



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

---

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ  
ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ



ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΑΡΑΙΣΑΣ ΠΕΤΡΟΣ  
ΦΟΙΤΗΤΗΣ : ΠΟΥΛΙΟΥΠΟΛΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ Α.Μ. 69

ΑΘΗΝΑ  
ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2018



Copyright © Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή της για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ευχαριστώ την οικογένεια μου και όλους εκείνους που ήταν δίπλα μου σε όλη αυτή τη προσπάθεια παρέχοντας απεριόριστη κατανόηση και ψυχολογική υποστήριξη.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	σελ 5-6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	σελ 8
EXECUTIVE SUMMARY .....	σελ 9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	σελ 10-11
1.ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥΣ .....	σελ 12-47
1.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΚΑΙ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ.....	σελ 12-13
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	σελ 14-17
1.3 ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΕΝΟΠΤΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΜΕΡΕΣ ΜΑΣ .....	σελ 17-20
1.4 ΒΑΣΙΚΑ ΓΝΩΡΙΣΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	σελ 20-21
1.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ .....	σελ 21-22
1.6 ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ .....	σελ 22-23
1.7 ΕΙΔΙΚΟΤΕΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	σελ 24-26
1.8 ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΕΦΑΡΜΟΣΤΟΥΝ ΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΝΑ ΠΡΟΚΥΨΟΥΝ ΣΧΕΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ .....	σελ 26-47
1.8.1 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΑΥΤΟΤΕΛΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	σελ 27-31
1.8.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ DC/AC ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ ΣΕ ΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟ.....	σελ 31-38
1.8.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟ.....	σελ 38-43
1.8.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΟΥ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΠΡΟΚΥΨΕΙ ΛΟΓΩ ΜΗ ΣΩΣΤΗΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΤΑΣΗΣ .....	σελ 43-44
1.8.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ- HYSTERESIS CURRENT CONTROL.....	σελ 44-47
2. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	σελ 47-63
2.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ .....	σελ 47-52
2.1.1 ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ (ΤΙΜΕΣ Α ΚΑΙ Β).....	σελ 49-52
2.2 Η ΕΝΝΟΙΑ ΚΑΙ ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΚΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	σελ 53-56
2.2.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΛΟΓΩ ΦΟΡΤΩΣΗΣ .....	σελ 53-54
2.2.2 ΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	σελ 54-55

2.2.3 ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	σελ 55
2.2.4 ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΑΡΜΟΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΙΣΟΡΡΟΠΙΩΝ .....	σελ 55-56
2.3 ΤΡΟΠΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	σελ 56-63
2.3.1 ΑΠΩΛΕΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ .....	σελ 56-57
2.3.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΦΟΡΤΙΟ .....	σελ 58
2.3.3 ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ .....	σελ 58-60
2.3.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ .....	σελ 60-63
ΕΠΙΛΟΓΟΣ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	σελ 64-65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	σελ 66-67

## **Περίληψη**

Σκοπός της παρούσης πτυχιακής εργασίας, αναφέρεται σχετικά η συλλογή, αξιολόγηση και συζήτηση στοιχείων που οριοθετούνται στο πλαίσιο της ανάλυσης βιβλιογραφικών δεδομένων για την ανάλυση των μετασχηματιστών ισχύος και υπολογισμό απωλειών κενού φορτίου.

Ως εκ τούτου, και προκειμένου η εν λόγω εργασία να θεωρείται ορθή και αποτελεσματική ως προς τα στοιχεία που εξετάζει, διαχωρίζεται σχετικά σε δύο (2) κεφάλαια, με πρώτο εκείνο των Στοιχείων Μετασχηματιστών Ισχύος Ηλεκτρικής Ενέργειας και Τρόπος Λειτουργίας τους και στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται και αναλύονται οι Μετασχηματιστές Ισχύος και ο Υπολογισμός Απωλειών Κενού Φορτίου.

## **Executive Summary**

The aim of this dissertation is the collection, evaluation and discussion of data delineated in the analysis of bibliographic data for the analysis of power transformers and calculation of empty load losses.

Therefore, and in order for this work to be considered correct and effective as regards the elements under consideration, it is divided into two (2) chapters, the first of which is the Power Transformers Elements and their Mode of Operation, and in the second chapter is mentioned Power Transformers and Load Absorption Calculation are analyzed



## Εισαγωγή

Αναφερόμενος κανείς στην επεξήγηση της έννοιας και εφαρμογής των μετατροπένων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και μετατροπένων ισχύος, θα πρέπει αρχικά να γνωρίζει πως τα ηλεκτρονικά ισχύος θεωρούνται μια σημαντική επιστημονική περιοχή η οποία παρουσιάζει έως τις μέρες μας μια ραγδαία εξέλιξη καθώς και πληθώρα σημαντικών εφαρμογών, όπου το πεδίο των οποίων διευρύνεται διαρκώς με θεαματικά αποτελέσματα για το χώρο της τεχνολογίας και της διαχείρισης ενέργειας (Akçay, Ece, 2003).

Πολλοί είναι οι ειδικοί δε, οι οποίοι εκτιμούν ότι στο μέλλον θα υπάρξει μια μεγάλη ανάγκη σε μηχανικούς και τεχνικούς, οι οποίοι θα πρέπει να είναι γνώστες των ηλεκτρονικών ισχύος και των τρόπων που εκείνα λειτουργούν.

Αυτό βέβαια συνεπάγεται πως θα πρέπει να καταβληθεί μια ιδιαίτερη προσπάθεια αλλά και φροντίδα με σκοπό την σωστή διάδοση του συγκεκριμένου γνωστικού αντικείμενου από τους ειδικούς προς εκείνους που επιθυμούν να ασχοληθούν με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν πολλά συγγράμματα και βιβλία που ασχολούνται με το συγκεκριμένο θέμα και θεωρούνται στις μέρες μας από τα καλύτερα διδακτικά συγγράμματα ηλεκτρονικών ισχύος (Reece, 2000).

Αυτό βέβαια που πρέπει να διακρίνει τα βιβλία αυτά είναι αντίστοιχα η καινοτομία που εισάγουν στην παρουσίαση της ύλης του με σκοπό να κάνουν κατανοητή τη λειτουργία μετατροπών ισχύος και να προϊδεάσουν τους αναγνώστες και εκείνους που επιθυμούν να ασχοληθούν με το αντικείμενο. Προκειμένου όμως κανείς διαβάζοντας αυτά τα συγγράμματα, να μπορεί να κατανοήσει τις διάφορες τοπολογίες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ισχύος, αυτές θα πρέπει να παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας ιδανικούς διακόπτες.

Με αυτόν τον τρόπο η κατανόηση των βασικών αρχών των ηλεκτρονικών ισχύος θα μπορεί να γίνει απλούστερη. Με άλλα λόγια, η παρουσίαση των βασικών αρχών είναι δυνατόν ν' απαλλάσσεται από τη σύγχυση, που προκαλεί η ταυτόχρονη παρουσίασή τους με τις ιδιότητες και τη λειτουργία των ημιαγωγικών διακοπών ισχύος, οι οποίοι, ως σημειωθεί,

αλλάζουν συνεχώς και με γρήγορους ρυθμούς, λόγω των προόδων της τεχνολογίας των ημιαγωγών (Μανιάς, 1988).

Είναι σημαντικό λοιπόν να σημειωθεί πως τα ηλεκτρονικά ισχύος θεωρούνται μια εξίσου ιδιαίτερη κατηγορία ηλεκτρονικών διατάξεων και οι οποίες χρησιμοποιούνται αντίστοιχα στην επεξεργασία, τον έλεγχο αλλά και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας στις μέρες μας. Μια σχετική *διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος* αναφέρεται συχνά και ως *μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας*. Η ανάγκη αυτή βέβαια και με σκοπό την επεξεργασία της ηλεκτρικής ενέργειας, προκύπτει αντίστοιχα από το γεγονός ότι η ηλεκτρική ισχύς παρέχεται με ορισμένα σταθερά χαρακτηριστικά.

Ως εκ τούτου θα πρέπει να σημειωθεί πως τις περισσότερες φορές, η διαθέσιμη πηγή ισχύος το οποίο αναφέρεται ως ένα δίκτυο ισχύος, είναι μια αντίστοιχη τριφασική πηγή σταθερής τάσης και συχνότητας ταυτόχρονα. Όταν βέβαια οι απαιτήσεις του φορτίου δεν θεωρούνται συμβατές με τα χαρακτηριστικά ενός διαθέσιμου δικτύου, τότε είναι αναγκαία η χρήση ενός μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας, γνωστός ως Μ.Η.Ε. (Akçay, Ece, 2003).

Σύμφωνα δε με τον μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας, η διάταξη ισχύος είναι ικανή να μορφοποιεί κατάλληλα τις παραμέτρους εξόδου όπως την τάση, ένταση και συχνότητα και με το τρόπο αυτό να «ικανοποιούν» τις απαιτήσεις του φορτίου. Βέβαια, από τη συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε εναλλασσόμενη μορφή, ένα μεγάλο ποσοστό της τάξης από 30% ως 40% και το οποίο αυξάνεται συνεχώς, υφίσταται κάποιου είδους μετατροπή αναλόγως των περιπτώσεων.

Ωστόσο σημαντικό στοιχείο ανάλυσης στα παραπάνω, κρίνεται και η λειτουργία των μετασχηματιστών ισχύος σε συνδυασμό με τον υπολογισμό απωλειών κενών φορτίων και ουσιαστικά οι λόγοι για τους οποίους αναφέρονται τα παραπάνω και ποια οι εν λόγω αιτίες που τις προκαλούν αλλά και τις στοιχειοθετούν αντίστοιχα και όπως αναλύονται στα ακόλουθα κεφάλαια που παρατίθενται στην εν λόγω μελέτη.

# **1. Κεφάλαιο Πρώτο – Στοιχεία Μετασχηματιστών Ισχύος Ηλεκτρικής Ενέργειας και Τρόπος Λειτουργίας τους**

## **1.1 Η Έννοια και τα Χαρακτηριστικά των Μετατροπών Ισχύος**

Αναφερόμενος κανείς στην επεξήγηση της έννοιας και εφαρμογής των μετατροπών ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και ηλεκτρονικών ισχύος, θα πρέπει αρχικά να γνωρίζει πως τα ηλεκτρονικά ισχύος θεωρούνται μια σημαντική επιστημονική περιοχή η οποία παρουσιάζει έως τις μέρες μας μια ραγδαία εξέλιξη καθώς και πληθώρα σημαντικών εφαρμογών, όπου το πεδίο των οποίων διευρύνεται διαρκώς με θεαματικά αποτελέσματα για το χώρο της τεχνολογίας και της διαχείρισης ενέργειας (Akçay, Ece, 2003).

Πολλοί είναι οι ειδικοί δε, οι οποίοι εκτιμούν ότι στο μέλλον θα υπάρξει μια μεγάλη ανάγκη σε μηχανικούς και τεχνικούς, οι οποίοι θα πρέπει να είναι γνώστες των ηλεκτρονικών ισχύος και των τρόπων που εκείνα λειτουργούν (Reece, 2000).

Αυτό βέβαια συνεπάγεται πως θα πρέπει να καταβληθεί μια ιδιαίτερη προσπάθεια αλλά και φροντίδα με σκοπό την σωστή διάδοση του συγκεκριμένου γνωστικού αντικείμενου από τους ειδικούς προς εκείνους που επιθυμούν να ασχοληθούν με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν πολλά συγγράμματα και βιβλία που ασχολούνται με το συγκεκριμένο θέμα και θεωρούνται στις μέρες μας από τα καλύτερα διδακτικά συγγράμματα ηλεκτρονικών ισχύος (Μανιάς, 1988).

Αυτό βέβαια που πρέπει να διακρίνει τα βιβλία αυτά είναι αντίστοιχα η καινοτομία που εισάγουν στην παρουσίαση της ύλης του με σκοπό να κάνουν κατανοητή τη λειτουργία μετατροπών ισχύος και να προϊδεάσουν τους αναγνώστες και εκείνους που επιθυμούν να ασχοληθούν με το αντικείμενο.

Προκειμένου όμως κανείς διαβάζοντας αυτά τα συγγράμματα, να μπορεί να κατανοήσει τις διάφορες τοπολογίες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ισχύος, αυτές θα πρέπει να παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας ιδανικούς διακόπτες. Με αυτόν τον τρόπο η κατανόηση των βασικών αρχών

των ηλεκτρονικών ισχύος θα μπορεί να γίνει απλούστερη. Με άλλα λόγια, η παρουσίαση των βασικών αρχών είναι δυνατόν ν' απαλλάσσεται από τη σύγχυση, που προκαλεί η ταυτόχρονη παρουσίασή τους με τις ιδιότητες και τη λειτουργία των ημιαγωγικών διακοπών ισχύος, οι οποίοι, ως σημειωθεί, αλλάζουν συνεχώς και με γρήγορους ρυθμούς, λόγω των προόδων της τεχνολογίας των ημιαγωγών (Proussalidis, Hatziargyriou, Kladas, 1999).

Είναι σημαντικό λοιπόν να σημειωθεί πως τα ηλεκτρονικά ισχύος θεωρούνται μια εξίσου ιδιαίτερη κατηγορία ηλεκτρονικών διατάξεων και οι οποίες χρησιμοποιούνται αντίστοιχα στην επεξεργασία, τον έλεγχο αλλά και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας στις μέρες μας.

Μια σχετική *διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος* αναφέρεται συχνά και ως *μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας*. Η ανάγκη αυτή βέβαια και με σκοπό την επεξεργασία της ηλεκτρικής ενέργειας, προκύπτει αντίστοιχα από το γεγονός ότι η ηλεκτρική ισχύς παρέχεται με ορισμένα σταθερά χαρακτηριστικά (Proussalidis, Hatziargyriou, Kladas, 1999).

Ως εκ τούτου θα πρέπει να σημειωθεί πως τις περισσότερες φορές, η διαθέσιμη πηγή ισχύος το οποίο αναφέρεται ως ένα δίκτυο ισχύος, είναι μια αντίστοιχη τριφασική πηγή σταθερής τάσης και συχνότητας ταυτόχρονα. Όταν βέβαια οι απαιτήσεις του φορτίου δεν θεωρούνται συμβατές με τα χαρακτηριστικά ενός διαθέσιμου δικτύου, τότε είναι αναγκαία η χρήση ενός μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας, γνωστός ως M.H.E. (Akçay, Ece, 2003).

Σύμφωνα με τον μετατροπέα ηλεκτρικής ενέργειας, η διάταξη ισχύος είναι ικανή να μορφοποιεί κατάλληλα τις παραμέτρους εξόδου όπως την τάση, ένταση και συχνότητα και με το τρόπο αυτό να «ικανοποιούν» τις απαιτήσεις του φορτίου. Βέβαια, από τη συνολικά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε εναλλασσόμενη μορφή, ένα μεγάλο ποσοστό της τάξης από 30% ως 40% και το οποίο αυξάνεται (Reece, 2000).

## 1.2 Ιστορική Εξέλιξη των Μετατροπέων Ισχύος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Προσπαθώντας κανείς να επιτελέσει μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των μετατροπέων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στην ποιότητα των ηλεκτρονικών ισχύος, θα διακρίνει πως στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκαν αρχικά και συγκεκριμένα πριν από το έτος 1900, οι *ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς* και οι οποίοι ονομάζονται και *στρεφόμενοι μετατροπείς*. Οι αναφερόμενοι στρεφόμενοι μετατροπείς υλοποιούνται επίσης με τη χρήση των κατάλληλων ηλεκτρικών μηχανών και οι οποίες αντίστοιχα λειτουργούν ως γεννήτριες ή κινητήρες (Proussalidis, Hatzargyriou, Kladas, 1999).

Ειδικότερα δε, ο στρεφόμενος μετατροπέας είναι εκείνος ο οποίος εξασφαλίζει τη μετατροπή της λεγόμενης εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή και όπου ο μετατροπέας αποτελείται από μια μηχανή συνεχούς ρεύματος (dc) καθώς και μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος (ac) (Reece, 2000).

Η μηχανή του εναλλασσομένου ρεύματος μπορεί και τροφοδοτείται από το διαθέσιμο ac δίκτυο και λειτουργεί βέβαια ως κινητήρας. Ο κινητήρας μπορεί αντίστοιχα και «εξαναγκάζει» σε περιστροφή μια μηχανή συνεχούς ρεύματος και η οποία λειτουργεί ως γεννήτρια. Ο μετατροπέας βέβαια μπορεί να λειτουργήσει και με αντίστροφο τρόπο, με σκοπό τη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη.

Με το τρόπο, η μηχανή ενός συνεχούς ρεύματος λειτουργεί ως ένας κινητήρας και η μηχανή του εναλλασσομένου ρεύματος ως γεννήτρια. Οι αναφερόμενοι στρεφόμενοι μετατροπείς αν και βέβαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος, παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα όπου τα κυριότερα είναι τα εξής (Μανιάς, 1988):

- Έχουν μεγάλο όγκο και βάρος, επομένως απαιτούν μεγάλο χώρο για την εγκατάστασή τους.
- Προκαλούν θορύβους και ταλαντώσεις στις επιφάνειες στήριξης.
- Απαιτούν, εξαιτίας των κινούμενων μερών τους, συντήρηση.

- Κατά τη μετατροπή της ενέργειας υπάρχουν μεγάλες απώλειες ισχύος, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να είναι μικρός. Ο ολικός βαθμός απόδοσης του στρεφόμενου μετατροπέα προκύπτει από το γινόμενο του βαθμού απόδοσης της κάθε ηλεκτρικής μηχανής.
- Εξαιτίας της αδράνειας των στρεφόμενων μαζών τους, δεν παρουσιάζουν καλή δυναμική συμπεριφορά. Η δυναμική συμπεριφορά αναφέρεται στη διαταραχή της τάσης εξόδου του μετατροπέα, εξαιτίας μιας ισχυρής και απότομης μεταβολής κάποιου παραμέτρου, όπως η τάση εισόδου ή το φορτίο.

Αξίζει να σημειωθεί όμως πως τα μειονεκτήματα των αποκαλούμενων στρεφόμενων μετατροπέων υπερνικήθηκαν αντίστοιχα με την ανάπτυξη των *στατών* μετατροπέων, δηλαδή εκείνων των μετατροπέων χωρίς τα κινούμενα μέρη. Στους στατούς μετατροπείς αντίστοιχα, η επεξεργασία της ηλεκτρικής ενέργειας και των ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί και επιτυγχάνεται με τη χρήση διακοπών.

