



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ
ΜΕΓΑΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ
ΣΟΛΩΜΟΥ 56, 10682 ΑΘΗΝΑ, ΤΗΛ.: 0103803343, 0105192136 FAX: 0105192324

COMITE NATIONAL HELLENIQUE

56, RUE SOLOMOU, 10682 ATHENES, TEL.: +30103803343, 30105192136 FAX: 30105192324

GREEK NATIONAL COMMITTEE

56, SOLOMOU STR., 10682 ATHENS, TEL.: +30103803343, 30105192136 FAX: 30105192324

ΣΥΝΟΔΟΣ “ΑΘΗΝΑ 2003” Αθήνα 27 & 28 Νοεμβρίου 2003

ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

Π. Γεωργιλάκης
Συνεπτήρ Ηλεκτρίκ ΑΕ

Μ. Τσίλη
ΕΜΠ

Α. Κλαδάς¹
ΕΜΠ

Α. Σουφλάρης
Συνεπτήρ Ηλεκτρίκ ΑΕ

Γ. Μπακόπουλος
Συνεπτήρ Ηλεκτρίκ ΑΕ

Δ. Παπαρήγας
Συνεπτήρ Ηλεκτρίκ ΑΕ

Κ. Αναστασίου
Συνεπτήρ Ηλεκτρίκ ΑΕ

Στο νέο και ανταγωνιστικό περιβάλλον που έχει δημιουργηθεί στην παγκόσμια αγορά ενέργειας μέσω της διαδικασίας απελευθέρωσης και ιδιωτικοποίησης των ηλεκτρικών εταιρειών, εμφανίζεται στη βιομηχανία παραγωγής μετασχηματιστών η ανάγκη βελτίωσης της αξιοπιστίας των προϊόντων τους, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος τους. Η αύξηση της αξιοπιστίας συνδέεται άμεσα με την ακριβή πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, η οποία συμβάλει παράλληλα στη μείωση του συνολικού κόστους παραγωγής. Η συστηματική αύξηση των επιδόσεων των υπολογιστών και η εξέλιξη των αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης πεδίων μεγεθών καθιστά σήμερα δυνατή την λεπτομερέστατη ανάλυση μαγνητικού πεδίου των μετασχηματιστών. Στο άρθρο αυτό εξετάζεται ο υπολογισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος ενός κατασκευασμένου τριφασικού μετασχηματιστή ισχύος με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες μετρημένες τιμές. Η ανάλυση εστιάζει στην επαγωγική πτώση τάσης των τυλιγμάτων του και την τάση βραχυκύκλωσης. Η εργασία αυτή συγχρηματοδοτείται από την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας στα πλαίσια του ερευνητικού έργου ΠΑΒΕΤ 00ΒΕ457.

IMPROVEMENT OF THE DESIGN METHODOLOGY AND POWER TRANSFORMERS CHARACTERISTICS PREDICTION BY USING ADVANCED MAGNETIC FIELD ANALYSIS TECHNIQUES AND EXPERIMENTAL VERIFICATION

P. Georgilakis

M. Tsili

A. Kladas

A. Souflaris

J. Bakopoulos

D. Paparigas

K. Anastasiou

In the context of the new and competitive environment, created in the global energy market by the energy deregulation process and the electric utilities privatization, the need for improvement of transformer reliability, while reducing its cost, arises in the transformer manufacturing business. The increase in the transformer reliability is directly connected to the exact prediction of its characteristics, which also contributes to the reduction of its total cost. Now-a-days, the systematic increase of computers performance, along with the evolution of numerical field simulation techniques enable the detailed transformer magnetic field analysis. This article presents the transformer equivalent circuit parameters calculation with the use of numerical methods and their comparison to the respective measured values. The analysis focuses on the inductive voltage drop of the transformer windings and its short-circuit impedance. This work is co-funded by the General Secretariat for Research and Technology of Greece under Grant PAVET 000BE457.

