψηλής τάσης για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος, με σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών σε τρεις συνδεσμολογίες παραλληλισμού ενός μετασχηματιστή διπλού επιπέδου υψηλής τάσης.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις για την ακρίβεια της μεθόδου την κατέστησαν αξιόπιστο εργαλείο για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης. Ωστόσο, για την περαιτέρω χρήση της στη βιομηχανική μονάδα ήταν αναγκαία η ανάπτυξη ενός ευέλικτου εργαλείου λογισμικού, εύχρηστου κατά τη σχεδιαστική διαδικασία, έτσι ώστε να παρέχει ένα γρήγορο και ικανοποιητικά ακριβή εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της τάσης βραχυκύκλωσης, ο οποίος να μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με την υφιστάμενη μεθοδολογία. Για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων κρίθηκε σκόπιμη η ενσωμάτωση λειτουργιών μετεπεξεργασίας (οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά στο Παράρτημα), όπως η απεικόνιση της μαγνητικής επαγωγής και των δυνάμεων κατά το βραχυκύκλωμα. Οι απεικονίσεις αυτές, αν και σε περιπτώσεις πλεγμάτων μικρής διακριτότητας δεν προσφέρουν μεγάλη λεπτομέρεια στην απεικόνιση των μεγεθών του μαγνητικού πεδίου, παρέχουν μια γενική εικόνα των μεταβολών του, χρήσιμη για την εξαγωγή συμπερασμάτων που ενδιαφέρουν το χρήστη κατά τη μελέτη της λειτουργίας του μετασχηματιστή σε συνθήκες βραχυκυκλώματος.

Στη συνέχεια της διατριβής, η αριθμητική ανάλυση του μαγνητοστατικού πεδίου του μετασχηματιστή επεκτάθηκε στη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του, με έμφαση στην

προσθήκη μαγνητικών θωρακίσεων για τη μεταβολή της τάσης βραχυκύκλωσης. Η επίδραση της γεωμετρίας μαγνητικής θωράκισης στο πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης μετασχηματιστών ισχύος μελετήθηκε με τη χρήση του μοντέλου πεπερασμένων – οριακών στοιχείων, καθώς αυτό διευκολύνει την παραμετρική διερεύνηση των επιπτώσεων της μαγνητικής θωράκισης μέσω της επιβολής κατάλληλων οριακών συνθηκών. Η βελτιστοποίηση αντιμετωπίστηκε ως μη γραμμικό, πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς και το προτεινόμενο αριθμητικό μοντέλο συνδυάστηκε με διάφορους ντετερμινιστικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης, από τη σύγκριση των οποίων προσδιορίστηκε ο καταλληλότερος από πλευράς ταχύτητας σύγκλισης και ποιότητας βέλτιστης λύσης. Για τη βέλτιστη ιεράρχηση των συνιστωσών της σύνθετης αντικειμενικής συνάρτησης πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, οδηγώντας στην κατάλληλη διαμόρφωση των βαρών τους.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης τροποποιήθηκε κατάλληλα για την ανάλυση των απωλειών κενού φορτίου. Οι τροποποιήσεις έγιναν έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη ο μαγνητικός κορεσμός του υλικού του πυρήνα κατά τη δοκιμή κενού φορτίου, η οποία επιλύεται ως μη γραμμικό πρόβλημα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου και τα αποτελέσματά του συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές που δόθηκαν από τον κατασκευαστή. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προέκυψε το γενικό συμπέρασμα ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προβλέπει τιμές απωλειών σιδήρου μικρότερες κατά 15-20% περίπου σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρημένες. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι για τη μοντελοποίηση του υλικού του πυρήνα των μετασχηματιστών χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του που παρέχονται από τον κατασκευαστή της λαμαρίνας πριν τη διαμόρφωσή της σε πυρήνες, αγνοώντας έτσι την αλλοίωση των χαρακτηριστικών αυτών κατά τις μηχανικές καταπονήσεις και θερμικές κατεργασίες που ακολούθησαν. Η μείωση του σφάλματος μπορεί να επιτευχθεί μόνο με κατάλληλη τροποποίηση των καμπυλών πρώτης μαγνήτισης και ειδικών απωλειών του υλικού του πυρήνα, με πραγματοποίηση τοπικών μετρήσεων των διαμορφωμένων πυρήνων χαρακτηριστικών των σε ήδη κατασκευασμένους μετασχηματιστές.

9.2 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

Τα κύρια σημεία συμβολής της παρούσας διδακτορικής διατριβής στην προαγωγή της επιστήμης μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων βασισμένου σε ανηγμένο (reduced) βαθμωτό δυναμικό, το οποίο, σε συνδυασμό με τη λεπτομερή αναπαράσταση της γεωμετρίας των μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα, δίνει μεγάλη ακρίβεια πρόβλεψης των χαρακτηριστικών τους με μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις.
- Ανάπτυξη μεικτής τεχνικής πεπερασμένων-οριακών στοιχείων, η οποία, λόγω της γεωμετρίας του μετασχηματιστή (η οποία περιλαμβάνει μεγάλα τμήματα αέρα αλλά και περιοχές με μη γραμμικά υλικά) παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα κατά τη μοντελοποίηση της προσθήκης θωρακίσεων.
- Εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης γεωμετρίας σε αριθμητικές μεθόδους ανάλυσης προβλημάτων.
- Βελτίωση χαρακτηριστικών σύγκλισης και ακρίβειας των αριθμητικών μεθόδων με κατάλληλες θεωρήσεις χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων διατάξεων (π.χ. ενσωμάτωση

των καναλιών ψύξης στο αριθμητικό μοντέλο του μετασχηματιστή, η οποία επηρεάζει δραστικά την ακρίβεια υπολογισμού του πεδίου σκέδασης).

- Υιοθέτηση κατάλληλων μεταβλητών για αποδοτική υλοποίηση των αλγορίθμων υπολογισμού.
- Διερεύνηση της θεώρησης του μαγνητικού κορεσμού για την ανάλυση προβλημάτων σε συνδυασμό με τις προτεινόμενες μεθόδους.

9.3 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής αναδεικνύονται τα σημεία, η ανάλυση των οποίων αξίζει να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης. Τέτοια σημεία είναι τα εξής:

- Εξέταση και άλλων τεχνικών σύζευξης των μεικτών μεθόδων ανάλυσης του πεδίου.
- Κατάλληλη τροποποίηση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν για τον ακριβή υπολογισμό των απωλειών κενού φορτίου. Μια τέτοια τροποποίηση μπορεί να συμπεριλάβει τη συστηματική ανάλυση των τοπικών ιδιοτήτων του υλικού του πυρήνα με αναλυτικές μεθοδολογίες με σκοπό την προσαρμογή τους για την κατά περιοχές εφαρμογή τους σε μοντέλα μακροσκοπικής κλίμακας (όπως είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων).
- Επέκταση των μεθόδων βελτιστοποίησης που εξετάστηκαν και σε άλλα χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων.
- Εφαρμογή των μεθοδολογιών που αναπτύχθηκαν σε άλλα προβλήματα βιομηχανικού ενδιαφέροντος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΑΣΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Στο Παράρτημα αυτό περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο υλοποιούνται οι λειτουργίες της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 6.3 του Κεφαλαίου 6 από τον κώδικα Fortran του λογισμικού υπολογισμού τάσης βραχυκύκλωσης μετασχηματιστών ισχύος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η αλληλεπίδρασή του κώδικα Fortran με τον κώδικα Visual Basic για την ενιαία διαμόρφωση του εργαλείου λογισμικού.

Π.1 ΚΩΔΙΚΑΣ FORTRAN

Π.1.1 Προ-επεξεργασία

Το εργαλείο προ-επεξεργασίας ενός πακέτου ΜΠΣ πρέπει να εκτελεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- 1) Ορισμός γεωμετρίας,
- 2) Ορισμός ιδιοτήτων υλικών και οριακών συνθηκών,
- 3) πλεγματοποίηση.

Η πρώτη λειτουργία απαιτεί την κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου με τον ορισμό των συντεταγμένων αντιπροσωπευτικών σημείων της εξεταζόμενης γεωμετρίας, λαμβάνοντας υπόψη πιθανές συμμετρίες του προβλήματος. Μετά την κατασκευή του μοντέλου, ανατίθενται οι επιθυμητές ιδιότητες υλικών στις αντίστοιχες περιοχές της γεωμετρίας και επιβάλλονται οριακές συνθήκες στις εξωτερικές επιφάνειες. Η διαδικασία προ-επεξεργασίας ολοκληρώνεται με τη διακριτοποίηση του χώρου του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία.

Η υλοποίηση των λειτουργιών προ-επεξεργασίας που περιγράφηκαν παραπάνω μπορεί να γίνει ιδιαίτερα περίπλοκη και απαιτεί ειδικές γνώσεις σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή και πεδιακής ανάλυσης. Η αποδοτικότητα εφαρμογής των διαφόρων αλγόριθμων πλεγματοποίησης ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του εξεταζόμενου προβλήματος ενώ η υλοποίησή τους περιλαμβάνει σημαντική προγραμματιστική προσπάθεια. Επιπλέον, η υιοθέτηση προσαρμοστικής μεθόδου πλεγματοποίησης απαιτεί υψηλότερο βαθμό αλληλεπίδρασης με το χρήστη του προγράμματος, αυξάνοντας τον όγκο των δεδομένων εισόδου που απαιτούνται για την κατασκευή του μοντέλου και την πλεγματοποίησή του. Από την άλλη πλευρά, δεδομένου ότι το αναπτυσσόμενο πακέτο λογισμικού είναι προσανατολισμένο στην ανάλυση τριφασικών μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σταθερή γεωμετρική διαμόρφωση του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο, η εισαγωγή της γεωμετρίας και ο ορισμός των υλικών και των οριακών συνθηκών πρέπει να γίνει μόνο μία φορά, καθώς δεν επηρεάζεται από την αλλαγή των διαστάσεων του μετασχηματιστή. Έτσι, αντί της ανάπτυξης αυτοματοποιημένου πλεγματοποιητή, υιοθετήθηκε μια διαδικασία παραμετροποίησης του πλέγματος, καθώς αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτική και ευέλικτη από τους αλγόριθμους δημιουργίας νέου πλέγματος..

Η βασική αρχή της διαδικασίας παραμετροποίησης συνίσταται στην τροποποίηση των διαστάσεων υπαρχόντων πλεγμάτων (κατασκευασμένων με βάση ένα αρχικό μοντέλο τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα) σύμφωνα με τα γεωμετρικά δεδομένα του εκάστοτε εξεταζόμενου μετασχηματιστή. Αυτό πραγματοποιείται με μεταβολή των συντεταγμένων των κόμβων του πλέγματος με τη χρήση εξισώσεων που προκύπτουν από τη γεωμετρία των τριφασικών μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα.

Για την κατασκευή του αρχικού τρισδιάστατου πλέγματος χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά στοιχεία πρώτης τάξης. Εάν και η χρήση στοιχείων υψηλότερης τάξης ήταν δυνατή, δεν υλοποιήθηκε στον προ-επεξεργαστή, καθώς ενδέχεται να οδηγήσουν σε μεγαλύτερο χρόνο υπολογισμών και αύξηση της πολυπλοκότητας του μοντέλου.

Δεδομένου ότι η κατασκευή του αρχικού πλέγματος ήταν αποφασιστικής σημασίας για την ακρίβεια των υπολογισμών που πραγματοποιούνται από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην πυκνότητα και την ομοιομορφία του. Επιπλέον, καθώς ο χρόνος επίλυσης αυξάνει συναρτήσει του συνολικού αριθμού κόμβων, το μέγεθος του πλέγματος έπρεπε να παραμείνει κάτω από ένα μέγιστο, εξασφαλίζοντας λογική αύξηση στον απαιτούμενο χρόνο για την εκτέλεση των υπολογισμών. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν πλέγματα διαφόρων πυκνοτήτων, δίνοντας έτσι στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει το πλέον κατάλληλο (σύμφωνα με τις απαιτήσεις σε ακρίβεια και χρόνο εκτέλεσης).

Για την απλοποίηση της διαδικασίας παραμετροποίησης, τα αρχικά πλέγματα χωρίστηκαν σε πολλαπλές περιοχές. Η διαίρεση βασίστηκε στις διαστάσεις που επηρεάζουν τους κόμβους κάθε περιοχής: έτσι, έγινε προσπάθεια ομαδοποίησης γειτονικών κόμβων, οι συντεταγμένες των οποίων εξαρτώνται από τη μεταβολή των ίδιων γεωμετρικών παραμέτρων του μετασχηματιστή σε απλά συνδεδεμένους χώρους. Η διαδικασία αυτή οδήγησε στη δημιουργία 84 συνολικά περιοχών, η προοπτική όψη των οποίων φαίνεται στο Σχήμα Π.1.

Τα αρχικά πλέγματα ενσωματώνονται στα δεδομένα εισόδου του προγράμματος υπό τη μορφή αρχείων ASCII. Σε κάθε κόμβο και σε κάθε στοιχείο του πλέγματος ανατίθεται ένας αριθμός ταυτοποίησης (ID), ενώ η ιδιότητα υλικού του κάθε στοιχείου αντιπροσωπεύεται από έναν αριθμό (από 1 έως 84). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει στο πρόγραμμα να ταυτοποιεί την περιοχή στην οποία ανήκει κάθε στοιχείο και τις συντεταγμένες των κορυφών του, με τη χρήση των τιμών ID οι οποίες αποθηκεύονται στους πίνακες κόμβων και στοιχείων κατά τη διάρκεια ανάγνωσης των δεδομένων εισόδου. Οι κορυφές των στοιχείων αποθηκεύονται στον πίνακα NUME διαστάσεων Nelem × 4, όπου Nelem είναι ο συνολικός αριθμός των στοιχείων (τετραέδρων) του πλέγματος. Το υλικό κάθε στοιχείου αποθηκεύεται στον πίνακα MATERIAL διαστάσεων Nelem × 1. Το υλικό κάθε περιοχής του πλέγματος αντιπροσωπεύεται από ένα ακέραιο αριθμό $k \in [1...84]$.

Η διαδικασία παραμετροποίησης απεικονίζεται στο διάγραμμα του Σχήματος Π.2. Καλείται μετά την εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων του εξεταζόμενου μετασχηματιστή. Δεν απαιτείται καμία αλληλεπίδραση από το χρήστη, πέρα από τον προσδιορισμό της επιθυμητής πυκνότητας πλέγματος. Μια βάση δεδομένων αρχικών πλεγμάτων διαφόρων πυκνοτήτων είναι διαθέσιμη και το πρόγραμμα επιλέγει αυτήν που αντιστοιχεί στην πυκνότητα που ορίστηκε από το χρήστη. Το παραμετροποιημένο πλέγματος, η οποία περιγράφεται στη συνέχεια.



Σχήμα Π.1: Προοπτική όψη της διαίρεσης του μοντέλου του μετασχηματιστή σε περιοχές.



Σχήμα Π.2: Διάγραμμα της διαδικασίας παραμετροποίησης πλέγματος.

Αρχικά θεωρείται μια ορθογωνική περιοχή πλέγματος, η οποία φαίνεται στο Σχήμα Π.3, όπου (X_P, Y_P, Z_P) είναι οι συντεταγμένες τυχαίου σημείου εντός της περιοχής, (a, b, c) είναι οι

διαστάσεις της περιοχής κατά μήκος των αξόνων x, y και z ενώ (X_o , Y_o , Z_o) είναι οι αποστάσεις της αρχής της περιοχής από την αρχή του Καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Οι νέες συντεταγμένες του σημείου P προκύπτουν με τη χρήση της εξίσωσης (Π.1). Στην εξίσωση αυτή, οι εκθέτες "old" αναφέρονται στις παλιές (αρχικές) συντεταγμένες, ενώ οι εκθέτες "new" αναφέρονται στις νέες συντεταγμένες (μετά την αλλαγή των διαστάσεων του μετασχηματιστή).

$$\begin{aligned} X_{P}^{new} &= \frac{a^{new}}{a^{old}} \left(X_{P}^{old} - X_{o}^{old} \right) + X_{o}^{new} \\ Y_{P}^{new} &= \frac{b^{new}}{b^{old}} \left(Y_{P}^{old} - Y_{o}^{old} \right) + Y_{o}^{new} \\ Z_{P}^{new} &= \frac{c^{new}}{c^{old}} \left(Z_{P}^{old} - Z_{o}^{old} \right) + Z_{o}^{new} \end{aligned}$$
(II.1)

Η διαδικασία είναι παρόμοια για μία μη-ορθογωνική περιοχή πλέγματος και η μόνη διαφορά συνίσταται στο γεγονός ότι οι διαστάσεις (a, b, c) και (X_o , Y_o , Z_o) δεν είναι σταθερές και εξαρτώνται από τις συντεταγμένες του εξεταζόμενου σημείου P. Για παράδειγμα, στην περιοχή του Σχήματος Π.4, η απόσταση X_o είναι συνάρτηση της συντεταγμένης κατά y-άξονα του σημείου P. Σε αυτήν την περίπτωση, το X_o μπορεί εύκολα να υπολογιστεί με τη χρήση της εξίσωσης ευθείας της εξωτερικής ακμής της περιοχής, η οποία προκύπτει από τα όρια της περιοχής.

