



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Δοκιμές και Μετρήσεις σε Μετασχηματιστές Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του
Πολύκαρπου Α. Φωτόπουλου

Καθηγητής: Ιωάννης Α. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Αθήνα, Απρίλιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

180

Δοκιμές και Μετρήσεις σε Μετασχηματιστές Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πολύκαρπος Α. Φωτόπουλος

Καθηγητής: Ιωάννης Α. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Γκόνοσ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3^η Απριλίου 2013.

.....
Ι.Α. Σταθόπουλος
Καθηγητής

.....
Φ. Τοπαλής
Καθηγητής

.....
Π. Γεωργιάκης
Λέκτορας

Αθήνα, Απρίλιος 2013

.....
Πολύκαρπος Α. Φωτόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Πολύκαρπος Φωτόπουλος

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 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 τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

**Αφιερώνεται
στην οικογένειά μου**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το έναυσμα για την επιλογή του συγκεκριμένου θέματος της παρούσας εργασίας ήταν η επαγγελματική ενασχόλησή μου με το αντικείμενο των Μετασχηματιστών, αρχικά ως Επόπτη Παραγωγής και κατόπιν ως Υπευθύνου Ποιοτικού Ελέγχου στο εργοστάσιο παραγωγής Μετασχηματιστών Διανομής της Schneider Electric στα Οινόφυτα Βοιωτίας.

Στο 1^ο κεφάλαιο αναφέρεται η θεωρία των Μετασχηματιστών και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά αυτών, όπως π.χ. η τάση βραχυκύκλωσης, οι απώλειες και οι συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων. Εκτός από την αναφορά των χαρακτηριστικών αυτών, γίνεται περιγραφή των αιτιών δημιουργίας των απωλειών και του θορύβου αλλά και των επιπτώσεων του βραχυκυκλώματος.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα κύρια μέρη από τα οποία αποτελούνται οι Μετασχηματιστές όπως είναι ο πυρήνας, το τύλιγμα των πηνίων και το λάδι. Επίσης, περιγράφονται τα είδη των επιμέρους υλικών (χάλυβας, χαλκός και αλουμίνιο, ορυκτέλαιο) και αναλύεται η επίδρασή τους στα χαρακτηριστικά των Μετασχηματιστών (π.χ. στις απώλειες, στον θόρυβο).

Στο 3^ο κεφάλαιο απεικονίζονται, μέσω φωτογραφιών που ελήφθησαν στο εργοστάσιο της Schneider Electric, τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας που ακολουθείται για την κατασκευή Μετασχηματιστών και παράλληλα γίνεται αναφορά σε γενικότερα κατασκευαστικά θέματα που έχουν επίδραση στα αποτελέσματα των δοκιμών των Μετασχηματιστών.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται και αναλύονται οι δοκιμές που εκτελούνται γενικά σε εργοστάσιο παραγωγής Μετασχηματιστών μετά την ολοκλήρωση κατασκευής και πριν την αποστολή αυτών στον πελάτη. Έτσι, στη παρούσα εργασία δεν αναφέρονται και δεν αναλύονται δοκιμές και μετρήσεις των πρώτων υλών και των ημιέτοιμων προϊόντων της παραγωγικής διαδικασίας όπως είναι τα πηνία και οι πυρήνες.

Λέξεις κλειδιά

Μετασχηματιστές Ισχύος, Δοκιμές και Μετρήσεις, Παραγωγική Διαδικασία

ABSTRACT

The trigger for choosing the topic of this thesis was my professional involvement with the subject of transformers, first as Production Supervisor and later as a Quality Control Responsible in the plant of Schneider Electric, in which Distribution Transformers are being manufactured, at Inofyta of Viotia.

In the 1st chapter, the theory of Transformers is mentioned and their characteristics, such as short-circuit voltage, losses and the connections of the windings, are being referred. Apart from the reference to these characteristics, the causes of the losses, the noise and the effects of the short-circuit are described.

In the 2nd chapter, the main parts, from which the Transformers are being consisted, are described, like the core, the winding of the coils and the oil. Also, the materials such as steel, copper or aluminum and mineral oil are described and their effects to the characteristics of the Transformers (for example in losses and in noise) are analyzed.

In the 3rd chapter, the stages of the manufacturing process which is being followed by the factory of Schneider Electric are illustrated by photographs while references are made to broader manufacturing issues that have an impact on the results of the tests on the transformers.

In the 4th chapter, the tests that are being conducted in a manufacturing plant of Transformers, upon the completion of their fabrication and before their shipment to the client, are described and analyzed. Thus, in this thesis, tests and measurements of the raw materials and the semi-finished products, like the coils and the cores, of the manufacturing process are not discussed here.

Key words

Power Transformers, Tests and Measurements, Manufacturing Process

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κο. Ι. Σταθόπουλο, ο οποίος με εμπιστεύτηκε να φέρω εις πέρας τη διπλωματική αυτή εργασία , ενώ θερμές ευχαριστίες οφείλω και στον κο. Ιωάννη Γκόνο, ο οποίος με την άρτια επιστημονική του κατάρτιση και την ουσιαστική καθοδήγησή του με βοήθησε σημαντικά και ουσιαστικά στη συγγραφή της εργασίας αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Προϊστάμενο Παραγωγής του εργοστασίου κατασκευής μετασχηματιστών διανομής της εταιρίας Schneider Electric κο. Γεώργιο Περρή για τις γνώσεις που μου προσέφερε και για την άριστη συνεργασία μας τόσο κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής απασχόλησής μου στο συγκεκριμένο εργοστάσιο όσο και κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους εργαζόμενους του εργοστασίου των Οινοφύτων της Schneider Electric για κάθε πληροφορία και γνώση που μου προσέφεραν προκειμένου να ολοκληρωθεί η εργασία αυτή.

Π. Α. Φωτόπουλος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θεωρία και Χαρακτηριστικά Μετασχηματιστών | 19 |
| 1.1 Γενικά | 19 |
| 1.2 Μαγνητικά Κυκλώματα | 19 |
| 1.2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα | 21 |
| 1.2.2 Σχέδια Μαγνητικών κυκλωμάτων | 22 |
| 1.3 Χαρακτηριστικά Μετασχηματιστών | 25 |
| 1.3.1 Ονομαστική Ισχύς | 25 |
| 1.3.2 Κανονικές συνθήκες λειτουργίας | 25 |
| 1.3.3 Ανύψωση Θερμοκρασίας | 25 |
| 1.3.4 Τάση βραχυκύκλωσης | 26 |
| 1.3.5 Απώλειες εν κενώ | 26 |
| 1.3.6 Απώλειες φορτίου | 29 |
| 1.3.6.1 Ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων | 29 |
| 1.3.6.2 Απώλειες λόγω δινορρευμάτων σε αγωγούς | 29 |
| 1.3.6.3 Απώλειες σε δομικά μέρη του Μ/Σ | 30 |
| 1.3.7 Ονομαστικές τάσεις | 30 |
| 1.3.8 Συνδεσμολογία Τυλιγμάτων | 31 |
| 1.3.9 Θόρυβος | 31 |
| 1.3.9.1 Θόρυβος του πυρήνα | 32 |
| 1.3.9.2 Θόρυβος Μετασχηματιστή υπό φορτίο | 32 |
| 1.3.9.3 Θόρυβος από ανεμιστήρες και αντλίες | 32 |
| 1.3.10 Ρεύμα βραχυκύκλωσης | 34 |
| 1.3.10.1 Θερμικές επιπτώσεις | 34 |
| 1.3.10.2 Μηχανικές επιπτώσεις | 35 |
| 1.3.11 Ρεύμα μαγνήτισης | 38 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 41 |

| | |
|--|------------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Υλικά Μετασχηματιστών | 43 |
| 2.1 Πυρήνας | 43 |
| 2.1.1 Χάλυβας θερμής έλασης | 44 |
| 2.1.2 Χάλυβας προσανατολισμένων κόκκων | 45 |
| 2.1.3 Χάλυβας υψηλής διαπερατότητας | 49 |
| 2.1.4 Χάλυβας με αναδιαμορφωμένες δομές | 50 |
| 2.1.5 Άμορφος χάλυβας | 52 |
| 2.1.6 Μικροκρυσταλλικός χάλυβας | 53 |
| 2.2 Τύλιγμα πηνίου | 54 |
| 2.3 Μόνωση Μ/Σ | 57 |
| 2.3.1 Μονωτικό χαρτί | 58 |
| 2.3.2 Λάδι Μετασχηματιστών | 63 |
| 2.3.2.1 Το λάδι ως ψυκτικό μέσο | 63 |
| 2.3.2.2 Το λάδι ως μονωτικό | 64 |
| 2.3.2.3 Άλλα διηλεκτρικά υγρά | 69 |
| Βιβλιογραφία | 71 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Διαδικασία παραγωγής Μετασχηματιστών Ισχύος | 75 |
| 3.1 Γενικά | 75 |
| 3.2 Μεταλλικά μέρη Μ/Σ | 76 |
| 3.3 Κατασκευή πηνίου | 87 |
| 3.4 Κατασκευή πυρήνα | 90 |
| 3.5 Συναρμολόγηση | 95 |
| 3.6 Ξήρανση και πλήρωση με λάδι των Μ/Σ | 96 |
| 3.7 Ποιοτικός έλεγχος – Δοκιμαστήριο | 97 |
| 3.8 Αποπεράτωση Μ/Σ | 98 |
| 3.9 Δοκιμές δοκιμαστηρίου | 99 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 108 |

| | |
|---|------------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Δοκιμές Μετασχηματιστών Ισχύος | 109 |
| 4.1 Γενικά | 109 |
| 4.1.1 Γενικές απαιτήσεις δοκιμών | 110 |
| 4.2 Μέτρηση αντίστασης τυλιγμάτων | 112 |
| 4.2.1 Γενικά περί μετρήσεων αντίστασης | 113 |
| 4.2.2 Μέθοδοι μέτρησης αντίστασης | 115 |
| 4.2.2.1 Μέθοδος γέφυρας | 115 |
| 4.2.2.2 Μέθοδος βολτομέτρου-αμπερομέτρου | 117 |
| 4.2.3 Κρύα αντίσταση | 119 |
| 4.2.4 Αβεβαιότητα μετρήσεων αντίστασης | 120 |
| 4.3 Μέτρηση λόγου μετασχηματισμού και έλεγχος ομάδας ζεύξης | 121 |
| 4.3.1 Λόγος μετασχηματισμού – Βασική θεωρία | 121 |
| 4.3.1.1 Μέθοδοι μέτρησης λόγου μετασχηματισμού | 121 |
| 4.3.1.2 Μέτρηση λόγου μετασχηματισμού για τριφασικούς Μ/Σ | 124 |
| 4.3.1.3 Μέτρηση αβεβαιότητας | 125 |
| 4.3.2 Έλεγχος ομάδας ζεύξης | 125 |
| 4.4 Μέτρηση τάσης βραχυκύκλωσης και απωλειών φορτίου | 128 |
| 4.4.1 Κύκλωμα μέτρησης – Γενικά | 128 |
| 4.4.2 Αβεβαιότητα μέτρησης απωλειών φορτίου | 129 |
| 4.4.3 Διορθώσεις στις μετρούμενες απώλειες φορτίου | 130 |
| 4.4.3.1 Διόρθωση γωνίας φάσης συμβατικού συστήματος μέτρησης απωλειών φορτίου | 131 |
| 4.4.3.2 Διόρθωση πλάτους | 132 |
| 4.4.3.3 Διόρθωση των απωλειών λόγω του συνδέσμου βραχυκύκλωσης | 133 |
| 4.4.4 Ειδικά μέτρα | 134 |
| 4.4.4.1 Μέτρηση σε χαμηλότερη τιμή ρεύματος από το ονομαστικό | 134 |
| 4.4.4.2 Διάρκεια δοκιμής | 134 |
| 4.4.4.3 Βελτιστοποίηση της κλίμακας των μετρητικών οργάνων | 135 |
| 4.4.5 Κύκλωμα μέτρησης τριφασικών Μ/Σ | 135 |
| 4.4.5.1 Μέθοδος τριών βαττομέτρων | 135 |
| 4.4.5.2 Μέθοδος δύο βαττομέτρων | 136 |
| 4.4.6 Προηγμένα μετρητικά συστήματα | 136 |
| 4.4.6.1 Ενισχυμένο συμβατικό σύστημα | 136 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.4.6.2 | Προηγμένοι μετατροπείς τάσης και ρεύματος | 136 |
| 4.4.6.3 | Μέθοδος γέφυρας | 138 |
| 4.4.7 | Ασυμμετρία απωλειών φορτίου | 138 |
| 4.4.8 | Διόρθωση των απωλειών φορτίου στη θερμοκρασία αναφοράς | 139 |
| 4.4.9 | Αλληλεξάρτηση των απωλειών φορτίου με τη συχνότητα | 140 |
| 4.4.10 | Τάση βραχυκύκλωσης | 141 |
| 4.4.10.1 | Αλληλεξάρτηση της τάσης βραχυκύκλωσης και του ρεύματος φορτίου | 142 |
| 4.4.10.2 | Αλληλεξάρτηση της τάσης βραχυκύκλωσης και της συχνότητας | 142 |
| 4.4.10.3 | Αλληλεξάρτηση της τάσης βραχυκύκλωσης και της θερμοκρασίας του τυλίγματος | 142 |
| 4.4.10.4 | Μέτρηση τάσης βραχυκύκλωσης | 143 |
| 4.5 | Μέτρηση απωλειών εν κενώ (σιδήρου) και ρεύματος μαγνήτισης | 144 |
| 4.5.1 | Παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος των απωλειών σιδήρου | 144 |
| 4.5.1.1 | Επαγωγή | 144 |
| 4.5.1.2 | Πλάτος τάσης διέγερσης | 144 |
| 4.5.1.3 | Κυματομορφή τάσης διέγερσης | 144 |
| 4.5.1.4 | Διαμόρφωση πυρήνα | 146 |
| 4.5.1.5 | Υλικό πυρήνα | 147 |
| 4.5.1.6 | Συχνότητα | 147 |
| 4.5.1.7 | Κατασκευή του πυρήνα | 147 |
| 4.5.1.8 | Θερμοκρασία πυρήνα | 147 |
| 4.5.1.9 | Επίδραση κρουστικών δοκιμών στη μέτρηση των απωλειών σιδήρου | 148 |
| 4.5.1.10 | Σταθεροποίηση πυρήνα | 149 |
| 4.5.2 | Μετρητικά κυκλώματα μέτρησης απωλειών σιδήρου και ρεύματος μαγνήτισης | 149 |
| 4.5.2.1 | Συνδέσεις τριών βαττομέτρων | 149 |
| 4.5.2.2 | Συνδέσεις δύο βαττομέτρων | 150 |
| 4.5.2.3 | Συνδέσεις βολτομέτρου | 151 |
| 4.5.2.4 | Σύγχρονα μετρητικά συστήματα | 152 |
| 4.6 | Δοκιμή εφαρμοζόμενης τάσης | 152 |
| 4.6.1 | Μετρητικός εξοπλισμός | 153 |
| 4.6.2 | Αβεβαιότητα | 154 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 4.7 | Δοκιμή επαγόμενης τάσης | 155 |
| 4.7.1 | Δοκιμή επαγόμενης τάσης μικρής διάρκειας (ACSD) για Μ/Σ με τυλίγματα ομοιόμορφης μόνωσης | 156 |
| 4.7.1.1 | Μ/Σ με $U_m \leq 72,5$ kV | 156 |
| 4.7.1.2 | Μ/Σ με $U_m > 72,5$ kV | 157 |
| 4.7.2 | Δοκιμή επαγόμενης τάσης μικρής διάρκειας (ACSD) για βαθμωτά μεμονωμένους Μ/Σ | 158 |
| 4.7.3 | Δοκιμή επαγόμενης τάσης μακράς διάρκειας (ACLD) για ομοιόμορφα ή βαθμωτά μεμονωμένους Μ/Σ | 159 |
| 4.8 | Δοκιμή λειτουργίας του μηχανισμού αλλαγής λήψεων υπό φορτίο | 160 |
| 4.9 | Δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας | 161 |
| 4.9.1 | Παραδοχές | 161 |
| 4.9.2 | Μέθοδοι δοκιμής | 162 |
| 4.9.2.1 | Μέθοδος “back-to-back” | 162 |
| 4.9.2.2 | Δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασία κατά την διάρκεια της λειτουργίας | 162 |
| 4.9.2.3 | Μέθοδος βραχυκυκλώματος | 162 |
| 4.9.2.3.1 | Μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα | 164 |
| 4.9.2.3.2 | Μέτρηση ανύψωσης θερμοκρασίας λαδιού | 164 |
| 4.9.2.3.3 | Μέτρηση ανύψωσης μέσης θερμοκρασίας τυλιγμάτων | 165 |
| 4.9.3 | Διάρκεια δοκιμής | 167 |
| 4.10 | Δοκιμή εξωτερικής τάσης (Lightning impulse voltage test) και Δοκιμή εσωτερικής τάσης (Switching impulse voltage test) | 169 |
| 4.10.1 | Δοκιμή εξωτερικής τάσης (Lightning impulse voltage test) | 170 |
| 4.10.2 | Δοκιμή εσωτερικής τάσης (Switching impulse voltage test) | 171 |
| 4.10.3 | Κρουστικές κυματομορφές | 171 |
| 4.10.3.1 | Εξωτερική κρουστική | 171 |
| 4.10.3.2 | Εξωτερική κρουστική αποκομμένη στην ουρά | 172 |
| 4.10.3.3 | Εξωτερική κρουστική αποκομμένη στο μέτωπο | 173 |
| 4.10.3.4 | Εσωτερική κρουστική | 173 |
| 4.10.4 | Παραγωγή υψηλών κρουστικών τάσεων | 174 |
| 4.10.4.1 | Παραγωγή αποκομμένων εξωτερικών κρουστικών | 175 |
| 4.10.4.2 | Παραγωγή αποκομμένων εξωτερικών κρουστικών | 175 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 4.10.5 | Συνδεσμολογία κυκλώματος δοκιμής | 176 |
| 4.10.5.1 | Εξωτερική κρουστική | 177 |
| 4.10.5.2 | Εσωτερική κρουστική | 178 |
| 4.10.6 | Μέτρηση υψηλών κρουστικών τάσεων | 178 |
| 4.10.7 | Μέτρηση κρουστικού ρεύματος | 181 |
| 4.11 | Προσδιορισμός των χωρητικοτήτων μεταξύ τυλιγμάτων-γη και μεταξύ των τυλιγμάτων | 181 |
| 4.12 | Μέτρηση αντίστασης μηδενικής ακολουθίας | 183 |
| 4.12.1 | Γενικά | 183 |
| 4.12.2 | Ορισμός της ομοπολικής αντίστασης | 184 |
| 4.12.3 | Είδη ομοπολικών αντιστάσεων | 185 |
| 4.12.4 | Διαδικασία μέτρησης | 186 |
| 4.13 | Δοκιμή βραχυκυκλώματος | 188 |
| 4.13.1 | Συνθήκες δοκιμής | 188 |
| 4.13.2 | Κύκλωμα δοκιμής | 189 |
| 4.13.3 | Απαιτήσεις δοκιμής | 190 |
| 4.13.3.1 | Ρεύμα δοκιμής | 190 |
| 4.13.3.1.1 | Συμμετρικό ρεύμα βραχυκυκλώματος | 190 |
| 4.13.3.1.2 | Ασύμμετρο ρεύμα δοκιμής κορυφής \hat{i} | 191 |
| 4.13.3.2 | Ανοχές ρευμάτων | 192 |
| 4.13.3.3 | Συχνότητα δοκιμής | 192 |
| 4.13.4 | Διαδικασία δοκιμής | 192 |
| 4.13.5 | Εντοπισμός σφαλμάτων, αξιολόγηση αποτελεσμάτων | 193 |
| 4.14 | Προσδιορισμός των επιπέδων θορύβου | 194 |
| 4.14.1 | Μέτρηση και μετρητικό κύκλωμα | 194 |
| 4.14.2 | Διαδικασία μέτρησης | 196 |
| 4.14.2.1 | Μετρητικά σημεία και όργανα μέτρησης | 196 |
| 4.14.2.2 | Υπολογισμός της περιβαλλοντολογικής διόρθωσης K | 197 |
| 4.14.2.3 | Μέτρηση της στάθμης του υπόβαθρου θορύβου | 198 |
| 4.14.3 | Αβεβαιότητα μέτρησης | 200 |
| 4.15 | Μέτρηση αρμονικών του ρεύματος μαγνήτισης | 200 |
| 4.15.1 | Κύκλωμα μέτρησης | 202 |
| 4.15.2 | Διαδικασία μέτρησης | 203 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 4.16 | Μέτρηση της απορροφημένης ισχύς από ανεμιστήρες και κινητήρες αντλιών λαδιού | 203 |
| 4.17 | Μέτρηση της αντίστασης της μόνωσης των τυλιγμάτων ως προς γη | 204 |
| | 4.17.1 Μετρητικό κύκλωμα - Διαδικασία μέτρησης | 206 |
| | 4.17.2 Κατηγορίες δοκιμών μέτρησης αντίστασης μόνωσης | 206 |
| 4.18 | Μέτρηση εφαπτομένης δ των χωρητικοτήτων του μονωτικού συστήματος | 208 |
| | 4.18.1 Κύκλωμα μέτρησης | 208 |
| | 4.18.2 Μέτρηση με τη χρήση γέφυρας | 208 |
| | 4.18.3 Μέτρηση με τη μέθοδο Doble | 209 |
| | Βιβλιογραφία | 219 |
| | | |
| | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Υπολογισμός αβεβαιοτήτων | 223 |
| | 5.1 Αντικείμενο μετρήσεων | 223 |
| | 5.2 Υπολογισμός αβεβαιότητας της μέτρησης της αντίστασης της χαμηλής τάσης | 224 |
| | 5.3 Υπολογισμός αβεβαιότητας της μέτρησης της αντίστασης της μέσης τάσης | 226 |
| | 5.4 Υπολογισμός αβεβαιότητας της μέτρησης του λόγου μετασχηματισμού | 228 |
| | 5.5 Υπολογισμός αβεβαιότητας της μέτρησης των απωλειών εν κενώ | 229 |
| | 5.6 Υπολογισμός αβεβαιότητας της μέτρησης των απωλειών φορτίου | 230 |
| | Βιβλιογραφία | 232 |
| | | |
| | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα – Επόμενη ημέρα | 233 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

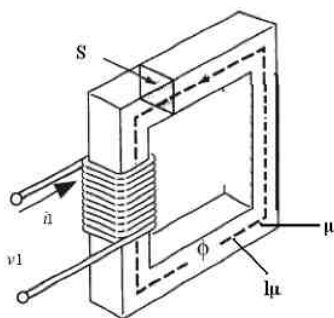
Θεωρία και Χαρακτηριστικά Μετασχηματιστών

1.1 Γενικά

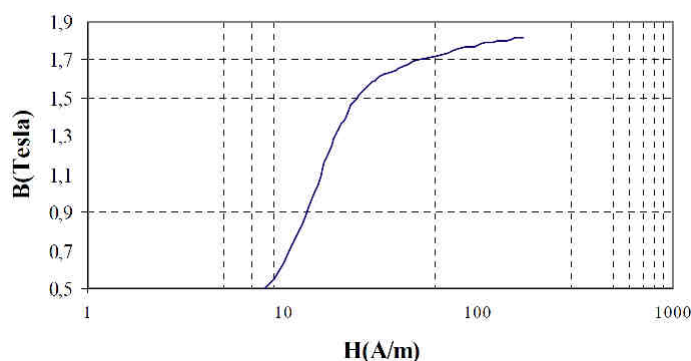
Ο Μετασχηματιστής (Μ/Σ) Ισχύος είναι μία συσκευή η οποία μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια και μετατρέπει μια ορισμένη τάση σε μία άλλη τάση χωρίς αλλαγή της συχνότητας. Έχει δύο ή παραπάνω τυλίγματα συνεξυγμένα μέσω ενός κοινού μαγνητικού κυκλώματος. Το ένα τυίγμα ονομάζεται πρωτεύον και θεωρείται ως η είσοδος της ηλεκτρικής ισχύος, ενώ το άλλο τυίγμα, από το οποίο εξέρχεται η ηλεκτρική ισχύς, ονομάζεται δευτερεύον. Στις ειδικές περιπτώσεις μετασχηματιστών που μπορεί να υπάρχει και τρίτο τυίγμα, αυτό ονομάζεται τριτεύον.

1.2 Μαγνητικά Κυκλώματα

Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον θεωρούνται τυλιγμένα γύρω από τον σιδερένιο πυρήνα ενός μαγνητικού κυκλώματος (σχ. 1.1) το οποίο διαρρέεται από μαγνητική ροή (ϕ). Ο πυρήνας αυτός αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό μαγνητικής διαπερατότητας μ (H/m) και η συμπεριφορά του οποίου φαίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης του (σχ. 1.2), ενώ τα μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν αλλά και η αντιστοιχία τους με τα ηλεκτρικά μεγέθη αναφέρονται στον πίνακα 1.1.



Σχήμα 1.1 – Μαγνητικό κύκλωμα



Σχήμα 1.2 – Καμπύλη μαγνήτισης

| Μαγνητικά κυκλώματα | | | Ηλεκτρικά κυκλώματα | | |
|---------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Σύμβολο | Όνομα | Μονάδες | Σύμβολο | Όνομα | Μονάδες |
| Φ | Μαγνητική ροή | Wb | i | Ρεύμα | A |
| B | Μαγνητική επαγωγή | Wb/m ² | J | Πυκνότητα ρεύματος | A/m ² |
| H | Ένταση μαγνητικού πεδίου | At/m | E | Ένταση ηλεκτρικού Πεδίου | V/m |
| F | Μαγνητεγερτική δύναμη | At | V | Τάση | V |
| μ | Μαγνητική διαπερατότητα | H/m | γ | Αγωγιμότητα | (Ω m) ⁻¹ |
| R | Μαγνητική αντίσταση | At/Wb | R | Ηλ. αντίσταση | Ω |

Πίνακας 1.1

Στη καμπύλη μαγνήτισης φαίνεται ότι στην αρχή μία μικρή αύξηση της έντασης του πεδίου έντασης H προκαλεί μεγάλη αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B. Η περιοχή που παρατηρείται το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ακόρεστη.

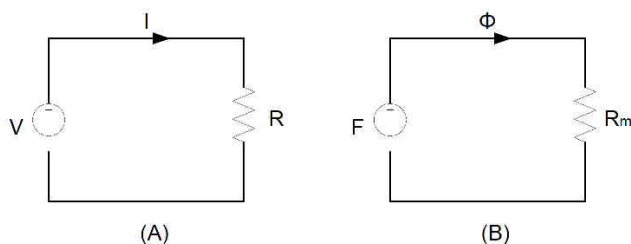
Μετά από συγκεκριμένο σημείο της καμπύλης, μία επιπλέον αύξηση της έντασης του πεδίου προκαλεί μία σχετικά μικρότερη αύξηση μαγνητικής επαγωγής B. Αυτή η περιοχή είναι η περιοχή μετάβασης από την ακόρεστη στην κορεσμένη περιοχή και στην οποία η καμπύλη τείνει να γίνει οριζόντια.

Η χρήση σιδηρομαγνητικών υλικών στους Μ/Σ έχει το πλεονέκτημα ότι για συγκεκριμένη ένταση πεδίου H, εμφανίζεται πολλαπλάσια μαγνητική ροή συγκριτικά με αυτή που θα παρουσιαζόταν αν υπήρχε αέρας στη θέση του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Το πηνίο είναι τυλιγμένο γύρω από τον πυρήνα και αποτελείται από N σπείρες μονωμένες ηλεκτρικά και μεταξύ τους και ως προς τον πυρήνα.

1.2.1 Ισοδύναμο κύκλωμα

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μαγνητικού κυκλώματος του σχ. 1.1 απεικονίζεται στο σχήμα 1.3, με τα μαγνητικά μεγέθη να είναι σε αντιστοιχία με τα ηλεκτρικά μεγέθη όπως ακριβώς παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.



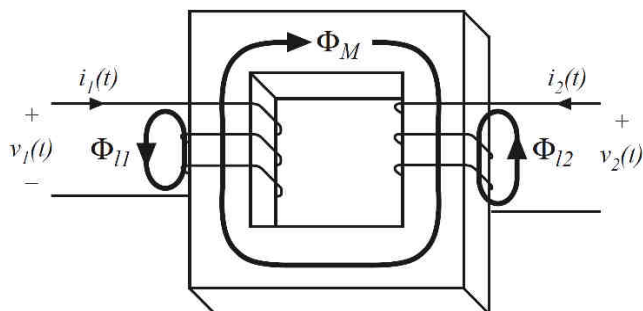
Σχ. 1.3 – Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μαγνητικού κυκλώματος

(A) Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα

(B) Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα του σχήματος (A)

Ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής Φ ενός μαγνητικού κυκλώματος με την βοήθεια ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων γίνεται κατά προσέγγιση, γιατί:

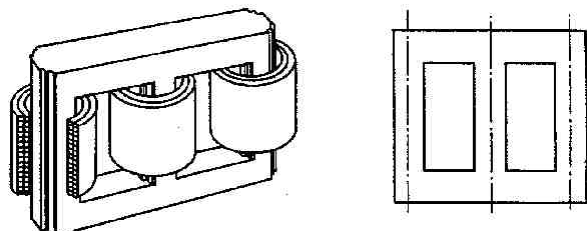
- στη πραγματικότητα ένα μικρό μέρος της ροής ξεφεύγει από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει (ροή σκεδάσεως-βλ. σχ.1.4) αλλά έγινε η παραδοχή ότι η ροή είναι συγκεντρωμένη και κινείται μέσα στον πυρήνα.
- για τον υπολογισμό της μαγνητικής αντίστασης θεωρούνται σταθερά το μέσο μήκος και η διατομή του πυρήνα.
- η μαγνητική διαπερατότητα θεωρείται σταθερή αν και στην πραγματικότητα εξαρτάται από την τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται στο υλικό και συνεπώς και από τη ροή.



Σχ. 1.4 – Φ_{11} , Φ_{12} : Ροές σκεδάσεως

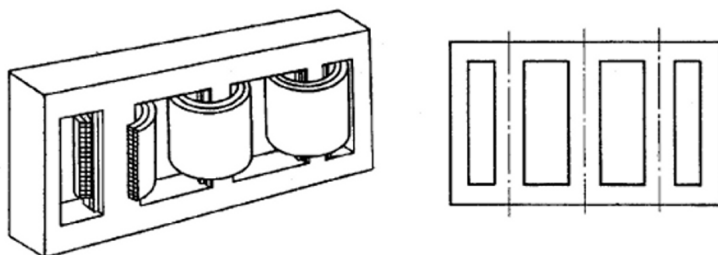
1.2.2 Σχέδια Μαγνητικών κυκλωμάτων

Το πιο κοινό σχέδιο για την κατασκευή του μαγνητικού κυκλώματος του τριφασικού Μ/Σ είναι του τύπου πυρήνα με τρία σκέλη όπου τρία παράλληλα, κάθετα σκέλη είναι συνδεδεμένα στο άνω και κάτω άκρο με οριζόντια ζυγώματα (σχ. 1.5)



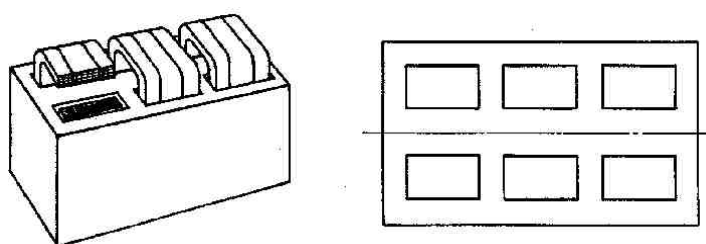
Σχ. 1.5 – Μαγνητικό κύκλωμα τύπου πυρήνα τριών σκελών [1.1]

Το μαγνητικό κύκλωμα τύπου πυρήνα με πέντε σκέλη (σχ. 1.6) έχει τρία σκέλη με περιελιγμένα τυλίγματα και δύο μη-περιελιγμένα πλευρικά σκέλη μικρότερης διατομής. Τα ζυγώματα που συνδέουν και τα πέντε σκέλη επίσης είναι μειωμένης διατομής σε σύγκριση με τα περιελιγμένα σκέλη.



Σχ. 1.6 – Μαγνητικό κύκλωμα τύπου πυρήνα πέντε σκελών [1.1]

Το συμβατικό τριφασικό σχέδιο του τύπου μανδύα έχει έναν σκελετό με τρία περιελιγμένα σκέλη να είναι οριζόντια και να έχουν μία κοινή κεντρική γραμμή (σχήμα 1.7). Εντός των τυλιγμάτων, τα σκέλη του πυρήνα, έχουν ορθογώνια διατομή και τα συνδεδεμένα μέρη του μαγνητικού κυκλώματος περικλείουν τα τυλίγματα σαν ένα μανδύα.



Σχ. 1.7 – Μαγνητικό κύκλωμα τύπου μανδύα [1.1]

Η πιο χρησιμοποιημένη κατασκευή για τριφασικό Μ/Σ μικρής και μεσαίας ονομαστική ισχύος είναι εκείνη του τύπου πυρήνα. Για κάθε φάση, η ροή κάθε σκέλους επιστρέφει μέσω των ζυγώματων και των δύο άλλων σκελών (ίση ποσότητα ροής ρέει στα σκέλη και στα ζυγώματα). Σε αυτή τη κατασκευή, σκέλη και ζυγώματα έχουν συνήθως το ίδιο μέγεθος, αν και σε κάποιες περιπτώσεις, τα ζυγώματα κατασκευάζονται με 5% επιπλέον μέγεθος σε σύγκριση με τα σκέλη ώστε να μειωθούν οι απώλειες σιδήρου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αύξηση του μεγέθους των ζυγώματων κατά 5% μειώνει την πυκνότητα μαγνητικής ροής στα ζυγώματα κατά 5%, μειώνει την αναλογία watts/kg περισσότερο από 5% αλλά ταυτόχρονα αυξάνει το βάρος των ζυγώματων κατά 5%. Επίσης μπορεί να προκαλέσει την επιπρόσθετη αύξηση των απωλειών εξαιτίας των μη τέλειων συνδέσεων των ελασμάτων του πυρήνα στα σημεία των ενώσεων των ζυγώματων και σκελών, με αποτέλεσμα την πιθανότητα η συνολική μείωση των απωλειών να μην είναι σημαντική.

Όμως, αυτό το επιπλέον μέγεθος των ζυγώματων ίσως βελτιώνει την απόδοση σε συνθήκες υπερδιέγερσης. Σε παρόμοιες συνθήκες, οι απώλειες δινορρευσμάτων μειώνονται κατά ένα βαθμό εξαιτίας του κορεσμού του πυρήνα.

Ο τύπος τριών σκελών έχει έμφυτη τριφασική ασυμμετρία με επακόλουθο την ανισότητα των ρευμάτων μαγνήτισης και των απωλειών στις τρεις φάσεις. Μπορούμε να δημιουργήσουμε συμμετρικό πυρήνα με το να τον συνδέσουμε ως αστέρα ή τρίγωνο έτσι ώστε τα τυλίγματα των τριών φάσεων να είναι μεταξύ τους ηλεκτρικά και πραγματικά μετατοπισμένα κατά 120 μοίρες. Αυτή η κατασκευή έχει ως επακόλουθο την μείωση του βάρους του πυρήνα και του μεγέθους της δεξαμενής αλλά σπάνια πια χρησιμοποιείται εξαιτίας της πολυπλοκότητας αυτής.

Σε μεγάλους Μ/Σ ισχύος, με στόχο την μείωση του ύψους τους οπότε και την καλύτερη μεταφορά αυτών, χρησιμοποιείται ο τύπος των πέντε σκελών. Το μαγνητικό μήκος που έχει ως περίμετρο την περιοχή που σχηματίζεται από την τομή του ακριανού σκέλους και του ζυγώματος έχει μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση σε σύγκριση με αυτό που έχει ως περίμετρο το κύριο μέρος του ζυγώματος. Έτσι, όταν η μαγνητική ροή αυξάνεται, πρώτα κινείται στη διαδρομή της μικρότερης μαγνητικής αντίστασης του κύριου μέρους του ζυγώματος. Επειδή όμως το κύριο μέρος του ζυγώματος δεν είναι αρκετά μεγάλο να μεταφέρει όλη τη ροή από τα σκέλη, επέρχεται κορεσμός και επιβάλλει στην απομένουσα ροή να κινηθεί προς το σκέλος. Αλλά επειδή εκείνη η στιγμή συμβαίνει χρονικά κοντά στη κορυφή της μαγνητικής ροής και εξαιτίας του ότι η αναλογία της μαγνητικής αντίστασης των δύο αυτών διαδρομών μεταβάλλεται λόγω των μη-γραμμικών ιδιοτήτων του πυρήνα, οι

μαγνητικές ροές και στο κύριο μέρος του ζυγώματος και στη περιοχή που σχηματίζεται από την τομή του ακριανού σκέλους με το ζύγωμα έχουν κίνηση μη-ημιτονοειδή αν και η ροή στο κύριο μέρος του σκέλους μεταβάλλεται ημιτονοειδώς.

Περισσότερες απώλειες εμφανίζονται στη περιοχή της τομής ζυγωμάτων και σκελών εξαιτίας των αρμονικών της ροής. Για την αντιστάθμιση των παραπάνω αυτών απωλειών, είναι συνήθης πρακτική η κύρια περιοχή του ζυγώματος και οι περιοχές που σχηματίζονται από τις τομές των ακριανών σκελών και των ζυγωμάτων να περιορίζονται συγκριτικά με το κύριο μέρος των σκελών κατά 60% και κατά 50% αντίστοιχα.

Η ομοπολική αντίσταση των πέντε σκελών είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των τριών σκελών εξαιτίας της χαμηλής μαγνητικής αντίστασης της ακολουθούμενης διαδρομής (δηλαδή των ζυγωμάτων και των “εσωτερικών σκελών”) από την μαγνητική ροή μηδενικής ακολουθίας και εφόσον η εφαρμοζόμενη τάση κατά την διάρκεια της δοκιμής της μέτρησης της ομοπολικής αντίστασης είναι τόσο μικρή όσο απαιτείται ώστε τα ζυγώματα και τα άκρα των σκελών να μην είναι κορεσμένα, η τιμή της ομοπολικής αυτής αντίστασης είναι μικρότερη αλλά πλησίον της τιμής της αντίστασης της θετικής ακολουθίας [1.2]

Φαινόμενο σιδηροσυντονισμού

Το φαινόμενο σιδηροσυντονισμού παρουσιάζεται κατά την απόξεση γραμμής μεταφοράς με συνδεδεμένο στο απομακρυσμένο άκρο της μετασχηματιστή σε κενή λειτουργία. Στη γραμμή, μετά την απόξεσή της, παραμένει παγιδευμένο στη χωρητικότητά της ένα φορτίο. Η γραμμή έχει οδό διαρροής του παραμένοντος φορτίου της, μέσω κυρίως, της μαγνητίζουσας αντίδρασης του Μ/Σ. Εντούτοις, όσο ο πυρήνας του Μ/Σ είναι μη κεκορεσμένος παρουσιάζει πολύ μεγάλη επαγωγική αντίδραση και η διαρροή είναι πολύ βραδεία, αλλά όταν κορεσθεί από τις μέγιστες τιμές της παραμένουσας τάσης, η οποία αναπτύσσει αυξημένη μαγνητική ροή στο Μ/Σ, ο πυρήνας κορέννυται και παρουσιάζει απότομη μείωση της αντίστασής του. Αυτή ακολουθείται από απότομη αύξηση του ρεύματος της γραμμής και ταχεία εκφόρτιση μέσω του Μ/Σ. Όταν αλλάξει η πολικότητα της τάσης ο πυρήνας βγαίνει από τον κορεσμό, το ρεύμα μειώνεται δραστικά, η τάση ισορροπεί και αυξάνει λόγω επαναφόρτισης της χωρητικότητας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται από μόνη της, μέχρι την απόσβεση των κυμάτων ή την εκφόρτιση της γραμμής. Το μέγεθος των αναπτυσσόμενων υπερτάσεων άρα και η διατήρηση του φαινομένου εξαρτάται εξαρτάται από το βαθμό του σιδηροσυντονισμού που αναπτύσσεται μεταξύ γραμμής και Μ/Σ. Στη μη γραμμικότητα της αυτεπαγωγής μαγνητίσεως του Μ/Σ, η

οποία οφείλεται στη μαγνητική χαρακτηριστική του πυρήνα, οφείλεται στη περίπτωση αυτή ο όρος σιδηροσυντονισμός [1.3]

Στην εργασία [1.4] εξετάστηκε η μεταβατική ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του πυρήνα τριφασικού μετασχηματιστή 400/275kV μεταξύ δύο διαφορετικών μαγνητικών κυκλωμάτων, με πέντε και με τρία σκέλη. Βάσει αυτής της μελέτης, εξήχθη το συμπέρασμα ότι ο πυρήνας των πέντε σκελών είναι πιο ευπαθής στον σιδηροσυντονισμό. Επιπρόσθετα, δείχτηκε ότι τα σκέλη του πυρήνα είναι τα μέρη αυτού που μπορούν να κορεστούν πιο εύκολα.

1.3 Χαρακτηριστικά Μετασχηματιστών

1.3.1 Ονομαστική Ισχύς (Rated Power)

Όταν στο πρωτεύον του Μ/Σ εφαρμόζεται η ονομαστική τάση και στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος ρέει το ονομαστικό ρεύμα τότε ο Μ/Σ αποδίδει στην έξοδό του την ονομαστική ισχύς του [1.5].

1.3.2 Κανονικές συνθήκες λειτουργίας

Υπό ορισμένες συνθήκες, ο Μ/Σ σε συνεχή λειτουργία δεν πρέπει να υπερβαίνει τα όρια ανύψωσης της θερμοκρασίας του όπως αυτά καθορίζονται στο πρότυπο IEC 60076-2 [1.6].

Οι αναφερόμενες παραπάνω συνθήκες είναι οι ακόλουθες:

- το υψόμετρο εγκατάστασης και λειτουργίας του Μ/Σ να μην υπερβαίνει τα 1000μ.
- το κατώτατο και ανώτατο όριο της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου να είναι -25°C και $+40^{\circ}\text{C}$ αντίστοιχα. Για Μ/Σ με νερό ως ψυκτικό μέσο, απαιτείται η θερμοκρασία του νερού στην είσοδο να μην υπερβαίνει τους $+25^{\circ}\text{C}$.
- η κυματομορφή της τάσης τροφοδοσίας να είναι κατά προσέγγιση ημιτονοειδής.
- οι τρεις φάσεις της τάσης τροφοδοσίας να είναι συμμετρικές
- το περιβάλλον εγκατάστασης να μην είναι τέτοιο ώστε να απαιτείται ειδική μέριμνα σχετικά με την εξωτερική μόνωση είτε των μονωτήρων είτε ολόκληρου του Μ/Σ. [1.5]

1.3.3 Ανύψωση Θερμοκρασίας (Temperature Rise)

Η ανύψωση της θερμοκρασίας ισούται με την διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας της μέσης ανύψωσης της θερμοκρασίας του τυλίγματος ή της ανύψωσης θερμοκρασίας του πιο θερμού σημείου του τυλίγματος και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Ειδικότερα, για τους Μ/Σ ελαίου με συνεχή λειτουργία υπό κανονικών συνθηκών πρέπει να ισχύουν τα εξής:

- Η μέγιστη ανύψωση της θερμοκρασίας του λαδιού που βρίσκεται πλησίον του καλύμματος του Μ/Σ (δηλαδή στο πάνω μέρος της δεξαμενής λαδιού) να είναι 60 K δηλαδή αυξημένη έως 60 °C της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.
- Για Μ/Σ τύπου ON (φυσική κυκλοφορία λαδιού) και OF (βεβιασμένη κυκλοφορία του λαδιού εντός του ψυκτικού εξοπλισμού και φυσική κυκλοφορία του λαδιού στα τυλίγματα) η μέση ανύψωση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων να είναι το μέγιστο 65 K δηλαδή αυξημένη έως 65 °C της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.
- Για Μ/Σ τύπου OD (βεβιασμένη κυκλοφορία του λαδιού εντός του ψυκτικού εξοπλισμού, κατευθυνόμενη από αυτόν προς τα τυλίγματα) η μέση ανύψωση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων να είναι το μέγιστο 70 K δηλαδή αυξημένη έως 70 °C της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. [1.6]

1.3.4 Τάση βραχυκύκλωσης (Short-circuit voltage, Impedance voltage)

Η τάση βραχυκύκλωσης είναι το ποσοστό της ονομαστικής τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί στο πρωτεύον τύλιγμα όταν το δευτερεύον είναι βραχυκυκλωμένο, ώστε να έχουμε ροή του ονομαστικού ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα.

Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση βραχυκύκλωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η πτώση τάσης του δευτερεύοντος, όταν το πρωτεύον τροφοδοτείται με σταθερή τάση και η φόρτιση μεταβάλλεται από το κενό μέχρι το πλήρες φορτίο. Και όσο μικρότερη είναι η τάση βραχυκύκλωσης τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί βραχυκύκλωμα.

1.3.5 Απώλειες εν κενώ (No-Load Losses)

Οι απώλειες εν κενώ ή απώλειες σιδήρου ή απώλειες πυρήνα προκαλούνται από το ρεύμα μαγνήτισης το οποίο απαιτείται για την μαγνήτιση του πυρήνα. Οι απώλειες αυτές εμφανίζονται εξαιτίας της υστέρησης (hysteresis) και των δινορρευμάτων (eddy currents) που ρέουν στο πυρήνα με αποτέλεσμα την θέρμανση του υλικού αυτού. Οι απώλειες σιδήρου εμφανίζονται όποτε ο Μ/Σ είναι ενεργοποιημένος και αποτελούνται από δύο συνιστώσες: τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες δινορρευμάτων.

Απώλειες υστέρησης

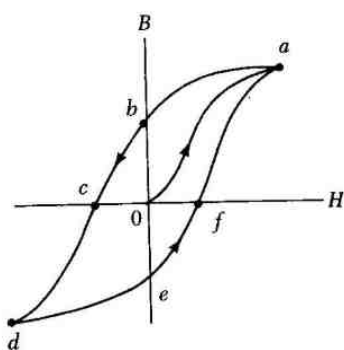
Όταν διεγείρουμε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό με εναλλασσόμενο ρεύμα, η μαγνητική του συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από την καμπύλη του σχήματος 1.8, η οποία ονομάζεται βρόχος υστέρησης. Στον βρόχο αυτόν, το εμβαδόν ανάμεσα στην καμπύλη H-B και τον άξονα της μαγνητικής επαγωγής B αντιστοιχεί στην πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας που εισέρχεται στο μαγνητικό πεδίο.

Αρχίζοντας από το σημείο του θετικού μεγίστου a, όταν η μαγνητική ροή ελαττώνεται ενώ η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ακόμα θετική (τμήμα ab), το μαγνητικό πεδίο αποδίδει ενέργεια στο ηλεκτρικό κύκλωμα που το διεγείρει. Από το σημείο b όμως, όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου γίνει αρνητική ενώ η πυκνότητα μαγνητικής ροής εξακολουθεί να μειώνεται, το μαγνητικό πεδίο απορροφά ενέργεια από το ηλεκτρικό κύκλωμα (τμήμα bd).

Αντίστοιχα, μετά το αρνητικό μέγιστο η πυκνότητα μαγνητικής ροής αυξάνει ενώ η ένταση του μαγνητικού πεδίου παραμένει αρνητική. Συνεπώς στο τμήμα de του βρόχου υστέρησης το μαγνητικό πεδίο επιστρέφει ενέργεια στο ηλεκτρικό κύκλωμα διεγέρσεως. Τέλος, στο τμήμα ea έχουμε θετική ένταση μαγνητικού πεδίου και η πυκνότητα μαγνητικής ροής αυξάνει, συνεπώς το μαγνητικό πεδίο απορροφά και πάλι ενέργεια.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου το μαγνητικό πεδίο απορροφά περισσότερη ενέργεια από όση αποδίδει. Δεδομένου ότι η τελική κατάσταση είναι εντελώς ίδια με την αρχική, αυτή η επιπλέον ενέργεια, η οποία ισούται με το εμβαδόν του βρόχου υστερήσεως, είναι ενέργεια που χάνεται με τη μορφή απωλειών. [1.7]

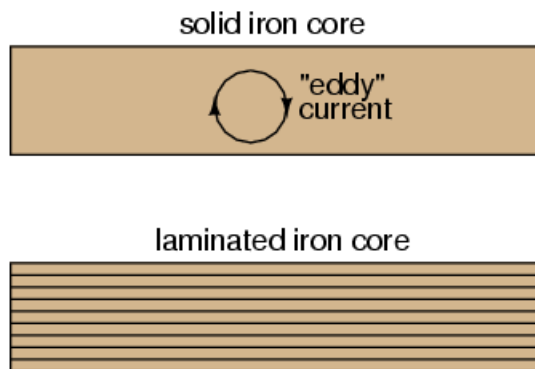
Και αυτές οι απώλειες είναι ανάλογες με το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης, με τον όγκο του μαγνητικού πεδίου και με την συχνότητα του ρεύματος διεγέρσεως.



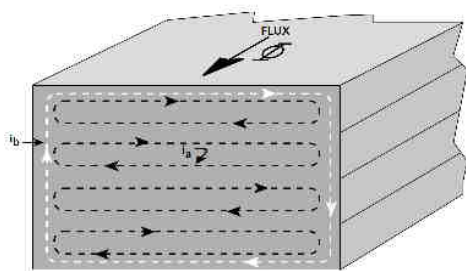
Σχ. 1.8- Βρόχος υστέρησης

Απώλειες λόγω δινορρευμάτων

Στα μαγνητικά ρεύματα που διεγείρονται από εναλλασσόμενα ρεύματα εμφανίζονται και οι απώλειες λόγω ανάπτυξης δινορρευμάτων αφού όταν μεταβάλλεται περιοδικά η μαγνητική ροή Φ , επάγονται εναλλασσόμενα ρεύματα τα οποία ρέουν στο εσωτερικό του σιδερένιου πυρήνα και αυτά με τη σειρά τους θερμαίνουν τη μάζα του σιδήρου. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από το τετράγωνο της συχνότητας ενώ είναι και ανάλογες του τετραγώνου του πάχους του υλικού. Για τον περιορισμό της ανάπτυξης δινορρευμάτων και άρα των απωλειών που αυτά προκαλούν, απαιτείται κατασκευή των πυρήνων από ηλεκτρικό χάλυβα με κατάλληλη ειδική αντίσταση, αρκετά λεπτό πάχος ελασμάτων (σχήμα 1.9) και αποτελεσματική ηλεκτρική μόνωση μεταξύ των ελασμάτων. Τα δινορρεύματα μπορούν να ρέουν όχι μόνο εντός των ελασμάτων αλλά και εντός ολόκληρου του πυρήνα εγκάρσια των επιφανειών των ελασμάτων. Η χρήση ελασμάτων θα ήταν αναποτελεσματική στο περιορισμό των ρευμάτων που κυκλοφορούν εντός του πυρήνα αν η επιφάνεια των ελασμάτων ήταν ανεπαρκώς μονωμένη [1.8]



Σχ. 1.9 – Χρήση ελασμάτων για την μείωση των απωλειών λόγω δινορρευμάτων



Σχ. 1.10 – Δινορρεύματα σε πυρήνα με ελάσματα.

Τα δινορρεύματα που κινούνται εντός των ελασμάτων συμβολίζονται με i_a και καθορίζονται από την μαγνητική ροή ανά έλασμα και από την αντίσταση των ελασμάτων. Συνεπώς εξαρτώνται από το πάχος, πλάτος και την ειδική αντίσταση όγκου του ελάσματος. Τα δινορρεύματα που κινούνται εγκάρσια των ελασμάτων (i_b) καθορίζονται από την ολική μαγνητική ροή και την αντίσταση του πυρήνα. Εξαρτώνται από το ύψος και βάρος της στοίβας των ελασμάτων, τον αριθμό των ελασμάτων και την αντίσταση της μόνωσης της επιφάνειας των ελασμάτων. [1.8]

1.3.6 Απώλειες φορτίου (Load Losses)

Οι απώλειες φορτίου περιλαμβάνουν τις απώλειες λόγω της παραγόμενης θερμότητας κατά την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από εξαρτήματα του Μ/Σ (τύλιγμα πηνίων, ακροδέκτες, μονωτήρες), τις απώλειες λόγω δινορρευμάτων και τις απώλειες σε δομικά μέρη του Μ/Σ.

1.3.6.1 Ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων

Αποτελούν την κυριότερη συνιστώσα των μεταβλητών απωλειών και προσδιορίζονται ως απώλειες I^2R ή χαλκού. Εξαρτώνται από την αντίσταση του τυλίγματος και συνεπώς από την ειδική αντίσταση του αγωγού, τις διαστάσεις και την θερμοκρασία του. Εξαιτίας της εξάρτησης από την θερμοκρασία, οι απώλειες θα μεταβάλλονται ανάλογα με τον βαθμό της φόρτισης αλλά και με την μέθοδο της ψύξης [1.9].

Η αντίσταση του τυλίγματος R_2 σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία θ_2 (θερμοκρασία αναφοράς) δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Για τύλιγμα χαλκού: } R_2 = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1} R_1 \quad (1.1)$$

$$\text{Για τύλιγμα αλουμινίου: } R_2 = \frac{225 + \theta_2}{225 + \theta_1} R_1 \quad (1.2)$$

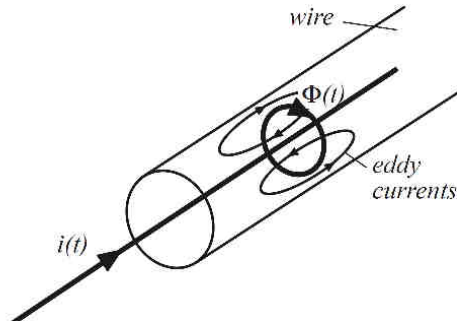
όπου: R_1 είναι η αντίσταση του τυλίγματος σε θερμοκρασία θ_1 (θερμοκρασία κατά την διάρκεια της μέτρησης)

1.3.6.2 Απώλειες λόγω δινορρευμάτων σε αγωγούς

Είναι γνωστό ότι όταν ένα αγωγίμο τύλιγμα τοποθετηθεί εντός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου τότε, λόγω επαγωγής, θα εμφανιστούν τάσεις και αντίστοιχα ρεύματα εντός του κυρίου σώματος του αγωγού και συνεπώς θα έχουμε παραγωγή επιπλέον θερμότητας και κατά συνέπεια αύξηση των απωλειών. Αυτές οι απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου της συχνότητας.

Για έναν απομονωμένο αγωγό, τα παραπάνω προκαλούν την συγκέντρωση ρεύματος στην επιφάνεια αυτού, γνωστό και ως “επιδερμικό φαινόμενο” (το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το επιφανειακό ρεύμα του αγωγού δημιουργεί κυκλοφορούντα επαγόμενα ρεύματα που αντισταθμίζουν το ρεύμα στο εσωτερικό του αγωγού) (σχ. 1.11).

