



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΟΥ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ
ΜΕΓΑΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

Πειραιώς 45, 105 53, Αθήνα, Τηλ., Fax: 210-3216851, e-mail: cigre@dei.gr

COMITE NATIONAL HELLENIQUE

45, rue Pireos, 105 53, Athenes, Tel.-Fax: +30210-3216851, e-mail: cigre@dei.gr

GREEK NATIONAL COMMITTEE

45, Pireos Str. , 105 53, Athens, Tel.-Fax: +30210-3216851, e-mail: cigre@dei.gr

ΣΥΝΟΔΟΣ "ΑΘΗΝΑ 2009"
3 & 4 Δεκεμβρίου 2009

**Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Ηλεκτρικά Δίκτυα μέσω
Μετασχηματιστών Διανομής Χαμηλών Απωλειών**

Θ. Κεφάλας¹, Μ. Τσίλη, Α. Κλαδάς Ε. Αμοιραλής, Π. Γεωργιλάκης Γ. Λοίζος, Α. Σουφλάρης
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Πολυτεχνείο Κρήτης ΣΝΕΝΤΕΡ ΕΛΕΚΤΡΙΚ ΑΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο ρόλος των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα είναι συχνά υποτιμημένος. Διεθνώς οι απώλειες κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής συνιστούν κατά προσέγγιση το 25% των απωλειών μεταφοράς και διανομής στα ηλεκτρικά δίκτυα. Μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση οι απώλειες των μετασχηματιστών διανομής υπολογίζονται στα 33 TWh/έτος με τις απώλειες άεργου ισχύος και ανώτερων αρμονικών να συνεισφέρουν 5 TWh/έτος επιπλέον. Στο Ελληνικό σύστημα, οι περίπου 140.000 μετασχηματιστές διανομής, παρότι η ΔΕΗ πρωτοπορεί στην ΕΕ στην υιοθέτηση μετασχηματιστών χαμηλών απωλειών, παρουσιάζουν απαιτήσεις ενέργειας λόγω απωλειών κενού φορτίου 490 GWh/έτος. Η εργασία αυτή έχει δύο στόχους: Ο πρώτος είναι να αναδείξει τη σημασία των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής σε περιόδους υψηλού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο δεύτερος στόχος είναι η παρουσίαση μιας καινοτόμου μεθοδολογίας αριθμητικής ανάλυσης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών τυλιχτού πυρήνα που επιτρέπει να προσδιοριστεί ο βέλτιστος οικονομικά και τεχνικά μετασχηματιστής για την εκάστοτε χρήση, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια αντιστοίχου ερευνητικού προγράμματος*.

**Energy Conservation in Electric Power Grids by using Low Loss
Distribution Transformers**

T. Kefalas, A. Kladas, M. Tsili
National Technical University
of Athens

E. Amoiralis, P. Georgilakis
Technical University of Crete

G. Loizos, A. Souflaris
Schneider Electric AE

ABSTRACT

The importance of distribution transformer no-load loss on the operation of modern electrical grids is often underestimated. Internationally, distribution transformer no-load loss constitutes nearly 25% of the transmission and distribution losses of electrical grids. The losses in European Union distribution transformers are estimated at about 33 TWh/year whereas, reactive power and harmonic losses add a further 5 TWh/year. In the Greek electrical grid the no-load losses of 140,000 distribution transformers, although PPC is pioneer among EU companies in adopting low loss transformer policy, are estimated at about 490 GWh/year. This paper has two goals: The first one is to illustrate the significance of distribution transformer no-load loss in periods of high electric energy cost. The second goal is the presentation of a novel numerical methodology for wound core transformers no-load loss analysis, enabling to determine the economically and technically optimum transformer for every use, which has been developed in the frame of the respective research project*.

¹ Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15773, Ζωγράφου, Αθήνα, Τηλ.: 210-772 2336, Fax: 210-772 2336, e-mail: thkefala@central.ntua.gr

*This paper is part of the 03ED045 research project that is co-financed by E.U.-European Social Fund (72%) and the Greek Ministry of Development-GSRT (18%).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι απώλειες των μετασχηματιστών μπορούν να αναλυθούν σε δύο συνιστώσες, στις απώλειες κενού φορτίου και στις απώλειες φορτίου. Οι απώλειες κενού φορτίου προκύπτουν από την ενέργεια, η οποία απαιτείται προκειμένου να διατηρηθεί η διαρκώς μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή στον πυρήνα και είναι πρακτικά ανεξάρτητες του φορτίου του μετασχηματιστή. Οι απώλειες φορτίου είναι κυρίως απώλειες Joule στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και είναι ανάλογες του τετραγώνου του φορτίου.

Οι απώλειες κενού φορτίου είναι από τις σημαντικότερες λειτουργικές παραμέτρους των μετασχηματιστών δεδομένου ότι ο μετασχηματιστής είναι διαρκώς ενεργοποιημένος σε αντίθεση με τις απώλειες φορτίου οι οποίες συμβαίνουν μόνο όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί υπό φορτίο. Έτσι, ενώ οι απώλειες κενού φορτίου είναι ένα κλάσμα των απωλειών φορτίου στο ονομαστικό φορτίο, η ενέργεια η οποία καταναλώνεται στους πυρήνες των τυπικών μετασχηματιστών διανομής κατά τη διάρκεια ενός έτους είναι 300% υψηλότερη από την ενέργεια που καταναλώνεται στα τυλίγματα τους [1]. Αν ληφθεί υπόψη ότι η διάρκεια ζωής ενός τυπικού μετασχηματιστή διανομής είναι είκοσι με τριάντα χρόνια, το λειτουργικό κόστος λόγω των απωλειών κενού φορτίου ξεπερνάει κατά πολύ το αρχικό κόστος αγοράς του μετασχηματιστή [2]. Συνοπτικά οι επιπτώσεις των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής είναι οι εξής [3]:

- Αύξηση του λειτουργικού κόστους του μετασχηματιστή.
- Εκπομπή αερίων θερμοκηπίου λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων προκειμένου να αντισταθμιστούν οι απώλειες κενού φορτίου των μετασχηματιστών του συστήματος.
- Σπατάλη ορυκτών καυσίμων και πρώτων υλών.

