

# ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΕΝΙΑΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

## **Ελευθέριος Ι. Αμοιραλής**

Δρ Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης (ΜΠΔ), Πολυτεχνείο Κρήτης (ΠΚ)

Επιβλέπων: **Παύλος Σ. Γεωργιλάκης**, Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος ΜΠΔ ΠΚ

Τριμελής Επιτροπή:

**Παύλος Σ. Γεωργιλάκης** Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος ΜΠΔ ΠΚ

**Βασίλειος Κουϊκόγλου** Καθηγητής Τμήματος ΜΠΔ ΠΚ

**Αντώνιος Κλαδάς** Καθηγητής Σχολής ΗΜΜΥ ΕΜΠ

Επταμελής Επιτροπή:

**Παύλος Σ. Γεωργιλάκης** Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος ΜΠΔ ΠΚ

**Βασίλειος Κουϊκόγλου** Καθηγητής Τμήματος ΜΠΔ ΠΚ

**Αντώνιος Κλαδάς** Καθηγητής Σχολής ΗΜΜΥ ΕΜΠ

**Γεώργιος Σταυρουλάκης** Καθηγητής Τμήματος ΜΠΔ ΠΚ

**Ιωάννης Νικολός** Λέκτορας Τμήματος ΜΠΔ ΠΚ

**Κωσταντίνος Καλαϊτζάκης** Καθηγητής Τμήματος ΗΜΜΥ ΠΚ

**Γεώργιος Σταυρακάκης** Καθηγητής Τμήματος ΗΜΜΥ ΠΚ

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το μέλλον βασίζεται όλο και περισσότερο στον ηλεκτρισμό υποκινούμενο από την αυξανόμενη ζήτηση, τις νέες μορφές παραγωγής ενέργειας, τις νέες εφαρμογές και τα συστήματα που συνεχώς ολοκληρώνονται και αναπτύσσονται. Ζούμε την αυγή μιας νέας εποχής, όπου η ηλεκτρική ενέργεια και ο αυτοματισμός συγκλίνουν. Οι μετασχηματιστές συνιστούν μια τέτοια τεχνολογία που έχει βρει πολλαπλές και ποικίλες εφαρμογές εδώ και πολλές δεκαετίες. Καλύπτουν ανάγκες μιας ευρείας κατηγορίας εγκαταστάσεων από

τις πλέον μεγάλες όπως ηλεκτρικοί υποσταθμοί και από τις πλέον μικρές όπως οι οικιακές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Καθοριστική είναι η ύπαρξη των μετασχηματιστών στην ανύψωση και στον υποβιβασμό της τάσης για τα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παράλληλα, η διαδικασία απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ιδιωτικοποίησης των ηλεκτρικών εταιρειών έχει δημιουργήσει ένα νέο, ανταγωνιστικό περιβάλλον στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Σ' αυτό το νέο και ενδιαφέρον περιβάλλον εμφανίζεται στη βιομηχανία παραγωγής μετασχηματιστών η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης και αξιοπιστίας των μετασχηματιστών τους και μείωσης του κόστους τους.

Ταυτόχρονα, η κλιματική αλλαγή, ως αποτέλεσμα της αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου, απειλεί την ευστάθεια του παγκόσμιου κλίματος, της οικονομίας και των κοινωνιών. Περισσότερο από τα δύο τρίτα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα προέρχονται από τον τρόπο που ο άνθρωπος χρησιμοποιεί την ενέργεια. Στο πλαίσιο του πρωτοκόλλου του Κιότο, βάσει του οποίου έχουν επιβληθεί μέτρα περιορισμού των εκπομπών για τα αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε διεθνές επίπεδο, η ανάγκη για μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιτακτική. Η χρησιμοποίηση μετασχηματιστών χαμηλών απωλειών βοηθάει στη προστασία του περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα οι μετασχηματιστές χαμηλών απωλειών μπορεί να είναι και οικονομικά αποδοτικότεροι, αν ποσοτικοποιηθεί το περιβαλλοντικό κόστος των απωλειών τους.

Υπό την πίεση των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων και των κλιματικών αλλαγών το θέμα της βέλτιστης σχεδίασης των μετασχηματιστών, καθώς και τις οικονομικής τους αξιολόγησης είναι αντικείμενα συνεχούς μελέτης και έχουν απασχολήσει πολλούς ερευνητές στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία [8]. Τα συγκεκριμένα προβλήματα αποτελούν και το κύριο αντικείμενο έρευνας της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής.