¹ Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου, Τηλ: 210-7723765, E-mail: kladasel@central.ntua.gr

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία απελευθέρωσης της ενέργειας και ιδιωτικοποίησης των ηλεκτρικών εταιρειών έχει δημιουργήσει ένα νέο, ανταγωνιστικό περιβάλλον στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. 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. Η απόδοση των μετασχηματιστών βελτιώνεται με τη μείωση των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου [1]. Η αξιοπιστία των μετασχηματιστών βελτιώνεται κυρίως με την ακριβή εκτίμηση του πεδίου σκέδασης, της τάσης βραχυκύκλωσης και των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα τυλίγματα τους κατά το βραχυκύκλωμα, καθώς επιτρέπουν την αποφυγή καταστροφών ή βλαβών κατά τις δοκιμές βραχυκύκλωσης και τα σφάλματα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μετασχηματιστές σχεδιάζονται έτσι ώστε οι απώλειες 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 [2].

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,
- 3) 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. Τέλος, 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.

Για τους παραπάνω λόγους, το πεδίο σκέδασης των μετασχηματιστών και ο υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσής τους είναι αντικείμενο συνεχούς μελέτης και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία [3, 4, 5].

2. ΕΙΔΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις αριθμητικές μεθόδους που έχουν επικρατήσει στην ανάλυση του πεδίου διατάξεων τρισδιάστατης γεωμετρίας που περιλαμβάνουν υλικά με μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως οι μετασχηματιστές, και μπορεί πλέον να εφαρμοσθεί σε εύλογο χρόνο χρησιμοποιώντας κατάλληλο προσωπικό υπολογιστή.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων τα οποία περιγράφονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις (Μ.Δ.Ε.). Η εξίσωση που χρησιμοποιείται στην περίπτωση ενός μαγνητοστατικού πεδίου είναι η εξίσωση Laplace:

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

όπου Φ_m είναι το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό. Το εξεταζόμενο πεδίο αναπαρίσταται από ομάδα πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση του χώρου γίνεται είτε με τρίγωνα ή με 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 σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων και οι τιμές πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων μπορούν να ανακτηθούν με τη χρήση των υπολογισμένων τιμών στους κόμβους των κορυφών τους.

Πολλές μέθοδοι επίλυσης μαγνητοστατικών προβλημάτων με τη χρήση βαθμωτού δυναμικού έχουν αναπτυχθεί, ωστόσο απαιτούν κατά κανόνα τον υπολογισμό των πηγών με τη χρήση του νόμου Biot-Savart, υπολογισμός ο οποίος απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Στο άρθρο αυτό υιοθετείται ένας νέος τρόπος επίλυσης για την ανάλυση του μαγνητοστατικού πεδίου. Σύμφωνα με αυτόν, η ένταση του μαγνητικού πεδίου H χωρίζεται σε δύο τμήματα, σύμφωνα με τη σχέση [6]:

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

όπου Φ_m είναι το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό σε όλο το χώρο του εξεταζόμενου πεδίου και $\mathbf{K}$ μια εικονική κατανομή πεδίου, ορισμένη σε απλά συνδεδεμένο υποχώρο ο οποίος περιλαμβάνει τους αγωγούς, η οποία ικανοποιεί το νόμο του Ampere και είναι κάθετη στο σύνορο του υποχώρου.

2.2 Μέθοδος οριακών στοιχείων

Μια άλλη αριθμητική τεχνική πεδιακής ανάλυσης είναι η μέθοδος των οριακών στοιχείων [7]. Η μέθοδος αυτή προκύπτει από διακριτοποίηση της ολοκληρωτικής εξίσωσης η οποία είναι μαθηματικά ισοδύναμη με την αρχική Μ. Δ. Ε. η οποία περιγράφει το εξεταζόμενο μαγνητοστατικό πρόβλημα. Η ολοκληρωτική εξίσωση η οποία αντιστοιχεί στην εξίσωση (1) είναι της μορφής:

$$c(s)\Phi_m(s) + \oint_{\Gamma} \left[\Phi_m(s) \frac{\partial G(s', s)}{\partial n} - G(s', s) \frac{\partial \Phi_m(s')}{\partial n'} \right] ds' = 0 \quad (3)$$

όπου s είναι το σημείο παρατήρησης, s' είναι η συντεταγμένη του συνόρου Γ , n' το κάθετο στην επιφάνεια του συνόρου μοναδιαίο διάνυσμα και G η θεμελιώδης λύση της εξίσωσης Laplace στις τρεις διαστάσεις.