Το ίδιο φαινόμενο, με την προσθήκη και των ροών από τους γειτονικούς αγωγούς (φαινόμενο εγγύτητας), οδηγεί σε αύξηση των απωλειών για αγωγούς τέτοιας διατομής όπως είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται για τα τυλίγματα των Μ/Σ. Αυτές οι απώλειες ονομάζονται απώλειες δινορρευμάτων.



Σχ. 1.11 – Δημιουργία δινορρευμάτων σε αγωγό.

1.3.6.3 Απώλειες σε δομικά μέρη του Μ/Σ

Ένα μέρος της μαγνητικής ροής ακολουθεί διαδρομή έξω από τον Μ/Σ αλλά αυτή ελαττώνεται αντίστροφα ανάλογα με την διανυθείσα απόσταση. Αν αυτή η ροή “διασταυρωθεί” με κάποιο αγώγιμο υλικό, τότε σε αυτό το υλικό θα εμφανιστούν απώλειες λόγω δινορρευμάτων. Για Μ/Σ λαδιού, ένα μέρος της μαγνητικής ροής “διασταυρώνεται” με μέρος του καπακιού και συνεπώς δημιουργούνται απώλειες δινορρευμάτων στη δομή του Μ/Σ. Αυτές οι απώλειες δεν εμφανίζονται όταν ο Μ/Σ είναι ξηρού τύπου.

Παρόμοια, οι αγωγοί των ακροδεκτών της χαμηλής τάσης που μεταφέρουν μεγάλης έντασης ρεύματα προκαλούν επιπρόσθετες απώλειες δινορρευμάτων σε δομικά σημεία που περιβάλλουν τους ακροδέκτες. [1.9]

1.3.7 Ονομαστικές τάσεις (Rated Voltages)

Η ονομαστική τάση πρωτεύοντος (τάση εισόδου) είναι η τάση εκείνη στην οποία ο Μ/Σ λειτουργεί. Η ονομαστική τάση πρωτεύοντος καθορίζει το επίπεδο της Βασικής Στάθμης Μόνωσης (BIL-Basic Insulation Level) του Μ/Σ, και η οποία υποδεικνύει την ικανότητα αυτού να ανθίσταται στις υπερτάσεις που μπορεί να εμφανιστούν στο δίκτυο. Ο υπολογισμός της μόνωσης των τυλιγμάτων βασίζεται στην Βασική Στάθμη Μόνωσης.

Η ονομαστική τάση δευτερεύοντος (τάση εξόδου) είναι η τάση στα άκρα του δευτερεύοντος τυλίγματος σε συνθήκες κενού φορτίου και υπό ονομαστικής τάσης πρωτεύοντος και ονομαστικής συχνότητας (και η οποία είναι 50Hz ή 60Hz ανάλογα με την συχνότητα του δικτύου).

1.3.8 Συνδεσμολογία Τυλιγμάτων (Vector Group)

Η συνδεσμολογία του τυλίγματος καθορίζει την μετατόπιση της φάσης μεταξύ του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος.

Το πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα μπορούν να συνδεθούν με διάφορους τρόπους έτσι ώστε να υπάρξει ένας τριφασικός Μ/Σ. Οι δυνατές συνδεσμολογίες είναι οι παρακάτω :

- Τρίγωνο (D για το πρωτεύον και d για το δευτερεύον)
- Αστέρας (Y για το πρωτεύον και y για το δευτερεύον)
- Τεθλασμένος Αστέρας (Z για το πρωτεύον και z για το δευτερεύον)
- Ουδέτερος (N για το πρωτεύον και n για το δευτερεύον)

Τα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα απαιτούν να υπάρχει μία σύνδεση αυτών με την γη. Οπότε είναι βολικότερο το τύλιγμα του Μ/Σ που τροφοδοτεί το δίκτυο να είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα ώστε να γειώνεται ο ουδέτερός του είτε κατευθείαν είτε μέσω μιας αντίστασης με σκοπό αυτή να περιορίζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Είναι επίσης επιθυμητό το σύστημα να έχει και μια συνδεσμολογία τριγώνου ώστε να παρέχεται ένας δρόμος για τα ρεύματα τρίτης αρμονικής ώστε να μειώνονται ή ακόμη και να εξαλείφονται οι τάσεις τρίτης αρμονικής. Για αυτό το λόγο, για ένα Μ/Σ υποβιβασμού τάσης θα ήταν προτιμότερο το τύλιγμα της υψηλής τάσης να είναι συνδεδεμένο κατά τρίγωνο (D) και της χαμηλής τάσης κατά αστέρα (y) με τον ουδέτερό του γειωμένο.

Το πλήρες εύρος των συνδεσμολογιών των τυλιγμάτων του Μ/Σ είναι διαθέσιμο στο πρότυπο IEC 60076-1 [1.5] ενώ οι κυριότερες συνδεσμολογίες απεικονίζονται στο σχήμα 3.7 της παραγράφου 3.3.2. Είναι πολλές οι περιπτώσεις όπου είναι σημαντικό να εξεταστεί για το ποια θα είναι η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων, ειδικότερα αν ο Μ/Σ πρόκειται να παραλληλιστεί με κάποιον άλλο Μ/Σ ή αν δύο διαφορετικά δίκτυα πρόκειται να διασυνδεθούν.

1.3.9 Θόρυβος (Noise)

Οι κυριότερες πηγές θορύβου στους Μετασχηματιστές είναι [1.10]:

- Από τον πυρήνα που προκαλείται εξαιτίας του φαινομένου της μαγνητοσυστολής και των μαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στις διάφορες στρώσεις των ελασμάτων.
- Κατά την λειτουργία του Μ/Σ υπό φορτίο, όπου προκαλείται από τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα τυλίγματα και στα

τοιχώματα της δεξαμενής λαδιού εξαιτίας της ροής σκεδάσεως που σχετίζεται με το ρεύμα.

- Από τον ψυκτικό εξοπλισμό εξαιτίας των ανεμιστήρων και των αντλιών

Το φάσμα συχνοτήτων για τον θόρυβο του πυρήνα και των τυλιγμάτων είναι διαφορετικό από αυτό του θορύβου του ψυκτικού εξοπλισμού. Ο τελευταίος κυριαρχεί στις χαμηλότερες και υψηλότερες συχνότητες (ανάλογα αν χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες ή αντλίες), ενώ ο θόρυβος από τον πυρήνα και τα τυλίγματα κυριαρχεί στις μεσαίες συχνότητες (μεταξύ 100Hz και 600Hz).

1.3.9.1 Θόρυβος του πυρήνα

Φαινόμενο μαγνητοσυστολής είναι εκείνη η διαδικασία που συμβαίνει όταν μία ταινία σιδήρου μαγνητίζεται με συνέπεια να υφίσταται μία μικρή αλλαγή στις διαστάσεις της. Αυτή η αλλαγή εξαρτάται από την διεύθυνση της μαγνητικής ροής, συνεπώς πραγματοποιείται σε συχνότητα διπλάσια από αυτήν την συχνότητας λειτουργίας. Επίσης, λόγω το ότι η καμπύλη της μαγνητοσυστολής είναι μη-γραμμική και στις περιοχές αυτής που η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι αυξημένη, έχουμε ως επακόλουθο της προκύπτουσας δόνησης-ταλάντωσης του πυρήνα να εμφανίζονται και αρμονικές υψηλής τάξης.

Επιπρόσθετα του φαινομένου της μαγνητοσυστολής, μαγνητικές δυνάμεις εντός του πυρήνα δημιουργούν δονήσεις και συνεπώς θόρυβο. Αυτές οι δυνάμεις προκύπτουν όταν η μαγνητική ροή κινείται από κάποιο επίπεδο του ελάσματος (δηλ. της μαγνητικής λαμαρίνας) προς το επίπεδο του γειτονικού ελάσματος ή και λόγω των διακένων αέρος. Το φαινόμενο αυτό δημιουργείται από το γεγονός ότι τα ελάσματα δεν είναι τελείως επίπεδα ή έχουν ανομοιόμορφο πάχος ή ακόμη και λόγω διαπερατότητας αφού παρεμβάλλονται σημεία ενώσεων και οπές βιδών συγκράτησης λαμαρίνας. Οι οπές αυτές διαστρεβλώνουν τοπικά την ροή, τροποποιώντας την πυκνότητα και την διεύθυνσή της.

Η διαδρομή του θορύβου του πυρήνα από την γέννησή του έως την εκπομπή του εκτός του Μ/Σ απεικονίζεται στο σχήμα 1.12 [1.11].

1.3.9.2 Θόρυβος Μετασχηματιστή υπό φορτίο

Ο θόρυβος αυτός μεταδίδεται από έναν Μ/Σ που βρίσκεται υπό φορτίο. Προκαλείται από τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις οι οποίες είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος

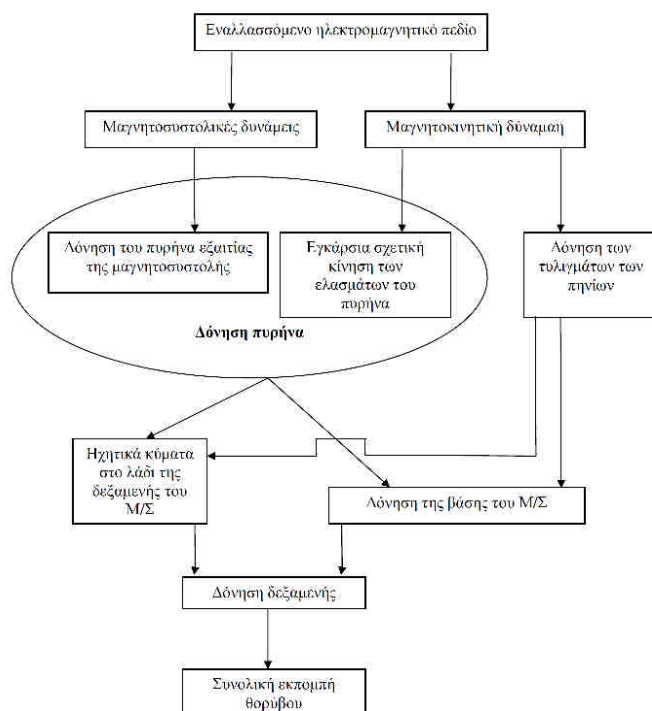
φορτίου και συνεπώς ο θόρυβος είναι ανάλογος της τετάρτης δύναμης του ρεύματος (ο διπλασιασμός του ρεύματος αυξάνει το θόρυβο κατά 12dB). Οι πηγές των θορύβων αυτών είναι οι δονήσεις των τοιχωμάτων της δεξαμενής λαδιού και των τυλιγμάτων.

Ο θόρυβος του Μ/Σ υπό φορτίο, κατά κύριο λόγο, παράγεται από την αξονική και ακτινική δόνηση των τυλιγμάτων και με την συχνότητα του θορύβου αυτού να είναι συνήθως το διπλάσιο της συχνότητας λειτουργίας. Οι προαναφερθείσες ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις παράγουν αξονικές δονήσεις και για αυτό είναι η μεγαλύτερη πηγή θορύβου. Και σε μερικές περιπτώσεις, η φυσική μηχανική συχνότητα των τυλιγμάτων μπορεί να συντονιστεί με τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και ο θόρυβος να ενισχυθεί.

1.3.9.3 Θόρυβος από ανεμιστήρες και αντλίες

Οι ανεμιστήρες, οι οποίοι είναι εν μέρει υπεύθυνοι για την ψύξη του Μ/Σ, συνήθως συμβάλλουν περισσότερο στον θόρυβο των Μ/Σ σε αυτούς με μικρότερη ονομαστική ισχύ και χαμηλής επαγωγικής τιμής. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον θόρυβο από τους ανεμιστήρες περιλαμβάνουν την ταχύτητα περιστροφής, τον αριθμό των ανεμιστήρων και τη ταξινόμηση των ψυκτικών σωμάτων.

Ο θόρυβος των αντλιών είναι αμελητέος σε περίπτωση που λειτουργούν οι ανεμιστήρες, αν και υπάρχει πιθανότητα να υπάρχει κάποιος θόρυβος χαμηλής συχνότητας.



Σχήμα 1.12 - Η διαδρομή του θορύβου του πυρήνα από την γέννησή του έως την εκπομπή του εκτός του Μ/Σ [1.11].

1.3.10 Ρεύμα βραχυκύκλωσης (Short-Circuit Current)

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αποτελείται από δύο συνιστώσες: από το ασύμμετρο και το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η ροή ασύμμετρου ρεύματος βραχυκύκλωσης στον Μ/Σ έχει μηχανικές επιπτώσεις ενώ αντίστοιχα το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης έχει θερμικές επιπτώσεις σε αυτόν.[1.12]

1.3.10.1 Θερμικές επιπτώσεις

Κατά την διάρκεια του βραχυκυκλώματος ένα μεγάλο ρεύμα διαρρέει τα τυλίγματα του Μ/Σ με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία αυτών. Λόγω το ότι η χρονική διάρκεια του βραχυκυκλώματος είναι συνήθως πολύ μικρή, η ανύψωση της θερμοκρασίας δεν είναι υπεύθυνη για οποιαδήποτε πρόκληση ζημιάς στον Μ/Σ. Σύμφωνα με [1.2], το πρότυπο IEC αναφέρει τις σχέσεις που υπολογίζουν την μέγιστη μέση θερμοκρασία των τυλιγμάτων αμέσως μετά από ένα βραχυκύκλωμα.

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{\frac{106000}{J^2 t} - 1} \quad \text{για τύλιγμα χαλκού} \quad (1.3)$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 225)}{\frac{45700}{J^2 t} - 1} \quad \text{για τύλιγμα αλουμινίου} \quad (1.4)$$

Όπου θ_0 είναι η αρχική θερμοκρασία σε °C

J είναι η πυκνότητα ρεύματος σε A/mm² κατά την διάρκεια του βραχυκυκλώματος
βασίζόμενο στην rms τιμή του συμμετρικού ρεύματος βραχυκυκλώματος

t η διάρκεια του βραχυκυκλώματος σε δευτερόλεπτα

Για τις παραπάνω σχέσεις, έγινε η παραδοχή ότι ολόκληρη η θερμότητα που αναπτύχθηκε στο βραχυκύκλωμα παρέμεινε στο τύλιγμα αυξάνοντας και την θερμοκρασία του. Αυτή η παραδοχή είναι δικαιολογημένη γιατί η θερμική σταθερά χρόνου του τυλίγματος ενός Μ/Σ λαδιού είναι πολύ υψηλή συγκριτικά με την διάρκεια του βραχυκυκλώματος με αποτέλεσμα να μπορούμε να θεωρήσουμε αμελητέα τη ροή θερμότητας από τα τυλίγματα προς το λάδι. Επίσης η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του χάλκινου τυλίγματος για Μ/Σ με θερμοκρασία μονωτικού συστήματος 105°C (θερμική κλάση A) είναι 250 °C ενώ

αντίστοιχα για αλουμινένιους αγωγούς είναι 200 °C. Όμως πρακτικά η θερμοκρασία του τυλίγματος του Μ/Σ δεν υπερβαίνει τις παραπάνω τιμές με συνέπεια οι θερμικές επιπτώσεις να μην χρήζουν ιδιαίτερης σχεδιαστικής μελέτης. [1.2]

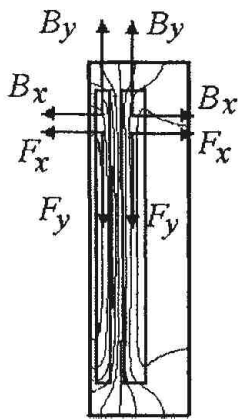
1.3.10.2 Μηχανικές επιπτώσεις

Δυνάμεις βραχυκυκλώματος

Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων είναι :

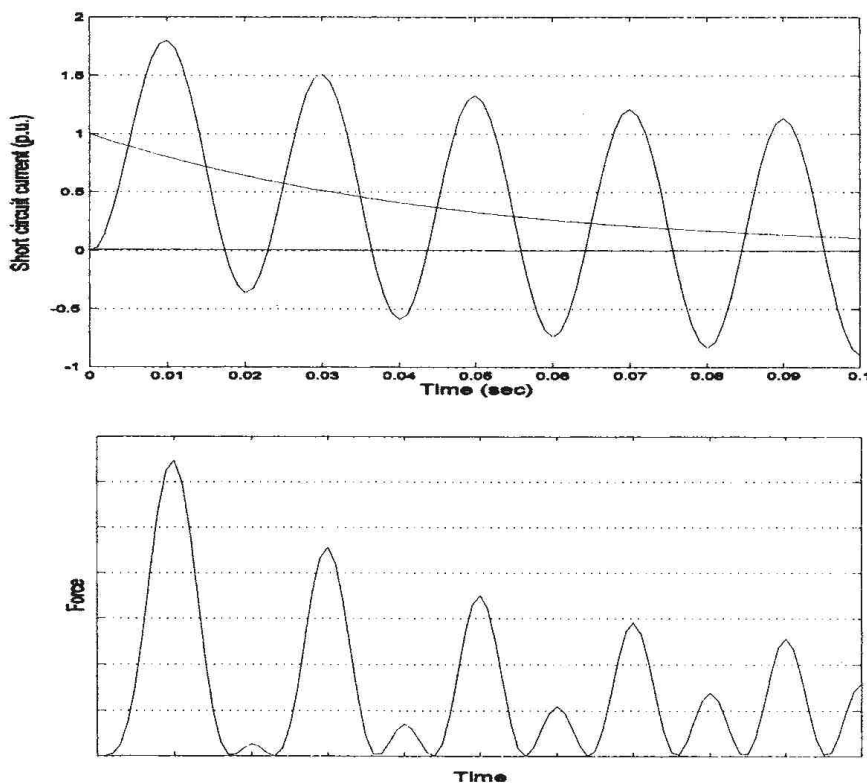
$$\mathbf{F} = L\mathbf{I} \times \mathbf{B}$$

όπου \mathbf{B} είναι πυκνότητα της μαγνητικής ροής, \mathbf{I} είναι η ένταση του ρεύματος, και L είναι το μήκος του τυλίγματος. Αν η ανάλυση των δυνάμεων γίνει σε δύο διαστάσεις με την πυκνότητα του ρεύματος να βρίσκεται στον άξονα z , η πυκνότητα μαγνητικής ροής μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Με τη μία συνιστώσα να έχει ακτινική διεύθυνση (B_x) και τη δεύτερη αξονική (B_y). Επομένως, υπάρχει ακτινική δύναμη κατά τη διεύθυνση του x -άξονα εξαιτίας της αξονικής πυκνότητας ροής και αξονική δύναμη κατά την διεύθυνση του y -άξονα εξαιτίας της ακτινικής πυκνότητας ροής, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.13. Οι διευθύνσεις των δυνάμεων αυτών προκύπτουν από τον κανόνα του δεξιού χεριού.



Σχ. 1.13 – Αξονικές και ακτινικές δυνάμεις

Συνεπώς οι μηχανικές δυνάμεις βραχυκυκλώματος αναλύονται σε δύο συνιστώσες: την ακτινική και την αξονική συνιστώσα. Η πρακτική της ανάλυσης στις παραπάνω συνιστώσες είναι θεμιτή αφού η ακτινικές και αξονική δύναμη οδηγούν σε διαφορετικά είδη καταπονήσεων και αστοχιών. Η τυπική κυματομορφή του ρεύματος βραχυκυκλώματος και της δύναμης απεικονίζεται στο σχήμα 1.14.



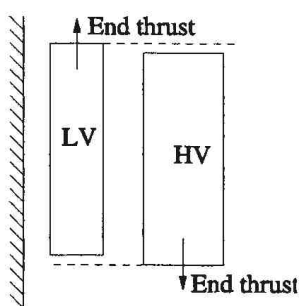
Σχ. 1.14 – Κυματομορφές ρεύματος βραχυκύκλωσης και δύναμης

Ακτινικές δυνάμεις

Οι ακτινικές δυνάμεις προκαλούν την αμοιβαία απώθηση μεταξύ των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος και του πρωτεύοντος με αποτέλεσμα το τύλιγμα του δευτερεύοντος να απωθείται βίαια προς τα έξω ενώ το τύλιγμα του πρωτεύοντος προς το εσωτερικό του πηνίου. Η αντιμετώπιση της βίαιης κίνησης του πρωτεύοντος είναι σχετικά εύκολη αφού το τύλιγμα αυτό είναι τοποθετημένο πάνω από τον πυρήνα και το μόνο που απαιτείται είναι να διασφαλιστεί η επαρκής υποστήριξη του τυλίγματος ώστε να μεταδίδεται η δύναμη από αυτό προς τον πυρήνα. Από την άλλη, η ακτινική κίνηση του τυλίγματος του δευτερεύοντος προς το εξωτερικό του πηνίου συναντά την αντίσταση του συνδυασμού της ασκούμενης πίεσης στο χαλκό και της παραγόμενης δύναμης τριβής λόγω του μεγάλου αριθμού στροφών περιέλιξης του δευτερεύοντος. Η ακτινική αυτή βίαιη κίνηση του δευτερεύοντος συνήθως δεν αποτελεί ένα ιδιαίτερο πρόβλημα αφού η αντοχή εφέλκυσμού του χαλκού είναι αρκετά κατάλληλη για τέτοιες καταστάσεις. Εξαιρέση σε αυτό αποτελούν τα πηνία που έχουν μικρό αριθμό στροφών περιέλιξης και ιδιαίτερα αυτά που η περιέλιξή τους είναι σε ελικοειδή μορφή. Σε αυτή τη περίπτωση πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα όπως πχ την επιπρόσθετη χρήση μονωτικού υλικού πάνω στο τύλιγμα.

Αξονικές δυνάμεις

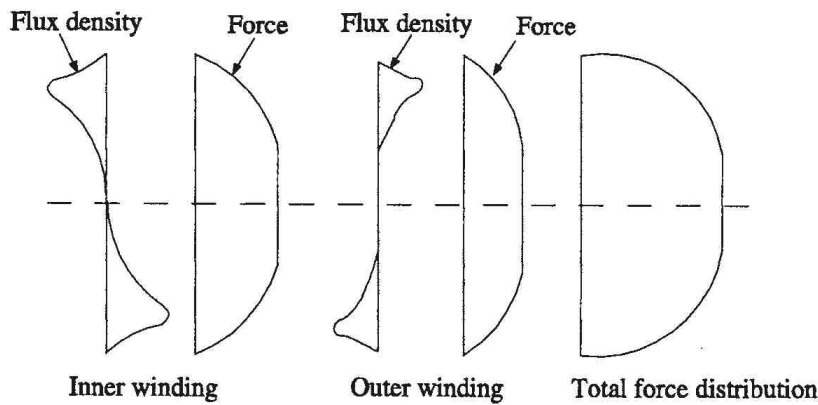
Οι αξονικές δυνάμεις με τη σειρά τους αποτελούνται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη προκύπτει από το γεγονός ότι όταν δύο ρευματοφόροι αγωγοί είναι παράλληλοι μεταξύ τους και το ρεύμα τους είναι της ίδιας φοράς αυτοί έλκονται μεταξύ τους παράγοντας μία συμπιεστική δύναμη. Η δύναμη αυτή εκδηλώνεται ως το αποτέλεσμα της μαγνητικής ροής που παράγεται από τους ίδιους τους αγωγούς. Επίσης, οι αγωγοί του κάθε τυλίγματος επηρεάζονται από τη ροή σκεδάσεως των αγωγών του άλλου τυλίγματος. Έτσι, η ακτινική συνιστώσα της ροής σκεδάσεως βοηθάει στην αύξηση της αξονικής δύναμης, η οποία θα δρα προς τη μία κατεύθυνση στη κορυφή του πηνίου και προς την αντίθετη κατεύθυνση στο κάτω μέρος αυτού. Και επειδή το ρεύμα έχει την ίδια κατεύθυνση και στα δύο μέρη (άνω και κάτω μέρος του πηνίου), αυτό παράγει αξονικές δυνάμεις προς αντίθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις και αν τα τυλίγματα, πρωτεύον και δευτερεύον, είναι ισορροπημένα, οπότε και η μαγνητική ροή είναι συμμετρική, τότε η απορρέουσα δύναμη πάνω στο τύλιγμα αντισταθμίζεται ως σύνολο. Αν αρχικά υπάρχει μαγνητική ανισορροπία μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος, δηλαδή αξονική μετατόπιση μεταξύ των μαγνητικών τους κέντρων, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία άνισων δυνάμεων στο άνω και κάτω άκρο του πηνίου. Συνεπώς θα υπάρχει ένα πλεόνασμα αξονικής δύναμης που θα τείνει να αυξήσει ακόμα πιο πολύ την μετατόπιση των τυλιγμάτων (βλ. σχήμα 1.15).



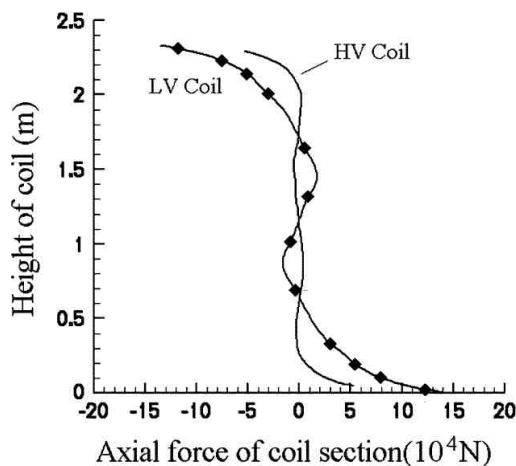
Σχ. 1.15 – Αξονική ασυμμετρία

Για μία ομοιόμορφη κατανομή ρεύματος ανά στροφή περιέλιξης σε τυλίγματα (πρωτεύον, δευτερεύον) ίσου ύψους, οι αξονικές δυνάμεις εξαιτίας της ακτινικής ροής σκεδάσεως στα άκρα των τυλιγμάτων έχουν την διεύθυνση προς το κέντρο του τυλίγματος όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.13. Αν και η τοπική δύναμη ανά μονάδα μήκους είναι μεγαλύτερη στα άκρα του τυλίγματος, η συσσωρευτική συμπιεστική δύναμη είναι μέγιστη

στο κέντρο των τυλιγμάτων (βλ. σχ. 1.16). Σε περίπτωση που υπάρχει ανομοιομορφία της κατανομής αμπερ ανά στροφή περιέλιξης τότε η αξονικές δυνάμεις κοντά στα άκρα του πηνίου είναι μεγαλύτερες από αυτές που βρίσκονται κοντά στην μέση του πηνίου δηλαδή αντίθετα με προηγούμενη διαπίστωση. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο σχήμα 1.17.



Σχ. 1.16 – Κατανομή αξονικής δύναμης για τυλίγματα ομοιόμορφης κατανομής αμπερ ανά στροφή περιέλιξης [1.2]

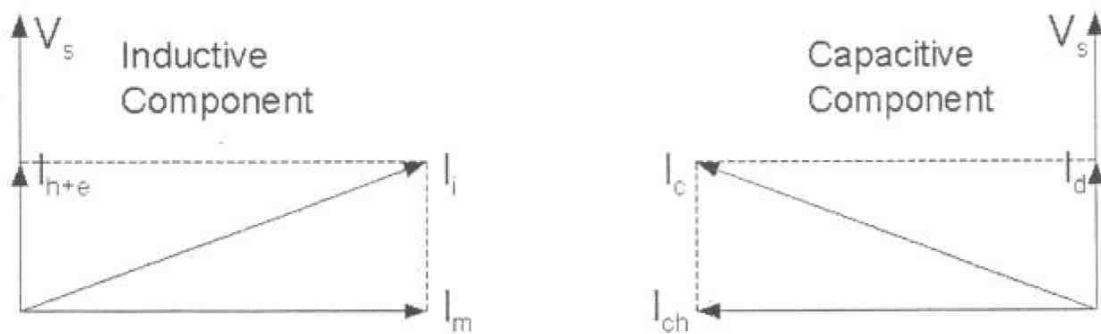


Σχ. 1.17 - Κατανομή αξονικής δύναμης για τυλίγματα ανομοιόμορφης κατανομής αμπερ ανά στροφή περιέλιξης [1.13]

1.3.11 Ρεύμα μαγνήτισης (Magnetizing Current)

Το ρεύμα μαγνήτισης είναι το ρεύμα εκείνο που απορροφά ο Μ/Σ όταν στο πρωτεύον τύλιγμα εφαρμοστεί η ονομαστική τάση και συγχρόνως το δευτερεύον τύλιγμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο. Το ρεύμα μαγνήτισης εκφράζεται ως ποσοστό επί της τιμής του ονομαστικού ρεύματος πρωτεύοντος και έχει δύο συνιστώσες: την επαγωγική και την

χωρητική συνιστώσα. Η επαγωγική συνιστώσα εξασφαλίζει την μαγνήτιση και τις απώλειες του πυρήνα (βλ. σχήμα 1.18) και για αυτό είναι μη-γραμμικά ανάλογη της τάσης διεγέρσεως. Η χωρητική συνιστώσα εξασφαλίζει το ρεύμα φόρτισης και τις διηλεκτρικές απώλειες και για την χωρητικότητα του εσωτερικού τυλίγματος και για την χωρητικότητα προς το έδαφος (σχήμα 1.15). Αυτή η χωρητική συνιστώσα είναι γραμμικά ανάλογη του ρεύματος διεγέρσεως [1.14]



Σχ. 1.18 – Διανυσματική ανάλυση των συνιστωσών του ρεύματος μαγνήτισης

όπου

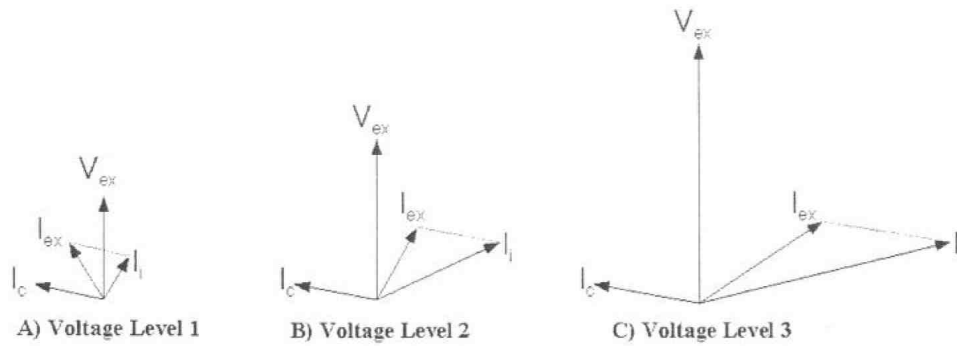
- V_s είναι η τάση τροφοδοσίας
- I_m είναι το ρεύμα μαγνήτισης
- I_{h+e} είναι το ρεύμα απωλειών
- I_i είναι η επαγωγική συνιστώσα
- I_{ch} είναι το ρεύμα φόρτισης
- I_d είναι ρεύμα διηλεκτρικών απωλειών
- I_c είναι η χωρητική συνιστώσα

Η επαγωγική συνιστώσα του ρεύματος μαγνήτισης είναι συνήθως η κυριαρχούσα συνιστώσα και επηρεάζεται από όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν και τις απώλειες σιδήρου, αλλά όμως σε μεγαλύτερο βαθμό, όπως η διαμόρφωση του πυρήνα, ο σχεδιασμός των ενώσεων-συνδέσεων του πυρήνα και την ποιότητα κατασκευής του πυρήνα.

Σε ένα υψηλής χωρητικότητας τύλιγμα, η χωρητική συνιστώσα του ρεύματος μαγνήτισης μπορεί να είναι συγκρίσιμη με την επαγωγική συνιστώσα.

Σε περιπτώσεις όπου η επαγωγική συνιστώσα είναι σχετικά χαμηλής τιμής, το συνολικό ρεύμα μαγνήτισης μπορεί να είναι μειωμένο σε ένα περιορισμένο εύρος τάσεων αλλά όταν η τάση αυξηθεί τότε η επαγωγική συνιστώσα, η οποία συνήθως αυξάνεται με μεγαλύτερο

ρυθμό από ότι η τάση και η χωρητική συνιστώσα, αρχίζει να κυριαρχεί με αποτέλεσμα την αύξησή της στο συνολικό ρεύμα μαγνήτισης (βλ. σχ. 1.19) [1.14].



Σχ. 1.19 – Συνιστώσες ρεύματος μαγνήτισης σε διαφορετικές τάσεις διέγερσης (Voltage level 1 < voltage level 2 < voltage level 3)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] “Power transformers – Application guide”, IEC 60076-8, First edition, 1997-10
- [1.2] “Transformer Engineering – Design and Practice”, S.V.Kulkarni, S.A. Khaparde, 2004
- [1.3] “Ταχεία Μεταβατικά Φαινόμενα στα Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας”, Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, 1997
- [1.4] “Core Structure and its Association with Transformer Susceptibility towards Ferroresonance”, C.A. Charalambous, Z. D. Wang, P. Jarman and M. Osborne, International Conference of Power System Transient, IPST 2009, Doshisha University, Kyoto, Japan, 2-6 June 2009, paper ID No.: 80
- [1.5] “Power Transformers – Part 1: General”, IEC 60076-1, 2004-04
- [1.6] “Power Transformers – Part 2: Temperature rise”, IEC 60076-2, 1993-04
- [1.7] “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, Αθήνα, 2001
- [1.8] “Selection of Electrical Steels for Magnetic Cores”, Product Data Bulletin, AK Steel, 2007
- [1.9] “Best Practice Manual – Transformers”, Devki Energy Consultancy Pvt. Ltd, 2006
- [1.10] “IEEE Guide for Sound Level Abatement and Determination for Liquid-Immersed Power Transformers and Shunt Reactors Rated Over 500 kVA”, IEEE Std C57.136-2000(R2005)
- [1.11] “On the influence of core laminations upon power transformer noise”, Ravish S. Masti, Wim Desmet, Ward Heylen, International Conference on Noise and Vibration Engineering, Proceedings of ISMA 2004, Leuven, Belgium, 20-22 September, pp 3851-3862
- [1.12] “Spotlight on Modern Transformer Design”, Pavlos S. Georgilakis, 2009
- [1.13] “Numerical Simulation of Transient Force and Eddy Current Loss in a 720-MVA Power Transformer”, S. L. Ho, Y. Li, H. C. Wong, S. H. Wang, R. Y. Tang, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 2, March 2004, pp 687-690
- [1.14] “IEEE Guide for Transformer Loss Measurement”, IEEE C57.123-2002

Υλικά Μετασχηματιστών

2.1 Πυρήνας

Οι μικροί Μ/Σ χαμηλής ισχύος κατασκευάζονται με αέρα μεταξύ των δύο πηνίων. Τέτοιοι Μ/Σ όμως είναι μη αποδοτικοί επειδή το ποσοστό της μαγνητικής ροής του πρώτου πηνίου που διέρχεται από το δεύτερο είναι μικρό με αποτέλεσμα η επαγόμενη τάση στο δεύτερο πηνίο να είναι μικρή. Ο αριθμός των περιελίξεων μπορεί να αυξηθεί ώστε να αυξηθεί και η τάση εξόδου, αλλά με αυτό τον τρόπο αυξάνεται επίσης και το κόστος. Συνεπώς, ο στόχος είναι να αυξηθεί η ποσότητα της μαγνητικής ροής του πρώτου πηνίου που διέρχεται και από το δεύτερο πηνίο δηλαδή να παρέχεται μία χαμηλής αντίστασης διαδρομή της μαγνητικής ροής που συνδέει το πρωτεύων με το δευτερεύον τύλιγμα.

Η ικανότητα του σιδήρου ή χάλυβα να μεταφέρει μαγνητική ροή είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή του αέρα. Η ικανότητα μεταφοράς μαγνητικής ροής καλείται διαπερατότητα. Οι σύγχρονοι ηλεκτρικοί χάλυβες έχουν διαπερατότητες της τάξης του 1500 συγκρινόμενες με το 1.0 του αέρα. Αυτό σημαίνει ότι η ικανότητα του πυρήνα από χάλυβα να μεταφέρει μαγνητική ροή είναι 1500 φορές εκείνης του αέρα. Πυρήνες από χάλυβα χρησιμοποιήθηκαν στους Μ/Σ ισχύος όταν πρωτοεισήχθηκαν τα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος στη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν δύο πηνία είναι συζευγμένα μέσω πυρήνα από χάλυβα, τότε σχεδόν 100% της ροής από το πρώτο πηνίο κυκλοφορεί στον πυρήνα έτσι ώστε η επαγόμενη τάση στο δεύτερο πηνίο να είναι ίση με την τάση του πρώτου αν ο αριθμός των σπειρών και στα δύο πηνία είναι ίσος [2.1].

Ο πυρήνας του Μ/Σ απαιτείται να είναι μαγνητικό υλικό με ποικίλα χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Από όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά, τα πιο ευρέως διαδεδομένα είναι οι λεγόμενοι “ηλεκτρικοί χάλυβες”.

Ταξινόμηση ηλεκτρικών χαλύβων

Εξαιτίας της χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, ένα πιο κατάλληλο όνομα για τέτοια υλικά θα ήταν “κράματα σιδήρου-πυριτίου”. Αλλά όμως, ο όρος “ηλεκτρικοί χάλυβες” έχει υιοθετηθεί παγκόσμια ως την ονομασία των μαγνητικών υλικών επίπεδης έλασης στα οποία το πυρίτιο είναι το κύριο αναμειγνυόμενο υλικό. Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά

χαρακτηριστικά τους τα κάνει κατάλληλα για χρήση ως ελασματικούς πυρήνες όπου η ροή αλλάζει διεύθυνση αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες ηλεκτρικών χαλύβων και τάξεις εντός κάθε κατηγορίας, κατάλληλες για εφαρμογή σε διάφορους τύπους ηλεκτρικών συσκευών. Μία από αυτές, για ομοιομορφία στην προδιαγραφή, παραγωγή και αγορά, είναι η ταξινόμηση βάσει απωλειών σιδήρου. Αυτό γιατί η μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη απωλειών σιδήρου, συνήθως, είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες για τους πυρήνες διαφόρων συσκευών.

Οι πρώτοι Μ/Σ είχαν πυρήνες από κατεργασμένο σίδηρο αλλά διαπιστώθηκε ότι με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων από πυρίτιο ή αλουμίνιο στον σίδηρο συνετέλεσε στην μεγάλη μείωση των απωλειών.

Παρακάτω αναφέρονται οι τρόποι που εφαρμόστηκαν στη διαδικασία παραγωγής-κατασκευής των ηλεκτρικών χαλύβων.

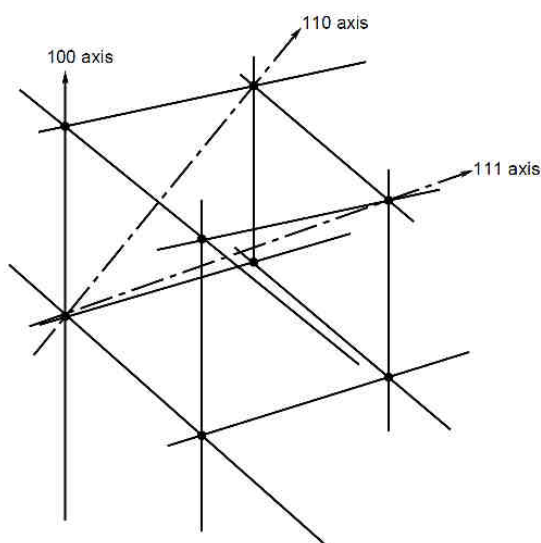
2.1.1 Χάλυβας θερμής έλασης (Hot-rolled steel)

Η προσθήκη πυριτίου μειώνει τις απώλειες υστέρησης, αυξάνει την διαπερατότητα και αυξάνει την ειδική αντίσταση με συνέπεια να μειώνονται οι απώλειες των δινορρευμάτων. Η παρουσία του πυριτίου έχει το μειονέκτημα ότι ο χάλυβας γίνεται εύθραυστος και σκληρός με αποτέλεσμα την δυσκολία στην κατασκευή του πυρήνα. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η δυσκολία, η ποσότητα του πυριτίου πρέπει να περιορίζεται στο 4.5%. Επίσης, η εξάλειψη διαφόρων προσμείξεων, συμπεριλαμβανομένου του άνθρακα, έχει σημαντική επίδραση στη μείωση των απωλειών. Έτσι, αν και οι πρώτοι χάλυβες που περιείχαν πυρίτιο εμφάνιζαν απώλειες περίπου της τιμής 7 W/kg σε μαγνητική επαγωγή 1.5 T και σε συχνότητα 50 Hz, παρόμοια κράματα που παρήχθησαν το έτος 1990 και είχαν υψηλά επίπεδα καθαρότητας παρουσίαζαν στις ίδιες συνθήκες απώλειες λιγότερες από 2 W/kg.

Οι ηλεκτρικοί χάλυβες έχουν κρυσταλλική δομή έτσι ώστε οι μαγνητικές ιδιότητες του φύλλου να προέρχονται από τις μαγνητικές ιδιότητες των ατομικών κρυστάλλων ή κόκκων και πολλές από αυτές τις ιδιότητες εξαρτώνται από την κατεύθυνση του κρυστάλλου στον οποίο έχουν μετρηθεί.

Οι κρύσταλλοι του χάλυβα μπορούν να απεικονιστούν από ένα κυβικό πλέγμα (σχήμα 2.1) οι άξονες του οποίου καθορίζονται από τις συντεταγμένες x, y, z, που περικλείονται στις παρενθέσεις. Π.χ. το (100) αντιπροσωπεύει τον άξονα κατά μήκος της ακμής του κύβου και το (110) το επίπεδο που τέμνει τις διαγώνιες αντίθετες κορυφές.

Στο κυβικό πλέγμα η κατεύθυνση (100) είναι η ευκολότερη κατεύθυνση της μαγνήτισης, η κατεύθυνση (110) είναι πιο δύσκολη και η (111) είναι η δυσκολότερη.



Σχήμα 2.1 – Οι κρύσταλλοι του χάλυβα με τη μορφή κυβικού πλέγματος [2.2]

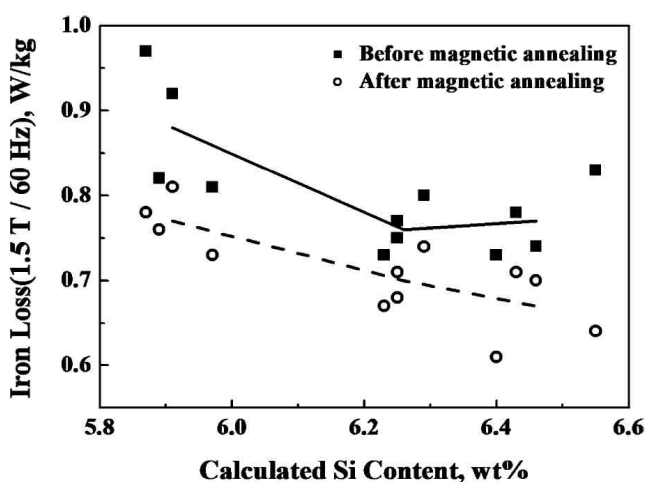
Ελάσματα από χάλυβα πυριτίου πάχους περίπου 0,35 mm χρησιμοποιούνταν στους Μ/Σ στις ΗΠΑ μέχρι την δεκαετία του 1940 και στο Ηνωμένο Βασίλειο μέχρι και λίγο αργότερα, και τα οποία ελάσματα παράγονταν με την διαδικασία της θερμής έλασης. Στη διαδικασία αυτή, η κόκκοι τοποθετούνται κατά τυχαίο τρόπο έτσι ώστε οι μαγνητικές ιδιότητες που παρατηρούνται σε ένα φύλλο να έχουν παρόμοιες τιμές ανεξάρτητα από την κατεύθυνση στην οποία μετρώνται. Αυτές αντιπροσωπεύουν ένα μέσο όρο των ιδιοτήτων προς όλες τις κατευθύνσεις εντός των ατομικών κρυστάλλων. Τα υλικά αυτά ονομάζονται ιστροπικά [2.2].

2.1.2 Χάλυβας προσανατολισμένων κόκκων (Grain-oriented steel)

Από τη δεκαετία του 1920 αναγνωρίστηκε ότι οι κρύσταλλοι του χάλυβα πυριτίου είναι ανισοτροπικοί αλλά ήταν το 1934 και 1939 που κατοχυρώθηκε η βιομηχανική χρήση και η εμπορική διαθεσιμότητά του αντίστοιχα. Το υλικό εκείνο ήταν ο πρώτος εμπορεύσιμος ψυχρής έλασης προσανατολισμένων κόκκων χάλυβας και είχε πάχος 0,32 mm με απώλειες 1.5 W/kg σε 1,5 T, 50 Hz [2.2]

Ο χάλυβας πυριτίου με προσανατολισμένους κόκκους χρησιμοποιούνται ευρέως για τους πυρήνες των Μ/Σ εξαιτίας των καλών μαγνητικών ιδιοτήτων και της χαμηλής τιμής. Οι σημαντικότερες ιδιότητες είναι οι χαμηλές απώλειες πυρήνα και η υψηλή μαγνητική επαγωγή στην συχνότητα λειτουργίας. Η υψηλή αυτή μαγνητική επαγωγή συνήθως έχει ως αποτέλεσμα στη μείωση του όγκου ή του βάρους του Μ/Σ. Επίσης, οι χαμηλές απώλειες

πυρήνα συσχετίζονται με την μείωση του κόστους συντήρησης. Ανάμεσα στους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες σιδήρου του υλικού, η ειδική αντίσταση είναι αυτή που ελέγχεται εύκολα με την αλλαγή της περιεκτικότητας σε πυρίτιο. Αυξάνοντας τη ποσότητα του πυριτίου, οι απώλειες πυρήνα μειώνονται και φτάνουν κοντά στο 6,5% του βάρους. Όμως, επειδή πρέπει να υπάρχει περιορισμός της αύξησης της περιεκτικότητας σε πυρίτιο λόγω της σκληρότητας του υλικού και της δυσκολίας στην κατασκευή του πυρήνα, υπάρχει και ένας άλλος τρόπος μείωσης των απωλειών πυρήνα. Αυτός είναι να μειωθεί το πάχος του υλικού. Η παραγωγή χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων υψηλής περιεκτικότητας σε πυρίτιο με πλάτος περίπου 0,1 mm είναι περισσότερο δύσκολη εξαιτίας της σημαντικότητας του ακριβούς ελέγχου της διαδικασίας της έλασης εν ψυχρώ και της σχέσης αυτής με αυτήν της ανόπτησης. Επιπρόσθετα, έχει αναφερθεί ότι περαιτέρω βελτίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων είναι δυνατή με μαγνητική ανόπτηση κοντά στη θερμοκρασία Curie¹: Απότομη αύξηση της μέγιστης διαπερατότητας και μείωση των απωλειών κατά 10% παρατηρήθηκαν μετά την ανόπτηση σε μαγνητικό πεδίο με πάνω από 10 Oe (oersted)². [2.3]



Σχήμα 2.2 – Μεταβολή των απωλειών πυρήνα με την μαγνητική ανόπτηση [2.3]

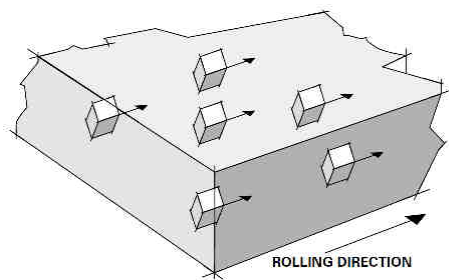
Ο χάλυβας προσανατολισμένων κόκκων παράγεται με μια καλά σχεδιασμένη κατεργασία μετάλλου ειδικής σύστασης. Ακολουθούμενη της αρχικής θερμής έλασης, η διαδικασία συνήθως περιλαμβάνει δύο στάδια ψυχρής έλασης και ενδιάμεσα αυτών την ανόπτηση.

¹ Όταν τα σιδηρομαγνητικά υλικά θερμανθούν σε υψηλές θερμοκρασίες γίνονται παραμαγνητικά. Η θερμοκρασία μετάβασης από την σιδηρομαγνητική στην παραμαγνητική συμπεριφορά ονομάζεται θερμοκρασία Curie. Στη θερμοκρασία αυτή, η διαπερατότητα μειώνεται απότομα και η παραμένουσα μαγνήτιση μηδενίζεται.

² Ισχύει η ισοδυναμία 10 Oe = 795,77 A/m

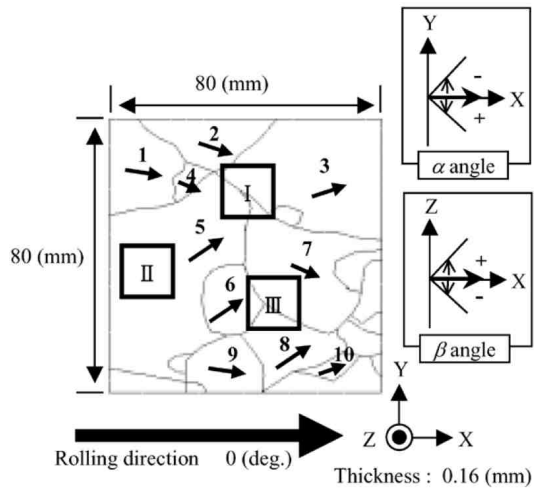
Κατά την διάρκεια της έλασης, οι κρύσταλλοι ή κόκκοι επιμηκύνονται και η κατεύθυνσή τους αλλάζει. Μετά την τελικό στάδιο της ανόπτησης, οι κόκκοι υφίστανται μία δεύτερη ανακρυστάλλωση όπου κάποιοι από αυτούς μεγαλώνουν σε μέγεθος εις βάρος κάποιων άλλων μικρότερων σε μέγεθος, δημιουργώντας τους μία κατεύθυνση τύπου (100). Οι μεταλλικοί κρύσταλλοι στο τελικό προϊόν είναι αρκετά μεγάλοι ώστε να εντοπίζονται με γυμνό μάτι αλλά έχουν χάσει πια το επιμηκυσμένο σχήμα και δεν αποκαλύπτουν πια την διεύθυνση της έλασης.

Η τελική κρυσταλλική διεύθυνση μπορεί να απεικονιστεί με ένα κύβο με τέσσερις από τις ακμές του να είναι παράλληλες προς την διεύθυνση της έλασης και οι υπόλοιπες οκτώ σε γωνία 45 μοιρών προς την επιφάνεια του φύλλου. Αυτό απεικονίζεται στο σχήμα 2.3. Επειδή οι κρύσταλλοι μαγνητίζονται πολύ εύκολα σε μία κατεύθυνση παράλληλη προς τις ακμές του κύβου, οι μαγνητικές ιδιότητες του προσανατολισμένου χάλυβα είναι οι καλύτερες σε διεύθυνση παράλληλη με την διεύθυνση της έλασης. Συνεπώς, με αυτό τον τρόπο, παράγονται κράματα με μεταλλική κρυσταλλική δομή στην οποία ο κόκκοι είναι ευθυγραμμισμένοι κατά την διεύθυνση της μαγνητικής ροής με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση των απωλειών. [2.1]

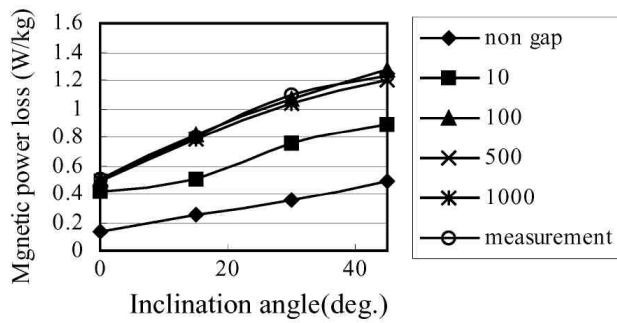


Σχήμα 2.3 – Απεικόνιση του τρόπου με τον οποίο οι κρύσταλλοι του χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων είναι ευθυγραμμισμένοι

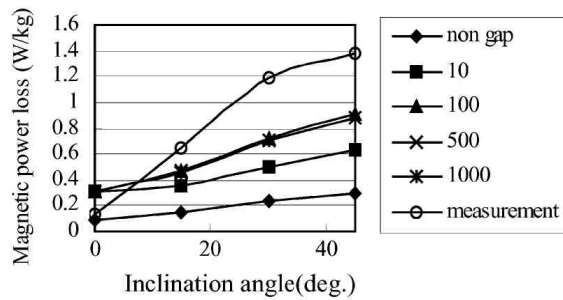
Στο [2.4] , τα παραπάνω μαγνητικά χαρακτηριστικά του χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων αναλύθηκαν με την μέθοδο FEM (Finite-element method). Έτσι αποσαφηνίστηκε ότι το τοπικό μαγνητικό χαρακτηριστικό του φύλλου από χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων μεταβλήθηκε εξαιτίας της δομής και της διαμόρφωσης των κρυσταλλικών κόκκων. Στην ανάλυση του μαγνητικού πεδίου, η κατεύθυνση διέγερσης (κλίση) θεωρήθηκε ίση με 0, 15, 30 και 45 μοίρες υπό συνθήκες εναλλασσόμενης ροής. Έτσι, βλέπουμε στο σχήμα 2.5 πως μεταβάλλονται οι απώλειες πυρήνα σε σχέση με την γωνία κλίσης (όταν η μαγνητική διαπερατότητα είναι 10, 100, 500 και 1000) για τις περιοχές του φύλλου με ονομασία I, II και III (σχήμα 2.4).



