

Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών Διανομής

Π. ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ
Δρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Ν. ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται ένα μοντέλο οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών (Μ/Σ) διανομής. Σκοπός αυτού του άρθρου είναι η αναλυτική παρουσίαση των βημάτων που απαιτούνται για την επιλογή των πλέον οικονομικών και ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών. Ακολουθώντας το μοντέλο οικονομικής αξιολόγησης, οι χρήστες των μετασχηματιστών έχουν ένα εργαλείο για τον συνυπολογισμό του κόστους των απωλειών και του κόστους προμήθειας των μετασχηματιστών. Το άρθρο αυτό προσφέρει στους χρήστες των μετασχηματιστών τη γνώση και τις μεθόδους για την αξιολόγηση των εναλλακτικών προσφορών μετασχηματιστών και για την ικανοποίηση της ανάγκης τους για εξοικονόμηση χρημάτων και ενέργειας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτρικές εταιρίες βελτιώνουν την αποδοτικότητα των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας τις απώλειες [1]. Οι βιομηχανικοί και οι εμπορικοί χρήστες της ηλεκτρικής ενέργειας, επίσης, βελτιώνουν την αποδοτικότητα των δικτύων διανομής τους, μειώνοντας τις απώλειες. Η μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής γίνεται με τις παρακάτω επτά μεθόδους [2]: (1) αντικατάσταση των μεγαλύτερων αγωγών που είναι σε λειτουργία, (2) αύξηση της τάσης του συστήματος, (3) βελτίωση του συντελεστή ισχύος του συστήματος με προσθήκη πυκνωτών διακλάδωσης, (4) προσθήκη γραμμών μεταφοράς ή αγωγών τροφοδοσίας, (5) προσθήκη ή εξισορρόπηση φάσεων, (6) χρήση ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών (χαμηλών απωλειών) και (7) επαναδιαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Ενώ μερικές από τις παραπάνω παρεμβάσεις μπορούν να υλοποιηθούν ευκολότερα από κάποιες άλλες, η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών Μ/Σ πραγματοποιείται πάντοτε εύκολα. Δεν χρειάζεται μεγάλη τεχνική εμπειρία, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σωστά οι Μ/Σ χαμηλών απωλειών. Η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών δεν απαιτεί τη γνώση του τρόπου με τον οποίο έχουν σχεδιαστεί, ούτε και των μεθόδων παραγωγής με τις οποίες έχουν κατασκευαστεί. Εκείνο που είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο χρήστης είναι ο τρόπος με τον οποίο θα πρέπει να επιλέξει τον

περισσότερο οικονομικό και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικό μετασχηματιστή.

Από τη δεκαετία του 1970, το αυξημένο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει τις ηλεκτρικές εταιρίες να απαιτούν από τους κατασκευαστές μετασχηματιστών να παράγουν περισσότερο αποδοτικούς μετασχηματιστές, αν και μερικές μικρές ηλεκτρικές εταιρίες καθώς και βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες μετασχηματιστών συνεχίζουν να χρησιμοποιούν φθηνότερους μη αποδοτικούς μετασχηματιστές.

Οι σημερινοί μετασχηματιστές είναι περισσότερο αποδοτικοί παρά ποτέ. Νέες τεχνικές κατασκευής και νέοι τύποι μαγνητικών υλικών έχουν οδηγήσει στην κατασκευή οικονομικών και ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών [3, 4, 5].

Το άρθρο είναι οργανωμένο ως εξής: η απόδοση των μετασχηματιστών αναλύεται στο δεύτερο τμήμα. Στο τρίτο τμήμα υπολογίζεται το κόστος των απωλειών και στο τέταρτο τμήμα περιγράφονται οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος του μετασχηματιστή. Στο πέμπτο τμήμα παρουσιάζεται το μοντέλο της οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών και στο έκτο τμήμα το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται για την επιλογή της καλύτερης ανάμεσα σε έξι εναλλακτικές προσφορές μετασχηματιστών συγκεκριμένου τύπου. Τέλος, στο έβδομο τμήμα παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

η :	η απόδοση του Μ/Σ
S :	το φορτίο του Μ/Σ
$\cos \varphi$:	ο συντελεστής ισχύος του Μ/Σ
$losses$:	οι απώλειες του Μ/Σ
NLL :	οι απώλειες κενού φορτίου του Μ/Σ
LL :	οι απώλειες φορτίου του Μ/Σ
S_B :	η ονομαστική ισχύς του Μ/Σ
TOC :	το συνολικό κόστος κτήσης του Μ/Σ

<i>BP</i> :	η τιμή πώλησης του Μ/Σ
<i>A</i> :	ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου του Μ/Σ
<i>B</i> :	ο συντελεστής απωλειών φορτίου του Μ/Σ
<i>SC</i> :	το ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος
<i>EC</i> :	το ετήσιο κόστος της ενέργειας
<i>HPY</i> :	οι ώρες λειτουργίας του Μ/Σ ανά έτος
<i>FCR</i> :	ο συντελεστής του ετήσιου κόστους της επένδυσής του Μ/Σ
<i>RF</i> :	ο συντελεστής ανομοιομορφίας του φορτίου του Μ/Σ
<i>LF</i> :	ο ετήσιος συντελεστής απωλειών του Μ/Σ
<i>PL</i> :	η ετήσια ισοδύναμη ομοιόμορφη αιχμή φορτίου του Μ/Σ
<i>TL_{SPL}</i> :	το φορτίο του Μ/Σ τη στιγμή της αιχμής φορτίου του συστήματος
<i>TL_{TPL}</i> :	η αιχμή φορτίου του Μ/Σ
<i>f</i> :	ο ετήσιος συντελεστής φορτίου
<i>cost_{NLL}</i> :	το κόστος των απωλειών κενού φορτίου
<i>cost_{LL}</i> :	το κόστος των απωλειών φορτίου
<i>LM</i> :	ο πολλαπλασιαστής απωλειών
<i>USPW</i> :	ο συντελεστής παρούσας αξίας

2. ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

2.1. Υπολογισμός απόδοσης μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές διανομής είναι πολύ αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές με βαθμό απόδοσης πάνω από 95%. Η απόδοση ισχύος οποιασδήποτε ηλεκτρικής μηχανής ορίζεται ως ο λόγος της χρήσιμης ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου. Η απόδοση μπορεί να καθορισθεί με ταυτόχρονη μέτρηση των ισχύων εξόδου και εισόδου. Ειδικά για μεγάλες μηχανές μία τέτοια μέτρηση είναι δαπανηρή και δύσκολη. Επιπλέον, όταν η απόδοση είναι υψηλή, μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια, εάν η απόδοση εκφραστεί μέσω των απωλειών. Έτσι, η **απόδοση** των μετασχηματιστών υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta = \frac{S \cos \phi}{S \cos \phi + losses} \quad (2.1)$$

όπου *S* το φορτίο του μετασχηματιστή σε *VA*, *losses* οι απώλειες σε *W* και $\cos \phi$ ο συντελεστής ισχύος. Από την εξίσωση (2.1) προκύπτει ότι η απόδοση του μετασχηματιστή αυξάνεται με μείωση των απωλειών του.