Όπως φαίνεται στην (3), η αναδιάταξη της Μ. Δ. Ε. η οποία καθορίζει τη μέθοδο των οριακών στοιχείων συνίσταται σε μια ολοκληρωτική εξίσωση που ορίζεται στο σύνορο του εξεταζόμενου χώρου και ένα ολοκλήρωμα το οποίο συσχετίζει τη λύση στο σύνορο με τη λύση στα σημεία του πεδίου. Κατά συνέπεια, ενώ στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων απαιτείται κατασκευή τρισδιάστατου πλέγματος το οποίο αναπαριστά όλο το πεδίο, στη μέθοδο των οριακών στοιχείων κατασκευάζεται μόνο το δισδιάστατο πλέγμα του συνόρου του, οδηγώντας έτσι σε σημαντική μείωση του μεγέθους του προβλήματος.

2.3 Μεικτή μέθοδος πεπερασμένων / οριακών στοιχείων

Μια ακόμη μέθοδος πεδιακής ανάλυσης που αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια αποτελεί συνδυασμό των δύο προηγούμενων τεχνικών. Η μεικτή αυτή τεχνική έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτική στην επίλυση δισδιάστατων και αξισυμμετρικών προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων [8]. 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.

Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω μεθόδων (πεπερασμένα / οριακά στοιχεία) για τη μοντελοποίηση ενός τρισδιάστατου μαγνητοστατικού προβλήματος μπορεί να υλοποιηθεί ως εξής: Θεωρούμε 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 (4) όπου Φ_i και $\frac{\partial \Phi_i}{\partial n}$ είναι οι τιμές δυναμικού και κάθετης παραγώγου δυναμικού του κόμβου i

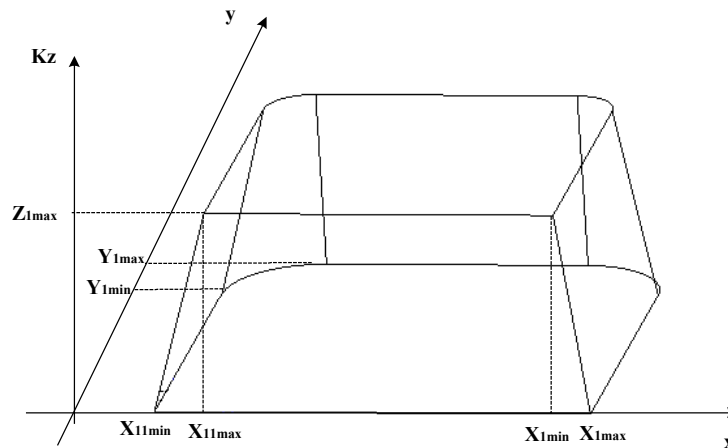
αντίστοιχα. Το αριστερό μέλος της αποτελείται από πέντε “υπο-πίνακες”: Ο πίνακας $[S]$ είναι ο πίνακας σκληρότητας και ο πίνακας $[F]$ το διάνυσμα πηγών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, οι πίνακες $[H]$ και $[G]$ είναι οι πίνακες της μεθόδου των οριακών στοιχείων, ενώ ο πίνακας $[T]$ περιλαμβάνει 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).

(4)