Ο διακόπτης όμως αυτός που χρησιμοποιήθηκε στους πρώτους στατούς μετατροπείς, ήταν ουσιαστικά ο *διακόπτης υδραργύρου*. Ο συγκεκριμένος διακόπτης υδραργύρου αποτελείται από ένα κατάλληλο δοχείο, γυάλινο ή μεταλλικό, το οποίο περιέχει υγρό υδράργυρο. Ο υδράργυρος θερμαίνεται και παράγει ατμό. Με τη βοήθεια ηλεκτροδίων έναυσης επιτυγχάνεται η ελεγχόμενη ροή του ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων της καθόδου και της ανόδου του διακόπτη (Prousalidis, Hatzargyriou, Kladas, 1999).

Είναι σημαντικό επίσης να σημειωθεί πως οι διακόπτες υδραργύρου μπορούν να ελέγξουν ορισμένα ισχυρά ρεύματα και έως την ποσότητα των 8.000A και για τάσεις έως τα 20.000V. Οι μετατροπείς αυτοί βέβαια με την χρήση των διακοπών υδραργύρου, όπως και οι αντίστοιχοι στρεφόμενοι, παρουσιάζουν μια «κακή» δυναμική συμπεριφορά, μικρή αξιοπιστία αλλά και μικρό σχετικά βαθμό απόδοσης (Akçay, Ece, 2003).

Ο μικρός βαθμός της απόδοσης οφείλεται βέβαια στη μεγάλη πτώση τάσης στα άκρα του συγκεκριμένου διακόπτη, περίπου στα 20V. Θα πρέπει αντίστοιχα να σημειωθεί πως η μεγάλη ανάπτυξη των στατών μετατροπέων ισχύος σημειώθηκε μετά το έτος 1958. Το έτος 1958 κατασκευάστηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες από την *General Electric*, ο *ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου (SCR)*, ο οποίος αναφέρεται καταχρηστικά και ως *thyristor*. Ο *SCR* προκάλεσε στην τεχνική των ηλεκτρονικών ισχύος την επανάσταση που επέφερε το transistor 8 χρόνια νωρίτερα στα ηλεκτρονικά ελέγχου. Έτσι, ο *SCR* κυριάρχησε στους μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας, εκτοπίζοντας τους στρεφόμενους μετατροπείς και τους διακόπτες υδραργύρου (Reece, 2000).

Η πρόοδος ωστόσο η οποία σημειώνεται τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη των νέων ημιαγωγών διακοπών και ηλεκτρονικών ισχύος, έχει οδηγήσει αντίστοιχα σε μια μεγάλη ανάπτυξη στον τομέα των συστημάτων ισχύος, «ανοίγοντας» ουσιαστικά κάποια νέα πεδία εφαρμογών.

Οι νέες αυτές τεχνολογίες κατασκευής των ημιαγωγών διακοπών, μπορούν να προσφέρουν σήμερα κάποια στοιχεία ικανά να χειρισθούν ορισμένες υψηλές τάσεις και ρεύματα σε μεγάλες ταχύτητες και ταυτόχρονα με απλό τρόπο ελέγχου. Οι διακόπτες αυτοί, κυρίως ειδικοί τύποι με transistors, έχουν εκτοπίσει τον *SCR* από τις εφαρμογές χαμηλής και μέσης ισχύος (Proussalidis, Hatziaargyriou, Kladas, 1999).

Εξίσου σημαντικό είναι και το γεγονός πως στην ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρονικής ισχύος έχει συμβάλει με ιδιαίτερο τρόπο και η πρόοδος της μικροηλεκτρονικής επιστήμης, η οποία έχει επιτρέψει την υλοποίηση εξαιρετικά ισχυρών ελεγκτών. Παλαιότερα η σχεδίαση της διάταξης ενός σχετικού ελέγχου, βασίζονταν σε αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Στις μέρες μας όμως μια μεγάλη ποικιλία μικροεπεξεργαστών, ειδικά σχεδιασμένων για εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, είναι διαθέσιμη από διάφορους κατασκευαστές. Με τη χρήση όμως των μικροεπεξεργαστών, η υλοποίηση ενός ελεγκτή μπορεί και απλοποιείται σημαντικά. Παράλληλα όμως θεωρείται δυνατή η όποια εκτέλεση κάποιων πολύπλοκων τεχνικών ελέγχου, με μια παράλληλη αύξηση της αξιοπιστίας αλλά και ελαχιστοποίηση

των διαστάσεων μιας συγκεκριμένης διάταξης. Με το τρόπο αυτό, οι σύγχρονες διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος με τους αποκαλούμενους ημιαγωγούς διακόπτες, μπορούν και προσφέρουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα (Μανιάς, 1988):

- Μικρό όγκο και βάρος
- Μικρές απώλειες, επομένως υψηλό βαθμό απόδοσης
- Υψηλή αξιοπιστία
- Πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά

### 1.3 Είδη Μετατροπών Ισχύος Ηλεκτρικής Ενέργειας που Ενοπίζονται στις Μέρες μας

Οι διάφοροι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας (ισχύος) διακρίνονται αντίστοιχα σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή της ισχύος εισόδου και εξόδου. Αυτές είναι οι ακόλουθες (Akçay, Ece, 2003) :

- Μετατροπείς  $ac-dc$  ή Ανορθωτές (Rectifiers). Ανορθωτές ονομάζονται οι διατάξεις ισχύος, οι οποίες μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Ανάλογα με τη μορφή της εναλλασσόμενης εισόδου οι ανορθωτές διακρίνονται σε *μονοφασικούς* και *πολυφασικούς* (διφασικούς, τριφασικούς, εξαφασικούς). Ακόμη διακρίνονται σε *ελεγχόμενους* και *μη ελεγχόμενους*, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μεταβαλλόμενη ή σταθερή
- Μετατροπείς  $dc-ac$  ή Αντιστροφείς (Inverters). Οι αντιστροφείς μετατρέπουν την ενέργεια συνεχούς μορφής σε εναλλασσόμενη. Η λειτουργία τους είναι δηλαδή αντίθετη από εκείνη των ανορθωτών. Η έξοδος των αντιστροφέων είναι μονοφασική είτε πολυφασική (συνήθως τριφασική). Επίσης, η συχνότητα και το πλάτος της τάσης ή του ρεύματος εξόδου είναι ελεγχόμενα.
- Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος ( $dc-dc$  converters, choppers). Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν τη συνεχή τάση με ορισμένο πλάτος και πολικότητα σε συνεχή τάση με διαφορετικό πλάτος ή/και πολικότητα. Διακρίνονται σε μετατροπείς *υποβιβασμού* (*step-down*) και *ανύψωσης* (*step-up*) της τάσης, ανάλογα με το αν η



τάση εξόδου είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της τάσης εισόδου. Ακόμη, διακρίνονται σε μετατροπείς με *απομόνωση* και *χωρίς απομόνωση* της εξόδου από την είσοδό τους.

- Μετατροπείς εναλλασσομένου ρεύματος ή Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters). Οι κυκλομετατροπείς μετατρέπουν απευθείας, την εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας, σε εναλλασσόμενη τάση με ρυθμιζόμενο πλάτος και συχνότητα. Ο κυκλομετατροπέας ονομάζεται *υποβιβασμού συχνότητας (step-down)* όταν η συχνότητα εξόδου είναι μικρότερη της συχνότητας εισόδου. Διαφορετικά χαρακτηρίζεται ως *ανύψωσης συχνότητας (step-up)*. Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος. Μια ειδική κατηγορία των μετατροπέων εναλλασσομένου ρεύματος είναι οι *ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers)*. Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης παρέχουν στην έξοδό τους μια τάση μεταβαλλόμενου πλάτους, η συχνότητα της οποίας είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα της ac πηγής εισόδου.

Η παραπάνω αναφερόμενη διάκριση των μετατροπέων ηλεκτρονικής ισχύος δεν είναι απόλυτα ακριβής, καθώς προϋποθέτει ότι η ροή της ισχύος είναι μονόδρομη, από την είσοδο προς την έξοδο του μετατροπέα. Στην πραγματικότητα η ροή της ισχύος στους περισσότερους μετατροπείς είναι αμφίδρομη (Proussalidis, Hatziaargyriou, Kladas, 1999).

Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς μπορεί να ρέει και από την έξοδο του μετατροπέα προς την είσοδό του. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης πως ο μετατροπέας αυτός μπορεί και λειτουργεί συμβατικά ως ανορθωτής, δηλαδή είναι ικανός να μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση εισόδου σε μια συνεχή τάση στην έξοδο. Στην περίπτωση όμως αυτή, η ροή της ισχύος θεωρείται θετική, από την είσοδο στην έξοδο του μετατροπέα αντίστοιχα (Reece, 2000).

Ο ίδιος μετατροπέας μπορεί με κατάλληλο έλεγχο των διακοπών του να λειτουργήσει και ως αντιστροφέας, μεταφέροντας αντίστοιχα μια αρνητική ισχύ. Στη περίπτωση αυτή, ο μετατροπέας μπορεί να μεταφέρει ισχύ συνεχούς μορφής από την έξοδό του, στο εναλλασσόμενο δίκτυο.

Η σχετική αμφίδρομη ροή της ισχύος προϋποθέτει ότι ο μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου  $io-uo$  όπου,  $io$  είναι το ρεύμα εξόδου και  $uo$  η τάση εξόδου του μετατροπέα. Σ' ένα μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημορίων η φορά του ρεύματος  $io$  μπορεί να αντιστραφεί, ενώ η πολικότητα της  $uo$  μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος. Ο συμβατικός ανορθωτής με SCR λειτουργεί μόνο στα δύο από τα τέσσερα τεταρτημόρια και ειδικότερα στο πρώτο και το δεύτερο (Silvester, Ferrari, 2005).

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί πως ένας πρακτικός μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί συχνά να περιλαμβάνει περισσότερους από ένα στοιχειώδεις μετατροπείς ηλεκτρονικής ισχύος. Με το τρόπο αυτό, η συνεχής τάση εισόδου των αντιστροφών παρέχεται συνήθως από ένα ανορθωτή, καθώς το διαθέσιμο δίκτυο ισχύος είναι εναλλασσόμενο. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται ουσιαστικά η αποσύζευξη των δύο μετατροπέων.

Η αποσύζευξη εξασφαλίζει ότι η λειτουργία του κάθε μετατροπέα δεν επηρεάζει τους υπόλοιπους. Η αποσύζευξη επιτυγχάνεται αντίστοιχα με την προσθήκη μεταξύ των μετατροπέων στοιχείων που αποθηκεύουν ενέργεια, δηλαδή πυκνωτών ή πηνίων. Οι μετατροπείς ισχύος διακρίνονται ακόμη σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο μετάβασης των διακοπτικών στοιχείων τους (Silvester, Ferrari, 2005):

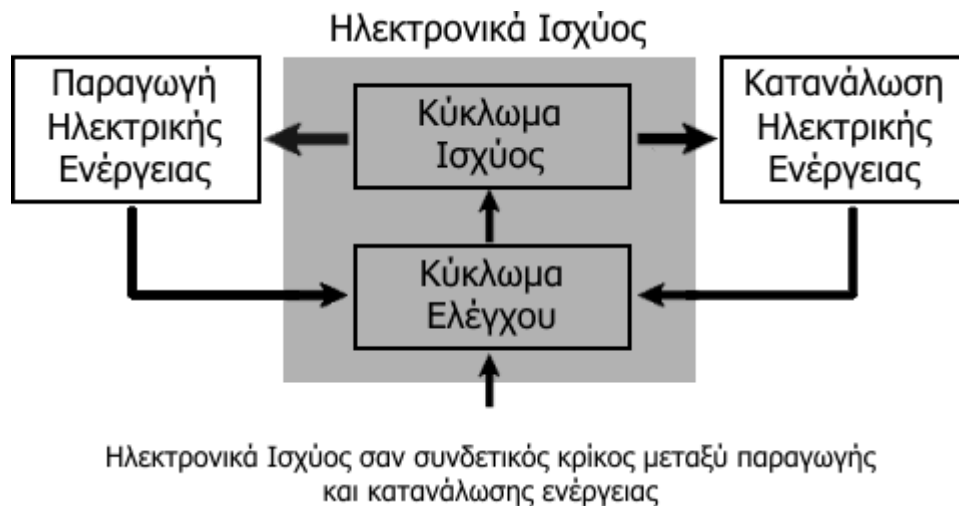
- Μετατροπείς με φυσική μετάβαση (natural, line, load commutated ή phase controlled converters). Οι διακόπτες των μετατροπέων με φυσική μετάβαση ανοίγουν ή και κλείνουν με τη βοήθεια της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου (εισόδου), ή των συνθηκών που επιβάλλει το φορτίο. Οι μετατροπείς με φυσική μετάβαση έχουν περιορισμένες δυνατότητες και χρήσεις. Η εξέλιξή τους έχει σημειωθεί άλλωστε πριν από αρκετές δεκαετίες, με την κατασκευή του SCR. Η τάση εξόδου των μετατροπέων με φυσική μετάβαση αποτελείται από τμήματα της τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ισχυρές αρμονικές συνιστώσες στην είσοδο και την έξοδο του μετατροπέα. Έτσι, ένας αντιστροφέας τάσης δεν μπορεί να ανήκει στην κατηγορία

των μετατροπέων με φυσική μετάβαση. Αντίθετα, οι τυπικοί ανορθωτές με διόδους ή SCR και οι κυκλομετατροπείς υποβιβασμού της συχνότητας, είναι μετατροπείς με φυσική μετάβαση.

- Μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση (*force commutated* ή *switch-mode converters*). Η κατάσταση των διακοπών στους μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση ορίζεται αποκλειστικά από τη μονάδα ελέγχου της διάταξης ισχύος. Οι διακόπτες των μετατροπέων αυτών λειτουργούν συνήθως σε υψηλές συχνότητες και έτσι μπορούν να θεωρηθούν ως διακοπτικοί ενισχυτές ισχύος με υψηλό κέρδος (*switching-mode power amplifiers*).
- Μετατροπείς συντονισμού (*resonant converters*). Η έναυση και η σβέση των διακοπών στους μετατροπείς συντονισμού επιτελείται όταν η τάση στα άκρα τους, ή/και το ρεύμα που τους διαρρέει, είναι μηδέν. Επειδή οι περισσότερες τοπολογίες των μετατροπέων αυτών απαιτούν κάποιο κύκλωμα συντονισμού LC, επικράτησε να ονομάζονται μετατροπείς συντονισμού. Τα πλεονεκτήματα των μετατροπέων συντονισμού έναντι των δύο προηγούμενων τύπων είναι ότι περιορίζονται δραστικά οι μεταβατικές απώλειες ισχύος στους διακόπτες και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

#### **1.4 Βασικά Γνωρίσματα Μετατροπέων Ηλεκτρονικής Ισχύος**

Το βασικό γνώρισμα των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η μετατροπή και ο έλεγχος ηλεκτρικής ενέργειας, όπου για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κυκλώματα με ηλεκτρονικά στοιχεία. Τα ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν συνδετικό κρίκο μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της κατανάλωσης. Τα ηλεκτρονικά ισχύος χωρίζονται στο κύκλωμα ισχύος και στο κύκλωμα ελέγχου (Reece, 2000).



*Εικόνα Νο.1 – Ηλεκτρονικά Ισχύος ως Συνδεδετικός Κρίκος Μεταξύ Παραγωγής και Κατανάλωσης Ενέργειας*

## 1.5 Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος

Το κύριο στοιχείο του κυκλώματος ισχύος είναι το thyristor το οποίο λειτουργεί σαν διακόπτης. Αλλά βασικά στοιχεία είναι οι δίοδοι ισχύος, τα triac, τα transistor ισχύος, τα transistor IGBT καθώς δε και τα transistor επίδρασης πεδίου μονωμένης πύλης που είναι γνωστά σαν MOSFET. Το κύκλωμα ελέγχου διαθέτει ηλεκτρονικά στοιχεία χαμηλής ισχύος, τα οποία μπορούν να συνθέτουν κυκλώματα: αναλογικά, ψηφιακά, μικροεπεξεργαστές, μικροϋπολογιστές ή ακόμη ολόκληρες εγκαταστάσεις υπολογιστών εάν πρόκειται για μεγάλα και λειτουργικά πολύπλοκα συστήματα ισχύος (Μανιάς, 1988).

Στόχος του κυκλώματος ώστε να επιτυγχάνεται η ιδανικότερη δυνατή προσαρμογή της ηλεκτρικής ενέργειας στις απαιτήσεις της κατανάλωσης. Για τον σκοπό αυτό είναι δυνατόν να συλλέγονται πληροφορίες από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την κατανάλωση και από μια τρίτη πηγή η οποία καθορίζει τα πλαίσια λειτουργίας του συστήματος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος βρίσκουν σήμερα τεράστια εφαρμογή στην βιομηχανία. Για να καταλάβουμε καλύτερα την αξία τους, αρκεί να αναφέρουμε ότι βιομηχανικοί τομείς που χρησιμοποιούν ηλεκτροκινητήριες μηχανές, των οποίων ροπή και στροφές πρέπει να ελέγχονται, δεν μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς τα ηλεκτρονικά ισχύος (Akçay, Ece, 2003).

Τέτοιες περιπτώσεις έχουμε π.χ. στην χημική βιομηχανία, στην κλωστοϋφαντουργία και στην βιομηχανία τσιμέντου. Άλλες εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος έχουμε στους ηλεκτρικούς σιδηρόδρομους και πάσης φύσεως ηλεκτροκίνητα οχήματα. Σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία και ανεμογεννήτριες, στα δίκτυα παροχής ρεύματος των αεροπλάνων, πλοίων υποβρυχίων, δορυφόρων, στα κέντρα, σε συσκευές οικιακής χρήσης, σε συσκευές με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας και σε πολλές άλλες περιπτώσεις (Proussalidis, Hatziargyriou, Kladas, 1999).