Ο Πίνακας Π.1 περιγράφει συνοπτικά τις 84 περιοχές στις οποίες διαιρείται το πλέγμα του μετασχηματιστή για την παραμετροποίηση. Το Σχήμα Π.5 δείχνει την άνω όψη των τμημάτων του πλέγματος του ενεργού μέρους (επίπεδο xy) ενώ τα Σχήματα Π.6, Π.7 και Π.8 απεικονίζουν την πίσω όψη (επίπεδο xz), την άνω όψη (επίπεδο xy) και την πίσω όψη των τμημάτων που περιβάλλουν το ενεργό μέρος.



Σχήμα Π.3: Ορθογωνική περιοχή πλέγματος.



Σχήμα Π.4:

Μη ορθογωνική περιοχή πλέγματος.

	Όνομα τμήματος	Περιγραφή
1	SmallCore1a	Τμήμα 1 μικρού πυρήνα
2	SmallCore1b	Τμήμα 2 μικρού πυρήνα
3	LargeCore1a	Τμήμα 1 μεγάλου πυρήνα
4	LargeCore1b	Τμήμα 2 μεγάλου πυρήνα
5	Air Box ExtGap	Εξωτερικό διάκενο
6	Air Box Left of Coils	Κουτί αέρα (αριστερά του πηνίου υψηλής τάσης-έξω από τον πυρήνα)
7	Air Box Right of Coils 2	Κουτί αέρα (δεξιά του πηνίου υψηλής τάσης-έξω από τον πυρήνα)
8	Air Box Cores Gap 1	Διάκενο 1 πυρήνων
9	Air Box right 1	Κουτί αέρα 1 δεξιά του ενεργού μέρους
10	Air Box left 1	Κουτί αέρα 1 αριστερά του ενεργού μέρους
11	CoilYTa4 left	Αριστερό τμήμα υποπηνίου 4 υψηλής τάσης
12	CoilYTa4 center	Μεσαίο τμήμα υποπηνίου 4 υψηλής τάσης
13	CoilYTa4 right	Δεξιό τμήμα υποπηνίου 4 υψηλής τάσης
14	CoilYTa3 left	Αριστερό τμήμα υποπηνίου 3 υψηλής τάσης
15	CoilYTa3 center	Μεσαίο τμήμα υποπηνίου 3 υψηλής τάσης
16	CoilYTa3 right	Δεξιό τμήμα υποπηνίου 3 υψηλής τάσης
17	CoilYTa2 left	Αριστερό τμήμα υποπηνίου 2 υψηλής τάσης
18	CoilYTa2 center	Μεσαίο τμήμα υποπηνίου 2 υψηλής τάσης
19	CoilYTa2 right	Δεξιό τμήμα υποπηνίου 2 υψηλής τάσης
20	CoilYTa1 left	Αριστερό τμήμα υποπηνίου 1 υψηλής τάσης
21	CoilYTa1 center	Μεσαίο τμήμα υποπηνίου 1 υψηλής τάσης

Πίνακας Π.1.1: Τμήματα στα οποία διαιρείται το αρχικό πλέγμα κατά την παραμετροποίηση.

	T	
22	CoilYTa1 right	Δεξιό τμήμα υποπηνίου 1 υψηλής τάσης
23	CoilXTa left	Αριστερό τμήμα πηνίου χαμηλής τάσης
24	CoilXTa center	Μεσαίο τμήμα πηνίου χαμηλής τάσης
25	CoilXTa right	Μεσαίο τμήμα πηνίου χαμηλής τάσης
26	Air Box HVLV gap left	Αριστερό τμήμα διακένου ΥΤ-ΧΤ
27	Air Box HVLV gap center	Μεσαίο τμήμα διακένου ΥΤ-ΧΤ
28	Air Box HVLV gap right	Δεξιό τμήμα διακένου ΥΤ-ΧΤ
29	Air Box IntGap left	Αριστερό τμήμα διακένου ΧΤ-πυρήνα
30	Air Box IntGap center	Μεσαίο τμήμα διακένου ΧΤ-πυρήνα
31	Air Box IntGap right	Δεξιό τμήμα διακένου ΧΤ-πυρήνα
32	Air Box Right of Coils 1a	Κουτί αέρα (δεξιά από το πηνίο ΥΤ-κάτω από τον πυρήνα)
33	Air Box Right of Coils 1b	Κουτί αέρα (δεξιά από το πηνίο ΥΤ-έξω από τον πυρήνα)
34	Air Box Center 1c	Τμήμα 1c κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
35	Air Box Center 1a	Τμήμα 1a κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
36	Air Box Center 1b	Τμήμα 1b κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
37	Air Box Center 1d	Τμήμα 1d κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
38	Air Box Center 1e	Τμήμα 1e κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
39	Air Box Center 1f	Τμήμα 1f κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
40	Air Box Center 2c	Τμήμα 2c κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
41	Air Box Center 2a	Τμήμα 2a κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
42	Air Box Center 2b	Τμήμα 2b κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
43	Air Box Center 2d	Τμήμα 2d κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
44	Air Box Center 2f	Τμήμα 2f κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
45	Air Box Center 2e	Τμήμα 2e κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
46	Air Box Top IntGap left	Αριστερό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το διάκενο ΧΤ- πυρήνα
47	Air Box Top IntGap center	Μεσαίο τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το διάκενο ΧΤ- πυρήνα
48	Air Box Top IntGap right	Δεξιό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το διάκενο ΧΤ- πυρήνα

Πίνακας Π.1.2: Τμήματα στα οποία διαιρείται το αρχικό πλέγμα κατά την παραμετροποίηση.

49	Air Box Top CoilXTa left	Αριστερό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το πηνίο γαμηλής τάσης
50	Air Box Top CoilXTa	χαμηλης τασης Μεσαίο τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το πυνίο
	center	γαμηλής τάσης
51	Air Box Top CoilXTa right	Δεξιό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το πηνίο χαμηλής
	,	τάσης
52	Air Box Top HVLVgap left	Αριστερό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το διάκενο ΥΤ- ΧΤ
53	Air Box Top HVLVgap center	Μεσαίο τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το διάκενο ΥΤ- ΧΤ
54	Air Box Top HVLVgap right	Δεξιό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το διάκενο ΥΤ-ΧΤ
55	Air Box Top CoilYTa1 left	Αριστερό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπηνίο 1 υψηλής τάσης
56	Air Box Top CoilYTa1	Μεσαίο τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπηνίο 1
	center	υψηλής τάσης
57	Air Box Top CoilYTa1	Δεξιό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπηνίο 1
58	rigni Air Boy Top CoilVTa2 left	υψηλης τασης
50	An Box rop contraz ien	υψηλής τάσης
59	Air Box Top CoilYTa2	Μεσαίο τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπηνίο 2
	center	υψηλής τάσης
60	Air Box Top CoilYTa2	Δεξιό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπηνίο 2
(1	right	υψηλης τασης
01	Air Box Top Coll Y Tas left	Αριστερο τμημα κουτίου αερά πανώ από το υποπηνίο 3
62	Air Box Top CoilYTa3	Μεσαίο τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπηνίο 3
-	center	υψηλής τάσης
63	Air Box Top CoilYTa3	Δεξιό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπηνίο 3
	right	υψηλής τάσης
64	Air Box Top CoilYTa4 left	Αριστερό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπηνίο 4
65	Air Box Ton CoilVTa4	υψηλης τασης Μεσαίο τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπυνίο 4
05	center	υψηλής τάσης
66	Air Box Top CoilYTa4	Δεξιό τμήμα κουτιού αέρα πάνω από το υποπηνίο 4
	right	υψηλής τάσης
67	Air Box Top ExtGap	Κουτί αέρα πάνω από το εξωτερικό διάκενο
68	SmallCore1c	Τμήμα 3 μικρού πυρήνα
69	LargeCore1c	Τμήμα 3 μεγάλου πυρήνα
70	Air Box Front of Cores	Κουτί αέρα μπροστά από το πάνω μέρος των πυρήνων
71	Air Box Cores Gap 2	Διάκενο 2 πυρήνων
72	Air Box right 2	Κουτί αέρα 2 δεξιά του ενεργού μέρους
73	Air Box left 2	Κουτί αέρα 2 αριστερά του ενεργού μέρους
74	Air Box Center 3a	Τμήμα 3a κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους

Πίνακας Π.1.3: Τμήματα στα οποία διαιρείται το αρχικό πλέγμα κατά την παραμετροποίηση.

75	Air Box Center 3b	Τμήμα 3b κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
76	Air Box Center 3c	Τμήμα 3c κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
77	Air Box Center 3d	Τμήμα 3d κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
78	Air Box Center 3e	Τμήμα 3e κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
79	Air Box Center 3f	Τμήμα 3f κουτιού αέρα μεταξύ ενεργού μέρους και κελύφους
80	Air Box up (left)	Αριστερο κουτί αέρα πάνω από το ενεργό μέρος
81	Air Box up (right)	Δεξιό κουτί αέρα πάνω από το ενεργό μέρος
82	Air Box up (center 1)	Μεσαίο κουτί αέρα 1 πάνω από το ενεργό μέρος
83	Air Box up (center 2)	Μεσαίο κουτί αέρα 2 πάνω από το ενεργό μέρος
84	Air Box up (center 3)	Μεσαίο κουτί αέρα 3 πάνω από το ενεργό μέρος

Πίνακας Π.1.4: Τμήματα στα οποία διαιρείται το αρχικό πλέγμα κατά την παραμετροποίηση



Σχήμα Π.5: Ανω όψη των τμημάτων του πλέγματος του ενεργού μέρους (επίπεδο xy).

Κατά τη μεταβολή των συντεταγμένων των κόμβων του πλέγματος λαμβάνονται υπόψη όλες οι διαστάσεις του αντίστοιχου τμήματος οι οποίες μεταβάλλονται κατά τη δημιουργία του νέου μοντέλου μετασχηματιστή. Ο συμβολισμός των διαστάσεων αυτών φαίνεται στο Σχήμα Π.9.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τη μεταβολή των συντεταγμένων περιλαμβάνονται στον Πίνακα Π.2. Οι εξισώσεις αφορούν σε κόμβους τετραέδρων που ανήκουν στο συγκεκριμένο τμήμα του πλέγματος. Τα τονούμενα σύμβολα που χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον πίνακα αναφέρονται στις καινούριες διαστάσεις του πλέγματος.



Σχήμα Π.6: Πίσω όψη των τμημάτων του πλέγματος που περιβάλλουν το ενεργό μέρος (επίπεδο xz).



Σχήμα Π.7: Άνω όψη των τμημάτων του πλέγματος που περιβάλλουν το ενεργό μέρος (επίπεδο xy).

				x
Air Box up (right)	Air Box 3f	Air Box 2f	Air Box If	
	Air Box 3e	Air Box 2e	Air Box 1e	
	Air Box 3d	Air Box 2d	Air Box 1d	
Air Box up (center 1)	Air Box 3c	Air Box 2c	Air Box 1c	
	Air Box 3b	Air Box 2b	Air Box 1b	
Air Box up (left)	Air Box 3a	Air Box 2a	Air Box 1a	

Σχήμα Π.8: Μπροστά όψη των τμημάτων του πλέγματος που περιβάλλουν το ενεργό μέρος.

N



Σχήμα Π.9: Συμβολισμοί διαστάσεων μοντέλου μετασχηματιστή.

	SmallCore1a
x′	$\frac{E_{u}'}{v}$
	E _u
У́	$\frac{D_1'}{v}$
	D_1
z	$\frac{G'}{Z}$
	G
	SmallCore1b
X	$\frac{E_{u}}{E_{u}}[x - (E_{u} + F_{1})] + (E_{u}' + F_{1}')$
у́	D_1'
	$\overline{\mathrm{D}_{1}}^{\mathrm{y}}$
z	$\frac{G'}{Z}$
	G
	SmallCore1c
x	$\frac{2E_{u}+F_{l}}{2}$ x
-	$2E_u + F_l$
У́	$\frac{D_1'}{T}$ y
Z	$\frac{E_u'}{Z}(z-\frac{G}{z})+\frac{G'}{z}$
	$E_u \sim 2^2 - 2$
	LargeCore1a
X	$\frac{E_{u}'}{E_{u}}[x - (2E_{u} + F_{l} + K)] + (2E_{u}' + F_{l}' + K')$
У́	$\frac{D_1'}{V}$
	$\mathbf{D}_1^{\mathbf{y}}$
z	$\frac{G'}{Z}$
	G
	LargeCore1b
X	$\frac{Eu'}{Eu}[x - (3Eu + K + F_1 + F_2)] + (3Eu' + K' + F_1' + F_2')$
У́	D_1'
	$\overline{\mathbf{D}_1}^{\mathbf{y}}$
z	$\frac{G'}{Z}$
	G
	LargeCore1c
X´	$\frac{2E_{u}'+F_{2}'}{2E_{u}+F_{2}}[x-(2E_{u}+K+F_{1})]+(2E_{u}'+K'+F_{1}')$
у́	D ₁ '
-	$\overline{D_1}^y$

Πίνακας Π.2.1: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

z	$\frac{E_u'}{E_u'}(z-\frac{G}{2})+\frac{G'}{2}$
	E _u 2 2 CoilVTa4 left
x	hv _{thickness14} 'r _r (E + ErtCorr)] + (E + ErtCorr)
	$\frac{1}{hv_{thickness14}} [x - (E_u + ExtGap)] + (E_u + ExtGap)$
У́	$\frac{a_{55} \cdot x' + b_{55}}{v}$
	$a_5 \cdot x + b_5$
	$a_5 = \frac{Y_{W5MAX} - Y_{W5MIN}}{Y_{W5MIN} - Y_{W5MIN}}, b_5 = \frac{Y_{W5MIN} \cdot X_{W55MIN} - Y_{W5MAX} \cdot X_{W55MAX}}{Y_{W5MAX} - Y_{W5MAX} - Y_{W5MAX} - Y_{W5MAX}}$
	YWSMAN'-YWSMIN' YWSMIN'-YWSMAN'XWSSMAN'
	$a_{55} = \frac{w_{5MMX}}{X_{W55MIN}' - X_{W55MAX}'}, b_{55} = \frac{w_{5MMX}}{X_{W55MIN}' - X_{W55MAX}'}$
z	LV _{height} '
	LV _{height}
	CoilYTa3 left
X	$\frac{hv_{thickness13}'}{1} [x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14})] + (E_u' + ExtGap' + hv_{thickness14}')$
	hv _{thickness13}
У	$\frac{a_{44} \cdot x + b_{44}}{a_{44}} y$,
	$Y_{WAMAN} - Y_{WAMIN} - Y_{WAMIN} - Y_{WAMAN} - Y_{W$
	$a_4 = \frac{1}{X_{W4MIN} - X_{W4MIN}}, b_4 = \frac{1}{X_{W4MIN} - X_{W4MIN} - X_{W4MAX}}, b_4 = \frac{1}{X_{W4MIN} - X_{W4MIN} - X_{W4MAX}}$
	$Y_{W4MAX}' - Y_{W4MIN}' = h_{U} - Y_{W4MIN}' \cdot X_{W44MIN}' - Y_{W4MAX}' \cdot X_{W44MAX}'$
_	$X_{W44MIN}' - X_{W44MAX}', X_{W44MIN}' - X_{W44MAX}'$
Z	LV _{height} 'z
v′	Colly 1 a2 left
А	$\frac{hv_{\text{thickness12}}}{hv_{\text{thickness12}}} [x - (E_u + ExtGap + hv_{\text{thickness14}} + hv_{\text{thickness13}})] +$
	(E ₁ , '+ExtGap'+hy _{this} lmoot ('+hy _{this} lmoot 2')
y´	$a_{33} \cdot x' + b_{33}$
·	$\overline{a_3 \cdot x + b_3} y$,
	$a_{2} = \frac{Y_{W3MAX} - Y_{W3MIN}}{P_{2}} b_{2} = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W33MIN} - Y_{W3MAX} \cdot X_{W33MAX}}{P_{2}}$
	$X_{W33MIN} - X_{W33MAX}$
	$a_{33} = \frac{Y_{W3MAX} - Y_{W3MIN}}{Y_{W3MIN}}, b_{33} = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W33MIN} - Y_{W3MAX} \cdot X_{W33MAX}}{Y_{W3MAX} - Y_{W3MAX} - Y_{W3M$
	$\mathbf{X}_{W33MIN} - \mathbf{X}_{W33MAX} $ $\mathbf{X}_{W33MIN} - \mathbf{X}_{W33MAX}$
z′	LV _{height} '
	$\frac{1}{LV_{height}}$