Οι απώλειες του μετασχηματιστή χωρίζονται σε **απώλειες κενού φορτίου** και σε **απώλειες φορτίου**. Οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές, ενώ οι απώλειες φορτίου είναι ανάλογες του φορτίου του μετασχηματιστή. Έτσι, η απόδοση του μετασχηματιστή δίνεται από τη σχέση [6]:

$$\eta = \frac{S \cos \phi}{S \cos \phi + NLL + LL(S / S_B)^2} \quad (2.2)$$

όπου *NLL* οι απώλειες κενού φορτίου, *LL* οι απώλειες φορτίου και *S_B* η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή σε *VA*.

2.2. Μέθοδοι βελτίωσης απόδοσης μετασχηματιστών

Η απόδοση του μετασχηματιστή βελτιώνεται με τη μείωση των απωλειών του [7]. Οι απώλειες του μετασχηματιστή μπορούν να μειωθούν με μεταβολή της σχεδίασης, της κατασκευής, της λειτουργίας και της συντήρησης του μετασχηματιστή καθώς και με εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος βελτίωσης της απόδοσης του μετασχηματιστή είναι μέσω της μεταβολής της σχεδίασής του [8, 9].

2.2.1. Βελτίωση απόδοσης μέσω της σχεδίασης του μετασχηματιστή

Η ιδεατή σχεδίαση μετασχηματιστή στοχεύει να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου [10]. Για τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου συνήθως επιλέγεται η μείωση της μαγνητικής επαγωγής. Όμως, η μείωση της μαγνητικής επαγωγής απαιτεί περισσότερες σπείρες, με συνέπεια να αυξάνονται οι απώλειες φορτίου. Παρόμοια, αν μειωθεί η πυκνότητα του ρεύματος, θα μειωθούν οι απώλειες φορτίου, όμως στην περίπτωση αυτή απαιτείται περισσότερο μαγνητικό υλικό, οπότε αυξάνονται οι απώλειες κενού φορτίου.

Η σχεδίαση μετασχηματιστή με μειωμένες απώλειες είναι ένας συμβιβασμός από τη μια μεριά με την κατανομή των απωλειών στον πυρήνα και στα πηνία, και από την άλλη μεριά με το βάρος, το μέγεθος, τον όγκο, την τάση βραχυκύκλωσης, τη μόνωση και το κόστος του μετασχηματιστή. Οι σύγχρονες τεχνικές σχεδίασης με τη βοήθεια Η/Υ επιτρέπουν πολλές μεταβολές στις μεταβλητές σχεδίασης με αποτέλεσμα την επιλογή της βέλτιστης τεχνικοοικονομικά λύσης. Στον πίνακα 1 φαίνεται πώς η μεταβολή της σχεδίασης του πυρήνα και των τυλιγμάτων μπορεί να μειώσει τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου καθώς επίσης και πώς αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν το κόστος του μετασχηματιστή [2].

2.2.2. Βελτίωση απόδοσης μέσω της κατασκευής του μετασχηματιστή

Οι τεχνικές κατασκευής των μετασχηματιστών μέσω εναλλακτικών μαγνητικών υλικών και διαμορφώσεων του

Πίνακας 1: Εναλλακτικές τεχνικές μείωσης απωλειών.
Table 1: Alternative loss reduction techniques.

	Απώλειες Κενού	Απώλειες Φορτίου	Κόστος
Μείωση απωλειών κενού φορτίου			
A. Χρήση υλικού πυρήνα χαμηλότερων απωλειών	Χαμηλότερες	Αμετάβλητες	Υψηλότερο
B. Μείωση μαγνητικής ροής με			
1. Αύξηση εγκάρσιας διατομής πυρήνα	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Υψηλότερο
2. Μείωση τάσης ανά σπείρα	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Υψηλότερο
Γ. Μείωση του μήκους διαδρομής της ροής με μείωση της εγκάρσιας διατομής του αγωγού	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Χαμηλότερο
Μείωση απωλειών φορτίου			
A. Χρήση αγωγού χαμηλότερων απωλειών	Αμετάβλητες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο
B. Μείωση πυκνότητας ρεύματος με αύξηση εγκάρσιας διατομής αγωγού	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Υψηλότερο
Γ. Μείωση του μήκους διαδρομής του ρεύματος με			
1. Μείωση εγκάρσιας διατομής πυρήνα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο
2. Αύξηση τάσης ανά σπείρα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο

πυρήνα μειώνουν τις απώλειες κενού φορτίου. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, ψυχράς εξέλασης, με προσανατολισμένους κόκκους. Για περαιτέρω μειώσεις των απωλειών κενού φορτίου χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο χαραγμένο με laser, στον οποίο οι κόκκοι είναι προσανατολισμένοι κατά την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Επίσης, η χρήση άμορφου σιδήρου ως υλικού κατασκευής του πυρήνα οδηγεί σε μείωση των απωλειών κενού φορτίου από 75% έως 80% σε σχέση με τον μετασχηματιστή με συμβατικό πυριτιούχο σίδηρο [11]. Ο πυριτιούχος σίδηρος, που είναι χαραγμένος με laser, είναι ακριβότερος από το συμβατικό, ενώ πολύ πιο ακριβός είναι ο άμορφος σίδηρος. Για το λόγο αυτό οι δύο αυτές επιλογές μαγνητικού υλικού ακολουθούνται, όταν δίνεται μεγάλη βαρύτητα στο κόστος των απωλειών.

2.2.3. Βελτίωση απόδοσης μέσω της λειτουργίας του μετασχηματιστή

Η επιλογή της ονομαστικής ικανότητας (μεγέθους) του μετασχηματιστή επηρεάζει την απόδοσή του [12]. Αν επιλεγεί μετασχηματιστής με μεγαλύτερη ονομαστική ικανότητα από την απαιτούμενη, τότε αυξάνονται οι απώλειες κενού φορτίου, ενώ, αν επιλεγεί μετασχηματιστής μικρότερου μεγέθους, τότε αυξάνονται οι απώλειες φορτίου.

Ένας τρόπος μείωσης των απωλειών είναι μέσω της λειτουργίας των μετασχηματιστών με τρόπο, ώστε να υπάρχει ισορροπία στη φόρτισή τους, διότι οι συνολικές απώλειες είναι χαμηλότερες, όταν το φορτίο μοιράζεται στους μετασχηματιστές σύμφωνα με την ονομαστική τους ικανότητα.