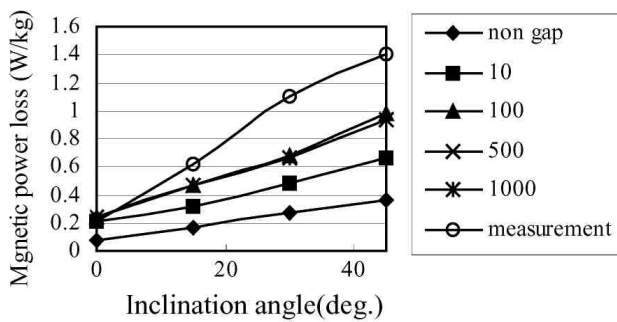
Σχήμα 2.4 – Σύνθεση του κρυσταλλικού κόκκου και η “εύκολη για μαγνήτιση” κατεύθυνση κάθε κόκκου [2.4]



(a)



(b)



(c)

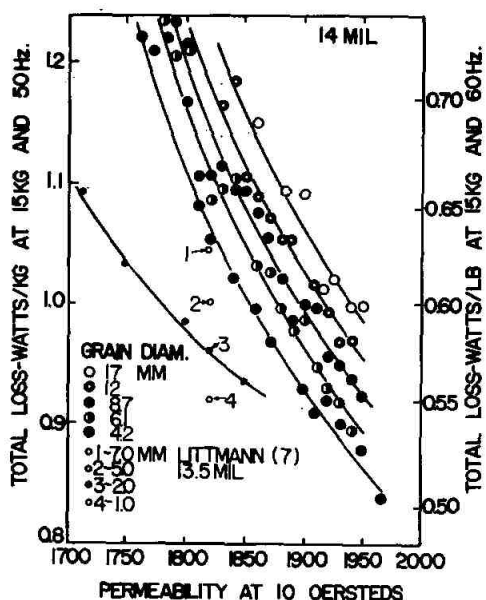
Σχήμα 2.5 – Μεταβολή απωλειών πυρήνα σε σχέση με την γωνία κλίσης για τις περιοχές I(α), II(β) και III(γ) αντίστοιχα τους σχήματος 2.3 [2.4]

2.1.3 Χάλυβας υψηλής διαπερατότητας (High-permeability steel)

Η διαδικασία της ψυχρής έλασης στον χάλυβα απλοποιείται με την κατάργηση κάποιων σταδίων αυτής ενώ επίσης προστίθεται ποσότητα αλουμινίου, με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να έχει καλύτερη κατευθυντικότητα και οι κόκκοι να είναι ευθυγραμμισμένοι εντός 3° του ιδανικού. Με τον παραπάνω τρόπο επιτυγχάνεται μείωση κατά 30-40% των απωλειών υστέρησης εξαιτίας της βελτίωσης της κατευθυντικότητας των κόκκων. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι μέσω της διαδικασίας αυτής μειώνονται και οι απώλειες δινορρευμάτων λόγω το ότι αυξάνεται η αντοχή εφελκυσμού του υλικού. [2.2]

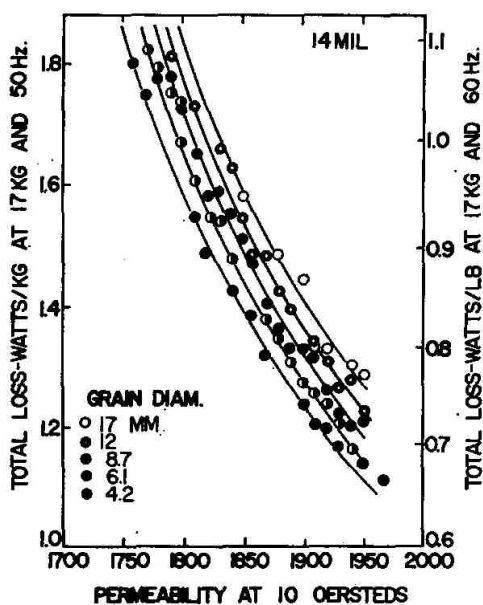
Μέχρι σήμερα, πολλές μελέτες έχουν αναδείξει το γεγονός ότι το αλουμίνιο έχει μία κακή επίδραση στις μαγνητικές ιδιότητες του πυριτιούχου σιδήρου όταν αυτός υπόκειται σε ανόπτηση σε υψηλές θερμοκρασίες και δεν προστατεύεται επαρκώς ενάντια στο οξυγόνο. Και αυτό γιατί το αλουμίνιο οξειδώνεται εύκολα και σχηματίζεται το οξείδιο του αλουμινίου το οποίο είναι δυσμενές για τις μαγνητικές ιδιότητες [2.5].

Επίσης, σύμφωνα με [2.5], παλιότερες μελέτες (Littmann) έχουν δείξει ότι κρυσταλλικοί κόκκοι με μεγαλύτερο μέγεθος έχουν υψηλότερες απώλειες. Το παραπάνω επιβεβαιώθηκε με την εργασία [2.5] όπου δείγματα υψηλής διαπερατότητας, που περιείχαν από 2,9% έως 3% πυρίτιο, λήφθηκαν και τα συμπεράσματά της απεικονίζονται στα σχήματα 2.6 και 2.7. Τα σχήματα αυτά δείχνουν την σχέση μεταξύ διαπερατότητας (στα $H=10$ Oe) και των ολικών απωλειών σε δείγματα κόκκων διαφόρων μεγεθών.



Σχήμα 2.6 – Επίδραση της διαπερατότητας στις συνολικές απώλειες στα 15 kG¹. Το μέγεθος των κόκκων είναι σταθερό για κάθε καμπύλη [2.5]

¹ Ισχύει η ισοδυναμία 1T = 10⁴ G (Gauss), δηλαδή 15 kG = 1,5 T



Σχήμα 2.7 – Επίδραση της διαπερατότητας στις συνολικές απώλειες στα 17 kG. Το μέγεθος των κόκκων είναι σταθερό για κάθε καμπύλη [2.5]

2.1.4 Χάλυβας με αναδιαμορφωμένες δομές (Domain-refined steel)

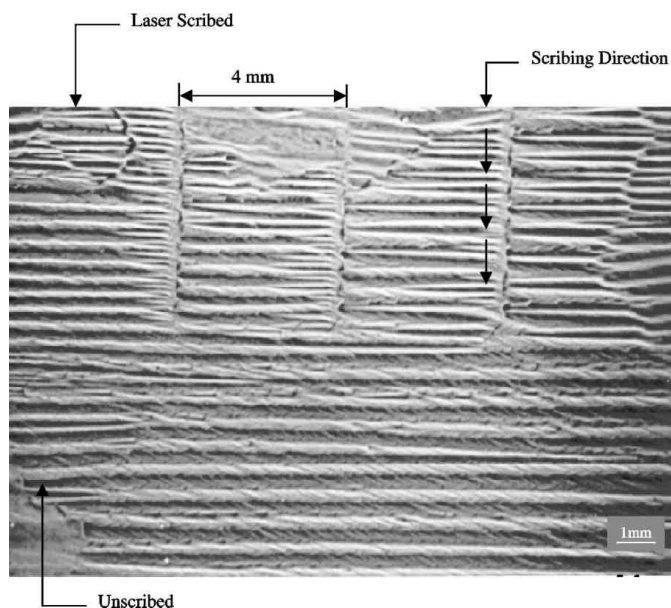
Ερευνητές αναζήτησαν μεθόδους οι οποίες να προσδίδουν στον χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων καλύτερες ιδιότητες. Έτσι, νεώτερες τεχνικές γνωστές ως τεχνικές αναδιαμορφωμένων δομών (DRT-domain refinement techniques) ερευνώνται για την αποτελεσματικότητά τους στο να μειώνουν τις απώλειες πυρήνα με το να μειώνουν το μέγεθος των δομών του υλικού. Αυτές οι τεχνικές αναδιαμορφωμένων δομών περιλαμβάνουν μηχανικό ξύσιμο, ακτινοβολία με ιονισμένο αέριο, εκτομή με σπινθήρα και χάραξη με λέιζερ. Όλες αυτές οι τεχνικές βελτιώνουν τη μείωση απωλειών πυρήνα αλλά η χάραξη με λέιζερ είναι η πιο ελκυστική από όλες εξαιτίας της αποδοτικότητάς της, της ευκολίας της στην εφαρμογή, στην απουσία επαφής και στην σχετική έλλειψη πρόκλησης ζημιάς στην επικάλυψη της επιφάνειας.

Αρχικά, το 1924 η εταιρία “Haynes and Wolford” εφάρμοσε τη μέθοδο του μηχανικού ξυσίματος του χάλυβα και η οποία μέθοδος απαιτούσε τη δημιουργία γραμμών ανά τακτικά διαστήματα και κάθετα στην διεύθυνση της έλασης. Αποτέλεσμα ήταν η μείωση των απωλειών πυρήνα. Τη δεκαετία του 1970, η εταιρία “Pepperhoff and Fieldler” πέτυχε μείωση απωλειών πυρήνα κατά 40% με την τομή λεπτών χαρακιών ανά τακτικών διαστημάτων κάθετα στην διεύθυνση της έλασης. Η τεχνική του μηχανικού ξυσίματος ήταν η πιο αποτελεσματική σε υλικά μεγάλου μεγέθους κόκκων. Αλλά η τεχνική αυτή ήταν τόσο

αργή που δεν μπορούσε να εφαρμοστεί ικανοποιητικά στη πράξη. Επίσης προκαλούσε ζημιά στην μονωτική επικάλυψη και φθορά στα εργαλεία εξαιτίας της ιδιαίτερα αυξημένης σκληρότητας της επίστρωσης του φωσφορικού άλατος.

Άλλη τεχνική, ονομαζόμενη εκτομή με σπινθήρα, αναπτύχθηκε με σκοπό να δημιουργήσει ένα ευνοϊκό σχέδιο πίεσης που θα μειώνει τις απώλειες πυρήνα. Η χρήση της τεχνικής αυτής πέτυχε της μείωση των απωλειών κατά 15% με το να παράγει ελεγχόμενες γραμμές στιγμάτων με απόσταση μεταξύ τους 0,5 mm. Για την αποκατάσταση της ζημιάς στην επίστρωση, απαιτούνταν ως προεργασία να τοποθετηθεί μία λεπτή ανόργανη επικάλυψη.

Σημαντική πρόοδος σημειώθηκε όταν η εταιρία “Nippon Steel” εφάρμοσε τη χρήση λέιζερ για την χάραξη χάλυβα. Η χάραξη γινόταν κάθετα στην διεύθυνση της έλασης, ανά διαστήματα των 5 mm. Οι απώλειες μειώθηκαν κατά 10% υπό τις βέλτιστες συνθήκες για ακτινοβολία λέιζερ (1,7 T και 50 Hz). Όταν το υλικό υπόκειται στη χάραξη, η ακτίνα του λέιζερ μεταδίδει μία θερμική κρούση στην επιφάνεια αυτού. Αυτή η θερμική εισροή επικεντρώνεται σε ένα μικρό σημείο της επιφάνειας και πραγματοποιείται σε πολύ μικρό χρονικό πλαίσιο. Επειδή η περιβάλλουσα περιοχή του υλικού δεν επηρεάζεται, η θερμαινόμενη περιοχή είναι αναγκασμένη στο να αντιδρά με το να επεκτείνεται έξω από το επίπεδο της επιφάνειας του υλικού. Αυτή η ραγδαία μετατόπιση της επιφάνειας πυροδοτεί ένα επεκτεινόμενο κύμα που διαδίδει την πίεση σε όλο το βάθος του υλικού. Η ωφέλιμη επίδραση της χάραξης με λέιζερ αποδίδεται στην αναδιαμόρφωση των δομών εξαιτίας της πίεσης που εισάγεται στη διαδικασία. [2.6]



Σχήμα 2.8 – Δομή πυριτιούχου χάλυβα μετά την χάραξη με λέιζερ

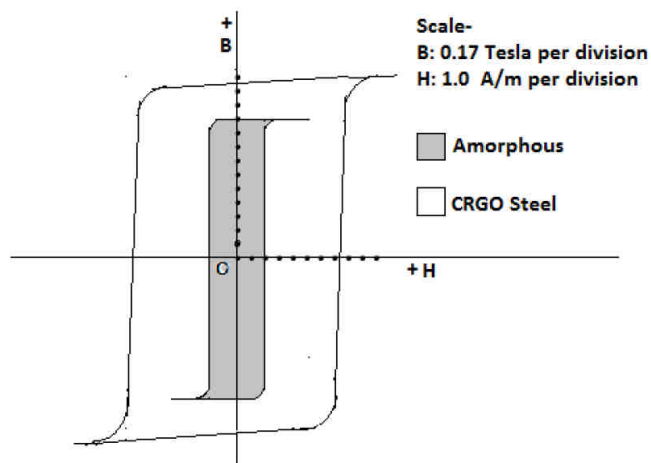
2.1.5 Άμορφος χάλυβας (Amorphous steel)

Ο άμορφος χάλυβας δεν έχει κρυσταλλική δομή (όπως έχουν οι χάλυβες των προηγούμενων κατηγοριών) , δεν έχει άξονες συμμετρίας ενώ και τα συστατικά άτομά του είναι διανεμημένα κατά τυχαίο τρόπο μέσα στο υλικό. Για την ικανοποιητική αντοχή του υλικού πραγματοποιείται πολύ γρήγορη ψύξη του λιωμένου μείγματος. Αν και η χρήση του άμορφου σιδήρου δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, ίσως και λόγω της δυσκολίας στη κόψη και διαμόρφωση του άμορφου για τους Μ/Σ τύπου τυλιχτού πυρήνα, μπορεί να υπάρξει σημαντική μείωση των απωλειών σιδήρου συγκριτικά με τα καλύτερα στο είδος τους, συμβατικούς χάλυβες.

Υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο αρκετά κράματα άμορφου, ανάμεσα στα οποία είναι το κράμα σιδήρου-βόριου-πυριτίου ($Fe_{78}B_{13}Si_{19}$) και το οποίο έχει την καλύτερη απόδοση. Οι απώλειες πυρήνα του συγκεκριμένου κράματος είναι περίπου το 1/10 των απωλειών πυρήνα του χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων.

Σύγκριση άμορφου χάλυβα και χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων

Για λόγους συντομίας θα αναφερόμαστε στον χάλυβα προσανατολισμένων κόκκων ως CRGO (Cold Rolled Grain-Oriented). Τα μαγνητικά χαρακτηριστικά (B-H) του άμορφου και του CRGO χάλυβα απεικονίζονται στο σχήμα 2.9 όπου παρατηρούμε ότι η περιοχή που περιβάλλεται από την καμπύλη υστέρησης του άμορφου είναι μικρότερη από αυτήν του CRGO. Το όριο κορεσμού για τον άμορφο είναι 1,69 Tesla ενώ για τον CRGO είναι 2,03 Tesla. Για αυτό το λόγο, ο άμορφος είναι πιο κατάλληλος για μικρού μεγέθους Μ/Σ και για Μ/Σ διανομής, μιας και σχεδιάζονται για μικρότερες πυκνότητες ροής.



Σχήμα 2.9 – Καμπύλη B-H

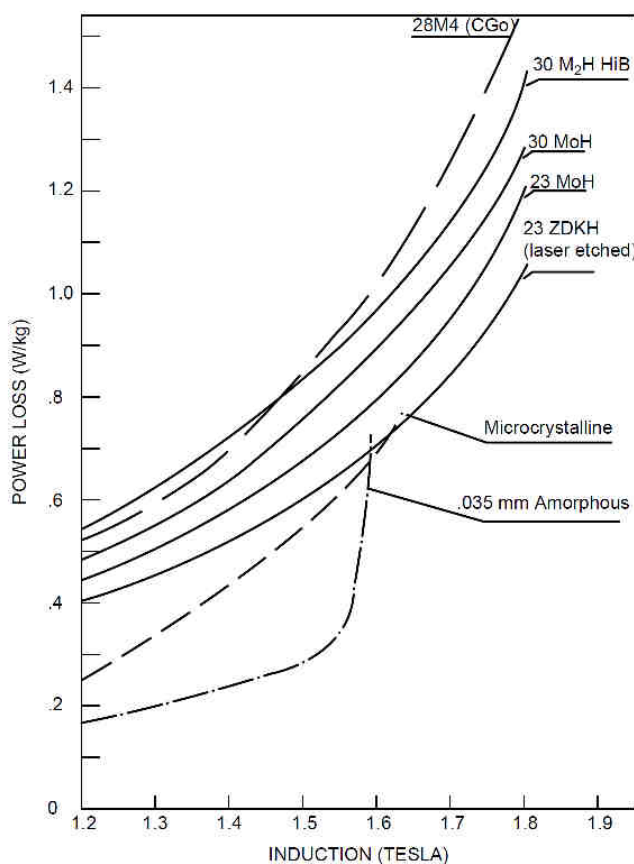
Ως προς τον οικονομικό σχεδιασμό του Μ/Σ, η διατομή του πυρήνα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Αλλά για μικρότερη διατομή πυρήνα, η πυκνότητα ροής είναι υψηλή και συνεπώς αυξάνονται οι απώλειες πυρήνα. Αν οι Μ/Σ μεγάλης ισχύος σχεδιάζονται για χαμηλή πυκνότητα ροής τότε η διατομή του πυρήνα πρέπει να είναι μεγάλη. Αλλά τότε το κόστος του πυρήνα και των τυλιγμάτων είναι μεγαλύτερο. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ο άμορφος δεν είναι κατάλληλη επιλογή για Μ/Σ μεγάλης ισχύος αν το κόστος είναι το πρωταρχικό ζήτημα. Οι Μ/Σ άμορφου είναι ενεργειακά αποδοτικοί αλλά το κόστος τους είναι κατά 20-30% μεγαλύτερο από το κόστος των Μ/Σ με πυρήνα από χάλυβα CRGO.

Για τριφασικό Μ/Σ τριών σκελών υπάρχει μαγνητική ασυμμετρία εξαιτίας της ανισότητας των τριών μαγνητικών μηκών για τις αντίστοιχες ροές. Το μήκος της μαγνητικής διαδρομής του μεσαίου σκέλους, την οποία ακολουθεί η μαγνητική ροή Φ_B είναι μικρότερο από τα μήκη των δύο υπόλοιπων διαδρομών. Έτσι, η μαγνητική αντίσταση για την ροή Φ_B είναι μικρότερη από τις μαγνητικές αντιστάσεις που συναντούν οι ροές Φ_A και Φ_C των ακριανών σκελών. Συνεπώς, δημιουργείται διαφορά στα ρεύματα μαγνήτισης των τριών φάσεων και το οποίο έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας. Στην περίπτωση των Μ/Σ άμορφου πυρήνα, η μαγνητική αντίσταση της μαγνητικής διαδρομής είναι πολύ λιγότερη (περίπου $\frac{1}{4}$ της αντίστασης του πυρήνα τύπου CRGO), το οποίο μειώνει την μαγνητική ασυμμετρία και κατά συνέπεια μειώνεται το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας.

Γενικότερα, ο Μ/Σ άμορφου πυρήνα, εκτός από μικρότερες απώλειες πυρήνα και μικρότερο ρεύμα μηδενικής ακολουθίας, έχει χαμηλό ρεύμα μαγνήτισης, λιγότερο θόρυβο, μεγαλύτερο ρεύμα ηλεκτρίσης, περισσότερα προβλήματα αρμονικών [2.7], μεγαλύτερο μέγεθος, μεγαλύτερο αρχικό κόστος, μεγαλύτερη αποδοτικότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Τα πλεονεκτήματα του άμορφου πυρήνα είναι περισσότερα συγκρινόμενα με τα μειονεκτήματα αυτού και αν προς το παρόν, το αρχικό κόστος του Μ/Σ άμορφου πυρήνα είναι σχετικά υψηλότερο, μετά από κάποια χρονική περίοδο γίνεται οικονομικότερος. [2.8]

2.1.6 Μικροκρυσταλλικός χάλυβας (Microcrystalline steel)

Η μαγνητική και μηχανική απόδοση του πυριτιούχου χάλυβα μπορεί να βελτιστοποιηθεί με την παραγωγή μείγματος πυριτίου και αλουμινίου-σιδήρου με ταχεία στερεοποίηση με τρόπο παρόμοιο με αυτόν του άμορφου χάλυβα. Το παραγόμενο προϊόν είναι ένα εύπλαστο μικροκρυσταλλικό υλικό το οποίο έχει το πλεονέκτημα της υψηλότερης διαπερατότητας συγκριτικά με του άμορφου χάλυβα.



Σχήμα 2.10 - Απώλειες σιδήρου συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητα 50Hz για διάφορα υλικά πυρήνων. [2.2]

2.2 Τύλιγμα πηνίου

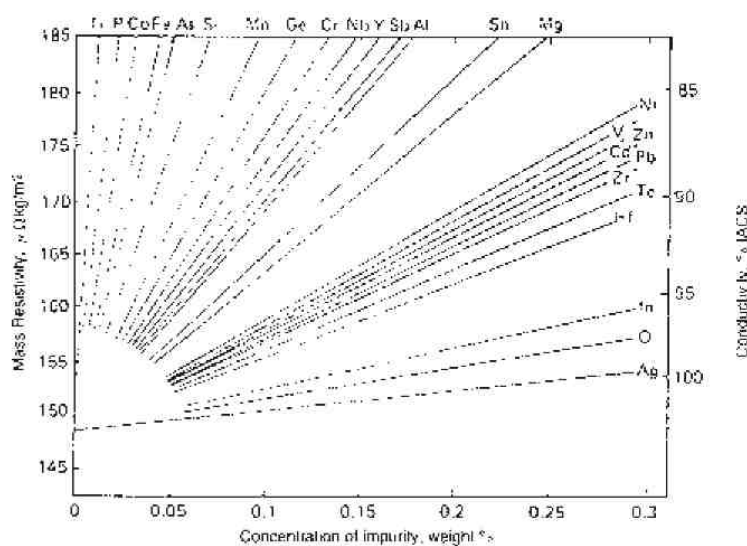
Τα τυλίγματα των Μ/Σ κατασκευάζονται με υψηλής αγωγιμότητας χαλκό. Ο χαλκός αυτός έχει άριστες μηχανικές ιδιότητες, έχει την μεγαλύτερη αγωγιμότητα από όλα τα διαθέσιμα στο εμπόριο μέταλλα ενώ συγχρόνως βοηθά στην μείωση των απωλειών φορτίου.

Υπάρχουν πολλά είδη κραμάτων χαλκού και υψηλής αγωγιμότητας χαλκού και τα οποία χρησιμοποιούνται σε διάφορους τύπους ηλεκτρικού εξοπλισμού. Ο χαλκός που χρησιμοποιείται για τα τυλίγματα των Μ/Σ υπακούει στο Πρότυπο “ΕΛΟΤ EN 13599 : Χαλκός και κράματα χαλκού-Πλάκες, φύλλα και ταινίες χαλκού για ηλεκτρικές εφαρμογές”[2.9]. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του χαλκού εξαρτώνται από το βαθμό παρουσίας ή απουσίας συγκεκριμένων στοιχείων και ειδικότερα του οξυγόνου, του φωσφόρου και του αργύρου. Οι διάφορες κατηγορίες του χαλκού είναι οι ακόλουθες [2.9]:

- **Ηλεκτρολυτικοί χαλκοί – ETP** (χαλκοί που εμπεριέχουν οξυγόνο). Παράγονται με συγκεκριμένη ποσότητα οξυγόνου και έχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- **Χαλκοί χωρίς οξυγόνο – OF**. Παράγονται σε περιβάλλον απουσίας οξυγόνου χωρίς τη χρήση αποξειδωτικών και έχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- **Αποξειδωτικοί χαλκοί**. Παράγονται με την προσθήκη ελεγχόμενης ποσότητας αποξειδωτικών, κατά προτίμηση φωσφόρου, και περιέχουν μία ελεγχόμενη μικρή ποσότητα από υπολείμματα αποξειδωτικών. Έχουν υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.
- **Χαλκοί με συνοδεία αργύρου**. Ηλεκτρολυτικοί, με απουσία οξυγόνου και αποξειδωτικοί χαλκοί μπορούν να παραχθούν με προσθήκη αργύρου.

Χαλκοί με συνοδεία αργύρου

Όμως το σημαντικότερο για την κατασκευή των Μ/Σ κράμα είναι αυτό του χαλκού και αργύρου. Η προσθήκη αργύρου σε χαλκό αυξάνει την θερμοκρασία που αυτό μαλακώνει ενώ η επίδραση στην ηλεκτρική του αγωγιμότητά του είναι πολύ μικρή. Συνήθως χρησιμοποιείται μία ελάχιστη ποσότητα αργύρου (0,01%) και η οποία βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες, ιδιαίτερα την αντίσταση ερπυσμού, και παρέχει την απαραίτητη αντοχή στα τυλίγματα του Μ/Σ ώστε να αντέξουν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία του Μ/Σ λόγω των σφαλμάτων και των βραχυκυκλωμάτων. Το μειονέκτημα του υλικού αυτού είναι η πρόσθετη δυσκολία στη διαδικασία της περιέλιξης εξαιτίας της αυξημένης σκληρότητάς του. Στο σχήμα 2.11 απεικονίζεται η επίδραση των διαφόρων προσμείξεων στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση και την αγωγιμότητα του χαλκού [2.2].



Σχήμα 2.11 Επίδραση των διαφόρων προσμείξεων στην ειδική ηλεκτρική αντίσταση και την αγωγιμότητα του χαλκού [2.2]

Ηλεκτρολυτικοί χαλκοί (ETP) και Χαλκοί χωρίς οξυγόνο(OF)

Υπάρχει πληθώρα ηλεκτρικών εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιείται χαλκός υψηλής αγωγιμότητας και ποικιλία χαλκού αλλά για την πλειοψηφία των εφαρμογών επιλέγεται ο ηλεκτρολυτικός χαλκός (ETP). Σύμφωνα με [2.10], ερευνήθηκε η επίδραση των μεγάλων περιόδων λειτουργίας των Μ/Σ στις φυσικές ιδιότητες των συρμάτων χαλκού τύπου OF και ETP τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται για τα τυλίγματα της Μέσης και Υψηλής Τάσης. Έτσι, προκύπτει ότι συγκεκριμένο δείγμα χαλκού τύπου OF διατήρησε την σκληρότητά του καλύτερα από ότι το δείγμα χαλκού τύπου ETP κατά την διάρκεια του πρώτου έτους της προσομοίωσης σε θερμοκρασίες λειτουργίας του Μ/Σ. Επίσης, παρατηρώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των δειγμάτων χαλκών OF και ETP, θεωρήθηκε ότι υπάρχει όφελος για τη χρήση χαλκού OF όσον αφορά τυλίγματα Μ/Σ όπου εκεί οι πραγματικές θερμοκρασίες μεταβάλλονται με τέτοιο τρόπο που οι φυσικές ιδιότητες των διαφόρων κατηγοριών χαλκού να αλλάζουν σημαντικά στο πρώτο έτος λειτουργίας του Μ/Σ. [2.11]

Αλουμίνιο

Ένα άλλο υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των τυλιγμάτων είναι το αλουμίνιο. Σύγκριση μεταξύ των χαρακτηριστικών των δύο υλικών παρουσιάζεται στο πίνακα 2.1.

| Φυσικές ιδιότητες | Χαλκός | Αλουμίνιο |
|---|----------|-----------|
| Ειδική αντίσταση, $\Omega\text{-mm}^2/\text{m}$ | 0,016642 | 0,03 |
| Πυκνότητα μάζας, kg/dm^3 | 8,89 | 2,7 |
| Αντοχή εφελκυσμού, MPa | 124 | 46,5 |
| Σημείο τήξης, $^{\circ}\text{C}$ | 1084,88 | 660,2 |
| Κόστος ανά κιλό, INR | 580 | 370 |

Πίνακας 2.1 Σύγκριση μεταξύ των υλικών χαλκού και αλουμινίου [2.11]

Η χρήση αλουμινίου αυξάνει το φυσικό μέγεθος του τυλιγματος και του Μετασχηματιστή. Όμως το μεγαλύτερο μέγεθος του τυλιγματος δεν ισοδυναμεί με αύξηση του κόστους αφού το αλουμίνιο είναι ελαφρύτερο και φτηνότερο συγκριτικά με τον χαλκό. Από την άλλη όμως, ο χαλκός έχει υψηλότερη μηχανική αντοχή και χρησιμοποιείται αποκλειστικά για μεγάλους Μετασχηματιστές Ισχύος όπου εμφανίζονται μεγάλες δυνάμεις μιας και τότε τα τυλίγματα πρέπει να αντέξουν μηχανικές δυνάμεις κατά την διάρκεια

βραχυκυκλώματος. Σε συνθήκες βραχυκυκλώματος, το ρεύμα μπορεί να φτάσει το 20πλάσιο του ονομαστικού και να αναπτυχθούν μηχανικές δυνάμεις έως 400 φορές τις δυνάμεις υπό κανονικές συνθήκες [2.11].

Είναι ακόμη γνωστό ότι λόγω της καλής συνδεσιμότητας του χαλκού, οι εσωτερικές συνδέσεις του Μ/Σ παραμένουν σφιχτές-στερέες με αποτέλεσμα να επιμηκύνεται ο χρόνος ζωής αυτού και να μειώνονται οι απαιτήσεις συντήρησής του. Η καλή συνδεσιμότητα του χαλκού προκύπτει λόγω της μικρότερης διαμέτρου του χάλκινου αγωγού, οπότε και αυτός ευκολότερα περιελίσσεται και συναρμολογείται. Επίσης, και αν ακόμη χρησιμοποιηθεί αλουμίνιο για τα τυλίγματα των πηνίων, αναγκαστικά σε κάποια σημεία θα πρέπει να γίνει συνένωση με χαλκό αλλά αυτή η διαφορά υλικών στα συνοριακά αυτά σημεία δημιουργεί προβλήματα οξείδωσης και κακής συνδεσιμότητας [2.12].

2.3 Μόνωση Μ/Σ

Η διάρκεια ζωής του Μ/Σ ισχύος εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη μόνωση αυτού. Έτσι, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό του μονωτικού συστήματος ώστε αυτό να διαθέτει την ικανότητα να αντέχει στις διάφορες υπερτάσεις που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια των δοκιμών στο εργοστάσιο παραγωγής και κατά την λειτουργία του Μ/Σ. Αυτές οι υπερτάσεις περιλαμβάνουν μεταβατικές τάσεις κατά την διάρκεια των κρουστικών δοκιμών αλλά και τάσεις βιομηχανικής συχνότητας που παράγονται κατά τη διάρκεια των δοκιμών της εφαρμοσμένης και επαγόμενης τάσης. Επίσης, το μονωτικό σύστημα πρέπει να έχει την ικανότητα να αντέχει σε μηχανικές και θερμικές πιέσεις, την ικανότητα να προλαμβάνει την υπερβολική συσσώρευση θερμότητας και την ικανότητα να διατηρεί τα χαρακτηριστικά του καθ' όλη τη διάρκεια της αποδεκτής περιόδου λειτουργίας του Μ/Σ.

Η επιλογή της στάθμης μόνωσης είναι ανάλογη των προβλεπόμενων υπερτάσεων προστιθέμενες με ένα περιθώριο ασφάλειας το οποίο αντισταθμίζει την μείωση ικανότητας της μόνωσης εξαιτίας της φθοράς αυτής λόγω των ετών λειτουργίας του Μ/Σ. Με την χρήση μονωτικών υλικών παρέχεται μόνωση μεταξύ δύο διαδοχικών στρώσεων της περιέλιξης, μεταξύ της υψηλής και χαμηλής τάσης, της χαμηλής τάσης και πυρήνα, μεταξύ των φάσεων και μεταξύ πυρήνα και γης.

Η μόνωση, σύμφωνα με [2.13], αποτελείται από:

- την κύρια μόνωση η οποία αποτελείται από ορυκτέλαιο (το οποίο δρα και ως μέσο ψύξης) και πεπιεσμένο χαρτόνι μεταξύ των τυλιγμάτων, μεταξύ τυλιγμάτων και γης, μεταξύ ακροδεκτών και μεταξύ ακροδεκτών και γειωμένων μερών του Μ/Σ
- τη μόνωση των τυλιγμάτων

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την μόνωση του Μ/Σ είναι :

- μονωτικό λάδι (ορυκτέλαιο, συνθετικό ή φυτικό)
- υλικά για τη μόνωση των αγωγών (χαρτί τύπων όπως Kraft και Nomex[®]) και βερνίκι
- στερεά μονωτικά (χαρτόνια διαφόρων τύπων)

2.3.1 Μονωτικό χαρτί

Η μόνωση με βάση τη κυτταρίνη είναι η προτιμώμενη επιλογή για τη στερεά μόνωση του Μ/Σ, όχι γιατί είναι η καλύτερη αλλά γιατί είναι ευρέως διαθέσιμες οι φυσικές πρώτες ύλες για την κατασκευή της μόνωσης, όπως είναι η μαλακή ξυλεία. Το κύριο μειονέκτημα του κυτταρινικού υλικού για την ηλεκτρολογική χρήση είναι ότι πρόκειται για υγροσκοπικό υλικό και χρειάζεται να επεξεργάζεται και να διατηρείται στεγνό. Για τους Μ/Σ ισχύος, η επεξεργασία αυτή είναι πολύπλοκη και απαιτητική ως προς τον χρόνο. Από τη στιγμή της τοποθέτησης της μόνωσης, αυτή κατά την διάρκεια των ετών αρχίζει να γηράσκει με αποτέλεσμα να αυξάνεται το νερό που βρίσκεται εντός αυτής εξαιτίας της αποσύνθεσης της μοριακής αλυσίδας λόγω των θερμικών πιέσεων και των οξειδωτικών διαδικασιών. Ο αποπολυμερισμός της κυτταρικής αλυσίδας μειώνει το μήκος της αλυσίδας και της μηχανικής αντοχής. Τελικά, η μόνωση καθίσταται εύθραυστη και ανθρακώδης χωρίς καμιά αντοχή στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η ξήρανση του Μ/Σ αντιμετωπίζει το παραπάνω πρόβλημα αφού η ξηρή κυτταρινική μόνωση έχει άριστες διηλεκτρικές ιδιότητες [2.14].

Χαρτί Kraft

Το χαρτί Kraft παρασκευάζεται από την ομώνυμη μέθοδο πολτοποίησης του ξύλου. Χρησιμοποιούνται κυρίως ξυλεία κωνοφόρων ειδών και πραγματοποιείται χημική κατεργασία των ξυλοτεμαχιδίων με υδατικό διάλυμα καυστικού νατρίου και θειούχου νατρίου τα οποία “σπάνε” τους δεσμούς της λιγνίνης και “ελευθερώνουν” τις ίνες της κυτταρίνης. Για την παραγωγή του χαρτιού Kraft, ξυλοτεμαχίδια τροφοδοτούνται σε μεγάλα χωνευτήρια τα οποία αντέχουν σε υψηλές πιέσεις και έχουν δυνατότητα παραγωγής

μέχρι και 800-1000 τόνους πολτού την ημέρα. Η πολτοποίηση του ξύλου, δηλ. η μετατροπή του ξύλου σε πολτό (ίνες) διαρκεί μερικές ώρες (3-6 ώρες) σε θερμοκρασίες περίπου 130-180 °C. Ο παραγόμενος πολτός έχει μεγαλύτερο μήκος ινών και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με άλλες μεθόδους. Στη συνέχεια έπονται τα στάδια του καθαρισμού, της συμπύκνωσης, της λεύκανσης και τα βασικά στάδια παραγωγής του χαρτιού [2.15].

Σύμφωνα με την εργασία [2.16], τα χαρτιά Kraft, υλικά με βάση την κυτταρίνη, χρησιμοποιούνται ευρέως στον εξοπλισμό διανομής από την δεκαετία του 1900. Ανεξάρτητα από τις ατέλειες της κυτταρίνης, το χαρτί kraft συνεχίζει να επιλέγεται ως μονωτικό σχεδόν σε όλους τους Μ/Σ. Δυστυχώς, το πολυμερές της κυτταρίνης υπόκειται σε θερμική αποσύνθεση και είναι ευάλωτο σε οξειδωτικές και υδρολυτικές προσβολές. Έτσι, ο ηλεκτρικός εξοπλισμός που είναι μονωμένος με χαρτί kraft πρέπει να σχεδιάζεται και να λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε η θερμοκρασία της μόνωσης να παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Για παράδειγμα, αναφέρεται στο [2.16] ότι για μη-αναβαθμισμένο χαρτί kraft που χρησιμοποιείται στους Μ/Σ, το πρότυπο IEEE C57.91 Annex D, προτείνει ως μέγιστη συνεχόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους 95°C, ενώ το IEC 354 τους 98°C. Η υπέρβαση αυτών των θερμοκρασιών προκαλεί την επιτάχυνση της γήρανσης με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου ζωής της μόνωσης [2.16].

Χαρτιά για ειδικές εφαρμογές

Υπάρχουν πολλών ειδών χαρτιών που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές εφαρμογές αλλά τέσσερις είναι οι κύριες κατηγορίες χαρτιού που ανταποκρίνονται στις ειδικές ανάγκες κατασκευής των Μετασχηματιστών. Αυτές είναι:

- Χαρτί Crepe
- Χαρτί υψηλής εκτατότητας (Highly extensible paper)
- Θερμικώς αναβαθμισμένο χαρτί (Thermally upgraded paper)
- Πεπιεσμένο χαρτί εποξικής ρητίνης (“Diamond dotted” presspaper)

Χαρτί Crepe

Το χαρτί Crepe συνήθως παράγεται σε λωρίδες των 25mm πλάτος και είναι ιδανικό για την μόνωση ακανόνιστων επιφανειών όπου σωστή μόνωση δεν μπορεί να διαμορφωθεί με επίπεδα χαρτιά όπως πχ στα άκρα των τυλιγμάτων και στην διαδρομή αυτών προς τον μεταγωγέα αφού λόγω της ευκαμψίας του μπορεί να τοποθετηθεί σε ακανόνιστες διαδρομές

και σε σημεία που υπάρχουν καμπές. Ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου χαρτιού είναι η τάση να χάνει την ελαστικότητά του με την πάροδο των χρόνων.



Σχήμα 2.12 Μονωτικά Crepe : σωλήνες (μακαρόνια) για τους ακροδέκτες και χαρτί

Χαρτί υψηλής εκτατότητας

Μία εναλλακτική, για πολλές περιπτώσεις, είναι το χαρτί υψηλής εκτατότητας. Στο χαρτί αυτό, η ελαστική ιδιότητα προστίθεται σε στάδιο της παραγωγής με κατάλληλη διεργασία. Στη τελική της μορφή, το χαρτί διατηρεί το λείο φινίρισμα αλλά συγχρόνως την αντοχή εφελκυσμού και την ηλεκτρική απόδοση του. Αυτός ο συνδυασμός σκληρότητας και ελαστικότητας του υψηλής εκτατότητας χαρτιού το καθιστά πιο κατάλληλο από το συμβατικό χαρτί ώστε να αντέχει τη σκληρή χρήση του κατά τη διάρκεια της περιέλιξης αλλά και την ελαχιστοποίηση του τσαλακώματός του [2.2].

Θερμικώς αναβαθμισμένο χαρτί

Η πιο αξιοσημείωτη πρόσφατη βελτίωση του χαρτιού kraft συνέβη στα τέλη του 1950, όταν το θερμικώς αναβαθμισμένο kraft χαρτί εμφανίστηκε. Δύο βασικά είδη της θερμικής επεξεργασίας αναπτύχθηκαν:

- Τροποποίηση της κυτταρικής αλυσίδας ειδικότερα των ομάδων του υδροξυλίου με τη διαδικασία της κυανοαιθυλίωσης και αυτήν της ακετυλίωσης.
- Προσθήκη χημικών για την προστασία της κυτταρίνης από οξείδωση. Αυτό αρχικά επιτυγχανόταν με νιτρώδης χημικές ενώσεις όπως ουρία, μελαμίνη, δικυανοδιαμίδη και πολυακρυλαμίδη.

Επειδή όλες οι διαδικασίες θερμικής αναβάθμισης χρησιμοποιούν χημικά με βάση το άζωτο και αυτό δεν είναι μέρος της δομής της κυτταρίνης, η ποσότητα του παράγοντα σταθεροποίησης (π.χ. δικυανοδιαμίδη) της θερμικής αναβάθμισης μπορεί να καθοριστεί με το να μετρηθεί η ποσότητα του αζώτου. Οι διάφορες τεχνολογίες αναβάθμισης έχουν ποικίλους βαθμούς ποσότητας αζώτου, και η οποία ποσότητα πρέπει να είναι επαρκής για την αναβάθμιση του χαρτιού ώστε να ικανοποιεί τα ικανά κριτήρια για συγκεκριμένο

μονωτικό σύστημα [2.17]. Η χημική επεξεργασία, με τη βοήθεια της δικυανοδιαμίδης, σταθεροποιεί τη δραστηριότητα του υδροξυλίου στο μόριο της κυτταρίνης και συνεπώς μειώνει την τάση προς υδρόλυση. Η διαδικασία αυτή της θερμικής αναβάθμισης αυξάνει την θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας, όπως εισηγείται το πρότυπο IEEE C57.91 (και αναφέρει το [2.16]), από τους 95 °C στους 110 °C. Σύμφωνα με [2.18], κατόπιν πειραματικών μετρήσεων, δείχτηκε ότι περισσότερο νερό παράγεται στις υψηλές θερμοκρασίες στο μη-θερμικώς αναβαθμισμένο χαρτί συγκριτικά με το θερμικώς αναβαθμισμένο χαρτί. Επίσης εξήχθη το συμπέρασμα ότι ο βαθμός της θερμικής αναβάθμισης του χαρτιού έχει θετική επίδραση στην υδρόλυση, καμιά επίδραση στην βραχυπρόθεσμη οξείδωση (πραγματική οξείδωση) αλλά θετική επίδραση στην μακροπρόθεσμη οξείδωση (νερό που παράγεται κατά τη γήρανση).

Συνθετικό χαρτί

Περαιτέρω αυξήσεις των θερμοκρασιών λειτουργίας έχουν επιτευχθεί κυρίως μέσω της χρήσης συνθετικών υλικών. Προς το παρόν, συνθετικά χαρτιά που μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες 250 °C και μεγαλύτερες είναι διαθέσιμα. Αλλά όμως, έχουν συντελεστή κόστους από 10 έως 50 φορές το κόστος του χαρτιού kraft, οπότε δεν είναι οικονομικά στις περισσότερες εφαρμογές των Μ/Σ ελαίου. Τα συνθετικά υλικά όπως το χαρτί τύπου aramid (υψηλής αντοχής συνθετικές ίνες αρωματικής πολυαμίδης) έχουν εμπορικές χρήσεις σε συγκεκριμένες ειδικές εφαρμογές όπως στους κινητούς Μ/Σ και στους Μ/Σ έλξης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι περιορισμοί του βάρους του μεγέθους αυτών καθιστούν σημαντική τη χρήση τους σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Τα επονομαζόμενα “υβριδικά” συστήματα έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί, όπου τα υψηλής θερμοκρασίας συνθετικά υλικά χρησιμοποιούνται σε μερικά μέρη των Μ/Σ και χαρτί kraft σε άλλα μέρη. Αυτή η προσέγγιση έχει εφαρμοστεί σε μεγάλους Μ/Σ ισχύος, για παράδειγμα, εκεί όπου ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας μεταξύ των ενεργών και μη-ενεργών εξαρτημάτων είναι αρκετά μεγάλος. Αντίθετα, αυτή η πρακτική δεν εφαρμόζεται στον εξοπλισμό διανομής, όπου ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας είναι πολύ μικρός.

Τα συνθετικά χαρτιά που διατίθενται για εμπορική χρήση, αν και έχουν βελτιωμένη αντίσταση ως προς την θερμική υποβάθμιση, έχουν ένα ή παραπάνω μειονεκτήματα συγκριτικά με τα χαρτιά kraft. Παράδειγμα, μερικά έχουν υψηλή διηλεκτρική σταθερά, αυξάνοντας την πίεση του ηλεκτρικού πεδίου σε άλλες περιοχές της δομής της μόνωσης. Μερικά είναι δύσκολο ή και αδύνατο να εμποτιστούν με διηλεκτρικό ρευστό, ή μπορούν να παγιδεύσουν αέρα κατά την διάρκεια της πλήρωσης με λάδι. Μερικά παρουσιάζουν

έλλειψη σκληρότητας όταν συγκρίνονται με χαρτιά kraft του ίδιου πάχους, κάτι που μπορεί να είναι μειονέκτημα σε τυλίγματα τύπου στρώσεων. Μερικά μαλακώνουν σε υψηλές θερμοκρασίες που εμφανίζονται κατά τη μικρή διάρκεια της υπέρβασης του ονομαστικού φορτίου [2.16].

Πεπιεσμένο χαρτί εποξικής ρητίνης

Το πεπιεσμένο χαρτί εποξικής ρητίνης που απεικονίζεται στο σχήμα 2.13 είναι ένα θερμικώς αναβαθμισμένο kraft χαρτί και χρησιμοποιείται για την μόνωση των διαδοχικών στρώσεων της περιέλιξης. Για την κατασκευή του χαρτιού, αυτό αρχικά καλύπτεται με δύο στρώσεις ρητίνης σε σχέδιο διαμαντιού (γι' αυτό και το όνομα "Diamond dotted") και το οποίο αφήνεται να στεγνώσει. Τα στίγματα της ρητίνης δημιουργούν μία συνδεδεμένη επιφάνεια ενώ συγχρόνως εξασφαλίζουν ότι το χαρτί θα ξηρανθεί επιτυχώς και ο εμποτισμός του λαδιού θα ολοκληρωθεί αποτελεσματικά. Όταν το τυλίγμα θερμανθεί, κατά την διάρκεια της διαδικασίας της ξήρανσης των πηνίων, τα κολλώδη στίγματα λιώνουν και σκληραίνουν δημιουργώντας μόνιμα συνδεδεμένα σημεία μεταξύ των τυλιγμάτων και της μονωτικής επιφάνειας. Τα μόνιμα αυτά συνδεδεμένα σημεία θα προσδώσουν στη δομή υψηλή μηχανική αντοχή και συγχρόνως θα είναι ανεπηρέαστα από τους διαδοχικούς κύκλους θέρμανσης.



Σχήμα 2.13 – Πεπιεσμένο χαρτί εποξικής ρητίνης

Πεπιεσμένο χαρτόνι

Το πεπιεσμένο χαρτόνι είναι ένα παχύ μονωτικό χαρτί το οποίο κατασκευάζεται με την τοποθέτηση διαδοχικών στρώσεων χαρτιού κατά την διάρκεια του υγρού σταδίου της παραγωγικής διαδικασίας. Οι προδιαγραφές του χαρτονιού για ηλεκτρικές χρήσεις αναφέρονται στο πρότυπο ΕΛΟΤ EN 60641.01 [2.19].

Σύμφωνα με [2.2], το χαρτόνι μπορεί να διαιρεθεί σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Σε αυτή που το χαρτόνι κατασκευάζεται από στρώσεις χαρτιού κατά την διάρκεια του υγρού σταδίου χωρίς τη παρουσία κάποιου συνδεδετικού υλικού

- Σε αυτή που το χαρτόνι, συνήθως μεγαλύτερου πάχους, κατασκευάζεται με τη σύνδεση μεμονωμένων χαρτονιών χρησιμοποιώντας κατάλληλο προσθετικό.

Σύγκριση χαρτιού kraft και πεπιεσμένου χαρτονιού

Το χαρτί kraft συνήθως τυλίγεται γύρω από τον αγωγό του τυλίγματος ενώ μικρά κομμάτια πεπιεσμένου χαρτονιού συνήθως τοποθετούνται ανάμεσα στις στρώσεις των τυλιγμένων με χαρτί αγωγών ώστε να προσφέρει τον χώρο για την κυκλοφορία του λαδιού. Μεγάλα φύλλα χαρτονιού τυλίγονται γύρω από όλο το τύλιγμα ως φράγμα για να εμποδίσει άμεση διάσπαση μέσω του λαδιού του Μ/Σ. Γενικά, οι εσωτερικές στρώσεις του χαρτιού kraft γύρω από τον αγωγό βρίσκονται κάτω από υψηλότερες θερμικές πιέσεις, έως και 95°C, ενώ το χαρτόνι βρίσκεται σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες, περίπου 60-80 °C. Σύμφωνα με [2.20], το πεπιεσμένο χαρτόνι έχει τη δική του διαδικασία παραγωγής και γηράσκει τουλάχιστον δύο φορές περισσότερο από ότι το χαρτί kraft κάτω από την ίδια θερμική πίεση. Αν όμως η θερμοκρασία του χαρτονιού είναι 15°C μικρότερη από αυτή του χαρτιού kraft, ο συντελεστής μείωσης της θερμοκρασίας είναι περίπου 1/6, σύμφωνα με τον κανόνα των 6°C (δηλαδή ανύψωση της θερμοκρασίας κατά 6°C μειώνει στο μισό τη προσδόκιμη διάρκεια ζωής). Σε τέτοιες συνθήκες το χαρτί kraft γηράσκει περίπου τρεις φορές γρηγορότερα από ότι το χαρτόνι.

2.3.2 Λάδι Μετασχηματιστών

Η πλειοψηφία των Μ/Σ ισχύος που χρησιμοποιούνται ανά τον κόσμο είναι Μ/Σ λαδιού και συγκεκριμένα ορυκτέλαιου σύμφωνα με το πρότυπο IEC-60296 [2.21] . Το λάδι έχει διπλή χρησιμότητα αφού από τη μια λειτουργεί ως ψυκτικό μέσο αλλά και ως μονωτικό.

2.3.2.1 Το λάδι ως ψυκτικό μέσο

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, ο σίδηρος και ο χαλκός έχουν απώλειες που εκδηλώνονται με τη μορφή θερμότητας. Αυτό συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος, δηλαδή του πυρήνα, των τυλιγμάτων, της δεξαμενής κτλ. Τα μέρη αυτά του Μ/Σ θα φτάσουν σε μία ισορροπία όπου η θερμότητα θα απομακρύνεται τόσο γρήγορα όσο αυτή παράγεται. Για τη μεγάλη πλειοψηφία των Μ/Σ αυτή η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία πρέπει να μειωθεί κάπου στην περιοχή των 100 °C προκειμένου ο Μ/Σ να έχει μία αποδεκτή

διάρκεια ζωής. Έτσι, πρέπει να υπάρχει επαρκής ψύξη του συστήματος και αυτό επιτυγχάνεται μέσω κάποιου ρευστού.

Το ορυκτέλαιο είναι το πιο αποδοτικό μέσο απορρόφησης θερμότητας και της μετάδοσής της από τον πυρήνα και τα τυλίγματα (είτε με φυσικό είτε με βεβιασμένο τρόπο) προς τις εξωτερικές επιφάνειες του Μ/Σ. Συνεπώς, η θερμική χωρητικότητα και η θερμική αγωγιμότητα του λαδιού έχουν σημαντική επίδραση στο ρυθμό μεταφοράς του λαδιού.

Όμως, σύμφωνα με [2.22], οι ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας του λαδιού επηρεάζονται από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις και από την οξειδωση αυτού, και το οποίο υποβαθμίζει το λάδι του Μ/Σ που βρίσκεται σε λειτουργία. Έτσι, με την παραγωγή οξειδωτικών συστατικών επηρεάζονται οι ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας του λαδιού.

2.3.2.2 Το λάδι ως μονωτικό

Στη πλειοψηφία του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού υπάρχουν διάφορα μέρη τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικά δυναμικά τάσης και συνεπώς υπάρχει ανάγκη να τοποθετηθεί μόνωση μεταξύ αυτών. Για να είναι ο Μ/Σ όσο πιο οικονομικός γίνεται, ο διαχωρισμός μεταξύ αυτών των μερών πρέπει να μειώνεται όσο το δυνατόν περισσότερο, κάτι που σημαίνει ότι ο εξοπλισμός πρέπει να είναι ικανός να λειτουργεί όσο το δυνατόν σε μεγαλύτερη ηλεκτρική φόρτιση. Επιπρόσθετα, συχνά απαιτείται ο Μ/Σ να λειτουργεί για μικρές χρονικές περιόδους πάνω από την ονομαστική τάση του ή και να ανθίσταται σε μεταβατικά φαινόμενα εξαιτίας της ζεύξης-απόζευξης γραμμών μεταφοράς ή λόγω κρουστικού κύματος.

Επίσης, απαιτείται το λάδι να συνεισφέρει στην αποδοτικότητα της στερεάς μόνωσης με το να εισρέει και να γεμίζει τα ενδιάμεσα κενά των στρώσεων της περιέλιξης αλλά και με το να εμποτίζει, αφού έχουν υποστεί ξήρανση και αφαίρεση αέρα μέσω του κενού, το χαρτί και άλλα μονωτικά υλικά που έχουν ως βάση την κυτταρίνη.

Το μονωτικό λάδι πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω ιδιότητες, οι οποίες θεωρούνται ως και οι σημαντικότερες :

- Χαμηλό ιξώδες
- Χαμηλό σημείο ροής
- Υψηλό σημείο ανάφλεξης
- Εξαιρετική χημική σταθερότητα
- Υψηλή διηλεκτρική αντοχή

Ιξώδες και σημείο ροής

Η θερμότητα μπορεί να διασκορπιστεί με τρεις τρόπους: μέσω εκπομπής, μέσω διέλευσης και μέσω μεταφοράς. Ο καθένας από τους τρόπους αυτούς συνεισφέρει στην ψύξη του πυρήνα και των αγωγών ενός Μ/Σ λαδιού αλλά η ψύξη μέσω μεταφοράς είναι το πιο σημαντικό στοιχείο. Η μεταφορά της θερμότητας βασίζεται πάνω στην “φυσική κυκλοφορία” που δημιουργείται από τη βαρύτητα εξαιτίας της διαφοράς της πυκνότητας μεταξύ του θερμότερου και του ψυχρότερου ρευστού. Η ευκολία με την οποία γίνεται αυτή η μεταφορά, εξαρτάται από το ιξώδες του ρευστού και συνεπώς είναι σημαντικό για το λάδι ενός Μ/Σ να έχει χαμηλό ιξώδες. Μερικές φορές η μεταφορά επιβάλλεται ή υποβοηθείται μέσω αντλιών, αλλά και πάλι είναι επιθυμητό αυτή η βοήθεια να είναι ελάχιστη και το λάδι να προσφέρει την ελάχιστη αντίσταση και την μέγιστη μεταφορική βοήθεια στη ροή.

Επιπρόσθετα, το χαμηλό ιξώδες θα βοηθήσει την εισροή του λαδιού σε στενά διάκενα και θα βοηθήσει στην κυκλοφορία μέσω των πηνίων. Με αυτό τον τρόπο, αποτρέπεται η τοπική υπερθέρμανση η οποία απορρέει από φτωχή ροή σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές.

Όταν μειώνεται η θερμοκρασία των ορυκτέλαιων τότε αυξάνεται το ιξώδες έως να καταλήξουν σε κατάσταση ημιστερεού, και στην οποία η ψυκτική απόδοσή τους είναι ουσιαστικά μηδενική. Το σημείο ροής ενός ρευστού είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία στην οποία το ρευστό είναι ικανό να έχει κάποια παρατηρούμενη ροή. Για πολλούς Μ/Σ που χρησιμοποιούνται σε ψυχρά κλίματα, το λάδι δεν πρέπει να πλησιάσει αυτή την ημιστερεά κατάσταση στις χαμηλές θερμοκρασίες που θα βιώσει και γι’ αυτό το λάδι πρέπει να έχει χαμηλό σημείο ροής.

Ακόμα και σε τέτοιες χαμηλές θερμοκρασίες που όμως αρκετά πάνω από το σημείο ροής, το ιξώδες του λαδιού πρέπει να είναι τέτοιο ώστε η ροή να μην εμποδίζεται σημαντικά. Οι προδιαγραφές για το λάδι του Μ/Σ [2.21] καθορίζουν ανώτατα όρια για το ιξώδες και για το σημείο ροής σε θερμοκρασία αρκετά χαμηλότερη από την φυσιολογική του περιβάλλοντος.