## **2. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ**

Η μείωση του κόστους των μετασχηματιστών και η αύξηση της απόδοσής τους επιτυγχάνεται κυρίως με την τεχνική και οικονομική βελτιστοποίηση της σχεδίασής τους. Για το

σκοπό αυτό είναι αναγκαία η ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων εκτίμησης του κόστους κατασκευής τους, σε συνδυασμό με κατάλληλες μεθόδους βελτιστοποίησης, προσαρμοσμένες στο πρόβλημα της σχεδίασης μετασχηματιστών. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, διατυπώθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης για τριφασικούς μετασχηματιστές διανομής με τυλιγμένους πυρήνες που έχουν ως μονωτικό το ορυκτό λάδι. Κύριος στόχος είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών των κατασκευαστικών παραμέτρων, βάσει των οποίων εξασφαλίζεται σχεδίαση με το ελάχιστο δυνατό κόστος (κατασκευής ή συνολικό κόστος κατοχής) ενώ παράλληλα ικανοποιούνται οι περιορισμοί σχεδίασης. Η βέλτιστη σχεδίαση συνίσταται στον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μηχανολογικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, μέσω αναλυτικών σχέσεων και εμπειρικών συντελεστών, ακολουθώντας μια αλληλουχία υπολογισμών οι οποίοι εμπλέκουν μια σειρά από μεταβλητές σχεδίασης. Βάσει των χαρακτηριστικών αυτών υπολογίζεται το κόστος των επιμέρους συνιστωσών του ενεργού και μηχανικού μέρους του μετασχηματιστή, το οποίο χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης. Η μη γραμμική μορφή της συνάρτησης αυτής, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να λαμβάνουν συνεχείς ή διακριτές τιμές, καθιστούν τη συγκεκριμένη βελτιστοποίηση ένα δύσκολο πρόβλημα μη γραμμικού μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με μη γραμμικούς περιορισμούς. Παράλληλα, μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίο επιλύεται το συγκεκριμένο πρόβλημα από την υφιστάμενη ευρετική μεθοδολογία βελτιστοποίησης και εντοπίστηκαν οι αδυναμίες της υφιστάμενης μεθόδου στην εύρεση του ολικού βέλτιστου. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν και τεκμηριώθηκαν οι αναλυτικές εξισώσεις της σχεδίασης, οι οποίες συνθέτουν τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, αποτελώντας τη βάση για τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν.

Έχοντας ορίσει τις αναλυτικές εξισώσεις της συνολικής σχεδίασης και πριν την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με καινοτομικές μεθοδολογίες, αντιμετωπίστηκε ένα σημαντικό υποπρόβλημα του κύριου προβλήματος το οποίο συνίσταται στην επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές. Αναλυτικότερα, αναπτύχθηκαν καινοτομικές μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης ικανές να επιλέγουν αυτόματα το υλικό των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές, το οποίο αποτελεί μια πολύ σημαντική

παράμετρο για τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους χωρίς να χρειάζεται να γίνει δύο φορές η βελτιστοποίηση της σχεδίασης: μία φορά με τυλίγματα χαλκού και μία φορά με τυλίγματα αλουμινίου. Δημιουργήθηκε μια βάση γνώσης που περιείχε 2646 βέλτιστες σχεδιάσεις. Για κάθε μία από αυτές τις 2646 σχεδιάσεις υπολογίστηκαν 13 ιδιότητες εισόδου. Οι συγκεκριμένες ιδιότητες επιλέχθηκαν μετά από μια σειρά δοκιμών, περικλείοντας τις σημαντικότερες ιδιότητες κατά τη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή, όπως το κόστος χαλκού και οι εγγυημένες απώλειες φορτίου, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την τεχνολογία και εμπειρία των μηχανικών σχεδίασης της βιομηχανίας. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τα δέντρα απόφασης επιλέχθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές, αξιοποιώντας με επιτυχία την προαναφερθείσα βάση γνώσης.

Αφού δημιουργήθηκε μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος με την τεχνική των νευρωνικών δικτύων, αναπτύσσοντας ένα πλήθος από διαφορετικές τοπολογίες νευρωνικών δικτύων, αναζητώντας εκείνη με το μεγαλύτερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου [10], η έρευνα επεκτάθηκε με την ανάπτυξη ενός καινοτομικού μοντέλου επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών. Το συγκεκριμένο μοντέλο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, των δέντρων απόφασης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων [5]. Τα δέντρα απόφασης επιλέγουν αυτόματα τις πιο σημαντικές παραμέτρους εισόδου που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων, ενώ τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών με βάση όχι μόνο τις συνολικές υποψήφιες παραμέτρους εισόδου αλλά και τις επιλεγμένες παραμέτρους από τα δέντρα απόφασης. Επίσης, διεξήχθησαν πειράματα με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποτελούνταν από ένα ή δύο κρυφά στρώματα και δύο διαφορετικές διαμερίσεις της βάσης γνώσης. Καταλήγοντας, παρατηρήθηκε ότι το καλύτερο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποίησε και τις 13 ιδιότητες ως νευρώνες εισόδου ήταν εκείνο με ένα κρυφό στρώμα, το οποίο διαμέρισε το σύνολο μάθησης στο 50% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 50% στο σύνολο ελέγχου, έχοντας την καλύτερη συμπεριφορά με βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με