2.2.4. Βελτίωση απόδοσης μέσω της συντήρησης του μετασχηματιστή

Η συντήρηση του μετασχηματιστή περιλαμβάνει επιθεώρηση και έλεγχο, ανακαίνιση και απόσυρση. Πολλοί λίγοι

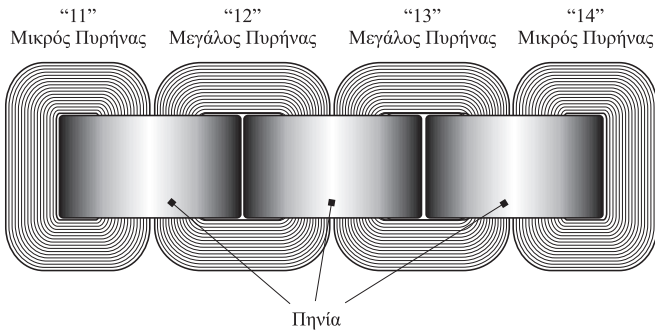
χρήστες συντηρούν τους μετασχηματιστές, προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια. Η συντήρηση συνήθως συνδέεται με την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Αν ένας χρήστης μπορεί με τρόπο οικονομικό να αντικαταστήσει ένα λιγότερο αποδοτικό με έναν περισσότερο αποδοτικό μετασχηματιστή, τότε θα εξοικονομεί ένα σημαντικό ποσό ενέργειας.

2.2.5. Βελτίωση απόδοσης με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης

Τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης έχουν πρόσφατα εφαρμοστεί για τη βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών μέσω της μείωσης των απωλειών κενού φορτίου (οι απώλειες φορτίου παραμένουν αμετάβλητες) [4].

Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των δένδρων απόφασης προσδιορίζονται οι πιο σημαντικές παράμετροι, που επηρεάζουν τις απώλειες κενού φορτίου [13]. Οι παράμετροι αυτές είναι η μαγνητική επαγωγή, οι μέσες ειδικές απώλειες (στα 15000 και στα 17000 Gauss) του μαγνητικού υλικού των τεσσάρων ατομικών πυρήνων, ο λόγος του πραγματικού προς το θεωρητικό συνολικό βάρος των τεσσάρων ατομικών πυρήνων και ο λόγος των πραγματικών προς τις θεωρητικές συνολικές απώλειες κενού φορτίου των τεσσάρων ατομικών πυρήνων. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι γνωστές πριν από την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής των μετασχηματιστών.

Τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζονται για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, χρησιμοποιώντας ως είσοδο τις τιμές των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί από τα δένδρα απόφασης [14]. Η πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου με χρήση των νευρωνικών δικτύων είναι πολύ ακριβής (μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα 1.6%) και εφαρμόζεται με επιτυχία στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών τύπου τυλιχτού πυρήνα [15].



Σχήμα 1: Ενεργό μέρος Μ/Σ τύπου τυλιχτού πυρήνα.
Figure 1: Active part of wound core type transformer.

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής τύπου τυλιχτού πυρήνα αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς ατομικούς πυρήνες (σχήμα 1). Όταν πρόκειται να κατασκευαστεί μία παρτίδα, έστω 50, μετασχηματιστών (ίδια μελέτη και ίδιος τύπος μετασχηματιστή), τότε πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα της ομαδοποίησης των πυρήνων, δηλαδή να συνδυαστούν οι 200 ατομικοί πυρήνες με τον καλύτερο δυνατό τρόπο έτσι, ώστε να προκύψουν 50 Μ/Σ με τις χαμηλότερες δυνατές απώλειες. Ένας προσεγγιστικός τρόπος, που χρησιμοποιείται παραδοσιακά για την επίλυση του προβλήματος ομαδοποίησης, είναι να συνδυαστούν ατομικοί πυρήνες με μεγαλύτερες και μικρότερες απώλειες έτσι, ώστε να προκύψουν μετασχηματιστές με μέσες απώλειες.

Οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης δίνουν μία πολύ καλύτερη λύση στο πρόβλημα της ομαδοποίησης των ατομικών πυρήνων. Πιο συγκεκριμένα, τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου κάθε ενός από τους εναλλακτικούς τρόπους συνδυασμού των ατομικών πυρήνων. Επειδή ο αριθμός των συνδυασμών αυτών είναι αρκετά μεγάλος για έναν τυπικό αριθμό (π.χ. 200) πυρήνων, χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι έτσι, ώστε να υπολογιστεί μέσα σε μερικές ανακυκλώσεις η βέλτιστη διάταξη των ατομικών πυρήνων. Η μέθοδος αυτή έχει οδηγήσει στη μείωση των απωλειών κενού φορτίου που φτάνει ή και, ορισμένες φορές, ξεπερνά το 3%, για μία τυπική παρτίδα 50 μετασχηματιστών [5].

3. ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Οι ηλεκτρικές εταιρίες προμηθεύονται μετασχηματιστές με βάση το κριτήριο του **συνολικού κόστους κτήσης**, το οποίο δίνεται από τη σχέση [16, 17]:

$$TOC = BP + A * NLL + B * LL \quad (3.1)$$

όπου BP (\$) είναι η τιμή πώλησης, A (\$/W) είναι ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου ή η αξία των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή και B (\$/W) είναι ο συντελεστής απωλειών φορτίου. Ο προσδιορισμός των συντελεστών A και B περιλαμβάνει πολλούς οικο-

νομικούς και τεχνικούς παράγοντες, όπως π.χ. επιτόκιο, κόστος ενέργειας, κόστος παραγωγικής ικανότητας, ρυθμός ανάπτυξης της αιχμής του φορτίου, αποδοτική φόρτιση κ.τ.λ. Ανάμεσα σε εναλλακτικές προσφορές, πιο συμφέρουσα είναι η προμήθεια των μετασχηματιστών με το μικρότερο συνολικό κόστος κτήσης.

Στα επόμενα θα περιγραφεί ο τρόπος υπολογισμού των συντελεστών A και B από τις ηλεκτρικές εταιρίες καθώς και από τους βιομηχανικούς και εμπορικούς χρήστες μετασχηματιστών.

3.1. Συντελεστής A

Ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου, ή συντελεστής A , παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Η τιμή του προσδιορίζεται από την παραγωγική ικανότητα και την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή των απωλειών κενού φορτίου των μετασχηματιστών. Η δυσκολία υπολογισμού του συντελεστή A οφείλεται στο γεγονός ότι δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί μία ενιαία τιμή για τα 30 χρόνια ζωής του μετασχηματιστή. Οι ηλεκτρικές εταιρίες προσπαθούν να υπολογίσουν την τιμή του συντελεστή A προβλέποντας τη μελλοντική μεταβολή του κόστους παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τιμή του συντελεστή A υπολογίζεται από τη σχέση [17]:

$$A = \frac{SC + EC * HPY}{FCR * 1.000} \quad (3.2)$$

όπου SC (\$/kW-yr) είναι το ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος, EC (\$/kWh) είναι το ετήσιο κόστος της ενέργειας, HPY (h/yr) είναι οι ώρες λειτουργίας του μετασχηματιστή ανά έτος και FCR είναι ο συντελεστής του ετήσιου κόστους της επένδυσης του μετασχηματιστή.

Το **κόστος της παραγωγικής ικανότητας** του συστήματος (SC) αντιπροσωπεύει το ετήσιο κόστος της επιπρόσθετης παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, το οποίο είναι αναγκαίο για την παροχή 1 kW αιχμής φορτίου στο μετασχηματιστή διανομής. Ο συντελεστής αυτός περιλαμβάνει το κόστος των μονάδων βάσης καθώς και των εφεδρικών μονάδων παραγωγής.