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

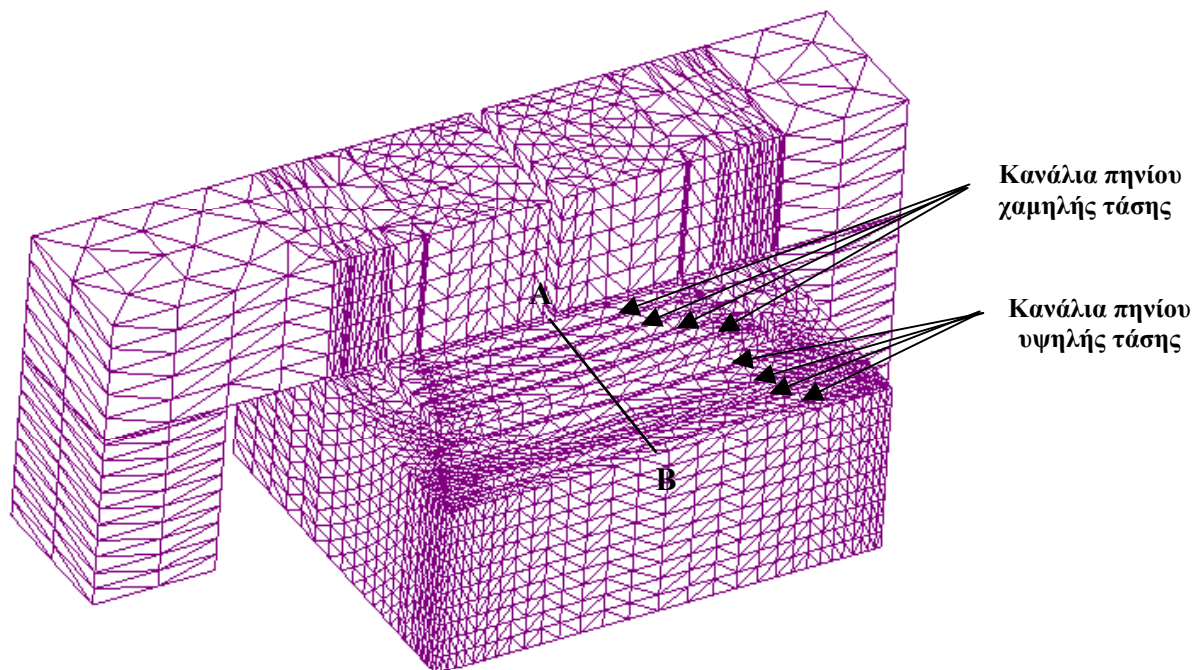
Η γεωμετρία του μοντέλου περιβάλλεται από κουτί αέρα, οι διαστάσεις του οποίου είναι ίδιες με τις διαστάσεις του κελύφους του μετασχηματιστή, περιορίζοντας έτσι τον υπολογισμό του πεδίου σε αυτόν το χώρο. Στις όψεις του κουτιού αέρα έχουν επιβληθεί οριακές συνθήκες κατάλληλες (οριακή συνθήκη Dirichlet ($\Phi=0$) στο επίπεδο συμμετρίας και Neumann ($\frac{\partial \Phi}{\partial n}=0$) στις υπόλοιπες τρεις όψεις του) για την αναπαράσταση του μαγνητοστατικού προβλήματος του μετασχηματιστή.

Το τύλιγμα υψηλής τάσης έχει χωριστεί σε 4 υποπηνία. Η διάκριση αυτή γίνεται για να ληφθεί υπ' όψη η συνδεσμολογία του τυλίγματος η οποία δίνει το δεύτερο επίπεδο τάσης (15 kV). Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της πρώτης συνδεσμολογίας (20 kV) θεωρείται ότι όλα τα υποπηνία διαρρέονται από ονομαστικό ρεύμα, ενώ στη δεύτερη τα υποπηνία που συνδέονται παράλληλα διαρρέονται από το μισό του ονομαστικού ρεύματος. Ο χωρισμός στα υποπηνία γίνεται με βάση τον αριθμό σπειρών κάθε υποπηνίου, που δίνεται στη μελέτη του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3: Εικονική κατανομή πεδίου οφειλόμενη στο πηνίο χαμηλής τάσης (προσέγγιση της γωνίας του πηνίου με έλλειψη)

Στο Σχήμα 3 εικονίζεται η εικονική κατανομή πεδίου K η οποία αντιστοιχεί στο τύλιγμα χαμηλής τάσης. Για την εξαγωγή της κατανομής αυτής έχει ληφθεί υπόψη η γεωμετρία των γωνιών του πηνίου, τα καμπύλα τμήματα των οποίων έχουν προσεγγιστεί με τμήματα ελλείψεων.