Πίνακας Π.2.2: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

	CoilYTa1 left
x	$\frac{hv_{thickness11}'}{hv_{thickness11}} [x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14} + hv_{thickness13} + hv_{thickness12})] +$
	(E _u '+ExtGap'+hv _{thickness14} '+hv _{thickness13} '+hv _{thickness12} ')
У́	$\frac{a_{22} \cdot x' + b_{22}}{x}$
	$a_2 \cdot x + b_2$
	$a_{2} = \frac{Y_{W2MAX} - Y_{W2MIN}}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}}, b_{2} = \frac{Y_{W2MIN} \cdot X_{W22MIN} - Y_{W2MAX} \cdot X_{W22MAX}}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}}$
	$a_{22} = \frac{Y_{W2MAX}' - Y_{W2MIN}'}{X_{W22MIN}' - X_{W22MAX}'}, b_{22} = \frac{Y_{W2MIN}' \cdot X_{W22MIN}' - Y_{W2MAX}' \cdot X_{W22MAX}'}{X_{W22MIN}' - X_{W22MAX}'}$
z	LV _{height} '
	LV _{height}
	CoilYTa4 right
X'	$\frac{hv_{thickness14}'}{hv_{thickness14}'} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11}]$
	+ $hv_{thickness12}$ + $hv_{thickness13}$)] + (3E _u '+K'+F ₁ '+IntGap'+ $lv_{thickness1}$ '+HVLVgap'
	+ hv thickness11'+hv thickness12'+hv thickness13')
ý	$\frac{c_{55} \cdot x' + d_{55}}{c_5 \cdot x + d_5} y,$
	$c_5 = \frac{Y_{W5MAX} - Y_{W5MIN}}{W_{M1}}, d_5 = \frac{Y_{W5MIN} \cdot X_{W5MAX} - Y_{W5MAX} \cdot X_{W5MIN}}{W_{M1}}$
	$X_{W5MAX} - X_{W5MIN} \qquad X_{W5MAX} - X_{W5MIN}$
	$c_{55} = \frac{\mathbf{I}_{W5MAX} - \mathbf{I}_{W5MIN}}{\mathbf{X}_{W5MAX}' - \mathbf{X}_{W5MIN}'}, d_{55} = \frac{\mathbf{I}_{W5MIN} \cdot \mathbf{X}_{W5MAX} - \mathbf{I}_{W5MAX} \cdot \mathbf{X}_{W5MIN}}{\mathbf{X}_{W5MAX}' - \mathbf{X}_{W5MIN}'}$
z	LV _{height} '_
	$\frac{1}{LV_{height}}Z$
	CoilYTa3 right
x	$\frac{hv_{thickness13}}{1}$ [x - (3E _u + K + F ₁ + IntGap + lv _{thickness1} + HVLVgap + hv _{thickness11}
	nV _{thickness13}
	$+hv_{thickness12})]+(3E_{u}'+K'+F_{1}'+IntGap'+lv_{thickness1}'+HVLVgap'+hv_{thickness11}')$
	+ hv _{thickness12} ')
у	$\frac{c_{44} \cdot x' + d_{44}}{c_4 \cdot x + d_4} y,$
	$c_{4} = \frac{Y_{W4MAX} - Y_{W4MIN}}{M_{4}} d_{4} = \frac{Y_{W4MIN} \cdot X_{W4MAX} - Y_{W4MAX} \cdot X_{W4MIN}}{M_{4}}$
	$X_{W4MAX} - X_{W4MIN}$, $X_{W4MAX} - X_{W4MIN}$
	$c_{44} = \frac{Y_{W4MAX}' - Y_{W4MIN}'}{Y_{W4MAX}' - Y_{W4MIN}'}, d_{44} = \frac{Y_{W4MIN}' \cdot X_{W4MAX}' - Y_{W4MAX}' \cdot X_{W4MIN}'}{Y_{W4MAX}' - Y_{W4MAX}' - Y_{W4MIN}'}$
	$\mathbf{A}_{W4MAX} - \mathbf{A}_{W4MIN}$ $\mathbf{A}_{W4MAX} - \mathbf{A}_{W4MIN}$

Πίνακας Π.2.3: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

z	LV _{height} '
	$\frac{1}{LV_{height}}$
	CoilYTa2 right
x	$\frac{hv_{thickness12}'}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness12})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness12})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness12})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness12})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness12})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness1}} [x - (3E$
	(3E _u '+K'+F ₁ '+IntGap'+lv _{thickness1} '+HVLVgap'+hv _{thickness11} ')
у́	$\frac{c_{33} \cdot x' + d_{33}}{v}$
	$c_3 \cdot x + d_3$
	$c_3 = \frac{Y_{W3MAX} - Y_{W3MIN}}{d_3} = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W3MAX} - Y_{W3MAX} \cdot X_{W3MIN}}{d_3}$
	$X_{W3MAX} - X_{W3MIN}$, $X_{W3MAX} - X_{W3MIN}$
	$c_{33} = \frac{Y_{W3MAX}' - Y_{W3MIN}'}{1}$, $d_{33} = \frac{Y_{W3MIN}' \cdot X_{W3MAX}' - Y_{W3MAX}' \cdot X_{W3MIN}'}{1}$
_	$X_{W3MAX}'-X_{W3MIN}'$
Z	$\frac{LV_{height}}{Z}$
	LV _{height}
	CoilYTa1 right
X'	$\frac{hv_{thickness1}}{1} [x - (3E_u + K + F_1 + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap)] +$
	hv _{thickness11}
	$(3E_u'+K'+F_1'+IntGap'+lv_{thickness1}'+HVLVgap')$
У́	$\frac{c_{22} \cdot x' + d_{22}}{v}$
	$c_2 \cdot x + d_2$
	$c_2 = \frac{Y_{W2MAX} - Y_{W2MIN}}{W_{W2MIN}}, d_2 = \frac{Y_{W2MIN} \cdot X_{W2MAX} - Y_{W2MAX} \cdot X_{W2MIN}}{W_{W2MAX} \cdot X_{W2MIN}}$
	$X_{W2MAX} - X_{W2MIN} \qquad X_{W2MAX} - X_{W2MIN}$
	$c_{22} = \frac{Y_{W2MAX}' - Y_{W2MIN}'}{Y_{W2MAX}' - Y_{W2MIN}'}, d_{22} = \frac{Y_{W2MIN}' \cdot X_{W2MAX}' - Y_{W2MAX}' \cdot X_{W2MIN}'}{Y_{W2MAX}' - Y_{W2MAX}' - Y_{W2MAX}' - Y_{W2MIN}'}$
,	$X_{W2MAX}' - X_{W2MIN}'$ $X_{W2MAX}' - X_{W2MIN}'$
Z	$\frac{LV_{\text{height}}}{LV}Z$
	L V _{height}
,	CoilYTa4 center
X	$\frac{y'-d_{55}}{d_{55}} - \frac{y'-b_{55}}{d_{55}}$
	$\frac{c_{55}}{v-d_{55}} = \frac{a_{55}}{v-d_{55}} \left(x - \frac{y - b_{5}}{c_{55}}\right) + \frac{y - b_{55}}{c_{55}}$
	$\frac{y}{c_5} \frac{y}{c_5} \frac{y}{c_5} \frac{z}{c_5} \frac{z}$
v	hV di isteranz 24 '
3	$\frac{hv_{thickness24}}{hv_{thickness24}} [y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness21} + hv_{thickness24}] $
	$hv_{thickness22} + hv_{thickness23})] + (D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness21}')$
	$+ hv_{thickness22}'+hv_{thickness23}')$

226 παραρτημά Υλοποίηση και Αλληλεπίδραση Υποπρογραμματών Λογισμικού ΜΠΣ



z	LV _{height} '
	LV _{height}
	CoilYTa3 center
x′	y'-d ₄₄ y'-b ₄₄
	$\frac{c_{44}}{a_{44}}$ $(x - \frac{y - b_4}{a_{44}}) + \frac{y' - b_{44}}{a_{44}}$
	$\underline{\mathbf{y}} - \mathbf{d}_4 - \underline{\mathbf{y}} - \mathbf{b}_4 \mathbf{a}_4 \mathbf{a}_{44}$
	c ₄ a ₄
y	$\frac{hv_{thickness23}}{1}$ [y - (D ₁ + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness21} +
	hv _{thickness23}
	$hv_{thickness22})] + (D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness21}' + hv_{thickness22}')$
z	LV _{height} '
	LV _{height}
	CoilYTa2 center
x´	$\underline{y'-d_{33}}$ $\underline{y'-b_{33}}$
	$\frac{c_{33}}{(x-y-b_3)} + \frac{y-b_{33}}{(x-y-b_3)} + \frac{y-b_{33}}{(x-y-b_3)$
	$\underline{\mathbf{y}} - \mathbf{d}_3 - \underline{\mathbf{y}} - \mathbf{b}_3 \qquad \mathbf{a}_3 \qquad \mathbf{a}_{33}$
,	$c_3 a_3$
У	$\frac{hv_{thickness22}}{hv_{thickness2}} [y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness21})] +$
	IIV thickness22
	(D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness21} ')
z	LV _{height} 'z
	LV _{height}
	CoilYTa1 center
x´	$\underline{y'-d_{22}}$ $\underline{y'-b_{22}}$
	$\frac{c_{22}}{1-1} = \frac{a_{22}}{1-1} (x - \frac{y - b_2}{2}) + \frac{y' - b_{22}}{2}$
	$\frac{\mathbf{y}-\mathbf{a}_2}{\mathbf{a}_2} - \frac{\mathbf{y}-\mathbf{b}_2}{\mathbf{a}_2} \qquad \mathbf{a}_2 \qquad \mathbf{a}_{22}$
V ′	$\mathbf{c}_2 \mathbf{a}_2$
У	$\frac{\text{IV thickness21}}{\text{hv tricess1}} [y - (D_1 + \text{IntGap} + \text{lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap})] +$
	hiv thickness21
	(D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap')
Z	$\frac{LV_{height}}{Z}$
	LV _{height}
	CoilXTa left
X	$\frac{ v_{thickness1} }{ v_{thickness1} } [x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness1} + HVLVgap)] +$
	IV _{thickness1}
	(E _u '+ExtGap'+hv _{thickness1} '+HVLVgap')

Πίνακας Π.2.5: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

У́	$\frac{a_{11} \cdot x' + b_{11}}{a_1 \cdot x + b_1} y$,
	$\mathbf{a}_{1} = \frac{\mathbf{Y}_{W1MAX} - \mathbf{Y}_{W1MIN}}{\mathbf{X}_{W11MD1} - \mathbf{X}_{W11MAX}}, \mathbf{b}_{1} = \frac{\mathbf{Y}_{W1MIN} \cdot \mathbf{X}_{W11MIN} - \mathbf{Y}_{W1MAX} \cdot \mathbf{X}_{W11MAX}}{\mathbf{X}_{W11MD1} - \mathbf{X}_{W11MAX}}$
	$\mathbf{a}_{11} = \frac{\mathbf{Y}_{\text{W1MAX}}' - \mathbf{Y}_{\text{W1MIN}}'}{\mathbf{X}_{\text{W1MMN}}' - \mathbf{X}_{\text{W1MMN}}'}, \mathbf{b}_{11} = \frac{\mathbf{Y}_{\text{W1MIN}}' \cdot \mathbf{X}_{\text{W11MN}} - \mathbf{Y}_{\text{W1MAX}}' \cdot \mathbf{X}_{\text{W11MAX}}'}{\mathbf{X}_{\text{W11MAX}}' - \mathbf{X}_{\text{W11MAX}}' \cdot \mathbf{X}_{\text{W11MAX}}'}$
z	$\frac{LV_{\text{height}'}}{LV}Z$
X	$\frac{Iv_{thickness1}}{Iv_{thickness1}} [x - (3E_u + K + F_1 + IntGap)] + (3E_u' + K' + F_1' + IntGap')$
У́	$\frac{c_{11} \cdot x' + d_{11}}{c_1 \cdot x + d_1} y,$
	$Y_{WIMAX} - Y_{WIMIN}$, $Y_{WIMIN} \cdot X_{WIMAX} - Y_{WIMAX} \cdot X_{WIMIN}$
	$c_1 = \frac{1}{X_{WIMAX} - X_{WIMIN}}, d_1 = \frac{1}{X_{WIMAX} - X_{WIMIN}}$
	$\mathbf{c}_{11} = \frac{\mathbf{Y}_{W1MAX}' - \mathbf{Y}_{W1MIN}'}{\mathbf{X}_{W1MAX}' - \mathbf{X}_{W1MIN}'}, \mathbf{d}_{11} = \frac{\mathbf{Y}_{W1MIN}' \cdot \mathbf{X}_{W1MAX}' - \mathbf{Y}_{W1MAX}' \cdot \mathbf{X}_{W1MIN}'}{\mathbf{X}_{W1MAX}' - \mathbf{X}_{W1MIN}'}$
z	LV _{height} '
	LV _{height} Z
	CoilXTa center
x	$y'-d_{11}$ $y'-b_{11}$
X	CoilXTa center $\frac{\underline{y'-d_{11}}}{\underline{c_{11}}} - \frac{\underline{y'-b_{11}}}{\underline{a_{11}}} (x - \underline{y-b_1}) + \frac{\underline{y'-b_{11}}}{\underline{y'-b_{11}}}$
x′	CoilXTa center $\frac{\underline{y'-d_{11}}}{\underline{c_{11}}} - \frac{\underline{y'-b_{11}}}{\underline{a_{11}}} (x - \frac{\underline{y-b_1}}{\underline{a_1}}) + \frac{\underline{y'-b_{11}}}{\underline{a_{11}}}$
x	CoilXTa center $\frac{\frac{y'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}}{\frac{y-d_{1}}{c_{1}} - \frac{y-b_{1}}{a_{1}}} (x - \frac{y-b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}$
x´ y´	$\frac{V'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{y - b_1}{a_1}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{y - b_1}{a_1}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} \frac{1v_{\text{thickness}2}'}{c_1} [y - (D_1 + \text{IntGap})] + (D_1' + \text{IntGap'})$
x´ y` z´	$ \frac{\frac{y'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}}{\frac{y-d_{1}}{c_{1}} - \frac{y-b_{1}}{a_{1}}} (x - \frac{y-b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}}{a_{11}} \\ \frac{\frac{1}{v_{thickness2}'}}{1} [y - (D_{1} + IntGap)] + (D_{1}'+IntGap') \\ LV_{height'} = 2 $
x´ y´ z´	$ \frac{\frac{y'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}}{\frac{y-d_{1}}{c_{1}} - \frac{y-b_{1}}{a_{1}}} (x - \frac{y-b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}}{a_{11}} \\ \frac{\frac{1}{v_{thickness2}'}}{1} [y - (D_{1} + IntGap)] + (D_{1}' + IntGap') \\ \frac{\frac{1}{v_{thickness2}}}{1 \\ \frac{1}{v_{thight}'}} z $
x´ y` z´	CoilXTa center $ \frac{y'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} $ $ \frac{y - d_{1}}{c_{1}} - \frac{y - b_{1}}{a_{1}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} $ $ \frac{lv_{thickness2}'}{lv_{thickness2}} [y - (D_{1} + IntGap)] + (D_{1}'+IntGap') $
x´ y´ z´ x´	$ \frac{y'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} \\ \frac{y-d_{1}}{c_{1}} - \frac{y-b_{1}}{a_{1}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} \\ \frac{lv_{thickness2}'}{lv_{thickness2}} [y - (D_{1} + IntGap)] + (D_{1}' + IntGap') \\ \frac{LV_{height}'}{LV_{height}'} z \\ \frac{AirBox IntGap left}{lntGap'} [y - (F_{1} + FxtGap + by and a + HVI Vgap + by and a + by an$
x´ y´ z´ x´	$\frac{V'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{Y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{Y-b_{1}}{a_{1}}) + \frac{Y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{Y-b_{11}}{a_{1}}) + \frac{Y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{Y-b_{11}}{a_{1}}) + \frac{Y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{Y-b_{11}}{a_{11}}) +$
x´ y´ z´ x´	$\frac{V'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{y'-d_{1}}{c_{1}} - \frac{y - b_{1}}{a_{1}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{lv_{thickness2}'}{lv_{thickness2}} [y - (D_{1} + IntGap)] + (D_{1}'+IntGap')$ $\frac{LV_{height}'}{LV_{height}} z$ $\frac{ItGap'}{IntGap} [x - (E_{u} + ExtGap + hv_{thickness1} + HVLVgap + lv_{thickness1})] + (E_{u}'+ExtGap'+hv_{thickness1}'+HVLVgap'+lv_{thickness1}')$ $a new \cdot x'+b new$
x´ y´ z´ x´ y´	$\frac{V'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{y'-b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{\frac{v_{1}-d_{1}}{c_{1}} - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}}{\frac{v_{1}-b_{1}}{a_{1}}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{\frac{1}{v_{thickness2}'}}{\frac{1}{v_{thickness2}'}} [y - (D_{1} + IntGap)] + (D_{1}'+IntGap')$ $\frac{\frac{1}{v_{thickness2}}}{\frac{1}{v_{thickness2}}} z$ $\frac{AirBox IntGap left}{\frac{1}{ntGap}} [x - (E_{u} + ExtGap + hv_{thickness1} + HVLVgap + lv_{thickness1})] + (E_{u}'+ExtGap'+hv_{thickness1}'+HVLVgap'+lv_{thickness1}')$ $\frac{a - new \cdot x'+b - new}{a \cdot x + b} y,$
x´ y´ z´ x´ y´	$\frac{V - d_{11}}{c_{11}} - \frac{y' - b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{y' - d_{1}}{c_{1}} - \frac{y - b_{1}}{a_{1}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y' - b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{\frac{1}{y - d_{1}} - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}}{c_{1}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y' - b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{\frac{1}{v \text{thickness2}}}{\frac{1}{v \text{thickness2}}} [y - (D_{1} + \text{IntGap})] + (D_{1}' + \text{IntGap}')$ $\frac{\frac{1}{v \text{thickness2}}}{\frac{1}{v \text{thickness2}}} z$ $\frac{IV_{\text{height}}'}{IV_{\text{height}}} z$ $\frac{\frac{1}{V \text{height}}}{IntGap} [x - (E_{u} + \text{ExtGap} + hv_{\text{thickness1}} + HVLVgap + lv_{\text{thickness1}})] + (E_{u}' + \text{ExtGap}' + hv_{\text{thickness1}}' + HVLVgap' + lv_{\text{thickness1}})] + (E_{u}' + \text{ExtGap}' + hv_{\text{thickness1}}' + HVLVgap' + lv_{\text{thickness1}})] + (E_{u}' + ExtGap' + hv_{\text{thickness1}}' + HVLVgap' + lv_{\text{thickness1}}')$ $\frac{a - new \cdot x' + b - new}{a \cdot x + b} y,$ $a - new = -1, b - new = D_{1}' + \text{IntGap}' + X_{W11MAX}'$
x´ y´ z´ y´	$\frac{V - d_{11}}{c_{11}} - \frac{y' - b_{11}}{a_{11}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y' - b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{y' - d_{1}}{c_{1}} - \frac{y - b_{1}}{a_{1}} (x - \frac{y - b_{1}}{a_{1}}) + \frac{y' - b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{lv_{thickness2}'}{lv_{thickness2}} [y - (D_{1} + IntGap)] + (D_{1}' + IntGap')$ $\frac{LV_{height}'}{LV_{height}} z$ $\frac{IntGap'}{IntGap} [x - (E_{u} + ExtGap + hv_{thickness1} + HVLVgap + lv_{thickness1})] + (E_{u}' + ExtGap' + hv_{thickness1}' + HVLVgap' + lv_{thickness1}')$ $\frac{a - new \cdot x' + b - new}{a \cdot x + b} y,$ $a - new = -1, b - new = D_{1}' + IntGap' + X_{W11MAX}'$ $a = -1, b = D_{1} + IntGap + X_{W11MAX}$
x´ y´ z´ y´ z´	$\frac{V'-d_{11}}{c_{11}} - \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{y'-d_{1}}{c_{1}} - \frac{y-b_{1}}{a_{1}}$ $\frac{y'-d_{1}}{c_{1}} - \frac{y-b_{1}}{a_{1}}$ $\frac{v'-b_{1}}{a_{1}} + \frac{y'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{v'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{v'-b_{11}}{c_{1}} - \frac{v'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{v'-b_{11}}{a_{11}} + \frac{v'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{v'-b_{11}}{c_{1}} - \frac{v'-b_{11}}{a_{11}}$ $\frac{v'-b_{11}}{v'-b_{11}} + \frac{v'-b_{11}}{v'-b_{11}}$ $\frac{v'-b_{11}}{v'-b_{11}} + \frac{v'-b_{11}}{v'-b_{11}} + v'$