95.92%. Από την άλλη μεριά, το καλύτερο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήσε τις 6 ιδιότητες (που προέκυψαν από το δέντρο απόφασης) ως νευρώνες εισόδου ήταν εκείνο με δύο κρυφά στρώματα, το οποίο διαμέρισε το σύνολο μάθησης στο 50% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 50% στο σύνολο ελέγχου έχοντας βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 94.58%.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε μία υβριδική τεχνική τεχνητής νοημοσύνης-αριθμητικής μεθόδου για την επιβεβαίωση της προτεινόμενης μεθόδου επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, χρησιμοποιώντας τα δέντρα απόφασης για την επιλογή των παραμέτρων εισόδου, την υβριδική τεχνική πεπερασμένων στοιχείων-οριακών στοιχείων για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή και τα νευρωνικά δίκτυα για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών [4]. Στόχος της τεχνικής ήταν να συνδυάσει την ακρίβεια της αριθμητικής μεθόδου στην πρόβλεψη των χαρακτηριστικών κάθε σχεδίασης, με όσο το δυνατόν μικρότερη υπολογιστική επιβάρυνση, λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η υβριδική μέθοδος πεπερασμένων-οριακών στοιχείων. Η ακρίβεια της προτεινόμενης τεχνικής είναι 96%, δηλαδή ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου για την επιλογή υλικού τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές είναι 96%, γεγονός που την αναδεικνύει ως μια μέθοδο πολύ αποδοτική, ειδικά για βιομηχανική χρήση.

Έχοντας επιλύσει επιτυχώς το υποπρόβλημα της επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων, επόμενος στόχος ήταν να αναπτυχθούν μεθοδολογίες ικανές να επιλύσουν το συνολικό πρόβλημα σχεδίασης του μετασχηματιστή. Με βάση τα παραπάνω, παρουσιάστηκαν υβριδικές μεθοδολογίες μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού σε συνδυασμό με τα πεπερασμένα στοιχεία [2] και νέες τεχνικές που επεμβαίνουν στη σχεδίαση του μετασχηματιστή, μεθοδολογίες που αποδείχθηκαν ότι είναι ικανές να επιλύσουν επιτυχημένα το πρόβλημα βελτιστοποίησης, δηλαδή να ελαχιστοποιήσουν το κατασκευαστικό κόστος των μετασχηματιστών διανομής τυλιγμένου πυρήνα [1] [3] [6]. Η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων είχε ως στόχο την εύρεση της βέλτιστης σχεδίασης των μετασχηματιστών διανομής.

Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνολικής σχεδίασης του μετασχη-

ματιστή σε σύγκριση με την υφιστάμενη μεθοδολογία της βιομηχανίας είναι τα ακόλουθα:

1. Η προτεινόμενη μεθοδολογία χρειάζεται 26 παραμέτρους εισόδου για τη βέλτιστη σχεδίαση, σε αντίθεση με την υφιστάμενη που χρειάζεται 134 παραμέτρους εισόδου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην προτεινόμενη μέθοδο ένα μεγάλο ποσοστό των δεδομένων εισόδου ορίζονται αυτόματα, λαμβάνοντας υπόψη τις 14 παραμέτρους εισόδου που αφορούν στα απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός μετασχηματιστή, ενώ οι υπόλοιπες 12 παράμετροι εισόδου αφορούν στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.
2. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εντοπίζει βέλτιστη λύση που είναι κατά μέσο όρο 1.60% φθηνότερη από τη λύση που δίνει η υφιστάμενη μεθοδολογία της βιομηχανίας. Το συγκεκριμένο ποσοστό προέκυψε μετά από μια πληθώρα βέλτιστων σχεδιάσεων που πραγματοποιήθηκαν σε ευρύ φάσμα μετασχηματιστών διανομής διαφορετικής ονομαστικής ισχύος, απωλειών και γενικότερα διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών.
3. Η προτεινόμενη μεθοδολογία καταλήγει σχεδόν πάντα στη βέλτιστη λύση ανεξαρτήτως του εύρους των διαστημάτων των μεταβλητών σχεδίασης. Με άλλα λόγια, ο χρήστης κατά τη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή μπορεί να ορίσει τα ανώτερα και κατώτερα διαστήματα των μεταβλητών σχεδίασης με τέτοιες τιμές, οι οποίες να καθορίζουν ένα αρκετά μεγάλο διάστημα. Για παράδειγμα, μπορεί να καθορίσει το διάστημα  $[5, 35]$ , το οποίο αντιπροσωπεύει το διάστημα μέσα στο οποίο πρέπει να επιλεγεί ο αριθμός των σπειρών του πηνίου της χαμηλής τάσης για ένα μετασχηματιστή με ονομαστική ισχύ 1600 kVA. Αντίστοιχα μπορεί να καθορίσει και τα υπόλοιπα διαστήματα που αντιπροσωπεύουν τις υπόλοιπες μεταβλητές σχεδίασης. Παρά το γεγονός ότι μπορεί να έχουν επιλεγεί μεγάλα διαστήματα κυρίως από έναν άπειρο χρήστη η προτεινόμενη μεθοδολογία εντοπίζει τη βέλτιστη λύση σε σύντομο χρονικό διάστημα, σε αντίθεση με την υφιστάμενη μεθοδολογία βάσει της οποίας αν επιλέξει ο χρήστης μεγάλο πλήθος τιμών για τις μεταβλητές σχεδίασης η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι όχι μόνο αρκετά χρονοβόρα, αλλά επιπλέον δεν εντοπίζει τη βέλτιστη λύση.
4. Αναπτύχθηκαν τρεις καινοτομικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της τιμής της πυκνότητας ρεύματος. Οι προσεγγίσεις αυτές εξασφαλίζουν την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης εντοπίζοντας την ολικά βέλτιστη σχεδίαση, η οποία ικανο-

ποιεί τις διεθνείς προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του πελάτη. Αντίθετα, ο βηματικός τρόπος (αρκετές εναλλακτικές τιμές στις μεταβλητές σχεδίασης) που ακολουθεί η υφιστάμενη μεθοδολογία δεν εξασφαλίζει την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

5. Η ταχύτητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας στον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης είναι ακόμη ένα πλεονέκτημα σε σχέση με την υφιστάμενη μεθοδολογία.
6. Η προτεινόμενη μεθοδολογία καταλήγει σχεδόν πάντα σε μια βέλτιστη λύση σε αντίθεση με την υφιστάμενη μεθοδολογία που μπορεί να απορρίψει όλες τις υποψήφιες λύσεις.
7. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία από τον μελετητή ώστε να εντοπιστεί η βέλτιστη λύση σε αντίθεση με την υφιστάμενη μεθοδολογία όπου ο χρήστης χρειάζεται τεχνογνωσία και εμπειρία για τον επιτυχή χειρισμό και βελτιστοποίηση μιας σχεδίασης μετασχηματιστή.
8. Το γραφικό περιβάλλον της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι πολύ φιλικό, συγκεντρώνοντας τις απαραίτητες μεταβλητές εισόδου στο κύριο παράθυρο, χωρίς να κουράζει τον χρήστη με πολλαπλά παράθυρα. Με άλλα λόγια, το γραφικό περιβάλλον είναι αρκετά ευέλικτο για κάθε χρήστη είτε πρόκειται για έναν εξειδικευμένο σχεδιαστή μετασχηματιστών είτε για έναν αρχάριο.

### **3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ**

Μετά την αντιμετώπιση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του κατασκευαστικού κόστους του μετασχηματιστή η έρευνα επεκτάθηκε στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής του απόδοσης μέσω ανάπτυξης κατάλληλων μοντέλων κόστους λειτουργίας. Στα μοντέλα αυτά αντικατοπτρίζεται η επίπτωση των απωλειών ενέργειας του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια ζωής του, τόσο από την πλευρά οικονομικής αποτίμησής τους από τον χρήστη (ηλεκτρική εταιρεία ή βιομηχανικό χρήστη), όσο και σε επίπεδο περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους. Το πρόβλημα αυτό συνδέεται άμεσα με το ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας, το οποίο αντιμετωπίζεται με όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο. Λόγω του πλήθους των εγκατεστημένων μετασχηματιστών στα δίκτυα διανομής η εξοικονόμηση ενέργειας συνδέεται άμεσα με τη μείωση των απωλει-

ών τους και την αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνει το κόστος επένδυσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο μεγαλύτερο ενδιαφέρον εκδηλώνουν οι ηλεκτρικές εταιρείες στην εγκατάσταση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, υιοθετώντας μοντέλα οικονομικής αξιολόγησης τα οποία συνεκτιμούν το κόστος απωλειών στο συνολικό κόστος επένδυσης ενός μετασχηματιστή.