Σημείο ανάφλεξης

Λόγω του ότι στον Μ/Σ χρησιμοποιείται λάδι με βάση το πετρέλαιο, υπάρχει ενδεχόμενος κίνδυνος για φωτιά και έκρηξη. Γι’ αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο η θερμοκρασία του λαδιού σε Μ/Σ εν λειτουργία να είναι πάρα πολύ μικρότερη από τη θερμοκρασία ανάφλεξης το λεγόμενο σημείο ανάφλεξης. Να σημειωθεί ότι κίνδυνος έκρηξης υπάρχει ακόμα και αν η θερμοκρασία του λαδιού είναι σε φυσιολογικά επίπεδα αλλά το λάδι έχει μολυνθεί από περισσότερα πτητικά προϊόντα

Χημική σταθερότητα

α) Οξείδωση

Η σταθερότητα της οξείδωσης είναι μία σημαντική χημική ιδιότητα του λαδιού ενός Μ/Σ και αναφέρεται ως η αντίσταση του λαδιού στην οξείδωση χωρίς μόνιμη αλλαγή των ιδιοτήτων του. Κάτω από ορισμένες συνθήκες όπως τις ενέργειες του διαλυμένου οξυγόνου, τη θερμοκρασία, το ηλεκτρικό πεδίο, το ηλεκτρικό τόξο, την υγρασία, τις προσμείξεις και τους μεταλλικούς καταλύτες, το λάδι ενός Μ/Σ σε λειτουργία είναι πιθανόν να υποβληθεί σε οξείδωση και διάσπαση, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων υπεροξειδίου, αλκοόλης, κετόνης και οξέων. Τότε, λόγω αντίδρασης συμπύκνωσης θα παραχθούν αδιάλυτες ουσίες όπως λάσπη λαδιού και θα προκληθεί σημαντική επίδραση στον Μ/Σ. Η σταθερότητα της οξείδωσης καθορίζει την ποιότητα του λαδιού, ποιότητα που με τη σειρά της επηρεάζει την ομαλή λειτουργία και διάρκεια ζωής των Μ/Σ. Γι' αυτό, είναι απαραίτητο να μετράται με ακρίβεια και προγραμματισμένα η σταθερότητα και να προβλέπεται η διάρκεια ζωής του λαδιού [2.23]

β) Αποσύνθεση

Είναι γενικότερα αποδεκτό ότι οι αρχικές εσωτερικές αστοχίες εντός των πηνίων των Μ/Σ ισχύος είναι υπεύθυνες για την δημιουργία αερίων μέσα στα ορυκτέλαια. Οι αρχικές αστοχίες οφείλονται στη τοπική υπερθέρμανση και οι οποίες δημιουργούν θερμά σημεία αλλά και υπέρμετρες ηλεκτρικές πιέσεις που παράγουν μερικές εκκενώσεις. Και οι δύο ατέλειες μπορούν να προσφέρουν την ενέργεια που απαιτείται για την αποσύνθεση συγκεκριμένων τρωτών αλυσίδων υδρογονανθράκων [2.24].

Έτσι, το λάδι, το οποίο αποτελείται από μόρια υδρογονανθράκων με μεγάλο μοριακό βάρος, μπορεί να υποστεί εκφυλισμό εξαιτίας της αποσύνθεσης των μορίων αυτών σε ελαφρύτερα και περισσότερο πτητικά μέρη. Αυτή η διαδικασία επίσης επιταχύνεται με την θερμοκρασία. Είναι επιθυμητό το παραπάνω φαινόμενο να μην συμβαίνει σε θερμοκρασίες φυσιολογικής λειτουργίας, αν και είναι αναπόφευκτο για μεγαλύτερες θερμοκρασίες οι οποίες αναπτύσσονται σε συνθήκες σφάλματος.

Επειδή μόνο τα προϊόντα χαμηλού μοριακού βάρους εξελίσσονται σε αέρια, αυτά θεωρούνται ως σήμα κινδύνου για την λειτουργική ασφάλεια του Μ/Σ. Γι' αυτό το λόγο, μέσω της χρήσης αεριοχρωματογραφικών προσεγγίσεων (Dissolved Gas Analysis, DGA), καταγράφονται τα διαλυμένα αέρια και προβλέπεται η διάρκεια ζωής του Μ/Σ.

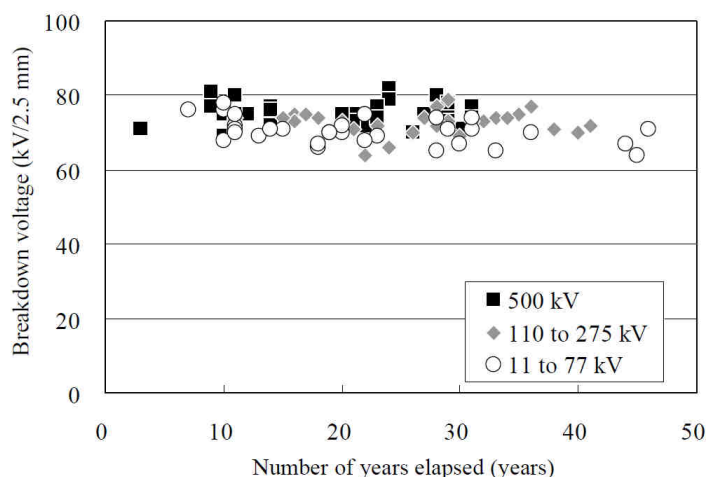
Ηλεκτρικές ιδιότητες ορυκτέλαιου

α) Τάση διάσπασης (Breakdown voltage)

Η ιδιότητα είναι πολύ σύνθετη και η μετρούμενη τιμή εξαρτάται από το περιεχόμενο σωματιδίου, τον τύπο του σωματιδίου, περιεχόμενο νερού και τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο μέτρησης. Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την μέτρηση της AC τάσης διάσπασης είναι τα πρότυπα ASTM D 1816 (όπως αναφέρεται στο πρότυπο IEEE C57.106[2.25]) και IEC 60156 [2.26]. Σε αυτές τις μεθόδους, τα ηλεκτρόδια είναι σφαιρικά ή ημισφαιρικά, η μεταξύ τους απόσταση είναι 2-2,5 mm και η εφαρμοζόμενη τάση αυξάνεται κατά 2 kV/s μέχρι να συμβεί η διάσπαση του λαδιού.

Το αποτέλεσμα της δοκιμής δίνει πληροφορίες για την ικανότητα της ηλεκτρικής μόνωσης του λαδιού. Εξαρτάται κυρίως στα σωματίδια και το νερό που περιέχει το λάδι. Ακόμη και το φτωχά διυλισμένο λάδι μπορεί να έχει υψηλή τάση διάσπασης, οπότε αυτή η μέθοδος δεν μας λέει τίποτα για άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την διύλιση το λαδιού όπως τα χαρακτηριστικά γήρανσης.

Σύμφωνα με [2.27], πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για να διαπιστωθεί πως μεταβάλλεται το λάδι με την πάροδο των ετών λειτουργίας και πως επηρεάζονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του όπως η τάση διάσπασης. Έτσι, βρέθηκε ότι δεν υπάρχει σχέση μεταξύ ετών λειτουργίας και της τάσης διάσπασης (σχήμα 2.14), αφού ακόμα και μετασχηματιστής με 40 έτη λειτουργίας παρουσίαζε υψηλή τάση διάσπασης.



Σχήμα 2.14 – Η τάση διάσπασης του λαδιού συναρτήσσει των ετών λειτουργίας του Μ/Σ

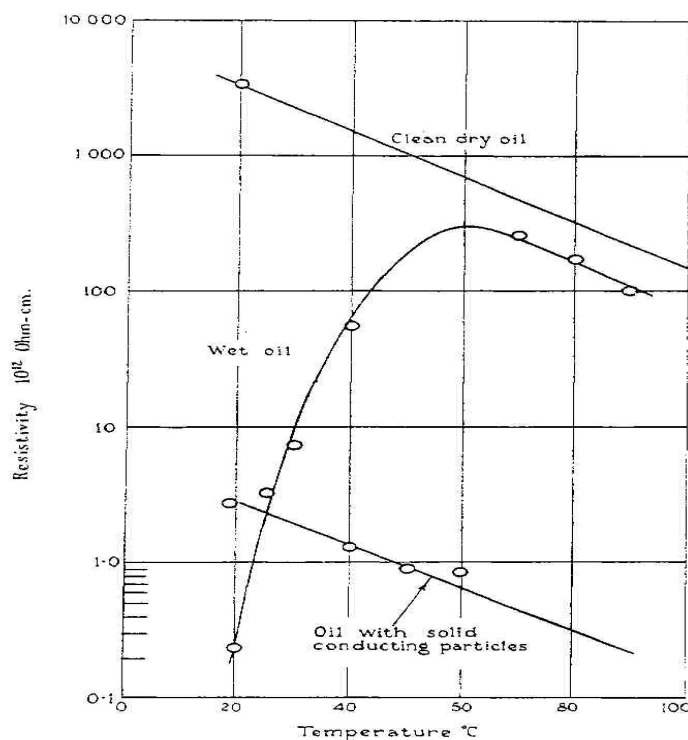
β) Συντελεστής διηλεκτρικών απωλειών (Dielectric dissipation factor)

Αυτή είναι μία παράμετρος που πάντα υπάρχει στις προδιαγραφές του λαδιού Μ/Σ. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την ποσότητα των ιονισμένων και πολικών μορίων του

λαδιού, τα οποία συνεισφέρουν στην ανύψωση της θερμοκρασίας του λαδιού που βρίσκεται σε Μ/Σ εν λειτουργία. Για καλά διυλισμένο λάδι, η παράμετρος αυτή έχει πάντα χαμηλή τιμή αλλά είναι πολύ ευαίσθητη ως προς τους ρυπαντές κατά τη διάρκεια της διαχείρισης του λαδιού. Το ίδιο το νερό δεν επηρεάζει την ιδιότητα αυτή, αλλά συμμετέχει στη διαμόρφωση σταθερών συμπλεγμάτων με τα προϊόντα της οξείδωσης ή με άλλες προσμείξεις με αποτέλεσμα αυξημένες τιμές του συντελεστή απωλειών [2.28]. Έτσι, χαμηλή τιμή του συντελεστή σημαίνει ότι το ρευστό θα προκαλέσει μικρή απώλεια της εφαρμοζόμενης ισχύος. Συνεπώς, η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται ως έλεγχος για την φθορά και ρύπανση του μονωτικού λαδιού [2.25].

γ) Ειδική αντίσταση (DC-Resistivity)

Με την ειδική αντίσταση του λαδιού μπορούμε να ελέγξουμε την ποιότητα του λαδιού. Σύμφωνα με [2.29], η αιώρηση νερού εντός του λαδιού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας εξαιτίας της μεταφοράς φορτίου μέσω των σταγονιδίων νερού που ταλαντώνονται μεταξύ των ηλεκτροδίων της συσκευής με την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση της αντίστασης. Η αντίσταση του λαδιού που περιέχει νερό είναι χαμηλή σε θερμοκρασία δωματίου και αυξάνεται προς το μέγιστο όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, ενώ κατόπιν μειώνεται με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας. Στο σχήμα 2.15 απεικονίζεται η μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας για λάδι που περιέχει νερό, για ξηρό λάδι και για λάδι που περιέχει στερεά αγωγιμα σωματίδια.



Σχήμα 2.15 – Μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας

2.3.2.3 Άλλα διηλεκτρικά υγρά

Η βελτίωση των χαρακτηριστικών των Μ/Σ ισχύος είναι ένας συνεχής στόχος των κατασκευαστών επειδή αυτός ο εξοπλισμός αποτελεί μία από τις ακριβότερες και πιο στρατηγικές συνιστώσες των συστημάτων της μεταφοράς και της διανομής ενέργειας. Αφού οι αστοχίες αυτών των συνιστωσών μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές οικονομικές απώλειες, οι κατασκευαστές πρέπει να βελτιώσουν την αξιοπιστία του εξοπλισμού αυτού και να μειώσουν τα κόστη με το να [2.30]:

- μειώσουν το μέγεθός τους στοχεύοντας στη μείωση των μονωτικών διακένων
- αυξήσουν τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους

Έτσι, για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των Μ/Σ ισχύος, πρέπει να επικεντρωθούμε στα μονωτικά υλικά και ειδικότερα στα μονωτικά λάδια. Για έναν Μ/Σ με μικρότερο μέγεθος (άρα και μειωμένων μονωτικών διακένων), τα υγρά πρέπει να εξασφαλίζουν την ακεραιότητα αυτού του διακένου για τα υπάρχοντα ή ακόμα μεγαλύτερα επίπεδα τάσεων και μπορούν να προσφέρουν ικανοποιητική ψύξη. Το πιο διαδεδομένο υγρό για τους Μ/Σ ισχύος είναι (όπως έχει ήδη αναφερθεί) το ορυκτέλαιο εξαιτίας του χαμηλού κόστους και των καλών ιδιοτήτων του. Αλλά, η απόδοση του ορυκτέλαιου αρχίζει να περιορίζεται ως προς τις παραπάνω απαιτήσεις. Γι' αυτό το λόγο, διάφορες έρευνες έχουν ξεκινήσει προκειμένου να γίνουν προσπάθειες βελτίωσης των ιδιοτήτων του ορυκτέλαιου ή εύρεσης άλλου κατάλληλου υγρού.

Στην εργασία [2.30], πραγματοποιήθηκε μελέτη για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του ορυκτέλαιου με τη μείξη ορυκτέλαιου με άλλα δύο είδη μονωτικών υγρών (κυρίως λάδια σιλικόνης και συνθετικών εστέρων). Σύμφωνα με τη παραπάνω εργασία, μπορεί να υπάρξει βελτίωση των χαρακτηριστικών του μονωτικού λαδιού με ένα μείγμα ορυκτέλαιου και 20% συνθετικού εστέρα σε σύγκριση με τη χρήση αποκλειστικά ορυκτέλαιου. Έτσι, μπορεί να υπάρξει βελτίωση της αξιοπιστίας του Μ/Σ ισχύος ή μείωση του μεγέθους του (και του κόστους του) με τη χρήση μικρότερων μονωτικών διακένων.

Εναλλακτικά, σύμφωνα με [2.2], μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά λάδι σιλικόνης ή συνθετικών εστέρων τα οποία έχουν υψηλά σημεία ανάφλεξης, καλές θερμικές αγωγιμότητες και χαμηλή τιμή ιζώδους σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα λάδια αυτά είναι ικανά για ικανοποιητική λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες απ' ό,τι το ορυκτέλαιο αλλά δημιουργούνται προβλήματα αν υπάρξει προσπάθεια εκμετάλλευσης αυτού. Αρχικά, και το σημαντικότερο, είναι απαραίτητο να βρεθεί εναλλακτική μόνωση χαρτιού, και κατά δεύτερο, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας θα έχει ως αποτέλεσμα τις υψηλές απώλειες

φορτίου αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας και μηδενίζοντας οποιαδήποτε εξοικονόμηση επιτεύχθηκε στο αρχικό κόστος.

Επίσης, σύμφωνα με [2.31], θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν υπό ορισμένες συνθήκες φυτικά έλαια ως μονωτικά λάδια. Μέχρι σήμερα υπάρχουν κάμποσοι μεγάλοι Μ/Σ ισχύος σε λειτουργία με φυτικά έλαια ενώ η εμπειρία σχετικά με την διαχείρισή τους στο πεδίο αυξάνεται. Όμως, για το ηλεκτρικό σχέδιο του Μ/Σ είναι σημαντικό να γνωρίζουμε για τις διαφορές μεταξύ φυτικών λαδιών και ορυκτέλαιων ως προς την διαδικασία εκκένωσης εντός των ανοιχτών διακένων λαδιού υπό υψηλή τάση αφού για την σύνθετη λάδι-κυτταρίνη μόνωση η διαφορά είναι όχι μόνο στην αντοχή της διάσπασης αλλά και στο είδος της διάσπασης.

Βιβλιογραφία

- [2.1] “Electrical Power Transformer Engineering”, edited by James H. Harlow, 2004
- [2.2] “J&P Transformer Book”, Martin J. Heathcote, Twelfth edition, 1998
- [2.3] “Iron Loss Influenced by Magnetic Annealing in 0.1-mm-Thick Grain-Oriented High-Silicon Steels”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No 10, October 2011, pp 3208-3211
- [2.4] “Magnetic Characteristic Analysis Considering the Crystal Grain of Grain-Oriented Electrical Steel Sheet”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 5, 2005, pp 1704-1707
- [2.5] “Characteristics of Magnetic Properties of Grain-Oriented Silicon Iron with High Permeability”, Satoru Taguchi and Akira Sakakura, American Institute of Physics, Journal of Applied Physics, Volume 40, Number 3, March 1969, pp 1539-1541
- [2.6] “Core loss reduction in grain-oriented silicon steels by excimer laser scribing, Part I: experimental work”, Satish V. Ponnaluri, Ramachand Cherukuri, P.A. Molian, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 112, No. 2, May 2001, pp 199-204
- [2.7] “Impact of Amorphous Metal Based Transformers on Efficiency and Quality of Electric Power Distribution”, R. Hasegawa, Power Engineering Society Summer Meeting, Volume 3, 2001, pp 1820-1823
- [2.8] “An Overview on Amorphous Core Transformers”, Man Mohan, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences, Vol. 3, No 2, 2012, pp 217-220
- [2.9] “Χαλκός και κράματα χαλκού – Πλάκες, φύλλα και ταινίες χαλκού για ηλεκτρικές εφαρμογές”, ΕΛΟΤ EN 13599, 2003-09-24
- [2.10] “A Comparison of Physical Properties of OF Copper and ETP Copper after Holding at Temperatures That Simulate High Voltage Transformer Use for up to One Year”, IEEE PES, Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Orlando FL, 7-10 May 2012, pp 1-8
- [2.11] “Amorphous-Core Transformer with Copper Winding Versus Aluminium Winding – A Comparative Study”, Man Mohan, ARPN Journal of Science and Technology, Vol. 2, No 4, 1 May 2012, pp 297-301

- [2.12] “Copper Applications – A Case Study – Energy Efficiency - Transformer Manufacturer Uses Only Copper”, CDA, Copper Development Association Inc., New York
- [2.13] ”High Voltage Power Transformer Insulation Design”, W.Ziomek, K.Vijayan, D.Boyd, K.Kuby, M.Franck, 2011 Electrical Insulation Conference, Anapolis, Maryland, 5-8 June 2011, pp 211-215
- [2.14] “Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part I-History and Development “, Thomas A. Prevost, T.V. Oommen, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, No 1, 2006, pp 28-35
- [2.15] “Γνωρίζετε γιατο χαρτί Kraft;”, Επιπλέον, τεύχος 41, 8/2009
- [2.16] “High Temperature Reinforced Cellulose Insulation for Use in Electrical Applications”, S.J. Ferrito, R.L. Stegehuis, 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Atlanta GA, 28 Oct 2001- 02 Nov 2001, Vol. 2, pp 684-687
- [2.17] “Thermally Upgraded Insulation in Transformers “, Thomas A. Prevost, 2005 Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical manufacturing Expo, Indianapolis IN, 26-26 Oct. 2005, pp 120-125
- [2.18] “Ageing of Oil Impregnated Thermally Upgraded Papers – Oxidation and Hydrolysis”, Kunt Brede Liland, Marit-Helen Glomm Ese, Cecilie Mork Selsbak, Lars Lundgaard, 2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Trondheim, 26-30 June 2011, pp 1-5
- [2.19] “Προδιαγραφές για χαρτόνι και πεπιεσμένο χαρτί για ηλεκτρικές χρήσεις–Μέρος 1: Ορισμοί και γενικές απαιτήσεις”, ΕΛΟΤ EN 60641.01, 2^η Έκδοση, 2008-01-24
- [2.20] “A Comparative Study of the Ageing Phenomena in Kraft Paper and Pressboard Used in 500 kV Class Transformer”, Zhong Zheng, Zhiyang Jin, Lihua Chen, Min Chen, Jianyin Liu, Hong Yu, Qingfeng Meng, Peimin Xie, Runguang Xu, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Cancun, Mexico, 16-19 October 2011, pp 620-623
- [2.21] “Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear”, IEC 60296, Third edition, 2003-11
- [2.22] “Parameters Affecting the Electrical and Thermal Properties of Transformers Oils”, J.S. N’Cho, L. Loiselle, I. Fofana, A. Beronal and T. Aka-Ngnui, 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), West Lafayette IN, 17-20 October 2010, pp 1-4

- [2.23] “Rapid Determination of Oxidation Stability for Transformer Oils with Antioxidant”, Zhou Zhou, Liu Kai, Wan Tao, Hu Xu, Qian Hui and Feng Bing, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 5, October 2012, pp 1604-1608
- [2.24] “The side effects of gassing in transmission power transformers”, Sabau J., Stokhuyzen R., 2009 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria BC, 15-18 October 2000, Vol. 1, pp 264-267
- [2.25] “IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment”, IEEE Std C57.106-2002
- [2.26] “Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method”, IEC 60156, Second edition, 1995-07
- [2.27] “Aging Effect on Electrical Characteristics of Insulating Oil in Field Transformer”, Kohtoh M., Kaneko S., Okabe S., Amimoto T., IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, December 2009, Vol. 16, No. 6, pp 1698-1706
- [2.28] “Mineral insulating oils; functional requirements, specifications and production”, Eklund M., Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto Ont., 11-14 June 2006, pp 68-72
- [2.29] “The conductivity of hydrocarbon transformer oil containing water and solid conducting particles”, A.W. Stannett, British Journal of Applied Physics, 1951, Vol. 2, No. 4, pp 110-114
- [2.30] “Improvement of Power Transformers by using Mixtures of Mineral Oil with Synthetic Esters”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, June 2006, Vol. 13, No. 3, pp 556-564
- [2.31] “Comparative Experimental Study of Dielectric Strength of Oil-cellulose Insulation for Mineral and Vegetable Oils”, Vukovic D., Jovalekic M., Tenbohlen S., Harthun J., Perrier C., Coulibaly M.L., Fink H., Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), San Juan PR, 10-13 June 2012, pp 424-428

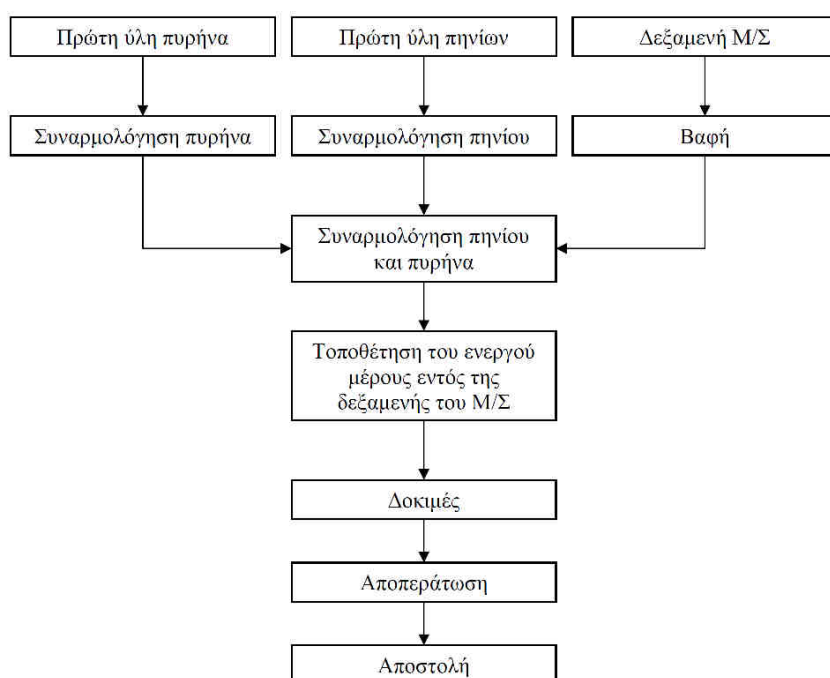
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Διαδικασία παραγωγής Μετασχηματιστών Ισχύος

3.1 Γενικά

Η κατασκευή των Μ/Σ ισχύος ακολουθεί παρόμοιες αρχές για μονάδες που η ισχύς τους κυμαίνεται από μερικά kVA έως τα μεγαλύτερα μεγέθη που κατασκευάζονται, αλλά όσο αυξάνεται το μέγεθος της μονάδας τόσο απαιτείται μεγαλύτερος βαθμός πολυπλοκότητας. Πολλοί κατασκευαστές υποδιαιρούν τις κατασκευαστικές τους δραστηριότητες σε “διανομής” και “μεγάλης ισχύος”, αν και το όριο διαχωρισμού που ακολουθεί ο καθένας ποικίλει ευρέως. Συνήθως, η διαχωριστική αυτή γραμμή εξαρτάται από το βάρος των κύριων εξαρτημάτων και τον τύπο και μέγεθος των εγκαταστάσεων διαχείρισης που απαιτούνται στο εργοστάσιο [3.1].

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν τα κυριότερα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας κατασκευής ενός Μ/Σ διανομής (σχήμα 3.1) και θα υπάρξουν αντίστοιχες φωτογραφίες από τη παραγωγική διαδικασία που ακολουθείται στο εργοστάσιο της Schneider Electric, το μοναδικό στην Ελλάδα που κατασκευάζει Μ/Σ, στα Οινόφυτα Βοιωτίας.



Σχήμα 3.1 – Τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας κατασκευής Μ/Σ

Εδώ και τέσσερις δεκαετίες οι μετασχηματιστές της σειράς Elvim (της Schneider Electric) σχεδιάζονται και κατασκευάζονται εξ' ολοκλήρου στην Ελλάδα βάσει διεθνών προτύπων ασφαλείας και προδιαγραφών. Από το 1995, όλες οι εργασίες στο πλαίσιο της παραγωγικής διαδικασίας είναι πιστοποιημένες με ISO 9001:2000, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία και την ποιότητα του προϊόντος. Επιπρόσθετα, η βιομηχανική μονάδα παραγωγής κατέχει πιστοποιητικό Περιβαλλοντικής Διαχείρισης ISO 14001 (από το 2000), εξασφαλίζοντας την ορθολογική χρήση των φυσικών πόρων και σεβασμό προς το περιβάλλον ενώ με την εφαρμογή του OHSAS 18000 για την Υγεία & Ασφάλεια εξασφαλίζεται το μέγιστο επίπεδο της υγείας και της ασφάλειας στο εργασιακό περιβάλλον.

3.2 Μεταλλικά μέρη Μ/Σ

Η δεξαμενή του Μ/Σ πρέπει να αντέχει στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της μεταφοράς αλλά και σε ιδιαίτερες συνθήκες. Έτσι, σύμφωνα με [3.2], επέρχεται διάρρηξη της δεξαμενής όταν εσωτερικό τόξο σφάλματος εξατμίσει το μονωτικό υγρό και δημιουργήσει επεκτεινόμενη φουσαλίδα αερίου. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της πίεσης εντός της δεξαμενής. Η περιοχή, η διάρκεια και η έκταση του τόξου σφάλματος επηρεάζουν κατά μεγάλο βαθμό το μέγεθος της αύξησης της πίεσης εντός της δεξαμενής. Η δυναμική ενίσχυση, επίσης, από τα κύματα πίεσης που δημιουργούνται κατά την διάρκεια ενός εσωτερικού τόξου σφάλματος παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην διάρρηξη της δεξαμενής. Οι δυναμικές επιδράσεις των εσωτερικών τόξων σφαλμάτων μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα πολύ υψηλές και μικρής διάρκειας ζωής τοπικές υπερπίεσεις οι οποίες είναι πολλών τάξεων μεγέθους υψηλότερες από την τοπική υπερπίεση με την μεγαλύτερη διάρκεια που προκαλείται από την επεκτεινόμενη φουσαλίδα αερίου.

Μερικές από τις μεθόδους για την μείωση ή την εξάλειψη του κινδύνου διάρρηξης της δεξαμενής του Μ/Σ είναι [3.2]:

- Βελτίωση της κατασκευής της δεξαμενής με την ύπαρξη κολλήσεων κατάλληλης ποιότητας ή και με τη χρήση θολωτού καλύμματος αντί επιπέδου καλύμματος ή και με τη χρήση στηριγμάτων για την αύξηση της αντοχής των τοιχωμάτων και του

καλύμματος. Επίσης, το μέγεθος και η θέση των οπών του καλύμματος πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν θα προκαλέσουν την μείωση της αντοχής του καλύμματος. Έτσι, αυτά τα ανοίγματα πρέπει να ενισχυθούν με στηρίγματα στο κάλυμμα (εικόνα 3.17, σελ. 86). Άλλος τρόπος για την βελτίωση της κατασκευής είναι με τη χρήση ενός μονού φύλλου χάλυβα για την διαμόρφωση των τεσσάρων τοιχωμάτων της δεξαμενής και κάνοντας μία κόλληση αντί κολλήσεων σε τέσσερα φύλλα χάλυβα

- Χρήση συσκευών εκτόνωσης πίεσης. Οι συσκευές αυτές έχουν αποτρέψει επιτυχώς, σε πολλές περιπτώσεις, τη διάρρηξη της δεξαμενής αλλά η ικανότητα της συσκευής εξαρτάται από τη περιοχή, το μέγεθος και τη διάρκεια του εσωτερικού τόξου σφάλματος.
- Σύγχρονος δίσκος διάρρηξης. Βασίζεται στη χρήση συστήματος αποσυμπίεσης με το οποίο επιτυγχάνεται η εκκένωση λαδιού και αερίου από την δεξαμενή του Μ/Σ σε μία δεξαμενή διαχωρισμού λαδιού-αερίου
- Ηλεκτρική προστασία. Ο κίνδυνος της διάρρηξης μπορεί να μειωθεί με την μείωση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος (με τη χρήση ασφαλειών περιορισμού ρεύματος) και με τη μείωση της ενέργειας του τόξου
- Βελτίωση του σχεδίου του ενεργού μέρους με την αύξηση των αποστάσεων ερπησμού και παρέχοντας επιπλέον μόνωση σε περιοχές όπου ενδέχεται να παρουσιαστούν εσωτερικά τόξα
- Χρήση λαδιού φυσικού εστέρα. Το λάδι αυτό αναφλέγεται πιο δύσκολα και όταν αναφλεγεί είναι ευκολότερη η σβέση του σε σύγκριση με το ορυκτέλαιο, κάτι που είναι πλεονέκτημα στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου της φωτιάς σε περίπτωση διάρρηξης της δεξαμενής
- Χρήση Μ/Σ με SF₆. Το αέριο SF₆ μπορεί να συμπιεστεί με αποτέλεσμα την πολύ μικρή ανύψωση της πίεσης εντός της δεξαμενής κατά την διάρκεια των εσωτερικών τόξων σφάλματος.



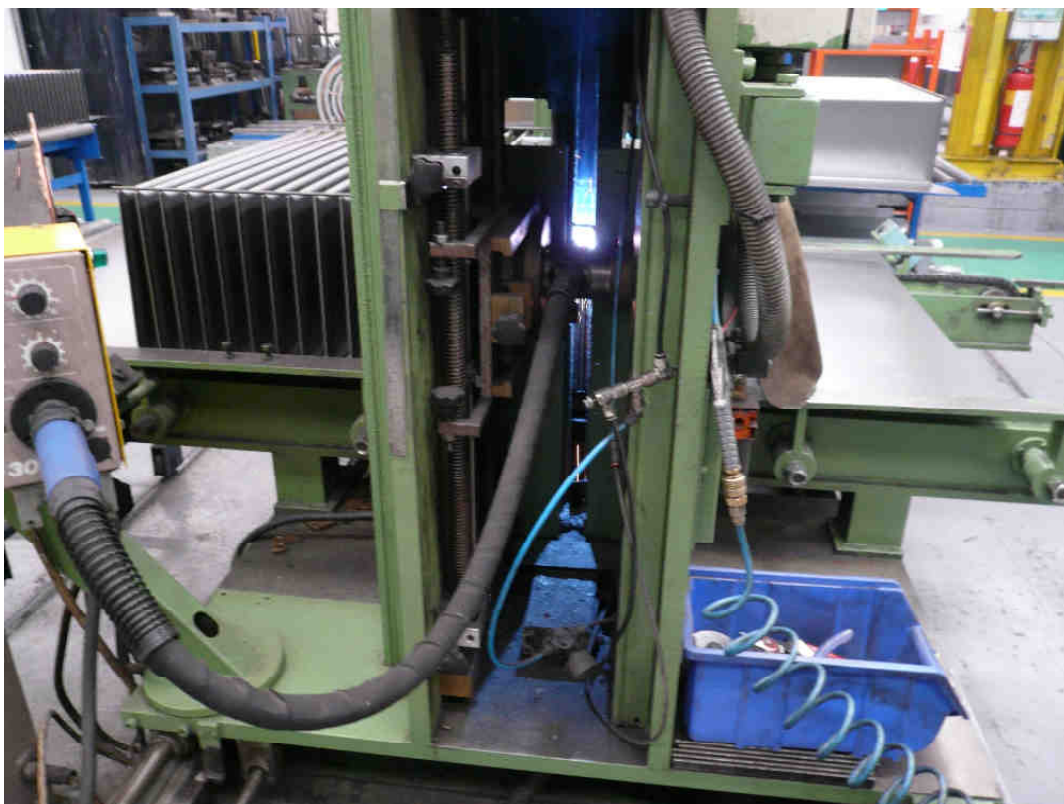
Εικόνα 3.1- Πρέσα διαμόρφωσης πλευρικών τοιχωμάτων (πανέλλων). Διακρίνεται η είσοδος του φύλλου στη πρέσα



Εικόνα 3.2 - Πρέσα διαμόρφωσης πλευρικών τοιχωμάτων (πανέλλων). Έξοδος από αυτήν των διαμορφωμένων τοιχωμάτων



Εικόνα 3.3 - Διαμορφωμένοι χάλυβες κατά τη διάρκεια κόλλησης της άνω και κάτω ραφής του κάθε πανέλλου ξεχωριστά



Εικόνα 3.4 - Διαμορφωμένοι χάλυβες κατά τη διάρκεια κόλλησης της άνω και κάτω ραφής του κάθε πανέλλου ξεχωριστά



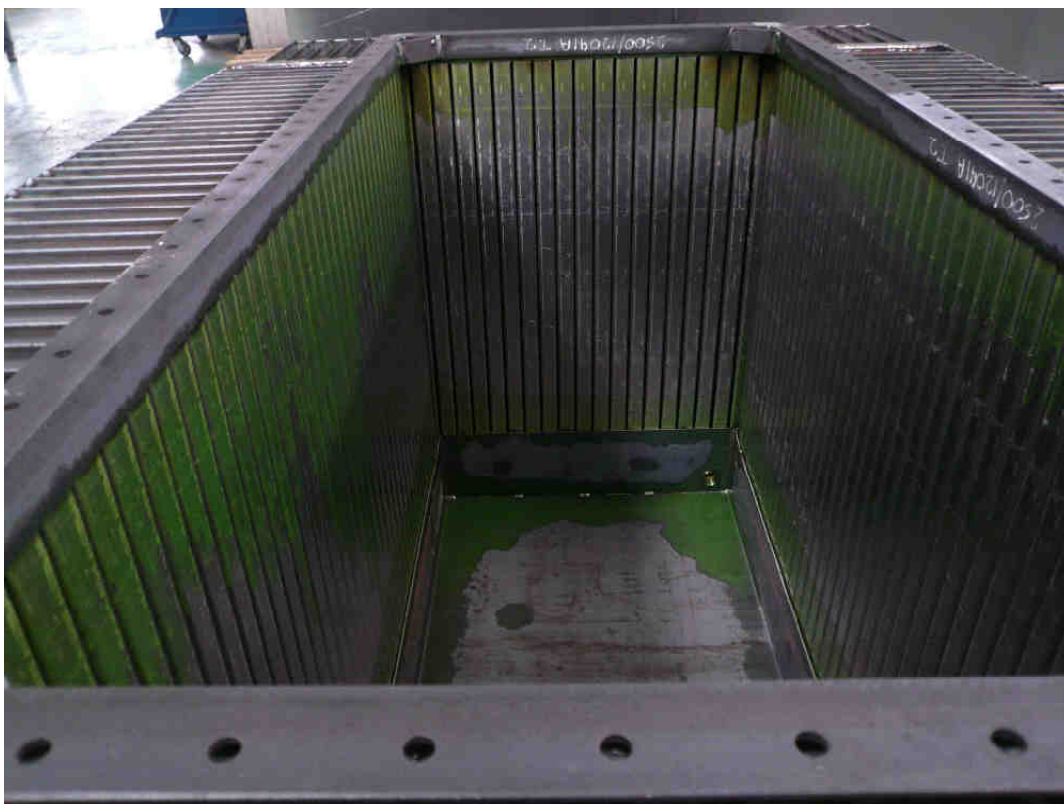
Εικόνα 3.5 - Διαμορφωμένοι χάλυβες (προοριζόμενοι για Μ/Σ 1600 kVA) προτού γίνει η συγκόλληση τους ώστε να αποτελέσουν τα πλευρικά τοιχώματα του Μ/Σ



Εικόνα 3.6 - Μετά την ολοκλήρωση των κολλήσεων της δεξαμενής πραγματοποιείται έλεγχος στεγανότητας. Με τη βοήθεια UV ακτινοβολίας και του διεισδυτικού υγρού που πρώτα τοποθετείται στο εσωτερικό της δεξαμενής διαπιστώνεται ενδεχόμενη ύπαρξη οπής και συνεπώς μελλοντικής διαρροής.



Εικόνα 3.7 - Διαμορφωμένο καζάνι για Μ/Σ 2500 kVA, μετά και τον έλεγχο στεγανότητας



Εικόνα 3.8 - Εσωτερικό του καζανιού Μ/Σ 2500 kVA όπου διακρίνεται το διεισδυτικό υγρό που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της στεγανότητας



Εικόνα 3.9 - Θάλαμος αμμοβολής για την απομάκρυνση από δεξαμενές και καλύμματα των οξειδίων του σιδήρου και των υπολοίπων των συγκολλήσεων



Εικόνα 3.10 - Θάλαμος απολίπανσης (απομάκρυνση παραμενουσών ακαθαρσιών) και φωσφάτωσης (δημιουργία λεπτού στρώματος φωσφορικού σιδήρου για την καλύτερη προσκόλληση του χρώματος) των δεξαμενών και των καλυμμάτων



Εικόνα 3.11 - Αστάρωμα (1^η στρώση) για την προστασία κατά της οξείδωσης των εξωτερικών επιφανειών της δεξαμενής και του καλύμματος



Εικόνα 3.12 - Δεύτερη στρώση ασταρώματος



Εικόνα 3.13 - Τελική βαφή



Εικόνα 3.14 – Στάδιο διάτρησης και κοπής καλύμματος Μ/Σ με χρήση πρέσας CNC



Εικόνα 3.15 - Κάλυμμα μετά την διάτρηση. Διακρίνονται οι οπές στις οποίες θα τοποθετηθούν εν τέλει οι μονωτήρες διέλευσης τόσο της χαμηλής όσο και της υψηλής τάσης.



Εικόνα 3.16 - Κάλυμμα (για Μ/Σ 500 kVA) μετά και την βαφή του. Διακρίνονται οι λαβές ανάρτησης, οι οπές για τους μονωτήρες διέλευσης και οι περιμετρικές οπές για τα μπουλόνια συγκράτησης του καλύμματος



Εικόνα 3.17 - Κάτω πλευρά καλύμματος όπου διακρίνονται τα στηρίγματα-ενισχύσεις



Εικόνα 3.18 - Έτοιμα (πλην βαφής) δοχεία διαστολής



Εικόνα 3.19 - Έλεγχος στεγανότητας σε δοχείο διαστολής

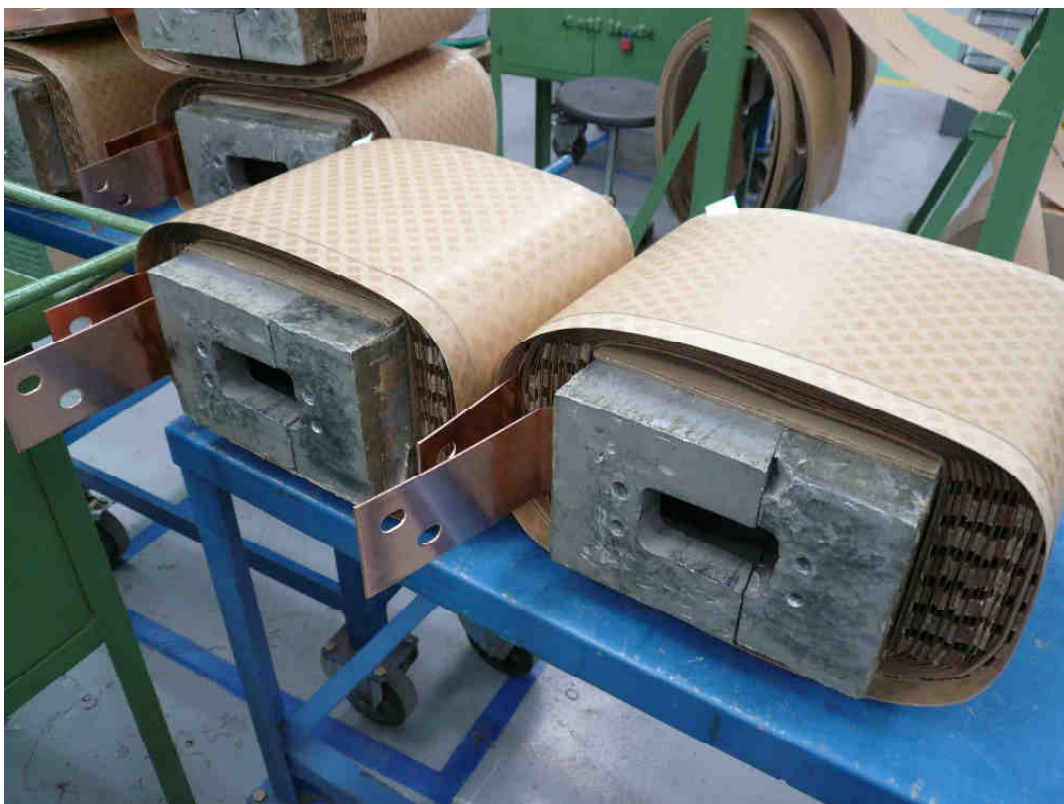
3.3 Κατασκευή πηνίου



Εικόνα 3.20 - Περιελικτική μηχανή κατασκευής του πηνίου χαμηλής τάσης



Εικόνα 3.21 - Στάδιο κατασκευής της περιέλιξης του πηνίου χαμηλής τάσης (για Μ/Σ 100 kVA)



Εικόνα.3.22 - Ολοκληρωμένο πηνίο χαμηλής τάσης και πριν την έναρξη της περιέλιξης της μέσης τάσης (εσωτερικά του πηνίου, διακρίνεται το καλούπι πάνω στο οποίο κατασκευάζεται το πηνίο και αφαιρείται μετά την ολοκλήρωση των περιελίξεων)



Εικόνα.3.23 - Περιελκτική μηχανή κατασκευής του πηνίου υψηλής τάσης. Διακρίνονται οι ακροδέκτες σύνδεσης με τον μεταγωγέα λήψεων που βρίσκονται στο τυλίγμα της μέσης τάσης.



Εικόνα.3.24 - Πρεσαρισμένα πηνία πριν τη τοποθέτησή τους σε θαλάμους ξήρανσης για την απομάκρυνση της υπάρχουσας υγρασίας αλλά και για το “δέσιμο” του τυλίγματος με το χαρτί της εποξικής ρητίνης

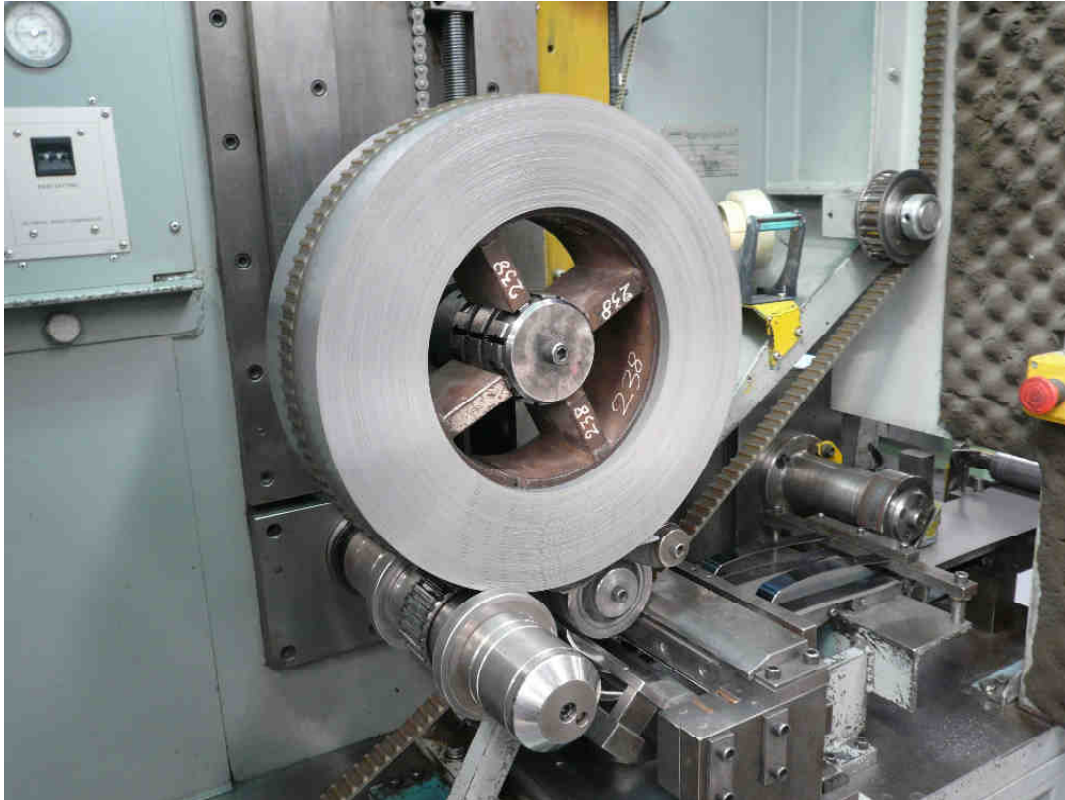


Εικόνα.3.25 - Πηνία (για Μ/Σ 630 kVA, 0.4/20 kV) έτοιμα για συναρμολόγηση με τον πυρήνα

3.4 Κατασκευή πυρήνα



Εικόνα.3.26 - Χάλυβας (πρώτη ύλη) που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του πυρήνα



Εικόνα.3.27 - Μηχανή διαμόρφωσης του χάλυβα στις επιθυμητές διαστάσεις



Εικόνα.3.28 - Πρέσα για την τελική διαμόρφωση σκέλους πυρήνα (πριν την διαμόρφωση)



Εικόνα.3.29 - Πρέσα για την τελική διαμόρφωση σκέλους πυρήνα (μετά την διαμόρφωση)



Εικόνα.3.30 - Διαμορφωμένοι πυρήνες τοποθετημένοι στον ειδικό χώρο όπου θα λάβει χώρα η διαδικασία της απόπτησης



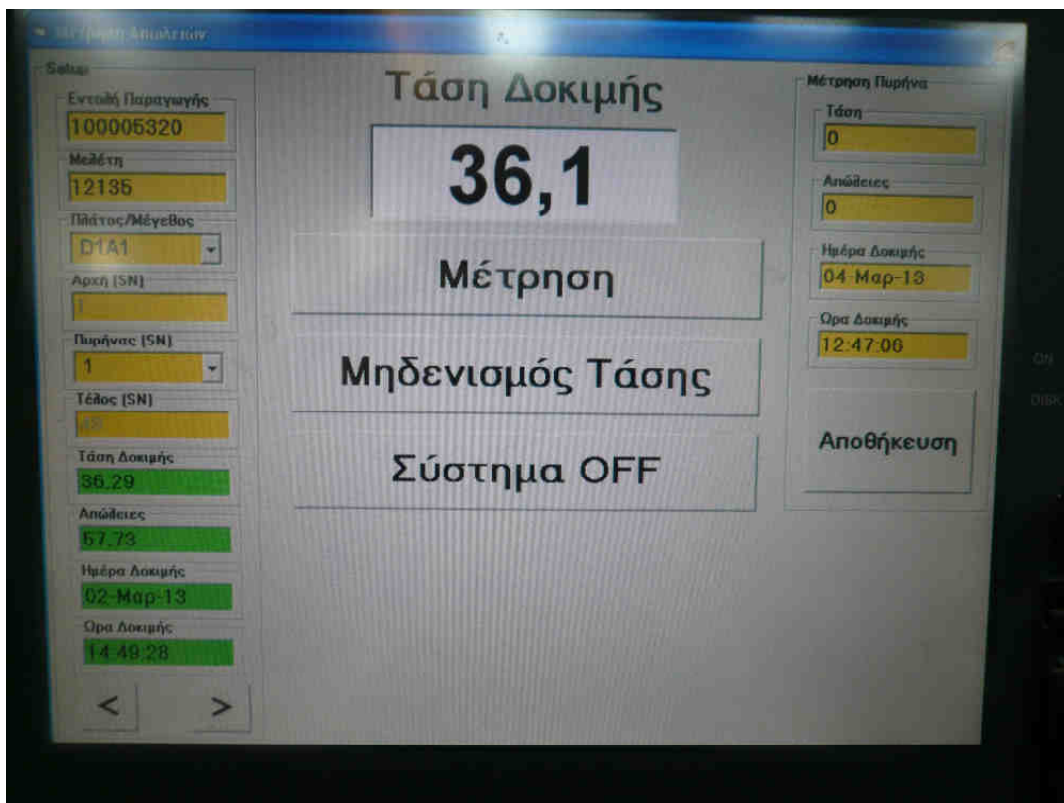
Εικόνα.3.31 - Θάλαμος μέσα στον οποίο λαμβάνει χώρα η διαδικασία της ανόπτησης¹

¹ Με την ανόπτηση αναιρούνται οι συνέπειες της πλαστικής παραμόρφωσης (σχήματα 3.28 και 3.29) κατά την διάρκεια της οποίας μεταβάλλονται τόσο η πυκνότητα όσο και η κατανομή των αταξιών. Το ψυξηλατημένο μέταλλο είναι θερμοδυναμικά ασταθές σε σχέση με το μέταλλο, που δεν έχει υποστεί πλαστική παραμόρφωση και επομένως έχει τη τάση να υποστεί αυθόρμητη μεταβολή για να μειώσει την πρόσθετη ελεύθερη ενέργεια, που έχει συσσωρευτεί λόγω της ψυξηλασίας. Οι διεργασίες, με τις οποίες ένα ψυξηλατημένο μέταλλο οδηγείται σε μείωση της ελεύθερης ενέργειας, ονομάζονται διεργασίες ανοπτήσεως.

Με την ανόπτηση υπάρχει δραστική μείωση της σκληρότητας, μείωση της πυκνότητας του μετάλλου και πτώση της ηλεκτρικής αντίστασης. Η μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης οφείλεται στη μείωση της πυκνότητας των σημειακών ατελειών (οπών και ατόμων παρεμβολής), που προβάλλουν αντίσταση στην κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων [3.3].