Σχήμα 4: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ενεργού μέρους που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση του μετασχηματιστή

Στο Σχήμα 4 εικονίζεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων του ενεργού μέρους που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση του πεδίου του μετασχηματιστή. Η διαμόρφωση του τετραεδρικού πλέγματος είναι σημαντικός παράγοντας για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, δεδομένου ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της συνδέεται άμεσα με την πυκνότητα και την ομοιομορφία του. 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

άμεση εξάρτηση του χρόνου επίλυσης, οδηγώντας έτσι σε μεγάλους χρόνους επίλυσης για πολύ πυκνά πλέγματα. Στο πλέγμα του σχήματος, η πυκνότητα των κόμβων στους πυρήνες είναι σχετικά μικρή, ενώ στην περιοχή των πηνίων αρκετά μεγαλύτερη. Η διαμόρφωση αυτή έγινε για να διατηρηθεί μικρός ο συνολικός αριθμός κόμβων και να αναπαρασταθεί καλύτερα ο χώρος των πηνίων, τα οποία αποτελούν τις πηγές του μαγνητικού πεδίου. Επιπλέον, δεδομένου ότι από τη διαφορετική συνδεσμολογία των υποπηνίων υψηλής τάσης (για την παραγωγή του δευτέρου επιπέδου τάσης πρωτεύοντος) επηρεάζεται το πεδίο και η τάση βραχυκύκλωσης, η πυκνότητα του πλέγματος στην περιοχή αυτή είναι ζωτικής σημασίας για την παρατήρηση των μεταβολών στις τοπικές τιμές του πεδίου και στις τιμές των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος. Μία ακόμη σημαντική λεπτομέρεια στη διαμόρφωση του πλέγματος είναι ο χωρισμός των περιοχών των πηνίων σε περιοχές, έτσι ώστε να αναπαρασταθούν τα κανάλια ψύξης στις κεφαλές τους. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, στις κεφαλές των πηνίων υπάρχουν ζώνες πλέγματος οι οποίες αντιστοιχούν στα κανάλια τους και στις οποίες θεωρείται ότι η πυκνότητα ρεύματος είναι μηδενική (λόγω του μονωτικού λαδιού που τα διαρρέει).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

4.1 Τοπικές τιμές πεδίου

Στα Σχήματα 5 και 6 φαίνονται οι μετρημένες τιμές της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής για τη διαδρομή AB κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης στα 20 και 15 kV και οι αντίστοιχες υπολογισμένες με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Οι πεδιακές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής βραχυκύκλωσης σε ονομαστική φόρτιση δευτερεύοντος τυλίγματος (χαμηλής τάσης). Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε πεδιόμετρο (γεννήτρια Hall) με το οποίο 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 καμπύλες «φάση b» και «φάση c» αναφέρονται στις μετρημένες τιμές των δύο φάσεων, ενώ η καμπύλη «3Δ Π.Σ.» στα αποτελέσματα της τρισδιάστατης μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Όπως παρατηρείται στα σχήματα, οι μετρημένες και υπολογισμένες τιμές πεδίου 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, για να αποφευχθεί η θερμική καταπόνηση του μετασχηματιστή, ο οποίος βρισκόταν εκτός λαδιού, εμφανίζοντας έτσι κάποια σφάλματα μέτρησης). 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).