Για την αξιολόγηση των απωλειών μετασχηματιστών έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι. Παρά το γεγονός ότι οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στις ίδιες βασικές αρχές, διαφοροποιούνται ανάλογα με τον στόχο που πρέπει να πετύχουν. Για παράδειγμα, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) έχει αναπτύξει μία απλή και γρήγορη μέθοδο για να κοστολογεί τις απώλειες και να συγκρίνει τις διάφορες προσφορές κατά τη διάρκεια της προμήθειας μετασχηματιστών.

Το Ινστιτούτο των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) έχει αναπτύξει ένα αρκετά αναλυτικό οδηγό για την αξιολόγηση των απωλειών, χωρίς όμως να αποτελεί μονόδρομο, αφού όπως προαναφέρθηκε έχουν αναπτυχθεί και άλλες μεθοδολογίες. Στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκε ως βάση ο συγκεκριμένος οδηγός του IEEE, εμπλουτίζοντάς τον με το περιβαλλοντικό κόστος των απωλειών. Με αυτόν τον τρόπο αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία αξιολόγησης των απωλειών στους μετασχηματιστές διανομής, η οποία χρησιμεύει κυρίως στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού.

Σκοπός αυτής της μεθόδου αξιολόγησης είναι ο συνυπολογισμός της αξίας της ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάται για την τροφοδότηση των απωλειών των μετασχηματιστών. Οι χρήστες (αγοραστές) των μετασχηματιστών μπορούν να χρησιμοποιήσουν την προτεινόμενη μέθοδο για να προσδιορίσουν το σχετικό οικονομικό όφελος από την αγορά ενός μετασχηματιστή με χαμηλό κόστος αγοράς και υψηλό κόστος απωλειών, σε αντιπαράθεση μ' έναν άλλο μετασχηματιστή ο οποίος έχει υψηλό κόστος αγοράς και χαμηλό κόστος απωλειών. Οι κατασκευαστές μετασχηματιστών μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη μέθοδο οικονομικής αξιολόγησης για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης του μετασχηματιστή, ώστε να προκύψει ένας μετασχηματιστής που να συμφέρει οικονομικά να κατασκευαστεί. Επίσης, το κόστος που προκύπτει από την αξιολόγηση, παρέχει τη δυνατότητα στον αγοραστή του μετασχηματιστή (ηλεκτρική εταιρεία) να συγκρίνει δύο



ή περισσότερες προσφορές και να καταλήξει στην πιο οικονομική.

Ταυτόχρονα, με δεδομένη την πρόσφατη έντονη ευαισθητοποίηση της παγκόσμιας κοινότητας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου λόγω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι πλέον αναγκαίο να ληφθούν και αυτές υπόψη κατά την κοστολόγηση των απωλειών ενέργειας.

Με βάση τα παραπάνω αναπτύχθηκε ένα καινοτομικό μοντέλο οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών, το οποίο λαμβάνει υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος που προέρχεται από τα αέρια του θερμοκηπίου, που δημιουργούνται από τις απώλειες των μετασχηματιστών διανομής [7]. Συγκεκριμένα, το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει το περιβαλλοντικό κόστος στην κλασική σχέση του συνολικού κόστους κατοχής, αναδεικνύοντας τα οφέλη που προκύπτουν για τις ηλεκτρικές εταιρείες από την εγκατάσταση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, ύστερα από εφαρμογή σε μετασχηματιστές που εξυπηρετούν διάφορα είδη φορτίου σύμφωνα με πραγματικά δεδομένα προερχόμενα από δίκτυα διανομής στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο και μη διασυνδεδεμένο σύστημα. Η μεθοδολογία βασίζεται στον οδηγό κοστολόγησης απωλειών σύμφωνα με το πρότυπο IEEE C57.120-1991, το οποίο αποτελεί μία διεθνώς αναγνωρισμένη και εφαρμοσμένη πρακτική για την οικονομική αξιολόγηση απωλειών, προτείνοντας ένα νέο αξιόπιστο εργαλείο αξιολόγησης επενδύσεων στο πλαίσιο του επαναπροσδιορισμού των τεχνικών και οικονομικών προτύπων που επιβάλλουν στον ενεργειακό τομέα οι επιπτώσεις της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής.

#### **4. ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ**

Στη συνέχεια, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μεγέθους μετασχηματιστών στα δίκτυα διανομής, το οποίο αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία εξαρτώμενη από ένα πλήθος τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων.