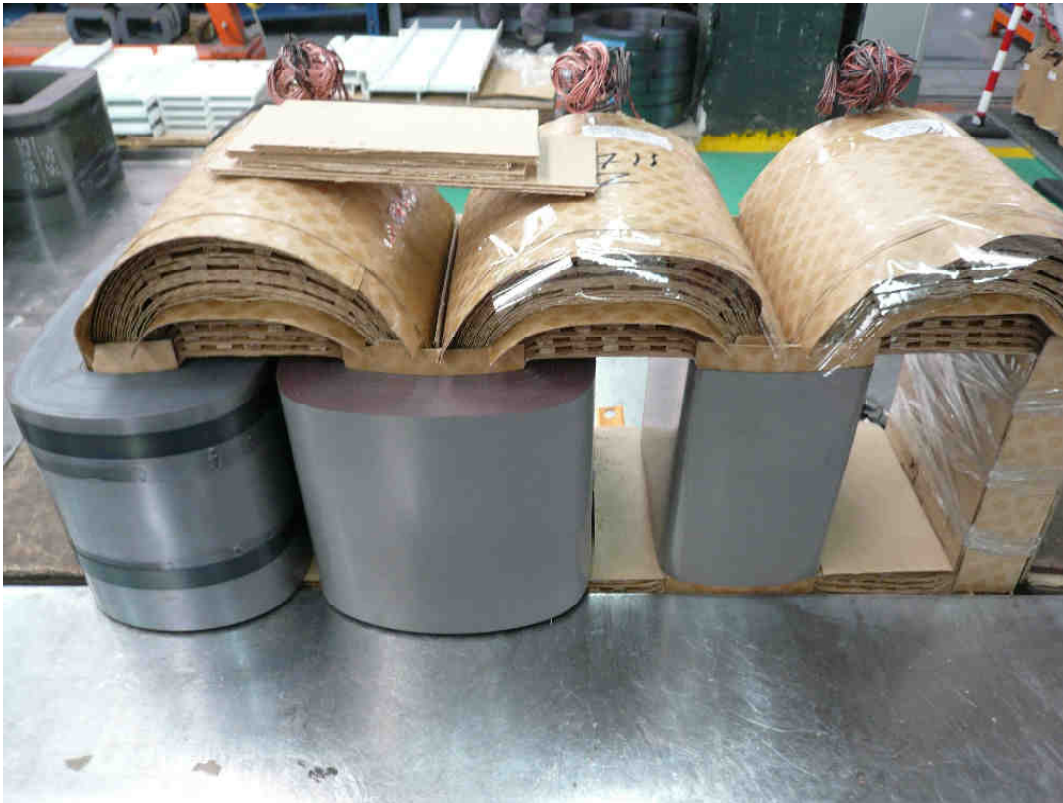


Εικόνα.3.32 - Πηνίο-ζώνη για τη μέτρηση των μονοφασικών απωλειών σκέλους πυρήνα προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη ομαδοποίηση των πυρήνων



Εικόνα 3.33 - Καταγραφικό σύστημα μέτρησης των μονοφασικών απωλειών σκέλους πυρήνα

3.5 Συναρμολόγηση



Εικόνα 3.34 - Συναρμολόγηση της μαγνητικής λαμαρίνας και των πηνίων



Εικόνα 3.35 - Κατασκευή ενεργού μέρους Μ/Σ 2500 kVA, 33/11 kV (πλευρά χαμηλής τάσης)



Εικόνα 3.36 - Κατασκευή ενεργού μέρους Μ/Σ 2500 kVA, 33/11 kV (πλευρά μέσης τάσης)

3.6 Ξήρανση και πλήρωση με λάδι των Μ/Σ



Εικόνα 3.37 - 1^{ος} θάλαμος ξήρανσης (μέθοδος ηλεκτρικής ξήρανσης) και κενού



Εικόνα 3.38 - 2^{ος} θάλαμος ξήρανσης (μέθοδος ηλεκτρικής ξήρανσης) και κενού

3.7 Ποιοτικός Έλεγχος – Δοκιμαστήριο



Εικόνα 3.39 - Στάδιο δοκιμών Μ/Σ

3.8 Αποπεράτωση Μ/Σ

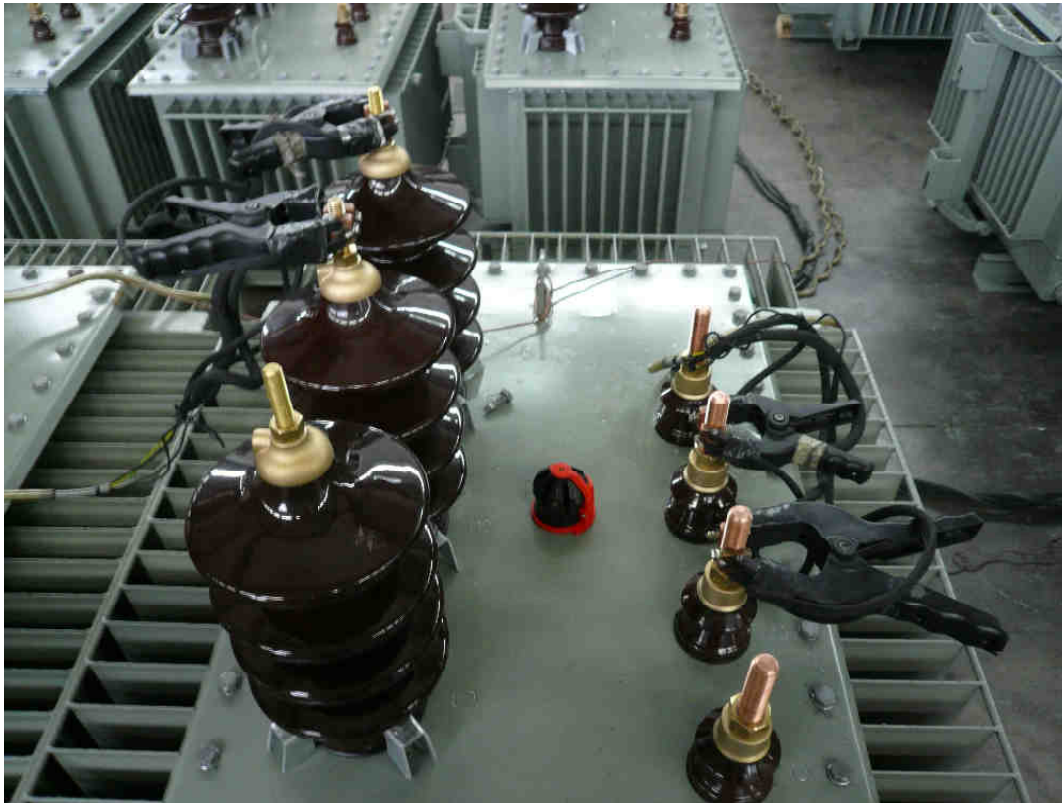


Εικόνα 3.40 - Τελική βαφή με ψεκασμό του Μ/Σ εντός καμπίνας βαφής με σύστημα απομάκρυνσης των αναθυμιάσεων και των καταλοίπων βαφής μέσω καταρράκτη νερού

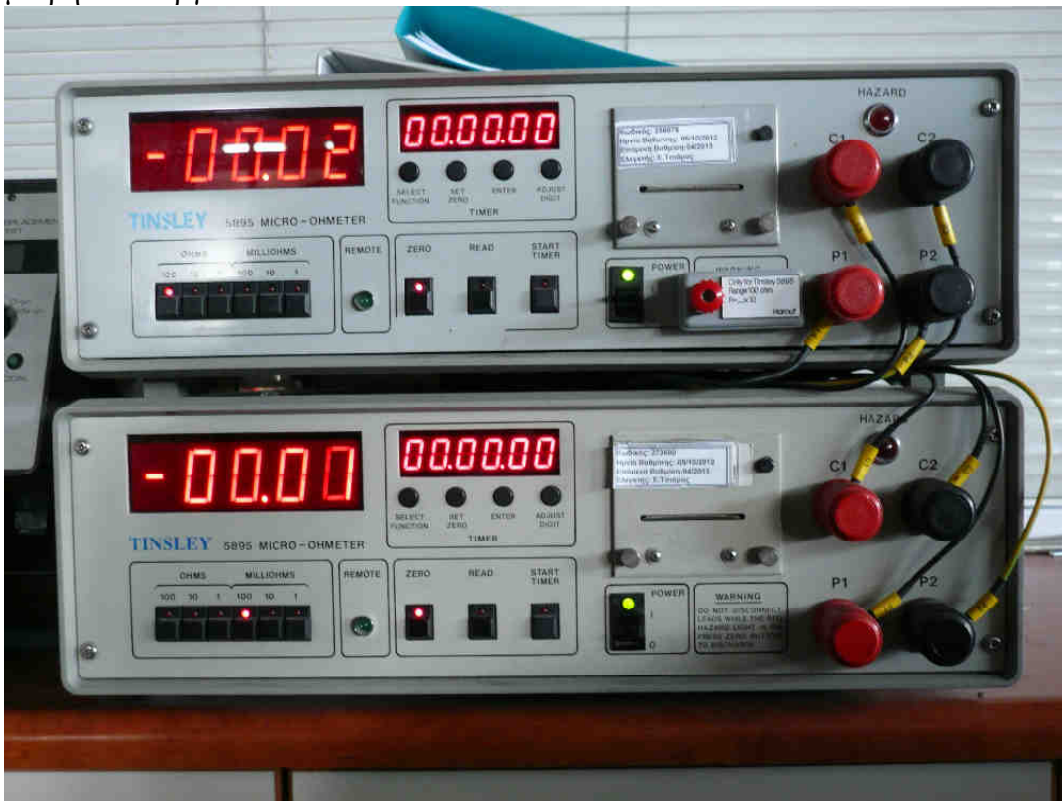


Εικόνα 3.41 - Αποπεράτωση του Μ/Σ

3.9 Δοκιμές Δοκιμαστηρίου



Εικόνα 3.42 - Μέτρηση των αντιστάσεων μεταξύ των φάσεων, ταυτόχρονα για τα τυλίγματα της χαμηλής και της μέσης τάσης. Απεικονίζεται η σύνδεση των ακροδεκτών του μετρητικού οργάνου



Εικόνα 3.43 - Όργανο μέτρησης αντιστάσεων



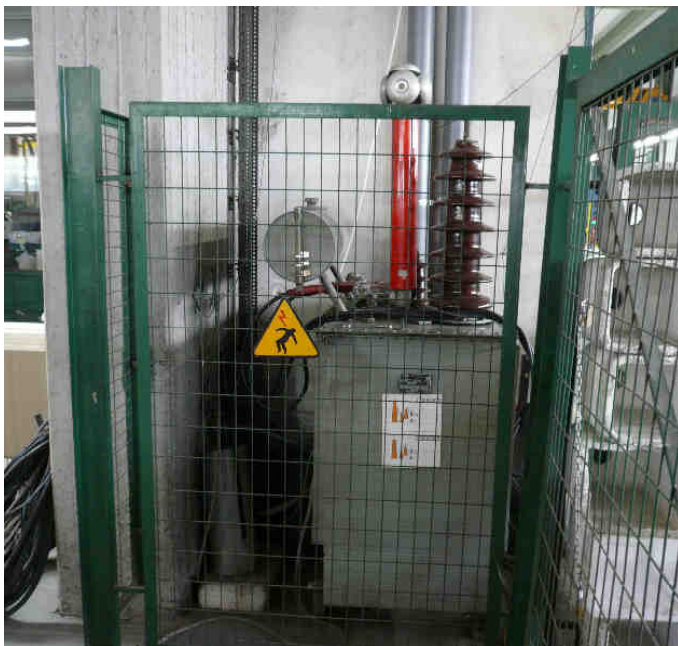
Εικόνα 3.44 – Συνδεσμολογία ακροδεκτών μετρητή λόγου μετασχηματισμού και ομάδας συνδεσμολογίας



Εικόνα 3.45 – Όργανο μέτρησης του λόγου μετασχηματισμού και της ομάδας συνδεσμολογίας



Εικόνα 3.46 – Συνδεσμολογία για την εκτέλεση της δοκιμής της εφαρμοζόμενης τάσης. Στη συγκεκριμένη εικόνα, ελέγχεται η αντοχή του τυλίγματος της μέσης τάσης (βραχυκυκλώνοντας τους τρεις ακροδέκτες αυτής και εφαρμόζοντας σε αυτούς τη τάση δοκιμής) με το τύλιγμα της χαμηλής τάσης και τα υπόλοιπα μεταλλικά μέρη (δεξαμενή, κάλυμμα) να είναι γειωμένα



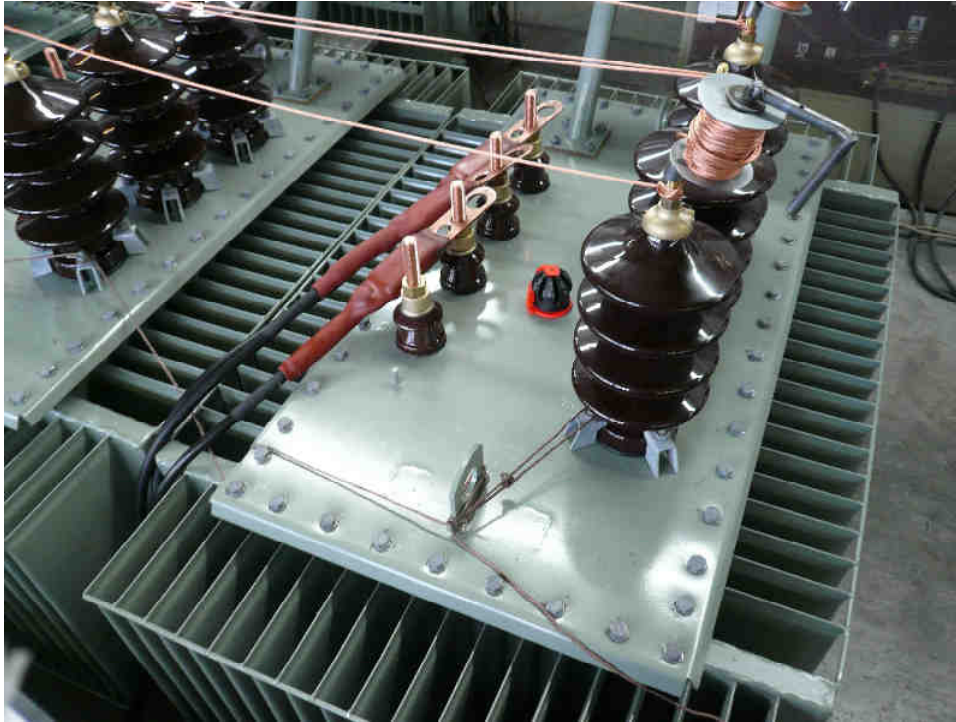
Εικόνα 3.47 – Μετασχηματιστής για την παραγωγή της υψηλής τάσης που θα χρησιμοποιηθεί ως τάση δοκιμής (δοκιμή εφαρμοζόμενης τάσης)



Εικόνα 3.48 – Όργανα ελέγχου εφαρμογής της τάσης δοκιμής (δοκιμή εφαρμοζόμενης τάσης)



Εικόνα 3.49 – Συνδεσμολογία εκτέλεσης της δοκιμής επαγόμενης τάσης. Η εφαρμογή της τάσης δοκιμής πραγματοποιείται από τη πλευρά της χαμηλής τάσης και με τους ακροδέκτες της μέσης τάσης να παραμένουν ανοιχτοκυκλωμένοι (στη συγκεκριμένη εικόνα οι ακροδέκτες μιας σειράς Μ/Σ είναι βραχυκυκλωμένοι ανά φάση ώστε την ίδια χρονική περίοδο να δοκιμάζονται συγχρόνως περισσότεροι Μ/Σ)



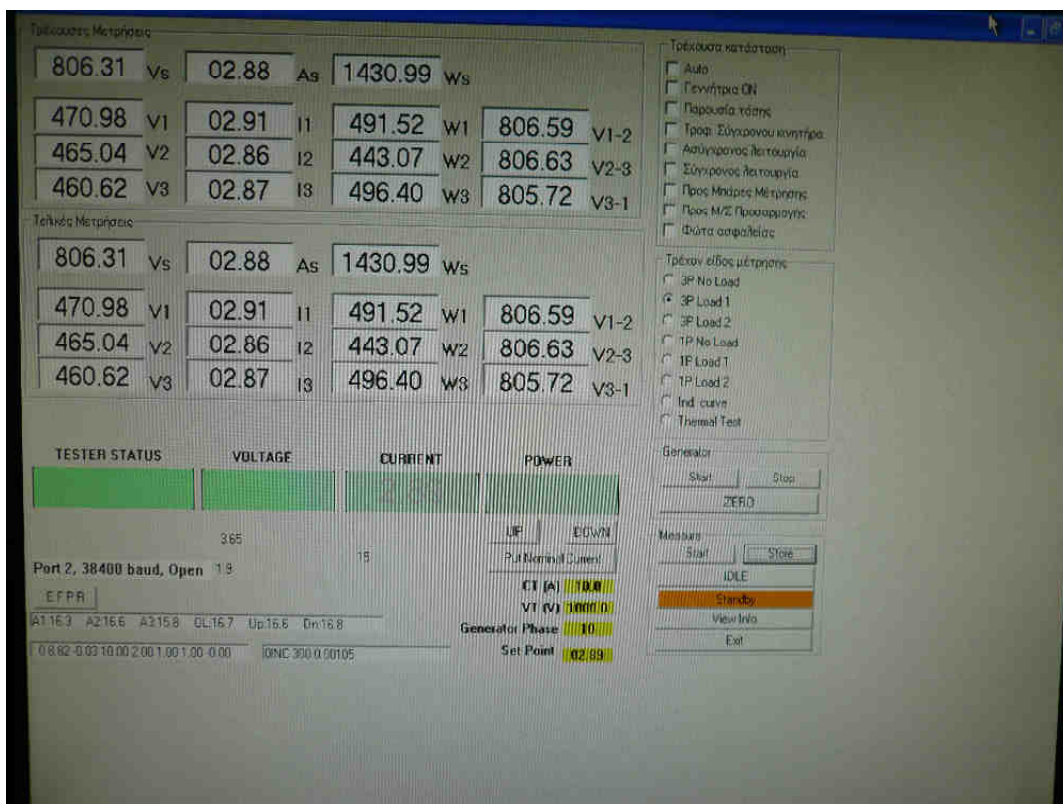
Εικόνα 3.50 – Δοκιμή επαγόμενης τάσης. Διακρίνεται η γείωση των μεταλλικών μερών



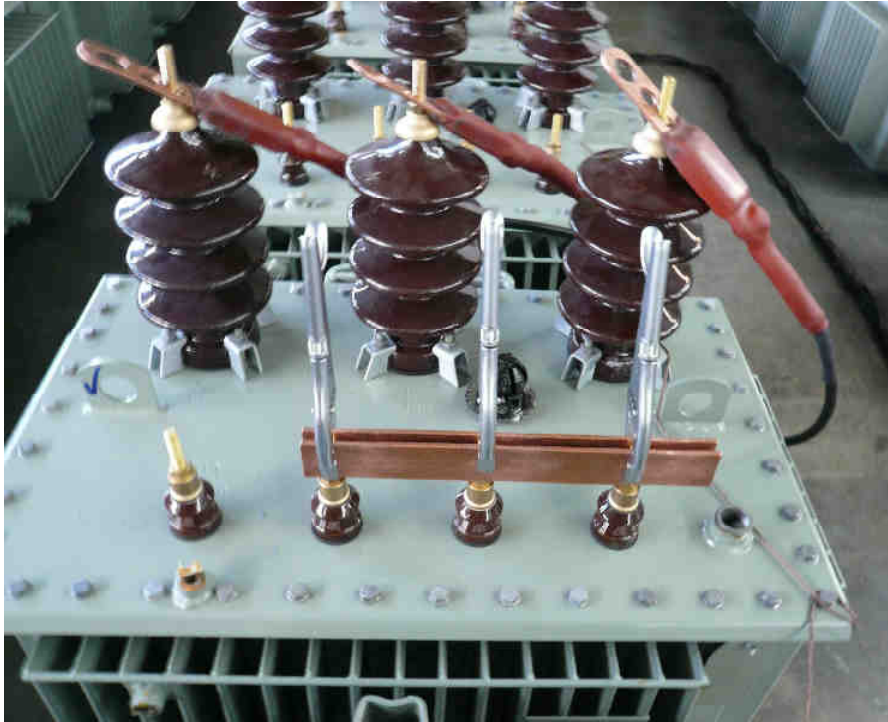
Εικόνα 3.51 – Τράπεζα ελέγχου της δοκιμής της επαγόμενης τάσης



Εικόνα 3.52 – Δοκιμή μέτρησης απωλειών σιδήρου και ρεύματος μαγνήτισης



Εικόνα 3.53 – Σύστημα καταγραφής των μετρούμενων απωλειών



Εικόνα 3.54 – Συνδεσμολογία μέτρησης απωλειών φορτίου και τάσης βραχυκύκλωσης



Εικόνα 3.55 – Σύστημα δοκιμής κρουστικής τάσης. Διακρίνονται: ο υπό δοκιμή Μ/Σ (100 kVA, 20/0.4 kV), η κρουστική γεννήτρια δύο σταδίων, ο σπινθηριστής για το αποκομμένο κύμα και ο χωρητικός καταμεριστής



Εικόνα 3.56 – Συνδεσμολογία του υπό δοκιμή Μ/Σ. Η εξεταζόμενη φάση, στη παρούσα εικόνα, είναι η φάση Α της μέσης τάσης, με τους δύο άλλους ακροδέκτες της μέσης τάσης να είναι βραχυκυκλωμένοι και γειωμένοι. Επίσης, οι ακροδέκτες της χαμηλής τάσης και τα μεταλλικά μέρη (κάλυμμα, δεξαμενή) είναι βραχυκυκλωμένα και γειωμένα.



Εικόνα 3.57 – Όργανα ελέγχου διακένων σπινθηριστών και τάσης δοκιμής



Εικόνα 3.58 – Καταγραφικό σύστημα των κρουστικών τάσεων

Βιβλιογραφία

- [3.1] “J&P Transformer Book”, Martin J. Heathcote, Twelfth edition, 1998
- [3.2] “Power Transformer Tank Rupture and Mitigation – A Summary of Current State of Practice and Knowledge by the Task Force of IEEE Power Transformer Subcommittee”, Nick Abi-Samra, Javier Arteaga, Bill Darovny, Marc Foata, Joshua Herz, Terence Lee, Van Nhi Nguyen, Guillaume Perigaud, Craig Swinderman, Robert Thomson, Ge (Jim) Zhang, and Peter D. Zhao, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009, pp.: 1959-1967
- [3.3] “Φυσική μεταλλουργία: θεμελιώδεις αρχές”, Χαϊδεμενόπουλος Γ.Ν., Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, 2000

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Δοκιμές Μετασχηματιστών Ισχύος

4.1 Γενικά

Σε αντίθεση με τον υπόλοιπο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, η πλειοψηφία των Μ/Σ κατασκευάζεται χειρωνακτικά, αφού κατά τη διάρκεια της κατασκευής εμπλέκεται μικρή ή καθόλου αυτοματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής. Αυτό σημαίνει ότι ο πελάτης-αγοραστής δεν μπορεί να βασιστεί στις εκτεταμένες δοκιμές τύπου των δοκιμών (πριν την παραγωγή των Μ/Σ) για τον ικανοποιητικό σχεδιασμό και την επαρκή κατασκευή των Μ/Σ. Έτσι, κάθε ένας Μ/Σ μετά την παραγωγή του και πριν την παράδοσή του στον πελάτη πρέπει να ελέγχεται για την ικανότητά του για τουλάχιστον 30 έτη λειτουργίας.

Οι δοκιμές καταλληλότητας του Μ/Σ εμπίπτουν σε τρεις κατηγορίες [4.1]:

- Δοκιμές για τον έλεγχο αν ο Μ/Σ έχει κατασκευαστεί σωστά. Αυτές περιλαμβάνουν τον έλεγχο του λόγου μετασχηματισμού, τον έλεγχο της πολικότητας, την μέτρηση της αντίστασης και τον έλεγχο λειτουργίας του μεταγωγέα.
- Δοκιμές για την μέτρηση των εγγυημένων μεγεθών όπως αυτά καθορίζονται από τις απαιτήσεις του πελάτη. Πρόκειται για τις απώλειες, τη τάση βραχυκύκλωσης, την ανύψωση της θερμοκρασίας και την στάθμη θορύβου.
- Δοκιμές που αποδεικνύουν ότι ο Μ/Σ θα λειτουργεί ικανοποιητικά. Αυτές είναι οι διηλεκτρικές δοκιμές ή δοκιμές υπερτάσεων.

Επίσης, οι δοκιμές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Δοκιμές σειράς – Είναι οι δοκιμές οι οποίες εκτελούνται σε όλο των αριθμό των παραχθέντων Μ/Σ
- Δοκιμές τύπου – Είναι οι δοκιμές που γίνονται σε αντιπροσωπευτικό δείγμα Μ/Σ και οι οποίοι επιλέγονται δειγματοληπτικά από τον πελάτη.
- Ειδικές δοκιμές – Είναι οι δοκιμές που εκτελούνται μετά από συμφωνία πελάτη και κατασκευαστή.

4.1.1 Γενικές απαιτήσεις δοκιμών

Οι Μ/Σ υπόκεινται στις παραπάνω δοκιμές εφόσον ικανοποιούνται οι παρακάτω απαιτήσεις [4.2]:

- Οι δοκιμές θα εκτελούνται όταν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μεταξύ 10 °C και 40 °C και με τον νερό ψύξης (όταν απαιτείται) να βρίσκεται σε θερμοκρασία μικρότερη των 25 °C
- Οι δοκιμές θα εκτελούνται με ευθύνη του κατασκευαστή, εκτός αν έχει συμφωνηθεί κάτι διαφορετικό μεταξύ κατασκευαστή και αγοραστή
- Όλα τα εξωτερικά εξαρτήματα που πιθανόν να επηρεάσουν την απόδοση του Μ/Σ κατά την διάρκεια του Μ/Σ πρέπει να είναι τοποθετημένα στη θέση τους
- Ο μεταγωγέας πρέπει να βρίσκεται στη κύρια θέση του, δηλαδή στην ονομαστική τάση, εκτός αν η σχετική οδηγία του αντίστοιχου προτύπου απαιτεί άλλη θέση ή αν έχει συμφωνηθεί κάτι άλλο μεταξύ κατασκευαστή και πελάτη.
- Τα μετρητικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τις δοκιμές πρέπει να διαθέτουν πιστοποιημένη ακρίβεια και να υπόκεινται σε περιοδική διακρίβωση
- Όπου απαιτείται, τα αποτελέσματα των δοκιμών θα διορθώνονται σε μία θερμοκρασία αναφοράς και η οποία θα είναι 75 °C για τους Μ/Σ λαδιού

Αναλυτικότερα οι δοκιμές αποτελούνται από επιμέρους δοκιμές:

Οι δοκιμές σειράς από:

- Μέτρηση αντίστασης τυλιγμάτων
- Μέτρηση λόγου μετασχηματισμού και έλεγχος ομάδας ζεύξης
- Μέτρηση τάσης βραχυκύκλωσης και απωλειών φορτίου
- Μέτρηση απωλειών σιδήρου και ρεύματος μαγνήτισης
- Διηλεκτρικές δοκιμές σειράς
 - Δοκιμή εφαρμοζόμενης τάσης
 - Δοκιμή επαγόμενης τάσης
- Δοκιμή λειτουργίας του μηχανισμού αλλαγής λήψεων υπό φορτίο

Οι δοκιμές τύπου από:

- Δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας
- Διηλεκτρικές δοκιμές τύπου

Οι ειδικές δοκιμές από:

- Διηλεκτρικές ειδικές δοκιμές
- Προσδιορισμός των χωρητικοτήτων μεταξύ τυλιγμάτων-γη και μεταξύ των τυλιγμάτων.
- Μέτρηση της αντίστασης της μηδενικής ακολουθίας τριφασικού Μ/Σ
- Δοκιμή βραχυκυκλώματος
- Προσδιορισμός των επιπέδων θορύβου
- Μέτρηση αρμονικών του ρεύματος μαγνήτισης
- Μέτρηση της απορροφημένης ισχύς από ανεμιστήρες και κινητήρες αντλιών λαδιού
- Μέτρηση της αντίστασης της μόνωσης των τυλιγμάτων ως προς γη, και/ή μέτρηση εφαπτομένης δ των χωρητικοτήτων του μονωτικού συστήματος

Διαδοχή δοκιμών

Σύμφωνα με [4.3], συνίσταται συγκεκριμένη διαδοχή εκτέλεσης των δοκιμών ώστε πρώτα να πραγματοποιούνται οι δοκιμές που εμπλέκουν τάσεις και ρεύματα τα οποία συνήθως είναι μειωμένα σε σύγκριση με τις ονομαστικές τιμές ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ζημιογόνες επιδράσεις προς τους Μ/Σ.

Έτσι, η εργασία [4.4] λαμβάνοντας υπόψη της το παραπάνω αλλά και τα σχετικά που προτείνει το πρότυπο [4.2], προτείνει την ακόλουθη διαδοχή δοκιμών:

- Λόγος μετασχηματισμού και έλεγχος ομάδας ζεύξης
- Μέτρηση αντίστασης
- Απώλειες σιδήρου (με επόμενη, αν απαιτείται, τη δοκιμή θορύβου)
- Απώλειες φορτίου και τάσης βραχυκύκλωσης
- Μέτρηση της αντίστασης της μηδενικής ακολουθίας (αν απαιτείται)
- Διηλεκτρικές δοκιμές
 - Δοκιμή εσωτερικής τάσης - Switching impulse voltage test (αν απαιτείται)
 - Δοκιμή εξωτερικής τάσης - Lightning impulse voltage test (αν απαιτείται)
 - Δοκιμή εφαρμοζόμενης τάσης
 - Δοκιμή επαγόμενης τάσης

Ανοχές μετρήσεων

Κατασκευαστικές ανάγκες οδηγούν σε παρεκκλίσεις των μετρούμενων τιμών από τις τιμές που είχαν συμφωνηθεί μεταξύ κατασκευαστή και πελάτη και οι οποίες τιμές ονομάζονται εγγυημένες τιμές [4.5]. Στον πίνακα 4.1 αναφέρονται οι ανοχές συγκεκριμένων μεγεθών, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076-1 [4.2].

| Μέγεθος | Ανοχή |
|---------------------------------------|---|
| Λόγος μετασχηματισμού | Η μικρότερη από τις ακόλουθες τιμές: α) $\pm 0,5\%$ της εγγυημένης τιμής β) $\pm 1/10$ της μετρούμενης τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης της κύριας θέσης του μεταγωγέα |
| Τάση βραχυκύκλωσης (U_k) | α) $\pm 7,5\%$ της εγγυημένης τιμής U_k , όταν $U_k \geq 10\%$ β) $\pm 10\%$ της εγγυημένης τιμής U_k , όταν $U_k < 10\%$ |
| Απώλειες εν κενώ | +15% της εγγυημένης τιμής απωλειών εν κενώ |
| Απώλειες φορτίου | +15% της εγγυημένης τιμής απωλειών φορτίου |
| Ολικές απώλειες (φορτίου και εν κενώ) | +10% της εγγυημένης τιμής των ολικών απωλειών (φορτίου και εν κενώ) |
| Ρεύμα μαγνήτισης | +30% της εγγυημένης τιμής του ρεύματος μαγνήτισης |

Πίνακας 4.1 – Εγγυημένες τιμές συγκεκριμένων μεγεθών [4.5]

4.2 Μέτρηση αντίστασης τυλιγμάτων

Η μέτρηση της αντίστασης των τυλιγμάτων ενός Μ/Σ είναι πρωταρχικής σημασίας για τους ακόλουθους λόγους [4.3]:

- Για τον υπολογισμό της συνιστώσας I^2R των απωλειών του αγωγού
- Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων στο τέλος της δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας

- Ως τιμή αναφοράς για πιθανές μελλοντικές βλάβες μετά την εγκατάσταση των Μ/Σ Εξάλλου, οι Μ/Σ υπόκεινται σε δονήσεις. Έτσι, προβλήματα ή αστοχίες συμβαίνουν εξαιτίας της κακής μελέτης, της κατασκευής, των κακών περιβαλλοντολογικών συνθηκών, της υπερφόρτισης ή της κακής συντήρησης. Η μέτρηση της αντίστασης των τυλιγμάτων επιβεβαιώνει ότι οι εσωτερικές συνδέσεις είναι σωστές και ότι δεν υπάρχουν ανοιχτές ή κακές-χαλαρές συνδέσεις

Πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με [4.6], αν μετά από κάποιο διάστημα λειτουργίας του Μ/Σ μετρηθούν οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων και εντοπιστούν διαφορές με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο εργοστάσιο κατασκευής δεν είναι απαραίτητο να σηματοδοτεί κάποιο εσωτερικό πρόβλημα του τυλίγματος ή των εσωτερικών ενώσεων με το τύλιγμα αυτό, αλλά μπορεί να οφείλεται στο σχηματισμό μεμβράνης θαμπώματος στις χάλκινες εσωτερικές επαφές του μεταγωγέα όπου υπάρχουν συνδέσεις με τους ακροδέκτες του τυλίγματος. Η πλήρης επίδραση της αντίστασης της μεμβράνης μειώνεται από την υψηλή μηχανική δύναμη που αναπτύσσεται κατά την επιλογή θέσης του μεταγωγέα αλλά και από το κανονικό ρεύμα φορτίου του Μ/Σ. Παρ' όλα αυτά όμως, με την πάροδο του χρόνου, η μεμβράνη αυξάνεται σε πάχος με αποτέλεσμα να αυξάνεται συνολικά και η αντίσταση.

4.2.1 Γενικά περί μετρήσεων αντίστασης

Η αντίσταση ενός αγωγού μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας τη εφαρμοζόμενη στον αγωγό τάση με το ρεύμα που διαρρέει αυτόν. Αυτή η γενική αρχή χρησιμοποιείται για την μέτρηση των τυλιγμάτων του Μ/Σ. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι τέτοια μέτρηση αντίστασης προϋποθέτει συνθήκες σταθερής κατάστασης όπου το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό παραμένει σταθερό ενώ και η πτώση τάσης στα άκρα αυτού να παραμένει επίσης σταθερή. Και το παραπάνω πρέπει να ισχύει καθ' όλη τη διάρκεια της μέτρησης. Αλλά είναι γνωστό ότι αν στη μέτρηση της αντίστασης υπάρχει συσχετισμός με κάποια επαγωγή ή χωρητικότητα τότε με την εφαρμογή τάσης και την ροή ρεύματος στον αγωγό δημιουργείται μία μεταβατική περίοδος. Ακριβείς μετρήσεις της αντίστασης δεν είναι δυνατές σε κύκλωμα RLC έως ότου η περίοδος της μετάβασης τελειώσει και οι συνθήκες σταθερής κατάστασης επικρατήσουν. Συνεπώς, για την μέτρηση της αντίστασης των τυλιγμάτων ενός Μ/Σ, όπου δηλαδή σημαντική επαγωγή συνδέεται με την αντίσταση, ειδικές τεχνικές και προφυλάξεις πρέπει να εφαρμοστούν ώστε να έχουμε ακριβείς μετρήσεις.

Μέτρηση αντίστασης συνδεδεμένη με επαγωγή

Η φάση της μετάβασης που προκύπτει από την εφαρμογή τάσης και την ροή ρεύματος στον αγωγό έχει σταθερά χρόνου ίση με L/R δευτερόλεπτα όπου L είναι η επαγωγή σε Henries και R είναι η αντίσταση σε Ohms. Για να πραγματοποιηθούν σωστές μετρήσεις της αντίστασης σε τέτοιο κύκλωμα, πρέπει η σταθερά χρόνου να είναι αρκετών (πέντε έως εννιά) σταθερών χρόνου ώστε να παρέλθει η περίοδος της μετάβασης. Ο απαιτούμενος αριθμός σταθερών χρόνου εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια. Πέντε σταθερές χρόνου προσφέρουν ακρίβεια 1% ενώ εννέα σταθερές χρόνου δίνουν ακρίβεια 0,1% περίπου. Το σφάλμα στην μέτρηση αντίστασης, υπό μη-σταθερές ή μεταβατικές συνθήκες, οφείλεται στην επαγωγή στην οποία εφαρμόζεται τάση ίση με $V=L*di/dt$, όπου L είναι η επαγωγή σε Henries και di/dt είναι ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος σε amperes ανά δευτερόλεπτο. Για να πραγματοποιηθούν μετρήσεις χωρίς σφάλμα, πρέπει να εξαλειφτεί η επαγωγή από το κύκλωμα ή το ρεύμα να παραμείνει τελείως σταθερό.

Μετασχηματιστές

Πρέπει να σημειωθεί ότι η επίδραση της επαγωγής είναι περισσότερο αισθητή σε μεγαλύτερους M/Σ αφού αυτοί έχουν μεγαλύτερη L/R σταθερά χρόνου. Αλλά, μία επιπρόσθετη επιπλοκή παρουσιάζεται στη μέτρηση της αντίστασης του τυλίγματος ενός M/Σ . Όπως είναι γνωστό, ο πυρήνας ενός M/Σ ισοδυναμεί με ένα κλειστό μαγνητικό κύκλωμα και γι' αυτό το τύλιγμα επιδεικνύει μία μεγάλη επαγωγή. Οπότε, για να μειωθεί η υψηλή επαγωγή και να υπάρξει ροή ρεύματος, θα πρέπει ο πυρήνας να είναι πλήρως ή μερικά κορεσμένος.

Αφού το ρεύμα εδραιωθεί, πρέπει να περιμένουμε αρκετές σταθερές χρόνου πριν καταγράψουμε τις ενδείξεις. Αυτή η σταθερά χρόνου εξαρτάται από τον λόγο της παραμένουσας επαγωγής στα τυλίγματα και της αντίστασης του μετρητικού κυκλώματος. Η σταθερά χρόνου μπορεί να μειωθεί επιτυχώς με την χρήση κατάλληλου μετρητικού εξοπλισμού, ο οποίος παρέχει επιπρόσθετη αντίσταση στο κύκλωμα με αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου L/R δηλαδή της σταθεράς χρόνου.

Μετασχηματιστές συνδεδεμένοι κατά τρίγωνο

Οι M/Σ που διαθέτουν τύλιγμα συνδεδεμένο κατά τρίγωνο παρουσιάζουν ειδικά προβλήματα όταν μετράται η αντίστασή τους. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται στο μεταβατικό ρεύμα που εδραιώνεται εντός του τριγώνου κατά την διάρκεια της αρχικής μεταβατικής

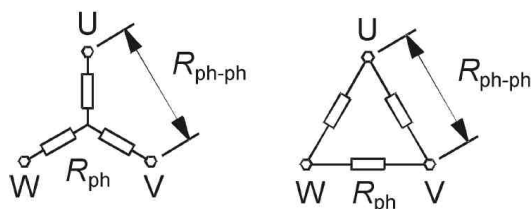
περιόδου. Με τη σύζευξη του ρεύματος αυτού και στο άλλο τύλιγμα, κρίνεται απαραίτητο να το αφήσουμε να εξαλειφθεί ώστε να επιτύχουμε ακριβής μέτρηση. Έτσι, αυτό το μεταβατικό ρεύμα είναι μία επιπρόσθετη επιπλοκή στη μέτρηση της αντίστασης σχετικά μεγάλων Μ/Σ, αφού ελέγχει τον απαιτούμενο χρόνο για να ολοκληρωθεί η μέτρηση της αντίστασης του συνδεδεμένου κατά τρίγωνο τυλίγματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το μεταβατικό ρεύμα επέρχεται άσχετα σε ποιο τύλιγμα, πρωτεύον ή δευτερεύον, μετράται η αντίσταση και άσχετα από την μετρητική συνδεσμολογία (φάση-προς-φάση, φάση-προς-ουδέτερο). Η σταθερά χρόνου της μεταβατικής περιόδου είναι ανάλογη του λόγου της επαγωγής προς την αντίσταση εντός του κυκλώματος του τριγώνου. Αυτή η σταθερά χρόνου αυξάνεται με την αύξηση τόσο της ονομαστικής ισχύς όσο και με τον βαθμό απόδοσης του Μ/Σ [4.7].

Ερμηνεία των μετρούμενων τιμών

Για τριφασικούς Μ/Σ, μετρώνται είτε οι αντιστάσεις των φάσεων R_{ph} ή οι αντιστάσεις μεταξύ των φάσεων R_{ph-ph} . Έτσι, βάσει του σχήματος 4.1, ισχύει [4.4]:

- α) για σύνδεση αστέρα: $R_{ph-ph} = 2 R_{ph}$
- β) για σύνδεση τριγώνου: $R_{ph-ph} = 2/3 R_{ph}$



Σχήμα 4.1 – Οι μετρούμενες αντιστάσεις στις συνδεσμολογίες κατά αστέρα και κατά τρίγωνο[4.4].

4.2.2 Μέθοδοι μέτρησης αντίστασης

4.2.2.1 Μέθοδος γέφυρας

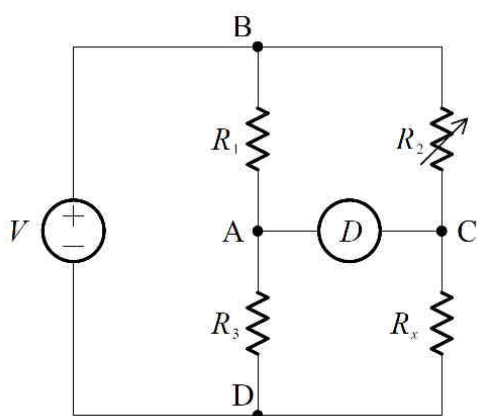
Η μέθοδος μέτρησης της αντίστασης μέσω γέφυρας είναι μία από τις δύο μεθόδους που προτιμάται εξαιτίας της ακρίβειας και της ευκολίας της στη χρήση, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις αντιστάσεων μέχρι και 10.000 Ω.

Ειδικότερα, για τιμές αντιστάσεων από 1Ω και μεγαλύτερες χρησιμοποιείται η γέφυρα Wheatstone, ενώ για τιμές μικρότερες από 1Ω χρησιμοποιείται γέφυρα Kelvin. Πιο σύγχρονες γέφυρες, πάντως, έχουν την ικανότητα μέτρησης και στις δύο κλίμακες. Αυτή η

μέθοδος όμως πρέπει να χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου το ονομαστικό ρεύμα του τυλίγματος του Μ/Σ που θα μετρηθεί να είναι μικρότερο από 1Α [4.3].

Γέφυρα Wheatstone

Η γέφυρα Wheatstone είναι η απλούστερη από όλες τις γέφυρες και είναι αυτή που χρησιμοποιείται πιο πολύ για την ακριβή μέτρηση αντιστάσεων. Η γέφυρα αυτή αποτελείται από τέσσερις κλάδους που περιέχουν αντίστοιχες αντιστάσεις, μία πηγή ρεύματος (μία μπαταρία) και ένα γαλβανόμετρο. Το κύκλωμα απεικονίζεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 – Γέφυρα Wheatstone

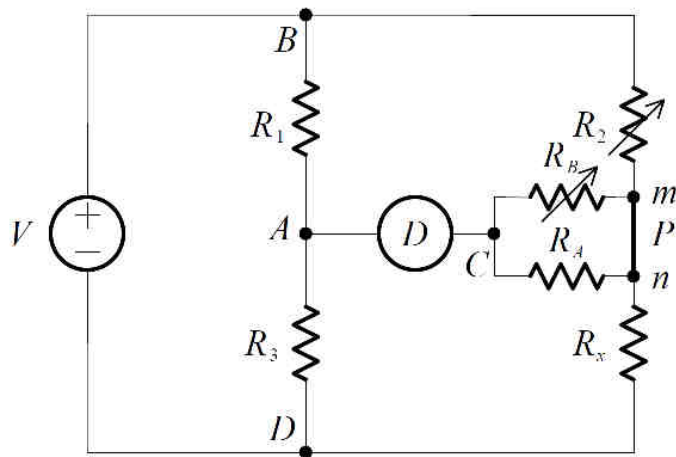
Συνήθως χρησιμοποιείται για την μέτρηση αντιστάσεων από 1Ω έως 10ΜΩ. Έχει χαμηλή ευαισθησία για αντιστάσεις μικρής τιμής.

Οι αντιστάσεις R_3 και R_1 είναι σταθερού λόγου ενώ η R_2 είναι μεταβλητή. Σε συνθήκες ισορροπίας της γέφυρας (όπου το γαλβανόμετρο δεν διαρρέεται από ρεύμα κατόπιν της ρύθμισης της γνωστής μεταβλητής αντίστασης R_2) ισχύει ο παρακάτω τύπος με τον οποίο μπορούμε να υπολογίσουμε την άγνωστη αντίσταση R_X :

$$R_X = \frac{R_3}{R_1} R_2 \quad (4.1)$$

Γέφυρα Kelvin

Μία παραλλαγή της γέφυρας Wheatstone θεωρείται ότι είναι η γέφυρα Kelvin, η οποία αυξάνει την ακρίβεια της μέτρησης των αντιστάσεων χαμηλής τιμής. Χρησιμοποιείται για την μέτρηση αντιστάσεων από 100nΩ έως 1Ω. Το κύκλωμα της γέφυρας Kelvin απεικονίζεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 – Γέφυρα Kelvin

Για την λειτουργία της γέφυρας Kelvin, πραγματοποιείται ισορροπία όπως και με την γέφυρα Wheatstone δηλαδή ρυθμίζοντας κατάλληλα την μεταβλητή αντίσταση R_2 . Κατόπιν, όταν αφαιρεθεί ο σύνδεσμος P, ελέγχουμε αν παραμένει η γέφυρα σε ισορροπία. Αν είναι εκτός ισορροπίας τότε ρυθμίζουμε την μεταβλητή αντίσταση R_B ώστε να αποκατασταθεί ξανά η γέφυρα.

Με τον σύνδεσμο ξανά στη θέση του και την αντίσταση αυτού ορισμένη ως P, προκύπτει ο τύπος υπολογισμού της αντίστασης R_X :

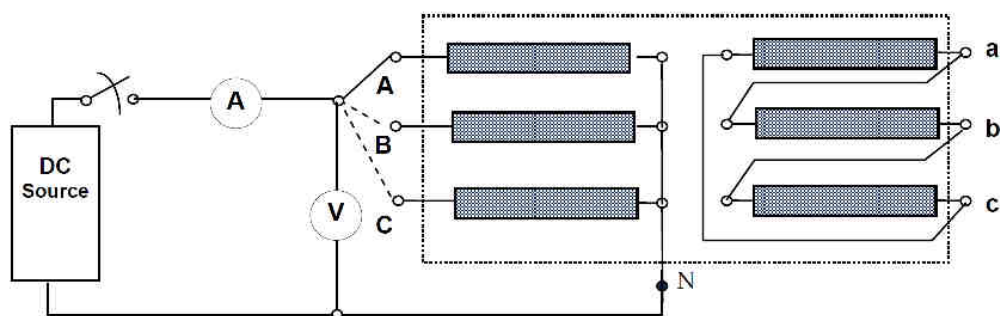
$$R_X = \frac{R_3}{R_1} R_2 + \frac{R_B P}{R_A + R_B + P} \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_A}{R_B} \right) \quad (4.2)$$

Σε περίπτωση που ισχύει $R_3/R_1 = R_A/R_B$, η εξίσωση (4.2) ταυτίζεται με αυτή της γέφυρας Wheatstone. Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση του συνδέσμου P (η οποία μεταφέρει το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος) δεν έχει κάποια επίδραση, εφόσον ισχύει η ισότητα $R_3/R_1 = R_A/R_B$.

4.2.2.2 Μέθοδος βολτομέτρου-αμπερομέτρου

Η μέθοδος βολτομέτρου-αμπερομέτρου κάποιες φορές είναι περισσότερη χρηστική απ' ό,τι η μέθοδος της γέφυρας ενώ πρέπει να χρησιμοποιείται αν το ονομαστικό ρεύμα του τυλίγματος του M/Σ είναι μεγαλύτερο από 1A. Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος θα πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

α) Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με συνεχές ρεύμα, και με τις ενδείξεις του αμπερομέτρου και βολτομέτρου να καταγράφονται ταυτόχρονα (σχήμα 4.4). Κατόπιν, η αντίσταση υπολογίζεται βάσει των ενδείξεων με το νόμο του Ohm. Για ικανοποιητική λειτουργία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή συνεχούς τάσης μία μπαταρία ή ένας ανορθωτής.



Σχήμα 4.4 – Συνδεσμολογία μεθόδου βολτομέτρου-αμπερομέτρου

β) Για την ελαχιστοποίηση του λάθους παρατήρησης:

- Τα μετρητικά όργανα πρέπει να διαθέτουν τέτοιες κλίμακες ώστε να εμφανίζουν τις λογικά μεγάλες αποκλίσεις.
- Η πολικότητα της μαγνήτισης του πυρήνα να παραμείνει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της καταγραφής των ενδείξεων.

γ) Οι ακροδέκτες του βολτομέτρου πρέπει να είναι ανεξάρτητοι των ακροδεκτών του ρεύματος και πρέπει να είναι συνδεδεμένοι όσο το δυνατόν πιο κοντά στους ακροδέκτες του τυλίγματος του οποίου η αντίσταση πρόκειται να μετρηθεί.

δ) Δεν θα γίνεται καταγραφή των ενδείξεων έως ότου το ρεύμα και η τάση φτάσουν σε τιμές σταθερής κατάστασης. Όταν μετράται η κρύα αντίσταση, πριν την εκτέλεση της δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας, πρέπει να σημειώνεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε οι ενδείξεις να γίνουν σταθερές. Αυτή η χρονική περίοδος πρέπει να διέρχεται προτού καταγράψουμε την πρώτη ένδειξη, όταν πραγματοποιηθεί η τελική μέτρηση της θερμής αντίστασης.

Γενικά, το τύλιγμα θα παρουσιάσει μεγάλη dc σταθερά χρόνου. Για να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το ρεύμα σε τιμή σταθερής κατάστασης, πρέπει να προστίθεται σε σειρά με την πηγή μία μη-επαγωγική εξωτερική αντίσταση. Η αντίσταση πρέπει να είναι μεγάλη σε σύγκριση με την επαγωγή του τυλίγματος. Αλλά τότε είναι απαραίτητο να αυξήσουμε την τάση της πηγής για να αντισταθμίσουμε την πτώση τάσης

στην αντίσταση που βρίσκεται εν σειρά. Αλλά όμως η σταθερά χρόνου θα μειωθεί επίσης με το να διατηρούμε όλα τα υπόλοιπα τυλίγματα του Μ/Σ ανοιχτοκυκλωμένα κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

ε) Το ρεύμα που χρησιμοποιείται δεν πρέπει να υπερβαίνει το 15% του ονομαστικού ρεύματος του τυλίγματος του οποίου η αντίσταση πρόκειται να μετρηθεί. Μεγαλύτερες τιμές ίσως προκαλέσουν σφάλμα με το να θερμανθεί το τύλιγμα και συνεπώς να μεταβάλλουν την θερμοκρασία και την αντίστασή του [4.3].

4.2.3 Κρύα αντίσταση

Για την σωστή μέτρηση της κρύας αντίστασης του Μ/Σ πρέπει να ικανοποιούνται τα παρακάτω:

- Η μέτρηση της κρύας αντίστασης δεν πρέπει να γίνεται σε Μ/Σ που είναι τοποθετημένοι σε ρεύματα αέρα ή σε χώρο του οποίου η θερμοκρασία μεταβάλλεται ραγδαία.
- Η θερμοκρασία των τυλιγμάτων θεωρείται ίση με τη μέση θερμοκρασία του μονωτικού λαδιού εφόσον:
 - Πριν τη μέτρηση της κρύας αντίστασης πρέπει να έχουν μεσολαβήσει από 3h έως 8h (ανάλογα τον Μ/Σ) από τότε που το τύλιγμα έχει βρεθεί εντός μονωτικού λαδιού χωρίς κάποια διέγερση και χωρίς ρεύμα να το διαρρέει.
 - Η θερμοκρασία του μονωτικού λαδιού έχει σταθεροποιηθεί και η διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών του πάνω και του κάτω μέρους να μην υπερβαίνει τους 5°C.
- Η θερμοκρασία των τυλιγμάτων πρέπει να καταγράφονται ως ο μέσος όρος των ενδείξεων αρκετών θερμομέτρων ή θερμοζευγών που έχουν τοποθετηθεί ανάμεσα στα πηνία σε σημεία όσο το δυνατόν πιο κοντά στην άμεση επαφή με τους αγωγούς του τυλίγματος. Έτσι, δεν πρέπει να θεωρείται ότι τα τυλίγματα έχουν την ίδια θερμοκρασία με τον περιβάλλοντα αέρα.

Μετατροπή των μετρήσεων της αντίστασης

Οι μετρήσεις των κρύων αντιστάσεων των τυλιγμάτων κανονικά μετατρέπονται σε μία σταθερή θερμοκρασία αναφοράς η οποία είναι ίση με την ονομαστική μέση θερμοκρασία των τυλιγμάτων αυξανόμενη κατά 20°C. Η μετατροπή επιτυγχάνεται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης [4.3]:

$$R_s = R_m \frac{T_s + T_k}{T_m + T_k} \quad (4.3)$$

όπου

R_s είναι η αντίσταση στην επιθυμητή θερμοκρασία T_s

R_m είναι η μετρούμενη αντίσταση

T_s είναι η επιθυμητή θερμοκρασία αναφοράς ($^{\circ}\text{C}$)

T_m είναι η θερμοκρασία στην οποία μετράται η αντίσταση ($^{\circ}\text{C}$)

T_k είναι $234,5^{\circ}\text{C}$ (για χαλκό) ή 225°C (για αλουμίνιο)

Επίσης, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076-1 [4.2], για Μ/Σ λαδιού με θερμοκρασία αναφοράς τους 75°C ο τύπος μετατροπής της αντίστασης είναι ο ακόλουθος:

$$R_2 = R_1 \frac{310}{235 + T_1} \quad (\text{για χαλκό}) \quad (4.4)$$

$$R_2 = R_1 \frac{300}{225 + T_1} \quad (\text{για αλουμίνιο})$$

4.2.4 Αβεβαιότητα μετρήσεων αντίστασης

Σύμφωνα με [4.4], το πρότυπο IEEE C57.12.00 “IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers” απαιτεί μετρητικό σύστημα ακρίβειας $\pm 0,5\%$ για τις μετρήσεις αντίστασης και $\pm 1^{\circ}\text{C}$ για μετρήσεις θερμοκρασίας.

Μέθοδος βολτομέτρου-αμπερομέτρου

Χρησιμοποιώντας αναλογικά όργανα, η αβεβαιότητα συνήθως είναι $0,5\%$ (κλάση ακρίβειας 0,2 για τα όργανα και 0,1 για τις πρότυπες αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ρεύματος).

Για ψηφιακά όργανα, η αβεβαιότητα είναι $0,15\%$ ($0,025$ για τα όργανα και $0,1$ για την πρότυπη αντίσταση)

Μέθοδος γέφυρας

Γενικά, η μέθοδος αυτή έχει αβεβαιότητα $0,1\%$.

Εξαιτίας του ότι η αντίσταση αναπόφευκτα συνδέεται με τη θερμοκρασία, η οποία μπορεί πρακτικά να μετρηθεί με αβεβαιότητα $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (που αντιστοιχεί σε $\pm 0,4\%$ στην

αντίσταση), η συνολική αβεβαιότητα της μέτρησης της αντίστασης του τυλίγματος είναι μεταξύ 0,5-0,9 %.

4.3 Μέτρηση λόγου μετασχηματισμού και έλεγχος ομάδας ζεύξης

4.3.1 Λόγος μετασχηματισμού – Βασική θεωρία

Υπάρχει μία άμεση σχέση μεταξύ των αριθμών των σπειρών και του λόγου των τάσεων του πρωτεύοντος προς το δευτερεύον, και η οποία σχέση είναι η:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (4.5)$$

όπου

V_p είναι η τάση του πρωτεύοντος

V_s είναι η τάση του δευτερεύοντος

N_p είναι ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος

N_s είναι ο αριθμός των σπειρών του δευτερεύοντος

Αυτός ο βασικός τύπος είναι η βάση για μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την δοκιμή και αξιολόγηση της λειτουργικής ικανότητας του Μ/Σ. Η μέθοδος αυτή καλείται δοκιμή λόγου μετασχηματισμού. Η δοκιμή αυτή εκτελείται, μετά την κατασκευή του Μ/Σ, για τον έλεγχο της καλής κατασκευής του αλλά και μετά την εγκατάστασή του για την επιβεβαίωση της μη ύπαρξης προβλημάτων αφού η μόνωση των τυλιγμάτων μπορεί να πάθει ζημιά ή να εκφυλιστεί η ποιότητά του εξαιτίας διαφόρων αιτιών όπως λόγω ακμών, κυμάτων, σφαλμάτων, ζημιά κατά την μεταφορά κτλ. Η βλάβη της μόνωσης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το βραχυκύκλωμα μεταξύ σπειρών, δηλαδή τη μείωση του αριθμού των σπειρών αλλάζοντας το λόγο και αποκλίνοντας από τον ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού[4.8].

4.3.1.1 Μέθοδοι μέτρησης λόγου μετασχηματισμού

Ο λόγος μετασχηματισμού ενός Μ/Σ είναι ο λόγος του αριθμού των σπειρών του τυλίγματος της υψηλής τάσης προς τον αριθμό των σπειρών του τυλίγματος της χαμηλής τάσης. Επίσης, όταν ο Μ/Σ έχει θέσεις λήψης (taps), ο λόγος μετασχηματισμού θα μετράται σε όλες τις θέσεις.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι μέτρησης του λόγου μετασχηματισμού:

α) Μέθοδος βολτομέτρου

Χρησιμοποιούνται δύο βολτόμετρα, ένα για την καταγραφή της τάσης του τυλίγματος της υψηλής τάσης και ένα για το τυλίγμα της χαμηλής τάσης ενώ οι ενδείξεις των βολτομέτρων καταγράφονται συγχρόνως [4.3]. Για την καταγραφή των ενδείξεων ενδεχομένως να απαιτηθούν και μετασχηματιστές μέτρησης και συγκεκριμένα τάσης [4.4]. Μετά την πρώτη ομάδα καταγραφής των ενδείξεων, μία δεύτερη λαμβάνει μέρος αφού πρώτα όμως γίνει ανταλλαγή των δύο οργάνων μεταξύ τους. Έτσι, λαμβάνεται υπόψη ο μέσος όρος των δύο ομάδων μετρήσεων για την αντιστάθμιση των σφαλμάτων μέτρησης.

Θα πραγματοποιούνται δοκιμές σε τουλάχιστον τέσσερις τάσεις σε στάδια του 10% και η μέση τιμή αυτών θα θεωρείται η πραγματική μετρούμενη τιμή. Αυτές οι πολλαπλές τιμές δεν πρέπει να έχουν απόκλιση παραπάνω από 1% ενώ σε αντίθετη περίπτωση, οι δοκιμές πρέπει να επαναλαμβάνονται με διαφορετικά βολτόμετρα.