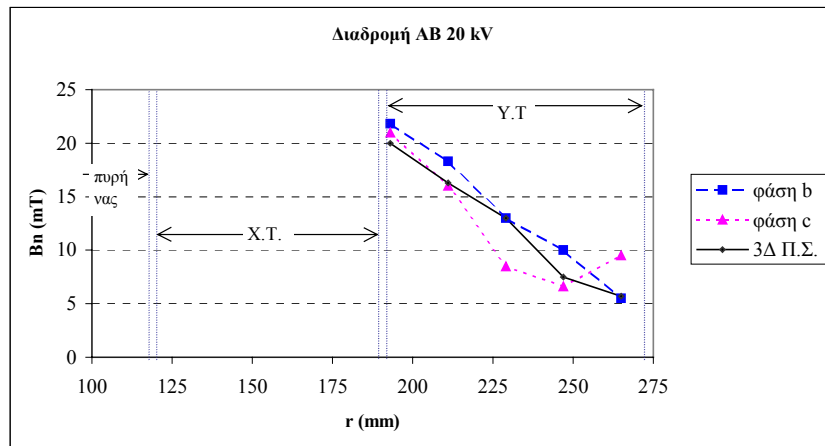
4.2 Τιμές τάσης βραχυκύκλωσης

Τα παραπάνω τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή 630 kVA. Για την εκτίμηση της ακρίβειας της υπολογισμένης τιμής τάσης βραχυκύκλωσης πραγματοποιήθηκε σύγκρισή της με τη μέση τιμή της μετρημένης τάσης βραχυκύκλωσης 20 μετασχηματιστών με χαρακτηριστικά της μελέτης 630 kVA, έτσι ώστε να προκύψουν γενικά συμπεράσματα ως προς την ακρίβεια του θεωρητικού μοντέλου σε σχέση με τις τελικές τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη πλέγματος, με και χωρίς μοντελοποίηση των καναλιών ψύξης, για να διερευνηθεί η επίπτωση της μοντελοποίησης αυτής στην ακρίβεια του μοντέλου. Οι υπολογισμένες τιμές της τάσης βραχυκύκλωσης καθώς και η απόκλισή τους από τη μέση τιμή των παραπάνω μετρήσεων για διάφορες πυκνότητες πλέγματος φαίνονται στους Πίνακες 1 και 2.

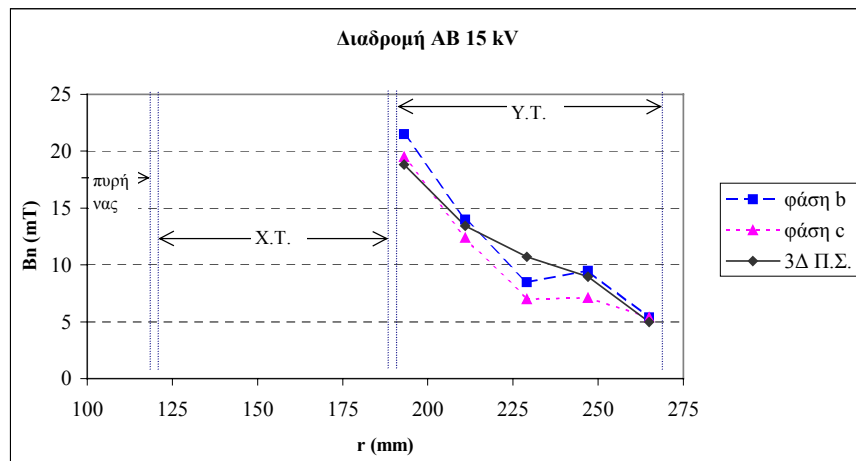
Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, το σφάλμα στην τάση βραχυκύκλωσης ξεκινά από μικρή τιμή για αραιό πλέγμα για να αυξηθεί με την αύξηση της πυκνότητας και να συγκλίνει στην ίδια τιμή με την αντίστοιχη της τιμής του μοντέλου χωρίς κανάλια για σχετικά μεγάλη πυκνότητα πλέγματος (>30000 κόμβοι). Αυτό σημαίνει 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.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΆΛΛΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία υιοθετήθηκε για την ανάπτυξη ενός κώδικα ο οποίος πραγματοποιεί τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης τριφασικού μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα, δύο επιπέδων τάσεων πρωτεύοντος. Το εργαλείο αυτό χρησιμοποιήθηκε κατά τη σχεδίαση μετασχηματιστών διαφορετικής ισχύος και επιπέδων τάσης πρωτεύοντος. Στον Πίνακα 3 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των τιμών της υπολογισμένης τάσης βραχυκύκλωσης σε τρεις περιπτώσεις και οι μετρημένες τιμές μετά την κατασκευή. Η μεταξύ τους απόκλιση είναι μικρότερη του 2,7% ενώ σε κάποιες περιπτώσεις πέφτει κάτω από το 0,5%.