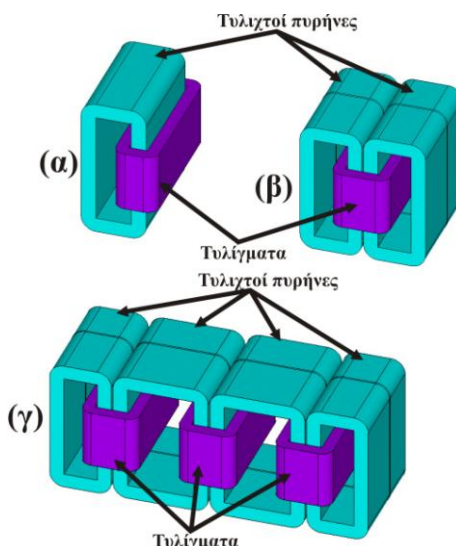
Ως αποτέλεσμα, η μείωση των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής έχει προσελκύσει τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών, κατασκευαστών μετασχηματιστών αλλά και ηλεκτρικών εταιριών καθώς αναμένεται να προκύψουν πολλαπλά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Η μείωση των απωλειών κενού φορτίου και συνεπακόλουθα η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού και του κατασκευαστικού κόστους των μετασχηματιστών μπορεί να επιτευχθεί μέσω μεθόδων πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου κατά τη φάση σχεδίασης του μετασχηματιστή. Ο ακριβής υπολογισμός των απωλειών κενού φορτίου κατά τη φάση σχεδίασης είναι πολύ σημαντικός για τους κατασκευαστές μετασχηματιστών καθώς συμβάλλει στη μείωση των περιθωρίων ασφαλείας για τις απώλειες κενού φορτίου, στην αποφυγή της πληρωμής ρητρών και στη μείωση του χρόνου παράδοσης του μετασχηματιστή [4].

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε μία καινοτόμα μέθοδος υπολογισμού απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών τυλιχτού πυρήνα [1],[2]. Ένας τυπικός τυλιχτός πυρήνας, Σχ. 1, αποτελείται από εκατοντάδες φύλλα σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας. Οι τυλιχτοί πυρήνες χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή μετασχηματιστών διανομής με ονομαστική φαινόμενη ισχύ που κυμαίνεται από 25 kVA μέχρι 2500 kVA. Μονοφασικοί και τριφασικοί μετασχηματιστές τυλιχτού πυρήνα κατασκευάζονται τυλίγοντας τους πυρήνες γύρω από προκατασκευασμένα τυλίγματα όπως φαίνεται στο Σχ. 2.



Σχ. 1 Τυπικός τυλιχτός πυρήνας.



Σχ. 2 Μετασχηματιστής τυλιχτού πυρήνα (α) 1Φ τύπου πυρήνα, (β) 1Φ τύπου κελύφους, (γ) 3Φ τύπου κελύφους.

2. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Οι μετασχηματιστές διανομής υψηλής αποδοτικότητας αποτελούν μια τεχνολογία που συνιστάται για τη μείωση των απωλειών δικτύου, δεδομένου ότι [5]:

- Οι μετασχηματιστές διανομής αντιπροσωπεύουν τη δεύτερη κυριότερη συνιστώσα των απωλειών στο δίκτυο.
- Η αντικατάσταση των μετασχηματιστών είναι ευκολότερη από την αλλαγή καλωδίων ή γραμμών.
- Οι μετασχηματιστές παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες για μείωση των απωλειών τους, καθώς υπάρχουν τεχνολογίες για μείωση των απωλειών έως και 80% κατά τη διάρκεια της ζωής τους.

Με βάση τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι υπάρχουν αρκετοί λόγοι που συνηγορούν υπέρ της προοπτικής χρησιμοποίησης ολοένα και περισσότερο των μετασχηματιστών διανομής υψηλής απόδοσης, ως μιας τεχνολογίας για την βελτίωση των απωλειών του δικτύου.

Στις επόμενες δύο παραγράφους παρατίθενται στοιχεία που αφορούν τις απώλειες των ηλεκτρικών δικτύων τόσο σε παγκόσμιο και Ευρωπαϊκό επίπεδο όσο και στον Ελλαδικό χώρο.

2.1 Παγκόσμια και Ευρωπαϊκά δεδομένα

Μελέτες σε Ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο τα τελευταία χρόνια ασχολούνται με την καταγραφή των εγκατεστημένων μετασχηματιστών διανομής και των απωλειών τους. Μια από αυτές είναι το Leonardo energy programme, η οποία διεξάγεται από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Χαλκού (European Copper Institute).

Σύμφωνα με το Leonardo energy programme οι απώλειες στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως εκτιμάται ότι φτάνουν στις 1.279 TWh, ή στο 9,2% της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι απώλειες δικτύου είναι σημαντικές για διάφορους λόγους [6]-[9]. Αντιπροσωπεύουν μια παγκόσμια οικονομική απώλεια 61 δισεκατομμυρίων δολαρίων [10], αυξάνοντας αδικαιολόγητα το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, πάνω από 700 εκατομμύρια τόνοι αερίων του θερμοκηπίου μπορούν να συσχετιστούν με αυτές τις απώλειες. Τυπικά, το ένα τρίτο των απωλειών μεταφοράς και διανομής συμβαίνουν στους μετασχηματιστές, και τα δύο τρίτα στο υπόλοιπο σύστημα, ενώ σχεδόν το 70% των απωλειών συμβαίνουν στο δίκτυο διανομής.

Όσον αφορά την Ευρωπαϊκή Ένωση των 27 (EU-27), σύμφωνα με την Strategies for Development and Diffusion of Energy Efficient Distribution Transformers (SEEDT) οι απώλειες των μετασχηματιστών διανομής υπολογίζονται στα 33 TWh/έτος. Επιπροσθέτως, οι απώλειες άεργου ισχύος και ανώτερων αρμονικών συνεισφέρουν 5 TWh/έτος με αποτέλεσμα οι συνολικές απώλειες των μετασχηματιστών διανομής να ανέρχονται σε 38 TWh/έτος [1]. Λόγω των συνθηκών φόρτισης των EU-27 μετασχηματιστών διανομής, ο λόγος των απωλειών κενού φορτίου προς τις απώλειες φορτίου είναι ίσος με τρία. Αυτό συνεπάγεται ότι το 75% των απωλειών μετασχηματιστών διανομής αφορά τις απώλειες κενού φορτίου ενώ μόνο ένα 25% τις απώλειες φορτίου.

2.2 Ελληνική πραγματικότητα

Σύμφωνα με εκτιμήσεις στην Ελλάδα υπάρχουν εγκατεστημένοι περίπου 155.000 μετασχηματιστές διανομής. Η ΔΕΗ διαθέτει περίπου 140.000 μετασχηματιστές διανομής, που με ένα μέσο ύψος απωλειών κενού φορτίου 400 W/μετασχηματιστή ισοδυναμούν με απαιτήσεις ισχύος 56 MW ή απαιτήσεις ενέργειας, λόγω απωλειών κενού φορτίου, περίπου 490 GWh/έτος [3]. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας το έτος 2006 στις γραμμές του Μετρό της Αθήνας ήταν 90 GWh. Οι υπόλοιποι 15.000 ανήκουν σε ιδιώτες και προορίζονται για βιομηχανική ή εμπορική χρήση.