	AirBox IntGap right
x	IntGap'
	$\frac{1}{\text{IntGap}} [x - (3E_u + K + F_1)] + (3E_u' + K' + F_1')$
v	$c \text{ new} \cdot \mathbf{x'} + d \text{ new}$
y	$\frac{c_{-new} + d_{-new}}{c_{+} + d_{-}} y,$
	c new = 1. d new = D_1 '+IntGap'-X _{W1M1N1} '
	$c = 1$ $d = D_1 + IntGap - X_{WIMD}$
7	
Ł	$\frac{L \text{ neight}}{L V} Z$
	AirBox IntGap center
X	$\underline{y-b}_{new} = \underline{y-d}_{new}$
	$-\underline{a_new} \underline{c_new} (x-\underline{y-b}) + \underline{y'-b_new}$
	$y-b y-d$ a a_new
У	$\frac{\operatorname{IntGap}}{\operatorname{L} + C} (y - D_1) + D_1'$
,	IntGap
Z	$\frac{LV_{height}}{Z}$
	LV _{height}
	AirBox HVLVgap left
x´	$\frac{HVLVgap'}{HVLVgap'} [x - (E_{1} + ExtGan + hv_{d+1} - 1)] + (E_{1} + ExtGan' + hv_{d+1} - 1)]$
	HVLVgap
у́	$\frac{a_{12}' \cdot x' + b_{12}'}{x}$
	$a_{12} \cdot x + b_{12}$
	$Y_{W1MAX}'-Y_{W2MIN}'$ $h_{co}'-Y_{W2MIN}'X_{W11MIN}'-Y_{W1MAX}'X_{W22MAX}'$
	$X_{W11MIN}' - X_{W22MAX}', X_{W11MIN}' - X_{W22MAX}'$
	$\mathbf{A}_{12} = \frac{\mathbf{Y}_{W1MAX} - \mathbf{Y}_{W2MIN}}{\mathbf{Y}_{W1MIN}} \mathbf{h}_{12} = \frac{\mathbf{Y}_{W2MIN} \cdot \mathbf{X}_{W11MIN} - \mathbf{Y}_{W1MAX} \cdot \mathbf{X}_{W22MAX}}{\mathbf{Y}_{W2MIN}}$
	$X_{W11MIN} - X_{W22MAX}$, V_{12} , $X_{W11MIN} - X_{W22MAX}$
z	LV _{height} '
	LV _{height}
	AirBox HVLVgap right
x´	HVLVgap' [$V = (3E + K + E + IntGap + IV + V)$]
	$\frac{1}{\text{HVLVgap}} \left[X - (3E_u + K + T_1 + \text{IntGap} + W_{\text{thickness}}) \right] + \frac{1}{1} + \frac{1}{1}$
_	$(3E_u'+K'+F_l'+IntGap'+lv_{thicknessl'})$
У́	$\frac{\mathbf{c}_{12}' \cdot \mathbf{x}' + \mathbf{d}_{12}'}{\mathbf{y}}$
	$c_{12} \cdot x + d_{12}$
	$c_{12}' = \frac{Y_{W2MIN}' - Y_{W1MAX}'}{d_{12}'}$, $d_{12}' = \frac{Y_{W1MAX}' \cdot X_{W2MIN}' - Y_{W2MIN}' \cdot X_{W1MAX}'}{d_{12}'}$
	$X_{W2MIN}' - X_{W1MAX}' X_{W2MIN}' - X_{W1MAX}'$
	$c_{12} = \frac{Y_{W2MIN} - Y_{W1MAX}}{Y_{W2MIN}}, d_{12} = \frac{Y_{W1MAX} \cdot X_{W2MIN} - Y_{W2MIN} \cdot X_{W1MAX}}{Y_{W1MAX}}$
	$X_{W2MIN} - X_{W1MAX}$ $X_{W2MIN} - X_{W1MAX}$

Πίνακας Π.2.7: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

z	LV _{height} '
	LV _{height} Z
	AirBox HVLVgap center
x′	y'-b ₁₂ ' y'-d ₁₂ '
	a_{12}' c_{12}' $(x - y - b_{12}) + y' - b_{12}'$
	$\underline{y-b_{12}}$ $\underline{y-d_{12}}$ $(x a_{12}) a_{12}'$
	a_{12} c_{12}
У́	$\frac{\text{HVLVgap'}}{\text{HVLVgap'}} \left[v - (D_1 + \text{IntGap} + v_{\text{thiskmass}}) \right] + (D_1 + \text{IntGap'} + v_{\text{thiskmass}}')$
	HVLVgap
Z	LV _{height} '
	LV _{height}
	AirBox ExtGap
x´	$\frac{\text{ExtGap'}}{(x-F_{i})+F_{i}}$
	ExtGap $(X - L_u) + L_u$
У́	D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} '
	$D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}$
z	LV _{height} '
	LV _{height}
	Air Box Right of Coils 1a
x′	$\frac{F_2'-lv_{thickness1}'-hv_{thickness1}'-IntGap'-HVLVgap'}{[x - (3F_1 + K + F_1 + IntGap]}$
	$F_2 - lv_{thickness1} - hv_{thickness1} - IntGap - HVLVgap^{LV} - (5D_u + R + T_1 + IntGap)$
	+ $lv_{thickness1}$ + $HVLVgap$ + $hv_{thickness1}$] + ($3E_u$ '+ K '+ F_1 '+ $IntGap$ '+ $lv_{thickness1}$ '+
	HVLVgap'+hv _{thickness1} ')
У́	$\frac{D_1'}{v}$
	D_1
z	$\frac{G'}{Z}$
	Air Box Right of Colls 1b
X	$\frac{F_2 - IV_{\text{thickness1}} - IIV_{\text{thickness1}} - IIIGap - HVLVgap}{F_2 - IV_{\text{thickness1}} - Iv_{\text{thickness1}} - IntGap - HVLVgap} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap)]$
	+ $lv_{thickness1}$ + $HVLVgap$ + $hv_{thickness1}$] + ($3E_u$ '+K'+F ₁ '+IntGap'+ $lv_{thickness1}$ '+
	HVLVgap'+hv _{thickness1} ')
у́	IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} '
	IntGap + $lv_{thickness2}$ + HVLVgap + $hv_{thickness2}$

230 παραρτημά Υλοποίηση και Αλληλεπίδραση Υποπρογραμματών Λογισμικού ΜΠΣ

Πίνακας Π.2.8: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

παραρτημά Υλοποίηση και Αλληλεπίδραση Υποπρογραμματών Λογισμικού ΜΠΣ	231	

z	$\frac{G'}{z}$
	G
	Air Box Left of Coils
X'	$\frac{E_u'}{E_u}x$
у́	IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ' (r. D.) + D.
	$\frac{1}{\text{IntGap} + \text{lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness2}}} (y - D_1) + D_1$
z	G'
	$\frac{1}{G}$
	Air Box Right of Coils 2
X´	$\frac{E_{u}'}{E_{u}}[x - (3E_{u} + K + F_{1} + F_{2})] + (3E_{u}' + K' + F_{1}' + F_{2}')$
у́	IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ' (r D) + D'
	$\frac{1}{\text{IntGap} + \text{lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness2}}} (y - D_1) + D_1$
z	G'
	G
	Air Box Front of Cores
X´	$\frac{4E_{u}'+K'+F_{1}'+F_{2}'}{x}$
	$4E_u + K + F_1 + F_2$
У́	$\frac{\text{IntGap'+lv}_{\text{thickness2}'} + \text{HVLVgap'+hv}_{\text{thickness2}'}}{(v - D_1) + D_1'}$
	IntGap + $lv_{thickness2}$ + HVLVgap + $hv_{thickness2}$ (5) = 1) + 1
z	$\frac{E_u'}{E_u'}(z-\frac{G}{2})+\frac{G'}{2}$
	$E_u = 2 = 2$
X	$\frac{hv_{thickness14}}{hv_{thickness14}} [x - (E_u + ExtGap)] + (E_u' + ExtGap')$
У́	$\frac{a_{55} \cdot x' + b_{55}}{v}$
	$a_5 \cdot x + b_5$
	$a_5 = \frac{Y_{W5MAX} - Y_{W5MIN}}{Y_{W5MIN}}, b_5 = \frac{Y_{W5MIN} \cdot X_{W55MIN} - Y_{W5MAX} \cdot X_{W55MAX}}{Y_{W55MAX} \cdot X_{W55MAX}}$
	$X_{W55MIN} - X_{W55MAX}$ $X_{W55MIN} - X_{W55MAX}$
	$a_{55} = \frac{Y_{W5MAX} - Y_{W5MIN}}{X_{W55MIN} - X_{W55MAX}}, b_{55} = \frac{Y_{W5MIN} + X_{W55MIN} - Y_{W5MAX} + X_{W55MAX}}{X_{W55MIN} - X_{W55MAX}}$
z	$\frac{G'}{LV_{\text{beight}}}$
	$\frac{2}{C}$ (z-LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{d}{2} - LV_{height}$
	Air Box Top CoilYTa3 left
x′	hv _{thickness13} ' [(E.) ExtCorr (here) (E.) (E.) (E.) (C.) (I.)
	$\frac{1}{hv_{thickness13}} \left[x - (E_u + ExtGap + nv_{thickness14}) \right] + (E_u + ExtGap + nv_{thickness14})$