Σχήμα 5: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής AB για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 630 kVA στα 20 kV



Σχήμα 6: Μεταβολή της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος της διαδρομής AB για τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ 630 kVA στα 15 kV

630/ 82008	Κόμβοι πλέγματος	IX (%)	IR (%)	Vk (%)	Μέση μετρημένη τιμή Vk (%)	απόκλιση (%)
20 kV	2613	5,78	1,48	5,97	5,61	6,35
	23696	5,76		5,95		5,99
	31818	5,58		5,77		2,90
	89603	5,54		5,73		2,22
15 kV	2613	5,63	1,48	5,82	5,50	5,84
	23696	5,56		5,75		4,58
	31818	5,43		5,63		2,28
	89603	5,42		5,62		2,15

Πίνακας 1: Σύγκριση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών τάσης βραχυκύκλωσης για το μετασχηματιστή 630 kVA (χωρίς μοντελοποίηση των καναλιών)

630 / 82008	Κόμβοι πλέγματος	IX (%)	IR (%)	Vk (%)	Μέση μετρημένη τιμή Vk (%)	απόκλιση (%)
20 kV	3260	5,49	1,48	5,69	5,61	1,35
	24862	5,58		5,77		2,90
	32555	5,58		5,77		2,90
15 kV	3260	5,36	1,48	5,56	5,50	1,10
	24862	5,45		5,65		2,68
	32555	5,43		5,63		2,28

Πίνακας 2: Τάση βραχυκύκλωσης μετασχηματιστή 630 kVA (με μοντελοποίηση των καναλιών)

	Ονομαστική ισχύς	Τάση Πρωτεύοντος	Μετρημένη τιμή Uk	Υπολογισμένη τιμή Uk	Απόκλιση (%)
1	1000 kVA	20 kV	6,27	6,26	0,23
		15 kV	6,17	6,30	2,18
2	630 kVA	20 kV	3,77	3,83	1,46
		6,6 kV	3,75	3,81	1,49
3	100 kVA	20 kV	4,16	4,27	2,67
		15 kV	4,17	4,19	0,48

Πίνακας 3: Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο άρθρο αυτό παρουσιάστηκε η εφαρμογή τρισδιάστατης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων σε τριφασικό μετασχηματιστή τύπου τυλιχτού πυρήνα δύο επιπέδων τάσεων πρωτεύοντος. Η μέθοδος βασίζεται σε τρόπο επίλυσης ο οποίος χρησιμοποιεί το βαθμωτό δυναμικό Φ_m και δεν απαιτεί υπολογισμό των πηγών με το νόμο Biot-Savart. Κατά τη μοντελοποίηση των μετασχηματιστών ελήφθησαν υπόψη οι λεπτομέρειες της γεωμετρίας των τυλιγμάτων τους (γωνίες πηνίων, κανάλια ψύξης). Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας πιστοποιήθηκαν με τοπικές μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου και δοκιμάστηκαν σε διάφορες περιπτώσεις μετασχηματιστών. Η αντιστοιχία μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών καθιστά τη μέθοδο αυτή ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο για τον υπολογισμό της τάσης βραχυκύκλωσης.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Π. Σ. Γεωργιλάκης, «Συμβολή Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης στη μείωση των Απωλειών Κενού Φορτίου Μετασχηματιστών Διανομής». Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 2000.
- [2] IEC 76-1, *Power Transformers – Part I: General*, 1993
- [3] 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.
- [4] K. Zakrzewski, B. Tomezuk: "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
- [5] Π. Ραϊτσος, «Διερεύνηση θεμάτων που αφορούν στη δοκιμή βραχυκύκλωσης μετασχηματιστών», *Σύννοδος Ελληνικής Επιτροπής CIGRE*, Αθήνα, Μάρτιος 2002.
- [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.
- [7] C. A. Brebbia, R. Magureanu, "The boundary element method for electromagnetic problems", *Engineering Analysis*, Vol. 4, Nr. 4, 1987.
- [8] 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 Magn.*, Vol. 22, Nr. 5, Sept. 1986, pp. 1040-1042.