Κάθε χρόνο, για λόγους αντικατάστασης παλιών μετασχηματιστών ή για την ικανοποίηση νέων φορτίων, η ΔΕΗ εγκαθιστά περίπου 7.300 νέους μετασχηματιστές διανομής, ενώ εγκαθίστανται και 630 νέοι μετασχηματιστές για βιομηχανική ή εμπορική χρήση. Τα στοιχεία αυτά αφορούν αποκλειστικά τους μετασχηματιστές διανομής τύπου λαδιού, όπου αποτελούν και την πλειοψηφία των μετασχηματιστών διανομής τόσο στην Ελλάδα, όσο και στον διεθνή χώρο.

Οι περισσότεροι από τους ήδη εγκατεστημένους μετασχηματιστές διανομής έχουν υψηλές απώλειες, αφού έχει προτιμηθεί η αρχικά χαμηλή τιμή αντί της αποδοτικότητας, ενώ πολλοί από αυτούς είναι και αρκετά γερασμένοι, κυρίως αυτοί που έχουν δημόσια χρήση.

Η αντικατάσταση του συνόλου των μετασχηματιστών διανομής από νέους αποδοτικότερους είναι πρακτικά ανέφικτη και οικονομικά ασύμφορη. Όμως, οι νέοι μετασχηματιστές που εγκαθίστανται επιβάλλεται να είναι ενεργειακά αποδοτικοί, αφού το όφελος θα είναι διπλό. Η χρήση αποδοτικών μετασχηματιστών από τη μία πλευρά θα βοηθήσει στην προσπάθεια για μείωση των εκπομπών, μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας, και από την άλλη θα υπάρχει και οικονομικό όφελος για τους αγοραστές των μετασχηματιστών αυτών, αφού

θα περιορίσουν την κατανάλωση ενέργειας και θα αποφύγουν τις επιπλέον εκπομπές που ενδέχεται να καλούνται να πληρώσουν, λόγω του πρωτοκόλλου του Κιότο.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Στην παρούσα παράγραφο αναλύονται συνοπτικά η συμβατική και η προτεινόμενη μέθοδος πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών διανομής τυλιχτού τύπου.

3.1 Συμβατική μέθοδος

Για την εύρεση των απωλειών κενού φορτίου η συμβατική διαδικασία που ακολουθείται είναι ο διαχωρισμός των απωλειών σε τρεις συνιστώσες και ο υπολογισμός καθεμίας συνιστώσας από κατάλληλα μοντέλα. Οι απώλειες κενού φορτίου χωρίζονται στις εξής συνιστώσες:

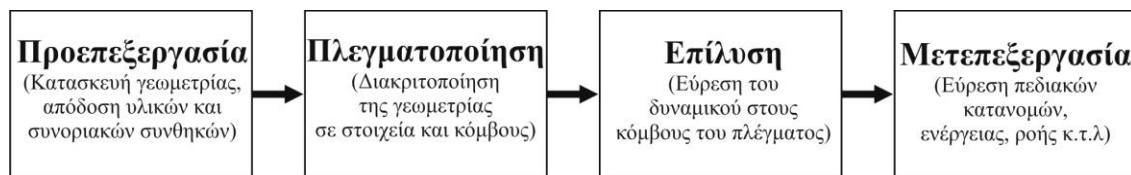
- Απώλειες κλασσικών δινορρευμάτων (classical eddy current losses).
- Απώλειες υστέρησης (hysteresis losses).
- Απώλειες ανώμαλες (anomalous or excess losses).

Οι απώλειες υστέρησης και ανώμαλες είναι πιο δύσκολο να υπολογιστούν καθώς δεν έχει αναπτυχθεί μέχρι στιγμής ένα ακριβές φυσικό μοντέλο. Τα μοντέλα που βρίσκουν συνήθως εφαρμογή είναι τα φαινομενολογικά μοντέλα, δηλαδή μαθηματικά μοντέλα. Αν και έχουν δώσει χρήσιμα αποτελέσματα σε πολλές εφαρμογές, δεν έχουν ικανοποιητική ακρίβεια και για αυτόν το λόγο δεν έχουν βρει εφαρμογή στη βιομηχανία.

Η συνήθης πρακτική στη βιομηχανία μετασχηματιστών για τον υπολογισμό των απωλειών κενού φορτίου είναι η κατασκευή πειραματικών καμπύλων η οποία απαιτεί τη διεξαγωγή ενός μεγάλου αριθμού μετρήσεων, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση των παραμέτρων που επηρεάζουν τις απώλειες κενού φορτίου [3]. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει πολύ καλή ακρίβεια στην περίπτωση τυποποιημένων μετασχηματιστών και σιδηρομαγνητικών υλικών για τα οποία υπάρχει επαρκής βιομηχανική εμπειρία. Στην περίπτωση όμως μη τυποποιημένων σχεδιάσεων ή στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται καινούργιες μαγνητικές λαμαρίνες η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει μεγάλα σφάλματα. Παρόλαυτα η χρήση για κάθε μαγνητική λαμαρίνα, καμπύλων ειδικών απωλειών σε συνάρτηση με την τιμή κορυφής της μαγνητικής επαγωγής είναι ένα καλό πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό των απωλειών κενού φορτίου καθώς οι συγκεκριμένες καμπύλες μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό που πρέπει να διερευνηθεί είναι η ανάπτυξη συστημάτων τεχνικών, για τον υπολογισμό της τοπικής κατανομής της μαγνητικής επαγωγής και για τον πειραματικό προσδιορισμό των τοπικών ειδικών απωλειών, έτσι ώστε να αναπτυχθεί μία γενικευμένη μέθοδος για τον υπολογισμό των απωλειών κενού φορτίου τυλιχτών πυρήνων ανεξάρτητα των γεωμετρικών παραμέτρων τους.