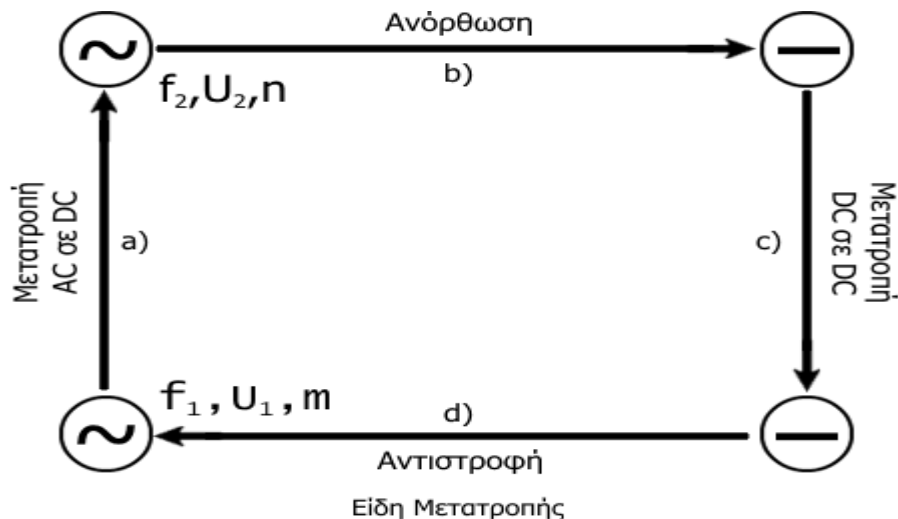
Γενική είναι η διαπίστωση, ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος κατέχουν σήμερα μια θέση στον αυτοματισμό, όπου με την σειρά τους έχουν συμβάλλει και θα συμβάλλουν και στο μέλλον στην ολοένα και περισσότερο ραγδαία εξέλιξη του. Παλαιότερα τα προβλήματα μετατροπής ενέργειας επιλύονταν με μεθόδους που παρουσιάζουν πολλά μειονεκτήματα (μεγάλος όγκος συσκευών, θόρυβος, μικρός βαθμός απόδοσης κ.τ.λ.). Με την εισαγωγή του θυρίστορ πυριτίου (silicon controlled rectifier) το έτος 1958 από την General Electric (USA), ανοίγει ο δρόμος της ραγδαίας εξέλιξης των ηλεκτρονικών ισχύος, τα οποία εκτόπισαν τα στοιχεία με ατμό υδραργύρου και τους περιστρεφόμενους μετατροπείς (Silvester, Ferrari, 2005).

## **1.6 Βασικές Λειτουργίες των Ηλεκτρονικών Ισχύος**

Οι βασικές λειτουργίες των ηλεκτρονικών ισχύος είναι τέσσερις (Reece, 2000):

- η μετατροπή του εναλλασσόμενου σε εναλλασσόμενο
- η μετατροπή του εναλλασσόμενου σε συνεχές
- η μετατροπή του συνεχούς σε συνεχές
- η μετατροπή και του συνεχούς σε εναλλασσόμενο.

Τέλος, καθοριστικός παράγοντας για να διακρίνουμε το είδος της μετατροπής είναι η ροή ενέργειας, η οποία όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ορίζεται από τη φορά του βέλους.



Εικόνα Νο.2 – Ηλεκτρονικά Ισχύος ως Συνδετικός Κρίκος Μεταξύ Παραγωγής και Κατανάλωσης Ενέργειας

Στην πρώτη περίπτωση (a) η ενέργεια ρέει από ένα εναλλασσόμενο σύστημα συχνότητας  $f_1$ , τάσης  $U_1$ , και αριθμού φάσεων  $m$  σε άλλο συχνότητας  $f_2$ , τάση  $U_2$  και αριθμού φάσεων  $n$ . Στην περίπτωση (b) η μετατροπή του εναλλασσόμενου οποιασδήποτε συχνότητας, τάσης και αριθμού φάσεων σε συνεχές, ονομάζεται ανόρθωση. Κατά την περίπτωση μετατροπής συνεχούς σε άλλο συνεχές (c) μετατρέπεται η τιμή μιας συνεχούς τάσης σε άλλη και κατά περίπτωση η πολικότητα. Η δε ενέργεια μεταφέρεται από το ένα συνεχές στο άλλο (Silvester, Ferrari, 2005).

Στην περίπτωση (d) έχουμε ροή ενέργειας από ένα συνεχές σύστημα σε ένα εναλλασσόμενο, δηλαδή αντίθετη λειτουργία από αυτή της ανόρθωσης την οποία ονομάζουμε αντιστροφή. Οι εκάστοτε μετατροπές από ένα σύστημα σε άλλο μπορεί να είναι ελεγχόμενες ή όχι. Ελεγχόμενες εννοούμε αυτές όπου το ποσό της ενέργειας μπορεί να μεταβάλλεται μέσω του μετατροπέα. Στις μη ελεγχόμενες δεν παρέχεται αυτή η δυνατότητα, οπότε η ροή ενέργειας παραμένει σταθερή. Μη ελεγχόμενη ανόρθωση πραγματοποιείται π.χ. με τον απλό μετατροπέα γέφυρας τεσσάρων διόδων επειδή μέσω αυτού είναι αδύνατον να μεταβληθεί η μορφή και η τιμή της τάσης εξόδου.

## 1.7 Ειδικότερες Εφαρμογές των Μετατροπέων Ισχύος στην Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας και γενικότερα της ισχύος, χρησιμοποιούνται στις ακόλουθες ειδικότερες εφαρμογές ως εξής (Μανιάς, 1988):

- *Μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.* Η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται συνήθως με τη μορφή εναλλασσόμενης τάσης πολύ υψηλής τιμής μέσω τριφασικών γραμμών μεταφοράς, έτσι ώστε οι απώλειες ισχύος να είναι μικρές. Η χρήση της εναλλασσόμενης τάσης οφείλεται στην ευκολία με την οποία μετασχηματίζεται. Όμως, σε ορισμένες περιπτώσεις όπως είναι η μεταφορά υψηλής ισχύος σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, η μεταφορά της ενέργειας είναι αποδοτικότερη με τη μορφή *συνεχούς υψηλής τάσης (High Voltage Direct Current, HVDC)*.

Οι απώλειες ισχύος στις γραμμές μεταφοράς είναι μικρότερες στο συνεχές ρεύμα, ενώ βελτιώνεται και η ευστάθεια του συστήματος. Η μέθοδος *HVDC* χρησιμοποιείται συχνότερα στην υποθαλάσσια μεταφορά, όπου για δεδομένη ισχύ το μέγιστο μήκος μεταφοράς είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τη μεταφορά μέσω εναέριων γραμμών. Στη μέθοδο *HVDC* απαιτούνται μετατροπείς της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή και το αντίστροφο, οι οποίες εξαιτίας της εξαιρετικά μεγάλης ισχύος (100δες MW), υλοποιούνται συνήθως με τη χρήση πολλών εκατοντάδων ή και χιλιάδων *SCR* (Silvester, Ferrari, 2005).

- *Ζεύξη ενεργειακών δικτύων διαφορετικής συχνότητας.* Όπως είναι γνωστό τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες λειτουργούν στα 60Hz, αντίθετα με τα Ευρωπαϊκά που εργάζονται στα 50Hz. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο στην Ιαπωνία, το σύστημα ισχύος της οποίας περιλαμβάνει και τις δύο συχνότητες. Η σύζευξη δικτύων διαφορετικής συχνότητας μπορεί να γίνει μόνο με τη χρήση των κατάλληλων μετατροπέων, οι οποίοι μετατρέπουν τις δύο ac τάσεις σε συνεχή τάση (Reece, 2000).

- *Ήπιες μορφές ενέργειας.* Στην παραγωγή της ενέργειας χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια διάφορες διατάξεις, οι οποίες μετατρέπουν την ηλιακή, την αιολική και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε ηλεκτρική. Για τη διασύνδεση των διατάξεων αυτών με το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο είναι απαραίτητη η χρήση των κατάλληλων μετατροπών.

- *Μεταφορές.* Τα ηλεκτρικά τρένα είναι ήδη διαδεδομένα σε πολλές χώρες. Επίσης γίνονται προσπάθειες για αποδοτικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος, για τον έλεγχο της ροπής και της ταχύτητας του ηλεκτρικού κινητήρα του οχήματος.

- *Διακοπτικά τροφοδοτικά συνεχούς ρεύματος και συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (Uninterruptible Power Supplies, U.P.S.).* Τα διακοπτικά τροφοδοτικά έχουν διαδοθεί πολύ τα τελευταία χρόνια και σε κάποιες εφαρμογές, όπως τα τροφοδοτικά των υπολογιστών, έχουν εκτοπίσει πλήρως τις κλασικές γραμμικές διατάξεις. Επίσης, η χρήση των συστημάτων U.P.S. επεκτείνεται συνεχώς. Η λειτουργία των συστημάτων αυτών βασίζεται στους μετατροπείς συνεχούς ρεύματος και τους αντιστροφείς. Η εξέλιξη στην κατασκευή των μετατροπών αυτών είναι ιδιαίτερα έντονη, αναφορικά με το βαθμό απόδοσης την αξιοπιστία και το μέγεθος, καθώς οι απαιτήσεις από τα φορτία αυξάνονται διαρκώς (Akçay, Ece, 2003).

- *Έλεγχος των ηλεκτρικών κινητήρων.* Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτροκινητήρων. Για κάθε τύπο κινητήρα έχουν αναπτυχθεί κατάλληλοι μετατροπείς, μέσω των οποίων ελέγχουμε τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά (ροπή, ταχύτητα περιστροφής, θέση). Τα ρομποτικά συστήματα παίρνουν κίνηση από κατάλληλους κινητήρες, οι οποίοι τροφοδοτούνται από υψηλής ακρίβειας μετατροπείς ισχύος (*servo drives*). Ακόμη, με τον έλεγχο της ταχύτητας των κινητήρων είναι δυνατή η σημαντική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η πλέον χαρακτηριστική εφαρμογή είναι το σύστημα κινητήρα-αντλίας (Silvester, Ferrari, 2005).

Τέλος, στα συμβατικά συστήματα άντλησης ο κινητήρας τροφοδοτείται απευθείας από το δίκτυο και στρέφεται με σταθερή ταχύτητα, ενώ η παροχή της αντλίας ρυθμίζεται με βάνες. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας προκαλεί μεγάλη



σπατάλη ενέργειας, όταν η επιθυμητή παροχή από την αντλία είναι σημαντικά μικρότερη της ονομαστικής.

Ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο την ίδια περίπου ισχύ, όπως και στην περίπτωση της ονομαστικής ροής, η οποία καταναλώνεται στις βάνες. Οι απώλειες ισχύος στις βάνες αποφεύγονται ρυθμίζοντας την ταχύτητα του κινητήρα μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Έτσι, η ρύθμιση της παροχής επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, χωρίς τη χρήση βανών.

### **1.8 Δίκτυα στα Οποία Μπορούν να Εφαρμοστούν οι Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος και να Προκύψουν Σχετικά Προβλήματα στη Ποιότητα του Δικτύου**

Αποτελεί γεγονός πως με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών μονάδων που διαθέτουν μετατροπέα, είναι δυνατή η μετατροπή της εναλλασσόμενης ισχύος συγκεκριμένης συχνότητας σε εναλλασσόμενη ισχύ διαφορετικής συχνότητας. Με τους μετατροπείς είναι πλέον δυνατό να επιλυθεί οποιοδήποτε πρόβλημα ρύθμισης ισχύος. Έτσι, είναι δυνατή η λειτουργία κινητήρων συνεχούς ρεύματος με πηγές εναλλασσόμενης τάσης, αλλά και το αντίθετο, ή κινητήρων τριφασικών με πηγές μονοφασικής τάσης. Το κόστος των ηλεκτρονικών μονάδων σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο έχει μειωθεί σημαντικά, ενώ η αξιοπιστία τους έχει βελτιωθεί (Silvester, Ferrari, 2005).

Οι πολλές δυνατότητές τους στον έλεγχο των επαγωγικών κινητήρων είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών νέων εφαρμογών, όχι μόνο τους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος αλλά και σε οποιοδήποτε πρόβλημα ρύθμισης ή σταθεροποίησης ισχύος. Τέτοιες εφαρμογές συναντώνται σήμερα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από εναλλακτικές πηγές, όπως ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκά.

Η ισχύς που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια είναι μεταβαλλόμενης συχνότητας και οι μετατροπείς συμβάλλουν ως σταθεροποιητές τάσης και συχνότητας στην τροφοδοσία των φορτίων. Ομοίως, οι αντιστροφείς σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις μετατρέπουν την παραγόμενη συνεχή ισχύ σε

εναλλασσόμενη κατάλληλης μορφής για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, μέσω των ηλεκτρονικών διατάξεων, ελέγχεται πάνω από το 60% του συνολικού φορτίου στα περισσότερα συστήματα ισχύος του ανεπτυγμένου κόσμου (Μανιάς, 1988).

Το βασικό πρόβλημα, που σχετίζεται με τα ηλεκτρονικά ισχύος σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο, είναι οι αρμονικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος που επάγονται στα συστήματα από τις διακοπτόμενες ταλαντώσεις στους ηλεκτρονικούς ελεγκτές ισχύος. Οι διάφοροι μετατροπείς διαθέτουν μη γραμμικά ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία, που, λόγω της λειτουργίας τους, παραμορφώνουν στην έξοδό τους την ημιτονοειδή μορφή της τάσης, παράγοντας έτσι αρμονικές συνιστώσες ανώτερης τάξης.

Οι αρμονικές αυτές αυξάνουν τις συνολικές ροές ρεύματος στις γραμμές, ιδιαίτερα στην ουδέτερη συμμετρική κατάσταση ενός τριφασικού συστήματος ισχύος και προκαλούν σημαντικά προβλήματα τόσο στο δίκτυο, όσο και στα φορτία της γραμμής παραγωγής.

Τα επιπλέον ρεύματα προκαλούν αυξημένες απώλειες και θέρμανση στα εξαρτήματα, θορύβους και κραδασμούς στη λειτουργία των κινητήρων και μείωση του συντελεστή ισχύος. Τα προβλήματα αυτά πολλαπλασιάζονται με τη συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση των ηλεκτρονικών διατάξεων στα συστήματα ισχύος. Έτσι, έχουν δημιουργηθεί νέα πρότυπα για τον περιορισμό του πλήθους των αρμονικών, έχουν σχεδιαστεί νέοι ελεγκτές και έχουν προταθεί σύγχρονοι τρόποι αντιμετώπισης και μείωσης των παραγόμενων αρμονικών συνιστωσών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Proussalidis, Hatziaargyriou, Kladas, 1999).

### **1.8.1 Μετατροπέας Αυτοτελούς Συστήματος**

Τα κύρια χαρακτηριστικά μετατροπέα αυτοτελούς συστήματος είναι τα εξής : Η τάση εισόδου, είναι η τάση σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Η ισχύς του που καθορίζεται από το μέγεθος του συστήματος. Η απόδοσή του που κυμαίνεται μεταξύ του 80 και 90%. Η ικανότητα του να μετατρέπει όσο το δυνατό καλύτερα τη συνεχή τάση εισόδου σε εναλλασσόμενη, χωρίς να

εμφανίζονται σήματα παραμόρφωσης και να διατηρεί μια σχετική σταθερότητα στη συχνότητα (Reece, 2000).

Βασικό κριτήριο στην εκλογή κατάλληλου μετατροπέα που θα τοποθετηθεί σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο είναι το είδος της εναλλασσόμενης τάσης που χρειάζεται για να λειτουργήσει ο καταναλωτής. Πολλές συσκευές λειτουργούν και με εναλλασσόμενη τάση διαφορετική της ημιτονοειδούς, υπάρχουν όμως συσκευές, όπως οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, που χρειάζονται τέλεια ημιτονοειδή τάση για να λειτουργήσουν κανονικά. Άλλες συσκευές που έχουν κινητήρα χρειάζονται σταθερότητα στη συχνότητα γι' αυτό και ο μετατροπέας πρέπει να δίνει εναλλασσόμενη τάση σταθερής συχνότητας (Akçay, Ece, 2003).

Η όσο το δυνατό μεγαλύτερη απόδοση αποτελεί βασικό κριτήριο για την εκλογή του μετατροπέα. Αν ένας μετατροπέας έχει 90% απόδοση τότε στην είσοδό του θα χρειαστεί ισχύς 3,3 kW για να δώσει στην έξοδό του ισχύ 3 kW. Συνήθως η απόδοση είναι μικρότερη αν η ισχύς που του δίνεται είναι μικρότερη από τη τιμή για την οποία κατασκευάστηκε. Φυσικά είναι πλεονέκτημα για ένα μετατροπέα να έχει σταθερή απόδοση για μεγάλη περιοχή διαφορετικών τιμών ισχύος. Ένα άλλο πλεονέκτημα που πρέπει να έχει ένας μετατροπέας είναι η αυτόματη διακοπή της λειτουργίας του όταν δεν είναι συνδεδεμένος με καταναλωτή σε λειτουργία. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται ενέργεια γιατί δεν θα υπάρχουν απώλειες στον ίδιο τον μετατροπέα όταν δεν περνά ρεύμα από αυτόν (Silvester, Ferrari, 2005).

Επίσης, σε περίπτωση που ο μετατροπέας χρειαστεί να τροφοδοτήσει μεγάλο κινητήρα σαν αυτόν που βρίσκεται σε ηλεκτρική αντλία νερού ή σε συμπιεστή ψυγείου, πρέπει να είναι σε θέση να δώσει στην αρχή την απαραίτητη ισχύ που χρειάζεται ο κινητήρας για να ξεκινήσει, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Για παράδειγμα ένας κινητήρας ισχύος ενός ίππου (HP), ανάλογα με την απόδοσή του, χρειάζεται 1 μέχρι 1.5 kW για να λειτουργήσει κανονικά. Για να ξεκινήσει όμως είναι δυνατό να χρειασθεί 5 kW ή ακόμη και περισσότερη

ισχύ. Κάθε μετατροπέας έχει ως χαρακτηριστικά τη μέγιστη στιγμιαία ισχύ που μπορεί να δώσει σε ένα κινητήρα για να τον ξεκινήσει και τη συνεχή ισχύ που δίνει στον ίδιο κινητήρα για να λειτουργήσει κανονικά (Μανιάς, 1988).