Η διαστασιολόγηση, δηλαδή η επιλογή της ονομαστικής ισχύος των μετασχηματιστών που εγκαθίστανται στο δίκτυο επηρεάζει την απόδοση και τη λειτουργικότητά τους. Η κατάλληλη επιλογή μετασχηματιστή, βάσει του φορτίου που πρόκειται να εξυπηρετηθεί, έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Μετασχηματιστής ονομαστικής

ισχύος αρκετά μεγαλύτερης από τη βέλτιστη επιλογή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών κενού φορτίου, ενώ μετασχηματιστής ονομαστικής ισχύος αρκετά μικρότερης από τη βέλτιστη επιλογή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών φορτίου. Η βέλτιστη επιλογή του μεγέθους του μετασχηματιστή εξαρτάται από μια σειρά από οικονομικούς παράγοντες καθώς, επίσης, και από τις απώλειές του.

Εξαιτίας του πολύ μεγάλου αριθμού εγκατεστημένων μετασχηματιστών διανομής στα ηλεκτρικά δίκτυα η επίδραση της επιλογής του κατάλληλου μεγέθους είναι ζωτικής σημασίας, παρέχοντας σημαντικά οικονομικά οφέλη στις ηλεκτρικές εταιρείες και στους άλλους χρήστες μετασχηματιστών. Υπάρχουν μια σειρά από παράγοντες που εμπλέκονται στη σωστή επιλογή του μεγέθους του μετασχηματιστή, όπως για παράδειγμα η προβλεπόμενη αύξηση του φορτίου που θα εξυπηρετηθεί, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι απώλειες του μετασχηματιστή, η τιμή αγοράς του μετασχηματιστή, το προεξοφλητικό επιτόκιο και το κόστος της ενέργειας. Κατά τη διάρκεια επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στις υποψήφιες διακριτές τιμές ονομαστικής ισχύος των μετασχηματιστών όπως, επίσης, και στην επιλογή της αναβάθμισης του μεγέθους του μετασχηματιστή μια ή περισσότερες φορές κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, οδηγώντας σε διαφορετικές στρατηγικές διαστασιολόγησης.

Στη διδακτορική διατριβή προτείνεται μια καινοτομική τεχνική για την επίλυση του προβλήματος διαστασιολόγησης των μετασχηματιστών, χρησιμοποιώντας τον ελιτιστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (EAS), ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος του μετασχηματιστή, το οποίο αποτελείται από το άθροισμα του κόστους αγοράς του και του κόστους των απωλειών του κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης [9]. Ταυτόχρονα, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος, δηλαδή το φορτίο που πρόκειται να εξυπηρετηθεί καθώς, επίσης, και τα θερμικά όρια φόρτισης του μετασχηματιστή. Η συγκεκριμένη καινοτομική τεχνική εφαρμόζεται για την επιλογή του βέλτιστου μεγέθους μετασχηματιστών διανομής σ' ένα πραγματικό δίκτυο αποτελούμενο από 16 υποσταθμούς διανομής, οι οποίοι εξυπηρετούν συγκεκριμένο φορτίο κατά τη διάρκεια 30 ετών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εφαρμογής διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη τεχνική EAS είναι αρκετά αποτελεσματική εξαιτίας του γεγονότος ότι πάντα συγκλίνει στο ολικό βέλτιστο

του προβλήματος της επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή μεταξύ της πληθώρας πιθανών στρατηγικών διαστασιολόγησης, οι οποίες προκύπτουν μέσω των διαφορετικών πιθανών επιλογών μεγεθών μετασχηματιστών και ετών εγκατάστασής τους στο δίκτυο.

## 5. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Με δεδομένη την υπολογιστική ισχύ των ηλεκτρονικών υπολογιστών που εξασφαλίζουν σε ελάχιστο χρόνο την ανάλυση και διαστασιολόγηση ενός δεδομένου προϊόντος τίθεται το θέμα της δημιουργίας μιας νέας γενιάς προγραμμάτων που θα διευρύνουν τις δυνατότητες σχεδιασμού των προϊόντων, προσφέροντας καλύτερες λύσεις σε σχέση με κάποια κριτήρια. Το λογισμικό TDO (Transformer Design Optimization), που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής, είναι μια συλλογή από εργαλεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης μετασχηματιστών διανομής. Αναλυτικότερα, το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα της συνολικής σχεδίασης των μετασχηματιστών διανομής χρησιμοποιώντας την τεχνική του μεικτού ακέραιου προγραμματισμού. Στη συνέχεια, ο χρήστης του λογισμικού μπορεί να αξιολογήσει την ποιότητα της κάθε βέλτιστης λύσης με μια σειρά από γραφικά εργαλεία απεικόνισης και κατάλληλα αρχεία εξόδου. Επίσης, η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί επιπλέον εργαλείο ανάλυσης, υπολογίζοντας το πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης του βέλτιστου μετασχηματιστή. Ακόμη, το λογισμικό TDO παρέχει τη δυνατότητα στον χρήστη να αξιολογήσει οικονομικά όχι μόνο την κάθε βέλτιστη σχεδίαση αλλά και να τη συγκρίνει και με άλλες σχεδιάσεις. Παράλληλα, στο πρόγραμμα TDO έχει ενσωματωθεί μια μεγάλη βάση δεδομένων με υπάρχουσες βέλτιστες σχεδιάσεις (200 μετασχηματιστές), οι οποίες μπορούν να εισαχθούν στο πρόγραμμα για περαιτέρω επεξεργασία. Το λογισμικό TDO έχει δημιουργηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab.