3.2 Προτεινόμενη μέθοδος

Στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός των απωλειών κενού φορτίου επιτυγχάνεται με συνδυασμό της τοπικά προσδιορισμένης κατανομής της τιμής κορυφής της μαγνητικής επαγωγής με τις πειραματικά προσδιορισμένες τοπικές ειδικές απώλειες [1], [2]. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει μικρό σφάλμα στην πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου ανεξάρτητα της γεωμετρίας των τυλιχτών πυρήνων. Συνεπώς η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι κατάλληλη για εφαρμογή στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών. Ο προσδιορισμός της τοπικής κατανομής της τιμής κορυφής της μαγνητικής επαγωγής γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η οποία αποτελείται από τα τέσσερα βασικά στάδια του Σχ. 2. Πιο συγκεκριμένα αναπτύχθηκε μία επαναληπτική μέθοδος με την οποία είναι δυνατή η εύρεση της κατανομής της τιμής κορυφής της μαγνητικής επαγωγής μόνο με μαγνητοστατικές αναλύσεις. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μικρό υπολογιστικό κόστος και μεγάλη ακρίβεια σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές στις οποίες γίνεται χρήση αρμονικών ή μεταβατικών αναλύσεων.



Σχ. 3 Τα τέσσερα στάδια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Ένα άλλο πρόβλημα το οποίο έπρεπε να επιλυθεί ήταν η κατάλληλη αναπαράσταση του τυλιχτού πυρήνα. Ένας τυπικός τυλιχτός πυρήνας αποτελείται από εκατοντάδες σιδηρομαγνητικά ελάσματα. Προκειμένου να

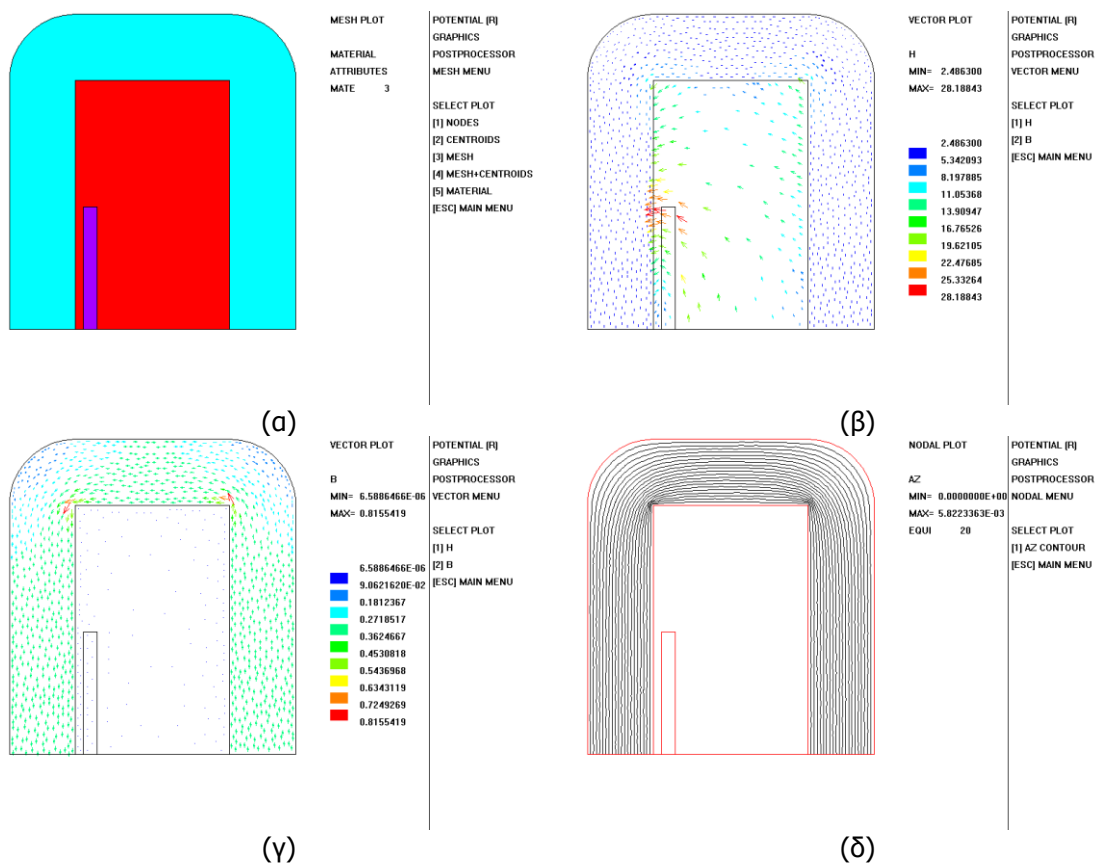
υπολογιστεί με ακρίβεια η κατανομή πεδιακών μεγεθών με συμβατικές μεθόδους θα έπρεπε να μοντελοποιηθούν όλα τα ελάσματα και ο αέρας μεταξύ τους. Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που θα προέκυπτε όμως με αυτόν τον τρόπο θα είχε πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος και η λύση του θα ήταν πολύ δύσκολη ή αδύνατη. Η τεχνική που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ήταν να θεωρηθεί το υλικό του τυλιχτού πυρήνα ως συνεχές και να αντικατασταθεί από ένα φαινόμενο υλικό με συγκεκριμένες ιδιότητες. Για την αναπαράσταση του υλικού αναπτύχθηκε ένα ελλειπτικό ανισοτροπικό μοντέλο κατάλληλο για τη μοντελοποίηση των σιδηρομαγνητικών ελασμάτων από τα οποία αποτελείται ο τυλιχτός πυρήνας. Με την παραπάνω τεχνική επιτυγχάνεται καλή ακρίβεια στον υπολογισμό της τοπικής κατανομής της μαγνητικής επαγωγής αλλά και εξαιρετικά χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Οι τοπικές ειδικές απώλειες προσδιορίζονται πειραματικά από εργαστηριακή διάταξη που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κάνοντας χρήση δοκιμαστικών πηνίων, κάρτας δειγματοληψίας και κατάλληλων υπολογιστικών τεχνικών.