Άλλο χαρακτηριστικό μετατροπέα αυτοτελούς σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο, είναι η σταθερότητα τάσης που δίνει στον καταναλωτή. Επειδή η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας δεν είναι πάντοτε η ίδια, υπάρχουν αυξομειώσεις στη τάση που δέχεται ο μετατροπέας. Σήμερα έχουν κατασκευασθεί εξαιρετικοί από πλευράς ποιότητας μετατροπείς που έχουν τη δυνατότητα να δίνουν ημιτονοειδή εναλλασσόμενη τάση με (1-2%) αυξομείωση στην τάση εξόδου. Οι περισσότερες οικιακές συσκευές λειτουργούν κανονικά με αυξομειώσεις της τάσης γύρω στο 5-10%.

Αυτές είναι συνήθως μικρότερες των αυξομειώσεων της τάσης που δίνει το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο στο σπίτι. Για προστασία τόσο του ιδίου του μετατροπέα, της μπαταρίας αλλά και του καταναλωτή, ένας καλής ποιότητας μετατροπέας έχει μηχανισμό διακοπής της λειτουργίας του εφόσον η τάση στην είσοδο του έχει αστάθεια. Ο συντελεστής ισχύος είναι ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος που χρησιμοποιεί ο καταναλωτής προς την ισχύ που δίνεται στον καταναλωτή. Η τιμή του συντελεστή ισχύος εξαρτάται από την εκλογή του μετατροπέα και το είδος του καταναλωτή. Ένας καλής ποιότητας μετατροπέας παρουσιάζει συντελεστή ισχύος 0.7 κατά τη σύνδεση του με τους διάφορους καταναλωτές (Silvester, Ferrari, 2005).

Είναι γεγονός όμως ότι πολλοί μετατροπείς παρουσιάζουν προβλήματα στη διατήρηση σταθερότητας μιας αποδεκτής τιμής του συντελεστή ισχύος κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Για παράδειγμα αν στο κύκλωμα του καταναλωτή υπάρχουν φώτα και πλυντήριο, είναι δυνατό να χαμηλώσουν τα φώτα λόγω μικρότερης ισχύος που δέχονται αν λειτουργήσει συγχρόνως και το πλυντήριο.

Πολλοί μετατροπείς, όταν λειτουργούν, προκαλούν ηλεκτρομαγνητική ενόχληση σε ηλεκτρονικές συσκευές. Για να αποφευχθεί το άσχημο αυτό επακόλουθο πρέπει να γίνει καλή εκλογή του μετατροπέα ώστε το βασικό

εσωτερικό κύκλωμα να μην προκαλεί ηλεκτρομαγνητική εκπομπή (Proussalidis, Hatziaargyriou, Kladas, 1999).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει ένας μετατροπέας είναι να μη προκαλεί θόρυβο κατά τη λειτουργία του. Στην περίπτωση που προκαλεί κάποιο μικρό θόρυβο, πρέπει να τοποθετείται μακριά από χώρους στους οποίους ο θόρυβος είναι ενοχλητικός (Akçay, Ece, 2003).

Είναι πολύ σημαντικό επίσης για το μετατροπέα να λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να υποστεί βλάβη αλλά και σε περίπτωση βλάβης ο αντιπρόσωπος να είναι σε θέση να τον επιδιορθώσει. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε πως οι μετατροπείς ισχύος είναι διατάξεις που μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ από μια μορφή σε άλλη χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς διακόπτες που κατασκευάζονται από ημιαγωγούς.

Τέτοιοι μετατροπείς χρησιμοποιούνται πολύ συχνά, σε οικιακές και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Το ευρύ φάσμα εφαρμογών των μετατροπέων, οδήγησε τα τελευταία χρόνια σε έρευνα και ανάπτυξη στην περιοχή των Ηλεκτρονικών Ισχύος, προκειμένου να κατασκευαστούν μετατροπείς με βελτιωμένα χαρακτηριστικά (Μανιάς, 1988).

Σήμερα οι μετατροπείς που κατασκευάζονται έχουν χαμηλότερες απώλειες, καλύτερη ποιότητα ισχύος, παρέχουν αυξημένες δυνατότητες ελέγχου, είναι οικονομικότεροι και διαθέσιμοι για εφαρμογές μεγάλης ισχύος. Στην κατασκευή νέων μετατροπέων και γενικά στην ανάπτυξη του κλάδου των Ηλεκτρονικών Ισχύος βοήθησαν δύο τεχνολογίες, η τεχνολογία των υλικών και η μικροηλεκτρονική.

Με την πρόοδο στην τεχνολογία των υλικών δημιουργήθηκαν νέοι ημιαγωγοί διακόπτες με βελτιωμένες δυνατότητες, ενώ χάρη στη μικροηλεκτρονική υλοποιήθηκαν ελεγκτές, αναλογικοί ή ψηφιακοί, που ελέγχουν αποτελεσματικά τη ροή της ηλεκτρικής ισχύος. Μαζί με την πρόοδο στον κλάδο των Ηλεκτρονικών Ισχύος και άρα τη γενικευμένη χρήση των μετατροπέων ισχύος, δημιουργήθηκαν νέα πρότυπα και νέοι κανονισμοί για

τη λειτουργία των μετατροπέων. Στα πρότυπα αυτά εναρμονίστηκαν οι κατασκευαστές, και έτσι σήμερα μπορούμε να πούμε ότι οι μετατροπείς, εκτός των άλλων πλεονεκτημάτων τους, είναι και συμβατοί με τα πρότυπα και ασφαλείς για το δίκτυο ή τον εξοπλισμό στον οποίο συνδέονται (Proussalidis, Hatzargyriou, Kladas, 1999).

### **1.8.2 Μετατροπείς DC/AC και εφαρμογές τους σε ένα δίκτυο**

Συχνά χρησιμοποιούμενοι μετατροπείς είναι οι DC/AC μετατροπείς, οι οποίοι μεταφέρουν ισχύ από ένα σύστημα συνεχούς τάσης σε ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης, δηλαδή λειτουργούν ως αντιστροφείς ('inverters'). Οι ίδιοι μετατροπείς μπορούν να λειτουργήσουν και με αντίστροφη ροή ισχύος και να μεταφέρουν ισχύ από το σύστημα εναλλασσόμενης τάσης στο σύστημα συνεχούς τάσης (Silvester, Ferrari, 2005).

Σ' αυτή την περίπτωση ονομάζονται ανορθωτές ('rectifiers'). Μπορούμε να συνδέσουμε τις DC πλευρές δύο τέτοιων μετατροπέων και να μεταφέρουμε ισχύ από ένα εναλλασσόμενο σύστημα σε άλλο, διαφορετικής συχνότητας και τάσης, λειτουργώντας τον ένα μετατροπέα ως αντιστροφή και τον άλλο ως ανορθωτή. Έτσι, ο μετατροπέας DC/AC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πλήθος εφαρμογών και να αντικαταστήσει με επιτυχία τη λειτουργία άλλων ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος, όπως του ανορθωτή διόδων ή θυρίστορ και του κυκλομετατροπέα AC/AC.

Σε αρκετές εφαρμογές συναντάμε τον μετατροπέα DC/AC συνδεδεμένο σε δίκτυο. Οι λειτουργίες που μπορεί να κάνει ένας μετατροπέας όταν συνδεθεί στο δίκτυο είναι οι παρακάτω (Μανιάς, 1988):

*Μεταφορά ισχύος προς το δίκτυο:* Η λειτουργία αυτή γίνεται όταν θέλουμε να συνδέσουμε στο δίκτυο μια διάταξη παραγωγής ή κατά την αναγεννητική πέδηση συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης. Η ισχύς που μεταφέρεται στο δίκτυο, μπορεί να προέρχεται απευθείας από μια DC πηγή, από έναν μετατροπέα DC/DC που συνδέεται σε μια DC πηγή ή από έναν μετατροπέα AC/DC και που συνδέεται σε μια AC πηγή (Σχήμα 1). Ο ρόλος του μετατροπέα είναι να μεταφέρει προς το δίκτυο την ισχύ της πηγής και να

παράγει ή να απορροφά από το δίκτυο άεργο ισχύ, δηλαδή να ρυθμίζει το συντελεστή ισχύος στην πλευρά του δικτύου. Σε πολλές περιπτώσεις ο μετατροπέας λειτουργεί και ως ανορθωτής, μεταφέροντας ισχύ από το δίκτυο προς την πηγή (όπως στην περίπτωση των αντιστροφών μπαταριών) (Reece, 2000).

Μιας ιδιαίτερης σημασίας εφαρμογή του αντιστροφέα DC/AC είναι η σύνδεση στο δίκτυο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, δηλαδή παραγωγής που προέρχεται από μονάδες μικρής ισχύος. Ένας τέτοιος μετατροπέας συνδέει στο δίκτυο φωτοβολταϊκά στοιχεία ή fuel cell, δηλαδή μονάδες που έχουν DC τάση εξόδου, αλλά και μονάδες με AC τάση εξόδου οι οποίες δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο δίκτυο γιατί είτε παράγουν τάση μεταβλητής συχνότητας, όπως οι ανεμογεννήτριες, είτε παράγουν τάση υψηλής συχνότητας, όπως οι μικροτουρμπίνες (Silvester, Ferrari, 2005).

Μεταφορά ισχύος από το δίκτυο: Αν στην πλευρά DC του μετατροπέα του δικτύου συνδέεται δεύτερος μετατροπέας DC/AC, η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση κινητήρα εναλλασσομένου ρεύματος (Σχήμα 2). Ο μετατροπέας του δικτύου ονομάζεται 'front-end' και λειτουργεί ως ανορθωτής. Ωστόσο κατά την πέδηση του κινητήρα επανακτάται ενέργεια, οπότε η ροή ισχύος αντιστρέφεται και ο μετατροπέας του δικτύου λειτουργεί ως αντιστροφέας, δίνοντας ισχύ στο δίκτυο. Αν ο μετατροπέας του δικτύου δεν μπορούσε να λειτουργήσει και κατά τις δύο φορές, (π.χ. ένας απλός ανορθωτής διόδων), τότε η ενέργεια που επανακτήθηκε κατά την πέδηση του κινητήρα δε θα μπορούσε να επιστρέψει στο δίκτυο (Prousalidis, Hatziaargyriou, Kladas, 1999).

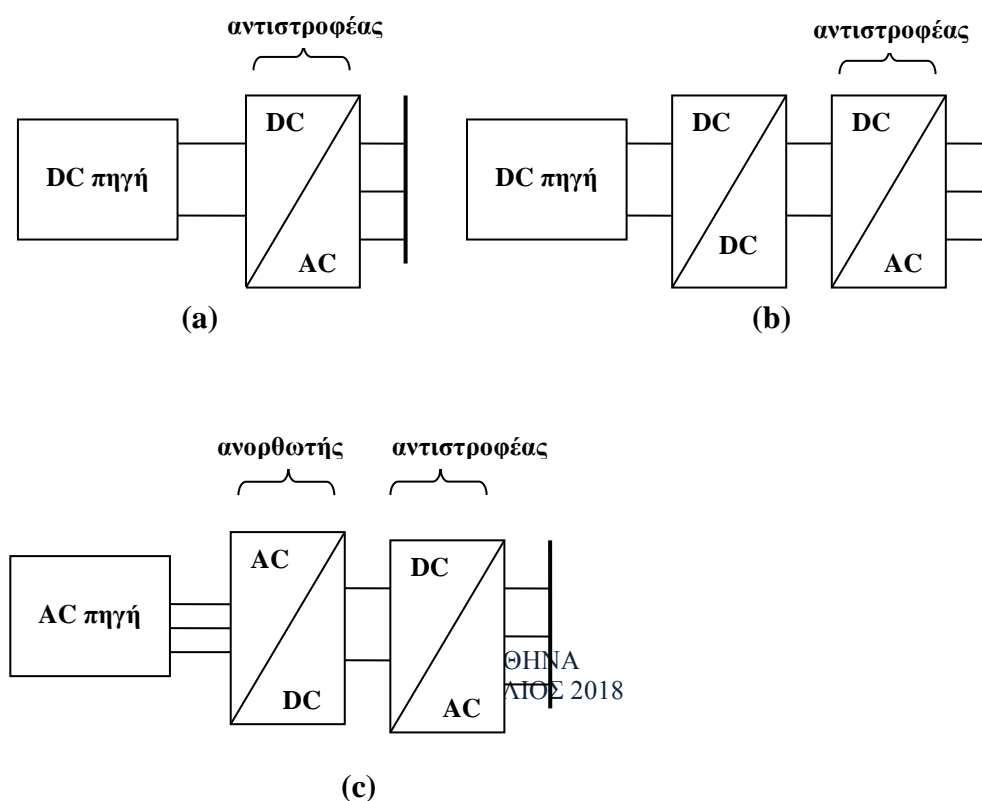
Ο μετατροπέας DC/AC μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για τη μεταφορά ισχύος σε συστήματα αποθήκευσης, δηλαδή για τη φόρτιση συσσωρευτών, ή για τη μεταφορά ισχύος από γραμμές υψηλούς συνεχούς τάσης ('HVDC').

Καταστολή των αρμονικών του ρεύματος και διόρθωση των διαταραχών της τάσης: Ο μετατροπέας λειτουργεί σαν ενεργό φίλτρο, δηλαδή εγχύει στο δίκτυο αρμονικά ρεύματα ίσου πλάτους αλλά με διαφορά  $180^{\circ}$  με τα αρμονικά

ρεύματα του δικτύου. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται με τον μετατροπέα να λειτουργεί παράλληλα προς το δίκτυο. Αν ο μετατροπέας λειτουργεί σε σειρά με το δίκτυο τότε μπορεί να διορθώσει και διαταραχές της τάσης, όπως βυθίσεις. Τα ενεργά φίλτρα εκτός των άλλων μπορούν να διορθώσουν ασυμμετρίες στην τάση και στο ρεύμα και βέβαια το συντελεστή ισχύος του δικτύου.

Οι μετατροπείς DC/AC λειτουργώντας σαν ενεργά φίλτρα διορθώνουν τα προβλήματα που άλλοι μετατροπείς ή γενικά άλλα μη γραμμικά φορτία δημιουργήσαν. Μαζί με τα παθητικά φίλτρα καταστέλλουν τις αρμονικές και αποτρέπουν τα διάφορα προβλήματα που αυτές συνεπάγονται (απώλειες ισχύος, υπερθέρμανση στα τυλίγματα των μηχανών και σε ουδέτερους αγωγούς, παρενοχλήσεις σε τηλεπικοινωνιακούς αγωγούς, θόρυβο σε κυκλώματα ελέγχου κλπ.).

Διόρθωση του συντελεστή ισχύος: Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος μπορεί να γίνει παράλληλα με όλες τις παραπάνω λειτουργίες αλλά και μόνη της με τα συστήματα αντιστάθμισης αέργου ισχύος ('STATCOM'). Ο μετατροπέας συνδέεται παράλληλα με το δίκτυο και παράγει ή απορροφά μόνο άεργο ισχύ. Με τα συστήματα αντιστάθμισης της αέργου ισχύος γίνεται οικονομικότερη αξιοποίηση των γραμμών μεταφοράς καθώς μεταφέρεται περισσότερη ενεργός ισχύς.

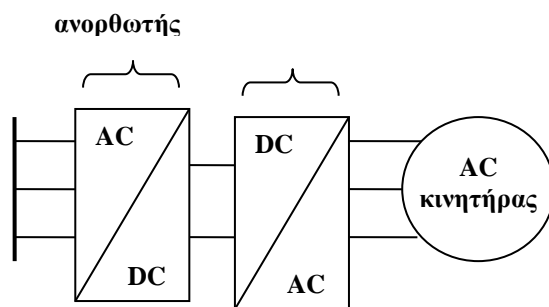




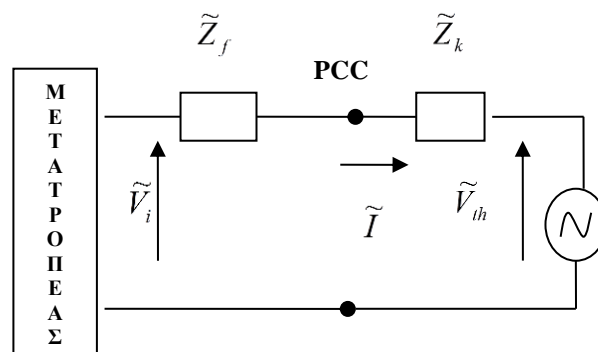
Σχήμα Νο. 1 - Σύνδεση διατάξεων παραγωγής στο δίκτυο

- μέσω μετατροπέα DC/AC
- μέσω μετατροπέα DC/DC/AC
- μέσω μετατροπέα AC/DC/AC

Σχήμα 2 Σύνδεση AC κινητήρα στο δίκτυο μέσω μετατροπέα AC/DC/AC



Οι φασικές τάσεις μετατροπέα που συνδέεται στο δίκτυο



Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα  
τριφασικού μετατροπέα που συνδέεται στο δίκτυο

Από το 2<sup>ο</sup> νόμο του Kirchhoff στο βρόχο του παραπάνω Σχήματος μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της φασικής τάσης του μετατροπέα:

$$\tilde{V}_i = \tilde{V}_{th} + \tilde{I}(\tilde{Z}_k + \tilde{Z}_f)$$

Και αν μετασχηματίσουμε στο πεδίο Laplace όλα τα μεγέθη σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο, για κάθε φάση ισχύει :

$$v_{an} = v_{th\_a} + i_a(Z_k(s) + Z_f(s))$$

$$v_{bn} = v_{th\_b} + i_b(Z_k(s) + Z_f(s))$$

$$v_{cn} = v_{th\_c} + i_c(Z_k(s) + Z_f(s))$$

(1.1)

Η διαδικασία για την εύρεση των  $v_{an}$  ,  $v_{bn}$  ,  $v_{cn}$  είναι όμοια με τη Παράγραφο:

$$v_{an} = v_{ao} - v_{no} = v_{th\_a} + i_a(Z_k(s) + Z_f(s))$$

$$v_{bn} = v_{bo} - v_{no} = v_{th\_b} + i_b(Z_k(s) + Z_f(s))$$

$$v_{cn} = v_{co} - v_{no} = v_{th\_c} + i_c(Z_k(s) + Z_f(s))$$

(1.2)

Με πρόσθεση κατά μέλη :

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} - 3v_{no} = (v_{th\_a} + v_{th\_b} + v_{th\_c}) + (i_a + i_b + i_c).(Z_k(s) + Z_f(s)) \quad (1.3)$$

Επειδή ο ουδέτερος η του φορτίου είναι ασύνδετος ισχύει  $i_a + i_b + i_c = 0$  , ενώ στη γενική περίπτωση μη συμμετρικού δικτύου ισχύει  $v_{th\_a} + v_{th\_b} + v_{th\_c} \neq 0$  .Επομένως :

$$v_{no} = \frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) - \frac{1}{3}(v_{th\_a} + v_{th\_b} + v_{th\_c})$$

(1.4)

Και με αντικατάσταση στην (1.5) :

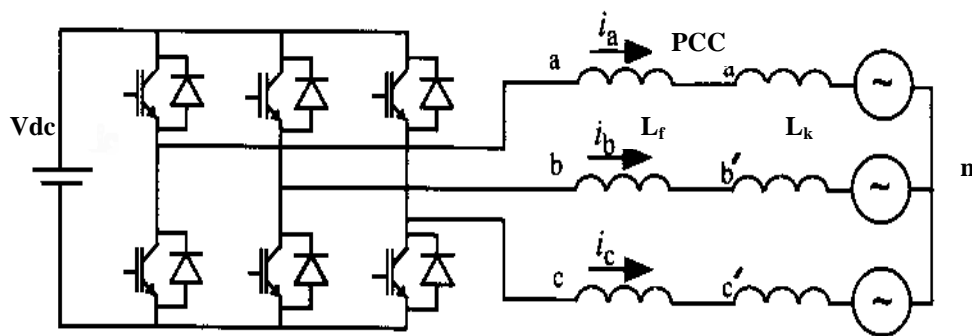
$$v_{an} = \frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} + \frac{1}{3}(v_{th\_a} + v_{th\_b} + v_{th\_c})$$

$$v_{bn} = \frac{2}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} - \frac{1}{3}v_{ao} + \frac{1}{3}(v_{th\_a} + v_{th\_b} + v_{th\_c})$$

$$v_{cn} = \frac{2}{3}v_{co} - \frac{1}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} + \frac{1}{3}(v_{th\_a} + v_{th\_b} + v_{th\_c})$$

(1.6)

Αν η τάση του δικτύου είναι συμμετρική ή δεν περιέχει ημιπολική συνιστώσα, τότε η (1.6) γίνεται ίδια με την (1.1). Δηλαδή δεν υπάρχει καμία διαφορά στις φασικές τάσεις σε σχέση με την περίπτωση όπου ο μετατροπέας τροφοδοτεί παθητικό φορτίο. Η επίδραση της στάθμης βραχυκύκλωσης στην αρμονική παραμόρφωση ( ).