Το **ετήσιο κόστος της ενέργειας** (EC) περιλαμβάνει κάθε κόστος που είναι ανάλογο με την ενέργεια εξόδου των γεννητριών των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι περιλαμβάνει το κόστος προμήθειας του καυσίμου, το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης του καυσίμου, το κόστος μετατροπής του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια καθώς και το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του σταθμού παραγωγής.

Ο συντελεστής του ετήσιου **κόστους της επένδυσης** του μετασχηματιστή (FCR) περιλαμβάνει το κόστος του κεφα-

Πίνακας 2: Οικονομική αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδιασμών (A = \$4/W, B = \$1/W).
Table 2: Economic evaluation of alternative designs (A = \$4/W, B = \$1/W).

Τιμές μετασχηματιστή	Σχεδίαση 1	Σχεδίαση 2	Σχεδίαση 3	Σχεδίαση 4
Απώλειες κενού φορτίου (W)	100	80	50	120
Απώλειες φορτίου (W)	220	280	290	310
Αρχικό κόστος	\$490	\$475	\$580	\$350
Κόστος απωλειών κενού φορτίου	\$400	\$320	\$200	\$480
Κόστος απωλειών φορτίου	\$220	\$280	\$290	\$310
Συνολικό κόστος κτήσης	\$1.110	\$1.075	\$1.070	\$1.140
Ταξινόμηση	3	2	1	4

Πίνακας 3: Οικονομική αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδιασμών (A = \$2,5/W, B = \$0,75/W).
Table 3: Economic evaluation of alternative designs (A = \$2,5/W, B = \$0,75/W).

Τιμές μετασχηματιστή	Σχεδίαση 1	Σχεδίαση 2	Σχεδίαση 3	Σχεδίαση 4
Απώλειες κενού φορτίου (W)	100	80	50	120
Απώλειες φορτίου (W)	220	280	290	310
Αρχικό κόστος	\$490	\$475	\$580	\$350
Κόστος απωλειών κενού φορτίου	\$250	\$200	\$125	\$300
Κόστος απωλειών φορτίου	\$165	\$210	\$218	\$233
Συνολικό κόστος κτήσης	\$905	\$885	\$923	\$883
Ταξινόμηση	3	2	4	1

λαίου, την απόσβεση της επένδυσης, την ασφάλεια και τους φόρους.

3.2 Συντελεστής B

Ο συντελεστής απωλειών φορτίου, ή συντελεστής B, υπολογίζεται από τη σχέση [17]:

$$B = \frac{(SC * RF + EC * LF * HPY) * PL^2}{FCR * 1.000} \quad (3.3)$$

όπου RF είναι ο συντελεστής ευθύνης (μέτρο της ανομοιομορφίας του φορτίου του μετασχηματιστή), LF είναι ο ετήσιος συντελεστής απωλειών και PL είναι η ετήσια ισοδύναμη ομοιόμορφη αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή.

Ο **συντελεστής ευθύνης (RF)** μειώνει την απαιτούμενη παραγωγική ικανότητα του συστήματος για τις απώλειες φορτίου, επειδή οι μέγιστες απώλειες του μετασχηματιστή δεν λαμβάνουν απαραίτητα χώρα τη στιγμή της αιχμής φορτίου. Ο συντελεστής ευθύνης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$RF = \sqrt{\frac{TL_{SPL}}{TL_{TPL}}} \quad (3.4)$$

όπου TL_{SPL} είναι το φορτίο του μετασχηματιστή τη στιγμή της αιχμής φορτίου του συστήματος και TL_{TPL} είναι η αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή.

Ο ετήσιος **συντελεστής απωλειών (LF)** χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ετήσιων απωλειών των μετασχηματιστών διανομής. Ο συντελεστής απωλειών συνήθως προκύπτει από την ακόλουθη προσεγγιστική σχέση [2]:

$$LF = 0,15 * I_f + 0,85 * (I_f)^2 \quad (3.5)$$

όπου I_f είναι ο ετήσιος **συντελεστής φορτίου**, ο οποίος είναι ίσος με το λόγο της ενέργειας που καταναλώνεται λόγω της φόρτισης των μετασχηματιστών προς την ενέργεια που θα καταναλωνόταν, αν οι μετασχηματιστές ήταν συνεχώς φορτισμένοι με το μέγιστο φορτίο.

Η ετήσια **ισοδύναμη ομοιόμορφη αιχμή φορτίου** του μετασχηματιστή (PL) είναι η ανηγμένη αιχμή φορτίου που τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής (α) θεωρώντας μία αρχική αιχμή φορτίου για τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του, (β) εκτιμώντας τον ετήσιο ρυθμό αύξησης της αιχμής του φορτίου και (γ) ορίζοντας μία μέγιστη επιτρεπόμενη αιχμή φορτίου, πέρα από την οποία ο μετασχηματιστής πρέπει να αντικατασταθεί [17].

3.3. Βιομηχανικοί χρήστες

Οι περισσότεροι βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες δεν αξιολογούν τις απώλειες των μετασχηματιστών. Ο λόγος είναι ότι προμηθεύονται μετασχηματιστές σε μικρές ποσότητες και επιπλέον δεν αγοράζουν τους Μ/Σ απευθείας από τους κατασκευαστές αλλά μέσω αντιπροσώπων τους.

Οι βιομηχανικοί χρήστες μπορούν, αντί να μελετούν διεξοδικά όλες τις παραμέτρους κόστους των απωλειών των μετασχηματιστών (όπως κάνουν οι ηλεκτρικές εταιρίες), να χρησιμοποιούν μία περισσότερο απλή αλλά αποδοτική προσέγγιση. Μπορούν να εφαρμόζουν τις ίδιες σχέσεις για τον υπολογισμό των συντελεστών A και B, χρησιμοποιώντας τη

Πίνακας 4: Προσφορές μετασχηματιστών.

Table 4: Transformer offers.

Προμηθευτής	Τιμή πώλησης (\$)	Απώλειες κενού (W)	Απώλειες φορτίου (W)
Κατασκευαστής 1	390	95	413
Κατασκευαστής 2	375	115	390
Κατασκευαστής 3	407	99	385
Κατασκευαστής 4	420	104	365
Κατασκευαστής 5	388	107	410
Κατασκευαστής 6	412	90	430

Πίνακας 5: Δεδομένα φόρτισης μετασχηματιστών.

Table 5: Transformer loading data..

Παράμετρος φόρτισης	Τιμή
Ωρες ετήσιας λειτουργίας (h)	8.760
Συντελεστής φορτίου (%)	40
Διάρκεια ζωής μετασχηματιστή (years)	30
Ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της αιχμής φορτίου του μετασχηματιστή (%)	2
Αρχική αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή (% της ονομαστικής ικανότητάς του)	92
Αιχμή φορτίου για αντικατάσταση του μετασχηματιστή (% της ονομαστικής ικανότητάς του)	140
Χρόνια που απαιτούνται για την αντικατάσταση του μετασχηματιστή (years)	22
Ισοδύναμη ομοιόμορφη αιχμή φορτίου (%)	114,23
Συντελεστής απωλειών μετασχηματιστή (%)	19,6
Συντελεστής ευθύνης (%)	90
Πολλαπλασιαστής απωλειών (%)	10

ζήτηση ενέργειας και το ποσό με το οποίο η ηλεκτρική εταιρία τούς χρεώνει την ενέργεια (κόστος παραγωγικής ικανότητας και κόστος ενέργειας). Η δυσκολία της μεθόδου αυτής έγκειται στην πρόβλεψη της τιμής με την οποία η ηλεκτρική εταιρία θα τους χρεώνει την ενέργεια στο μέλλον.

4. ΚΟΣΤΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Ο αγοραστής δίνει στον κατασκευαστή του μετασχηματιστή τις τιμές των συντελεστών A και B της σχέσης (3.1) του συνολικού κόστους κτήσης. Ο κατασκευαστής συνυπολογίζει τις τιμές των συντελεστών A και B με τα διάφορα κόστη του μετασχηματιστή (υλικά, εργατικά, γενικά βιομηχανικά έξοδα), προκειμένου να υπολογίσει τη βέλτιστη τεχνικοοικονομικά σχεδίαση. Έτσι, οι τιμές των συντελεστών A και B γίνονται μέρος της προδιαγραφής του μετασχηματιστή. Η προδιαγραφή επίσης, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει τη δυνατότητα υπερφόρτισης, την ικανότητα μόνωσης, την αντοχή στο βραχυκύκλωμα, τη συνδεσμολογία, τις συνθήκες λειτουργίας κ.ο.κ.

Οι πίνακες 2 και 3 δείχνουν πώς οι τιμές των συντελεστών A και B επηρεάζουν το κόστος του μετασχηματιστή. Η σχεδίαση 3, η οποία έχει το μεγαλύτερο αρχικό κόστος, είναι η πιο συμφέρουσα (μικρότερο κόστος κτήσης), όταν οι τιμές

των συντελεστών απωλειών είναι $A = \$4/W$, $B = \$1/W$, ενώ η σχεδίαση 4 (η οποία έχει το μικρότερο αρχικό κόστος) είναι η πιο συμφέρουσα, όταν οι τιμές των συντελεστών απωλειών πέσουν σε $A = \$2,5/W$, $B = \$0,75/W$.

5. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Η κατανόηση των οικονομικών παραμέτρων του μετασχηματιστή είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση του κόστους του μετασχηματιστή ως προς την απόδοσή του. Όπως σε κάθε οικονομική ανάλυση, έτσι και για το μετασχηματιστή πρέπει να αξιολογηθεί το χρηματικό κόστος σε όλη τη διάρκεια ζωής του. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι για την αξιολόγηση των μετασχηματιστών [18]: (α) το ισοδύναμο κόστος επένδυσης, (β) το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος και (γ) η μέθοδος της παρούσας αξίας.

Η μέθοδος του **ισοδύναμου κόστους επένδυσης** είναι η πλέον δημοφιλής μέθοδος οικονομικής ανάλυσης. Η μέθοδος αυτή παίρνει τη σχέση του συνολικού κόστους κτήσης και προσθέτει τους διάφορους παράγοντες χωρίς επιπρόσθετες τροποποιήσεις:

$$TOC_1 = BP + cost_NLL + cost_LL \quad (5.1)$$

Πίνακας 6: Αποτελέσματα αξιολόγησης με βάση το συνολικό κόστος κτήσης.
Table 6: Evaluation results based on the total owning cost.

Προμηθευτής	BP (\$)	NLL (W)	LL (W)	cost_NLL (\$)	cost_LL (\$)	TOC ₁ (\$)
Κατασκευαστής 3	407	99	385	233	403	1.042
Κατασκευαστής 1	390	95	413	223	432	1.045
Κατασκευαστής 4	420	104	365	244	382	1.046
Κατασκευαστής 2	375	115	390	270	408	1.053
Κατασκευαστής 5	388	107	410	252	429	1.068
Κατασκευαστής 6	412	90	430	212	450	1.073

Πίνακας 7: Αξιολόγηση προσφοράς ενός μετασχηματιστή διανομής.
Table 7: Evaluation of the offer of one transformer.

Προμηθευτής	Απόδοση σε φορτίο 50%	Συνολικό κόστος		Απώλειες		Κόστος	Εξοικονόμηση
		κτίσης	Τιμή	Διαφορά τιμής	ισχύος (W)	ενέργειας (kWh/yr)	ενέργειας (\$/yr)
Κατασκευαστής 5	99,44%	\$1.068	\$388	\$0	173	1.512	\$45
Κατασκευαστής 3	99,48%	\$1.042	\$407	\$19	161	1.407	\$3,16
Κατασκευαστής 1	99,47%	\$1.045	\$390	\$2	161	1.411	\$3,04
Κατασκευαστής 4	99,48%	\$1.046	\$420	\$32	162	1.423	\$2,69
Κατασκευαστής 2	99,44%	\$1.053	\$375	-\$13	177	1.554	-\$1,26
Κατασκευαστής 6	99,48%	\$1.073	\$412	\$24	159	1.391	\$3,64

Προμηθευτής	Απλή εξόφληση (Years)	Κόστος εξοικονομούμενης		Συνολική εξοικονομούμενη		Αποφυγή εκπομπής	Αποφυγή εκπομπής	Αποφυγή εκπομπής
		ενέργειας (\$/kWh)		ενέργεια (MWh)		SO ₂ (lb)	CO ₂ (lb)	NO _x (lb)
Κατασκευαστής 5								
Κατασκευαστής 3	6,0	\$0,0176		3,2		40	4.730	17
Κατασκευαστής 1	0,7	\$0,0019		3,0		39	4.541	17
Κατασκευαστής 4	11,9	\$0,0349		2,7		34	4.021	15
Κατασκευαστής 2	10,3	\$0,0301		-1,3		-16	-1.892	-7
Κατασκευαστής 6	6,6	\$0,0193		3,6		46	5.440	20

όπου $cost_NLL$ και $cost_LL$ είναι το κόστος των απωλειών κενού φορτίου και το κόστος των απωλειών φορτίου, αντίστοιχα, τα οποία υπολογίζονται ως εξής:

$$cost_NLL = A * (1 + LM) * NLL \quad (5.2)$$

$$cost_LL = B * (1 + LM) * LL \quad (5.3)$$

όπου LM είναι ο πολλαπλασιαστής απωλειών, ο οποίος εκφράζει την επίδραση των απωλειών μεταφοράς και διανομής στον εξοπλισμό της παραγωγής.

Η μέθοδος του **ισοκατανεμημένου ετήσιου κόστους** μοιράζει κάθε παράγοντα κόστους της σχέσης του συνολικού κόστους κτήσης σε ετήσια κόστη εξίσου κατανεμημένα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή:

$$TOC_2 = FCR * (BP + cost_NLL + cost_LL) \quad (5.4)$$

Δηλαδή η μόνη διαφορά από τη μέθοδο του ισοδύναμου κόστους επένδυσης είναι η ύπαρξη του συντελεστή του ετήσιου κόστους επένδυσης του μετασχηματιστή (FCR).