Η προτεινόμενη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει τη δυνατότητα πρόβλεψης κατά τη φάση σχεδίασης του μετασχηματιστή των απωλειών κενού φορτίου με ικανοποιητική ακρίβεια ανεξάρτητα της γεωμετρίας των τυλιχτών πυρήνων ή του επιπέδου της μαγνήτισης. Επίσης, λόγω του ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία παρουσιάζει πολύ χαμηλό υπολογιστικό κόστος μπορεί να ενσωματωθεί στην υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης κατασκευαστών μετασχηματιστών καθώς επίσης να συνδυαστεί με ντετερμινιστικούς και στοχαστικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης [4], οι οποίοι είναι απαραίτητοι προκειμένου να προσδιοριστεί ο βέλτιστος τεχνικά και οικονομικά μετασχηματιστής.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

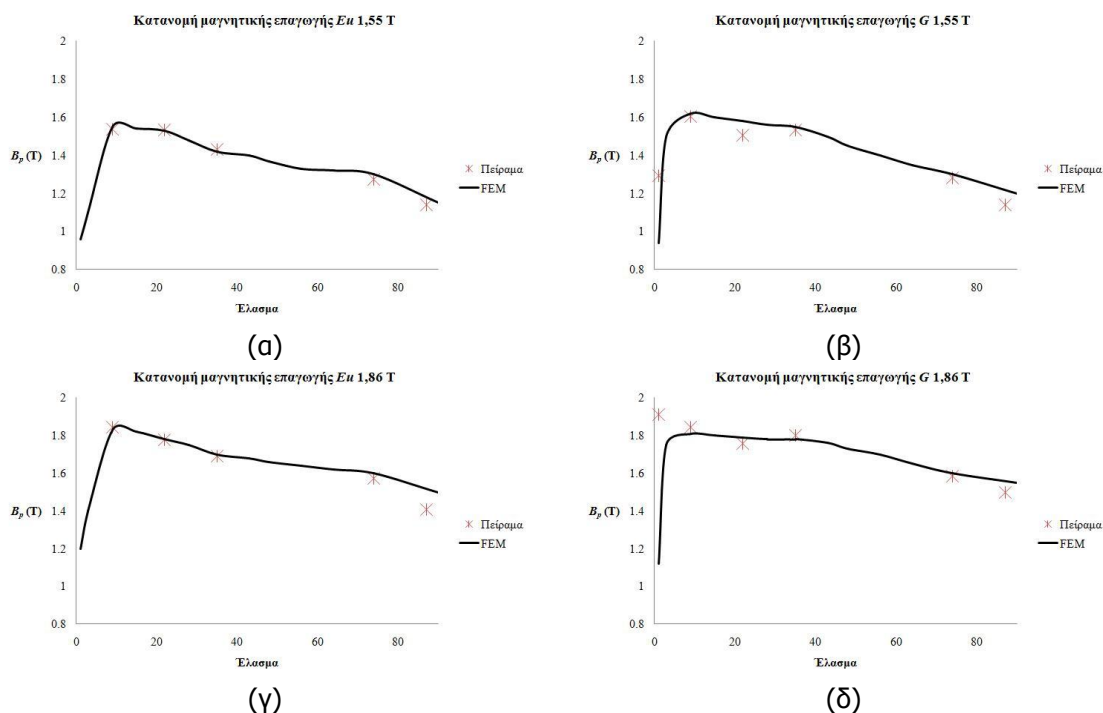
4.1 Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Στο Σχ. 4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη προτεινόμενη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για έναν 1Φ μετασχηματιστή τυλιχτού πυρήνα τύπου κελύφους. Πιο συγκεκριμένα στο Σχ. 4(α) απεικονίζεται η γεωμετρία των πεπερασμένων στοιχείων. Μόνο το $\frac{1}{4}$ της συνολικής γεωμετρίας έχει μοντελοποιηθεί λόγω συμμετρίας του προβλήματος. Στο Σχ. 4(β) και (γ) απεικονίζεται η διανυσματική κατανομή της έντασης του μαγνητικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής. Τέλος στο Σχ. 4(δ) φαίνονται οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού.



Σχ. 4 1Φ μετασχηματιστής τυλιχτού πυρήνα τύπου κελύφους, (α) γεωμετρία πεπερασμένων στοιχείων, (β) κατανομή έντασης μαγνητικού πεδίου, (γ) κατανομή μαγνητικής επαγωγής, (δ) κατανομή δυναμικού.

Η σύγκριση μεταξύ υπολογισμένης και πειραματικής τοπικής τιμής κορυφής μαγνητικής επαγωγής, σε δύο διαφορετικά σημεία (στη γωνία και στο σκέλος του τυλιχτού πυρήνα) και για δύο επίπεδα μαγνήτισης (1,55 T και 1,86 T) παρουσιάζεται στο Σχ. 5. Η σύγκλιση μεταξύ της υπολογισμένης και της πειραματικής πεδιακής κατανομής είναι ικανοποιητική όπως μπορεί κάποιος να δει από το Σχ. 5. Η παραπάνω σύγκριση έγινε για συνολικά 9 επίπεδα μαγνήτισης και 3 διαφορετικά σημεία σε αρκετούς τυλιχτούς πυρήνες και τα αποτελέσματα ήταν ανάλογα με αυτά του Σχ. 5.



Σχ. 5 Σύγκριση υπολογισμένης και πειραματικής κατανομής μαγνητικής επαγωγής (α) γωνία πυρήνα, 1,55 T, (β) σκέλος πυρήνα, 1,55 T, (γ) γωνία πυρήνα, 1,86 T, (δ) σκέλος πυρήνα, 1,86 T.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3, στην προτεινόμενη μέθοδο πρόβλεψης απωλειών κενού φορτίου, η υπολογισμένη κατανομή της τιμής κορυφής της μαγνητικής επαγωγής, συνδυάζεται με τις τοπικές ειδικές απώλειες προκειμένου να προκύψουν οι απώλειες κενού φορτίου των μετασχηματιστών τυλιχτού πυρήνα.

Στην περίπτωση του αναλυτικού υπολογισμού των απωλειών κενού φορτίου, πρώτα προσδιορίζεται η μέση τιμή κορυφής της μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα για δεδομένη τιμή της μαγνήτισης (της ενεργού τάσης του τυλιγματος διέγερσης) και μετά μέσω της καμπύλης μέσων ειδικών απωλειών προσδιορίζονται οι ειδικές απώλειες στη λειτουργία κενού φορτίου. Στο Σχ. 6(α) παρουσιάζονται οι μετρημένες και οι υπολογισμένες απώλειες κενού φορτίου τυλιχτού πυρήνα με την αναλυτική μέθοδο για διάφορες τιμές της ενεργού τάσης εισόδου του πηνίου διέγερσης.