Τριφασικός μετατροπέας που συνδέεται σε δίκτυο μέσω φίλτρου L

Στην ανάλυση έχουμε αγνοήσει τις ωμικές αντιστάσεις του φίλτρου και του δικτύου ενώ η ΗΕΔ δικτύου θεωρούμε ότι δεν περιέχει αρμονικές. Οι φασικές τάσεις εξόδου του αντιστροφέα περιέχουν αρμονικές. Οι αρμονικές αυτές εμφανίζονται και στο σημείο κοινής σύνδεσης. Αν εφαρμόσουμε διαιρέτη τάσης στη φάση a προκύπτει:

$$\frac{(v_{a'n})_h}{(v_{an})_h} = \frac{(X_k)_h}{(X_k)_h + (X_f)_h} = \frac{L_k h \omega}{L_k h \omega + L_f h \omega} = \frac{L_k \omega}{L_k \omega + L_f \omega} = \frac{X_k}{X_k + X_f} \quad (1.7)$$

όπου  $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ rad/s}$  και  $h$  η τάξη της αρμονικής.

Γενικά για κάθε φάση μπορούμε να γράψουμε :

$$\frac{(v_g)_h}{(v_i)_h} = \frac{X_k}{X_k + X_f} \quad \Rightarrow \quad (v_g)_h = \frac{X_k}{X_k + X_f} (v_i)_h \quad (1.8)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (1.30) λοιπόν, η αρμονική παραμόρφωση της τάσης εξαρτάται από το λόγο  $\frac{X_k}{X_k + X_f}$ . Το  $X_{f(p.u.)}$  είναι περίπου 0.05 ανοιγμένο στα ονομαστικά μεγέθη του αντιστροφέα  $S_N$  και  $V_N$ . Το μέγεθος  $X_k$  έχει τιμή που εξαρτάται από τη στάθμη βραχυκύκλωσης του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης. Συγκεκριμένα έχει τιμή  $X_k = \frac{V_N^2}{S_k}$ .

$$\text{Η βάση αντίστασης για το σύστημα μας είναι : } Z_{base} = \frac{V_N^2}{S_N} \quad (1.9)$$

$$\text{Οπότε η τιμή της } X_k \text{ σε ανά μονάδα είναι : } X_{k(p.u.)} = \frac{X_k}{Z_{base}} = \frac{S_N}{S_k} \quad (1.10)$$

Εδώ αναδεικνύεται η επίδραση της στάθμης βραχυκύκλωσης στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης. Αν για παράδειγμα  $S_k = 20 S_N$  τότε  $X_{k(p.u.)} = 0.05 = X_{f(p.u.)}$  και από τη σχέση (1.30)  $(v_g)_h = 0.5(v_i)_h$ . Αν το  $S_k$  είναι πολύ μεγαλύτερο από το  $S_N$ , δηλαδή έχουμε 'άπειρο ΣΗΕ', πρακτικά ο λόγος  $X_{k(p.u.)} = S_N / S_k$  είναι μηδέν και από τη σχέση (1.10) συμπεραίνουμε ότι στο σημείο κοινής σύνδεσης δεν εμφανίζονται αρμονικές τάσης.

Επίσης για τις αρμονικές ρεύματος έστω της φάσης a ισχύει:

$$(i_a)_h = \frac{(v_{an})_h}{(X_k)_h + (X_f)_h} = \frac{(v_{an})_h}{(L_k + L_f)h\omega} = \frac{(v_{an})_h}{(X_k + X_f)h}$$

(1.11)

Γενικά για κάθε φάση μπορούμε να γράψουμε :

$$i_h = \frac{(v_i)_h}{(X_k + X_f)h}$$

(1.12)

Δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η τάξη της αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος, τόσο μικρότερο γίνεται το πλάτος της. Δηλαδή πρακτικά καταστέλλονται οι αρμονικές ρεύματος ανώτερης τάξης.

### 1.8.3 Μέτρηση της ισχύος σε ένα δίκτυο

Η μέτρηση της ισχύος σε ένα δίκτυο σύμφωνα με το πρότυπο 1459 της IEEE, το οποίο δημιουργήθηκε για να δείξει τον τρόπο μέτρησης της ισχύος στη πλέον γενική περίπτωση δικτύου, δηλαδή στη περίπτωση ασύμμετρου και παραμορφωμένου δικτύου. Πριν εφαρμοστεί το πρότυπο η μέτρηση της ισχύος γινόταν με τρόπο ο οποίος σε κάποιες περιπτώσεις, όπως στην περίπτωση ασυμμετρίας, οδηγούσε σε αντιφατικά ή λανθασμένα συμπεράσματα. Για παράδειγμα σε ένα ασύμμετρο δίκτυο οι τρεις φάσεις δεν καταναλώνουν την ίδια ισχύ ( $S_a \neq S_b \neq S_c$ ,  $P_a \neq P_b \neq P_c$ ,  $Q_a \neq Q_b \neq Q_c$ ,  $D_a \neq D_b \neq D_c$ ).

Επομένως η τριφασική ισχύς δεν είναι το τριπλάσιο της ισχύος που καταναλώνεται σε μία από τις τρεις φάσεις. Προκειμένου να προσδιοριστεί η ισχύς σε ένα ασύμμετρο δίκτυο, το παλαιότερο πρότυπο της IEEE (Std 100) όριζε δύο εκφράσεις για τη φαινόμενη ισχύ

$$S_A = |\tilde{S}_a| + |\tilde{S}_b| + |\tilde{S}_c| = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2 + D_a^2} + \sqrt{P_b^2 + Q_b^2 + D_b^2} + \sqrt{P_c^2 + Q_c^2 + D_c^2}$$

(1.13)

*'arithmetic apparent power'*

$$S_V = |\tilde{S}_a + \tilde{S}_b + \tilde{S}_c| = \sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2 + (D_a + D_b + D_c)^2}$$

(1.36)

*'vector apparent power'*

Και όπως είναι προφανές από τις (1.35) και (1.36)  $S_V \leq S_A$ . Σύμφωνα με το νέο πρότυπο της IEEE (STD 1459) καμία από τις παραπάνω εκφράσεις δεν είναι σωστή. Σε αρκετές περιπτώσεις φυσικά, το νέο πρότυπο της IEEE ισοδυναμεί με το παλαιότερο πρότυπο. Το παλαιότερο πρότυπο (STD 100) δίνει απλούστερες εκφράσεις για τη μέτρηση της ισχύος, οι οποίες θα εφαρμόζονται όπου κρίνεται σωστό ώστε να αποφεύγονται οι πολύπλοκες εκφράσεις του νέου προτύπου.

Σύμφωνα με την προσέγγιση του STD 1459, η φαινόμενη ισχύς ορίζεται ως η μέγιστη ενεργός ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί μέσω μιας δεδομένης τριφασικής γραμμής σε ένα τέλεια συμμετρικό τριφασικό φορτίο που τροφοδοτείται από τάση  $V_e$ , με τις απώλειες στη γραμμή να παραμένουν αμετάβλητες. Η φαινόμενη ισχύς ορίζεται από τον τύπο

$$S_e = 3V_e I_e \quad \text{'effective apparent power'}$$

(1.14)

όπου

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{18}}$$

(1.15)

και

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}}$$

(1.16)

όλες οι τιμές είναι *rms* ενώ  $I_n$  είναι το ρεύμα του ουδέτερου.

Όταν δεν υπάρχει ουδέτερος αγωγός, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του δικτύου που εξετάζουμε, οι τύποι (1.15) και (1.16) απλοποιούνται στους τύπους

$$V_e = \sqrt{\frac{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{9}}$$

(1.40)

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}$$

(1.41)

Και αν η τάση και το ρεύμα είναι συμμετρικά ισχύει

$$V_e = \frac{V_{ll}}{\sqrt{3}}$$

(1.17)

$$I_e = I$$

(1.18)

Οπότε προκύπτει ο γνωστός τύπος της ισχύος

$$S_e = \sqrt{3}V_{ll}I$$

(1.19)

Η τάση και το ρεύμα αποτελούνται από τη θεμελιώδη συνιστώσα των 50 Hz και από αρμονικές συνιστώσες. Μπορούμε να διαχωρίσουμε τις θεμελιώδεις συνιστώσες από τις αρμονικές

$$I_e^2 = I_{e1}^2 + I_{eH}^2$$

(1.45)

$$V_e^2 = V_{e1}^2 + V_{eH}^2$$

(1.20)

Οπότε η φαινόμενη ισχύς αποτελείται από τέσσερις όρους

$$\begin{aligned} S_e^2 &= (3V_{e1}I_{e1})^2 + (3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 + (3V_{eH}I_{eH})^2 \\ &= S_{e1}^2 + D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \end{aligned} \quad (1.21)$$

Ο πρώτος όρος είναι η θεμελιώδης φαινόμενη ισχύς και μπορεί να διαχωριστεί σε θεμελιώδη φαινόμενη ισχύ θετικής ακολουθίας και σε έναν ένα δεύτερο όρο που εξαρτάται από την ασυμμετρία του συστήματος, δηλαδή

$$S_{e1}^2 = (3V_{e1}I_{e1})^2 = (S_1^+)^2 + (S_{U1})^2$$

(1.22)

Ο όρος  $S_1^+$  με τη σειρά του μπορεί να διαχωριστεί σε ενεργό και άεργο θεμελιώδη ισχύ θετικής ακολουθίας

$$(S_1^+)^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2$$

(1.23)

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta_1^+ \quad \text{και} \quad Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta_1^+$$

(1.24)

Οι υπόλοιποι τρεις όροι της σχέσης (1.47) εκφράζουν όλοι μαζί τη μη θεμελιώδη φαινόμενη ισχύ

$$S_{eN}^2 = S_e^2 - S_{e1}^2 = D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2$$

(1.25)

Οι τρεις αυτοί όροι μπορούν ακόμα να εκφραστούν σε συνάρτηση με το  $S_{e1}$ , δηλαδή



$$D_{eI} = 3V_{eI}I_{eH} = 3V_{eI}I_{eI} \frac{I_{eH}}{I_{eI}} = S_{eI} THD_{eI}$$

(1.26)

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{eI} = 3V_{eI}I_{eI} \frac{V_{eH}}{V_{eI}} = S_{eI} THD_{eV}$$

(1.27)

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} = 3V_{eI}I_{eI} \frac{V_{eH}}{V_{eI}} \frac{I_{eH}}{I_{eI}} = S_{eI} THD_{eI} THD_{eV}$$

(1.28)

Ο όρος  $S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH}$  περιέχει την ενεργό ισχύ αρμονικών συνιστωσών, δηλαδή ισχύει

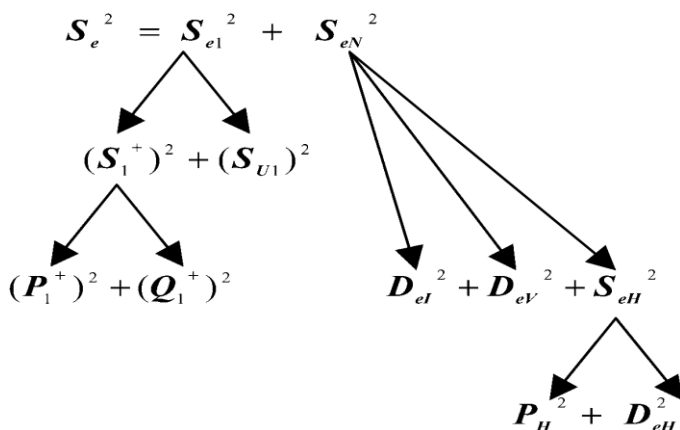
$$S_{eH}^2 = P_H^2 + D_{eH}^2$$

(1.29)

όπου

$$P_H = \sum_{\substack{h \neq 1 \\ i=a,b,c}} V_{ih} I_{ih} \cos \theta_{ih} = P - P_1$$

(1.30)



Διαχωρισμός της ισχύος σύμφωνα με το πρότυπο 1459 της IEEE

Ένας άλλος διαχωρισμός που μπορεί να γίνει στη φαινόμενη ισχύ είναι ο διαχωρισμός σε ενεργό ισχύ  $P$  και σε άεργο ισχύ  $N$ , δηλαδή

$$S_e^2 = P^2 + N^2$$

(1.31)

Το μειονέκτημα αυτού του διαχωρισμού είναι ότι δεν κάνει διάκριση ανάμεσα στην άεργο ισχύ των 50 Hz και στην άεργο ισχύ ανώτερων συχνοτήτων. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω

για ρεύμα και τάση συμμετρικά και χωρίς αρμονικές θα ισχύει

$$S_e = S_{e1} = S_1^+$$

για ρεύμα και τάση συμμετρικά με αρμονική παραμόρφωση θα ισχύει

$$S_e > S_{e1} = S_1^+$$

για ρεύμα και τάση ασύμμετρα με αρμονική παραμόρφωση θα ισχύει

$$S_e > S_{e1} > S_1^+$$

#### 1.8.4 Πρόβλημα που Μπορεί να Προκύψει Λόγω μη Σωστής Ρύθμισης της Ισχύος με Έλεγχο Τάσης

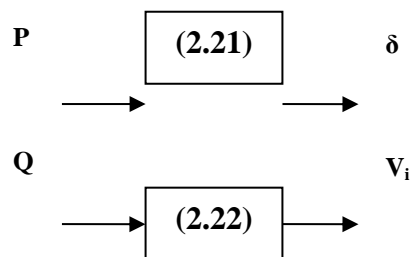
Η σωστή ρύθμιση της ενεργού και αέργου ισχύος σε μετατροπέα που συνδέεται στο δίκτυο μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, με έλεγχο της τάσης του μετατροπέα και με έλεγχο του ρεύματος του μετατροπέα. Στην εργασία γίνεται ρύθμιση της ισχύος με έλεγχο ρεύματος και ο έλεγχος τάσης αναφέρεται απλώς για την πληρότητα του θέματος. Ο έλεγχος τάσης θα πρέπει να στηρίζεται στην αναλογία μεταξύ ροής ενεργού ισχύος και της διαφοράς φάσης μεταξύ της τάσης εξόδου του μετατροπέα και της τάσης του δικτύου, και στην αναλογία της αέργου ισχύος και της διαφοράς των μέτρων των δύο τάσεων. Οι αναλογίες αυτές ισχύουν υπό τις προϋποθέσεις ότι η γωνία  $\delta = (\tilde{V}_i, \tilde{V}_g)$  είναι της τάξης των λίγων μοιρών και ότι η αντίσταση  $R_f$  των φίλτρων εξόδου είναι πολύ μικρότερη από την αντίδραση  $X_f$ .

$$P = \frac{3V_g V_i \sin \delta}{2X_f} \quad \Rightarrow \quad \delta = \sin^{-1} \left( \frac{2X_f P}{3V_i V_g} \right)$$

(1,31)

$$Q = \frac{3V_g (V_i - V_g)}{2X_f} \quad \Rightarrow \quad V_i = V_g + \frac{2X_f Q}{3V_g}$$

(1,32)



*Βρόχοι ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος.*

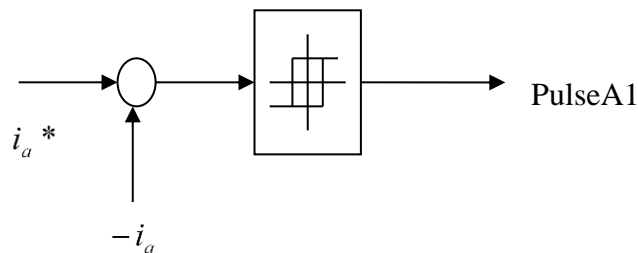
*Οι δύο βρόνχοι παρουσιάζουν ασθενή σύζευξη.*

Οι σχέσεις (1,31) και (1,32) δείχνουν ότι για τη ρύθμιση των P και Q, πρέπει να ρυθμιστεί η γωνία  $\delta$  και το πλάτος  $V_i$  αντίστοιχα, δηλαδή το διάνυσμα της τάσης του μετατροπέα  $\tilde{V}_i = V_i \angle \delta$ . Αυτό θα γίνει με τη ρύθμιση των παλμών των ημιαγωγικών διακοπών οι οποίοι εφαρμόζονται στον μετατροπέα με κάποια μέθοδο διαμόρφωσης.