Πίνακας Π.2.9: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

У́	$\frac{a_{44} \cdot x' + b_{44}}{a_{44}} y$,
	$a_4 \cdot x + b_4$ $Y_{WAMAY} - Y_{WAMB}$ $Y_{WAMB} \cdot X_{WAMB} - Y_{WAMAY} \cdot X_{WAMAY}$
	$a_{4} = \frac{1}{X_{W4MMA}} + \frac{1}{W4MMA} + \frac{1}{W4MA} + \frac{1}{W4MA} + \frac{1}{W4} + $
	$Y_{W4MAX}'-Y_{W4MIN}'$ $Y_{W4MIN}'X_{W44MIN}'-Y_{W4MAX}'X_{W44MAX}'$
	$a_{44} = \frac{1}{X_{W44MIN} - X_{W44MAX'}}, b_{44} = \frac{1}{X_{W44MIN} - X_{W44MAX'}}$
z	$\frac{G'}{LV_{\text{height}}}$
	$\frac{2}{G}$ (z-LV _{height})+LV _{height} '
	$\frac{d}{2}$ - LV _{height}
	Air Box Top CoilYTa2 left
x′	$\frac{hv_{thickness12}}{[x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14} + hv_{thickness13})] +$
	hv _{thickness12}
	(E _u '+ExtGap'+hv _{thickness14} '+hv _{thickness13} ')
у́	$\frac{a_{33} \cdot x' + b_{33}}{v}$
	$a_3 \cdot x + b_3$
	$a_3 = \frac{Y_{W3MAX} - Y_{W3MIN}}{Y_{W3MAX} - Y_{W3MIN}}, b_3 = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W33MIN} - Y_{W3MAX} \cdot X_{W33MAX}}{Y_{W3MAX} - Y_{W3MAX} - $
	$\begin{array}{ccc} \mathbf{A}_{W33MIN} - \mathbf{A}_{W33MAX} & \mathbf{A}_{W33MIN} - \mathbf{A}_{W33MAX} \\ \mathbf{Y}_{W2MAY}' - \mathbf{Y}_{W2MIN}' & \mathbf{Y}_{W2MIN}' \cdot \mathbf{X}_{W22MIN}' - \mathbf{Y}_{W2MAY}' \cdot \mathbf{X}_{W22MAY}' \end{array}$
	$a_{33} = \frac{w_{3MAX} - w_{3MAX}}{X_{W33MIN} - X_{W33MAX}}, b_{33} = \frac{w_{3MAX} - w_{3MAX} - w_{3MAX}}{X_{W33MIN} - X_{W33MAX}}$
z´	$\frac{G'}{-LV_{\text{brinks}}}$
	$2 \qquad \text{regim} \qquad (z + V -) + V - 1$
	$\frac{1}{G}$ (Z – L V height) + L V height
	$\frac{G}{2} - LV_{height} (2 - LV_{height}) + LV_{height}$
	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} (2 - LV_{height}) + LV_{height}$ Air Box Top CoilYTa1 left
 	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} = LV_{height} + LV_{height}$ Air Box Top CoilYTa1 left $\frac{hv_{thickness11}'}{1} [x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14} + hv_{thickness13} + hv_{thickness12})] + LV_{height} = LV_{height}$
X´	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} = LV_{height} + LV_{height}$ $\frac{Air Box Top CoilYTa1 left}{hv_{thickness11}'} [x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14} + hv_{thickness13} + hv_{thickness12})] + LV_{height} = LV_{height}$
 X´	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} (Z - LV_{height}) + LV_{height}$ $\frac{Air Box Top CoilYTa1 left}{hv_{thickness11}'} [x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14} + hv_{thickness13} + hv_{thickness12})] + (E_u' + ExtGap' + hv_{thickness14}' + hv_{thickness13}' + hv_{thickness12}')$
x´ y´	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} (Z - LV_{height}) + LV_{height}$ $\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height}$ $\frac{Air Box Top CoilYTa1 left}{hv_{thickness11}'} [x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14} + hv_{thickness13} + hv_{thickness12})] + (E_u' + ExtGap' + hv_{thickness14}' + hv_{thickness13}' + hv_{thickness12}')$ $\frac{a_{22} \cdot x' + b_{22}}{h}y,$
x´ y´	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} = LV_{height} + LV_{height}$ $\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} = \frac{1}{2} - LV_{heig$
x´ y´	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} = LV_{height} + LV_{height}$ $\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} = LV_{height}$ $\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} = LV_$
x´ y´	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} (Z - LV_{height}) + LV_{height}$ Air Box Top CoilYTa1 left $\frac{hv_{thickness11}'}{hv_{thickness11}} [x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14} + hv_{thickness13} + hv_{thickness12})] + (E_u' + ExtGap' + hv_{thickness14}' + hv_{thickness13}' + hv_{thickness12}')$ $\frac{a_{22} \cdot x' + b_{22}}{a_2 \cdot x + b_2} y,$ $a_2 = \frac{Y_{W2MAX} - Y_{W2MIN}}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}}, b_2 = \frac{Y_{W2MIN} \cdot X_{W22MIN} - Y_{W2MAX} \cdot X_{W22MAX}}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}}$
x´ y´	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} = LV_{height} + LV_{height}$ $\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} = \frac{VV_{height}}{V_{height}} = \frac{VV_{height}}{V_{height}} = \frac{VV_{height}}{V_{height}} = \frac{VV_{height}}{V_{height}} = \frac{VV_{height}}{V_{height}} = \frac{VV_{height}}{V_{height}} = \frac{VV_{height}}{VV_{height}} = \frac{VV_{height}}{VV_$
x´ y´ z´	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} (2 - LV_{height}) + LV_{height}}{\overline{2} - LV_{height}}$ $\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} [X - (V_{height}) + LV_{height}] + LV_{height}}{\overline{2} - LV_{height}} [X - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14} + hv_{thickness13} + hv_{thickness12})] + (E_u' + ExtGap' + hv_{thickness14} ' + hv_{thickness13} ' + hv_{thickness12} ')$ $\frac{a_{22} \cdot x' + b_{22}}{a_2 \cdot x + b_2} y,$ $a_2 = \frac{Y_{W2MAX} - Y_{W2MIN}}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}}, b_2 = \frac{Y_{W2MIN} \cdot X_{W22MIN} - Y_{W2MAX} \cdot X_{W22MAX}}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}}$ $a_{22} = \frac{Y_{W2MAX} - Y_{W2MIN}'}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}'}, b_{22} = \frac{Y_{W2MIN} \cdot X_{W22MIN} - Y_{W2MAX} \cdot X_{W22MAX}}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}}$
x´ y´ z´	$\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} (2 - LV_{height}) + LV_{height}}$ $\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} (2 - LV_{height}) + LV_{height}}$ $\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height} [x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness14} + hv_{thickness13} + hv_{thickness12})] + (E_u' + ExtGap' + hv_{thickness14}' + hv_{thickness13}' + hv_{thickness12}')$ $\frac{a_{22} \cdot x' + b_{22}}{a_2 \cdot x + b_2} y,$ $a_2 = \frac{Y_{W2MAX} - Y_{W2MIN}}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}}, b_2 = \frac{Y_{W2MIN} \cdot X_{W22MIN} - Y_{W2MAX} \cdot X_{W22MAX}}{X_{W22MIN} - X_{W22MAX}}$ $a_{22} = \frac{Y_{W2MAX}' - Y_{W2MIN}'}{X_{W22MIN}' - X_{W22MAX}'}, b_{22} = \frac{Y_{W2MIN}' \cdot X_{W22MIN}' - Y_{W2MAX}' \cdot X_{W22MAX}'}{X_{W22MIN}' - X_{W22MAX}'}$ $\frac{\overline{G}}{2} - LV_{height}'}{(z - LV_{height}) + LV_{height}'}$

Πίνακας Π.2.10: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

	Air Box Top CoilYTa4 right
x´	$\frac{hv_{thickness14}'}{1}$ [x - (3E ₁₁ + K + F ₁ + IntGap + lv _{thickness1} + HVLVgap + hv _{thickness11}
	hv _{thickness14}
	$+ hv_{thickness12} + hv_{thickness13})] + (3E_{u}' + K' + F_{l}' + IntGap' + lv_{thickness1}' + HVLVgap'$
_	+ hv _{thickness11} '+hv _{thickness12} '+hv _{thickness13} ')
У	$\frac{c_{55} \cdot x' + d_{55}}{c_5 \cdot x + d_5} y,$
	$c_5 = \frac{Y_{W5MAX} - Y_{W5MIN}}{V}, d_5 = \frac{Y_{W5MIN} \cdot X_{W5MAX} - Y_{W5MAX} \cdot X_{W5MIN}}{V}$
	$\begin{array}{cccc} \mathbf{A}_{W5MAX} - \mathbf{A}_{W5MIN} & \mathbf{A}_{W5MAX} - \mathbf{A}_{W5MIN} \\ \mathbf{V} & \mathbf{V} & \mathbf{V} & \mathbf{V} & \mathbf{V} & \mathbf{V} & \mathbf{V} \end{array}$
	$c_{55} = \frac{T_{W5MAX} - T_{W5MIN}}{X_{W5MAX}' - X_{W5MIN}'}, d_{55} = \frac{T_{W5MIN} \cdot X_{W5MAX} - T_{W5MAX} \cdot X_{W5MIN}}{X_{W5MAX}' - X_{W5MIN}'}$
z	G' LV '
	$\frac{2}{2} - Lv_{\text{height}} (z - LV_{\text{height}}) + LV_{\text{height}}'$
	$\frac{G}{2} - LV_{\text{height}}$
	Air Box Top CoilYTa3 right
x	hv _{thickness13} 'r (2E - K - E - LetConstal
	$\frac{1}{hv_{thickness13}} [x - (3E_u + K + F_1 + IntGap + Iv_{thickness1} + HvLvgap + nv_{thickness11}]$
	+ $hv_{thickness12}$] + (3E _u '+K'+F ₁ '+IntGap'+ $lv_{thickness1}$ '+HVLVgap'+ $hv_{thickness11}$ '
	+ hv _{thickness12} ')
У́	$\frac{c_{44} \cdot x' + d_{44}}{v}$ v
	$c_4 \cdot x + d_4$
	$c_4 = \frac{Y_{W4MAX} - Y_{W4MIN}}{V}, d_4 = \frac{Y_{W4MIN} \cdot X_{W4MAX} - Y_{W4MAX} \cdot X_{W4MIN}}{V}$
	$X_{W4MAX} - X_{W4MIN}$ $X_{W4MAX} - X_{W4MIN}$
	$c_{44} = \frac{Y_{W4MAX} - Y_{W4MIN}}{X_{W4MAX} - X_{W4MIN}}, d_{44} = \frac{Y_{W4MIN} \cdot X_{W4MAX} - Y_{W4MAX} \cdot X_{W4MIN}}{X_{W4MAX} - X_{W4MIN}}$
z′	$\frac{G'}{-LV_{\text{baiebt}}}$
	$\frac{2}{C}$ (z-LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{d}{2}$ – LV _{height}
	Air Box Top CoilYTa2 right
x́	$\frac{hv_{thickness12}'}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness1}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness1}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + HVLVgap + hv_{thickness11})] + \frac{hv_{thickness12}}{hv_{thickness12}} [x - (3E_u + K + F_l + HVLV$
	(3E _u '+K'+F ₁ '+IntGap'+lv _{thickness1} '+HVLVgap'+hv _{thickness11} ')

Πίνακας Π.2.11: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

У́	$\frac{c_{33} \cdot x' + d_{33}}{v}$ v.
	$c_3 \cdot x + d_3$
	$c_3 = \frac{Y_{W3MAX} - Y_{W3MIN}}{Q_3} = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W3MAX} - Y_{W3MAX} \cdot X_{W3MIN}}{Q_3 = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W3MX} - Y_{W3MAX} \cdot X_{W3MIN}}{Q_3 = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W3MX} - Y_{W3MX} \cdot X_{W3MX} - Y_{W3MX} \cdot X_{W3MIN}}{Q_3 = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W3MX} - Y_{W3MX} \cdot X_{W3MX} - Y_{W3MX} \cdot X_{W3MIN}}{Q_3 = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W3MX} - Y_{W3MX} \cdot X_{W3MX} - Y_{W3MX} \cdot X_{W3MIN}}{Q_3 = \frac{Y_{W3MIN} \cdot X_{W3MX} - Y_{W3MX} \cdot X_{W3MX} - Y_{W3MX} - Y_{W3MX}$
	$X_{W3MAX} - X_{W3MIN}$ $X_{W3MAX} - X_{W3MIN}$
	$c_{33} = \frac{Y_{W3MAX}' - Y_{W3MIN}'}{Y_{W3MAX}' - Y_{W3MIN}'}, d_{33} = \frac{Y_{W3MIN}' \cdot X_{W3MAX}' - Y_{W3MAX}' \cdot X_{W3MIN}'}{Y_{W3MAX}' - Y_{W3MAX}' - Y_{W3MIN}'}$
	$X_{W3MAX}' - X_{W3MIN}'$
Z	$\frac{G'}{C} - LV_{\text{height}}$
	$\frac{2}{G}$ (z - LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{d}{2}$ - LV _{height}
	Air Box Top CoilYTa1 right
x′	$hv_{thickness1}$
	$\frac{1}{hv_{thickness11}} [x - (3E_u + K + F_1 + IntGap + Iv_{thickness1} + HvLvgap)] +$
	(3E '+K'+E '+IntGan'+ly, ('+HVI Vgan')
v	$(3L_u + \mathbf{x} + 1 + 1)$ + 1
J	$\frac{c_{22} + c_{22}}{c_{22} + x + d_{22}} y$,
	$Y_{W2MAY} - Y_{W2MDY} - Y_{W2MDY} + X_{W2MAY} - Y_{W2MAY} + X_{W2MDY}$
	$c_2 = \frac{T_{W2MAX} - T_{W2MIN}}{X_{W2MAX} - X_{W2MIN}}, d_2 = \frac{T_{W2MIN} - T_{W2MAX} - T_{W2MAX} - T_{W2MIN}}{X_{W2MAX} - X_{W2MIN}}$
	$Y_{W2MAX} - Y_{W2MIN}$ $Y_{W2MAX} - Y_{W2MAX} - Y_{W2MAX} - Y_{W2MAX}$
	$c_{22} = \frac{w_{2MMA} - w_{2MMA}}{X_{W2MAX} - X_{W2MIN}}, d_{22} = \frac{w_{2MMA} - w_{2MMA} - w_{2MMA}}{X_{W2MAX} - X_{W2MIN}}$
z	G' LV I
	$\frac{2}{2} - LV_{\text{height}} (z - LV_{\text{height}}) + LV_{\text{height}}$
	$\frac{G}{G} - LV_{\text{height}} + LV_{\text{height}}$
v ′	Air Box Top Coll Y 1 a4 center
Λ	$\frac{y-u_{55}}{c} - \frac{y-u_{55}}{c}$
	$\frac{c_{55}}{v-d_5} \frac{a_{55}}{v-b_5} \left(x - \frac{y}{a_5}\right) + \frac{y}{a_{55}} \frac{b_{55}}{a_{55}}$
	$\frac{5}{c_5} - \frac{5}{a_5} - \frac{5}$
v	hv _{thickness24} 'r (D. 1997)
J	$\frac{1}{hv_{thickness24}} \left[y - (D_1 + IntGap + Iv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness21} + HVLVgap + hv_{thickness24} + HVLVgap $
	here is the second seco
	$nv_{thickness22} + nv_{thickness23}) + (D_1 + ntGap + nv_{thickness2} + nv_L v gap + nv_{thickness21})$
	$+ hv_{thickness22}' + hv_{thickness23}')$
z	$\frac{G'}{G}$ – IV ₁ · · · ·
	$\frac{2}{C} \frac{(z - LV_{height}) + LV_{height}}{(z - LV_{height}) + LV_{height}}$
	$\frac{G}{2} - LV_{\text{height}}$

Πίνακας Π.2.12: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

	Air Box Top CoilYTa3 center
x′	$y'-d_{44} - y'-b_{44}$
	$\frac{c_{44}}{(x-y-b_4)} + \frac{y'-b_{44}}{(x-y-b_4)} + \frac{y'-b_{44}}{(x-y-b$
	$\underline{y-d_4}$ $\underline{y-b_4}$ a_4 a_{44}
v ′	$c_4 a_4$
у	$\frac{\text{Hv thickness23}}{\text{hv}_{\text{thickness23}}} \left[y - (D_1 + \text{IntGap} + \text{lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness21}} + \text{HVLVgap} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness21}} + \text{HVLVgap} + HVLVga$
	hv _{thickness22})]+(D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness21} '+hv _{thickness22} ')
z	$\frac{G'}{I}$ - IV_{I} · · · · ·
	$\frac{2}{C}$ (z-LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{G}{2} - LV_{\text{height}}$
	Air Box Top CoilYTa2 center
x′	y'-d ₃₃ y'-b ₃₃
	$\frac{1}{c_{33}} - \frac{1}{a_{33}} (x - \frac{y - b_3}{y} + \frac{y' - b_{33}}{y} + \frac{y' - b_{33}}{$
	$\underline{y-d_3} \underline{y-b_3} (x a_3) a_{33}$
	c ₃ a ₃
У́	$\frac{hv_{thickness22}}{1} [y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness21})] +$
	hv _{thickness22}
	$(D_1'+IntGap'+lv_{thickness2}'+HVLVgap'+hv_{thickness21}')$
z′	$\frac{G'}{LV_{\text{height}}}$
	$\frac{2}{G}$ (z-LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{d}{2}$ – LV _{height}
	Air Box Top CoilYTa1 center
x	$y'-d_{22}$ $y'-b_{22}$
	$\frac{c_{22}}{(x-y-b_2)} + \frac{y-b_2}{(y-b_2)} + \frac{y-b_{22}}{(y-b_2)}$
	$\underline{y-d_2} \underline{y-b_2}$ a_2 a_{22}
	$c_2 a_2$
У	$\frac{\text{IV thickness21}}{\text{hV thickness21}} [y - (D_1 + \text{IntGap} + \text{lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap})] +$
	(D, '+IntGan'+ly,, s'+HVI Vgan')
7	G'
-	$\frac{3}{2}$ - LV _{height} ' (7 LV) + LV
	$\frac{\overline{G}}{\overline{G} - I V_{height}} (Z - L V_{height}) + L V_{height}$
	2 ² ineight