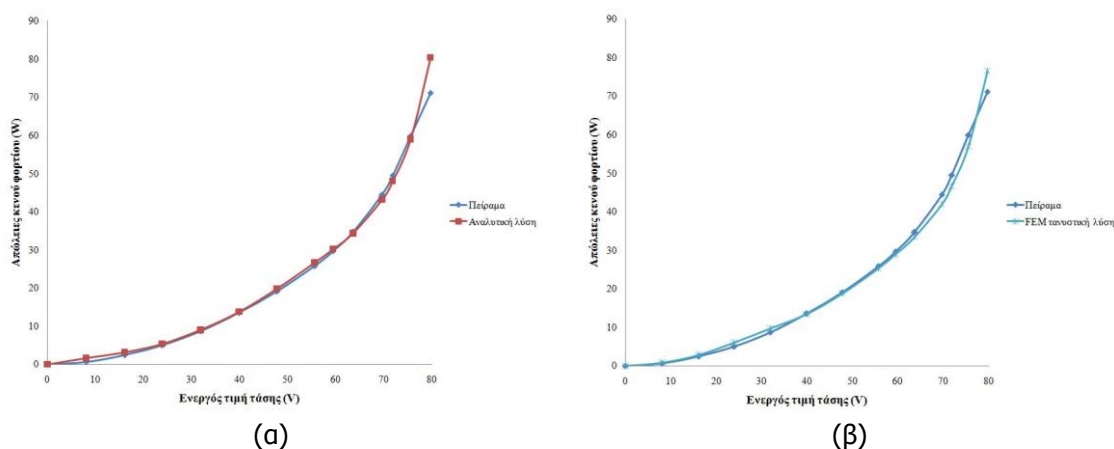
Το σφάλμα το οποίο προκύπτει κυμαίνεται μεταξύ 3,5% για μέσες τιμές της μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα ($1,3 \text{ T} \div 1,8 \text{ T}$) και -4% για μικρές και μεγάλες τιμές της μαγνητικής επαγωγής ($B < 1,3 \text{ T}$ και $B > 1,8 \text{ T}$). Επίσης το σφάλμα τείνει να αυξάνεται καθώς η τιμή της μαγνητικής επαγωγής μειώνεται, δηλαδή όταν είναι πολύ μικρότερη του 1 T, καθώς επίσης και όταν το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής είναι μεγάλο δηλαδή όταν είναι αρκετά μεγαλύτερο του 1,8 T.

Ενώ τα σφάλματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ικανοποιητικά για την περίπτωση των απλών πυρήνων, δεν ισχύει το ίδιο με τους τριφασικούς μετασχηματιστές όπου τα σφάλματα είναι σημαντικά μεγαλύτερα. Επίσης το σφάλμα δε διατηρείται σταθερό με την αλλαγή των γεωμετρικών διαστάσεων του πυρήνα καθώς και με την αλλαγή των σχεδιαστικών παραμέτρων αυτού, δηλαδή υπάρχει σημαντική διασπορά. Για τους παραπάνω λόγους υιοθετήθηκε η προτεινόμενη αριθμητική ανάλυση της παραγράφου 3 για τον υπολογισμό των απωλειών κενού φορτίου.

Στη προτεινόμενη αριθμητική ανάλυση, μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων γίνονται διαδοχικές μη γραμμικές μαγνητοστατικές αναλύσεις για διάφορες τιμές του ρεύματος εισόδου και προσδιορίζεται κάθε φορά η πεπλεγμένη ροή του πηνίου του πυρήνα και μέσω αυτής η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου. Αυτό

επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί η κατάλληλη τιμή του ρεύματος εισόδου που εξασφαλίζει μία συγκεκριμένη τιμή της τάσης εισόδου. Από την τοπική κατανομή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα που προκύπτει από τη συγκεκριμένη τιμή του ρεύματος εισόδου προσδιορίζονται μέσω κώδικα μετεπεξεργασίας και οι απώλειες κενού φορτίου.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο επιλέγεται η μακροσκοπική αναπαράσταση του υλικού του πυρήνα μέσω τανυστή της ειδικής μαγνητικής αντίστασης με ελλειπτικό ανισοτροπικό μοντέλο. Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται η περιγραφή του υλικού μέσω του τανυστή είναι ότι ο πυρήνας αποτελείται από μεγάλο αριθμό ελασμάτων με αποτέλεσμα η μαγνητική αντίσταση να είναι μικρότερη κατά την κατεύθυνση εξέλασης της λαμαρίνας ενώ κάθετα στη διεύθυνση εξέλασης η μαγνητική αντίσταση να είναι πολύ μεγαλύτερη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τοπική κατανομή της μαγνητικής επαγωγής του πυρήνα να είναι διαφορετική από αυτή που προκύπτει θεωρώντας μία ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων χωρίς τη χρήση του τανυστή. Το παραπάνω επιβεβαιώνεται και πειραματικά μέσω της πειραματικής εύρεσης της τοπικής κατανομής της μαγνητικής επαγωγής του πυρήνα με τη χρήση δοκιμαστικών πηνίων όπως φαίνεται στο Σχ. 5. Στο Σχ. 6(β) παρουσιάζονται οι μετρημένες και οι υπολογισμένες απώλειες κενού φορτίου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και με τη χρήση τανυστή. Το σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ 4% και 1% για όλες τις τιμές της μαγνητικής επαγωγής.



Σχ. 6 Σύγκριση υπολογισμένων και πειραματικών απωλειών κενού φορτίου τυλιχτού πυρήνα (α) αναλυτική μέθοδος, (β) προτεινόμενη αριθμητική μέθοδος.