Σύμφωνα όμως με [4.8], η διαδικασία των άμεσων μετρήσεων της τάσης εξόδου ίσως φαίνεται απλή λύση αλλά δεν είναι πρακτική. Μετρήσεις τάσεις σε M/Σ εν λειτουργία είναι δύσκολες, ενδεχομένως επικίνδυνες και δεν μπορούν να εκτελεστούν με την απαιτούμενη ακρίβεια και ευαισθησία προκειμένου να υπολογιστεί ο λόγος μετασχηματισμού. Επιπρόσθετα, μπορούν να εμφανιστούν σφάλματα που οφείλονται στη διαταραχή από τη πηγή της τάσης και όχι από τη φθορά των σπειρών. Οι μετρήσεις τάσης είναι το κλειδί τον υπολογισμό του λόγου μετασχηματισμού αλλά πρέπει να εκτελείται από όργανο μέτρησης σχεδιασμένο με κάποια αναγκαία χαρακτηριστικά απόδοσης και ευαισθησίας.

β) Μέθοδος μετρητή λόγου

Για να υπάρχει η απαιτούμενη ακρίβεια είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται όργανο μέτρησης λόγου αντί των παραπάνω μεθόδων στις οποίες ο M/Σ ηλεκτρίζεται από παροχή χαμηλής τάσης και μετρώνται η υψηλή και χαμηλή τάση.

Ο μετρητής λόγου χρησιμοποιεί, για την λειτουργία του, κύκλωμα γέφυρας όπου οι τάσεις των τυλιγμάτων του υπό δοκιμή M/Σ ισορροπούν έναντι των τάσεων που αναπτύσσονται κατά μήκος των σταθερών και μεταβλητών αντιστάσεων του μετρητή λόγου. Έτσι, μέσω της ρύθμισης των διακριβωμένων μεταβλητών αντιστάσεων του μετρητή επέρχεται η μηδενική απόκλιση του γαλβανόμετρου και υπολογίζεται ο λόγος μετασχηματισμού του λόγου μέσω των αντιστάσεων του μετρητή. Με τη μέθοδο αυτή επιβεβαιώνεται η πολικότητα των τυλιγμάτων αφού αν οι συνδέσεις των τυλιγμάτων ήταν αντίστροφα τοποθετημένες δεν θα ήταν δυνατή η επίτευξη της μηδενικής ένδειξης [4.1].

Μία σημαντική αιτία δημιουργίας σφάλματος μέτρησης είναι η πτώση τάσης του πρωτεύοντος τυλίγματος εξαιτίας του ρεύματος μαγνήτισης. Το σφάλμα αυτό μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την διέγερση κατά ένα μέρος της ονομαστικής τάσης. Έτσι, ο μετρητής πρέπει να είναι ικανός να μετράει το “χωρίς φορτίο” λόγο τάσεων με πολύ μικρή τάση διέγερσης. Οι μετρητές συνήθως λειτουργούν περίπου στα 8V, και έχουν πολλαπλές τάσεις δοκιμών μέχρι και κλασμάτων του volt. Ένα περίπλοκος μετρητής περιορίζει το ρεύμα διέγερσης σε πιο κατάλληλο επίπεδο και κατόπιν καθορίζει αυτόματα τις τάσεις δοκιμών στις χαμηλότερες τιμές ώστε να αποτραπεί η υπέρβαση του ορίου. Για μεγαλύτερες απαιτήσεις όπως στους τριφασικούς Μ/Σ οι διαθέσιμες τάσεις δοκιμών είναι έως 100 V.

Πιο ακριβείς μετρήσεις είναι δυνατόν να επιτευχθούν με την εφαρμογή διαφόρων τεχνικών σχεδίασης, που περιλαμβάνουν την εφαρμογή της τάσης διέγερσης στην χαμηλή τάση αλλά και τη χρήση Μ/Σ αναφοράς ο οποίος διαθέτει πυρήνα υψηλής διαπερατότητας και τύλιγμα χαμηλής αντίστασης. Με την διέγερση του τυλίγματος χαμηλής τάσης, η ισχύς διέγερσης, οι απώλειες και η πτώση τάσης στα τυλίγματα έχουν χαμηλές τιμές και συνεπώς διευκολύνεται η υψηλή ακρίβεια της μέτρησης.

Αν η διέγερση λάμβανε μέρος από το τύλιγμα της υψηλής τάσης, η προκύπτουσα τάση ίσως να ήταν πολύ χαμηλή ώστε να μετρηθεί με ακρίβεια. Σε αυτή τη περίπτωση θα απαιτούνταν ένας ενισχυτής για τη κάλυψη όλης της κλίμακας. Η αντίθετη διαμόρφωση, με την διέγερση από τη πλευρά του τυλίγματος της χαμηλής τάσης, επιτρέπει τον μετρητή να είναι μικρότερος, ελαφρύτερος και πιο εύκολος στη χρήση του. Λόγοι μετασχηματισμού από 0,001 έως 130 είναι χαρακτηριστικοί αλλά μεγαλύτεροι λόγοι μεγάλων Μ/Σ δεν μπορούν να μετρηθούν με αυτή τη βασική τεχνική. Εμφανίστηκαν και άλλες τεχνικές που περιελάμβαναν τη χρήση τάσης γραμμής και συστοιχιών πυκνωτών αλλά αυτές οι μέθοδοι ενδεχόμενα ήταν επικίνδυνες και καταστροφικές. Επίσης, σύμφωνα με άλλη μέθοδο, οι Μ/Σ υψηλής τάσης θα μπορούσαν να υποβιβαστούν μέσω της τοποθέτησής τους σε σειρά αλλά θα υπήρχε το μειονέκτημα της απώλειας της ακρίβειας. Όμως η εμφάνιση της τεχνολογίας των μικροεπεξεργαστών και της αυξημένης ευαισθησίας αυτών επέτρεψε την άμεση μέτρηση του λόγου με τιμές έως 45.000 ενώ υπήρχε και η απαιτούμενη ακρίβεια στις άκρες τις κλίμακας. Με αυτό το βαθμό της ευαισθησίας, χαμηλές τάσεις δοκιμής μπορούν να εφαρμοστούν στο τύλιγμα της υψηλής ενώ και οι αντίστοιχες τάσεις της χαμηλής μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια. Αυτή η αντιστροφή εξαλείφει το πρόβλημα των επικίνδυνων τάσεων που παραγόntonταν με την προηγούμενη διαμόρφωση [4.8].

4.3.1.2 Μέτρηση λόγου μετασχηματισμού για τριφασικούς Μ/Σ

Σαν κανόνας, ο λόγος μετασχηματισμού των τριφασικών Μ/Σ μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας μονοφασική παροχή εφόσον λαμβάνεται υπόψη η κατανομή της μαγνητικής ροής στον πυρήνα. Μόνο πηνία, μέρη πηνίων και συνδυασμός πηνίων που έχουν την ίδια εφαρμοζόμενη μαγνητική ροή μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Το κύκλωμα μέτρησης απορρέει από το διανυσματικό διάγραμμα της ομάδας συνδεσμολογίας του υπό δοκιμή Μ/Σ. Οι δύο τάσεις που συγκρίνονται μεταξύ τους πρέπει να είναι σε φάση και να έχουν την ίδια κατεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη σύνδεση των ακροδεκτών της υψηλής και χαμηλής τάσης.

Το παράδειγμα του σχήματος (4.5) δείχνει ότι οι συγκρινόμενες τάσεις δεν είναι πάντα φασικές. Γι' αυτό το λόγο, η γέφυρα μέτρησης πρέπει να ρυθμιστεί έτσι, ώστε να αντιπροσωπεύει την ονομαζόμενη μετρηθείσα-δηλωθείσα τιμή [4.4].

$$r_{mdecl} = k \cdot r_{decl} \quad (4.6)$$

όπου

r_{mdecl} είναι η δηλωθείσα τιμή του λόγου μετασχηματισμού για το αντίστοιχο κύκλωμα μέτρησης

και
$$r_{decl} = \frac{U_{pN}}{U_{sN}}$$

με U_{pN} και U_{sN} οι τάσεις του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος

Οι ακόλουθες τάσεις συγκρίνονται, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 4.5:

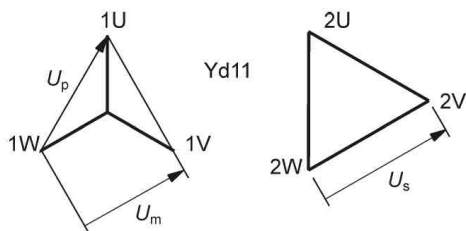
$$\frac{1U-1V1W}{2U-2W}, \frac{1V-1W1U}{2V-2U}, \frac{1W-1U1V}{2W-2V}$$

(με 1V1W, 1W1U, 1U1V το καθένα γαλβανικά συνδεδεμένο)

Στη περίπτωση του σχήματος (4.5) ισχύει:

$$k = \frac{1,5}{\sqrt{3}}$$

$$r_{mdecl} = \frac{1,5}{\sqrt{3}} \cdot r_{decl}$$



Σχήμα 4.5 – Σύγκριση τάσεων U_m και U_s (ίδιας φάσης), $U_m = 1,5 \cdot U_p / \sqrt{3}$ [3.4]

4.3.1.3 Μέτρηση αβεβαιότητας

Ο μετρητής λόγου με γέφυρα είναι αρκετά κατάλληλος για να επαληθεύσει ότι ο μετρούμενος λόγος είναι εντός των ανοχών που καθορίζουν τα πρότυπα. Είναι εύκολος στη χρήση του μιας και συνήθως απαιτεί μόνο οικιακή AC τροφοδοσία. Είναι όμως φανερό ότι παρ' όλη την προστασία του εξωτερικά πεδία μπορούν να διαστρεβλώσουν τα αποτελέσματα της μέτρησης. Έτσι, πρέπει να δοθεί φροντίδα ώστε να μην υπάρχουν πλησίον της γέφυρας αγωγοί υψηλής τάσης ή υψηλού ρεύματος. Η μετρούμενη αβεβαιότητα του μετρητή είναι περίπου στο $\pm 0,1\%$. Η αβεβαιότητα αυτή αυξάνεται ελάχιστα, ακόμη και αν χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικοί μετασχηματιστές τάσεων.

Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος του βολτομέτρου για τον καθορισμό του λόγου, δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί μετρούμενη αβεβαιότητα μικρότερη από $\pm 0,5\%$ χωρίς σημαντική επιπρόσθετη προσπάθεια και συνεπώς δεν είναι κατάλληλη για M/Σ οι οποίοι πρέπει να ικανοποιούν κάποια πρότυπα. Η μέθοδος του βολτομέτρου χρησιμοποιείται μόνο όταν δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η γέφυρα ή όταν δεν είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται οι ανοχές όπως αυτές καθορίζονται από τα πρότυπα [4.4].

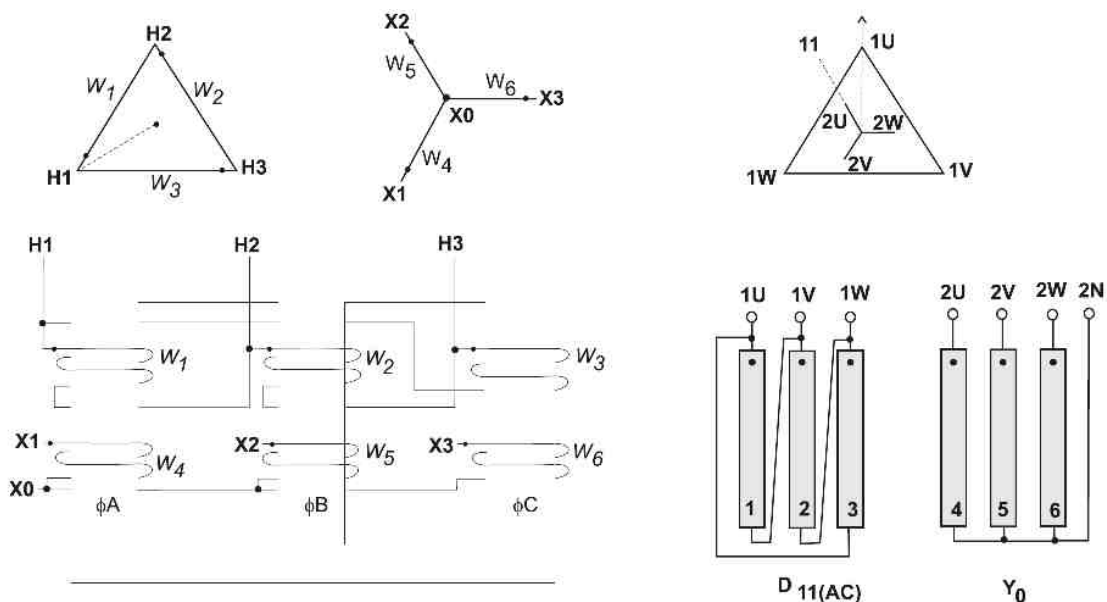
4.3.2 Έλεγχος ομάδας ζεύξης

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.3.8, ανάλογα με την συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του M/Σ, αυτός μπορεί να είναι συνδεδεμένος κατά αστέρα (Y), κατά τρίγωνο(D) και κατά τεθλασμένο αστέρα (Z). Οι ομάδες αυτές μπορούν να σχηματίσουν πολλαπλές συνδέσεις. Έτσι, ο αστέρας και το τρίγωνο έχουν από έξι παραλλαγές η καθεμιά της ανάλογα με τον τρόπο που συνδέονται τα τρία πηνία μεταξύ τους και με τους μονωτήρες διέλευσης ενώ ο τεθλασμένος αστέρας έχει 24 διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης των έξι υποπηνίων μεταξύ τους και των μονωτήρων διέλευσης του M/Σ. Οι αριθμοί αυτοί των διαφορετικών συνδέσεων πηνίων και μονωτήρων διέλευσης, και των αντίστοιχων διαγραμμάτων, ισχύουν στην εναλλαγή της θετικής ακολουθίας. Στην πραγματικότητα

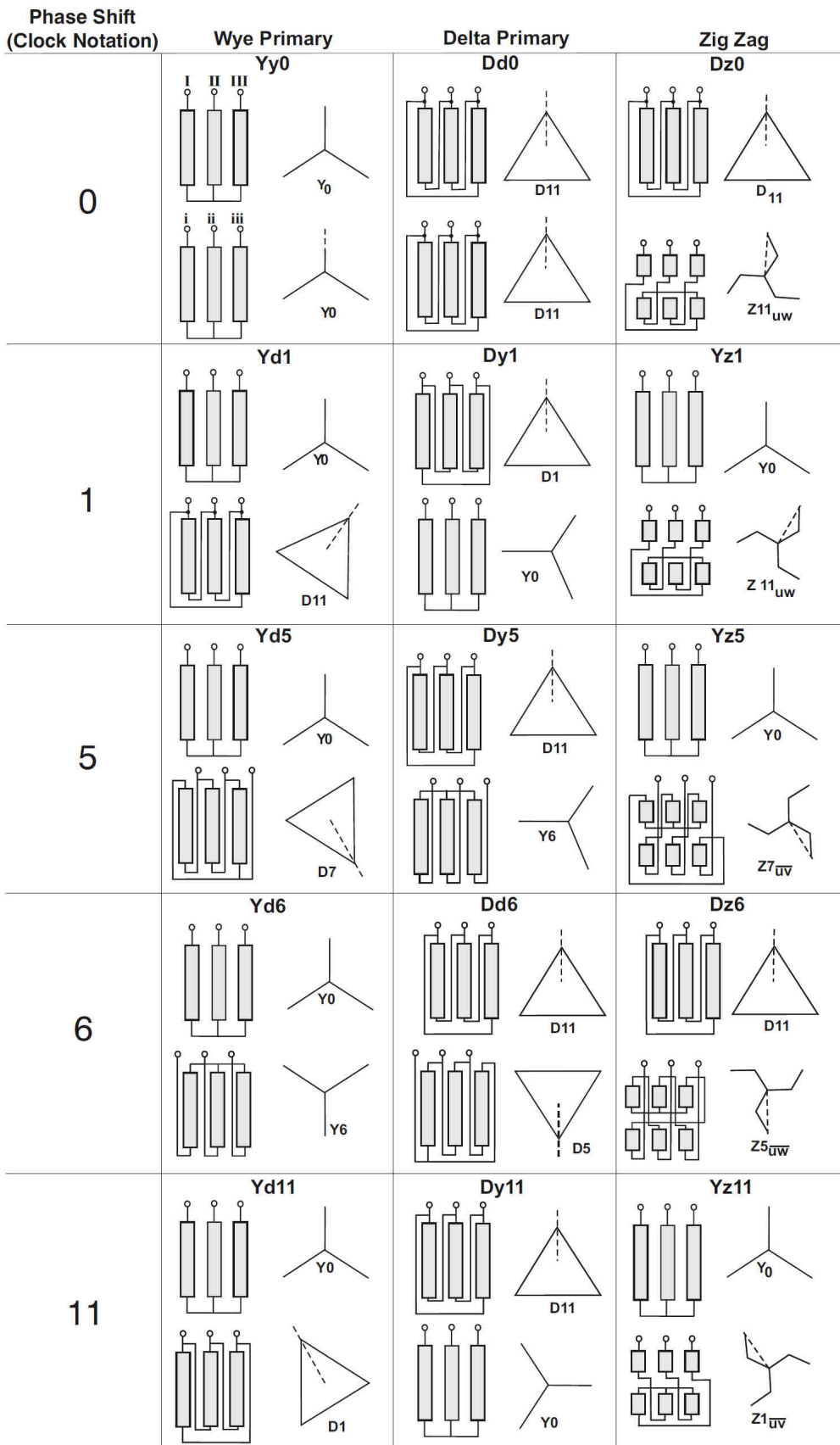
υπάρχουν περισσότερες διαθέσιμες συνδέσεις που θα μπορούσαν να προκύψουν αν αντιμεταθέταμε τις δύο φάσεις από τη μία μόνο πλευρά του Μ/Σ, αφήνοντας την τρίτη φάση στη θέση της με αποτέλεσμα τη μετατροπή της θετικής ακολουθίας τάση από την μία πλευρά του Μ/Σ σε αρνητικής ακολουθίας τάση στην άλλη πλευρά του Μ/Σ [4.9].

Οι ομάδες συνδεσμολογίας και οι συμβολισμοί τους ορίζονται για τριφασικούς Μ/Σ στους οποίους μεταξύ των τυλιγμάτων της υψηλής και της χαμηλής τάσης υπάρχει γωνία φάσης που ποικίλει από 0 έως 360 μοίρες. Το διανυσματικό διάγραμμα του τυλίγματος υψηλής τάσεως σχεδιάζεται επί ενός χαρτιού με αρίθμηση ρολογιού, έτσι ώστε η κορυφή του διανύσματος 1U (ακροδέκτης τυλίγματος της 1^{ης} φάσης της υψηλής τάσης) να πέσει επί του αριθμού 12. Το διανυσματικό διάγραμμα του τυλίγματος χαμηλής τάσεως τοποθετείται τώρα μετατοπισμένο φασικά, έτσι ώστε να προκύπτει από την διεύθυνση του διανύσματος 2U ο αριθμός της ομάδας συνδεσμολογίας (σχήμα 4.6 για συνδεσμολογία Dy11). Σε περίπτωση συνδεσμολογίας τεθλασμένου αστέρα, για τον συμβολισμό των ακροδεκτών, καθορίζεται πάντοτε το επόμενο τους μισό τύλιγμα.

Όμως, ένα μικρό ποσοστό όλων των δυνατών συνδυασμών των τυλιγμάτων συναντάται συνήθως στη πράξη και πολλοί από αυτούς είναι πλεονάζοντες όψεις του ίδιου συνδυασμού. Οι συνήθειες συνδεσμολογίες, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076-1, απεικονίζονται στο σχήμα 4.7.



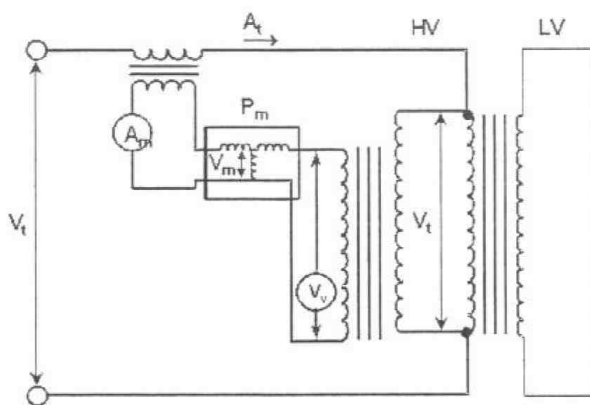
Σχήμα 4.6 – Συνδεσμολογία Dy11 [4.9]



Σχήμα 4.7 - Συνήθειες συνδεσμολογίες, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076-1 [4.9]

τάση βραχυκύκλωσης) στο τύλιγμα της υψηλής τάσης με αποτέλεσμα τη ροή ονομαστικού ρεύματος και στα δύο τυλίγματα. Τότε, πραγματοποιείται η μέτρηση της τάσης εισόδου, του ρεύματος και της ισχύς. Στο σχήμα 4.9 απεικονίζεται το σύνηθες κύκλωμα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση των απωλειών φορτίου ενός μονοφασικού Μ/Σ. Η μέτρηση των απωλειών σε τριφασικούς Μ/Σ πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο αλλά όμως με τη χρήση τριών ομάδων οργάνων και Μ/Σ μέτρησης [4.10].

Και ενώ σύμφωνα με τα πρότυπα IEC και IEEE υπάρχει μόνο ανώτατο όριο (και όχι κατώτατο όριο) αποδεκτών τιμών απωλειών φορτίου για κάθε είδος Μ/Σ, στη πραγματικότητα οι μετρούμενες τιμές δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Έτσι, σύμφωνα με [4.11], η μεταβλητότητα της τιμής των απωλειών φορτίου συγκεκριμένου είδους Μ/Σ ισχύος πρέπει να είναι πολύ χαμηλή και κυρίως αυτή προκαλείται από τις ανοχές στη μετρητική διαδικασία των Μ/Σ.



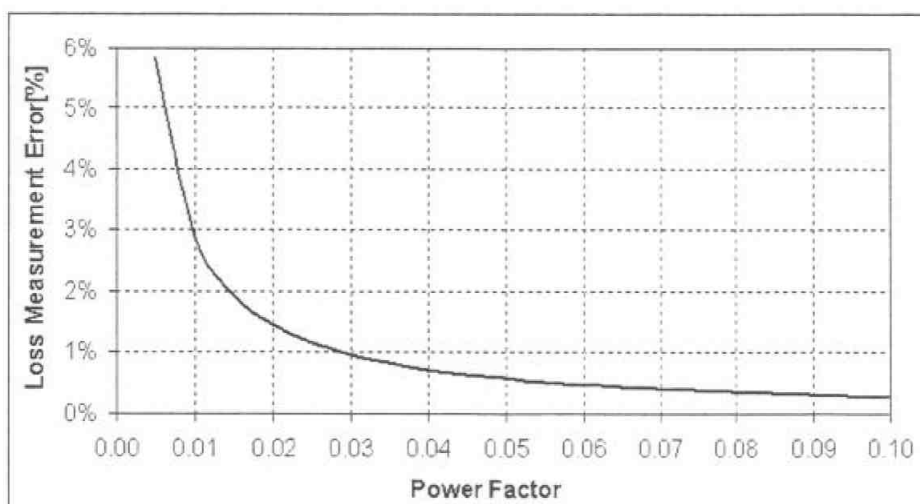
Σχήμα 4.9 – Κύκλωμα μέτρησης απωλειών φορτίου μονοφασικού Μ/Σ [4.10].

4.4.2 Αβεβαιότητα μέτρησης απωλειών φορτίου

Οι απώλειες φορτίου για τους σύγχρονους Μ/Σ ισχύος είναι αρκετά χαμηλές εξαιτίας των αυξημένων απαιτήσεων για βελτιωμένη αποδοτικότητα αυτών. Στους Μ/Σ ισχύος, ο συντελεστής ισχύος του Μ/Σ στη δοκιμή μέτρησης των απωλειών φορτίου έχει γενικά χαμηλή τιμή, η οποία ποικίλει από 5% έως 1% ή και ακόμα μικρότερη στους μεγάλους Μ/Σ ισχύος. Μικρή τιμή του συντελεστή ισχύος σημαίνει ότι η γωνία ϕ μεταξύ της τάσης και του ρεύματος πλησιάζει τις 90 μοίρες. Εδώ έγκειται το σημαντικότερο θέμα όσον αφορά την ακρίβεια των μετρήσεων των απωλειών φορτίου αφού οι απώλειες αυτές σε χαμηλές τιμές του συντελεστή ισχύος είναι πολύ ευαίσθητες στα σφάλματα.

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.10, σφάλμα της γωνίας φάσης κατά ένα λεπτό (δηλαδή για 1/6 της μοίρας) στη τάση ή στο ρεύμα θα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σφάλματος τιμής περίπου 3% στη μέτρηση των απωλειών φορτίου ενός Μ/Σ με συντελεστή ισχύος 0,01. Έτσι, η αβεβαιότητα της γωνίας φάσης είναι μία από τις πολλές αβεβαιότητες που σχετίζονται με την μέτρηση των απωλειών φορτίου σε χαμηλές τιμές του συντελεστή ισχύος.

Επίσης, στα σφάλματα των μετρούμενων απωλειών συνεισφέρουν και τα σφάλματα του λόγου μετασχηματισμού των Μ/Σ μέτρησης αλλά και τα σφάλματα πλάτους των ενδείξεων των βαττομέτρων.



Σχήμα 4.10 – Σφάλμα % σε μετρούμενες απώλειες ανά λεπτό σφάλματος γωνίας φάσης[4.10]

4.4.3 Διορθώσεις στις μετρούμενες απώλειες φορτίου

Όταν πραγματοποιείται η μέτρηση των απωλειών φορτίου, η επιθυμητή ποσότητα των πραγματικών απωλειών δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_t = V_t A_t \cos(\varphi_t) \quad (4.7)$$

όπου

P_t είναι οι πραγματικές απώλειες του υπό δοκιμή Μ/Σ (W)

V_t είναι η τάση βραχυκύκλωσης του υπό δοκιμή Μ/Σ (V)

A_t είναι το ρεύμα του υπό δοκιμή Μ/Σ (A)

φ_t είναι η γωνία φάσης της σύνθετης αντίστασης υπό δοκιμή Μ/Σ ($^{\circ}$)

Για Μ/Σ ισχύος, οι Μ/Σ μέτρησης και το βαττόμετρο υποδεικνύουν τις μετρούμενες απώλειες σύμφωνα με τον τύπο:

$$P_m = V_m A_m \cos(\varphi_m) \quad (4.8)$$

όπου

P_m είναι η ένδειξη του βαττομέτρου (W)

V_m είναι η ένδειξη του βολτομέτρου κατά μήκος του πηνίου τάσης του βαττομέτρου (V)

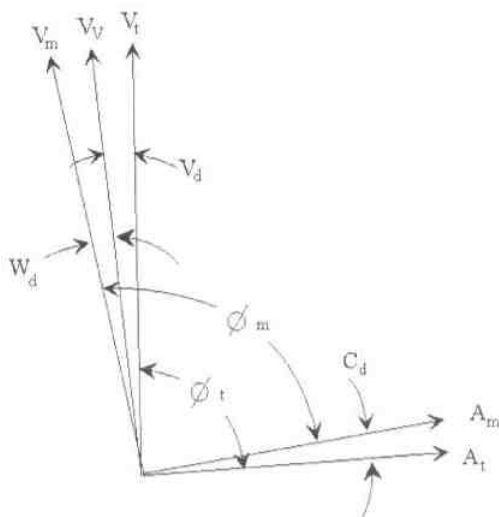
A_m είναι η ένδειξη του αμπερομέτρου στο πηνίο έντασης του βαττομέτρου (A)

φ_m είναι η γωνία φάσης της σύνθετης αντίστασης υπό δοκιμή M/Σ (°)

Συνεπώς, οι μετρούμενες απώλειες πρέπει να διορθωθούν ώστε να ληφθούν οι πραγματικές απώλειες P_t .

4.4.3.1 Διόρθωση γωνίας φάσης συμβατικού συστήματος μέτρησης απωλειών φορτίου

Τα συμβατικά μετρητικά συστήματα αποτελούνται από μαγνητικού τύπου μετασχηματιστές τάσης και έντασης που γενικά έχουν σφάλματα γωνίας φάσης V_d και C_d αντίστοιχα. Επίσης, το βαττόμετρο έχει σφάλμα γωνία φάσης W_d . Το σφάλμα της γωνίας φάσης ενός M/Σ μέτρησης είναι θετικό όταν το σήμα εξόδου προπορεύεται του σήματος εισόδου. Για τα βαττόμετρα, αυτό το σφάλμα είναι θετικό όταν η ένδειξη του βατομέτρου, υπό συνθήκες προπορευόμενου συντελεστή ισχύος του φορτίου, είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική. Στο σχήμα 4.11 απεικονίζει τη σχέση μεταξύ των διανυσμάτων των τάσεων και ρευμάτων με τις αντίστοιχες τους μεταβολές φάσεων.



Σχήμα 4.11 – Διανυσματικό διάγραμμα ενός M/Σ ισχύος σε συνθήκες μέτρησης απωλειών φορτίου (V_v είναι η τάση κατά μήκος του βολτομέτρου) [4.10].

Αν η πραγματική γωνία φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος ενός Μ/Σ υπό δοκιμή είναι φ_t , η μετρούμενη γωνία φάσης στο βαττόμετρο θα είναι :

$$\varphi_t = \varphi_m + (-W_d - V_d + C_d) \quad (4.9)$$

όπου

W_d είναι το σφάλμα της γωνίας φάσης του βαττομέτρου ($^\circ$)

V_d είναι το σφάλμα της γωνίας φάσης του Μ/Σ τάσης ($^\circ$)

C_d είναι το σφάλμα της γωνίας φάσης του Μ/Σ ρεύματος ($^\circ$)

$(-W_d - V_d + C_d)$ είναι το συνολικό σφάλμα της γωνίας φάσης ($^\circ$)

Θεωρώντας ότι n_v και n_c είναι οι λόγοι μετασχηματισμού των Μ/Σ τάσης και έντασης αντίστοιχα και ότι K είναι ο συντελεστής επέκτασης περιοχής μέτρησης, τότε για την περίπτωση απουσίας σφαλμάτων πλάτους ισχύει:

$$P_t = K n_t n_c V_m A_m \cos(\varphi_m - W_d - V_d + C_d) =$$

$$= K n_t n_c V_m A_m [\cos(\varphi_m) \cos(-W_d - V_d + C_d) - \sin(\varphi_m) \sin(-W_d - V_d + C_d)]$$

Επειδή $\varphi_m \approx 90^\circ$ ισχύει $\sin(\varphi_m) \approx 1,0$

και επειδή η γωνία $(-W_d - V_d + C_d)$ είναι πολύ μικρή

τότε $\sin(-W_d - V_d + C_d) \approx (-W_d - V_d + C_d)$

και $\cos(-W_d - V_d + C_d) \approx 1,0$

Άρα, οι πραγματικές απώλειες φορτίου είναι :

$$P_t = K n_t n_c V_m A_m [\cos(\varphi_m) - (-W_d - V_d + C_d)] = K n_t n_c [P_m - V_m A_m (-W_d - V_d + C_d)] \quad (4.10)$$

4.4.3.2 Διόρθωση πλάτους

Για καθοριστούν οι πραγματικές μετρούμενες απώλειες P_t , πρέπει, εκτός της διόρθωσης της γωνίας φάσης, να γίνει διόρθωση των σφαλμάτων πλάτους των Μ/Σ μέτρησης. Αυτή η διόρθωση του πλάτους πρέπει να γίνεται σε μετρήσεις και χαμηλών και υψηλών τιμών του συντελεστή ισχύος. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη το σφάλμα του αμπερομέτρου που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ρεύματος δοκιμής αφού οι απώλειες φορτίου του υπό δοκιμή Μ/Σ μεταβάλλονται με το τετράγωνο του ρεύματος. Και αυτού του είδους το σφάλμα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα στις μετρούμενες απώλειες.

4.4.3.3 Διόρθωση των απωλειών λόγω του συνδέσμου βραχυκύκλωσης

Το ρεύμα που διαρρέει τον σύνδεσμο που χρησιμοποιείται για το βραχυκύκλωμα των ακροδεκτών της χαμηλής τάσης είναι ένας ακόμη παράγοντας ο επηρεάζει τη τιμή των μετρούμενων απωλειών φορτίου αν και η διόρθωση αυτής της τιμής συνήθως δεν έχει μεγάλη σημασία. Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι οι απώλειες του βραχυκυκλωμένου συνδέσμου είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τους Μ/Σ που έχουν χαμηλής τάσης και υψηλού ρεύματος δευτερεύον τύλιγμα.

Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί μέθοδοι για τον συνυπολογισμό των συγκεκριμένων απωλειών, με τις μεθόδους αυτές να έχουν διάφορους βαθμούς ακρίβειας. Οι μέθοδοι αυτές είναι [4.10]:

- Μέθοδος κατά προσέγγιση
- Μέθοδος βαττομέτρου με τσιμπίδα
- Μέθοδος βαττομέτρου
- Αυτόματη διόρθωση

Σύμφωνα με [4.4], αν η αντίσταση του συνδέσμου βραχυκύκλωσης είναι μεγάλη συγκριτικά με την αντίσταση του τυλίγματος, οι μετρούμενες απώλειες φορτίου μπορούν να διορθωθούν σύμφωνα με τον ακόλουθο προσεγγιστικό τύπο:

$$\begin{array}{l} \text{▪ Για χαλκό:} \quad P = 1,96 \left(\frac{235 + \Theta}{255} \right) \cdot J^2 \cdot m \quad (4.11) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{▪ Για αλουμίνιο:} \quad P = 11,22 \left(\frac{225 + \Theta}{245} \right) \cdot J^2 \cdot m \end{array}$$

Για την αποφυγή των υψηλών απωλειών με τη μορφή θερμότητας και συνεπώς τη παρουσία υψηλών θερμοκρασιών πρέπει ο σύνδεσμος αυτός να είναι κατάλληλου σχεδιασμού ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία του. Έτσι, ο σύνδεσμος πρέπει να ικανοποιεί κάποιους παράγοντες [4.12]:

- Υλικό ηλεκτρικού συνδέσμου.
Πρέπει να είναι από χαλκό και αλουμίνιο. Η καλύτερη πρακτική είναι ο σύνδεσμος να είναι του ίδιου υλικού με τους αγωγούς με τους οποίους θα συνδεθεί ώστε να εξαλειφθεί η γαλβανική διάβρωση.
- Περιοχή επαφής

Για την καλή απόδοση του συνδέσμου, είναι σημαντικό να εξασφαλίσουμε ότι η περιοχή επαφής είναι αρκετά μεγάλη αφού το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μόνο μέσω των σημείων επαφής τα οποία δημιουργούνται κατά την διάρκεια της σύνδεσης.

- Τύπος σύνδεσης

Χρησιμοποιούνται σύνδεσμοι βιδωμένοι με μπουλόνια εξαιτίας της πολλαπλότητας των εφαρμογών τους, της αξιοπιστίας τους, του χαμηλού κόστους και της ευκολίας στην συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση. Σύνδεσμοι βιδωμένοι με μπουλόνια πρέπει να βιδώνονται με ένα ροπόκλειδο για να επιτευχθεί κατάλληλη ροπή. Ακατάλληλες ροπές θα έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής επαφής.

4.4.4 Ειδικά μέτρα

4.4.4.1 Μέτρηση σε χαμηλότερη τιμή ρεύματος από το ονομαστικό

Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE [4.10], οι απώλειες φορτίου μπορούν να μετρηθούν με ρεύμα ίσο με το ονομαστικό της αντίστοιχης θέσης λήψης. Αν όμως το ρεύμα δεν είναι ίσο με το ονομαστικό ρεύμα, τότε η μετρούμενη τιμή των απωλειών φορτίου πρέπει να διορθωθεί κατά το τετράγωνο του λόγου του ονομαστικού ρεύματος προς το ρεύμα δοκιμής (το οποίο ρεύμα δοκιμής είναι ο μέσος όρος του φασικού ρεύματος του τριφασικού Μ/Σ).

Έτσι, σύμφωνα με [4.4], ισχύει:

$$P_L = P_{Lm} \cdot \left(\frac{I_r}{I_m} \right)^2 \quad (4.12)$$

όπου

P_L οι μετρούμενες απώλειες στο ονομαστικό ρεύμα

P_{Lm} οι μετρούμενες απώλειες στο ρεύμα δοκιμής

I_m το ρεύμα δοκιμής

4.4.4.2 Διάρκεια δοκιμής

Κατά την διάρκεια της μέτρησης των απωλειών, το ρεύμα στο τύλιγμα αυξάνει την θερμοκρασία στο ίδιο το τύλιγμα και επομένως αυξάνονται οι απώλειες I^2R . Για την ελαχιστοποίηση του φαινομένου αυτού, ο χρόνος δοκιμής πρέπει να είναι το δυνατόν ο συντομότερος [4.10].

4.4.4.3 Βελτιστοποίηση της κλίμακας των μετρητικών οργάνων

Για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων, τα μετρητικά όργανα πρέπει να χρησιμοποιούνται στο βέλτιστο εύρος της κλίμακας τους. Έτσι, οι διορθώσεις της γωνίας φάσης των Μ/Σ μέτρησης, που έχουν πυρήνα με μαγνητικό υλικό, είναι σημαντικά μεγαλύτερες όταν αυτοί λειτουργούν σε τάσεις/ρεύματα που είναι μικρότερα από το 70% του αντίστοιχου ονομαστικού μεγέθους. Επίσης, αυτές οι διορθώσεις μπορούν να μεταβάλλονται σημαντικά με τον λόγο του Μ/Σ μέτρησης [4.10].

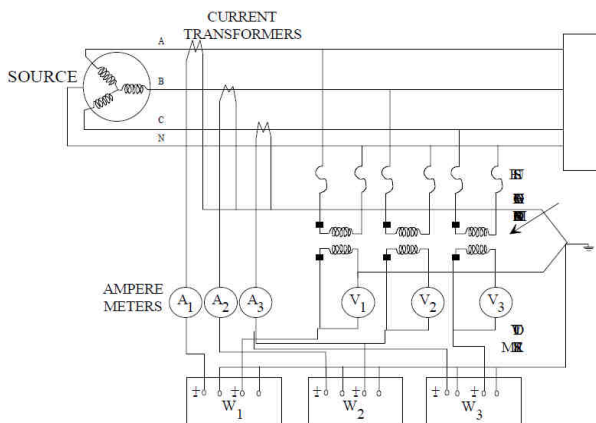
4.4.5 Κύκλωμα μέτρησης τριφασικών Μ/Σ

Η μέτρηση των απωλειών των τριφασικών Μ/Σ μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες μεθόδους όπως οι ακόλουθες [4.10]:

- Μέθοδος τριών βαττομέτρων
- Μέθοδος δύο βαττομέτρων
- Μέθοδος γέφυρας

4.4.5.1 Μέθοδος τριών βαττομέτρων

Η μέθοδος αυτή είναι αυτή που προτιμάται για την ακριβή μέτρηση των απωλειών φορτίου, οπότε χρησιμοποιείται ευρέως στις δοκιμές σειράς των Μ/Σ ισχύος. Οι συνολικές απώλειες είναι το αλγεβρικό άθροισμα των τριών μονοφασικών ενδείξεων των βαττομέτρων. Οπότε, όσα αναφέρθηκαν παραπάνω σχετικά με τα σφάλματα ισχύουν και εδώ. Όταν πραγματοποιούνται διορθώσεις αυτών των σφαλμάτων, αυτές οι διορθώσεις πρέπει να εφαρμόζονται σε καθεμιά ξεχωριστή ένδειξη βαττομέτρου και όχι στο άθροισμα των τριών βαττομέτρων. Αυτό συμβαίνει γιατί πολύ συχνά τα βαττόμετρα έχουν διαφορετικές ενδείξεις και συνεπώς πολύ διαφορετικούς συντελεστές ισχύος [4.10].



Σχήμα 4.12 – Κύκλωμα μέτρησης απωλειών φορτίου με τη χρήση τριών βαττομέτρων και Μ/Σ μέτρησης [4.13]

4.4.5.2 Μέθοδος δύο βαττομέτρων

Αν και η μέθοδος αυτή θεωρείται κατάλληλη για την μέτρηση της ισχύς σε συμμετρικά τριφασικά κυκλώματα εξαιτίας της απλότητάς της και της ευκολίας της, αυτής δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε μετρήσεις όπου εμπλέκονται χαμηλοί συντελεστές ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί σε αυτή τη περίπτωση οι ενδείξεις των δύο βαττομέτρων είναι πολύ κοντά ως προς το πλάτος και έχουν αντίθετα πρόσημα. Έτσι, ακόμη και μικρά σφάλματα στο καθένα από τους μετρητές έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλου μετρητικού σφάλματος.

4.4.6 Προηγμένα μετρητικά συστήματα

Τα συστήματα αυτά παρέχουν σημαντικά βελτιωμένη ακρίβεια για τις μετρήσεις απωλειών χαμηλού συντελεστή ισχύος.

4.4.6.1 Ενισχυμένο συμβατικό σύστημα

Τα συμβατικά συστήματα μέτρησης, τα οποία αποτελούνται από Μ/Σ τάσης και έντασης συνδυασμένα με ηλεκτρομηχανικά αναλογικά όργανα, μπορούν να τροποποιηθούν ώστε να βελτιωθεί σημαντικά η ακρίβεια. Η χρήση υψηλής ακρίβειας ηλεκτρονικών βαττομέτρων καθώς και των Μ/Σ τάσης και έντασης, τα οποία δίνουν ακριβείς τιμές των σφαλμάτων της γωνίας φάσης, γενικά παρέχει την απαιτούμενη ακρίβεια για χαμηλές τιμές του συντελεστή ισχύος έως 0,02. Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια για την μέτρηση απωλειών ενός Μ/Σ με συντελεστή ισχύος μικρότερο από 0,02 πρέπει να χρησιμοποιηθούν Μ/Σ μέτρησης με πολύ μικρά σφάλματα γωνία φάσης.

4.4.6.2 Προηγμένοι μετατροπείς τάσης και ρεύματος

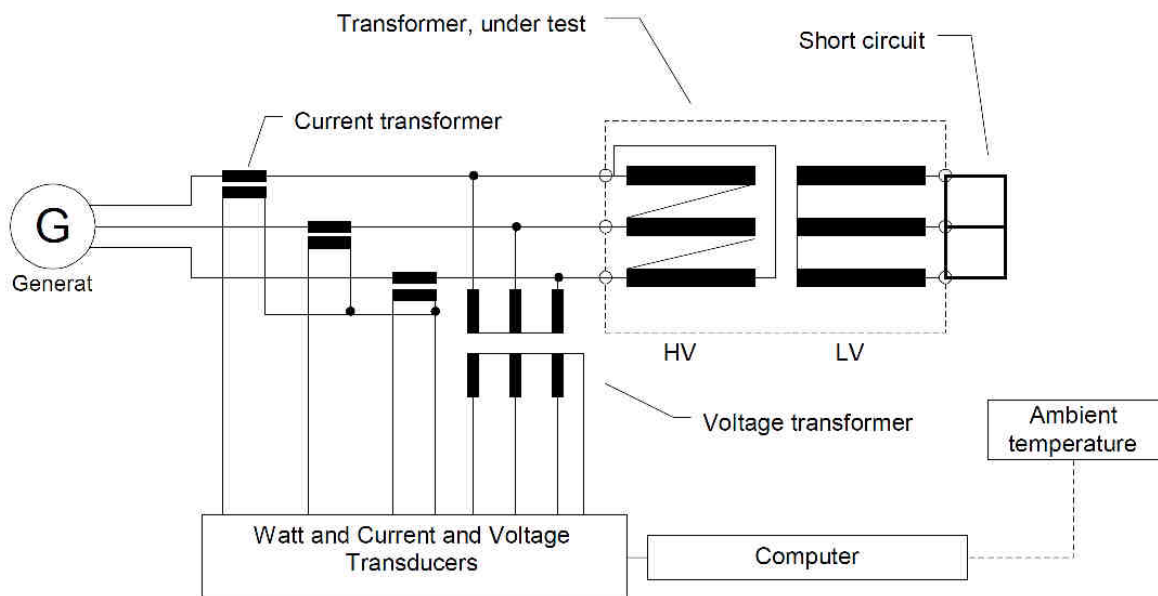
Προηγμένα συστήματα μέτρησης απωλειών χρησιμοποιούν έναν αριθμό από αισθητήρες τάσης και έντασης που έχουν πολύ μικρό ή μηδενικό σφάλμα γωνίας φάσης.

Οι σύγχρονοι μετατροπείς τάσης χρησιμοποιούν τυποποιημένους πεπιεσμένους πυκνωτές αερίου οι οποίοι σε συνδυασμό με διάφορα ενεργά κυκλώματα ανάδρασης ελαχιστοποιούν τα σφάλματα πλάτους και γωνίας φάσης του μετρητικού συστήματος της τάσης.

Με τη σειρά τους, οι Μ/Σ ρεύματος λειτουργούν βάσει της αρχής της μείωσης της ροής στο πυρήνα κοντά στο μηδέν ή και ακόμα του μηδενισμού της.

Η χρήση των υψηλής ακρίβειας μετατροπέων συνδυασμένη με την ψηφιακή ανάγνωση των ενδείξεων βελτιώνουν την συνολική ακρίβεια του συστήματος εξαιτίας των ακόλουθων παραγόντων:

- Τα τυχαία σφάλματα εξαιτίας της περιορισμένης ανάλυσης των αναλογικών οργάνων εξαλείφονται με τη χρήση ψηφιακών οργάνων
- Τεχνολογίες όπως τεχνικές πολυπλεξίας διαίρεσης χρόνου μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια έναντι των συμβατικών ηλεκτροδυναμόμετρων όπως το βαττόμετρο. Η ακρίβεια, επίσης, βελτιώνεται εξαιτίας του μειωμένου φόρτου των Μ/Σ μέτρησης και της μείωσης των εσωτερικών μετατοπίσεων της φάσης.
- Συνετή χρήση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, υποβοηθούμενη από ενισχυτές, μπορεί να εξασφαλίσει την λειτουργία των μετατροπέων στο βέλτιστο λειτουργικό τους φάσμα. Με αυτό τον τρόπο, μειώνεται το σφάλμα που εξαρτάται από το πλάτος εισόδου ως ποσοστό της πλήρης κλίμακας.
- Τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της άθροισης και του μέσου όρου των τριφασικών μετρήσεων μπορούν να συμπεριληφθούν στο σχεδιασμό του συστήματος ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα υπολογισμού αλλά και τα σφάλματα λόγω λανθασμένων προσήμων.



Σχήμα 4.13 – Κύκλωμα μέτρησης απωλειών φορτίου με τη χρήση μετατροπέων τάσης και ρεύματος[4.14]

4.4.6.3 Μέθοδος γέφυρας

Μία άλλη μέθοδος για τον καθορισμό των απωλειών φορτίου χαμηλού συντελεστή ισχύος είναι ο συνδυασμός μετρήσεων με γέφυρα (μέτρησης λόγου μετασχηματισμού) και μετρήσεων τάσης-ρεύματος. Η γέφυρα, ειδικότερα, χρησιμοποιεί τον χωρίς απώλειες υψηλής τάσης πεπιεσμένο πυκνωτή ως πηγή αναφοράς για την παροχή ρεύματος αναφοράς. Αλλά για να επιτευχθεί η ισορροπία της γέφυρας απαιτείται η αντιστροφή της φάσης του επαγωγικού ρεύματος φορτίου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση Μ/Σ ρεύματος υψηλής ακρίβειας όπως ο Μ/Σ ρεύματος δύο σταδίων ο οποίος χρησιμεύει επίσης και για την επέκταση της κλίμακας.

Η ισορροπία της γέφυρας δεν είναι ευαίσθητη σε μικρές διακυμάνσεις της τάσης αλλά είναι όμως ευαίσθητη σε μεταβολές της συχνότητας και στις αρμονικές του ρεύματος. Αυτά τα προβλήματα πρέπει να αντιμετωπίζονται αν θέλουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι ακριβή. Έτσι, υπάρχει απαίτηση μικρής χρονικής περιόδου σχετικά σταθερής συχνότητας αλλά και ημιτονοειδής τάση δοκιμής χαμηλής παραμόρφωσης ώστε να επιτευχθεί κατάλληλη ισορροπία.

Για μετρήσεις τριφασικών απωλειών, με όλες τις φάσεις ενεργοποιημένες, κάθε φάση πρέπει να μετρηθεί ξεχωριστά. Έτσι, αν θέλουμε ταυτόχρονη μέτρηση και των τριών φάσεων, απαιτείται παρουσία τριών γεφυρών. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο μία γέφυρα και κάθε φάση να μετράται ξεχωριστά με σύντομες παύσεις για την μεταφορά του εξοπλισμού. Επίσης, συνήθως χρησιμοποιούνται τρεις Μ/Σ ρεύματος δύο σταδίων, ένας για κάθε φάση, αφού η εναλλαγή τους είναι δύσκολη. Όμως οι παύσεις μπορούν να εξαλειφθούν αν χρησιμοποιηθούν τρεις πυκνωτές αναφοράς αλλά και κατάλληλες ενεργοποιήσεις-απενεργοποιήσεις [4.10].

4.4.7 Ασυμμετρία απωλειών φορτίου

Όταν ένας τριφασικός Μ/Σ υπόκειται σε δοκιμή μέτρησης απωλειών φορτίου, διαπιστώνεται ότι οι απώλειες και τα ρεύματα των φάσεων είναι ασύμμετρα και άνισα. Αυτό το φαινόμενο της ασυμμετρίας, σύμφωνα με [4.15], αποδόθηκε αρχικά στη ασυμμετρία των παρεκκλινουσών απωλειών (οι οποίες έχουν αναλυθεί στη παράγραφο 1.3.6.3 σελ.30, και οι οποίες καθορίζονται ως τις απώλειες που οφείλονται στην “διασταύρωση” της μαγνητικής ροής, που ακολουθεί διαδρομή έξω από τον Μ/Σ, με κάποιο αγωγίμο υλικό), κάτι που δεν είναι απόλυτα σωστό. Ο κύριος παράγοντας που συνεισφέρει

στο φαινόμενο της ασυμμετρίας των μετρήσεων είναι η ασυμμετρία της ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης μεταξύ των φάσεων.

Επίσης, σύμφωνα με [4.16], παρατηρήθηκε ότι ασυμμετρία μετρήσεων μπορεί να προκληθεί και με μικρές μη-ισορροπημένες διαφορές φάσεων μεταξύ των τάσεων της τριφασικής πηγής που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια της δοκιμής.

Παρόλη όμως την ύπαρξη του φαινομένου της ασυμμετρίας, οι συνολικές απώλειες σωστά λαμβάνονται από το άθροισμα των απωλειών της κάθε φάσης [4.17].

4.4.8 Διόρθωση των απωλειών φορτίου στη θερμοκρασία αναφοράς

Σύμφωνα με τη θεωρία, τα δινορρέυματα που βρίσκονται στα τυλίγματα (βλέπε παράγραφο 1.3.6.2 και σχήμα 1.11) περιορίζονται από την αντίσταση του χαλκού. Σε αυτή τη περίπτωση, τα δινορρέυματα θα μειωθούν αν η θερμοκρασία του χαλκού αυξηθεί σε συμφωνία με αύξηση της ειδικής αντίστασης του χαλκού με την θερμοκρασία. Η αντίσταση των τυλιγμάτων στο κύριο ρεύμα φορτίου επίσης αυξάνεται με την θερμοκρασία και όσο το ρεύμα φορτίου υπάρχει, οι απώλειες αυξάνονται με την θερμοκρασία. Έτσι, αν θέλουμε να υπολογίσουμε τις απώλειες σε μία θερμοκρασία αναφοράς (συνήθως 75°C) έχοντας πραγματοποιήσει μετρήσεις σε άλλη θερμοκρασία, πρέπει πρώτα να διαχωρίσουμε τις απώλειες που οφείλονται στα δινορρέυματα από τις ολικές μετρούμενες απώλειες. Οι απώλειες που οφείλονται στη ροή του ρεύματος φορτίου μέσα από την αντίσταση του τυλίγματος (I^2R) μπορούν να υπολογιστούν από τις αρχικές μετρήσεις της αντίστασης και με τις υπόλοιπες μετρούμενες απώλειες να είναι αυτές που οφείλονται στα δινορρέυματα. Αυτή η διαδικασία διαχωρίζει τις απώλειες και καθεμιά των επιμέρους απωλειών μπορεί να αναχθεί στην επιθυμητή θερμοκρασία αναφοράς των 75°C.

Στη διόρθωση αυτή συμπεριλαμβάνονται δύο σφάλματα τα οποία συνήθως δεν είναι μεγάλα:

- Ποσοστό των απωλειών δινορρευμάτων προέρχονται από τα ρεύματα που κυκλοφορούν σε μέρη του χάλυβα τα οποία ρεύματα δεν μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία με τον ίδιο τρόπο
- Αν οι απώλειες δινορρευμάτων είναι ασυνήθιστα υψηλές (ίσες με τις απώλειες I^2R), τα δινορρέυματα πολύ πιθανόν να αλλάξουν το μαγνητικό πεδίο και αυτά να περιοριστούν από την ισοδύναμη άεργο αντίσταση με συνέπεια οι απώλειες να μεταβάλλονται λιγότερο από αναλογικά με την θερμοκρασία [4.18]

Έτσι, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076-1 [4.2], οι “επιπρόσθετες απώλειες” κατά την μέτρηση των απωλειών φορτίου σε θερμοκρασία θ_2 είναι :

$$P_{a2} = P_2 - I^2 R_2$$

όπου $R_2 = R_1 \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1}$ η αντίσταση των τυλιγμάτων χαλκού όταν πραγματοποιήθηκε η μέτρηση των απωλειών, και R_1 , θ_1 η κρύα αντίσταση των τυλιγμάτων και η αντίστοιχη θερμοκρασία.