Πίνακας Π.2.13: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.
	Air Box Top CoilXTa left
X´	$\frac{lv_{thickness1}'}{lv_{thickness1}}[x - (E_u + ExtGap + hv_{thickness1} + HVLVgap)] +$
-	(E _u '+ExtGap'+hv _{thickness1} '+HVLVgap')
У	$\frac{a_{11} \cdot x' + b_{11}}{a_1 \cdot x + b_1} y,$
	$a_1 = \frac{Y_{W1MAX} - Y_{W1MIN}}{X_{W11MIN} - X_{W11MAX}}, b_1 = \frac{Y_{W1MIN} \cdot X_{W11MIN} - Y_{W1MAX} \cdot X_{W11MAX}}{X_{W11MIN} - X_{W11MAX}}$
	$a_{11} = \frac{Y_{W1MAX}' - Y_{W1MIN}'}{X_{W11MIN}' - X_{W11MAX}'}, b_{11} = \frac{Y_{W1MIN}' \cdot X_{W11MIN}' - Y_{W1MAX}' \cdot X_{W11MAX}'}{X_{W11MIN}' - X_{W11MAX}'}$
z	$\frac{G'}{2} - LV_{\text{height}'}$
	$\frac{2}{\frac{G}{2} - LV_{height}} (z - LV_{height}) + LV_{height}'$
	Air Box Top CoilXTa right
x	
	$\frac{1}{ v_{thickness1}} [x - (3E_u + K + F_1 + IntGap)] + (3E_u + K + F_1 + IntGap)$
у́	$c_{11} \cdot x' + d_{11}$ $A_{11} = Y_{W1MAX} - Y_{W1MIN}$ $A_{11} = Y_{W1MIN} \cdot X_{W1MAX} - Y_{W1MAX} \cdot X_{W1MIN}$
	$\frac{1}{c_1 \cdot x + d_1} y, c_1 - \frac{1}{X_{W1MAX} - X_{W1MIN}}, d_1 - \frac{1}{X_{W1MAX} - X_{W1MIN}}$
	$c_{11} = \frac{Y_{W1MAX}' - Y_{W1MIN}'}{X_{W1MAX}' - X_{W1MIN}'}, d_{11} = \frac{Y_{W1MIN}' \cdot X_{W1MAX}' - Y_{W1MAX}' \cdot X_{W1MIN}'}{X_{W1MAX}' - X_{W1MIN}'}$
z	G' IV I
	$\frac{2}{2} - Lv_{\text{height}} (z - LV_{\text{height}}) + LV_{\text{height}}'$
	$\frac{G}{2} - LV_{\text{height}}$
	Air Box Top CoilXTa center
x	$y'-d_{11}$ $y'-b_{11}$
	$\frac{1}{c_{11}} - \frac{1}{a_{11}} - \frac{1}$
	$\frac{y-d_1}{2} - \frac{y-b_1}{2} (x - \frac{y-b_1}{a_1}) + \frac{y-b_1}{a_{11}}$
_	$c_1 a_1$
У́	$\frac{ v_{thickness2'} }{ v_1(D_1 + IntGap) } + (D_1' + IntGap')$
,	lv _{thickness2}
Z	$\frac{G}{2}$ - LV _{height} '
	$\frac{2}{G}$ (z-LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{1}{2}$ - LV _{height}

Πίνακας Π.2.14: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

	AirBox Top IntGap left
X	$\frac{\text{IntGap'}}{\text{IntGap}}[x - (E_u + \text{ExtGap} + hv_{\text{thickness1}} + \text{HVLVgap} + lv_{\text{thickness1}})] + \frac{1}{1}$
	$(E_u'+ExtGap'+hv_{thickness1}'+HVLVgap'+lv_{thickness1}')$
У́	$\underline{a_\text{new} \cdot x' + b_\text{new}}_{y,}$
	$a \cdot x + b$ a new = -1, b new = D ₁ '+IntGap'+X _{W1IMAX} '
	$a = -1$, $b = D_1 + IntGap + X_{W11MAX}$
z	$\frac{G'}{LV_{\text{bainst}}}$
	$\frac{2}{G}$ $(z - LV_{height}) + LV_{height}'$
	$\frac{1}{2}$ - LV _{height}
	AirBox Top IntGap right
X'	$\frac{\text{IntGap'}}{\text{IntGap}}[x - (3E_u + K + F_1)] + (3E_u' + K' + F_1')$
у́	$\frac{c _ new \cdot x' + d _ new}{v}$
	$c \cdot x + d$
	$c_new = 1, d_new = D_1 + IntGap - X_{W1MIN}$
- ′	$c = 1, d = D_1 + IIIGap - X_{WIMIN}$
Z	$\frac{G}{2} - LV_{\text{height}}$
	$\frac{2}{G}$ (z - LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{1}{2}$ - LV _{height}
	AirBox Top IntGap center
X´	<u>y'-b_new</u> <u>y'-d_new</u>
	$\underline{a_new} c_new}(x-\underline{y-b}) + \underline{y'-b_new}$
	$\frac{y-b}{a}$ <u>y-d</u> <u>a</u> <u>a</u> <u>new</u>
v	a c IntGan'
5	$\frac{\operatorname{IntGap}}{\operatorname{IntGap}}(y - D_1) + D_1'$
z	$\frac{G'}{I} - LV_{\text{bright}}$
	$\frac{2}{C}$ (z-LV _{height})+LV _{height} '
	$\frac{G}{2}$ - LV _{height}
	AirBox Top HVLVgap left
x´	$\frac{\text{HVLVgap'}}{\text{HVLVgap'}} [x - (E_y + \text{ExtGap} + hy_{\text{thickness}})] + (E_y + \text{ExtGap'} + hy_{\text{thickness}})]$
	HVLVgap

Πίνακας Π.2.15: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

у́	$\frac{a_{12}' x' + b_{12}'}{y}$
	$a_{12} \cdot x + b_{12}$
	$a_{12}' = \frac{Y_{W1MAX} - Y_{W2MIN}}{Y_{W1MAX} + Y_{W2MIN}}, b_{12}' = \frac{Y_{W2MIN} + X_{W11MIN} - Y_{W1MAX} + X_{W22MAX}}{Y_{W2MIN} + Y_{W1MAX} + Y_{W2MIN}}$
	$\mathbf{X}_{W11MIN} - \mathbf{X}_{W22MAX} \qquad \mathbf{X}_{W11MIN} - \mathbf{X}_{W22MAX} \\ \mathbf{Y}_{W11MIN} - \mathbf{Y}_{W22MAX} \qquad \mathbf{Y}_{W11MIN} - \mathbf{X}_{W22MAX} $
	$a_{12} = \frac{1}{X} 1$
z	G'
_	$\frac{-}{2}$ - LV _{height} ' (7 - LV -) + LV - '
	$\frac{G}{G} - LV_{\text{height}} (Z - LV_{\text{height}}) + LV_{\text{height}}$
	2 ² ⁿ eight
	AirBox Top HVLVgap right
X	$\frac{HVLVgap}{HVLVgap} [x - (3E_u + K + F_1 + IntGap + lv_{thickness1})] +$
	II v L v gap
	$(3E_u'+K'+F_l'+IntGap'+lv_{thicknessl'})$
y	$\frac{c_{12} \cdot x' + d_{12}}{y} y$
	$c_{12} \cdot x + a_{12}$
	$c_{12}' = \frac{1}{X} $
	$\begin{array}{ccc} X_{W2MIN} & X_{W1MAX} & X_{W2MIN} & X_{W1MAX} \\ Y_{W2MIN} - Y_{W1MAX} & Y_{W1MAX} \cdot X_{W2MIN} - Y_{W2MIN} \cdot X_{W1MAX} \end{array}$
	$c_{12} = \frac{1}{X_{W2MIN} - X_{W1MAX}}, d_{12} = \frac{1}{X_{W1MAX} - X_{W2MIN} - X_{W1MAX}}, d_{12} = \frac{1}{X_{W1MAX} - X_{W1MAX} - X_{W1MAX}}$
z	G' IV '
	$\frac{2}{2}$ (z-LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{G}{2}$ - LV _{height}
	2 AirBox Ton HVI Vgan center
x	$\frac{v'-b_{12}'}{v'-d_{12}'}$
	$\frac{y-y_{12}}{a_{12}} - \frac{y-y_{12}}{c_{12}} - \frac{y-b_{12}}{c_{12}} + \frac{y-b_{12}}{c_{12}}$
	$\frac{y-b_{12}}{y-b_{12}} - \frac{y-d_{12}}{y-d_{12}} (x - \frac{y-d_{12}}{a_{12}}) + \frac{y-d_{12}}{a_{12}}$
	a_{12} c_{12}
У́	$\frac{\text{HVLVgap'}}{[v - (D_1 + \text{IntGap} + v_{\text{thickness}})] + (D_1 + \text{IntGap'} + v_{\text{thickness}}')]}$
,	HVLVgap
Z	$\frac{G'}{2}$ - LV _{height} '
	$\frac{2}{G}$ (z - LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{1}{2}$ - LV _{height}
	AirBox Top ExtGap
x′	$\frac{\text{ExtGap'}}{\text{ExtGap'}}(x - E_u) + E_u'$
	ExtGap

Πίνακας Π.2.16: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

	D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} '
	$\overline{D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}}^{y}$
z	$\frac{G'}{I}$ - L.V
	$\frac{2}{C}$ (z-LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{G}{2}$ - LV _{height}
	2 Air Boy left 1
x′	Dlongth'
	$\frac{-\text{rengin}}{D_{\text{length}}} \mathbf{X}$
v	D, '+IntGan'+ly,,, .'+HVI Vgan'+by,,, .'
J	$\frac{D_1 + \text{IntGap} + 1 \text{v}_{\text{thickness2}} + 11 \text{v} D \text{v} \text{gap} + 1 \text{v}_{\text{thickness2}}}{D_1 + \text{IntGap} + 1 \text{v}_{\text{thickness2}} + \text{HVI Vgap} + h \text{v}_{\text{thickness2}}} \text{y}$
z	G'
Ł	$\frac{G}{G}$ Z
	Air Box left 2
X'	D _{length} '
	D _{length} x
y´	D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} '
-	$\overline{D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}}y$
z	$E_{u'}$ G_{λ} G'
	$\frac{1}{E_u}(2-\frac{1}{2})+\frac{1}{2}$
	Air Box right 1
x′	Air Box right 1 $\frac{D_{\text{length}'}}{[x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')}$
x′	Air Box right 1 $\frac{D_{\text{length}}'}{D_{\text{length}}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$
x´ y´	Air Box right 1 $\frac{D_{\text{length}'}}{D_{\text{length}}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'} + lv_{\text{thickness2}'} + HVLVgap' + hv_{\text{thickness2}'}}{V}$
x´ y´	$\frac{\text{Air Box right 1}}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'} + lv_{\text{thickness2}}' + HVLVgap' + hv_{\text{thickness2}}'}{D_1 + \text{IntGap} + lv_{\text{thickness2}} + HVLVgap + hv_{\text{thickness2}}} y$
x´ y´ z´	Air Box right 1 $\frac{D_{\text{length}'}}{D_{\text{length}}} [x - (4E_u + K + F_l + F_2)] + (4E_u' + K' + F_l' + F_2')$ $\frac{D_l' + \text{IntGap'} + lv_{\text{thickness2}'} + HVLVgap' + hv_{\text{thickness2}'}}{D_l + \text{IntGap} + lv_{\text{thickness2}} + HVLVgap + hv_{\text{thickness2}}} y$ $\frac{G'}{2} z$
x´ y´ z´	Air Box right 1 $\frac{D_{\text{length}'}}{D_{\text{length}}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'} + \text{lv}_{\text{thickness2}'} + \text{HVLVgap'} + \text{hv}_{\text{thickness2}'}}{D_1 + \text{IntGap} + \text{lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness2}}} y$ $\frac{G'}{G} z$
x' y' z'	Air Box right 1 $\frac{D_{length}'}{D_{length}} [x - (4E_u + K + F_l + F_2)] + (4E_u' + K' + F_l' + F_2')$ $\frac{D_l' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}'}{D_l + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}} y$ $\frac{G'}{G} z$ Air Box right 2
x´ y´ z´ x´	Air Box right 1 $\frac{D_{length}'}{D_{length}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}'}{D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}} y$ $\frac{G'}{G} z$ Air Box right 2 $\frac{D_{length}'}{D_{1-th}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$
x' y' z' x'	Air Box right 1 $\frac{D_{length}'}{D_{length}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}'}{D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}} y$ $\frac{G'}{G} z$ $\frac{d'}{G} z$ $\frac{D_{length}'}{D_{length}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $D_u' + IntGap' + lv_{trice} + u' + HVLVgap' + hv_{trice} + u'$
x´ y´ z´ x´ y´	$\frac{\text{Air Box right 1}}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \ln Gap' + lv_{\text{thickness2}}' + HVLVgap' + hv_{\text{thickness2}}'}{D_1 + \ln Gap + lv_{\text{thickness2}} + HVLVgap + hv_{\text{thickness2}}} y$ $\frac{G'}{G}z$ $\frac{Air Box right 2}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_{\text{length}}}{D_{\text{length}}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$
x´ y´ z´ x´ y´ z´	$\frac{\text{Air Box right 1}}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1 + \text{IntGap'} + 1v_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap'} + hv_{\text{thickness2}}'}{D_1 + \text{IntGap} + 1v_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + hv_{\text{thickness2}}} y$ $\frac{G'}{G} z$ $\frac{\text{Air Box right 2}}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'} + 1v_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap'} + hv_{\text{thickness2}}'}{D_1 + \text{IntGap'} + 1v_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap'} + hv_{\text{thickness2}}'} y$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'} + 1v_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap'} + hv_{\text{thickness2}}}}{D_1 + \text{IntGap'} + 1v_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap'} + hv_{\text{thickness2}}} y$ $\frac{F_n'}{D_1 + \text{IntGap}} = \frac{G_1}{G_1'} = \frac{G_1}{G_1'}$
x´ y´ z´ x´ z´	$\frac{\text{Air Box right 1}}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'} + \text{Iv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap'} + \text{hv}_{\text{thickness2}}}{D_1 + \text{IntGap} + \text{Iv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness2}}} y$ $\frac{G'}{G} z$ $\frac{\text{Air Box right 2}}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'} + \text{Iv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap'} + \text{hv}_{\text{thickness2}} '}{D_1 + \text{IntGap'} + \text{Iv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap'} + \text{hv}_{\text{thickness2}} '} y$ $\frac{E_u'}{D_1 + \text{IntGap} + \text{Iv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness2}} y$ $\frac{E_u'}{E_u} (z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2}$
x´ y´ z´ y´ z´	Air Box right 1 $\frac{D_{length}'}{D_{length}} [x - (4E_u + K + F_l + F_2)] + (4E_u' + K' + F_l' + F_2')$ $\frac{D_l' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}'}{D_l + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}} y$ $\frac{G'}{G} z$ Air Box right 2 $\frac{D_{length}'}{D_{length}} [x - (4E_u + K + F_l + F_2)] + (4E_u' + K' + F_l' + F_2')$ $\frac{D_l' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}'}{D_l + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}'} y$ $\frac{E_u'}{E_u} (z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2}$ Air Box up (left)
x' y' z' y' z' x'	Air Box right 1 $\frac{D_{length}'}{D_{length}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}'}{D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}} y$ $\frac{G'}{G} z$ Air Box right 2 $\frac{D_{length}'}{D_{length}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}'}{D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2}} y$ $\frac{E_u'}{D_1} (z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2}$ Air Box up (left) $D_{length'} z$
x´ y´ z´ y´ z´ x´	$\frac{\text{Air Box right 1}}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'+lv}_{\text{thickness2}}' + \text{HVLVgap'+hv}_{\text{thickness2}}'}{D_1 + \text{IntGap + lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap + hv}_{\text{thickness2}}} y$ $\frac{G'}{G} z$ $\frac{\text{Air Box right 2}}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'+lv}_{\text{thickness2}}' + \text{HVLVgap'+hv}_{\text{thickness2}}'}{D_1 + \text{IntGap + lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap'+hv}_{\text{thickness2}}} y$ $\frac{E_u'}{D_1} (z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2}$ $\frac{\text{Air Box up (left)}}{D_{\text{length}}} x$
x' y' z' x' z' x' y'	$\frac{\text{Air Box right 1}}{D_{\text{length}}'} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'+lv}_{\text{thickness2}} ' + \text{HVLVgap'+hv}_{\text{thickness2}} ' y$ $\frac{G'}{G} z$ $\frac{G'}{G} z$ $\frac{D_{\text{length}}}{D_{\text{length}}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$ $\frac{D_{1} + \text{IntGap'+lv}_{\text{thickness2}} ' + \text{HVLVgap'+hv}_{\text{thickness2}} ' y$ $\frac{D_1' + \text{IntGap'+lv}_{\text{thickness2}} ' + \text{HVLVgap'+hv}_{\text{thickness2}} ' y$ $\frac{E_u'}{E_u} (z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2}$ $\frac{D_{\text{length}}'}{D_{\text{length}}} x$ $D_1' + \text{IntGap'+lv}_{\text{thickness2}} ' + \text{HVLVgap'+hv}_{\text{thickness2}} ' y$