### 1.8.5 Έλεγχος Ρεύματος με τη Μέθοδο της Υστέρησης - Hysteresis Current Control

Στον έλεγχο υστέρησης, το επιθυμητό ρεύμα μιας φάσης, π.χ. το  $i_a^*$ , προστίθεται στο αντίθετο του μετρούμενου ρεύματος  $i_a$ . Το σφάλμα είναι είσοδος σε ένα συγκριτή που έχει μια καθορισμένη ζώνη υστέρησης  $2h$ . Όταν το ρεύμα υπερβεί τη τιμή  $i_a^* + h$  επιβάλλεται pulse A1=0, δηλαδή αρνητικό δυναμικό στον ακροδέκτη a. Η αντίθετη κατάσταση, δηλαδή pulse A1=1,

επιβάλλεται όταν το ρεύμα γίνει μικρότερο της τιμής  $i_a^* - h$ , και τότε το δυναμικό γίνεται θετικό. Όσο το ρεύμα βρίσκεται μέσα στα προκαθορισμένα όρια  $i_a^* \pm h$  οι διακόπτες δεν αλλάζουν κατάσταση. Οι ελεγκτές των φάσεων μπορεί να είναι ανεξάρτητοι ή εξαρτημένοι, δηλαδή να επικοινωνούν μεταξύ τους.



Έλεγχος ρεύματος της φάσης a με τη μέθοδο της υστέρησης

Έλεγχος $i_a$	$\Delta i = i_a^* - i_a$	pulseA1	$v_{ao}$
Error! Objects cannot be created from editing field codes.>Error! Objects cannot be created from editing field codes.+h	$\Delta i < -h$	0	-Vdc/2
$i_a < i_a^* - h$	$\Delta i > h$	1	+Vdc/2
$i_a^* - h < i_a < i_a^* + h$	$-h < \Delta i < h$	Αμετάβλητα	

Παράδειγμα ελέγχου για το ρεύμα της φάσης a

Αυτή η μέθοδος ελέγχου είναι απλή στην εφαρμογή και η δυναμική συμπεριφορά της είναι εξαιρετική. Επιπλέον είναι μια φτηνή λύση. Ωστόσο υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα που μπορούν να εξαλειφθούν με τη χρήση επιπλέον συγκριτών και λογικής μνήμης ή με την τροποποίηση της μεθόδου

που θα γίνει στην επόμενη παράγραφο. Τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα μπορούν να είναι: ισχύς εξόδου  $S=50$  kVA με συντελεστή ισχύος  $\cos\phi=1$ , φίλτρο με  $X_f=5\%$ , ζώνη υστέρησης 2h που μεταβάλλεται και επίπεδο DC τάσης που τροφοδοτεί τον αντιστροφέα  $V_{dc}=600$  V, επαρκές ώστε να είναι δυνατή η επιβολή των απαιτούμενων φασικών ρευμάτων.

Μειονέκτημα είναι ότι με αυτού του τύπου τον έλεγχο η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται στα διάφορα τμήματα της κυματομορφής αναφοράς σε κάθε περίοδο. Έτσι σε κάποιο τμήμα της κυματομορφής αναφοράς η διακοπτική συχνότητα μπορεί να γίνει ιδιαίτερα υψηλή. Η μέγιστη διακοπτική συχνότητα εξαρτάται από τις παραμέτρους λειτουργίας του μετατροπέα και αποδεικνύεται ότι ισούται με  $\frac{V_{dc}}{4hL_f}$ . Δηλαδή όπως ήταν το αναμενόμενο η διακοπτική συχνότητα αυξάνεται όταν μειώνεται η ζώνη υστέρησης.

Συνοψίζοντας τα μειονεκτήματα του ελέγχου υστέρησης και τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν πρόβλημα σε ένα δίκτυο, αυτά είναι τα εξής.

- Η διακοπτική συχνότητα μεταβάλλεται και μπορεί να γίνει ιδιαίτερα υψηλή.
- Το σφάλμα του ρεύματος δεν είναι αυστηρά περιορισμένο.
- Παράγονται αρμονικές τάσης και ρεύματος σε συχνότητες πολλαπλάσιες των 50 Hz, σε ενδιάμεσες συχνότητες ('inter harmonics') και σε συχνότητες στην περιοχή από 0 έως 50 Hz ('sub harmonics').
- Η ποιότητα του διαμορφωμένου σήματος είναι γενικά χαμηλή, οπότε ο έλεγχος υστέρησης προτιμάται για λειτουργία μετατροπέα με υψηλή διακοπτική συχνότητα οπότε το διαμορφωμένο σήμα είναι βελτιωμένο. Με την αυξημένη διακοπτική συχνότητα όμως, οι απώλειες των διακοπών είναι μεγάλες και αυτό ίσως καθιστά προβληματική την εφαρμογή του ελέγχου σε χαμηλά επίπεδα ισχύος. Προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα που δημιουργεί ο έλεγχος υστέρησης

προτείνεται ο έλεγχος να γίνεται με τριγωνικό φέρον σήμα. Η νέα τεχνική ελέγχου περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

## **2. Κεφάλαιο Δεύτερο – Μετασχηματιστές Ισχύος και Υπολογισμός Απωλειών Κενού Φορτίου**

### **2.1 Η Έννοια των Απωλειών Μετασχηματιστών Ισχύος**

Οι απώλειες του μετασχηματιστή παράγονται από το ηλεκτρικό ρεύμα, που ρέει στα πηνία και το μαγνητικό πεδίο εναλλασσόμενο στον πυρήνα. Οι απώλειες που σχετίζονται με τα πηνία καλούνται απώλειες φορτίου, ενώ οι απώλειες που παράγονται στον πυρήνα ονομάζονται απώλειες χωρίς φορτίο. Οι απώλειες φορτίου ποικίλλουν ανάλογα με τη φόρτιση στον μετασχηματιστή. Περιλαμβάνουν απώλειες θερμότητας και δινορευτικά ρεύματα στους πρωτογενείς και δευτερεύοντες αγωγούς του μετασχηματιστή (Reece, 2000).

Οι απώλειες θερμότητας, ή οι απώλειες  $2R$ , στα υλικά περιέλιξης συνιστούν το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών φορτίου. Δημιουργούνται από την αντίσταση του αγωγού στη ροή ρεύματος ή ηλεκτρονίων. Η κίνηση των ηλεκτρονίων προκαλεί την κίνηση των μορίων του αγωγού και παράγει τριβή και θερμότητα. Η ενέργεια που παράγεται από αυτή την κίνηση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον τύπο (Akçay, Ece, 2003):

$$\mathbf{Watts = (volts) (amperes) \acute{\eta} VI.}$$

Σύμφωνα με το νόμο του Ohm,  $V = RI$ , ή η πτώση τάσης σε μια αντίσταση ισούται με την ποσότητα αντίστασης στην αντίσταση,  $R$ , πολλαπλασιασμένη με το ρεύμα  $I$  που ρέει στην αντίσταση. Ως εκ τούτου, οι απώλειες θερμότητας είναι ίσες  $(I) (RI)$  ή  $I^2 R$ .

Οι σχεδιαστές μετασχηματιστών δεν μπορούν να αλλάξουν το  $I$  ή το σημερινό τμήμα των απωλειών  $I^2R$ , οι οποίες καθορίζονται από τις απαιτήσεις φορτίου. Μπορούν μόνο να αλλάξουν την αντίσταση ή το τμήμα  $R$  του  $I^2R$  χρησιμοποιώντας ένα υλικό που έχει χαμηλή αντίσταση ανά περιοχή διατομής χωρίς να προσθέσει σημαντικά το κόστος του μετασχηματιστή. Οι περισσότεροι σχεδιαστές μετασχηματιστών έχουν βρει το χαλκό τον καλύτερο αγωγό λαμβάνοντας υπόψη το βάρος, το μέγεθος, το κόστος και την αντίσταση του αγωγού. Οι σχεδιαστές μπορούν επίσης να μειώσουν την αντίσταση του αγωγού αυξάνοντας την περιοχή διατομής του αγωγού (Μανιάς, 1988).

Οι απώλειες χωρίς φορτίο προκαλούνται από το ρεύμα μαγνητίσεως που απαιτείται για την ενεργοποίηση του πυρήνα του μετασχηματιστή και δεν μεταβάλλονται ανάλογα με τη φόρτιση του μετασχηματιστή. Είναι σταθερά και συμβαίνουν 24 ώρες την ημέρα, 365 ημέρες το χρόνο, ανεξάρτητα από το φορτίο, εξ ου και η απώλεια χωρίς φορτίο.

Μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε συνιστώσες: απώλειες υστέρησης στις κυματοειδείς ελασματοποιήσεις, απώλειες δινορρευμάτων στις πλάκες πυρήνα, απώλειες  $2R$  λόγω ρεύματος χωρίς φορτίο, απώλειες αδέσποτων φθορών σε σφιγκτήρες πυρήνα, βίδες και άλλα στοιχεία πυρήνα και απώλειες διηλεκτρικού (Silvester, Ferrari, 2005).

Οι απώλειες από υστέρηση και οι απώλειες από φούσκες συμβάλλουν στο 99% των απωλειών χωρίς φορτίο, ενώ τα αδέσποτα ρεύματα, οι διηλεκτρικές απώλειες και οι απώλειες  $2R$  λόγω του ρεύματος χωρίς φορτίο είναι μικρές και κατά συνέπεια συχνά παραμελημένες. Η λεπτότερη διαστρωμάτωση του πυρήνα του χάλυβα μειώνει τις απώλειες από φούσκες.

Ο μεγαλύτερος συντελεστής σε απώλειες χωρίς φορτίο είναι απώλειες υστέρησης. Οι απώλειες από υστέρηση προέρχονται από τα μόρια στα πλαστικά πυρήνα που αντιστέκονται στη μαγνητισμένη και απομαγνητισμένη από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτή η αντίσταση από τα μόρια προκαλεί τριβή που έχει ως αποτέλεσμα θερμότητα. Η ελληνική λέξη, η υστέρηση, σημαίνει "να υστερεί" και αναφέρεται στο γεγονός ότι η μαγνητική

ροή υστερεί πίσω από τη μαγνητική δύναμη. Η επιλογή μεγέθους και τύπου υλικού πυρήνα μειώνει τις απώλειες υστέρησης (Proussalidis, Hatziaargyriou, Kladas, 1999).

### **2.1.1 Τιμές των Απωλειών του Μετασχηματιστή (τιμές A και B)**

Οι τιμές των απωλειών του μετασχηματιστή είναι σημαντικές για τον αγοραστή ενός μετασχηματιστή ο οποίος θέλει να επιλέξει τον οικονομικότερο μετασχηματιστή για την εφαρμογή του. Η χρήση των συντελεστών A και B είναι μια μέθοδος που ακολουθείται από τις περισσότερες επιχειρήσεις ηλεκτρισμού και από πολλούς μεγάλους βιομηχανικούς πελάτες για την κεφαλαιοποίηση της μελλοντικής αξίας των ζημιών χωρίς φορτίο (που σχετίζονται με το κόστος για την παροχή του δυναμικού του συστήματος) και τις απώλειες φορτίου (που σχετίζονται με το κόστος της αυξητικής ενέργειας) (Reece, 2000).

Με άλλο τρόπο, οι τιμές A παρέχουν μια εκτίμηση του ισοδύναμου σημερινού κόστους των μελλοντικών απωλειών χωρίς φορτίο, ενώ οι τιμές B παρέχουν μια εκτίμηση του ισοδύναμου σημερινού κόστους των μελλοντικών απωλειών φορτίου. Οι περισσότερες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας ενημερώνουν τακτικά το κόστος αποφυγής της δυναμικότητας και της ενέργειας (συνήθως σε ετήσια βάση) και χρησιμοποιούν τιμές A και B κατά τον προσδιορισμό ενός μετασχηματιστή. Οι περισσότεροι μικρότεροι τελικοί χρήστες χρησιμοποιούν συνήθως μεθόδους αξιολόγησης του κόστους κύκλου ζωής (Proussalidis, Hatziaargyriou, Kladas, 1999).

Κατά την αξιολόγηση διαφόρων σχεδίων μετασχηματιστών, η υποτιθέμενη τιμή των απωλειών μετασχηματιστών (τιμές A και B) θα συμβάλει στον προσδιορισμό της απόδοσης του μετασχηματιστή που πρόκειται να αγοραστεί. Υποθέτοντας ότι μια υψηλή τιμή για τις απώλειες του μετασχηματιστή θα έχει γενικά ως αποτέλεσμα την αγορά μιας πιο



αποδοτικής μονάδας. αν υποθεθεί ότι μια χαμηλότερη αξία των ζημιών θα έχει ως αποτέλεσμα την αγορά μιας λιγότερο αποτελεσματικής μονάδας.

Ωστόσο η μέθοδος συνολικού κόστους ιδιοκτησίας (TOC) παρέχει έναν αποτελεσματικό τρόπο για την αξιολόγηση των αρχικών τιμών αγοράς των μετασχηματιστών και του κόστους των ζημιών. Ο στόχος είναι να επιλέξετε έναν μετασχηματιστή που να πληροί τις προδιαγραφές και ταυτόχρονα να έχει το χαμηλότερο TOC. Οι τιμές A και B περιλαμβάνουν το κόστος απώλειας χωρίς φορτίο και απώλειες φορτίου στον τύπο TOC (Μανιάς, 1988):

$$TOC = NLL \chi A + LL \chi B + \Gamma$$

όπου,

- TOC = κεφαλαιοποιημένο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας,
- NLL = απώλεια χωρίς φορτίο σε βατ,
- A = κεφαλαιοποιημένο κόστος ανά ονομαστικό watt NLL (τιμή A),
- LL = απώλεια φορτίου σε watt στο ονομαστικό φορτίο του μετασχηματιστή,
- B = κεφαλαιοποιημένο κόστος ανά ονομαστικό ρεύμα LL (τιμή B),
- C = το αρχικό κόστος του μετασχηματιστή, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, του φόρου επί των πωλήσεων και των λοιπών εξόδων για το προ

Το στοιχείο A είναι μια εκτίμηση της παρούσας αξίας των μελλοντικών στοιχείων κόστους κεφαλαίου (που δεν εξαρτώνται από το φορτίο) σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Μπορεί να ποικίλει με την πάροδο του χρόνου καθώς οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας επανεκτιμούν το κόστος τους σε περιοδική βάση.

Ακόμη και αν δεν υπάρχει φορτίο, υπάρχει κεφάλαιο που αφιερώνεται σταθερή χωρητικότητα παραγωγής, μετάδοσης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες συμβάλλουν στην τιμή A. Η φόρτιση που μπορεί να αλλάζει καθημερινά στον μετασχηματιστή δεν επηρεάζει την τιμή απώλειας χωρίς φορτίο.

Υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$A = [SC + (EC \times 8760)] \times 0,001 / [FC] = \text{Κόστος απώλειας χωρίς φορτίο σε } \$ / \text{watt}$

όπου,

SC = Ετήσιο κόστος χωρητικότητας συστήματος σε \$ / kW-έτος όπου SC είναι το επίπεδο ετήσιο κόστος της παραγωγής, της μετάδοσης και της πρωτογενούς δυναμικότητας διανομής που απαιτείται για την παροχή ενός ρεύματος φορτίου στον μετασχηματιστή διανομής που συμπίπτει με το φορτίο αιχμής.

EC = Κόστος ενέργειας όπου EC είναι το κατ 'αποκοπήν ετήσιο κόστος ανά kWh καυσίμου, συμπεριλαμβανομένου του πληθωρισμού, κλιμάκωσης και οποιωνδήποτε άλλων στοιχείων κόστους λειτουργίας ή συντήρησης που σχετίζονται με το καύσιμο και είναι ανάλογα με την ενεργειακή απόδοση των μονάδων παραγωγής).

FC = Σταθερό τέλος επί του κεφαλαίου ανά έτος όπου FC είναι το επίπεδο ετήσιο εισόδημα που απαιτείται για τη μεταφορά και αποπληρωμή της υποχρέωσης επένδυσης του μετασχηματιστή και των φόρων που συνδέονται με την πληρωμή, όλα εκφρασμένα ως μοναδιαία ποσότητα του πρωτοτύπου.

Παρόμοια με τον τρόπο προσδιορισμού της τιμής A, η τιμή B είναι μια εκτίμηση της παρούσας αξίας μελλοντικών μεταβλητών ή εξαρτώμενων από το φορτίο στοιχείων κόστους σε ένα δεδομένο σημείο χρόνος. Με άλλα λόγια, η τιμή B είναι η απάντηση στην ερώτηση, ποιο είναι το watt απώλειας φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Η τιμή B μπορεί επίσης να αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, καθώς οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας αναπροσαρμόζουν το κόστος τους σε περιοδική αλλά όταν προσδιοριστεί, είναι μια σταθερή τιμή για μια δεδομένη αγορά μετασχηματιστή. Το κόστος των απωλειών φορτίου ή της τιμής B υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο τύπο:

$$B = [(SC \times RF) + (EC \times 8,760 \times LF)] (PL) 2 (0,001)$$

όπου

(FC) = Κόστος απώλειας φορτίου

RF = συντελεστής υπευθυνότητας απώλειας κορυφής - RF είναι ο σύνθετος παράγοντας ευθύνης που μειώνει τις απαιτήσεις χωρητικότητας συστήματος για απώλειες φορτίου αφού οι απώλειες μετασχηματιστή αιχμής δεν εμφανίζονται απαραίτητα στο χρόνο αιχμής).

LF = Ετήσιος συντελεστής απώλειας όπου LF είναι ο λόγος της μέσης ετήσιας απώλειας φορτίου προς την μέγιστη τιμή της απώλειας φορτίου στον μετασχηματιστή).

PL = Ομοιόμορφο ισοδύναμο ετήσιο φορτίο αιχμής (PL είναι το επίπεδο φορτίο αιχμής ανά έτος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή).

Ο κύκλος ζωής του μετασχηματιστή ορίζεται ως η ωφέλιμη ζωή του περιουσιακού στοιχείου και θεωρείται συνήθως ότι είναι 30-35 έτη). Οι μετασχηματιστές που έχουν σχεδιαστεί ειδικά σχεδιασμένοι, οι κατασκευαστές βελτιστοποιούν το σχεδιασμό της μονάδας στις καθορισμένες τιμές A και B με αποτέλεσμα έναν μετασχηματιστή σχεδιασμένο για το χαμηλότερο συνολικό κόστος ιδιοκτήτη αντί για ένα σχεδιασμένο για το φθηνότερο πρώτο κόστος.