Οπότε, οι “επιπρόσθετες” απώλειες στη θερμοκρασία αναφοράς θ_r και η αντίσταση τυλιγμάτων R_2 δίνονται από τους τύπους:

$$R_r = R_1 \frac{235 + \theta_r}{235 + \theta_1} \text{ (χαλκού)}$$

$$R_r = R_1 \frac{225 + \theta_r}{225 + \theta_1} \text{ (αλουμινίου)}$$

$$P_{ar} = P_{a2} \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_r}$$

$$P_{ar} = P_{a2} \frac{225 + \theta_2}{225 + \theta_r}$$

Για Μ/Σ ελαίου με θερμοκρασία αναφοράς 75°C, οι παραπάνω τύποι μετατρέπονται στους εξής:

$$R_r = R_1 \frac{310}{235 + \theta_1} \text{ (χαλκού)}$$

$$R_r = R_1 \frac{300}{225 + \theta_1} \text{ (αλουμινίου)}$$

$$P_{ar} = P_{a2} \frac{235 + \theta_2}{310}$$

$$P_{ar} = P_{a2} \frac{225 + \theta_2}{300}$$

$$\text{Τέλος, } P_r = I^2 R_r + P_{ar} \quad (4.13)$$

4.4.9 Αλληλεξάρτηση των απωλειών φορτίου με τη συχνότητα

Γενικά, η ωμική συνιστώσα των απωλειών φορτίου είναι ανεξάρτητη της συχνότητας (η επίδραση του επιδερμικού φαινομένου –παράγραφος 1.3.6.2- μπορεί να αμεληθεί για το

εύρος της συχνότητας που εξετάζουμε) ενώ οι απώλειες δινορρευμάτων αυξάνονται με την συχνότητα:

$$P_L = P_j + P_{am} \cdot \left(\frac{f_r}{f_m}\right)^2 + P_{st} \left(\frac{f_r}{f_m}\right)^{0.8} \quad (4.14)$$

όπου

- P_L οι απώλειες φορτίου στην ονομαστική συχνότητα f_r
- P_j η ωμική συνιστώσα των απωλειών φορτίου
- P_{am} οι απώλειες δινορρευμάτων των τυλιγμάτων σε συχνότητα δοκιμής f_m
- P_{st} οι απώλειες δινορρευμάτων σε δομικά μέρη και στη δεξαμενή σε συχνότητα δοκιμής f_m

4.4.10 Τάση βραχυκύκλωσης

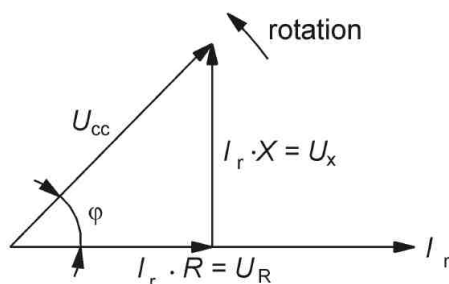
Το διανυσματικό διάγραμμα του ισοδυνάμου διαγράμματος του βραχυκυκλώματος (σχήμα 4.14) δίνει τα ακόλουθα [4.4]:

$$U_{cc} = \sqrt{U_X^2 + U_R^2}$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_R} \cdot 100 \quad (4.15)$$

όπου

- U_{cc} η τάση βραχυκύκλωσης
- U_R η ωμική πτώση τάσης
- U_X η επαγωγική πτώση τάσης
- ε_{cc} σχετική τάση βραχυκύκλωσης επί %
- U_R η ονομαστική τάση του Μ/Σ



Σχήμα 4.14 – Διανυσματικό διάγραμμα βραχυκυκλώματος [4.4]

Η σχετική τάση βραχυκύκλωσης δίνεται ως ποσοστό της ονομαστικής τάσης. Είναι η τιμή που καθορίζει το ρεύμα που θα διαρρεύσει σε περίπτωση που κατά την λειτουργία του Μ/Σ επέλθει βραχυκύκλωμα:

$$I = \frac{100}{\varepsilon_{cc}} \cdot I_r \quad (4.16)$$

όπου:

- I το συμμετρικό ρεύμα βραχυκυκλώματος
- I_r το ονομαστικό ρεύμα

4.4.10.1 Αλληλεξάρτηση της τάσης βραχυκύκλωσης και του ρεύματος φορτίου

Η τάση βραχυκύκλωσης αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του ρεύματος φορτίου.

$$U_{cc} = U_{ccm} \cdot \frac{I_r}{I_m} \quad (4.17)$$

όπου

- U_{cc} τάση βραχυκύκλωση στο ονομαστικό ρεύμα I_r
- U_{ccm} η τάση βραχυκύκλωσης στο I_m
- I_m το ρεύμα φορτίου κατά την διάρκεια της δοκιμής

4.4.10.2 Αλληλεξάρτηση της τάσης βραχυκύκλωσης και της συχνότητας

Η τάση βραχυκύκλωσης είναι ανάλογη της συχνότητας, εφόσον $U_R \ll U_X$.

$$U_{cc} = U_{ccm} \cdot \frac{f_r}{f_m} \quad (4.18)$$

όπου

- f_r η ονομαστική συχνότητα
- f_m η συχνότητα κατά την διάρκεια της δοκιμής

4.4.10.3 Αλληλεξάρτηση της τάσης βραχυκύκλωσης και της θερμοκρασίας του τυλίγματος

Τα πρότυπα IEC [4.2] ορίζουν ότι η τάση βραχυκύκλωσης ανάγεται σε θερμοκρασία τυλίγματος των 75°C ενώ τα πρότυπα IEEE [4.3] ορίζουν ως θερμοκρασία αναφοράς τους 85°C. Η τάση βραχυκύκλωσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων.

Έτσι, η τάση βραχυκύκλωσης στη θερμοκρασία αναφοράς δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\varepsilon_{cc} = \sqrt{\left(\frac{U_{ccm}}{U_r} \cdot 100\right)^2 - \left(\frac{P_{Lm}}{S_r} \cdot 100\right)^2 + \left(\frac{P_L}{S_r} \cdot 100\right)^2} \quad (4.19)$$

όπου

U_{ccm} η τάση βραχυκύκλωσης σε ονομαστικό ρεύμα I_r και σε θερμοκρασία του τυλίγματος κατά την διάρκεια της δοκιμής

P_{Lm} οι απώλειες φορτίου σε I_r και σε θερμοκρασία του τυλίγματος κατά την διάρκεια της δοκιμής

P_L οι απώλειες φορτίου σε I_r και σε θερμοκρασία του τυλίγματος 75°C / 85°C

S_r η ονομαστική φαινόμενη ισχύς

4.4.10.4 Μέτρηση τάσης βραχυκύκλωσης

Σύμφωνα με [4.19], η μέτρηση της τάσης βραχυκύκλωσης είναι απόλυτα απαραίτητη για τους εξής λόγους:

- Για την επαλήθευση της τεχνικής κατάστασης του Μ/Σ
- Για την εξακρίβωση πιθανών αστοχιών κατά το στάδιο της περιέλιξης των πηνίων
- Για την εξέταση της συμπεριφοράς των τυλιγμάτων κατά την διάρκεια της λειτουργίας του Μ/Σ
- Για την πραγματοποίηση διαφόρων υπολογισμών τόσο για το σύστημα όσο και για το βραχυκύκλωμα

Η τάση βραχυκύκλωσης είναι η τάση που εφαρμόζεται στο πρωτεύον τυλίγμα και προκαλεί τη ροή του ονομαστικού ρεύματος σε αυτό ενώ το δευτερεύον είναι βραχυκυκλωμένο. Τα μετρητικά κυκλώματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δοκιμή μέτρησης της τάσης βραχυκύκλωσης είναι τα ίδια με αυτά της μέτρησης των απωλειών φορτίου ενώ και οι δύο δοκιμές πραγματοποιούνται ταυτόχρονα ακολουθώντας κοινή διαδικασία.

Έτσι, ισχύει :

$$\%Z = \% \text{ τάση βραχυκύκλωσης} = \frac{\text{μετρούμενη τάση}}{\text{ονομαστική τάση}} \cdot 100$$

4.5 Μέτρηση απωλειών εν κενώ (σιδήρου) και ρεύματος μαγνήτισης

4.5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος των απωλειών σιδήρου [4.10]

4.5.1.1 Επαγωγή.

Οι απώλειες του πυρήνα μεταβάλλονται με το βαθμό της επαγωγής του πυρήνα (πυκνότητα ροής)

4.5.1.2 Πλάτος τάσης διέγερσης.

Επειδή η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι σε άμεση συνάρτηση με το πλάτος της τάσης διέγερσης, οι απώλειες σιδήρου είναι επίσης σε συνάρτηση με αυτή. Έτσι, μία μεταβολή 1% της τάσης προξενεί μία αντίστοιχη μεταβολή στις απώλειες πυρήνα της τάξης του 1%-3%. Ενώ, το σχέδιο και υλικό που χρησιμοποιούνται για τον πυρήνα καθορίζουν το μέγεθος της μεταβολής των απωλειών. Συνεπώς, είναι σημαντικό να υπάρχει ακριβής μέτρηση του πλάτους της τάσης διέγερσης.

4.5.1.3 Κυματομορφή τάσης διέγερσης

Οι απώλειες σιδήρου συνήθως καταγράφονται όταν η τάση διέγερσης είναι ημιτονοειδής μορφή. Αλλά ακόμη και με ημιτονοειδής πηγή τάσης, η μη-γραμμικότητα του πυρήνα του Μ/Σ εισάγει σημαντικές αρμονικές στο ρεύμα διέγερσης που έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση των κυματομορφών της τάσης διέγερσης και της μαγνητικής ροής. Το πλάτος της παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης συνήθως καθορίζεται από την σύνθετη αντίσταση εξόδου της πηγής τάσης και το πλάτος και τις αρμονικές του ρεύματος διέγερσης. Όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι παράμετροι, τόσο μεγαλύτερη θα είναι το πλάτος της παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης.

Οι μετρήσεις των απωλειών μεταβάλλονται αισθητά με την κυματομορφή. Κυματομορφές της τάσης που έχουν κορυφή έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερες απώλειες σε σύγκριση με αυτές της τάσης με ημιτονοειδής μορφή. Αλλά όμως κυματομορφές με επίπεδη κορυφή δίνουν υψηλότερες απώλειες απ' ότι οι αντίστοιχες με καθαρή ημιτονοειδής μορφή[4.10].

Διόρθωση κυματομορφής

Η συνιστώσα των δινορρευμάτων μεταβάλλεται με το τετράγωνο της RMS τιμή της τάσης διέγερσης και είναι ανεξάρτητη από την κυματομορφή της τάσης. Όταν όμως η τάση

δοκιμής πρέπει να παραμείνει σε συγκεκριμένη σταθερή τιμή, όπως διαβάζεται αυτή από το βολτόμετρο μέσης τιμής, υπάρχει η περίπτωση η πραγματική RMS τιμή της τάσης δοκιμής να μην είναι ίση με αυτή τη σταθερή τιμή. Τότε, οι απώλειες σιδήρου του Μ/Σ διορθώνονται, βάσει της ημιτονοειδούς κυματομορφής, με τη βοήθεια της ακόλουθης εξίσωσης:

$$P_c(T_m) = \frac{P_m}{P_1 + kP_2} \quad (4.20)$$

όπου

T_m είναι η μέση θερμοκρασία του λαδιού κατά την διάρκεια της δοκιμής (°C)

$P_c(T_m)$ είναι οι απώλειες σιδήρου, διορθωμένες για την κυματομορφή, σε θερμοκρασία T_m

P_m είναι οι μετρούμενες απώλειες σιδήρου σε θερμοκρασία T_m

P_1 είναι οι ανά μονάδα απώλειες υστέρησης

P_2 είναι οι ανά μονάδα απώλειες δινορρευμάτων

k είναι $\left(\frac{E_r}{E_a}\right)^2$

E_r είναι η τάση δοκιμής η οποία μετράται με RMS βολτόμετρο

E_a είναι η τάση δοκιμής που μετράται με βολτόμετρο μέσης τιμής

Οι πραγματικές ανά μονάδα τιμές των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων πρέπει να χρησιμοποιηθούν εφόσον είναι διαθέσιμες. Αν όμως αυτό δεν είναι δυνατόν, τότε προτείνεται να θεωρηθούν αυτές οι συνιστώσες ίσες μεταξύ τους και ίσες με τη τιμή του 0,5 ανά μονάδα [4.3].

Όμως, σύμφωνα με [4.20], η παραπάνω διόρθωση της επίδρασης της παραμόρφωσης της τάσης όπως περιγράφεται από το πρότυπο IEEE C57.12.90 [4.3], μπορεί να οδηγήσει σε διορθωμένες απώλειες που είναι διαφορετικές από τις απώλειες που μετρώνται υπό σχεδόν ημιτονοειδείς συνθήκες. Έτσι, για την ονομαστική τάση, η οποία είναι και η τάση δοκιμής και στην οποία ο κατασκευαστής εγγυάται τη τιμή των απωλειών, η διαφορά μεταξύ των μετρούμενων με σχεδόν ημιτονοειδής κυματομορφή τάσης απωλειών και των διορθωμένων απωλειών είναι περίπου 4%. Η δήλωση του [4.3] ότι ο τύπος της διόρθωσης είναι έγκυρος για τάσεις δοκιμής με μέτρια παραμόρφωση κυματομορφής είναι αληθής, όπως αποδεικνύεται στην [4.20], όπου σε αυτή τη περίπτωση η διαφορά μεταξύ των σχεδόν ημιτονοειδών και των διορθωμένων απωλειών είναι μικρότερη από 1%. Αλλά όμως, η

δήλωση αυτή του προτύπου είναι αόριστη για να χρησιμοποιηθεί στη πράξη αφού είναι δύσκολο να καθοριστεί το πότε η κυματομορφή είναι επαρκώς μέτρια παραμορφωμένη.

Από την άλλη, μπορεί να υπάρξει διόρθωση των απωλειών σιδήρου χωρίς να εμπλέκονται άμεσα στον υπολογισμό οι απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Έτσι, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076-1 [3.2], ο τύπος της διόρθωσης είναι :

$$P_o = P_m (1 + d) \quad (4.21)$$

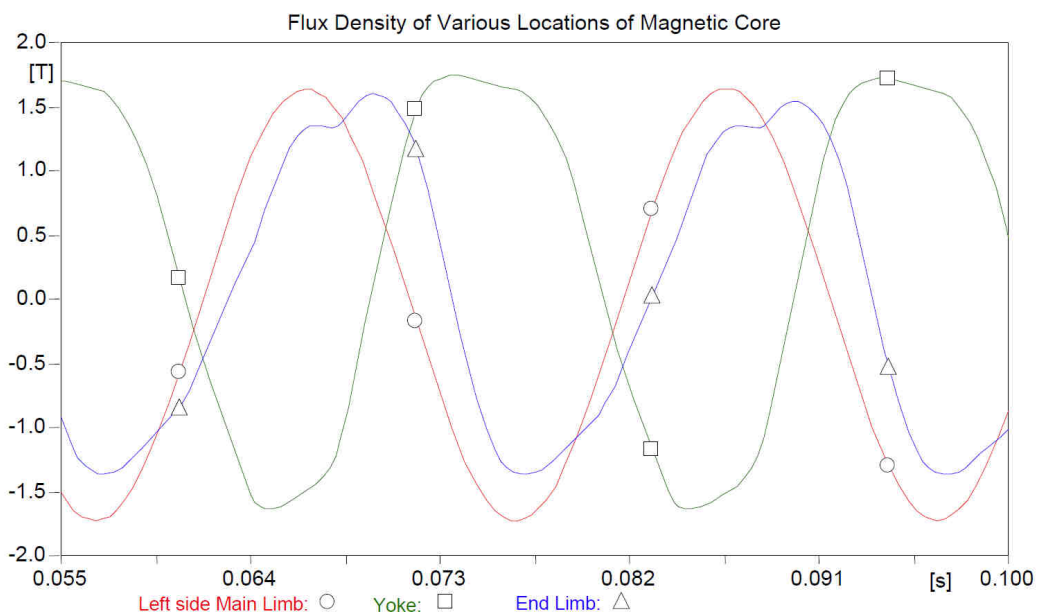
όπου $d = \frac{U' - U}{U}$ (συνήθως αρνητικό μέγεθος)

με U' να είναι η ένδειξη του βολτομέτρου που μετράει τη μέση τιμή της τάσης και U να είναι η ένδειξη του βολτομέτρου που μετράει την RMS τιμή της τάσης.

4.5.1.4 Διαμόρφωση πυρήνα

Διαφορετικές διαμορφώσεις πυρήνα (τριών έναντι πέντε σκελών, μονοφασικοί έναντι τριφασικών πυρήνων) αποδίδουν διαφορετικές τιμές απωλειών σιδήρου. Αυτό προκαλείται από διαφορές στη διανομή της μαγνητικής ροής στους παραπάνω διαμορφώσεις.

Έτσι, σύμφωνα με [4.21], (όπως είχε αναφερθεί και στη παράγραφο 1.2.2-“Σχέδια Μαγνητικών Κυκλωμάτων”) οι M/Σ που ο πυρήνας τους έχει πέντε σκέλη παρουσιάζουν στρεβλές μαγνητικές ροές (σχήμα 4.15) σε σύγκριση με τους M/Σ με πυρήνα τριών σκελών.



Σχήμα 4.15 – Παραμόρφωση μαγνητικών ροών για 100% διέγερση σε διάφορα σημεία του πυρήνα όπως στο αριστερό κύριο σκέλος (Left Main Limb), στο ζύγωμα (Yoke) και στο ακριανό σκέλος (End Limb) [4.21]

4.5.1.5 Υλικό πυρήνα

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο οι μετρήσεις των απωλειών σιδήρου εξαρτώνται από τις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού, από τις διαστάσεις αυτού αλλά και από την μονωτική επίστρωση των φύλλων του μαγνητικού υλικού.

4.5.1.6 Συχνότητα

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 1.3.5, οι απώλειες σιδήρου αποτελούνται από δύο συνιστώσες. Τη συνιστώσα των απωλειών που οφείλεται στην υστέρηση και σε εκείνη που οφείλεται στα δινορρέυματα. Η συνιστώσα των απωλειών υστέρησης μεταβάλλεται γραμμικά με την συχνότητα ενώ η συνιστώσα των απωλειών δινορρευμάτων μεταβάλλεται αναλογικά με το τετράγωνο της συχνότητας. Αλλά όμως, το μέγεθος του επηρεασμού της συχνότητας στις απώλειες καθορίζεται από δύο παραμέτρους, από τους κόκκους και το πάχος του χάλυβα.

4.5.1.7 Κατασκευή του πυρήνα

Η ποιότητα κατασκευής του πυρήνα και η διαχείρισή του κατά την διάρκεια της συναρμολόγησής του επιδρούν στο μέγεθος των απωλειών σιδήρου. Οι παραπάνω αυτοί λόγοι εξηγούν γιατί οι μετρήσεις των απωλειών σε παρόμοιους Μ/Σ διαφέρουν κατά ένα μικρό ποσοστό.

4.5.1.8 Θερμοκρασία πυρήνα

Οι απώλειες πυρήνα επηρεάζονται κατά ένα βαθμό από την θερμοκρασία του πυρήνα τη χρονική στιγμή κατά την οποία πραγματοποιείται η μέτρηση. Γενικά, οι απώλειες πυρήνα μειώνονται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του πυρήνα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μείωσης της συνιστώσας των δινορρευμάτων που με τη σειρά της προκαλείται από την υψηλότερη ειδική αντίσταση στις υψηλότερες θερμοκρασίες.

Το μέγεθος της επίδρασης αυτής είναι στη πραγματικότητα μία συνάρτηση του σχεδιασμού του πυρήνα και του υλικού αυτού. Αλλά όμως, η επίδραση είναι αρκετά μικρή (περίπου 1% για κάθε 15°C). Σε αυτή τη περίπτωση, η χρήση ενός μέσου όρου του συντελεστή διόρθωσης είναι ικανοποιητική [4.10].

Διόρθωση θερμοκρασίας των απωλειών σιδήρου

Αφού οι απώλειες σιδήρου μεταβάλλονται με την θερμοκρασία του πυρήνα, απαιτείται θερμοκρασία αναφοράς. Αν όμως οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι συνηθισμένες, τότε δεν υπάρχει ουσιαστική επίδραση στις απώλειες σιδήρου και εφόσον ισχύουν οι παρακάτω δύο προϋποθέσεις τότε δεν χρειάζεται διόρθωση της θερμοκρασίας:

- Η μέση θερμοκρασία λαδιού είναι εντός $\pm 10^{\circ}\text{C}$ από την θερμοκρασία αναφοράς T_r
- Η διαφορά των θερμοκρασιών του πάνω και κάτω μέρους του λαδιού δεν υπερβαίνει τους 5°C

Αν όμως η μέτρηση των απωλειών πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασία εκτός των παραπάνω ορίων, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση προκειμένου να διορθωθούν οι απώλειες σιδήρου στην θερμοκρασία αναφοράς:

$$P_c(T_r) = P_c(T_m) \{1 + (T_m - T_r) K_T\} \quad (4.22)$$

όπου

$P_c(T_r)$ είναι οι απώλειες σιδήρου, διορθωμένες στη θερμοκρασία αναφοράς T_r

$P_c(T_m)$ είναι οι απώλειες σιδήρου, διορθωμένες για την κυματομορφή, σε θερμοκρασία T_m

T_r είναι η θερμοκρασία αναφοράς ($^{\circ}\text{C}$)

K_T είναι ένα εμπειρικό μέγεθος που προέρχεται από την ανά μονάδα μεταβολή των απωλειών σιδήρου ανά $^{\circ}\text{C}$

Αν η πραγματική τιμή του K_T δεν είναι διαθέσιμη, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή 0,00065 ανά μονάδα μεταβολής ανά $^{\circ}\text{C}$. Αυτή η τιμή είναι χαρακτηριστική για πυρήνες κατασκευασμένους από χάλυβα πυριτίου προσανατολισμένων κόκκων και είναι ικανοποιητική για τη διόρθωση των απωλειών σιδήρου όταν ο υπό δοκιμή Μ/Σ είναι εκτός των συγκεκριμένων ορίων θερμοκρασίας [4.3].

4.5.1.9 Επίδραση κρουστικών δοκιμών στη μέτρηση των απωλειών σιδήρου

Όταν οι μετρήσεις απωλειών πυρήνα πραγματοποιούνται αμέσως μετά τις κρουστικές δοκιμές, τότε οι απώλειες είναι ελαφρά υψηλότερες (συνήθως 1% έως 3%) σε σύγκριση με αυτές που μετρήθηκαν πριν. Αυτή η αύξηση σπάνια είναι μόνιμη και συνήθως εξαλείφεται με τη πάροδο του χρόνου (αρκετές ώρες).

4.5.1.10 Σταθεροποίηση πυρήνα

Όταν ο Μ/Σ ενεργοποιείται με σκοπό να πραγματοποιηθεί η μέτρηση των απωλειών σιδήρου, ίσως αρχικά εμφανιστεί το φαινόμενο του υψηλού ρεύματος μαγνήτισης, των ελαφρά υψηλότερων απωλειών σιδήρου και της μεγάλης παραμόρφωσης της κυματομορφής της τάσης. Αλλά όσο η τάση παραμένει σταθερή, τόσο το ρεύμα, οι απώλειες και η παραμόρφωση σταδιακά μειώνονται στα προβλεπόμενα επίπεδα. Η χρονική περίοδος για την σταθεροποίηση είναι συνήθως μερικά δευτερόλεπτα αν και ίσως διαρκέσει περισσότερο για μερικά σχέδια Μ/Σ. Η αιτία του φαινομένου αυτού πιστεύεται ότι είναι κυρίως το φαινόμενο του παραμένουτος μαγνητισμού. Για την μείωση του χρόνου σταθεροποίησης, προτείνεται ο πυρήνας να διεγερθεί πρώτα σε μεγαλύτερη στάθμη πυκνότητας μαγνητικής ροής.

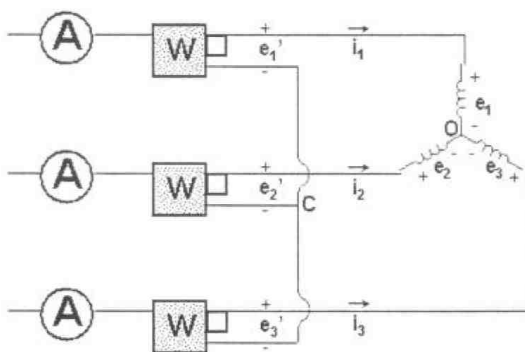
4.5.2 Μετρητικά κυκλώματα μέτρησης απωλειών σιδήρου και ρεύματος μαγνήτισης

Οι συνδέσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες:

- Τριών βαττομέτρων
- Δύο βαττομέτρων
- Βολτομέτρου

4.5.2.1 Συνδέσεις τριών βαττομέτρων

Ο αριθμός των απαιτούμενων βαττομέτρων και των συνδέσεων των πηνίων τάσης και έντασης καθορίζονται από το θεώρημα του Blondel. Το θεώρημα αυτό δηλώνει ότι για να μετρηθεί η συνολική ισχύς που παρέχεται μέσω N αγωγών, τότε απαιτούνται N βαττόμετρα με συνδέσεις όπως οι ακόλουθες. Το πηνίο ρεύματος κάθε βαττομέτρου συνδέεται σε μία γραμμή και το αντίστοιχο πηνίο τάσης συνδέεται μεταξύ αυτής της γραμμής και ενός κοινού σημείου. Η συνολική ισχύς υπολογίζεται από το άθροισμα των ενδείξεων των N βαττομέτρων. Το βασικό σχέδιο απεικονίζεται στο σχήμα 4.16.



Σχήμα 4.16 – Κύκλωμα τριών βαττομέτρων

Η ολική στιγμιαία ισχύς P_{tot} και η μετρούμενη από τα τρία βαττόμετρα στιγμιαία ισχύς P_{sum} υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{\text{tot}} = e_1 i_1 + e_2 i_2 = e_3 i_3$$

$$P_{\text{sum}} = e_1' i_1 + e_2' i_2 = e_3' i_3$$

όπου

P_{tot} είναι η ολική στιγμιαία ισχύς που δίδεται στο φορτίο

P_{sum} είναι το άθροισμα της στιγμιαίας ισχύς των ενδείξεων των τριών βαττομέτρων

e_1, e_2, e_3 είναι οι στιγμιαίες φασικές τάσεις του τριφασικού Μ/Σ

e_1', e_2', e_3' είναι οι στιγμιαίες τάσεις στα άκρα των πηνίων τάσης των βαττομέτρων

i_1, i_2, i_3 είναι τα στιγμιαία ρεύματα γραμμής (και τα ρεύματα των πηνίων ρεύματος των βαττομέτρων)

Αν η στιγμιαία τάση μεταξύ των σημείων Ο και C του σχήματος 4.13 είναι v , τότε

$$e_1 = v + e_1', e_2 = v + e_2', e_3 = v + e_3'.$$

Και :

$$P_{\text{sum}} = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 - v (i_1 + i_2 + i_3)$$

$$P_{\text{sum}} = P_{\text{tot}} - v (i_1 + i_2 + i_3)$$

Αν δεν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των σημείων Ο και C, τότε: $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

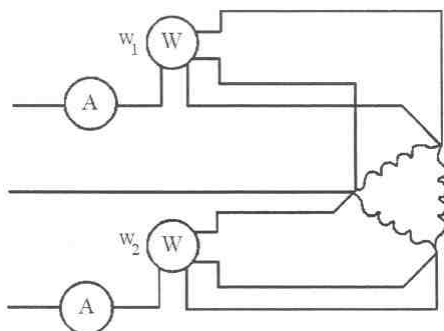
Αν τα σημεία Ο και C είναι συνδεδεμένα τότε $v = 0$.

Σε κάθε περίπτωση πάντως, ο όρος $v(i_1 + i_2 + i_3)$ είναι πάντα μηδέν και κάτω από όλες τις συνθήκες ασυμμετρίας φορτίου και ακόμη αν η τάση στο σημείο C είναι σημαντικά μετατοπισμένη από το σημείο του ουδετέρου, ισχύει :

$$P_{\text{sum}} = P_{\text{tot}} \quad (4.23)$$

4.5.2.2 Συνδέσεις δύο βαττομέτρων

Θεωρητικά, αν το κοινό σημείο (σημείο C του σχήματος 4.16) βρίσκεται σε μία από τις γραμμές τότε απαιτούνται μόνο N-1 βαττόμετρα. Η αντίστοιχη συνδεσμολογία απεικονίζεται στο σχήμα 4.17



Σχήμα 4.17 – Κύκλωμα δύο βαττομέτρων

Αν και η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στη πράξη, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση των απωλειών για τους ακόλουθους λόγους:

- Μία ασύμμετρη διανομή των απωλειών σιδήρου και του ρεύματος μαγνήτισης υπάρχει μεταξύ των φάσεων
- Οι κυματομορφές της εφαρμοζόμενης τάσης και του ρεύματος μαγνήτισης της δοκιμής μέτρησης απωλειών παρουσιάζουν έμφυτες παραμορφώσεις
- Οι Μ/Σ έχουν χαμηλό συντελεστή ισχύος όταν συνδέονται για την μέτρηση των απωλειών. Για παράδειγμα, με την μέθοδο των δύο βαττομέτρων, αν ο συντελεστής ισχύος των απωλειών που μετρώνται είναι μικρότερος από 50% (το οποίο είναι πολύ κοινό για μετρήσεις απωλειών σιδήρου), μία από τις ενδείξεις των δύο βαττομέτρων θα είναι αρνητική και τότε οι συνδέσεις του πρέπει να αντιστραφούν

4.5.2.3 Συνδέσεις βολτομέτρου

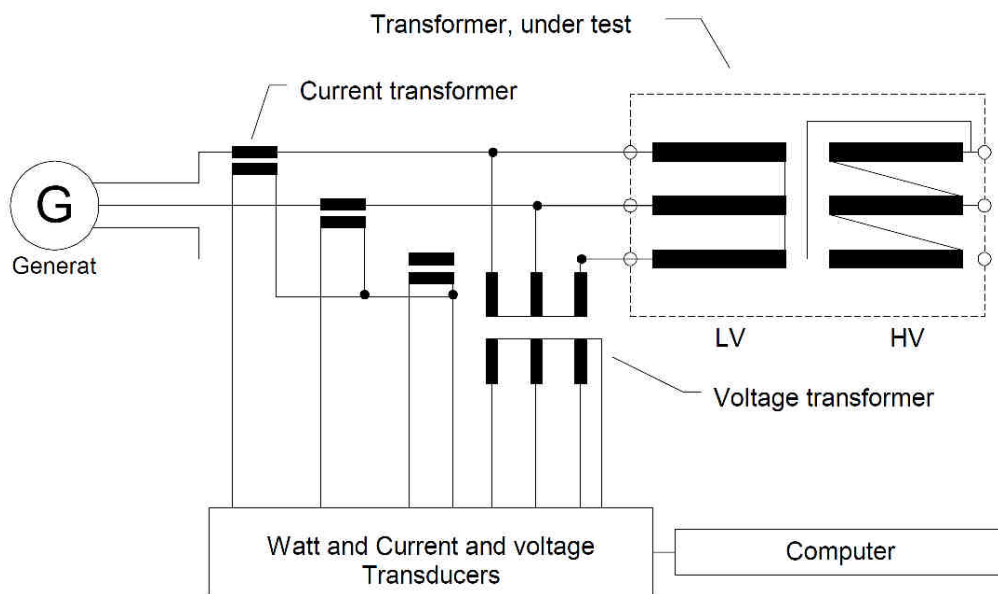
Η τάση δοκιμής που εφαρμόζεται στο βολτόμετρο πρέπει να είναι η ίδια με αυτή του υπό δοκιμή τυλίγματος. Αν η εφαρμοζόμενη στον Μ/Σ τάση περιέχει κατά την διάρκεια της δοκιμής αμελητέες αρμονικές (λιγότερο από 1% THD-Ολική Αρμονική Παραμόρφωση), τότε τα βολτόμετρα μπορούν να συνδεθούν είτε κατά τρίγωνο είτε κατά αστέρα, οτιδήποτε είναι πιο βολικό. Αλλά όμως, αν η εφαρμοζόμενη τάση σημαντική ποσότητα αρμονικών, όπως κατά την διάρκεια της μέτρησης απωλειών σιδήρου, τότε πρέπει να δοθεί προσοχή στις συνδέσεις του βολτομέτρου ώστε οι απώλειες να μετρηθούν σωστά με βάση το ημιτονοειδές κύμα. Έτσι, οι σωστές συνδέσεις του βολτομέτρου εξαρτώνται από την σύνδεση των τυλιγμάτων του υπό δοκιμή Μ/Σ με τη κυματομορφή της εφαρμοζόμενης τάσης στα άκρα κάθε βολτομέτρου να είναι ίδια με τη κυματομορφή της τάσης στα άκρα κάθε ενεργοποιημένου τυλίγματος.

Στο πρότυπο IEEE C57.123-2002 [4.10] απεικονίζονται κάποια κυκλώματα συνδεσμολογίας με βολτόμετρο, τα οποία κυκλώματα διαφέρουν ως προς τη συνδεσμολογία του υπό δοκιμή Μ/Σ (αν είναι κατά αστέρα ή κατά τρίγωνο) και ως προς το αν χρησιμοποιούνται και μετασχηματιστές μέτρησης.

4.5.2.4 Σύγχρονα μετρητικά συστήματα

Και στη μέτρηση των απωλειών σιδήρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως και στη μέτρηση των απωλειών φορτίου, τα ίδια προηγμένα μετρητικά συστήματα (βλέπε παράγραφο 4.4.6) όπως το ενισχυμένο συμβατικό σύστημα (παρ. 4.4.6.1) αλλά και οι προηγμένοι μετατροπείς τάσης και ρεύματος (4.4.6.2).

Αυτό που αλλάζει στη μέτρηση των απωλειών σιδήρου (σε σύγκριση με τη μέτρηση των απωλειών φορτίου) είναι ότι τώρα τροφοδοτείται το τύλιγμα της χαμηλής τάση με την ονομαστική της τάση και το τύλιγμα της υψηλής τάσης είναι ανοιχτοκυκλωμένο (σχήμα 4.18). Με το ίδιο κύκλωμα πραγματοποιείται συγχρόνως και η μέτρηση του ρεύματος μαγνήτισης.



Σχήμα 4.18 – Κύκλωμα μέτρησης απωλειών σιδήρου με τη χρήση μετατροπέων τάσης και ρεύματος [4.14]

4.6 Δοκιμή εφαρμοζόμενης τάσης

Ο σκοπός της δοκιμής αυτής είναι η διαπίστωση της αντοχής των ακροδεκτών και των συνδεδεμένων τυλιγμάτων τους ως προς τη γη και ως προς τα άλλα τυλίγματα

Η δοκιμή αυτή πρέπει να πραγματοποιείται με την εφαρμογή μονοφασικής εναλλασσόμενης τάσης η οποία να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ημιτονοειδής κυματομορφή και συχνότητας όχι μικρότερη από το 80% της ονομαστικής συχνότητας.

Η δοκιμή πρέπει να αρχίζει σε τιμή τάσης όχι μεγαλύτερης από το ένα τρίτο της τάσης δοκιμής και η τάση πρέπει να αυξάνεται έως και την τιμή της δοκιμής τόσο γρήγορα όσο παραμένει αυτή συνεπής με τη μέτρηση. Στο τέλος της δοκιμής, η τάση πρέπει να μειώνεται τάχιστα σε τιμή μικρότερη από το ένα τρίτο της τιμής δοκιμής πριν την απενεργοποίηση.

Η πλήρης τάση δοκιμής πρέπει να εφαρμόζεται για 60 δευτερόλεπτα με όλους τους ακροδέκτες του υπό δοκιμή τυλίγματος συνδεδεμένους μαζί ενώ οι ακροδέκτες του άλλων τυλιγμάτων, ο πυρήνας, το σασί και η δεξαμενή του Μ/Σ να είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και γειωμένοι [4.22].

Η τάση δοκιμής εξαρτάται από την υψηλότερη τάση του εξοπλισμού U_m που συσχετίζεται με τα αντίστοιχα μονωτικά επίπεδα των τυλιγμάτων. Έτσι, ανάλογα με την τάση του εξοπλισμού U_m προκύπτει η καθορισμένη από τα πρότυπα τάση δοκιμής. Αυτές οι τάσεις δοκιμών αναφέρονται σε πρότυπα και συγκεκριμένα στο πρότυπο IEC 60076-3 [4.22] στους πίνακες 2 και 4 (βλ. παράρτημα Α).

Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής αν δεν σημειωθεί κατάρρευση της τάσης δοκιμής [4.22] ή αν δεν υπάρχουν άλλες ενδείξεις σφάλματος όπως καπνός, φυσαλίδες και βροντές ή δεν σημειωθεί ξαφνική αύξηση του ρεύματος του κυκλώματος δοκιμής [4.4].

4.6.1 Μετρητικός εξοπλισμός

Οι μετρήσεις της τάσης δοκιμής U_p πρέπει πάντα να πραγματοποιούνται από τη πλευρά της υψηλής τάσης. Στη πράξη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές μετρητικές μέθοδοι [4.4]:

α) Μέτρηση με μετασχηματιστή τάσης

Αυτή η μέτρηση είναι ιδιαίτερος κατάλληλη για μετρήσεις τάσης έως και 70 kV. Δεν είναι απαραίτητη η διακρίβωση του μετρητικού κυκλώματος όταν χρησιμοποιούνται διακριβωμένοι μετασχηματιστές τάσης. Για το συγκεκριμένο μετρητικό κύκλωμα, η τάσης δοκιμής μπορεί να επιτηρείται με τη χρήση rms βολτομέτρου (σχήμα 4.19).

β) Μέτρηση με τη χρήση διαιρέτη τάσης και μετρητικής συσκευής

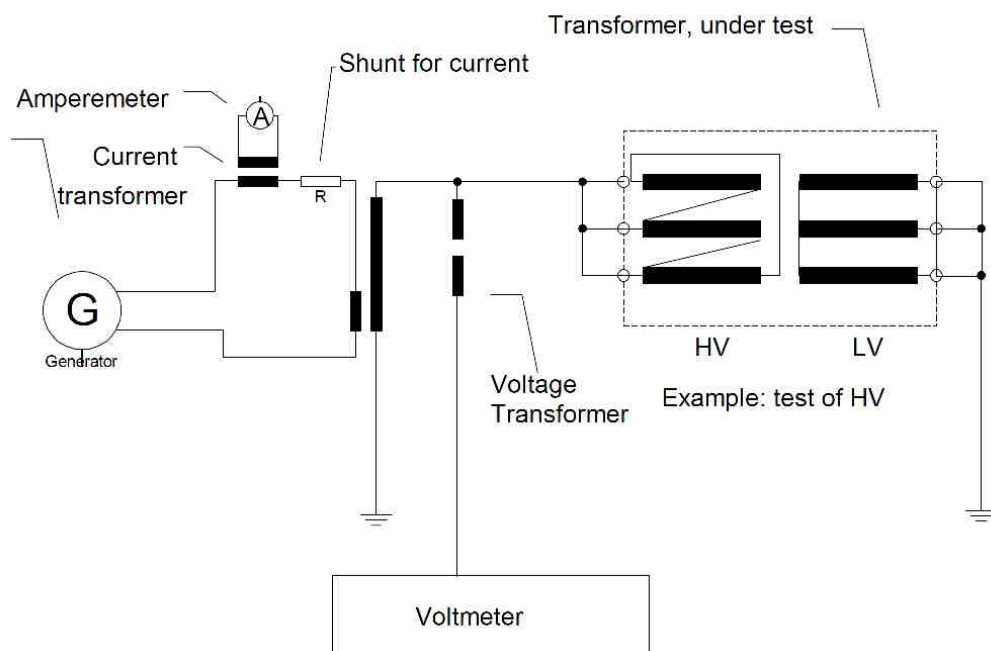
Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί έως τις υψηλότερες τιμές των τάσεων δοκιμής. Επιτρέπει την άμεση ανάγνωση της τιμής κορυφής και της rms τιμής της τάσης

δοκιμής. Ένα άλλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η υψηλή μετρητική της ακρίβεια. Η μετρούμενη τάση δοκιμής μειώνεται μέσω χωρητικού ή μεικτού διαιρέτη τάσης και συνδέεται με τη μετρητική συσκευή.

Όταν χρησιμοποιείται διακριβωμένος διαιρέτης τάσης, η μέτρηση πραγματοποιείται όπως στη περίπτωση -α- (μέσω μετασχηματιστή τάσης) και με την τάση δοκιμής να μπορεί να αναγνωσθεί κατευθείαν από την μετρητική συσκευή.

γ) Μέτρηση με σφαιρικά διάκενα

Παρόλο που η μέθοδος αυτή, σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους, έχει αρκετά μειονεκτήματα, χρησιμοποιείται κάποιες φορές. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει μόνο την έμμεση μέτρηση. Αυτό σημαίνει ότι πριν την έναρξη της δοκιμής όλο το κύκλωμα πρέπει να διακριβωθεί με τη χρήση των σφαιρικών διακένων ενώ κατά την διάρκεια της δοκιμής δεν είναι δυνατή η μέτρηση της τάσης δοκιμής U_p .



Σχήμα 4.19 – Κύκλωμα εφαρμοζόμενη τάσης (στη προκειμένη περίπτωση, εξετάζεται το τύλιγμα της υψηλής τάσης) [4.14]

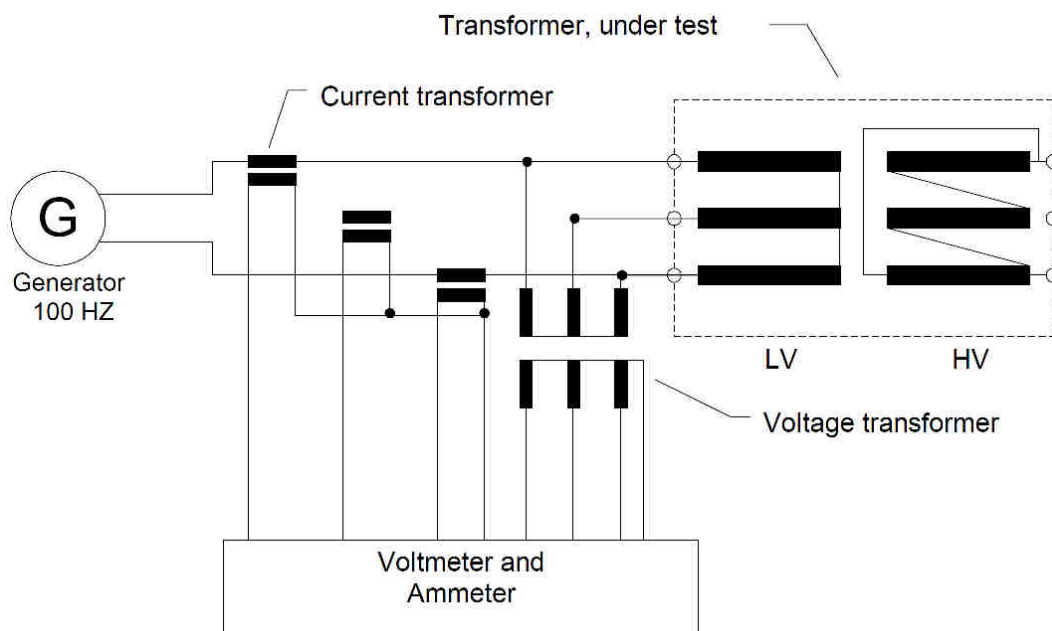
4.6.2 Αβεβαιότητα

Η τάση δοκιμής μπορεί να ρυθμιστεί με ακρίβεια περίπου 1% όταν χρησιμοποιούνται χωρητικοί ή μεικτοί διαιρέτες τάσης συνδεδεμένοι με το μετρητικό εξοπλισμό ή

μετασχηματιστές τάσης. Αν όμως για τη μέτρηση χρησιμοποιούνται σφαιρικά διάκενα τότε η ακρίβεια δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 3% [4.4].

4.7 Δοκιμή επαγόμενης τάσης

Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται με σκοπό την εξακρίβωση της μονωτικής αντοχής μεταξύ του υπό δοκιμή τυλίγματος και της γης, μεταξύ των τυλιγμάτων και μεταξύ των σπειρών [4.23]. Κατά την διάρκεια της δοκιμής, η συμμετρική τριφασική τάση δοκιμής εφαρμόζεται στο τύλιγμα της χαμηλής τάσης ενώ συγχρόνως το άλλο τύλιγμα πρέπει να παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο (βλ. σχήμα 4.20) και τα μεταλλικά μέρη (δεξαμενή) γειωμένα.



Σχήμα 4.20 – Κύκλωμα δοκιμής επαγόμενης τάσης [4.14]

Επειδή η τάση δοκιμής είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση του Μ/Σ, η τιμή της συχνότητας δοκιμής πρέπει να είναι επαρκώς μεγαλύτερη της ονομαστικής συχνότητας έτσι ώστε να αποφευχθεί το υπερβολικό ρεύμα μαγνήτισης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η τιμή της τάσης δοκιμής επιλέγεται ανάλογα της τιμής U_m του τυλίγματος με την υψηλότερη τάση λειτουργίας.

Ο χρόνος δοκιμής της εφαρμογής της τάσης δοκιμής πρέπει να είναι 60 δευτερόλεπτα για τις συχνότητες δοκιμής έως και την διπλάσια της ονομαστικής συχνότητας. Όταν η τιμή

της συχνότητας δοκιμής υπερβαίνει την διπλάσια τιμή της ονομαστικής συχνότητας, ο χρόνος της δοκιμής σε δευτερόλεπτα δίνεται από τον τύπο:

$$120 \times \frac{\text{ονομαστική συχνότητα}}{\text{συχνότητα δοκιμής}}, \quad \text{αλλά όχι λιγότερο από 15 δευτερόλεπτα} \quad (4.24)$$

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076-3 [4.22], οι δοκιμές της επαγόμενης τάσης ταξινομούνται ως μικρής διάρκειας (ACSD) ή μακράς διάρκειας (ACLD) αλλά και ανάλογα με το αν η τάση λειτουργίας είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από 72,5 kV. Έτσι, σύμφωνα με το πίνακα 1 (βλ. παράρτημα Α) του ανωτέρω προτύπου, οι δοκιμές της επαγόμενης μπορούν να θεωρηθούν ή δοκιμές σειράς ή δοκιμές τύπου ή ειδικές δοκιμές και συνεπώς εκτελούνται ανάλογα. Επίσης, για Μ/Σ με τάση λειτουργίας μικρότερη από 72,5 kV, η μέτρηση των μερικών εκκενώσεων δεν είναι υποχρεωτική ενώ για Μ/Σ με τάση λειτουργίας μεγαλύτερη από 72,5kV, η μέτρηση των μερικών εκκενώσεων κατά τη διάρκεια των δοκιμών επαγόμενης τάσης είναι υποχρεωτική και η οποία μέτρηση μπορεί να δείξει ενδεχόμενο ελάττωμα της μόνωσης προτού πραγματοποιηθεί σε αυτή κάποια διάσπαση[4.4].

4.7.1 Δοκιμή επαγόμενης τάσης μικρής διάρκειας (ACSD) για Μ/Σ με τυλίγματα ομοιόμορφης μόνωσης.

Οι τριφασικοί Μ/Σ πρέπει να υπόκεινται στη δοκιμή αυτή με τη παροχή συμμετρικής τριφασική τάσης και με το κύκλωμα μέτρησης να είναι αυτό του σχήματος 4.20. Αν ο Μ/Σ έχει ουδέτερο, αυτός πρέπει να γειώνεται κατά την διάρκεια της δοκιμής.

Ανάλογα με την υψηλότερη τιμή της τάσης του εξοπλισμού U_m η δοκιμή πρέπει να εκτελείται σύμφωνα με τις παραγράφους 4.7.1.1 και 4.7.1.2.

4.7.1.1 Μ/Σ με $U_m \leq 72,5$ kV

Η τιμή της φασικής τάσης δοκιμής δεν πρέπει να υπερβαίνει την ονομαστική AC επαγόμενη τάση που καθορίζεται στους πίνακες 2 και 3 του προτύπου IEC 60076-3 (βλ. παράρτημα Α) [4.22]. Κανόνας είναι η τιμή της τάσης δοκιμής στα άκρα του τυλίγματος του Μ/Σ να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στη διπλάσια τιμή της ονομαστικής τάσης.

Η δοκιμή θα αρχίζει σε τάση που η τιμή της δεν θα είναι μεγαλύτερη από το ένα τρίτο της τιμής της τάσης δοκιμής και η τάση θα αυξάνεται έως την τάση δοκιμής τόσο γρήγορα όσο χρειάζεται για να παραμένει συνεπής με τη μέτρηση. Στο τέλος της δοκιμής, η τάση

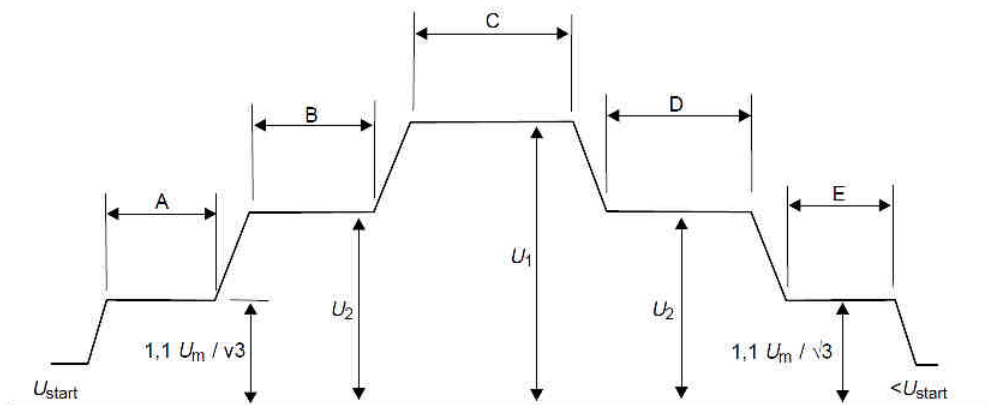
πρέπει να μειώνεται τάχιστα σε τιμή μικρότερη από το ένα τρίτο της τιμής δοκιμής πριν την απενεργοποίηση.

Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής αν δεν σημειωθεί κατάρρευση της τάσης δοκιμής [4.22].

4.7.1.2 M/Σ με $U_m > 72,5 \text{ kV}$

Οι φασικές τάσεις δοκιμών δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις ονομαστικές AC τάσεις αντοχής όπως καθορίζονται στους πίνακες 2, 3 ή 4 του προτύπου IEC 60076-3 (βλ. παράρτημα Α) [4.22]

Η εμφάνιση των μερικών εκκενώσεων (οι αντίστοιχες τιμές της τάσης στην οποία μετρώνται οι μερικές εκκενώσεις δίνονται στον πίνακα D1 του προτύπου IEC 60076-3 [4.22], βλ. παράρτημα Α) πρέπει να ελέγχεται βάσει της χρονικής διαδοχής διαφόρων τάσεων (και της τάσης δοκιμής U_1) όπως απεικονίζονται στο σχήμα 4.21



Σχήμα 4.21 – Χρονική διαδοχή της εφαρμογής της τάσης δοκιμής (όπου $A=5\text{min}$, $B=5\text{min}$, $C=\text{χρόνος δοκιμής όπως αναφέρεται στη παράγραφο 3.7}$, $D=5\text{min}$, $E=5\text{min}$)

Για να μην υπάρξει υπέρβαση της ονομαστικής τάσης αντοχής, όπως αυτή καθορίζεται στους πίνακες 2, 3 και 4 του προτύπου IEC 60076-3 (βλ. παράρτημα Α), μεταξύ των φάσεων, η στάθμη U_2 πρέπει να είναι ίση με :

$$1,3 \frac{U_m}{\sqrt{3}} \text{ φασική}$$

$$1,3U_m \text{ πολική}$$

Σύμφωνα με [4.22] και [4.24], καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής θα παρακολουθούνται οι μερικές εκφορτίσεις (για την μέτρηση αυτών βλ. παράρτημα Β) και η δοκιμή θα θεωρείται επιτυχής εάν:

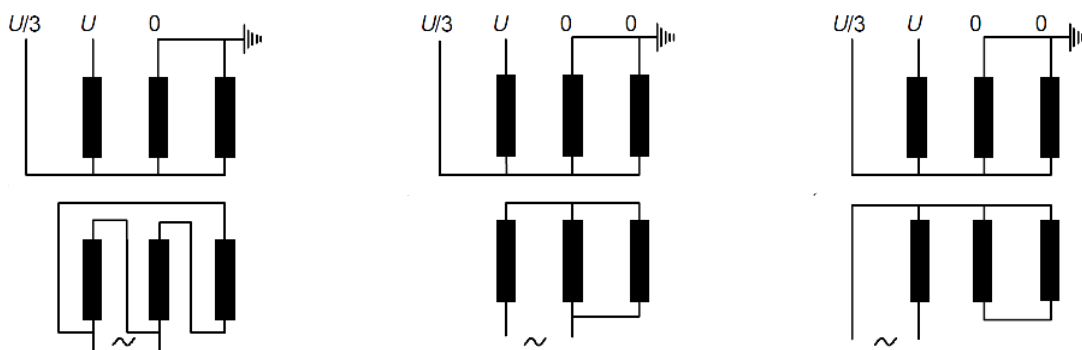
- Δεν συμβεί κατάρρευση της τάσης δοκιμής
- Το συνεχές επίπεδο των εμφανών εκφορτίσεων κατά την διάρκεια εφαρμογής της τάσης U_2 στη δεύτερη χρονική περίοδο των 5min δεν υπερβεί τα 300 pC σε όλους τους μετρούμενους ακροδέκτες
- Οι μερικές εκφορτίσεις δεν παρουσιάζουν συνεχή αυξητική τάση
- Το συνεχές επίπεδο των εμφανών εκφορτίσεων δεν υπερβεί τα 100 pC στα $1,3 U_m/\sqrt{3}$

4.7.2 Δοκιμή επαγόμενης τάσης μικρής διάρκειας (ACSD) για βαθμωτά μεμονωμένους Μ/Σ.

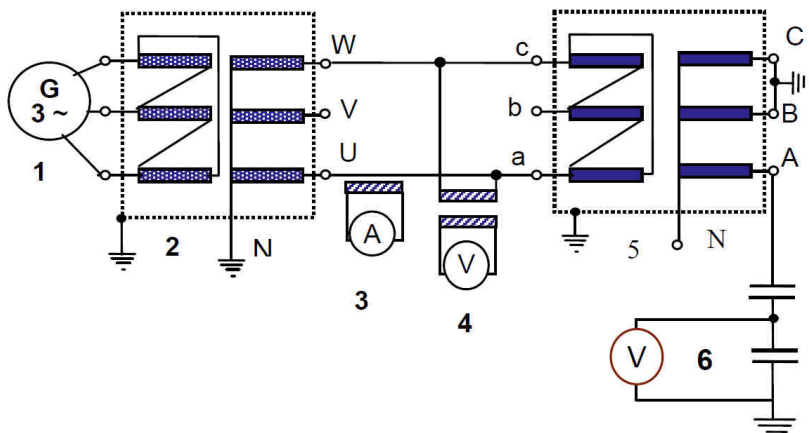
Για τους τριφασικούς Μ/Σ, υπάρχουν δύο ομάδες δοκιμών:

- Δοκιμή φάση προς γη με ονομαστικές τάσεις αντοχής όπως αυτές καθορίζονται στους πίνακες 2, 3 και 4 του προτύπου IEC 60076-3 [4.22] και με μέτρηση συγχρόνως και των μερικών εκφορτίσεων με $U_2 = 1,5 U_m/\sqrt{3}$ (μερικές από τις δυνατές συνδέσεις απεικονίζονται στο σχήμα 3.22).
- Δοκιμή φάση προς φάση με γειωμένο ουδέτερο και με ονομαστικές τάσεις αντοχής μεταξύ των φάσεων, σύμφωνα με τους πίνακες 2, 3 και 4 του προτύπου IEC 60076-3 [4.22] και με μέτρηση συγχρόνως και των μερικών εκκενώσεων με $U_2 = 1,3 U_m$). Η δοκιμή εκτελείται σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στη παράγραφο 4.7.1.2 (το κύκλωμα απεικονίζεται στο σχήμα 4.23)

Οι ανωτέρω ονομαστικές τάσεις αντοχής και οι αντίστοιχες τιμές της τάσης στην οποία μετρώνται οι μερικές εκκενώσεις δίνονται στον πίνακα D2 του προτύπου IEC 60076-3 [4.22] (βλ. παράρτημα Α)



Σχήμα 4.22 – Συνδέσεις για μονοφασικές δοκιμές επαγόμενης τάσης σε βαθμωτά μεμονωμένους Μ/Σ (U είναι η τάση δοκιμής φάση προς γη όπως καθορίζεται από τους πίνακες 2,3 και 4 του προτύπου IEC 60076-3) [4.22]



Σχήμα 4.23 – Κύκλωμα δοκιμής μονοφασικής επαγόμενης τάσης [4.25]
όπου

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 1: Σύγχρονη γεννήτρια | 2: Μ/Σ δοκιμής |
| 3: Μ/Σ έντασης και αμπερόμετρο | 4: Μ/Σ τάσης και βολτόμετρο |
| 5: Ο υπό δοκιμή Μ/Σ | 6: Χωρητικός καταμεριστής |

Έτσι, η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής ενός τριφασικού Μ/Σ περιλαμβάνει τρεις διαδοχικές μονοφασικές εφαρμογές της τάσης δοκιμής με διαφορετικά κάθε φορά τυλίγματα να γειώνονται.