Η μέθοδος της **παρούσας αξίας** μοιράζει κάθε παράγοντα κόστους της σχέσης του συνολικού κόστους κτήσης σε ετήσια κόστη εξίσου καταναμεμένα και επιπλέον μετατρέπει αυτά τα κόστη σε παρούσα αξία:

$$TOC_3 = USPW * FCR * (BP + cost_NLL + cost_LL) \quad (5.5)$$

Δηλαδή η μόνη διαφορά από τη μέθοδο του ισοκατανεμημένου ετήσιου κόστους είναι η ύπαρξη του συντελεστή παρούσας αξίας, $USPW$, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$USPW = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (5.6)$$

όπου i το επιτόκιο και n η διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Στην “απελευθερωμένη αγορά” το κόστος ενέργειας θα εξαρτάται από την ώρα της ημέρας περισσότερο από ό,τι συμβαίνει σήμερα. Έτσι, το αποτέλεσμα της αξιολόγησης των απωλειών ενέργειας θα εξαρτάται πάρα πολύ από την καμπύλη φόρτισης. Η τιμή της αιχμής ίσως είναι 3-4 φορές μεγαλύτερη από την τιμή βάσης. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που η “Διανομή” (Προμηθευτής Ηλεκτρικής Ενέργειας) αξιολογεί M/Σ και αγοράζει ενέργεια από τον ΔΕΣΜΗΕ (Διαχειριστή Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) στην οριακή τιμή του συστήματος, θα πρέπει να είναι προσεκτική σε αυτό το σημείο.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Έστω ότι μία ηλεκτρική εταιρία θέλει να προμηθευτεί 500 μονοφασικούς μετασχηματιστές λαδιού 75 kVA. Στην ηλεκτρική εταιρία έχουν υποβληθεί, από 6 διαφορετικούς κατασκευαστές, οι προσφορές του πίνακα 4.

Οι συντελεστές εκπομπής ρύπων της ηλεκτρικής εταιρίας είναι 1,5 lb/kWh CO₂, 5,8 gr/kWh SO₂ και 2,5 gr/kWh NO_x [19].

Η διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών είναι 30 χρόνια, το επιτόκιο λαμβάνεται 9% και ο συντελεστής ετήσιου κόστους επένδυσης είναι 17%. Το κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος είναι \$99,8/kW-yr και το κόστος της ενέργειας είναι \$0,0301/kWh. Τα δεδομένα φόρτισης των μετασχηματιστών φαίνονται στον πίνακα 5.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου της ηλεκτρικής εταιρίας είναι:

$$A = \frac{SC + EC * HPY}{FCR * 1.000} = \frac{\$99,8 + \$0,0301 * 8.760}{0,17 * 1.000} = \$2,14/W \quad (6.1)$$

και ο συντελεστής απωλειών φορτίου είναι:

$$B = \frac{(SC * RF + EC * LF * HPY) * PL^2}{FCR * 1.000} = \frac{(\$99,8 * 0,9 + \$0,0301 * 0,196 * 8.760) * 1,1424}{0,17 * 1.000} = \$0,95/W \quad (6.2)$$

Στον πίνακα 6 φαίνονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης με βάση το συνολικό κόστος κτήσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του ισοδύναμου κόστους επένδυσης. Στον πίνακα αυτό οι προσφορές είναι ταξινομημένες από το χαμηλότερο προς το υψηλότερο συνολικό κόστος επένδυσης. Διαπιστώνεται ότι πλέον συμφέρουσα είναι η προσφορά του κατασκευαστή 3.

Το επόμενο βήμα είναι να διεξαχθεί μία συγκριτική ανάλυση ανάμεσα στις εναλλακτικές προσφορές μετασχηματιστών. Για να γίνει κάτι τέτοιο, απαιτείται η επιλογή ενός βασικού κατασκευαστή, με τον οποίο θα συγκριθούν οι υπόλοιποι κατασκευαστές. Έστω ότι επιλέγεται ο κατασκευαστής 5 ως βασικός. Στον πίνακα 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης προσφοράς για ένα μετασχηματιστή.

Η απόδοση σε φορτίο 50% για τον κατασκευαστή 3 υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{S \cos \phi}{S \cos \phi + NLL + LL(S/S_B)^2} = \frac{37.500 * 1,0}{37.500 * 1,0 + 99 + 385 * (37.500 / 75.000)^2} = 0,9948 \quad (6.3)$$

Οι απώλειες ισχύος (W) ενός μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3 υπολογίζονται ως εξής:

$$Wattage_losses = NLL + (I_f)^2 * LL = 99 + 0,4^2 * 385 = 160,6 W \quad (6.4)$$

Οι ετήσιες απώλειες ενέργειας (kWh/yr) του ενός μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3 είναι:

$$Energy_losses = (Wattage_losses / 1.000) * HPY = (160,6 / 1.000) kW * 8.760 \frac{h}{yr} = 1.407 \frac{kWh}{yr} \quad (6.5)$$

Το ετήσιο κόστος των απωλειών ενέργειας (\$/yr) ενός μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3 υπολογίζεται ως εξής:

$$Energy_cost = Energy_losses * EC = 1.407 \frac{kWh}{yr} * \frac{\$0,0301}{kWh} = \frac{\$42}{yr} \quad (6.6)$$

Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας (\$/yr), που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση του επιλεγμένου μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 5, αντί του μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 3, υπολογίζεται ως εξής:

$$Energy_savings = (Energy_losses_5 - Energy_losses_3) * EC = (1.512 - 1.407) * 0,0301 = \frac{\$3,1605}{yr} \quad (6.7)$$

όπου $Energy_losses_5$ είναι οι απώλειες ενέργειας του βασικού μετασχηματιστή.

Η απλή εξόφληση της επένδυσης ($years$), που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση του επιλεγμένου μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 5, αντί του μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 3, υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} Simple_payback &= \frac{Price_difference}{Energy_savings} = \\ &= \frac{(\$407 - \$388)}{\$3,1605} = 6\ years \end{aligned} \quad (6.8)$$

Το κόστος της εξοικονομούμενης ενέργειας ($\$/kWh$) από τη χρησιμοποίηση, για όλη τη διάρκεια ζωής του, του επιλεγμένου μετασχηματιστή του κατασκευαστή 5, σε σχέση με το μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3, υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} Cost_of_energy_saved &= \\ &= \frac{(Price_3 - Price_5)}{(Energy_losses_5 - Energy_losses_3)} * \frac{i}{1 - (1-i)^n} = \\ &= \frac{(407 - 388)}{(1.512 - 1.407)} * \frac{0,09}{1 - (1 - 0,09)^{30}} = \frac{\$0,0176}{kWh} \end{aligned} \quad (6.9)$$

όπου $Price_3$ είναι η τιμή του μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3.