4.2 Βελτιστοποίηση σχεδίασης μετασχηματιστή

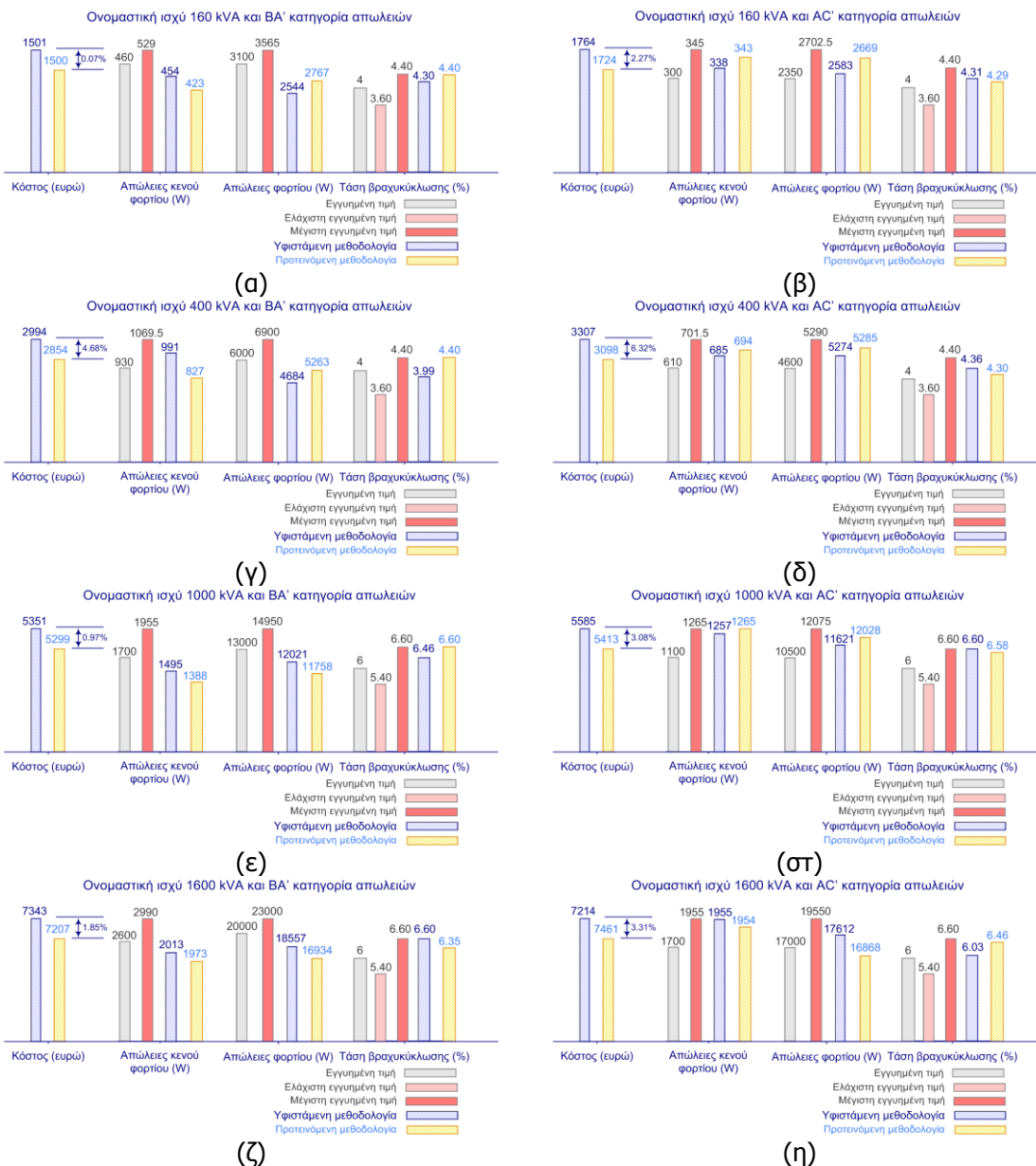
Για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης μετασχηματιστών τυλιχτού πυρήνα η αριθμητική μέθοδος πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου συνδυάστηκε με τη μεθοδολογία βελτιστοποίησης διακλάδωσης και φράγματος [4], [11]. Αρχικά η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης συγκρίθηκε με τη συμβατική ευρετική μεθοδολογία, που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών [3], για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης μετασχηματιστών διανομής τυλιχτού πυρήνα με ονομαστική ισχύ 160 kVA, 400 kVA, 1000 kVA και 1600 kVA σε δύο διαφορετικές κατηγορίες απωλειών, BA' και AC'. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 7. Σε όλες τις περιπτώσεις η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης οδηγεί σε βέλτιστες σχεδιάσεις μικρότερου κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους σε σύγκριση με τις αντίστοιχες σχεδιάσεις που προέκυψαν με χρήση της συμβατικής μεθόδου βελτιστοποίησης.

Κατόπιν η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης μετασχηματιστών διανομής συγκρίθηκε με την υπάρχουσα μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία αποδεικνύοντας την υπεροχή του σε περίπου 200 ακόμα εξεταζόμενες περιπτώσεις. Για την ορθή και αντικειμενική εξαγωγή αποτελεσμάτων των δύο μεθοδολογιών, έπρεπε να πραγματοποιηθεί σύγκριση των βέλτιστων σχεδιάσεων ανάμεσα στις δύο μεθόδους βελτιστοποίησης έχοντας ως κοινό σημείο αναφοράς τα παρακάτω δεδομένα εισόδου:

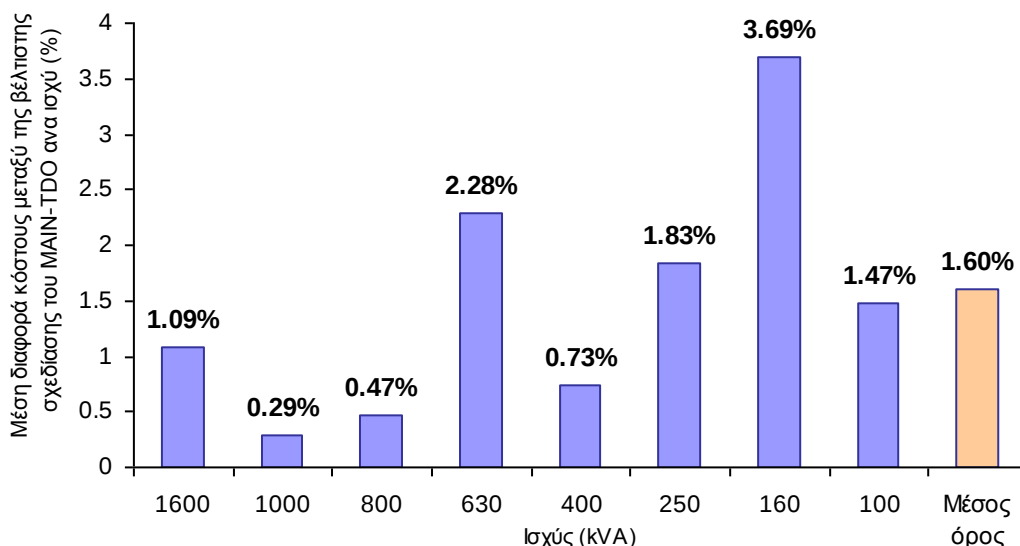
- Εγγυημένες απώλειες φορτίου και κενού φορτίου καθώς επίσης και τα αντίστοιχα ποσοστά τους
- Τιμές των οκτώ κύριων υλικών
- Υλικό πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Τιμή τάσης πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Συνδεσμολογία πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Τύπος αγωγού πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Πυκνότητα ρεύματος πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Συχνότητα
- Μαγνητικό υλικό

- Κοινό εύρος διαστημάτων στις μεταβλητές σχεδίασης (Σπείρες χαμηλής τάσης, πλάτος πυρήνα, ύψος πυρήνα και μαγνητική επαγωγή)