Συμπερασματικά, πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο πακέτο εργαλείων προσφέροντας ένα φιλικό και εύχρηστο γραφικό περιβάλλον. Το TDO μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στη βιομηχανία από μηχανικούς σχεδίασης μετασχηματιστών, αλλά και για εκπαιδευτική ή πειραματική χρήση στην επεξεργασία και άντληση συμπερασμάτων με εφαρμογή στη διδασκαλία ή στην έρευνα.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί το πρώτο και ουσιαστικότερο βήμα για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας σε εθνικό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο τελικού καταναλωτή. Βασικός στόχος της διδακτορικής διατριβής ήταν η εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτεύχθηκε με την προδιαγραφή, την επιλογή και την εγκατάσταση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των πλέον οικονομικών και ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών, χρησιμοποιώντας τα ενιαία μοντέλα εκτίμησης κόστους κατασκευής και λειτουργίας μετασχηματιστών που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διατριβής.

Η συμβολή και τα σημεία προαγωγής της επιστήμης της παρούσας διδακτορικής διατριβής [11] εντοπίζονται κυρίως στην ανάπτυξη και εφαρμογή των ακόλουθων μεθοδολογιών:

1. Εισαγωγή υβριδικής αιτιοκρατικής μεθόδου βελτιστοποίησης για την εύρεση του ολικού βέλτιστου σχεδίασης μετασχηματιστών διανομής τύπου τυλιγμένου πυρήνα. Αναπτύσσεται μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή με εφαρμογή του μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού, καταλήγοντας σε μία καινοτομική υβριδική τεχνική ικανή να εξασφαλίσει ολική βέλτιστη λύση. Τα βασικά σημεία υπεροχής της μεθοδολογίας συνίστανται: i) στην επιλογή κατάλληλου αλγόριθμου βελτιστοποίησης του συνολικού κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους του μετασχηματιστή, ii) στην επέκταση του χώρου των πιθανών λύσεων μέσω κατάλληλου προσδιορισμού του τρόπου μεταβολής καιρίων μεταβλητών σχεδίασης, όπως η διατομή των αγωγών, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο ολικά βέλτιστες σχεδιάσεις, iii) στην ενσωμάτωση αριθμητικών πεδιακών τεχνικών για την επιβεβαίωση της βέλτιστης σχεδίασης. Με τον τρόπο αυτό ξεπεράστηκε ένα από τα βασικά προβλήματα της υφιστάμενης μεθοδολογίας σχεδίασης που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία, η οποία, λόγω της ευρετικής φύσης του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, δεν έχει την ικανότητα να υπολογίσει το ολικό βέλτιστο μιας σχεδίασης, παρά μόνο να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση, αδυνατώντας να μειώσει περαιτέρω το κόστος κατασκευής των μετασχηματιστών διανομής.
2. Ενσωμάτωση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στην επιλογή του υλικού των τυλιγμά-

των μετασχηματιστών. Για την επίλυση του υποπροβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης που αφορά στην επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών αναπτύσσεται καινοτομικό μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης. Το συγκεκριμένο μοντέλο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, των δέντρων απόφασης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα δέντρα απόφασης επιλέγουν αυτόματα τις πιο σημαντικές παραμέτρους εισόδου που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων, ενώ τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών με βάση όχι μόνο τις συνολικές υποψήφιες παραμέτρους εισόδου αλλά και τις επιλεγμένες παραμέτρους από τα δέντρα απόφασης. Συνεπώς, αποφεύγεται η ανάγκη του κατασκευαστή να εξετάσει για κάθε σχεδίαση ενός μετασχηματιστή ποιό υλικό τυλιγμάτων είναι το οικονομικότερο, ο χαλκός ή το αλουμίνιο, οπότε μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για τη βελτιστοποίησή της.