Πίνακας Π.2.17: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

z	$\frac{D_{\text{height}}'}{D_{\text{height}}'} [z - (G/2 + E_u)] + (G'/2 + E_u')$
	D _{height}
	Air Box up (right)
x	$\frac{D_{\text{length}'}}{D_{\text{length}}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$
	D ' IntGan' Iv I HVI Vgan' hv
У	$\frac{D_1 + \text{IntGap} + 1v_{\text{thickness2}} + 11vL \sqrt{gap} + 1v_{\text{thickness2}}}{D_1 + 12tCap} + 12VL \sqrt{gap} + 12vL \sqrt{gap} + 12vL \sqrt{gap}$
,	$D_1 + IntGap + IV_{thickness2} + HVLVgap + nV_{thickness2}$
Z	$\frac{D_{\text{height}}}{D_{\text{height}}} [z - (G/2 + E_u)] + (G'/2 + E_u')$
	Air Box up (center 1)
x′	$4E_{n}'+K'+F_{1}'+F_{2}'$
	$\frac{1}{4E_{11} + K + E_1 + E_2} X$
v′	D_{1}
3	$\frac{D_1}{D}$ y
<i></i>	
Z	$\frac{D_{\text{height}}}{D_{\text{height}}} [z - (G/2 + E_u)] + (G'/2 + E_u')$
	D _{height}
	Air Box up (center 2)
x´	$\frac{4E_{u}'+K'+F_{1}'+F_{2}'}{K}$
	$4E_u + K + F_1 + F_2$
у́	IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ' (r D) + D'
	$\frac{1}{\text{IntGap} + \text{lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness2}}} (y - D_1) + D_1$
z	D _{height} '
	$\frac{1}{D_{\text{beight}}} [z - (G/2 + E_u)] + (G'/2 + E_u')$
	Air Boy un (center 3)
v ′	$4F' + K' + F_2 + F_2 + 2D_1 + 1'$
А	$\frac{1}{4E} + \frac{1}{4E} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2D} \frac{1}{1} + \frac{1}{2} \frac{1}{2D} \frac{1}{1} + \frac{1}{2D} $
	$4E_u + K + F_1 + F_2 + 2D_{length}$
У́	$\frac{D_{\text{width}}}{[v - (D_1 + \text{IntGap} + lv_{\text{thickness}}^2 + \text{HVLVgap} + hv_{\text{thickness}}^2)]$
	D _{width}
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
z	D _{height} '
	$\frac{-10 \text{ geV}}{D \text{ height}} [z - (G/2 + E_u)] + (G'/2 + E_u')$
	Air Box Coros gon 1
v ′	All Dox Corts gap 1
λ	$\frac{\kappa}{V} [x - (2E_u + F_1)] + (2E_u' + F_1')$
N ′	
У	$\frac{D_1}{D}$ y'

240 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΛΟΙ	ογισμικού ΜΠΣ
---	---------------

Πίνακας Π.2.18: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

z	$\frac{G'}{Z}$
	G
	Air Box Cores gap 2
X'	$\frac{K'}{K}[x - (2E_u + F_1)] + (2E_u' + F_1')$
У́	$\frac{D_1'}{D_1}y'$
z	$\frac{E_{u}'}{E_{u}}(z-\frac{G}{2})+\frac{G'}{2}$
	Air Box 1a
x'	Dimet'
А	$\frac{D_{\text{length}}}{D_{\text{length}}}(x + D_{\text{length}}) - D_{\text{length}}'$
У	$\frac{D_{\text{width}}'}{D_{\text{width}}} [y - (D_1 + \text{IntGap} + lv_{\text{thickness } 2} + \text{HVLVgap} + hv_{\text{thickness } 2})]$
	+ (D ₁ '+IntGap '+lv thickness 2 '+HVLVgap '+hv thickness 2 ')
z	LV _{height} '
	LV _{height} Z
	Air Box 1b
x	$E_{\rm m}$ '+ExtGap'
	$\frac{-u}{E_n + ExtGap}x$
у́	$\frac{D_{width}'}{D_{width}'} [y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$
	+ (D ₁ '+IntGap'+ly _{thisteress} , '+HVLVgap'+hy _{thisteress} , ')
7	$V_1 = V_1 = V_2$
L	$\frac{L V \text{ height}}{L V} Z$
	L v height
	Air Box 1c
X	$\frac{2(hv_{thickness1}'+HVLVgap'+lv_{thickness1}'+IntGap'+E_{u}')+K'}{2(hv_{thickness1}+HVLVgap+lv_{thickness1}+IntGap+E_{u})+K}[x-(E_{u}+ExtGap)]+$
	(E. '+ExtGap')
v'	D_{11} · · · · ·
y	$\frac{D_{width}}{D_{width}} [y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
z	LV _{height} '
	$\frac{1}{LV_{height}}Z$

Πίνακας Π.2.19: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

	Air Box 1d
X'	$\frac{F_2' - (IntGap' + lv_{thickness1}' + HVLVgap' + hv_{thickness1}')}{F_2 - (IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap' + hv_{thickness1}')} [x - (3E_u + K + F_1 + IntGap + lv_{thickness1})]$
	$F_2 = (IntGap + IV_{thickness1} + HVLV gap + IV_{thickness1})$
	$lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness1}$] + (3E _u '+K'+F ₁ '+IntGap'+lv _{thickness1} '+
	HVLVgap'+hv _{thickness1} ')
У́	$\frac{D_{width}'}{D_{width}}[y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
z	LV _{height} '
	$\frac{1}{LV_{height}}Z$
	Air Box 1e
x´	$E_{u'}$
	$\frac{1}{E_u} \left[\frac{x - (3E_u + K + r_1 + r_2)}{E_u} \right] + (3E_u + K + r_1 + r_2) $
У́	$\frac{D_{\text{width}'}}{[v - (D_1 + \text{IntGan} + v_1 + v_2 + HVI Vgan + hv_1 + v_2)]}$
	D_{width}
	+ $(D_1'+IntGap'+lv_{thickness2}'+HVLVgap'+hv_{thickness2}')$
z	LV _{height} '
	$\frac{1}{LV_{height}}Z$
	Air Box 1f
x	$D_{\text{length}'}$
	$\frac{1}{D_{\text{length}}} [X - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u + K + F_1 + F_2)$
y´	D_{width}' (D + IntCap + Iv + HVI Vgap + by)]
	$\frac{D_{\text{width}}}{D_{\text{width}}} \left[y - (D_1 + 11103ap + 11v_{\text{thickness}2} + 11v_{\text{L}}v_{\text{gap}} + 11v_{\text{thickness}2}) \right]$
	$+ (D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}')$
z	LV _{height} '
	$\frac{1}{LV_{height}}Z$
	Air Box 2a
x´	D _{length} ' (m + D =) D = '
	$\frac{1}{D_{\text{length}}} (x + D_{\text{length}}) - D_{\text{length}}$
y´	$\frac{D_{\text{width}'}}{[v - (D_{t} + \text{IntGan} + v_{t+1} - v_{t} + HVI Vgan + hv_{t+1} - v_{t})]}{[v - (D_{t} + IntGan + v_{t+1} - v_{t} + HVI Vgan + hv_{t+1} - v_{t})]}$
	D_{width}
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
z	$\frac{G'}{I}$ - LV here '
	$\frac{2}{C}$ (z - LV _{height}) + LV _{height} '
	$\frac{G}{2} - LV_{\text{height}}$
	2

Πίνακας Π.2.20: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

	Air Box 2b
x	E _n '+ExtGap'
	$\frac{u}{E_{u} + ExtGap}$ x
У́	$\frac{D_{width}'}{D_{width}'} [y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
Z	$\frac{\frac{G'}{2} - LV_{height}'}{\frac{G}{2} - LV_{height}} (z - LV_{height}) + LV_{height}'$
	Air Box 2c
x´	$\frac{2(hv_{thickness 1}'+HVLVgap '+lv_{thickness 1}'+IntGap '+E_{u}') + K'}{2(hv_{thickness 1} + HVLVgap + lv_{thickness 1} + IntGap + E_{u}) + K}[x - (E_{u} + ExtGap)] + K'$
	(E _u '+ExtGap')
У́	$\frac{D_{width}'}{D_{width}} [y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness} 2 + HVLVgap + hv_{thickness2})]$
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness} ?'+HVLVgap'+hv _{thickness} ?')
z	$\frac{G'}{2} - LV_{height}' - \frac{G'}{G} - LV_{height} + LV_{height} + LV_{height}'$
	2 Air Day 1d
v ′	AIF BOX 20 E. ! (IntGan! ly! HVI Vgan! hy!)
Χ	$\frac{F_2 - (\text{IntGap} + \text{Iv}_{\text{thickness1}} + \text{IIv} L \text{ v} \text{gap} + \text{Iv}_{\text{thickness1}})}{F_2 - (\text{IntGap} + \text{Iv}_{\text{thickness1}} + \text{HVLV}\text{gap} + \text{hv}_{\text{thickness1}})} [x - (3E_u + K + F_l + \text{IntGap} + \text{IntGap}$
	$lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness1}$] + (3E _u '+K'+F ₁ '+IntGap'+lv _{thickness1} '+
	HVLVgap'+hv _{thickness1} ')
У́	$\frac{D_{width}'}{D_{width}}[y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
z	$\frac{G'}{2} - LV_{\text{height}}' (z - LV_{\text{height}}) + LV_{\text{height}}'$
	$\frac{G}{2}$ – LV _{height}
	Äir Box 2e
x´	$\frac{E_{u}'}{E_{u}}[x - (3E_{u} + K + F_{1} + F_{2})] + (3E_{u}' + K' + F_{1}' + F_{2}')$

Πίνακας Π.2.21: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

У́	$\frac{D_{\text{width}}'}{D_{\text{width}}}[y - (D_1 + \text{IntGap} + lv_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + hv_{\text{thickness2}})]$
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
Z	$\frac{\frac{G'}{2} - LV_{height}'}{\frac{G}{2} - LV_{height}} (z - LV_{height}) + LV_{height}'$
	Air Box 2f
x´	$\frac{D_{\text{length}}'}{D_{\text{length}}} [x - (4E_u + K + F_1 + F_2)] + (4E_u' + K' + F_1' + F_2')$
У́	$\frac{D_{\text{width}'}}{D_{\text{width}}}[y - (D_1 + \text{IntGap} + lv_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + hv_{\text{thickness2}})]$
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
z	$\frac{\frac{G'}{2} - LV_{height}'}{\frac{G}{2} - LV_{height}} (z - LV_{height}) + LV_{height}'$
	2 33
	Air Doy 30
x ′	Air Box 3a
x´	Air Box 3a $\frac{D_{\text{length}}'}{D_{\text{length}}}(x + D_{\text{length}}) - D_{\text{length}}'$
x´ y´	Air Box 3a $\frac{D_{length}'}{D_{length}}(x + D_{length}) - D_{length}'$ $\frac{D_{width}'}{D_{width}'}[y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$
x´ y´	Air Box 3a $\frac{D_{length}'}{D_{length}}(x + D_{length}) - D_{length}'$ $\frac{D_{width}'}{D_{width}}[y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$ $+ (D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}')$
x´ y´ z´	Air Box 3a $\frac{D_{length}'}{D_{length}}(x + D_{length}) - D_{length}'$ $\frac{D_{width}'}{D_{width}}[y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$ $+ (D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}')$ $\frac{E_u'}{E_u}(z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2}$
x´ y´ z´	Air Box 3a $\frac{D_{length}'}{D_{length}}(x + D_{length}) - D_{length}'$ $\frac{D_{width}'}{D_{width}}[y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$ $+ (D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}')$ $\frac{E_u'}{E_u}(z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2}$ Air Box 3b
x´ y´ z´ x´	Air Box 3a $\frac{D_{length}'}{D_{length}}(x + D_{length}) - D_{length}'$ $\frac{D_{width}'}{D_{width}}[y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$ $+ (D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}')$ $\frac{E_u'}{E_u}(z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2}$ Air Box 3b $\frac{E_u' + ExtGap'}{E_u + E_x + E_x + E_x} x$
x´ y´ z´ x´	Air Box 3a $\frac{D_{length}'}{D_{length}}(x + D_{length}) - D_{length}'$ $\frac{D_{width}'}{D_{width}}[y - (D_1 + IntGap + lv_{thickness2} + HVLVgap + hv_{thickness2})]$ $+ (D_1' + IntGap' + lv_{thickness2}' + HVLVgap' + hv_{thickness2}')$ $\frac{E_u'}{E_u}(z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2}$ Air Box 3b $\frac{E_u' + ExtGap'}{E_u + ExtGap}x$
x´ y´ z´ x´ y´	$\begin{aligned} & \frac{\text{Air Box 3a}}{D_{\text{length}}'}(x + D_{\text{length}}) - D_{\text{length}}' \\ & \frac{D_{\text{width}}'}{D_{\text{length}}}[y - (D_1 + \text{IntGap} + \text{lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness2}})] \\ & + (D_1' + \text{IntGap'} + \text{lv}_{\text{thickness2}}' + \text{HVLVgap'} + \text{hv}_{\text{thickness2}}') \\ & \frac{E_u'}{E_u}(z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2} \\ \hline & \frac{\text{Air Box 3b}}{E_u + \text{ExtGap'}}x \\ & \frac{D_{\text{width}}'}{D_{\text{width}}}[y - (D_1 + \text{IntGap} + \text{lv}_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + \text{hv}_{\text{thickness2}})] \end{aligned}$
x´ y´ z´ y´	$\begin{aligned} & \frac{\text{Air Box 3a}}{D_{\text{length}}'}(x + D_{\text{length}}) - D_{\text{length}}' \\ & \frac{D_{\text{width}}'}{D_{\text{length}}}[y - (D_1 + \text{IntGap} + lv_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + hv_{\text{thickness2}})] \\ & + (D_1' + \text{IntGap'} + lv_{\text{thickness2}}' + \text{HVLVgap'} + hv_{\text{thickness2}}') \\ & \frac{E_u'}{E_u}(z - \frac{G}{2}) + \frac{G'}{2} \\ \hline & \frac{A\text{ir Box 3b}}{E_u + \text{ExtGap}'} x \\ & \frac{D_{u'dth}'}{D_{width}'}[y - (D_1 + \text{IntGap} + lv_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + hv_{\text{thickness2}})] \\ & + (D_1' + \text{IntGap'} + lv_{\text{thickness2}}' + \text{HVLVgap'} + hv_{\text{thickness2}})] \end{aligned}$

Πίνακας Π.2.22: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

	Air Box 3c
x´	$2(hv_{thickness}' + HVLVgap' + lv_{thickness}' + IntGap' + E_u') + K' [x - (E_u + ExtGap)] + K'$
	$\frac{1}{2(hv_{thickness1} + HVLVgap + lv_{thickness1} + IntGap + E_u) + K} [X - (E_u + EXGap)] + K$
	(F '+FytGan')
V ′	$(L_u + LXOap)$
y	$\frac{D_{\text{width}}}{D_{\text{width}}} [y - (D_1 + \text{IntGap} + v_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + hv_{\text{thickness2}})]$
	D _{width}
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
z	$\frac{E_{u}}{(z-G)} + \frac{G'}{(z-G)}$
	$E_{u} = 2^{1} + 2$
	Air Box 3d
X´	$\frac{F_2'-(IntGap'+lv_{thickness1}'+HVLVgap'+hv_{thickness1}')}{[x-(3E_n+K+E_1+IntGap+$
	$F_2 - (IntGap + lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness1})^{LW} (OLU + HVLVgap + hv_{thickness1})^{LW}$
	$lv_{thickness1} + HVLVgap + hv_{thickness1}] + (3E_u'+K'+F_1'+IntGap'+lv_{thickness1}'+$
	HVLVgap'+hv _{thickness1} ')
У́	$\frac{D_{\text{width}'}}{D_{\text{width}'}} [v - (D_1 + \text{IntGan} + v_{1} _{1}) + HVI Vgan + hv_{1} _{1} + 2)]$
	D_{width}
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
z	$\frac{E_u'}{(z-G)} + \frac{G'}{(z-G)}$
	$E_u \sim 2^{\prime} - 2$
	Air Box 3e
X	$\frac{E_{u}'}{E}[x - (3E_{u} + K + F_{1} + F_{2})] + (3E_{u}' + K' + F_{1}' + F_{2}')$
v'	D_{u}
y	$\frac{D_{\text{width}}}{D_{\text{width}}} [y - (D_1 + \text{IntGap} + v_{\text{thickness2}} + \text{HVLVgap} + hv_{\text{thickness2}})]$
	D width
	+ $(D_1'+IntGap'+lv_{thickness2}'+HVLVgap'+hv_{thickness2}')$
Z	$\frac{E_u'}{(z-G)} + \frac{G'}{(z-G)}$
	$E_u \sim 2^2 - 2$
	Air Box 3f
X	$\frac{D_{\text{length}'}}{2} [x - (4E_n + K + F_1 + F_2)] + (4E_n' + K' + F_1' + F_2')$
	D _{length}
У́	$\frac{D_{\text{width}'}}{D_{\text{width}'}} [v - (D_1 + \text{IntGan} + v_{\text{wiskmass}} + HVLVgan + hv_{\text{wiskmass}})]$
	D_{width}
	+ (D ₁ '+IntGap'+lv _{thickness2} '+HVLVgap'+hv _{thickness2} ')
z	$E_{u'}$ G_{λ} G'
	$\overline{E_u}^{(2-2)+2}$

Πίνακας Π.2.23: Εξισώσεις μεταβολής συντεταγμένων κόμβων πλέγματος κατά την παραμετροποίηση.