Το συνολικό κόστος της εξοικονομούμενης ενέργειας (MWh) για όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση του επιλεγμένου μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 5, αντί του μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 3, υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} Total_energy_savings &= \\ &= (Energy_losses_5 - Energy_losses_3) * n / 1.000 = \\ &= (1.512 - 1.407) * 30 / 1.000 = 3,15\ MWh \end{aligned} \quad (6.10)$$

Η αποφυγή εκπομπών SO_2 (lb), που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση του επιλεγμένου μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 5, αντί του μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 3, υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} SO2_avoided &= \\ &= (Energy_losses_5 - Energy_losses_3) * n * SO2_factor = \\ &= (1.512 - 1.407) \frac{kWh}{yr} * 30yr * \frac{5,8gr}{kWh} * \frac{1lb}{453,6gr} = 40,277\ lb \end{aligned} \quad (6.11)$$

όπου $SO2_factor$ ο συντελεστής εκπομπών SO_2 . Αντίστοιχα υπολογίζεται η αποφυγή εκπομπών CO_2 και NO_x .

Συγκρίνοντας τα κόστη και τα πλεονεκτήματα του μετασχηματιστή του κατασκευαστή 3 ως προς το βασικό μετασχηματιστή από τον κατασκευαστή 5 διαπιστώνεται ότι, παρ' όλο που κοστίζει \$19 περισσότερο ανά μετασχηματιστή (\$9.500 για τους 500 μετασχηματιστές), ο μετασχηματιστής του κατασκευαστή 3 οδηγεί σε \$3,16 ετήσια εξοικονόμηση

ενέργειας (\$1.581 ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας για τους 500 μετασχηματιστές) και οδηγεί σε απλή εξόφληση της επένδυσης εντός έξι ετών. Αν και οι 500 μετασχηματιστές του κατασκευαστή 3 κοστίζουν \$9.500 περισσότερο, στη διάρκεια των 30 ετών ζωής τους, οι μετασχηματιστές θα οδηγήσουν σε εξοικονόμηση \$47.430 (\$1.581 ετησίως για 30 χρόνια).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται μία μέθοδος επιλογής των πλέον οικονομικών και ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών. Η επιλογή βασίζεται στο συνολικό κόστος κτήσης, το οποίο συνυπολογίζει το κόστος των απωλειών με την τιμή πώλησης των μετασχηματιστών. Η μέθοδος αυτή, εκτός από τις ηλεκτρικές εταιρίες, μπορεί να εφαρμοστεί και από τους βιομηχανικούς χρήστες μετασχηματιστών. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος υπολογισμού όλων των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο συνολικό κόστος κτήσης. Για την πληρέστερη τεκμηρίωση του μοντέλου οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου αυτής στην επιλογή της καλύτερης ανάμεσα σε έξι εναλλακτικές προσφορές μετασχηματιστών συγκεκριμένου τύπου. Μέσα από αυτή την παρουσίαση φαίνονται επίσης η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση των εκπομπών SO_2 , CO_2 και NO_x που επιτυγχάνεται από τη χρήση του επιλεγμένου μετασχηματιστή σε σχέση με τους υπόλοιπους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Β. Παπαδιάς και Γ. Κονταξής, **Ηλεκτρική Οικονομία**, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1996.
2. Barry W. Kennedy, **Energy Efficient Transformers**, McGraw-Hill, New York, 1998.
3. Greg. Paula, "New insulation improves transformer performance", **Electric World**, vol. 203, no 14, 1989, pp. 45-46.
4. P.S. Georgilakis, N.D. Hatzigiorgiou and D.G. Paparigas, "AI Helps Reduce Transformer Iron Losses", **IEEE Computer Applications in Power**, vol. 12, no 4, October 1999, pp. 41-46.
5. Π. Σ. Γεωργιάκης, **Συμβολή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στη μείωση των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών διανομής**, διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.
6. Π. Ντοκόπουλος, **Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης**, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1992.
7. S. Austen Stigant and A.C. Franklin, **The J&P Transformer Book**, 10th edition, Newnes-Butterworths, Boston, 1973.
8. B. W. McConnell, "Increasing Distribution Transformer Efficiency: Potential for Energy Savings", **IEEE Power Engineering Review**, vol. 18, no 7, July 1998, pp. 8-10.
9. Wayne Beaty, "Transformer designs cut costs and improve operations", **Electric Light and Power**, vol. 72, no 5, 1994, pp. 24-27.
10. A. Dymkov, **Transformer Design**, English translation from the Russian by A. Gavrilovets, Mir Publishers, Moscow, 1975.
11. C. Pruess, "Low Core Loss Transformers for Industrial Energy Savings", **IEEE Power Engineering Review**, vol. 18, no 7, July 1998, pp. 12-14.

12. Α. Κάρτας και Δ. Τσανάκας, “Εξέταση της Δυνατότητας Υπερφόρτισης Μετασχηματιστών Λαδιού”, **Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ**, τόμ. 17, τεύχ. 1-2, 1997, σελ. 69-80.
13. N. D. Hatzigargyriou, P. S. Georgilakis, D. S. Spiliopoulos and J. A. Bakopoulos, “Quality Improvement of Individual Cores of Distribution Transformers Using Decision Trees”, **Int. Journal of Engineering Intelligent Systems**, vol. 6, no 3, September 1998, pp. 141-146.
14. P. S. Georgilakis, N. D. Hatzigargyriou, N. D. Doulamis, A. D. Doulamis and S. D. Kollias, “Prediction of Iron Losses of Wound Core Distribution Transformers based on Artificial Neural Networks”, **Neurocomputing**, vol. 23, no 1-3, December 1998, pp. 15-29.
15. P.S. Georgilakis, N.D. Hatzigargyriou, D.G. Paparigas, J.A. Bakopoulos and S.S. Elefsiniotis, “Automatic Learning Techniques for on-line Control and Optimization of Transformer Core Manufacturing Process”, **Proceedings of the 1999 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS '99)**, Phoenix, Arizona, October 1999, vol. 1, pp. 311-322.
16. ANSI/IEEE Standard C57.120, **Loss Evaluation Guide for Power Transformers**, Piscataway, N.J., 1991.
17. A. M. Bozarth, D. A. Duckett and W. J. Ros, **Guide for Evaluation of Distribution Transformers**, Schenectady, N.Y.:GE, 1994.
18. Department of Energy, **Financial Statistics of Major Investor-Owned Electric Utilities**, DOE/EIA-0437 (91), Washington, D.C.:DOE, 1993.
19. Environmental Protection Agency, **A Manual for Use with the Distribution Transformer Cost Evaluation Model (DTCEM)**, EPA 430-R-96-020, Washington, D.C.:EPA, April 1997.

Π. Γεωργιάκης,

Δρ ηλεκτρολόγος μηχανικός, Σενεντέρ Ελεκτρικ Α.Ε., Εργοστάσιο ΕΛΒΗΜ, 550 χλμ. Ε.Ο. Αθηνών-Λαμίας, 320 11 Οινόφυτα Βοιωτίας.

Ν. Χατζηαργυρίου,

Καθηγητής Ε.Μ.Π., Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., 157 80 Αθήνα.

Extended summary

Economic Evaluation of Distribution Transformers

P. GEORGILAKIS
Dr Electrical Engineer

N. HATZIARGYRIOU
Professor N.T.U.A.

Abstract

In this paper a distribution transformer economic evaluation model is presented. The purpose of this paper is to analytically present the required steps for the selection of the most cost-effective and energy-efficient transformers. Following the economic evaluation model, the transformer users have a tool in order to simultaneously evaluate the cost of losses and the transformer purchasing cost. This paper provides the transformer users with the knowledge and methods for evaluating the alternative transformer offers and for meeting their need to save money and energy.