3. Ενσωμάτωση περιβαλλοντικού κόστους στην οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών. Στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύσσεται μεθοδολογία οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών μέσω επέκτασης του μοντέλου που περιγράφεται στο διεθνές πρότυπο C57.120 του Ινστιτούτου των Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) με εισαγωγή του περιβαλλοντικού κόστους. Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά, τόσο του φορτίου που εξυπηρετείται από τους μετασχηματιστές, όσο και του δικτύου στο οποίο εγκαθίστανται δίνοντας με αυτόν τον τρόπο ρεαλιστική αποτύπωση των συνθηκών λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια ζωής τους και καταλήγοντας σε αξιόπιστα αποτελέσματα για την επίπτωση του συνυπολογισμού του περιβαλλοντικού κόστους στη διαδικασία οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών.
4. Ανάπτυξη και εφαρμογή στοχαστικής μεθόδου βελτιστοποίησης για τη διαστασιολόγηση μετασχηματιστών προς εγκατάσταση σε δίκτυο διανομής: Λόγω των χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης επιλέχθηκε για την επίλυσή του μέθοδος βασισμένη στον ελιτιστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών. Η προτεινόμενη μέθοδος επιλέγει επιτυχώς την ονομαστική

ισχύ ενός πλήθους μετασχηματιστών προς εγκατάσταση σε ένα δίκτυο διανομής, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές οικονομικών και τεχνικών παραγόντων κατά τη διάρκεια της θεωρούμενης μελέτης. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου καταδεικνύουν την καταλληλότητά της για την επίλυση του προβλήματος της επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή κατά τον προγραμματισμό των δικτύων διανομής, λόγω της δυνατότητας της μεθόδου να αξιολογήσει σωστά και με μικρό υπολογιστικό κόστος το πλήθος των πιθανών στρατηγικών διαστασιολόγησης των μετασχηματιστών σε ένα δίκτυο.

## **7. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΕ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΑ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΡΙΣΗ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

- 1 E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. G. Kladas, "Global Transformer Optimization Method using Evolutionary Design and Numerical Field Computation", IEEE Transactions on Magnetics, 2009, accepted for publication.
- 2 M. A. Tsili, E. I. Amoiralis, A. G. Kladas, A. T. Souflaris, "Hybrid Numerical-Analytical Technique for Power Transformer Thermal Modeling", IEEE Transactions on Magnetics, 2009, accepted for publication.
- 3 E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, A. G. Kladas, A. T. Souflaris, "A Parallel Mixed Integer Programming-Finite Element Method Technique for Global Design Optimization of Power Transformer," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 6, pp. 1022-1025, 2008.
- 4 E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, T. D. Kefalas, M. A. Tsili, A. G. Kladas, "Artificial Intelligence combined with Hybrid FEM-BE Techniques for Global Transformer Optimization," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 4, pp. 1633-1636, 2007.
- 5 P. S. Georgilakis, E. I. Amoiralis, "Spotlight on Transformer Design," IEEE Power and Energy, Vol. 5, No. 1, pp. 40-50, 2007.
- 6 E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. Tsili, "Design Optimization of Distribution Transformers Based on Mixed Integer Programming Methodology," Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Vol. 10, No. 5, pp. 1178-1183, 2008.
- 7 E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. Tsili, A. T. Souflaris, "Utility-Based Economic As-

- essment of Distribution Transformers Considering Specific Load Characteristics and Environmental Factors," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 10, No. 5, pp. 1184-1191, 2008.
- 8 E. I. Amoiralis, M. Tsili, P. S. Georgilakis, "The State of the Art in Engineering Methods for Transformer Design and Optimization: a Survey," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 10, No. 5, pp. 1149-1158, 2008.
- 9 E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. G. Kladas, "Ant Colony System-Based Algorithm for Optimal Multi-Stage Planning of Distribution Transformer Sizing", *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Part II, LNAI 5178, pp. 9-17, 2008.
- 10 E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, A. T. Gioulekas, "An Artificial Neural Network for the Selection of Winding Material in Power Transformers," *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, LNAI 3955, pp. 465-468, 2006.
- 11 Ε. Αμοιραλής, Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Αναπτύσσοντας Προηγμένα Ενιαία Μοντέλα Εκτίμησης Κόστους Κατασκευής και Λειτουργίας Μετασχηματιστών, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διδακτορική Διατριβή, 2008. (<http://poseidon.library.tuc.gr/cgi-bin-EL/egwcgi/72497/showfull.egw/1+0+3+full>)