Π.1.2 Κατάστρωση και επίλυση του συστήματος εξισώσεων ΜΠΣ

Το βήμα που ακολουθεί την ολοκλήρωση των λειτουργιών προ-επεξεργασίας είναι η κατάστρωση και επίλυση των εξισώσεων της ΜΠΣ. Το κομμάτι αυτό απαιτεί τη λιγότερη αλληλεπίδραση με το χρήστη, είναι ωστόσο το πλέον χρονοβόρο και απαιτητικό σε υπολογιστικές δυνατότητες. Έτσι, η επιλογή των μεθόδων επίλυσης είναι ζωτικής σημασίας και υπογραμμίζει την ανάγκη εξεύρεσης αποδοτικών αλγόριθμων.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό σε κάθε κόμβο του πλέγματος υπολογίζεται με την επίλυση της διακριτοποιημένης μορφής της διαφορικής εξίσωσης που καθορίζει το μαγνητοστατικό πρόβλημα, η οποία έχει τη μορφή της εξίσωσης (2.42).

Ένα πλέγμα αποτελούμενο από N κόμβους, αντιστοιχεί σε πίνακα ακαμψίας διαστάσεων $N \times N$ και σε διάνυσμα πηγών διαστάσεων $N \times I$. Ο πίνακας ακαμψίας αποτελείται από στοιχειώδεις πίνακες διαστάσεων 4×4 , οι οποίοι κατασκευάζονται ξεχωριστά για κάθε στοιχείο του πλέγματος. Έχει τη μορφή του Σχήματος Π.10.



Σχήμα Π.10: Πίνακας ακαμψίας.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα Π.10, ο πίνακας S είναι ιδιαίτερα αραιός, περιλαμβάνοντας μεγάλο αριθμό μη διαγώνιων μηδενικών στοιχείων. Η χρήση αυτού του πίνακα οδηγεί σε σημαντική κατάχρηση χώρου αποθήκευσης του συστήματος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πυκνότητας πλέγματος αρκετών χιλιάδων κόμβων. Για αυτό το λόγο, ήταν αναγκαία η αναζήτηση μιας εναλλακτικής τεχνικής αποθήκευσης, έτσι ώστε να μειωθεί ο χώρος μνήμης και δίσκου που απαιτείται για την αποθήκευση. Υιοθετήθηκε η χρήση της τεχνικής αποθήκευσης Μοrse, [Π.1], η οποία παράγει πίνακα συστήματος μόνο με τους μη μηδενικούς όρους του

αρχικού πίνακα ακαμψίας. Το διάγραμμα του Σχήματος Π.11 εξηγεί τη διαδικασία με την οποία κατασκευάζεται αυτός ο πίνακας.



Σχήμα Π.11: Διάγραμμα ροής για τη συναρμολόγηση των πινάκων της ΜΠΣ.

Οι τυπικές μέθοδοι για την επίλυση γραμμικών συστημάτων εξισώσεων είναι είτε ευθείες ή αναγωγικές. Η απαλοιφή Gauss και όλες οι παραλλαγές της υπάγονται στην πρώτη κατηγορία. Μία ευθεία μέθοδος υπολογίζει τη λύση με πεπερασμένη ακρίβεια σε πεπερασμένο αριθμό πράξεων. Ο αριθμός αυτός, στην περίπτωση της απαλοιφής Gauss ποικίλλει από O(N³) έως O(N²logN) για N αγνώστους ανάλογα με τις ιδιότητες του πίνακα συντελεστών και του τρόπου με τον οποίο αξιοποιείται η αραιή δομή των πινάκων. Ο ελάχιστος αριθμός λειτουργιών που μπορεί να επιτευγθεί, O(N²), αντιστοιγεί στον αλγόριθμο ελάγιστου βαθμού, ο οποίος είναι σχεδόν βέλτιστος. Οι αναγωγικές μέθοδοι, όπως οι Jacobi, Gauss Seidel, και οι παραλλαγές της, η Conjugate Gradient και η Preconditioned Conjugate Gradient, ξεκινούν με μια αρχική υπόθεση για τη λύση. Στη συνέχεια, προχωρούν βελτιώνοντας τις τρέχουσες προσεγγίσεις της λύσης με διαδοχικά βήματα ανανέωσης ή αναγωγές. Ο αριθμός λειτουργιών των αναγωγικών μεθόδων εξαρτάται από τις ιδιότητες σύγκλισης του κάθε αλγόριθμου, [Π.2]. Ο πιο γρήγορος από τους παραπάνω αλγόριθμους, η μέθοδος Preconditioned Conjugate Gradient (PCG) υπολογίζει τη λύση συστήματος με Ν αγνώστους σε $O(N^{3/2})$ πράξεις, παρέχοντας λύση η οποία είναι καλύτερη από αυτή που προκύπτει με τη χρήση της βέλτιστης ευθείας μεθόδου. Για τους παραπάνω λόγους, η μέθοδος PCG υιοθετήθηκε κατά την ανάπτυξη του επιλύτη του πακέτου λογισμικού ΜΠΣ, καθώς είναι πιο αποδοτική από την άποψη των λιγότερων απαιτήσεων μνήμης, μικρότερου υπολογιστικού κόστους και μικρότερου σφάλματος στρογγυλοποίησης. Επιπλέον, μειώνοντας το μέγιστο αριθμό αναγωγών της PCG ή την επιθυμητή ακρίβεια, μπορεί να μειωθεί αντίστοιχα ο χρόνος των υπολογισμών και να επιτευχθεί μεγαλύτερη ταχύτητα σύγκλισης.

Π.1.3 Μετεπεξεργασία

Ο μετεπεξεργαστής παρέχει το απαραίτητο εργαλείο επικοινωνίας ανάμεσα στο χρήστη και τη λύση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα πεδιακό πρόβλημα [Π.3].Η επίλυση των εξισώσεων της ΜΠΣ οδηγεί στον υπολογισμό του βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού σε κάθε κόμβο του πλέγματος. Από τα δεδομένα αυτά πρέπει να εξαχθούν άλλες ποσότητες, με τρόπο ώστε ο χρήστης του λογισμικού να μπορέσει να αξιοποιήσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης της ΜΠΣ. Η διαχείριση του μεγάλου αριθμού δεδομένων που παράγονται από τον επιλύτη των πεπερασμένων στοιχείων και η αποδοτική απεικόνισή τους, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη, αποτελεί το τελευταίο βήμα της υλοποίησης ενός λειτουργικού και αποτελεσματικού λογισμικού ΜΠΣ.

Στην περίπτωση του υπολογισμού της τάσης βραχυκύκλωσης ενός μετασχηματιστή, μεγέθη όπως η αυτεπαγωγή σκέδασης και η επαγωγική πτώση τάση των τυλιγμάτων είναι τα αποτελέσματα στα οποία ο χρήστης πρέπει να έχει άμεση πρόσβαση μετά την εκτέλεση των υπολογισμών. Ο υπολογισμός αυτών των μεγεθών περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3 και πραγματοποιείται με τη χρήση των εξισώσεων (3.6) έως (3.12).

Εκτός από τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών, η κατανομή των πεδιακών μεγεθών όπως η μαγνητική επαγωγή ή η ένταση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για το χρήστη του προγράμματος, κυρίως σε περιοχές του προβλήματος οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Για παράδειγμα, η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής ή η κατανομή των δυνάμεων στο χώρο των τυλιγμάτων παρέχει σημαντικές πληροφορίες στο μηχανικό σχεδίασης σχετικά με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή και την αντοχή του κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος. Για το σκοπό αυτό, ενσωματώθηκε στο λογισμικό η δυνατότητα απεικόνισης πεδιακών μεγεθών κατά μήκος επιλεγμένων επιφανειών του μοντέλου του μετασχηματιστή με τη μορφή διανυσματικών διαγραμμάτων ως λειτουργία μετεπεξεργασίας.

Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται σε τρία βήματα:

- Επιλογή επιφάνειας ενδιαφέροντος: Ο χρήστης πρέπει να ορίσει την επιφάνεια (επίπεδο) ενδιαφέροντος, πάνω στο οποίο επιθυμεί να γίνει η απεικόνιση των μεγεθών ενδιαφέροντος. Έτσι, γίνεται μετάβαση από το τρισδιάστατο πλέγμα των τετραέδρων σε μία δισδιάστατη επιφάνεια, η οποία αποτελείται από τις τριγωνικές έδρες των τετραέδρων που εφάπτονται σε αυτή.
- 2. Υπολογισμός συνιστωσών μαγνητικής επαγωγής στα σημεία της επιφάνειας με βάση τις υπολογισμένες τιμές των τετραέδρων του πλέγματος: Μετά την επίλυση των εξισώσεων της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτουν οι τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής στα βαρύκεντρα των τετραέδρων του τρισδιάστατου πλέγματος. Ο υπολογισμός των τιμών Β και Η σε οποιοδήποτε άλλου σημείο του μοντέλου γίνεται, ανάλογα με τη θέση του στο πλέγμα, με βάση τις τιμές του βαρυκέντρου του τετραέδρων στο σποίο ανήκει ή και των γειτονικών τετραέδρων. Έτσι μετά την επιλογή της επιφάνειας ενδιαφέροντος, υπολογίζονται οι τιμές των μεγεθών του μαγνητικού πεδίου σε σημεία της επιφάνειας (βαρύκεντρα τριγώνων πλέγματος) με βάση τις οποίες γίνεται η απεικόνιση σε μορφή διανυσματικού διαγράμματος.
- 3. Υπολογισμός άλλων μεγεθών μαγνητικού πεδίου με χρήση των τιμών μαγνητικής επαγωγής: Εάν η απεικόνιση αφορά σε μεγέθη που δεν προκύπτουν κατευθείαν από την επίλυση, όπως οι δυνάμεις, γίνεται ο υπολογισμός τους από τα γνωστά μεγέθη με χρήση κατάλληλων σχέσεων. Για παράδειγμα, η δύναμη σε ένα σημείο υπολογίζεται από τη Σχέση (Π.2).

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \tag{(II.2)}$$

Επιλέχθηκαν δύο επιφάνειες απεικόνισης:

- Επίπεδο xz (Y=0): η επιφάνεια αυτή περνά από το επίπεδο συμμετρίας του μετασχηματιστή, περιλαμβάνοντας το διάκενο μεταξύ των πηνίων και τα παράθυρα των πυρήνων. Η επιφάνεια αυτή φαίνεται στο Σχήμα Π.12, όπου απεικονίζονται δύο όψεις του τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του μετασχηματιστή. Όπως φαίνεται σε αυτό το σχήμα, η κατανομή της μαγνητικής ροής και των δυνάμεων σε αυτό το επίπεδο επιτρέπει στο χρήστη να εκτιμήσει το μέγεθος των δυνάμεων που ασκούνται στο πλαίσιο και στο χώρο των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή μέσα στα παράθυρα του πυρήνα κατά το βραχυκύκλωμα.
- 2) Επίπεδο κάθετο στο επίπεδο xy, το οποίο διέρχεται από το κέντρο των τυλιγμάτων: η μαγνητική επαγωγή και οι δυνάμεις μεγιστοποιούνται κατά μήκος αυτής της επιφάνειας, παρέχοντας έτσι μια αντιπροσωπευτική εικόνα των αναμενόμενων μεταβολών κατά το βραχυκύκλωμα.

Για τη σχεδίαση των διανυσματικών διαγραμμάτων κατά μήκος των παραπάνω επιφανειών, έπρεπε να υλοποιηθούν πρόσθετες υπορουτίνες για την εξαγωγή των τιμών του πεδίου στους κόμβους που ανήκουν στις αντίστοιχες επιφάνειες. Οι τιμές του πεδίου σχεδιάστηκαν στη συνέχεια με τη χρήση ρουτινών γραφικής απεικόνισης οι οποίες παρέχονται από τις βιβλιοθήκες της Fortran 90. Το Σχήμα Π.13 απεικονίζει το διανυσματικό διάγραμμα της μαγνητικής επαγωγής κατά το βραχυκύκλωμα κατά μήκος του επιπέδου xy για πλέγμα ενδιάμεσης πυκνότητας (μαζί με αναπαράσταση των περιοχών του πυρήνα, για καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων του διαγράμματος).



Σχήμα Π.12: Επιφάνειες ενδιαφέροντος για την απεικόνιση μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή κατά το βραχυκύκλωμα.

Π.2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ VISUAL BASIC - FORTRAN

Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης μεταξύ της γλώσσας προγραμματισμού VB και Fortran λειτουργεί με το αντίστοιχο κουμπί εντολής ή την εντολή μενού. Ο κώδικας που αντιστοιχεί στην εντολή αυτή καλεί τον κώδικα της Fortran σαν ανεξάρτητη υπορουτίνα. Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του κώδικα Fortran περνούν στη συνέχεια ως ορίσματα στον κώδικα της VB για την απεικόνιση των αντίστοιχων δεδομένων εξόδου.

Για την πραγματοποίηση της παραπάνω διαδικασίας, ο κώδικας Fortran έπρεπε να μετατραπεί σε Dynamic Link Library (DLL), έτσι ώστε να μπορεί να κληθεί από την κεντρική εφαρμογή της VB. Η μετατροπή αυτή υλοποιείται με τις παρακάτω εντολές, γραμμένες σε Fortran 90:

SUBROUTINE FEM_TF (λίστα ορισμάτων) ! DEC\$ ATTRIBUTES ALIAS: 'FEM_TF'::FEM_TF ! DEC\$ ATTRIBUTES DLLEXPORT::FEM_TF Οι παραπάνω εντολές, οι οποίες πρέπει να εμφανίζονται στην αρχή του κώδικα της Fortran (αμέσως μετά τη δήλωση της υπορουτίνας FEM_TF) παράγουν ένα αρχείο FEM_TF.dll. Παρόμοια δήλωση πρέπει να εμφανίζεται και στο αρχείο (module) της VB, υπό τη μορφή των ακόλουθων εντολών:

Declare Sub FEM_TF Lib "FEM_TF.dll" (λίστα ορισμάτων)

Η υπορουτίνα μπορεί στη συνέχεια να κληθεί όπως οποιαδήποτε κανονική υπορουτίνα VB, κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του προγράμματος. Η λίστα των ορισμάτων περιλαμβάνει τις μεταβλητές εισόδου, οι τιμές στις οποίες ανατίθενται μέσω των φορμών VB που περιγράφηκαν προηγουμένως, και τις μεταβλητές εξόδου, στις οποίες ανατίθενται τιμές μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και των λειτουργιών μετεπεξεργασίας. Οι τιμές αυτές (επαγωγική πτώση τάσης, τάση βραχυκύκλωσης) εμφανίζονται στην κύρια φόρμα του λογισμικού ΜΠΣ και μπορούν να αποθηκευτούν σε αρχείο δεδομένων εξόδου.



Σχήμα Π.13: Διανυσματικό διάγραμμα της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του επιπέδου xz κατά τη διάρκεια της δοκιμής βραχυκύκλωσης.

Π.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [II.1] B. Lucquin, O. Pironneau, "Introduction au calcul scientifique," Masson, Paris, 1996.
- [II.2] A. Mishra, P. Banerjee, "An Algorithm-Based Error Detection Scheme for the Multigrid Method," *IEEE Trans. Computers*, Vol. 52, No 9, pp. 1089-1099, Sept. 2003.
- [II.3] D. A. Lowther, P. P. Silvester, "*Computer-Aided Design in Magnetics*," Berlin and New York: Springer-Verlag, 1985.