Σε περιπτώσεις όπου οι τιμές A και B έχουν (ή ο τελικός χρήστης δεν χρησιμοποιεί ή προσδιορίζει), όπως συμβαίνει σε εμπορικές ή μικρές βιομηχανικές εφαρμογές, η προτεινόμενη τεχνική για μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας του μετασχηματιστή είναι να ληφθούν οι τιμές απώλειας φορτίου και πλήρους φορτίου ενός συγκεκριμένου μετασχηματιστή, σε βατ. Αυτή η μέθοδος εξετάζεται στο κόστος ζωής κύκλου ζωής του μετασχηματιστή, σε άλλο σημείο αυτής της ιστοσελίδας (Proussalidis, Hatzargyriou, Kladas, 1999).

## 2.2 Η Έννοια και τα Είδη των Απωλειών Κενών Φορτίων στους Μετασχηματιστές Ισχύος

Οι απώλειες φορτίων του μετασχηματιστή ισχύος, μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικά στοιχεία, απώλειες χωρίς φορτίο και απώλειες φορτίου. Αυτές οι απώλειες είναι κοινές σε όλους τους τύπους μετασχηματιστών ισχύος, ανεξάρτητα από την εφαρμογή μετασχηματιστή ή την ονομαστική ισχύ (Akçay, Ece, 2003).

Υπάρχουν, ωστόσο, δύο άλλα είδη προβλημάτων που μπορούν να προκύψουν. Επιπλέον απώλειες που δημιουργούνται από μη ιδανική ποιότητα ισχύος και απώλειες που μπορεί να ισχύουν ιδιαίτερα για μεγαλύτερους μετασχηματιστές - ψυκτικές ή βοηθητικές απώλειες, που προκαλούνται από τη χρήση εξοπλισμού ψύξης όπως ανεμιστήρες και αντλίες.

### 2.2.1 Απώλειες Ισχύος Λόγω Φόρτωσης

Αυτές οι απώλειες εμφανίζονται στον πυρήνα του μετασχηματιστή όποτε ενεργοποιείται ο μετασχηματιστής (ακόμα και όταν το δευτερεύον κύκλωμα είναι ανοιχτό). Ονομάζονται επίσης απώλειες σιδήρου ή απώλειες πυρήνα και είναι σταθερές. Αποτελούνται από (Reece, 2000):

- Οι απώλειες υστέρησης, που προκαλούνται από την κινητική τριβής των μαγνητικών τομέων στα πλαστικά πυρήνα, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται με εναλλαγή του μαγνητικού πεδίου. Αυτές οι απώλειες εξαρτώνται από τον τύπο του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή ενός πυρήνα. Ο πυριτιούχος χάλυβας έχει πολύ χαμηλότερη υστέρηση από τον κανονικό χάλυβα, αλλά το άμορφο μέταλλο έχει πολύ καλύτερες επιδόσεις από το χάλυβα πυριτίου. Οι απώλειες λόγω υστέρησης μπορούν να μειωθούν με την επεξεργασία των υλικών, όπως η ψυχρή έλαση, η επεξεργασία με λέιζερ ή ο προσανατολισμός των κόκκων. Οι απώλειες υστέρησης είναι συνήθως υπεύθυνες για πάνω από το ήμισυ των συνολικών απωλειών χωρίς

φορτίο (~ 50% έως ~ 80%). Ο λόγος αυτός ήταν μικρότερος στο παρελθόν (λόγω της υψηλότερης συμβολής των ζημιών από φούσκες).

- Απώλειες από τον φαινομενικό ρεύμα, που προκαλούνται από ποικίλα μαγνητικά πεδία που προκαλούν φούσκες στα πλαστικά και παράγουν θερμότητα. Αυτές οι απώλειες μπορούν να μειωθούν με την κατασκευή του πυρήνα από λεπτά στρωματοποιημένα φύλλα που είναι μονωμένα το ένα από το άλλο από ένα λεπτό στρώμα βερνικιού για τη μείωση των φουσκωμένων ρευμάτων. Οι απώλειες από οπισθοσκέδαση αντιπροσωπεύουν συνήθως το 20% έως 50% των συνολικών απωλειών χωρίς φορτίο

Υπάρχουν επίσης και λιγότερες απώλειες αδέσποτων και διηλεκτρικών που εμφανίζονται στον πυρήνα του μετασχηματιστή, που αντιπροσωπεύουν συνήθως όχι περισσότερο από το 1% των συνολικών απωλειών χωρίς φορτίο (Prousalidis, Hatzargyriou, Kladas, 1999).

### 2.2.2 Οι Πραγματικές Απώλειες Φορτίου

Αυτές οι απώλειες ονομάζονται συνήθως απώλειες χαλκού ή απώλειες βραχυκυκλώματος. Οι απώλειες φορτίου ποικίλλουν ανάλογα με τη φόρτιση του μετασχηματιστή. Αποτελούνται από (Μανιάς, 1988):

- Ωμική απώλεια θερμότητας, μερικές φορές αναφέρεται ως απώλεια χαλκού, καθώς αυτό το αντιστατικό στοιχείο της απώλειας φορτίου κυριαρχεί. Αυτή η απώλεια εμφανίζεται στις περιελίξεις του μετασχηματιστή και προκαλείται από την αντίσταση του αγωγού. Το μέγεθος αυτών των απωλειών αυξάνει με το τετράγωνο του ρεύματος φορτίου και είναι ανάλογο με την αντίσταση της περιέλιξης. Μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας την επιφάνεια διατομής του αγωγού ή μειώνοντας το μήκος περιέλιξης. Η χρήση χαλκού ως αγωγού διατηρεί την ισορροπία μεταξύ βάρους, μεγέθους, κόστους και αντίστασης. Προσθέτοντας μια πρόσθετη ποσότητα για να αυξήσετε τη διάμετρο του αγωγού, σύμφωνα με άλλους περιορισμούς σχεδιασμού, μειώνει τις απώλειες.

- Απώλειες διόδων αγωγού. Τα αιωρούμενα ρεύματα, λόγω μαγνητικών πεδίων που προκαλούνται από εναλλασσόμενο ρεύμα, εμφανίζονται επίσης στις περιελίξεις. Η μείωση της διατομής του αγωγού μειώνει τα φουσκωμένα ρεύματα, έτσι οι αγκυρωμένοι αγωγοί με τους ξεχωριστούς κλώνους μονωμένους μεταξύ τους είναι που χρησιμοποιείται για την επίτευξη της απαιτούμενης χαμηλής αντίστασης, ενώ ελέγχει την απώλεια του φούσκας. Στην πραγματικότητα, αυτό σημαίνει ότι η «περιέλιξη» αποτελείται από έναν αριθμό παράλληλων περιελίξεων.
- Δεδομένου ότι κάθε μία από αυτές τις περιελίξεις θα είχε μια ελαφρώς διαφορετική ροή, η τάση που αναπτύχθηκε από το καθένα θα ήταν ελαφρώς διαφορετική και η σύνδεση των άκρων θα οδηγούσε σε κυκλοφορούντα ρεύματα τα οποία θα μπορούσαν να συμβάλουν στην απώλεια. Αυτό αποφεύγεται με τη μεταφορά των αγωγών στις μέσες διαφορές ροής και την εξίσωση της τάσης.

### **2.2.3 Βοηθητικές Απώλειες Φορτίου**

Αυτές οι απώλειες προκαλούνται από τη χρήση ενέργειας για την λειτουργία ανεμιστήρων ψύξης ή αντλιών που βοηθούν στην ψύξη μεγαλύτερων μετασχηματιστών (Akçay, Ece, 2003).

### **2.2.4 Επιπλέον Απώλειες Λόγω Αρμονικών και Ανισορροπιών**

Οι παραμορφωμένες ή μη ισορροπημένες τάσεις ή ρεύματα έχουν ως αποτέλεσμα επιπλέον απώλειες. Οι απώλειες ισχύος που οφείλονται στα δινορευτικά ρεύματα εξαρτώνται από το τετράγωνο συχνότητας, έτσι ώστε η παρουσία αρμονικών συχνοτήτων που είναι υψηλότερες από την ονομαστική συχνότητα προκαλεί επιπλέον απώλειες στον πυρήνα και στις περιελίξεις (Silvester, Ferrari, 2005).

Οι μετασχηματιστές ισχύος που υπόκεινται σε τάσεις αρνητικής ακολουθίας μετασχηματίζουν τους με τον ίδιο τρόπο όπως οι τάσεις θετικής ακολουθίας. Η συμπεριφορά σε σχέση με τις ομοπολικές τάσεις εξαρτάται

από τις πρωτεύουσες και τις δευτερεύουσες συνδέσεις και, ειδικότερα, από την παρουσία ενός ουδέτερου αγωγού (Silvester, Ferrari, 2005).

## **2.3 Τρόπος Μέτρησης των Απωλειών Φορτίου**

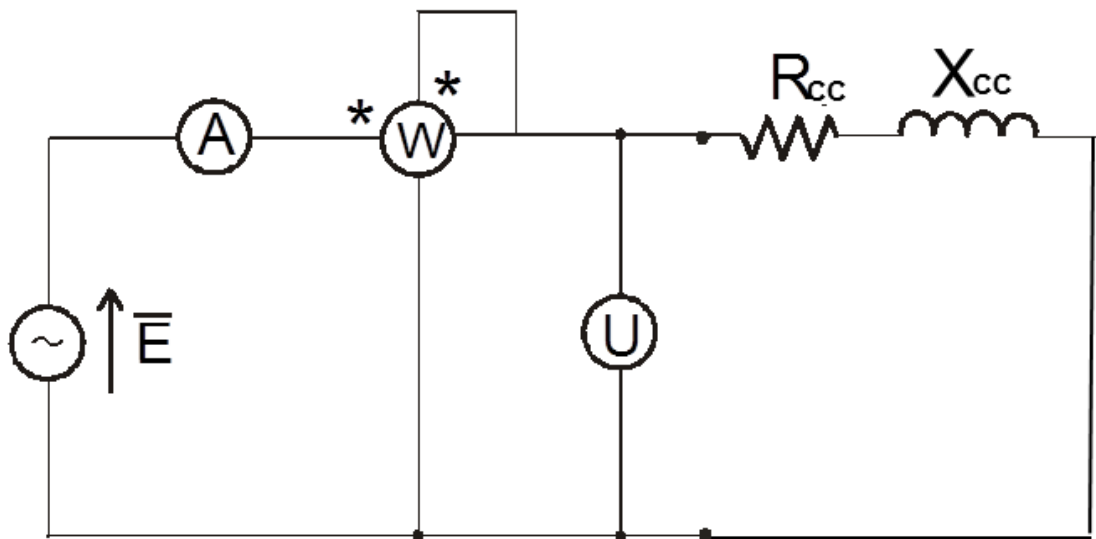
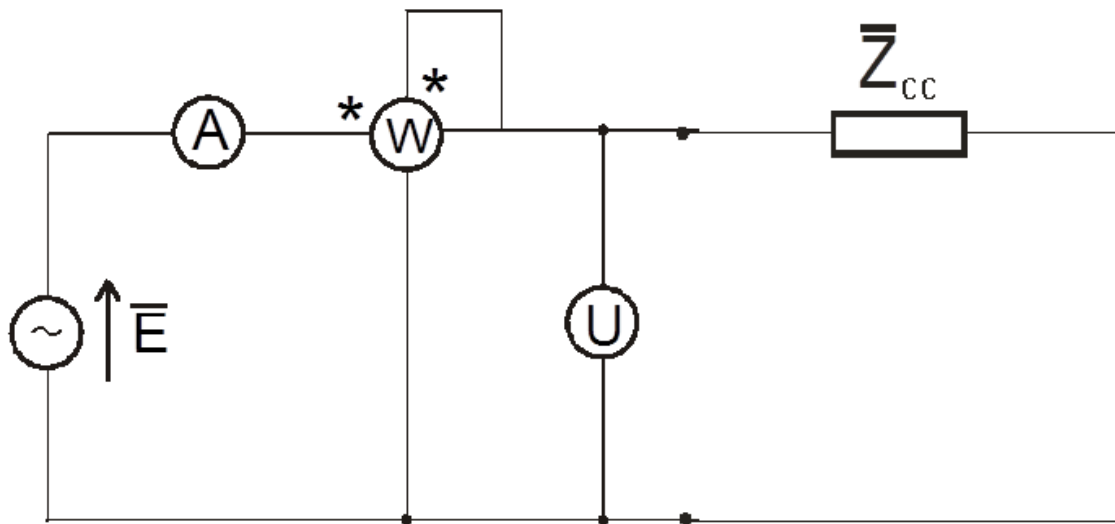
### **2.3.1 Απώλεια Φορτίου**

Η μέτρηση της απώλειας φορτίου σε ένα μεγάλο μετασχηματιστή ισχύος απαιτεί μεγάλη προσοχή και καλό εξοπλισμό μέτρησης λόγω του χαμηλού συντελεστή ισχύος και των συχνά μεγάλων ρευμάτων δοκιμής (Μανιάς, 1988). Η απώλεια φορτίου για ένα ζεύγος περιελίξεων μετρείται στην ονομαστική συχνότητα με την τάση που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες μίας περιέλιξης, με τους βραχυκυκλωμένους ακροδέκτες της άλλης περιέλιξης και με πιθανές άλλες περιελίξεις ανοικτές (Reece, 2000).

Το παρεχόμενο ρεύμα πρέπει να είναι ίσο με το σχετικό ονομαστικό ρεύμα. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται γρήγορα, ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας να μην προκαλεί σημαντικά σφάλματα. Η μετρούμενη τιμή της απώλειας φορτίου πολλαπλασιάζεται με το τετράγωνο του λόγου ονομαστικού ρεύματος προς το ρεύμα δοκιμής (Silvester, Ferrari, 2005).

Στη συνέχεια, το προκύπτον σχήμα διορθώνεται σε θερμοκρασία αναφοράς. Οι ωμικές απώλειες συνήθως και συμβατικά λαμβάνονται ως μεταβάλλονται άμεσα με τη θερμοκρασία και όλες τις άλλες απώλειες αντιστρόφως με τη θερμοκρασία. Σε έναν μετασχηματιστή ισχύος τριών περιελίξεων, πραγματοποιούνται μετρήσεις στους τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς δύο τύλιξης. Τα αποτελέσματα υπολογίζονται εκ νέου, κατανέμοντας τις απώλειες σε μεμονωμένες περιελίξεις. Οι συνολικές απώλειες για συγκεκριμένες περιπτώσεις φόρτωσης που περιλαμβάνουν όλες αυτές τις περιελίξεις καθορίζονται αναλόγως (Prousalidis, Hatzargyriou, Kladas, 1999).

Πρέπει να ελαχιστοποιηθούν τυχόν σφάλματα και απώλειες εξωτερικού κυκλώματος. Πρέπει να εφαρμόζεται διόρθωση για τη μέτρηση των σφαλμάτων του μετασχηματιστή και για την αντίσταση των δοκιμαστικών συνδέσεων, εκτός εάν είναι προφανώς αμελητέα.



$$Z_{CC} = \frac{V}{A}$$

$$R_{CC} = \frac{W}{A^2}$$

$$X_{CC} = \sqrt{Z_{CC}^2 - R_{CC}^2}$$

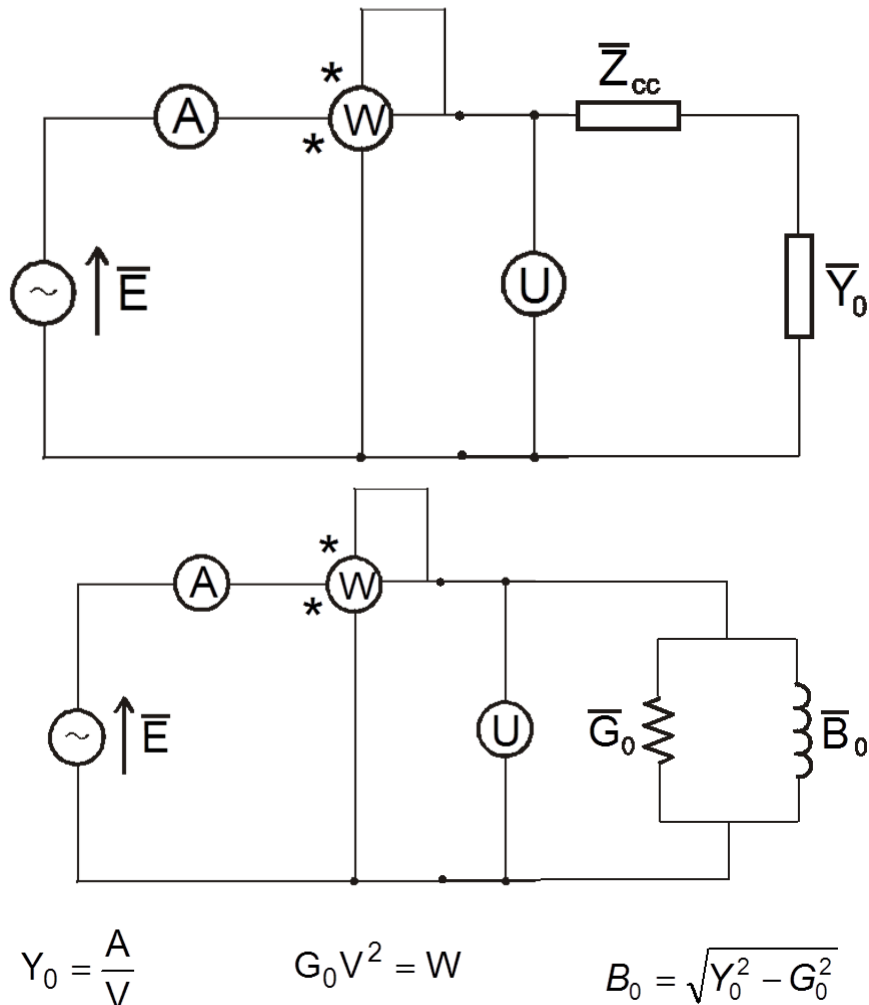
Εικόνα Νο.2.1 - Δοκιμή βραχυκυκλώματος ισοδύναμων μονοφασικών κυκλωμάτων.