1. INTRODUCTION

Electric utilities improve the efficiency of their transmission and distribution systems by reducing losses [1], as do industrial and commercial users of electricity. They reduce transmission and distribution losses by using the following seven basic methods [2]: (1) substitute larger conductors for those currently in use, (2) increase the system voltage, (3) improve system power factor by adding shunt capacitors, (4) add lines or feeders, (5) add or balance phases, (6) use energy-efficient transformers, and (7) reconfigure the electrical system.

While some of these modifications can be done more easily than others, the use of energy efficient transformers is always easily accomplished. It does not take a great deal of technical expertise to correctly use high-efficiency transformers. All the user needs to know is how to choose the most cost-effective energy-efficient transformer.

Since the 1970s, the increased cost of electrical energy has resulted in utilities requiring transformer manufacturers to build more efficient transformers, although some small utilities, as well as commercial and industrial users of transformers, continue to use inexpensive but inefficient transformers.

Today's transformers are more efficient than ever. New manufacturing techniques and new magnetic materials have resulted in the construction of cost-effective energy-efficient transformers [3,4,5].

The paper is organized as follows: transformer efficiency is presented in section 2. The value of losses is calculated in section 3 and the parameters that affect the transformer cost

are presented in section 4. The transformer cost evaluation model is presented in section 5 and the application of this model to the selection of the best transformer offer among six alternatives is presented in section 6. Finally, the conclusions are presented in section 7.

2. TRANSFORMER EFFICIENCY

Distribution transformers are very efficient devices with an efficiency greater than 95%. Transformer efficiency is defined by equation (2.2) as a function of no-load losses, load losses, power factor, transformer load and nameplate rating [6].

Transformer efficiency is improved by reducing the losses in the transformer [7]. The losses in the transformer can be reduced by changing the design, manufacture, operation, and maintenance of the transformer and by applying artificial intelligence techniques during transformer manufacturing [8-15]. Table 1 illustrates how changing core and conductor design can reduce no-load and load losses and improve transformer efficiency [2].

3. VALUE OF LOSSES

The total owning cost (equation (3.1)) provides the transformer purchaser with a means to compare various transformer designs [16, 17]. The transformer that meets the transformer purchaser's technical specification with the lowest total owning cost becomes the most cost-effective transformer. The total owning cost of the transformer is calculated by summing up the initial purchasing price of the transformer and the equivalent present value of transformer losses using the A and B factors. The A factor is the capitalized cost per rated watt of no-load losses and the B factor is the capitalized cost per rated watt of load losses.

The A factor is calculated according to equation (3.2) using the annual cost of system capacity, the energy cost, the hours of transformer operation per year, and the fixed charge on capital per year (annual owning cost of an investment as a percentage of the investment).

The B factor is calculated according to equation (3.3) using the peak loss responsibility factor (measure of the diversity of the load on the transformer), the annual loss factor, the uniform equivalent annual peak load, the annual cost of system capacity, the energy cost, the hours of transformer operation per year, and the fixed charge on capital per year.

Most commercial and industrial users of transformers do not evaluate losses because they purchase transformers on a small scale and they do not develop their transformer expertise. Rather than going through the extensive research and analysis that a utility does in developing its transformer cost of losses, commercial and industrial transformer purchasers can use the same formulas for the cost of no-load and load losses but using the demand and energy rate the utility charges them for the capacity cost and energy cost.

4. TRANSFORMER COST

The transformer purchaser provides the values of the A and B factors in the total owning cost formula to the transformer manufacturer. The transformer manufacturer integrates the values of the A and B factors into other costs of the transformer design. The costs of the A and B factors become part of the design specification. This includes the specified transformer overload capacity, transformer impedance, specified phasing, in-service conditions, voltage regulation, and the basic impulse level. Tables 2 and 3 illustrate how the value of the A and B factors affect the cost of the transformer.

5. TRANSFORMER ECONOMICS

An understanding of transformer economics is necessary to weigh the transformer cost against the benefits of transformer efficiency. As with all economic analyses, the time value of money over the life cycle of the alternatives needs to be evaluated. Efficiency improvement and loss savings occur over time and must somehow be compared with the initial cost of purchasing and installing the transformer.

There are basically three standard methods for evaluating alternative transformer choices [18]: (1) the equivalent investment cost, (2) the levelized annual cost, and (3) the present-worth method. Each one of these methods must be applied to the total owning cost formula in such a way that the various parts of the formula are compared on an equitable basis. Equations (5.1), (5.4) and (5.5) show how the total owning cost formula is affected when using each one of the above mentioned methods.

P. Georgilakis,

Dr electrical engineer, Schneider Electric S.A., ELVIM Plant, 55th km Athens-Lamia National Road, 320 11 Inofyta Viotias.

N. Hatziaargyriou,

Professor N.T.U.A., Electric Energy Division, Department of Electrical and Computer Engineering, N.T.U.A., 157 80 Athens.

6. APPLICATION OF TRANSFORMER COST EVALUATION MODEL

Let us consider that a utility is looking to purchase 500 single phase oil-immersed transformers rated at 75 kVA. Let us also assume that the utility has received the 6 transformer offers of Table 4. The utility's emission factors are 1,5 *lb/kWh* CO₂, 5,8 *gr/kWh* SO₂ and 2,5 *gr/kWh* NO_x [19].

The transformer life is 30 years, the interest rate is 9%, and the fixed charge rate is 17%. The cost of system capacity is \$99,8/*kW-yr* and the energy cost is \$0,0301/*kWh*. The transformer load characteristics are illustrated in table 5.

Table 6 presents the evaluation results based on the total owning cost formula. It can be concluded from table 6 that the best offer is the one of Manufacturer 3 (lowest total owning cost).

Table 7 presents the evaluation results for one transformer. More specifically, table 7 analyzes the energy costs, benefits, and emissions avoided in relation with the selected "base case" transformer from Manufacturer 5.

If the costs and benefits of transformers of Manufacturer 3 (lowest total owning cost) are compared with the base case (Manufacturer 5), it can be concluded that despite costing \$19 more per transformer (\$9.500 more for 500 transformers), the transformer of Manufacturer 3 will save \$3,16/year in energy (\$1.581/year for 500 transformers) and will result in a 6,0 year payback period. Though the transformers from Manufacturer 3 will cost \$9.500 more in initial capital costs, over the 30 year transformer lifetime, the transformers will save \$47.300 (\$1.517/year times 30 years) when compared to the transformers from Manufacturer 5.

7. CONCLUSIONS

In this paper, a method for the selection of the most cost-effective and energy-efficient transformers is presented. The selection is based on the total owning cost, which takes into account the cost of losses and the transformer price. Apart from the electric utilities, this method can also be used by the industrial and commercial transformer purchasers. In this paper, all the parameters involved in the total owning cost formula are analytically calculated. In order that above calculations be as clear as possible, an arithmetic example is used. From that example, the selection of the most cost-effective transformer among six alternative offers is presented together with the energy savings and the reduction of emissions that are coming from the specific selection.