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα εισόδου ως κοινά σημεία αναφοράς, πραγματοποιήθηκαν 200 σχεδιάσεις. Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκαν 14 σχεδιάσεις στα 1600 kVA, 24 σχεδιάσεις στα 1000 kVA, 20 σχεδιάσεις στα 800 kVA, 48 σχεδιάσεις στα 630 kVA, 28 σχεδιάσεις στα 400 kVA, 16 σχεδιάσεις στα 250 kVA, 24 σχεδιάσεις στα 160 kVA και 14 σχεδιάσεις στα 100 kVA. Στο Σχ. 8 παρουσιάζεται η μέση διαφορά κόστους μεταξύ της βέλτιστης σχεδίασης που προέκυψε με τη χρήση της υφιστάμενης μεθοδολογίας βελτιστοποίησης και της προτεινόμενης ανά ονομαστικής φαινόμενης ισχύος. Όπως φαίνεται στο Σχ. 8, η προτεινόμενη μεθοδολογία οδηγεί σε βέλτιστες σχεδιάσεις οι οποίες είναι χαμηλότερου κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους από αυτές που προκύπτουν από τη συμβατική μεθοδολογία κατά μέσο όρο που ανέρχεται στο **1,60 %** στο σύνολο των 188 σχεδιάσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέσο αυτό κόστος επιτυγχάνεται κατά κανόνα χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα των βέλτιστων λύσεων που παρέχει η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης, από πλευράς συμβατότητας με τους περιορισμούς της σχεδίασης, απόκλιση από εγγυημένες τιμές απωλειών και τάσης βραχυκύκλωσης, και λοιπών χαρακτηριστικών απόδοσης.



Σχ. 7 Γραφική απεικόνιση των κύριων αποτελεσμάτων της σύγκρισης των δύο μεθόδων για μετασχηματιστή διανομής με ονομαστική ισχύ (α) 160 kVA, BA' κατηγορία απωλειών, (β) 160 kVA, AC' κατηγορία απωλειών, (γ) 400 kVA, BA' κατηγορία απωλειών, (δ) 400 kVA, AC' κατηγορία απωλειών, (ε) 1000 kVA, BA' κατηγορία απωλειών, (στ) 1000 kVA, AC' κατηγορία απωλειών, (ζ) 1600 kVA, BA' κατηγορία απωλειών, (η) 1600 kVA, AC' κατηγορία απωλειών.



Σχ. 8 Μέση διαφορά κόστους μεταξύ της βέλτιστης σχεδίασης της συμβατικής και προτεινόμενης μεθοδολογίας βελτιστοποίησης ανά ισχύ

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το πρόβλημα της πρόβλεψης των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών τυλιχτού πυρήνα καθώς και την ανάπτυξη νέων μεθόδων βελτιστοποίησης της σχεδίασης μετασχηματιστών τυλιχτού πυρήνα. Η ανάπτυξη των προαναφερθεισών μεθόδων οδήγησε στη μείωση του κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους μετασχηματιστών διανομής τυλιχτού πυρήνα. Τα παραπάνω με τη σειρά τους είχαν ως αποτέλεσμα οικονομικές και περιβαλλοντικές ωφέλειες καθώς και τη βελτίωση της ποιότητας των μετασχηματιστών.

Πιο συγκεκριμένα η ακριβής πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου κατά τη φάση σχεδίασης είναι πολύ σημαντική για τους κατασκευαστές μετασχηματιστών τυλιχτού πυρήνα καθώς συμβάλλει στα εξής.

- Στη μείωση των περιθωρίων ασφαλείας για τις απώλειες κενού φορτίου.
- Στην αποφυγή της πληρωμής ρητρών απωλειών κενού φορτίου.
- Στη μείωση του χρόνου παράδοσης του μετασχηματιστή, εφόσον δεν είναι πλέον απαραίτητη η κατασκευή δοκιμών για την επιβεβαίωση της σχεδίασης του μετασχηματιστή.

Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κατασκευαστικού κόστους των μετασχηματιστών διανομής τυλιχτού πυρήνα. Τέλος επειδή η προμήθεια των μετασχηματιστών από τις εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με βάση το ολικό κόστος κατοχής, δηλαδή λαμβάνεται υπόψη όχι μόνο το κατασκευαστικό αλλά και το λειτουργικό κόστος κατοχής, οι κατασκευαστές μετασχηματιστών που θα έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν μετασχηματιστές συγκεκριμένων προδιαγραφών με ελαχιστοποιημένο ολικό κόστος κατοχής, θα αυξήσουν το μερίδιό τους στην αγορά.

Από την άλλη μεριά, η μείωση των απωλειών κενού φορτίου είναι πολύ σημαντική για τους χρήστες των μετασχηματιστών διανομής καθώς το ύψος των συνολικών απωλειών κενού φορτίου του δικτύου διανομής και κατ' επέκταση το κόστος των απωλειών, είναι ιδιαίτερα αυξημένο λόγω του μεγάλου πλήθους μετασχηματιστών διανομής εγκατεστημένων στο δίκτυο διανομής και δεδομένου ότι οι απώλειες κενού φορτίου εμφανίζονται όλο το εικοσιτετράωρο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αναπτύχθηκε στα πλαίσια αντίστοιχου ερευνητικού προγράμματος ΠΕΝΕΔ 03ΕΔ45 το οποίο συγχρηματοδοτήθηκε ως εξής:

72% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

18% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας

στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. D. Kefalas, A. G. Kladas, "Harmonic impact on distribution transformer no-load loss," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, accepted for future publication.
- [2] T. D. Kefalas, P. S. Georgilakis, A. G. Kladas, A. T. Souflaris, and D. G. Paparigas, "Multiple grade lamination wound core: A novel technique for transformer iron loss minimization using simulated annealing with restarts and an anisotropy model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 6, pp. 1082-1085, Jun. 2008
- [3] P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. T. Souflaris, "A heuristic solution to the transformer manufacturing cost optimization problem," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, no 1-3, pp. 260-266, 2007.
- [4] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, A. G. Kladas, and A. T. Souflaris, "A parallel mixed integer programming-finite element method technique for global design optimization of power transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 6, pp. 1022-1025, Jun. 2008.
- [5] PROPHET, Leonardo Energy, "Global energy savings potential from high efficiency distribution transformers", October 7, 2004.
- [6] European Commission, "The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers".
- [7] Electricity distribution losses-a consultant document. Technical report, Office of Gas and Electricity Markets, 2003.
- [8] European Commission, "The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers".
- [9] Εξοικονόμηση ενέργειας στους μετασχηματιστές διανομής, ΕΜΠ, Φραγκίσκος Β.Τοπαλής, Κωνσταντίνος Μπουρούσης.
- [10] Leonardo Energy, "The potential for global energy savings potential from high efficiency distribution transformers", February 2005.
- [11] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, and A. G. Kladas, "Global transformer optimization method using evolutionary design and numerical field computation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1720-1723, Mar. 2009.