ΑΘΗΝΑ  
ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2018



### 2.3.2 Μέτρηση των Απωλειών Χωρίς Φορτίο

Οι απώλειες χωρίς φορτίο μετρώνται σε μία από τις περιελίξεις στην ονομαστική συχνότητα και σε τάση που αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση. Τα υπόλοιπα τυλίγματα ή περιελίξεις πρέπει να παραμείνουν ανοικτά (Silvester, Ferrari, 2005).



### 2.3.3 Μέγιστες Απώλειες

Τα πλεονεκτήματα της χωριστής ρύθμισης της μέγιστης απώλειας φορτίου και απώλειας φορτίου στην προσπάθεια ρύθμισης ή τυποποίησης των ενεργειακών δυνατοτήτων του μετασχηματιστή μπορούν να συνοψιστούν ως εξής (Proussalidis, Hatziargyriou, Kladas, 1999):

- Ένας από τους σημαντικότερους στόχους της τυποποίησης είναι η ενοποίηση. Η ενοποίηση επιτρέπει να ανοίξει μια οριζόντια λειτουργία, με πολύ σημαντικές συνέπειες για τις μελλοντικές εξελίξεις των οικονομιών κλίμακας, την εναλλαξιμότητα κλπ.
- Καμία απώλεια φορτίου δεν είναι ποτέ μεγαλύτερη από μια ορισμένη τιμή, ανεξάρτητα από το εφαρμοζόμενο φορτίο, το οποίο είναι γενικά δύσκολο να προβλεφθεί σε rms, σε ημερήσια, εποχιακή ή κύκλου ζωής σε ολόκληρο το απόθεμα πανομοιότυπων μετασχηματιστών. Αυτό σημαίνει ότι εξασφαλίζεται ένα ελάχιστο επίπεδο απόδοσης ανεξάρτητα από το επίπεδο φόρτωσης που εφαρμόζεται στον μετασχηματιστή.
- Οι μέγιστες απώλειες δεν εξαρτώνται από την εφαρμογή, αλλά μόνο από το προϊόν, ενώ η αποδοτικότητα είναι ένας δείκτης ανάλογα με την εφαρμογή και αυτό εισάγει πρόσθετη αβεβαιότητα.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις, το προφίλ φορτίου είναι γνωστό με αρκετά μεγάλη αβεβαιότητα. Η γνώση του προφίλ φορτίου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για εκ των προτέρων βελτιστοποίηση δεν είναι συνήθως αρκετή για να φτάσει στη θεωρητική βέλτιστη υποσχέθηκε από προσεγγίσεις αποδοτικότητας.
- Η ευελιξία που σχετίζεται με τις προσεγγίσεις αποτελεσματικότητας είναι μια επαγγελματική αλλά αφήνει περισσότερο χώρο απ' ό,τι ένας κατάλογος ζημιών σε στρεβλωμένη συμπεριφορά της αγοράς και απάτες κλπ.
- Ο καθορισμός υποχρεωτικής μέγιστης στάθμης φορτίου και απώλειας φορτίου δεν σημαίνει ότι δεν είναι δυνατή η τυποποίηση ή απλώς η επιλογή άλλων αξιών που βελτιστοποιούν κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή.
- Όλες αυτές οι σκέψεις ισχύουν για μετασχηματιστές μέσης ισχύος, οι οποίοι συνήθως παράγονται σε μεγάλες σειρές και δεν επιτρέπουν τη μοναδική ειδική βελτιστοποίηση ούτε από το χρήστη ούτε από τον κατασκευαστή.
- Για τους λόγους αυτούς, ο ευρωπαϊκός κανονισμός για τις ενεργειακές επιδόσεις των μετασχηματιστών μέσης ισχύος βασίστηκε στη μέγιστη απώλεια φορτίου και φορτίου.

- Μια εναλλακτική λύση σε ξεχωριστές απαιτήσεις για μέγιστη απώλεια φορτίου χωρίς φορτίο και φορτίο είναι ο συνδυασμός των συνολικών απωλειών σε μία τιμή. Παρόμοια με το ελάχιστο όριο απόδοσης, θα υπάρχει ένα σιωπηλό σημείο κόστους του κατασκευαστή σε ένα δεδομένο σημείο φόρτωσης, το οποίο μπορεί ή όχι να είναι βέλτιστο για μια δεδομένη αγορά. Εάν αυτό το σημείο φόρτωσης δεν ταιριάζει με το φορτίο όπου εγκαθίσταται ο μετασχηματιστής με το χαμηλότερο κόστος, το βέλτιστο σημείο απόδοσης του μετασχηματιστή με ελάχιστο κόστος δεν θα συμπίπτει με τη φόρτωση της εγκατάστασης, με αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας.

#### **2.3.4 Μέτρηση Ελάχιστης Απόδοσης**

Η αποδοτικότητα είναι μια πιο ουδέτερη τεχνολογική μετρική, η οποία επιτρέπει την ευελιξία στο σχεδιασμό και την κατασκευή μετασχηματιστών. Στην πραγματικότητα, επιτρέπει στους μηχανικούς σχεδιασμού μετασχηματιστών να ανταλλάσσουν απώλειες χωρίς φορτίο και φορτίσεις προσπαθώντας παράλληλα να παράγουν έναν βελτιστοποιημένο μετασχηματιστή για έναν συγκεκριμένο πελάτη και εφαρμογή (Μανιάς, 1988).

Ταυτόχρονα, πρέπει να σημειωθεί ότι εάν ένας μετασχηματιστής αγοράζεται απλώς με βάση το ελάχιστο κόστος, το βέλτιστο σημείο φόρτισης του μπορεί να μην συμπίπτει με το μέσο φορτίο σε όλους τους χώρους εγκατάστασης, με αποτέλεσμα την απώλεια εξοικονόμησης ενέργειας.

Έτσι, η πρακτική των προμηθειών του μετασχηματιστή πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλες αυτές τις πτυχές και να ελαχιστοποιεί το κόστος των απωλειών σε σχέση με τη σειρά των προβαλλόμενων προφίλ φορτίου. Αυτό είναι εφικτό για τους μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος (λίγες πολύ σημαντικές μονάδες που καθορίζονται από επαγγελματίες εμπειρογνώμονες ένα προς ένα), αλλά είναι πρακτικά ανέφικτο για τους μετασχηματιστές μέσης ισχύος που παράγονται σε χιλιάδες μονάδες για τη γενική αγορά. Η αποδοτικότητα εκφράζεται ως εξής:

$$\text{Efficiency} = \frac{S_{\text{input}} - \text{Losses}}{S_{\text{input}}} = \frac{S_{\text{output}}}{S_{\text{output}} + \text{Losses}}$$

Η καθορισμένη ισχύς μπορεί να είναι είτε η ισχύς εισόδου (EN) είτε η ισχύς εξόδου (IEEE) με αποτέλεσμα δύο μεθόδους υπολογισμού της απόδοσης και ιστορικά έχουν χρησιμοποιηθεί και οι δύο μέθοδοι. Ο δείκτης απόδοσης κορυφής είναι ένα μετρικό στοιχείο χωρίς μονάδες, το οποίο αναπτύχθηκε ως ρυθμιστική επιλογή για την Ευρωπαϊκή Ένωση ( )

Ο δείκτης κορυφαίας απόδοσης επιτυγχάνεται όταν η απώλεια χωρίς φορτίο ισούται με την απώλεια φορτίου και δίνεται με την υποκατάσταση της  $k_{PEI}$  με την εξίσωση με την  $k_{PEI}$  όπως στην παρακάτω έκφραση (Reece, 2000):

$$k_{PEI} = \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0} + P_{ck_{PEI}}}{P_k}} \quad (\text{pu})$$

όπου:

- $P_0$  είναι η απώλεια χωρίς φορτίο που μετράται στην ονομαστική τάση, την ονομαστική συχνότητα και την ονομαστική βρύση
- $P_{c0}$  είναι η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται από το σύστημα ψύξης για λειτουργία χωρίς φορτίο που προκύπτει από τη μέτρηση της δοκιμής τύπου της ισχύος που λαμβάνεται από τους κινητήρες του ανεμιστήρα και των αντλιών.
- $P_k$  είναι η μετρούμενη απώλεια φορτίου σε ονομαστικό ρεύμα και ονομαστική συχνότητα στην ονομαστική βρύση που διορθώνεται σε θερμοκρασία αναφοράς σύμφωνα με το IEC 60076-1.
- Το  $P_{ck}$  ( $k$ ) είναι η πρόσθετη ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται (εκτός από το  $P_{c0}$ ) από το σύστημα ψύξης για λειτουργία σε συντελεστή φορτίου

$k$ , που προκύπτει από τη μέτρηση της δοκιμής τύπου της ισχύος που λαμβάνεται από τους κινητήρες του ανεμιστήρα και των αντλιών

- $S_r$  είναι η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή ή αυτόματος μετασχηματιστής όπως ορίζεται στο IEC60076-1 στον οποίο βασίζεται το  $P_k$

όπου

- ❖  $k$  είναι ο συντελεστής φορτίου
- ❖ είναι η επιπρόσθετη ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται (εκτός από το  $P_{c0}$ ) από το σύστημα ψύξης για λειτουργία σε  $kPEI$ .

Ο τύπος για τον υπολογισμό του δείκτη κορυφαίας απόδοσης (PEI), αναφέρεται σχετικά ως εξής

$$PEI = 1 - \frac{2(P_0 + P_{c0} + P_{ckPEI})}{S_r \sqrt{\frac{P_0 + P_{ckPEI} + P_{c0}}{P_k}}} \quad (pu)$$

Η τιμή της εξίσωσης εξαρτάται από τον λόγο  $S_r / \sqrt{P_k}$  που δεν μεταβάλλεται σημαντικά εάν ο  $S_r$  έχει αλλάξει (για παράδειγμα μεταβάλλοντας τον τρόπο λειτουργίας ψύξης) υπό την προϋπόθεση ότι η  $P_k$  μετράται σε  $S_r$ . Δήλωση του βιομηχανικού και τριτογενούς προϊόντος Έλεγχος και εφαρμογή προτύπων Μετασχηματιστές ισχύος (Akçay, Ece, 2003)

Ο δείκτης απόδοσης κορυφής (PEI) ορίζεται όπως:

- λαμβάνει υπόψη και τις ενεργειακές επιδόσεις των μονάδων που απαιτούνται για τον μετασχηματισμό της αέργου ισχύος μόνο
- έχουν ένα δείκτη που δεν εξαρτάται από αλλά σχετίζεται μόνο με το προϊόν. Ο δείκτης αυτός περιλαμβάνει τόσο απώλειες χωρίς φορτίο

όσο και απώλειες φορτίου, αλλά η εξίσωση γράφεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην απαιτεί ένα συγκεκριμένο σημείο φόρτωσης.

- Αντίθετα, ο δείκτης βρίσκει το σημείο όπου η απώλεια χωρίς φορτίο ισούται με την απώλεια φορτίου και υπολογίζει την τιμή. Αυτή η προσέγγιση έχει ένα πλεονέκτημα έναντι των άλλων, επειδή δεν απαιτεί συνταγογράφηση ή υποδηλώνει σημείο φόρτωσης.

Ταυτόχρονα, λαμβάνοντας υπόψη ότι σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον της αγοράς όλοι οι κατασκευαστές προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν το κόστος τους, προβλέποντας μόνο ελάχιστες τιμές για το PEI κάπως ριψοκίνδυνο.

Στην πραγματικότητα, μπορεί να υπάρχει αναντιστοιχία μεταξύ του λόγου απώλειας φορτίου και απώλειας φορτίου που ελαχιστοποιεί το κόστος του μετασχηματιστή και εκείνο που βελτιστοποιεί την ενεργειακή απόδοση κατά τη διάρκεια της υπηρεσίας (με την προϋπόθεση ότι και στις δύο περιπτώσεις πληρούται η ελάχιστη τιμή PEI).

Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό οι χρήστες μετασχηματιστών να προδιαγράφουν κατάλληλους αριθμούς κεφαλαιοποίησης ή να καθορίζουν ελάχιστες τιμές απόδοσης σε ορισμένους συντελεστές φορτίου προκειμένου να επιτυγχάνεται η υψηλότερη εξοικονόμηση ενέργειας. Η σημασία αυτού του ζητήματος είναι μεγαλύτερη για τις μικρότερες μονάδες, ενώ οι μετασχηματιστές μεγαλύτερης ισχύος τείνουν να είναι ήδη σήμερα σύγχρονοι όσον αφορά την αποδοτικότητα (Μανιάς, 1988).

## **Επίλογος – Συμπεράσματα**

Σκοπός της εν λόγω πτυχιακής εργασίας, ήταν σχετικά η συλλογή, αξιολόγηση και συζήτηση στοιχείων που οριοθετούνται στο πλαίσιο της ανάλυσης βιβλιογραφικών δεδομένων για την ανάλυση των μετασχηματιστών ισχύος και υπολογισμό απωλειών κενού φορτίου.

Αυτό που απορρέει είναι πως η μετατροπή ισχύος από τους μετασχηματιστές γίνεται πάντα με κάποιες απώλειες. Η σχεδίαση των σύγχρονων μετασχηματιστών ισχύος συνήθως υπερβαίνει το 95% σε λειτουργικότητα. Είναι χρήσιμο, ωστόσο, να γνωρίζουμε πού καταλήγει ένα μέρος των απωλειών αυτών και τι προκαλεί το φαινόμενο αυτό.

Αρχικά σημειώνται πως υπάρχουν απώλειες ισχύος που οφείλονται στην αντίσταση των τυλιγμάτων. Αν δε χρησιμοποιούνται υπεραγωγίμα σύρματα, θα υπάρχει πάντα ισχύ διαχεόμενη με τη μορφή θερμότητας μέσα από την αντίσταση των αγωγών που μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Επειδή οι μετασχηματιστές απαιτούν μεγάλα μήκη αγωγού, αυτές οι απώλειες μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας. Αυξάνοντας τις διαστάσεις των τυλιγμάτων, επιτυγχάνουμε μείωση των απωλειών, αλλά με ταυτόχρονη σημαντική αύξηση στο κόστος, το μέγεθος και το βάρος.

Εκτός από τις απώλειες στην αντίσταση, το μέγεθος των απωλειών των μετασχηματιστών ισχύος οφείλεται σε μαγνητικές επιδράσεις στον πυρήνα. Ίσως οι πιο σημαντικές από αυτές τις «απώλειες πυρήνα» είναι οι απώλειες δινορρευμάτων, οι οποίες είναι ωμικές και οφείλονται στη διαδρομή

επαγόμενων ρευμάτων μέσα από τον πυρήνα σιδήρου.

Οι απώλειες ενέργειας στους μετασχηματιστές έχουν την τάση να επιδεινώνονται αυξανόμενης της συχνότητας. Το επιδερμικό φαινόμενο μέσα στα τυλίγματα των αγωγών μειώνει τη διαθέσιμη επιφάνεια διατομής για τη ροή ηλεκτρονίων, έτσι που να αυξάνει την ενεργό αντίσταση με τη συχνότητα και να προκαλεί περισσότερες απώλειες ισχύος μέσω των αντιστάσεων.

Οι μαγνητικές απώλειες πυρήνα αυξάνονται επίσης ραγδαία με τη συχνότητα και έχουμε σοβαρές επιπτώσεις από τα φαινόμενα της υστέρησης και των δινορρευμάτων. Για το λόγο αυτό, οι μετασχηματιστές μεγάλου μεγέθους σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν αποτελεσματικά σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων.

Στα περισσότερα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπου η συχνότητα των γραμμών μεταφοράς είναι πολύ σταθερή, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι η μεγάλη συχνότητα δε μπορεί ποτέ να αποτελεί πρόβλημα. Ωστόσο αποτελεί πρόβλημα, με τη μορφή των αρμονικών που παράγονται από μη γραμμικά φορτία.

Όπως είναι γνωστό τέλος, οι μη ημιτονοειδείς κυματομορφές είναι ισοδύναμες με μια σειρά πολλαπλών ημιτονοειδών κυματομορφών με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες. Σε συστήματα ισχύος, αυτές οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, που σημαίνει ότι θα είναι πάντα υψηλότερες, ποτέ χαμηλότερες, από τη συχνότητα σχεδίασης του μετασχηματιστή



## **Βιβλιογραφία**

- Σ. Ν. Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1988.
- Ι. Προυσαλίδης, «Συμβολή στην ανάπτυξη μαθηματικών εργαλείων για ψηφιακή εξομοίωση της συμπεριφοράς των μετασχηματιστών και διακοπών ισχύος σε ταχέα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα», Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα 1997. Ι. Α. Τεγόπουλος, “Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β: Μόνιμη Κατάσταση”. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- Α. Τσιβγούλη, «Μελέτη γεωμετρίας Μετασχηματιστή με Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων». Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Οκτώβριος 2004.
- Η. Akçay, G. Ece, “Modeling of Hysteresis and Power Losses in Transformer Laminations, ” IEEE Trans. PWRD, Vol. 18, No. 2, pp. 487-492, Apr. 2003.
- E. F. Fuchs, D. Yildirim, W. Mack Grady, “Measurement of Eddy-Current Loss Coefficient PEC-R, Derating of Single-Phase Transformers, and Comparison with K-Factor Approach, ” IEEE Trans. PWRD, Vol. 15, No. 1, pp. 148-154, Jan. 2000.
- A. G. Kladas, J. A. Tegopoulos, “A new scalar potential formulation for 3D Magnetostatics necessitating no source field calculation”. IEEE Trans. on Magn., Vol. 28, No.2, March 1992, pp. 1103-1106.

- D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics – Version 3.0 – User's Manual". March 10, 2001. G. P. Nikishkov, "Introduction to the Finite Element Method". Lecture Notes, UCLA, 2001
- J. Prousalidis, N. D. Hatziaargyriou, A. G. Kladas: "Iron lamination efficient representation in power transformers", Proceedings of the 1st Japanese-Greek Joint Workshop on Superconductivity and Magnetic Materials, pp. 171-176, Athens, 1999.
- J.M. Prousalidis, N.D. Hatziaargyriou, B.C. Papadias: "Representation of hysteresis in 3-phase transformer models for electromagnetic transients", IEE Proceedings in Electric Power Applications, Vol. 143, pp. 331-338, 1996.
- A. B. J. Reece, "Finite Element Methods in Electrical Power Engineering". Oxford University Press, May 2000.
- P. P. Silvester, R. L. Ferrari, "Finite Elements for electrical engineers", Cambridge University Press, 2005