Η δοκιμή θεωρείται επιτυχημένη αν δεν επέλθει κατάρρευση της τάσης δοκιμής και αν οι μετρήσεις των μερικών εκφορτίσεων ικανοποιούν τις απαιτήσεις όπως αυτές καταγράφονται στην παράγραφο 4.7.1.2, με την ακόλουθη όμως αλλαγή:

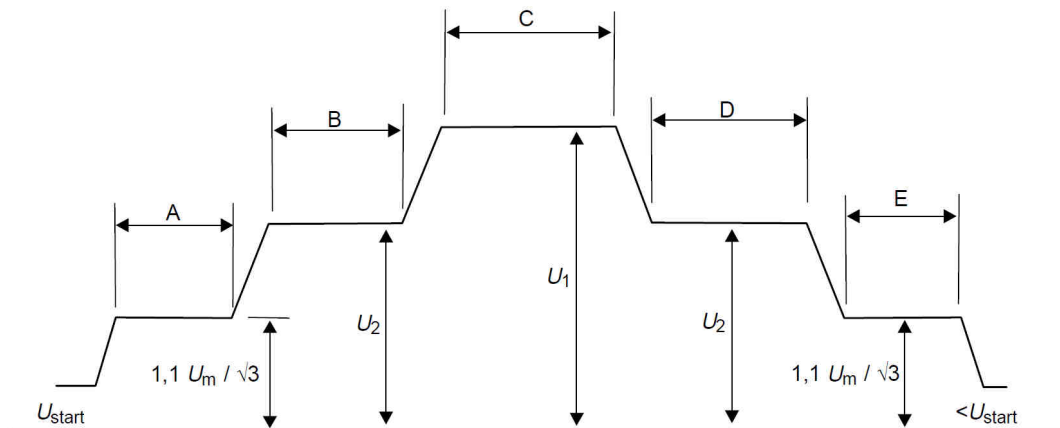
- Το συνεχές επίπεδο των εμφανών εκφορτίσεων κατά την διάρκεια εφαρμογής της τάσης U_2 στη δεύτερη χρονική περίοδο των 5min δεν υπερβαίνει τα 500 pC σε όλους τους μετρούμενους ακροδέκτες για τις μονοφασικές δοκιμές για τάση $U_2 = 1,5 U_m / \sqrt{3}$ φάση προς γη ή τα 300 pC για τις δοκιμές φάση προς φάση με $U_2 = 1,3 U_m / \sqrt{3}$ ή όσο απαιτείται σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές διαβάθμισης για τάση $1,2 U_m$ [4.22]

4.7.3 Δοκιμή επαγόμενης τάσης μακράς διάρκειας (ACLD) για ομοιόμορφα ή βαθμωτά μεμονωμένους Μ/Σ.

Η συγκεκριμένη δοκιμή δεν είναι μία δοκιμή για την απόδειξη της καταλληλότητας του σχεδίου και της κατασκευής του Μ/Σ αλλά είναι μία δοκιμή για τον ποιοτικό έλεγχο αυτού και ειδικότερα περιλαμβάνει τον έλεγχο πιθανών βλαβών εξαιτίας των προσωρινών υπερτάσεων και των δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω της συνεχιζόμενης φόρτισης του

M/Σ κατά την λειτουργία του. Έτσι, μέσω αυτής της δοκιμής εξακριβώνεται η λειτουργία χωρίς την παρουσία μερικών εκκενώσεων του M/Σ υπό συνθήκες λειτουργίας αυτού

Η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε ελέγχοντας κάθε φάση ξεχωριστά μέσω μονοφασικής σύνδεσης ή με συμμετρική τριφασική σύνδεση. Η διάρκεια της δοκιμής, εκτός του χρονικού διαστήματος εφαρμογής της τάσης U_1 , είναι ανεξάρτητη της συχνότητας δοκιμής με $U_1=1,7 U_m/\sqrt{3}$ και $U_1=1,5 U_m/\sqrt{3}$ (σχήμα 4.24).



Σχήμα 4.24 – Χρονική διαδοχή της εφαρμογής της τάσης δοκιμής (όπου $A=5\text{min}$, $B=5\text{min}$, $C=\text{χρόνος δοκιμής}$ (όπως αναφέρεται στη παράγραφο 3.7), $D=60\text{min}$ για $U_m \geq 300\text{kV}$ ή 30min για $U_m < 300\text{kV}$, $E=5\text{min}$ [4.22])

Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής αν :

- δεν επέλθει κατάρρευση της τάσης δοκιμής
- το συνεχές επίπεδο των μερικών εκκενώσεων κατά την διάρκεια εφαρμογής της τάσης U_2 στη μεγάλη χρονική περίοδο (60 ή 30min) δεν υπερβεί τα 500 pC
- οι μερικές εκκενώσεις δεν παρουσιάζουν συνεχή αυξητική τάση κατά την διάρκεια εφαρμογής της τάσης U_2
- το συνεχές επίπεδο των εμφανών εκκενώσεων δεν υπερβεί τα 100 pC στα $1,1 U_m/\sqrt{3}$ [4.22]

4.8 Δοκιμή λειτουργίας του μηχανισμού αλλαγής λήψεων υπό φορτίο

Με τον μηχανισμό αλλαγής λήψεων υπό φορτίο (OLTC) πλήρως συναρμολογημένο στον M/Σ θα εκτελεσθούν οι ακόλουθες λειτουργίες:

- Με τον M/Σ απενεργοποιημένο θα γίνουν 8 πλήρεις κύκλοι λειτουργίας (σε ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας ο επιλογέας πηγαίνει από τη χαμηλότερη λήψη μέχρι την υψηλότερη και επιστρέφει).

- Με τον Μ/Σ απενεργοποιημένο και τη βοηθητική τάση τροφοδοσίας στο 85% της ονομαστικής θα εκτελεσθεί ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας.
- Με τον Μ/Σ ενεργοποιημένο χωρίς φορτίο, στην ονομαστική τάση και ονομαστική συχνότητα θα εκτελεσθεί ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας.
- Με ένα τύλιγμα του Μ/Σ βραχυκυκλωμένο και με ονομαστικό ρεύμα στο υπό δοκιμή τύλιγμα, θα εκτελεσθούν 10 λειτουργίες αλλαγής λήψεων κατά μήκος και σε εύρος 2 βημάτων προς κάθε πλευρά, με αφετηρία τη μεσαία λήψη.

Αφού ο μηχανισμός αλλαγής λήψεων υπό φορτίο (OLTC) έχει πλήρως συναρμολογηθεί στον Μ/Σ, θα εκτελεσθεί δοκιμή αντοχής σε τάση συχνότητας δικτύου για τα βοηθητικά κυκλώματα [4.24].

4.9 Δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας

Ο σκοπός της συγκεκριμένης δοκιμής είναι το να επαληθεύσει τις εγγυημένες τιμές της αύξησης των θερμοκρασιών τόσο του λαδιού αλλά και των τυλιγμάτων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στο να εντοπίσει πιθανά θερμά σημεία, ιδιαίτερα για Μ/Σ με μεγάλα πεδία σκέδασης (όπως είναι οι Μ/Σ ισχύος που έχουν ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη από 300-500 MVA και οι αυτομετασχηματιστές).

Η θερμοκρασία του λαδιού μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα θερμοκρασίας σε άμεση ή έμμεση επαφή με το λάδι. Αντίθετα, η θερμοκρασία του τυλίγματος πρέπει να μετρηθεί με έμμεσο τρόπο μέσω της αντίστασης αυτού. Έτσι, η αντίσταση του τυλίγματος μετράται αρχικά πριν την έναρξη της δοκιμής, όταν ολόκληρος ο Μ/Σ βρίσκεται σε μία θερμική ισορροπία, ενώ αμέσως μετά την ολοκλήρωση της έγχυσης του ρεύματος πραγματοποιείται η τελική μέτρηση της αντίστασης. Η διαφορά των τιμών της αντίστασης αντικατοπτρίζει τη διαφορά της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων πριν και μετά τη δοκιμή.

4.9.1 Παραδοχές

Για τη πραγματοποίηση της δοκιμής γίνονται κάποιες παραδοχές και οι οποίες είναι:

- η θερμοκρασία του λαδιού εσωτερικά και κατά μήκος των πηνίων αυξάνεται γραμμικά από το κάτω έως το άνω τμήμα του λαδιού του Μ/Σ.
- η θερμοκρασία του τυλίγματος εμφανίζει γραμμική αύξηση από το κάτω έως το άνω τμήμα του λαδιού και μία σταθερή διαφορά g προς το προσκείμενο λάδι.

4.9.2 Μέθοδοι δοκιμής

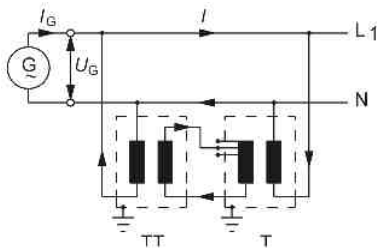
Θεωρητικά, υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για την εκτέλεση της δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας αλλά, για πρακτικούς λόγους, η επικρατούσα μέθοδος είναι αυτή του βραχυκυκλώματος.

4.9.2.1 Μέθοδος “back-to-back”

Για τη μέθοδο αυτή, απαιτούνται δύο παρόμοιοι Μ/Σ, από τους οποίους ο ένας είναι ο υπό δοκιμή Μ/Σ ενώ ο δεύτερος είναι συνδεδεμένος παράλληλα και διεγείρεται από την ονομαστική τάση του πρώτου Μ/Σ. Οι διαφορετικοί λόγοι μετασχηματισμού ή η έγχυση τάσης προκαλούν τη ροή του ονομαστικού ρεύματος.

Ο πυρήνας του υπό δοκιμή Μ/Σ διεγείρεται όπως στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας και έχει την ονομαστική πυκνότητα ροής. Γι’ αυτό το λόγο, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για του Μ/Σ ξηρού τύπου όπως απαιτούνται από τα πρότυπα[4.4].

Από τη πλευρά της, η γεννήτρια χρειάζεται να τροφοδοτήσει τις συνολικές απώλειες (φορτίου και σιδήρου) και των δύο Μ/Σ αλλά και την άεργο ισχύ για την ενεργοποίηση αυτών (σχήμα 4.25).



Σχήμα 4.25 – Συνδεσμολογία δοκιμής μεθόδου “back-to-back” όπου TT είναι ο υπό δοκιμή Μ/Σ

4.9.2.2 Δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασία κατά την διάρκεια της λειτουργίας του

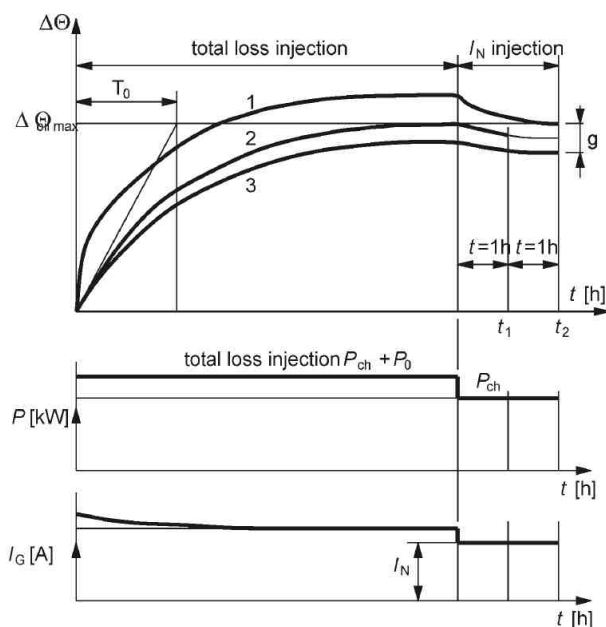
Η μέθοδος αυτή δεν προτείνεται, ιδιαίτερα για μεγάλους Μ/Σ ισχύος, αφού οι μεταβολές του φορτίου και της τάσης κατά την διάρκεια της δοκιμής ίσως επηρεάσουν τα μετρούμενα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, η μέτρηση της αντίστασης για τον καθορισμό της θερμοκρασίας τυλίγματος είναι μάλλον περίπλοκη.

4.9.2.3 Μέθοδος βραχυκυκλώματος

Η δοκιμή αυτή εκτελείται για κάθε ζεύγος τυλιγμάτων. Αν πρόκειται για Μ/Σ δύο τυλιγμάτων, τότε απαιτείται μόνο μία δοκιμή με ένα από τα τυλίγματα να βραχυκυκλώνεται και μάλιστα το κύκλωμα να είναι το ίδιο με αυτό με το οποίο μετράμε τις απώλειες φορτίου (σχήμα 4.13). Για Μ/Σ που διαθέτουν μηχανισμό αλλαγής λήψεων, η δοκιμή ανύψωσης

θερμοκρασίας πρέπει να πραγματοποιείται στη θέση του μεταγωγέα όπου έχουμε το μέγιστο ρεύμα, και όπου συνήθως αυτή η θέση είναι εκείνη με τις υψηλότερες απώλειες φορτίου[4.4]. Η δοκιμή εκτελείται σε δύο βήματα [4.24]:

- Εφαρμογή τάσης δοκιμής τέτοιας ώστε η μετρούμενη ενεργός ισχύς να είναι ίση με τις συνολικές απώλειες του Μ/Σ. Το ρεύμα δοκιμής θα είναι μεγαλύτερο του ονομαστικού ώστε να καλύπτονται και οι απώλειες κενού. Η δοκιμή σε αυτό το βήμα θα τελειώσει όταν ο ρυθμός μεταβολής της ανύψωσης θερμοκρασίας στο ανώτερο τμήμα του λαδιού πέσει κάτω από 1°C ανά ώρα και παραμείνει σ' αυτή την κατάσταση για τρεις ώρες.
- Από τη στιγμή που θα επιβεβαιωθεί η θερμική ανύψωση στο ανώτερο τμήμα του λαδιού, η δοκιμή συνεχίζεται άμεσα με την εφαρμογή για μία ώρα ρεύματος δοκιμής μειωμένου στην τιμή του ονομαστικού ρεύματος του υπό δοκιμή τυλίγματος. Στο τέλος της μίας ώρας μετράται η αντίσταση του τυλίγματος με την απότομη αποσύνδεση της παροχής (και με τις πρώτες καταγραφές των ενδείξεων να γίνονται αμέσως μετά την υποχώρηση του φαινομένου της παραμένουσας επαγωγής που έχει εξηγηθεί στη παράγραφο 4.2.1, αλλά όχι μετά από 4 λεπτά από την αποσύνδεση[4.4]) και υπολογίζεται προσεγγιστικά με τη γραφική μέθοδο



Σχήμα 4.26 – Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της δοκιμής όπου T_0 η σταθερά χρόνου του Μ/Σ, t_1 η στιγμή της μέτρησης των αντιστάσεων της υψηλής και χαμηλής τάσης, t_2 η στιγμή της μέτρησης της αντίστασης του δεύτερου τυλίγματος σε περίπτωση ξεχωριστής μέτρησης αντίστασης, g διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τυλίγματος και λαδιού, 1 η ανύψωση θερμοκρασίας του τυλίγματος, 2 η ανύψωση θερμοκρασίας του άνω μέρους του λαδιού, 3 η ανύψωση της μέσης θερμοκρασίας [4.4]

4.9.2.3.1 Μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα

Σύμφωνα με τα πρότυπα [4.26] και [4.3], η θερμοκρασία του αέρα, ο οποίος αέρας δρα ως ψυκτικό μέσο, πρέπει να μετράται κατά την διάρκεια της δοκιμής με τουλάχιστον τρεις αισθητήρες (θερμοζεύγη ή θερμόμετρα). Οι αισθητήρες αυτοί, τοποθετημένοι από 1 έως 2 μέτρα μακριά από τον Μ/Σ, πρέπει να είναι προστατευμένοι από ρεύματα αέρα και από άμεση εκπομπή θερμότητας.

4.9.2.3.2 Μέτρηση ανύψωσης θερμοκρασίας λαδιού

Η μέτρηση της ανύψωσης της θερμοκρασίας του λαδιού είναι το πρώτο βήμα για τη δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας που πραγματοποιείται με τη μέθοδο του βραχυκυκλώματος. Για να επιτευχθεί η ανύψωση της θερμοκρασίας του άνω μέρους του λαδιού $\Theta_{oil-max}$ και η ανύψωση του μέσου όρου της θερμοκρασίας του λαδιού Θ_{oil-av} , ο Μ/Σ πρέπει να υποβληθεί, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στο άθροισμα των απωλειών φορτίου και σιδήρου.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC [4.26], η θερμοκρασία Θ_{oil-av} υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\Theta_{oil-av} = \frac{1}{2} (\Theta_{oil-max} + \Theta_{KA}) \quad (4.25)$$

όπου Θ_{KA} είναι η θερμοκρασία του λαδιού σε σημείο του Μ/Σ όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.25.

Ενώ, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE [4.3], ισχύει:

$$\Theta_{oil-av} = \Theta_{oil-max} - \frac{1}{2} (\Theta_{KE} - \Theta_{KA}) \quad (4.26)$$

Με την μέση ανύψωση της θερμοκρασίας του λαδιού να δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta\Theta_{oil-av} = \Theta_{oil-av} - \Theta_{\alpha} \quad (4.27)$$

όπου Θ_{α} είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος

Αν η ισχύς που είναι απαραίτητη για να εκτελεστεί η δοκιμή ανύψωσης της θερμοκρασίας δεν είναι διαθέσιμη, τότε η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί με μειωμένη ισχύ ενώ το αποτέλεσμα $\Delta\Theta_{oil-max.M}$ πρέπει να διορθωθεί σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta\Theta_{oil-max.N} = \Delta\Theta_{oil-max.M} \left(\frac{P_{tot}}{P_M} \right)^x \quad (4.28)$$

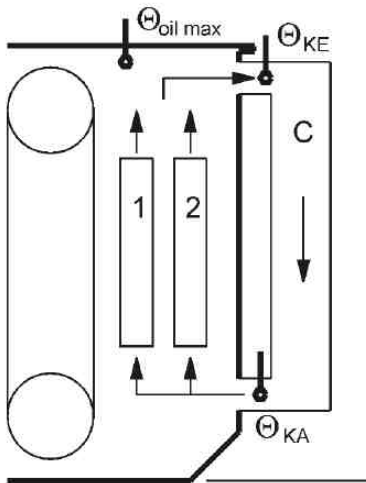
όπου

$\Delta\Theta_{oil-max.N}$ είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του άνω μέρος του λαδιού για συνολικές απώλειες P_{tot}

$\Delta\Theta_{oil-max.M}$ είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του άνω μέρος του λαδιού για συνολικές απώλειες P_M

x εκθέτης όπως αυτός καθορίζεται από σχετικό πίνακα (σύμφωνα με [4.26]): 0,9 για ONAN και ONAF, 1 για OFAF και ODAF).

Σημ.: ο τύπος (4.28) είναι έγκυρος εντός της περιοχής του $\pm 20\%$ από τις συνολικές απώλειες P_{tot} [4.4]



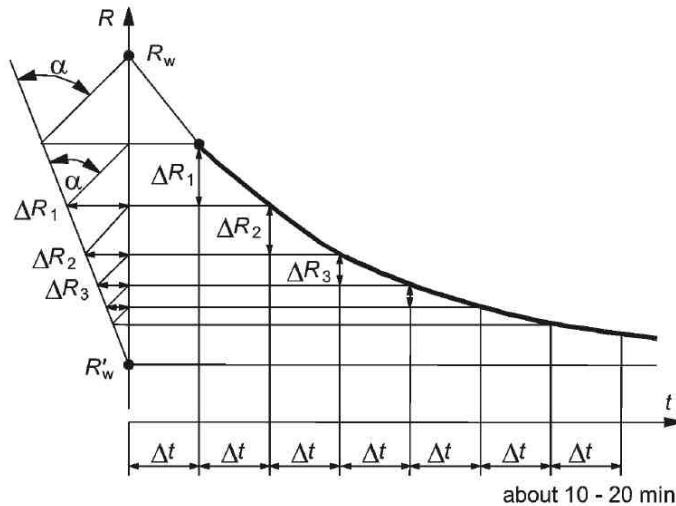
Σχήμα 4.27 – Θέση αισθητήρων στον Μ/Σ [4.4]

4.9.2.3.3 Μέτρηση ανύψωσης μέσης θερμοκρασίας τυλιγμάτων

Η μέτρηση της μέσης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων είναι το δεύτερο βήμα στην εκτέλεση της δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας με την μέθοδο του βραχυκυκλώματος. Αφού η ανύψωση του άνω μέρος του λαδιού $\Delta\Theta_{oil-max}$ έχει καθοριστεί, η δοκιμή συνεχίζεται στη δεύτερη φάση της, όπως έχει ήδη αναλυθεί στη παράγραφο 4.9.2.3, ενώ μετά την απότομη αποσύνδεση της παροχής μετρώνται οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων. Με τα δεδομένα των αντιστάσεων προ και μετά της δοκιμής αλλά και τις θερμοκρασίες όπως αυτές καταγράφηκαν υπολογίζεται η ανύψωση της μέσης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων.

Αναλυτικότερα:

Το σχήμα 4.28 δείχνει ότι η σωστή μέση θερμοκρασία του λαδιού κοντά στα τυλίγματα μπορεί να καθοριστεί από την ασύμπτωτη της συνάρτησης αντίστασης/χρόνου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για Μ/Σ με παραπάνω από δύο τυλίγματα.



Σχήμα 4.28 – Συμπερασματική εξαγωγή-προεκβολή της συνάρτησης αντίστασης-χρόνου όπου R_w είναι η υπολογισμένη προσεγγιστικά θερμή αντίσταση του τυλίγματος κατά τη χρονική στιγμή της απότομης αποσύνδεσης από τη παροχή και R_w είναι η τιμή της αντίστασης, η οποία αντιστοιχεί στη μέση θερμοκρασία του λαδιού που βρίσκεται πλησίον του τυλίγματος [4.4]

Κανονικά, η μέση θερμοκρασία τυλίγματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\Theta_{oil-av} = \Theta_{oil-max} - 0,5 (\Theta_{KE} - \Theta_{KA}) \quad (IEEE) \quad (4.29)$$

$$\Theta_{oil-av} = \Theta_{oil-max} - 0,5 (\Theta_{oil-max} + \Theta_{KA}) \quad (IEC) \quad (4.30)$$

Η μέση θερμοκρασία του τυλίγματος Θ_{Cu} για χάλκινα τυλίγματα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το τύπο:

$$\Theta'_{Cu} = \frac{R_w}{R_c} (235^* + \Theta_c) - 235^* \quad (4.31)$$

όπου:

Θ'_{Cu} η θερμοκρασία του τυλίγματος (θερμή)

R_w η αντίσταση σε θερμοκρασία Θ_w (θερμή)

R_c η αντίσταση σε θερμοκρασία Θ_c (ψυχρή)

*234,5 σύμφωνα με το πρότυπο IEEE

Για τυλίγματα αλουμινίου πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τιμή 225 αντί της 235 (234,5)

Επειδή η θερμοκρασία του λαδιού μειώνεται κατά την διάρκεια της μίας ώρας τροφοδοσίας με το ονομαστικό ρεύμα, η θερμοκρασία του τυλίγματος που υπολογίζεται μέσω του τύπου (4.31) πρέπει να διορθωθεί. Αρχικά, πρέπει να καθοριστεί η διαφορά θερμοκρασίας g μεταξύ τυλίγματος και λαδιού κατά την διάρκεια λειτουργίας με ονομαστικό ρεύμα:

$$g = \Theta_{Cu} - \Theta_{oil-av(Ir)}$$

και η οποία πρέπει να προστεθεί στη μέση θερμοκρασία του λαδιού $\Theta_{oil-av(Ptot)}$ που μετράται στη πρώτη φάση της δοκιμής κατά την οποία υπάρχει τροφοδότηση συνολικών απωλειών.

$$\Delta\Theta_{Cu} = \Theta_{oil-av(Ptot)} + g \quad (4.32)$$

Σε περίπτωση που δεν έχει γίνει δυνατό να υπάρξει τροφοδοσία με το ονομαστικό ρεύμα, τότε τα αποτελέσματα πρέπει να διορθωθούν σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$g_r = g_M \left(\frac{I_r}{I_t} \right)^y \quad (4.33)$$

όπου

I_r το ονομαστικό ρεύμα

I_t το ρεύμα δοκιμής

g_r η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τυλίγματος και λαδιού στο ονομαστικό ρεύμα

g_M μετρούμενη διαφορά θερμοκρασίας τυλίγματος και λαδιού στο ρεύμα δοκιμής

y εκθετική σταθερά [4.26], [4.3]

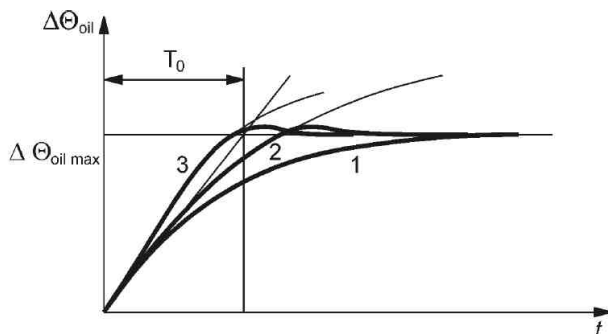
1,6 για ON και OF

2,0 για OD

Σημ.: ο τύπος (4.33) είναι έγκυρος εντός της περιοχής του $\pm 10\%$ από το ονομαστικό ρεύμα

4.9.3 Διάρκεια δοκιμής

Για να επιτευχθεί μείωση του χρόνου που διαρκεί η δοκιμή, είναι δυνατόν να αρχίσει αυτή με υψηλότερες απώλειες ή με μειωμένη ψύξη όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.29. Αλλά κάτω από αυτές τις συνθήκες, πρέπει να επιλεγεί η σωστή διάρκεια μιας και αλλιώς η συμπερασματική εξαγωγή-προεκβολή (extrapolation) δεν θα είναι δυνατή [4.4].



Σχήμα 4.29 – Διάρκεια δοκιμής ανύψωσης θερμοκρασίας με υψηλότερες απώλειες ή με μειωμένη ψύξη (1 = κανονική δοκιμή, 2 = δοκιμή με ολικές απώλειες αλλά έναρξη με μειωμένη ψύξη, 3 = δοκιμή με έναρξη υψηλότερες απώλειες, T_0 = σταθερά χρόνου M/Σ με όλα τα ψυκτικά μέσα σε λειτουργία)

Εκτιμώμενη διάρκεια δοκιμής

Στο πρότυπο [4.26], δίνεται ένας μαθηματικός τύπος για την θερμική σταθερά χρόνου τ_0 του Μ/Σ:

$$\tau_0 = \frac{5m_T + 15m_0}{P_{\text{tot}}} \cdot \left(\frac{\Delta\Theta_{\text{oil-max}}}{60} \right) \quad (4.34)$$

όπου

| | |
|---------------------------------|---|
| τ_0 | η θερμική σταθερά χρόνου του Μ/Σ (h) |
| m_T | το συνολικό βάρος του Μ/Σ χωρίς το λάδι (tn) |
| m_0 | το συνολικό βάρος του λαδιού χωρίς το λάδι που περιέχεται στο δοχείο του Μ/Σ (tn) |
| P_{tot} | οι συνολικές απώλειες του Μ/Σ (W) |
| $\Delta\Theta_{\text{oil-max}}$ | η εκτιμώμενη τελική ανύψωση του λαδιού, συνήθως λίγο μικρότερη από τους 60 K |

Η θερμική σταθερά του χρόνου είναι συνήθως της τάξης των 1-5h. Είναι μικρότερη για μεγάλους, βεβιασμένης ψύξης Μ/Σ και μεγαλύτερη για Μ/Σ με φυσική ψύξη [4.4].

Αβεβαιότητα

Το μετρούμενο σφάλμα στη μέτρηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος αποτελείται από διαφορετικά μεμονωμένα σφάλματα, όπως:

- τη μέτρηση της μέγιστης και του μέσου όρου της θερμοκρασίας του λαδιού
- τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα ή τη θερμοκρασία του νερού
- τη μέτρηση της αντίστασης

Ένα μετρούμενο σφάλμα της τιμής της αντίστασης π.χ. 0,05% και το οποίο είναι σχετικά χαμηλό για μία υπολογισμένη προσεγγιστικά θερμή αντίσταση, θα έχει ως αποτέλεσμα μία αβεβαιότητα της τάξης $\pm 1,5$ K (σε θερμοκρασία τυλίγματος 70°C).

Έτσι, ένα συνολικό μετρούμενο σφάλμα της τάξης των $\pm 2-3$ K πρέπει να ληφθεί υπόψη[4.4].

4.10 Δοκιμή εξωτερικής τάσης (Lightning impulse voltage test) και Δοκιμή εσωτερικής τάσης (Switching impulse voltage test)

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60076-3 [4.22], η δοκιμή εξωτερικής τάσης είναι δοκιμή σειράς για τους Μ/Σ με $U_m > 72,5 \text{ kV}$, ενώ σύμφωνα με το πρότυπο IEEE C57.12.00 [4.27] $U_m \geq 115 \text{ kV}$. Αντίστοιχα, η δοκιμή εσωτερικής τάσης είναι δοκιμή σειράς για Μ/Σ με $U_m > 300 \text{ kV}$ για [4.22] και $U_m \geq 345 \text{ kV}$ για [4.27]. Για τις υπόλοιπες τιμές της U_m αυτές οι τιμές θεωρούνται δοκιμές τύπου ή ειδικές δοκιμές.

Ο σκοπός των δοκιμών αυτών είναι το να επαληθεύσει την αντοχή της μόνωσης σε μεταβατικές τάσεις που προκαλούνται λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων (κεραυνοί), διαταραχών δικτύου ή χειρισμών.

Όπως είναι γνωστό, κατά την πρόσπτωση κεραυνού (που είναι ένα ρεύμα της τάξης αρκετών kA) σε ηλεκτρικό δίκτυο, δημιουργείται μια υπέρταση αρκετά μεγάλης τιμής που μπορεί να προκαλέσει σημαντικές καταστροφές. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Κεραυνική ή Εξωτερική Υπέρταση και είναι πολύ μικρής διάρκειας (της τάξης μερικών δεκάδων μs). Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι να μεταδίδεται η τάση στα διάφορα σημεία της γραμμής με κάποια χρονική καθυστέρηση. Δημιουργείται δηλαδή μια εικόνα μετακίνησης της υπέρτασης κατά μήκος της γραμμής και αυτός είναι ο λόγος ονομασίας της ως Οδεύον Κύμα Τάσης [4.28]. Συνεπώς, ο Μ/Σ μπορεί να πληγεί άμεσα από κεραυνό αλλά και έμμεσα μέσω του οδεύοντος κύματος που δημιουργεί το πλήγμα του κεραυνού σε κάποιο σημείο της γραμμής μεταφοράς.

Σύμφωνα με [4.29], οι εσωτερικές υπερτάσεις που αναπτύσσονται σ' ένα ηλεκτρικό δίκτυο, καθορίζονται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, τη δομή και τον τρόπο εκμετάλλευσής του. Εσωτερικές υπερτάσεις είναι και οι παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας. Αυτές προέρχονται από την εκδήλωση του φαινομένου Ferranti στο άκρο αφόρτιστης γραμμής μεταφοράς, από τη μετατόπιση του ουδετέρου κόμβου δικτύου κατά την εκδήλωση του μονοφασικού σφάλματος προς γη και από την απόρριψη φορτίου.

Οι υπερτάσεις χειρισμών εμφανίζονται σε οποιαδήποτε αλλαγή κατάστασης σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο (ζεύξη, απόζευξη) και οι οποίες υπερτάσεις διαδίδονται στο θεωρούμενο ηλεκτρικό δίκτυο υπό μορφή οδευόντων κυμάτων με σύνθετη κυματομορφή. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις ανάπτυξης και διάδοσης τέτοιων υπερτάσεων σ' ένα δίκτυο είναι οι παρακάτω [4.29]:

- Διακοπή χωρητικού ρεύματος (γραμμή μεταφοράς ή αφόρτιστο καλώδιο, πυκνωτές)
- Ενεργοποίηση και επανάζευξη μιας γραμμής μεταφοράς με ανοικτό άκρο
- Διακοπή μικρών επαγωγικών ρευμάτων
- Διακοπή ρευμάτων βραχυκυκλώματος

Ως προς την διαδοχή των διηλεκτρικών δοκιμών, αν δεν διευκρινίζεται διαφορετικά, οι κρουστικές δοκιμές προηγούνται των δοκιμών της επαγόμενης και της εφαρμοσμένης. Επίσης, το πρότυπο IEC απαιτεί η δοκιμή εσωτερικής τάσης να προηγείται αυτής της εξωτερικής τάσης.

Ένας Μ/Σ θεωρείται ότι έχει ολοκληρώσει επιτυχώς τις κρουστικές δοκιμές όταν διαπιστωθεί, μέσω σύγκρισης, ότι υπάρχει κοντινή ομοιότητα μεταξύ των καταγραφών του κρουστικού κύματος που πραγματοποιήθηκε για λόγους βαθμονόμησης και εκείνων που πραγματοποιήθηκαν στα καθορισμένα επίπεδα τάσεων. Επειδή οι κρουστικές δοκιμές προηγούνται των υπολοίπων διηλεκτρικών δοκιμών βιομηχανικής συχνότητας, είναι επίσης δυνατόν σε αυτές να εντοπιστούν μη συμμορφώσεις ή κρυφές αστοχίες που προκλήθηκαν από τις κρουστικές δοκιμές.

Οι κρουστικές τάσεις έχουν τυποποιημένες μορφές και οι οποίες καθορίζονται από τα αντίστοιχα πρότυπα. Η εσωτερική κρουστική τάση έχει μόνο μία χαρακτηριστική κυματομορφή που προσδιορίζεται ως ένα κανονικό πλήρες κύμα. Αντίθετα, η εξωτερική κρουστική τάση έχει τρεις διαφορετικές κυματομορφές:

- Πλήρες κύμα
- Αποκομμένο κύμα ουράς
- Αποκομμένο κύμα μετώπου

Η πολικότητα των κρουστικών τάσεων γενικά είναι αρνητική ώστε να αποφευχθούν υπερπηδήσεις προς την εξωτερική πλευρά των ακροδεκτών του Μ/Σ ή οποιεσδήποτε άλλες εξωτερικές υπερπηδήσεις [4.4].

4.10.1 Δοκιμή εξωτερικής τάσης (Lightning impulse voltage test)

Η διαδικασία της δοκιμής αυτής εξαρτάται από το πρότυπο που ακολουθείται, [4.22] ή [4.3] και τις απαιτήσεις του πελάτη. Γενικά, η διαδοχή της εφαρμογής των τάσεων αρχίζει με κρουστικές μειωμένου επιπέδου και τελειώνει με κρουστικές πλήρους κύματος καθορισμένου πλάτους.

Το IEC καθορίζει:

- Ένα μειωμένο πλήρες κρουστικό κύμα (κρουστική βαθμονόμησης)
- Ένα πλήρες κρουστικό κύμα (LI)
- Ένα ή περισσότερα αποκομμένα κρουστικά κύματα (αν ζητηθούν)
- Δύο πλήρη αποκομμένα κρουστικά κύματα (LIC), αν ζητηθούν
- Δύο πλήρη κρουστικά κύματα (LI)

Αν δεν ζητηθεί κάτι διαφορετικό, το πρότυπο [4.22] διευκρινίζει ότι το αποκομμένο κύμα πρέπει να έχει πλάτος 110% της τιμής του πλήρους κύματος.

Το IEEE καθορίζει:

- Ένα μειωμένο πλήρες κρουστικό κύμα (κρουστική βαθμονόμησης)
- Δύο κρουστικά κύματα μετώπου
- Δύο αποκομμένα κρουστικά κύματα
- Ένα πλήρες κρουστικό κύμα

Το αποκομμένο κύμα πρέπει να είναι στο 110% της τιμής Βασικής Στάθμης Μόνωσης (BIL) και το κύμα μετώπου να είναι σύμφωνα με το πίνακα 5 του προτύπου [4.27].

4.10.2 Δοκιμή εσωτερικής τάσης (Switching impulse voltage test)

Η δοκιμή εσωτερικής τάσης γενικά αποτελείται από:

- Μία κρουστική βαθμονόμησης στο 60% της καθορισμένης στάθμης μόνωσης
- Δύο [4.3] ή τρεις [4.22] κρουστικές σε καθορισμένες στάθμες μόνωσης

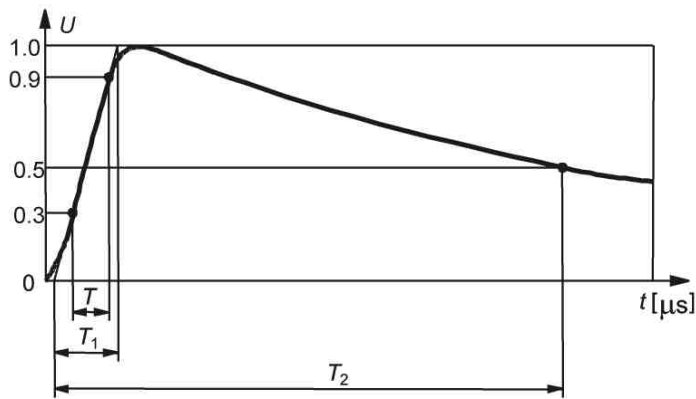
4.10.3 Κρουστικές κυματομορφές

4.10.3.1 Εξωτερική κρουστική

Η κυματομορφή της κρουστικής είναι μη-περιοδική, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.30, και έχει συγκεκριμένο χρόνο ανόδου 1,2μs και διάρκεια ημίσεως εύρους 50μs.

Η κυματομορφή χαρακτηρίζεται από:

- μέτωπο: $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$, ανοχή $\pm 30 \%$ (0,84 έως 1,56 μs)
- ουρά: $T_2 = 50 \mu\text{s}$, ανοχή $\pm 20 \%$ (40 έως 60 μs)
- πολικότητα: αρνητική (για όλους τους Μ/Σ λαδιού)



Σχήμα 4.30 – Κυματομορφή εξωτερικής κρουστικής τάσης κατά IEC και IEEE

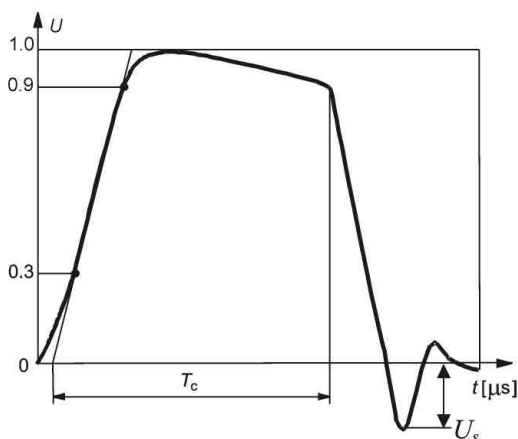
4.10.3.2 Εξωτερική κρουστική αποκομμένη στην ουρά

Στο IEC αναφέρεται:

Η κορυφή του αποκομμένου κύματος είναι κατά 10% υψηλότερη από τη κορυφή του πλήρους κύματος. Ο χρόνος της αποκοπής είναι $T_c = 2$ έως 6μs και η υπερύψωση U_s του πλάτους μετά τον πρώτο μηδενισμό δεν πρέπει να είναι παραπάνω από το 30% από το πλάτος της τάσης δοκιμής (σχήμα 4.31).

Στο IEEE αναφέρεται:

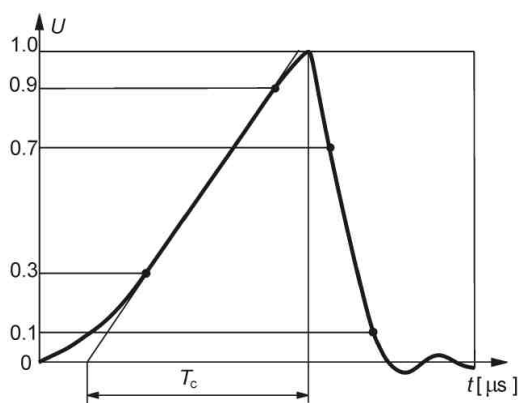
Η τάση δοκιμής και ο χρόνος αποκοπής καθορίζονται στους πίνακες 5 και 6 του προτύπου C57.12.00 [4.27] (παράρτημα Α), και η τάση κορυφής είναι κατά 10% μεγαλύτερη της τάσης κορυφής του πλήρους κύματος. Η υπερύψωση U_s δεν πρέπει να υπερβεί το 30% της τάσης δοκιμής (σχήμα 4.31).



Σχήμα 4.31 – Αποκομμένο στην ουρά κύμα κατά IEC και IEEE [4.4]

4.10.3.3 Εξωτερική κρουστική αποκομμένη στο μέτωπο

Η δοκιμή του αποκομμένου στο μέτωπο κρουστικού κύματος (σχήμα 4.32) απαιτείται μόνο από το πρότυπο IEEE και μόνο μετά από ειδική συμφωνία. Η τάση δοκιμής και ο χρόνος αποκοπής για $BIL \leq 350$ kV καθορίζονται στο πίνακα 5 του προτύπου [4.27] (παράρτημα Α). Η υπερύψωση δεν πρέπει να υπερβεί το 30%.



Σχήμα 4.32 – Αποκομμένο στο μέτωπο κύμα κατά IEEE

4.10.3.4 Εσωτερική κρουστική

Η κυματομορφή χαρακτηρίζεται από:

- Μέτωπο: $T_1 \geq 100 \mu\text{s} \rightarrow T_1 = 1,67 \cdot T$
- Τιμή 90%: $T_d \geq 200 \mu\text{s}$
- $U = 0$: $T_z \geq 500 \mu\text{s}$ ή ακόμα καλύτερα $\geq 1000 \mu\text{s}$ (IEC)
 $T_z \geq 1000 \mu\text{s}$ (IEEE)
όπου $T_z = 0$ χρόνος μέχρι τον πρώτο μηδενισμό

Ο χρόνος μετώπου T_1 πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε να υπάρξει γραμμική διανομή της τάσης κατά μήκος του τυλίγματος.

Πολικότητα:

- αρνητική (για εξοπλισμό λαδιού) κατά IEC 60076-3 [4.22]
- θετική ή αρνητική ή και οι δύο μαζί κατά IEEE [4.3]

Σχετικά με τον χρόνο του πρώτου ανόδου T_1 , αυτός καθορίζεται παρόμοια με αυτόν της εξωτερικής κρουστικής:

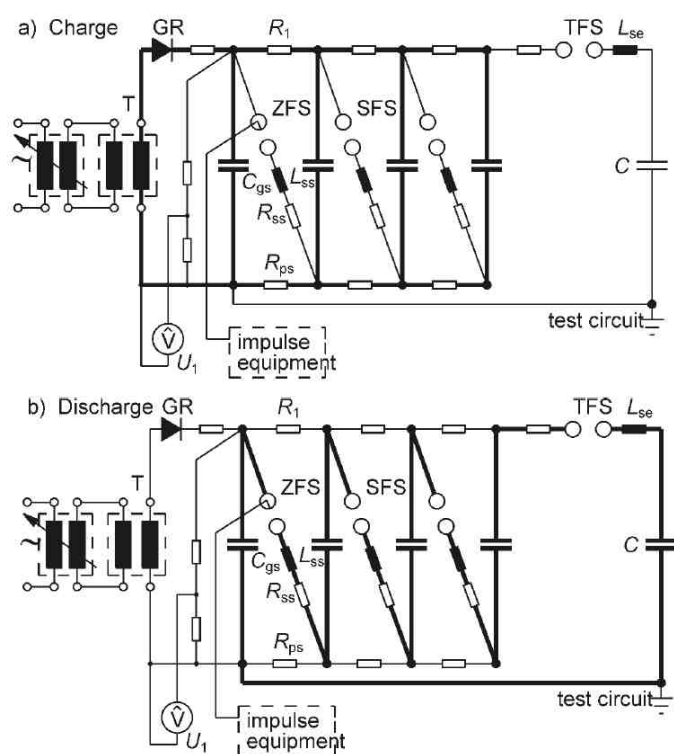
$$T_1 = 1,67 \cdot T$$

όπου $T = 0$ χρόνος μεταξύ του 30% και του 90% της τάσης δοκιμής κατά την αύξηση της τάσης.

4.10.4 Παραγωγή υψηλών κρουστικών τάσεων

Για την παραγωγή υψηλών εξωτερικών και εσωτερικών υπερτάσεων, για τον έλεγχο Μετασχηματιστών, χρησιμοποιούνται κρουστικές γεννήτριες.

Η κρουστική γεννήτρια (ονομάζεται και γεννήτρια Marx) (σχήμα 4.33) αποτελείται από έναν αριθμό πυκνωτών C_{gs} οι οποίοι φορτίζονται εν παραλλήλω και εκφορτίζονται εν σειρά, με την κορυφή της τάσης εκφόρτισης να είναι το άθροισμα των τελικών τάσεων φόρτισης του κάθε ένα πυκνωτή.



Σχήμα 4.33 – Κρουστική γεννήτρια (κύκλωμα Marx), (α): φόρτισης (β): εκφόρτισης [4.4]

Οι πυκνωτές φορτίζονται σε μία ορισμένη τάση, γενικά με εύρος 0-200 kV. Όταν το διάκενο ZFS διασπαστεί τότε όλα τα διάκενα SFS ακολουθούν. Η συνολική τάση εξόδου είναι το άθροισμα των τάσεων φόρτισης των πυκνωτών. Το κύκλωμα δοκιμής συνδέεται μέσω μίας διακοπτόμενης σφαίρας-διακένου TFS η οποία κλείνει το κύριο κύκλωμα εκφόρτισης. Η ενεργοποίηση της σφαίρας διακένου ZFS και συνεπώς η πυροδότηση της

κρουστικής γεννήτριας μπορεί να επέλθει με διάφορους τρόπους. Αυτοί περιλαμβάνουν την:

- αύξηση της τάσης φόρτισης U_1 έως ότου αυτή φτάσει τη τάση διάσπασης του ZFS
- την μείωση της απόστασης του διακένου έχοντας της τάση διάσπασης σταθερή
- την πυροδότηση μέσω κρουστικών συσκευών

4.10.4.1 Παραγωγή αποκομμένων εξωτερικών κρουστικών

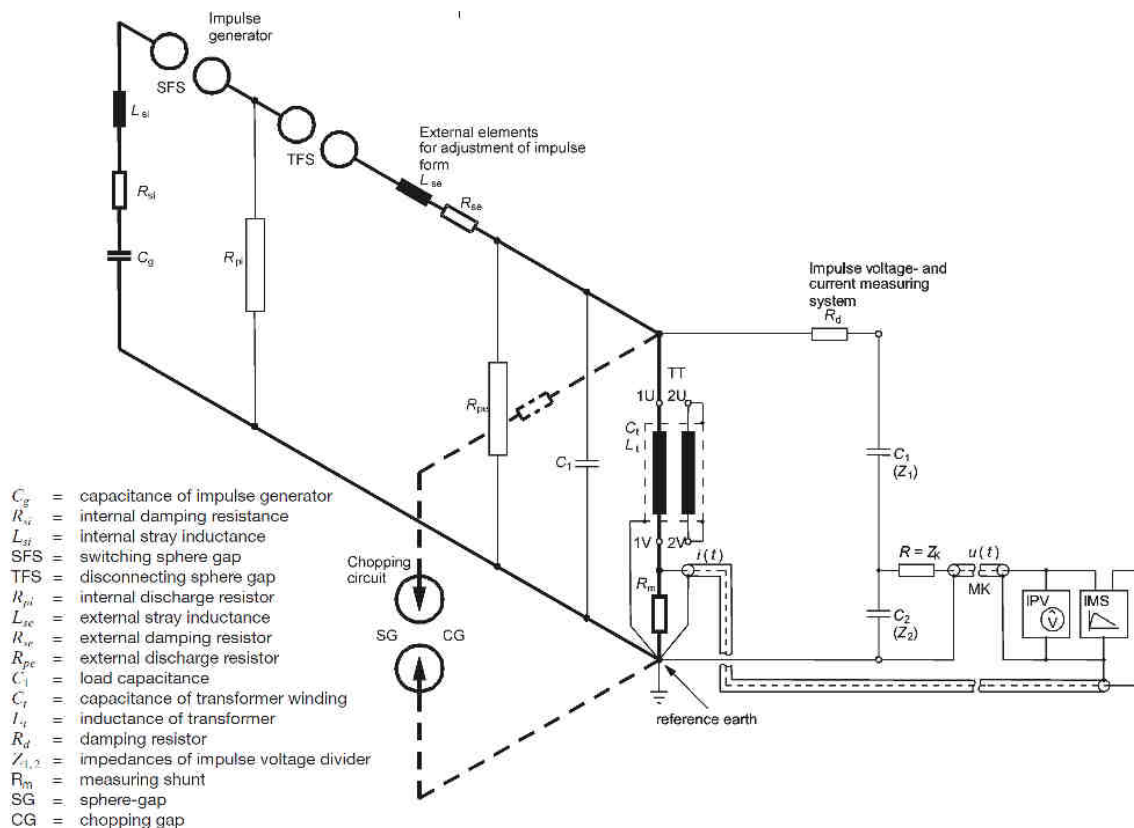
Όσον αφορά τον τρόπο παραγωγής αποκομμένων κρουστικών κυμάτων, ο πιο απλός και φτηνός τρόπος είναι με τη χρήση διακένου ράβδου-ράβδου ο οποίος συνήθως συνδέεται κατευθείαν στους ακροδέκτες του Μ/Σ έτσι ώστε το κενό διάσπασης να είναι παράλληλο στον άξονα του ακροδέκτη και συμμετρικό στο μισό ύψος του μονωτήρα διέλευσης [4.4].

4.10.4.2 Παραγωγή αποκομμένων εξωτερικών κρουστικών

Δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή των εσωτερικών κρουστικών τάσεων [4.4]:

- Η συνήθης μέθοδος είναι με τη παραγωγή της κρουστικής τάσης χρησιμοποιώντας συμβατική κρουστική γεννήτρια και την εφαρμογή της τάσης στο τύλιγμα της υψηλής τάσης (σχήμα 4.33). Το κύκλωμα της κρουστικής δοκιμής είναι βασικά αντίστοιχο με αυτό για την δοκιμή της εσωτερικής κρουστικής (σχήμα 4.34)
- Η δεύτερη μέθοδος είναι με την εκφόρτιση του πυκνωτή μέσω ενός τυλίγματος χαμηλής τάσης. Μερικές φορές αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση μιας κρουστικής γεννήτριας. Η χωρητικότητα της κρουστικής πρέπει να είναι μεταξύ 1 και 2 μF ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση κορυφών υπέρτασης στο αρχικό στάδιο του κρουστικού κύματος.

4.10.5 Συνδεσμολογία κυκλώματος δοκιμής



Σχήμα 4.34 – Βασικό σχέδιο της κρουστικής δοκιμής και του μετρητικού κυκλώματος – Σύνδεση του Μ/Σ για εκτέλεση της δοκιμής εξωτερικής κρουστικής τάσης [4.4]

Το κύκλωμα που απεικονίζεται στο σχήμα 4.34 μπορεί να διαχωριστεί σε τρία ξεχωριστά κυκλώματα [4.4]:

- το κύριο κύκλωμα (κύριο κύκλωμα εκφόρτισης) – απεικονίζεται με έντονες γραμμές στο σχήμα 4.34
- κύκλωμα μέτρησης τάσης – απεικονίζεται με λεπτές γραμμές στο σχήμα 4.34
- το κύκλωμα αποκοπής για τα αποκομμένα κυκλώματα (το οποίο απεικονίζεται με έντονες διακεκομμένες γραμμές στο σχήμα 4.34). Περιλαμβάνει επίσης τις σφαίρες-διακένου που, αν απαιτείται, χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμηση του μετρητικού εξοπλισμού της τάσης.

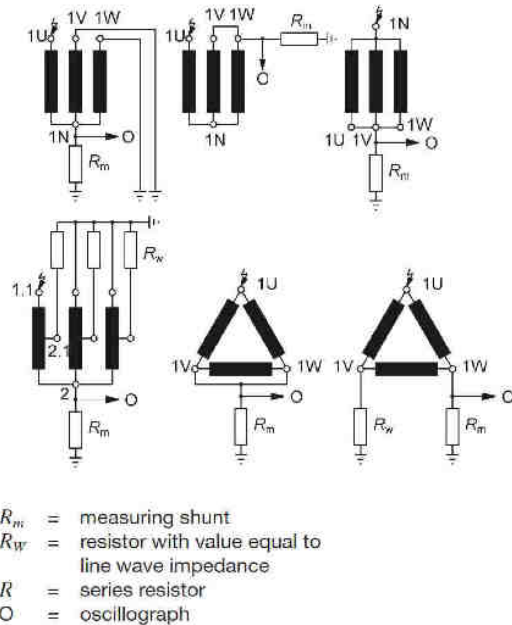
Το κύκλωμα της δοκιμής των εσωτερικών κρουστικών τάσεων παραμένει το ίδιο και με μόνο τις τιμές των ωμικών και των χωρητικών αντιστάσεων να αλλάζουν.

4.10.5.1 Εξωτερική κρουστική τάση

Η διαμόρφωση της συνδεσμολογίας έχει σημαντική επίδραση στη δοκιμή της εξωτερικής κρουστικής ως προς [4.4]:

- τη φόρτιση που θα δεχτεί ο υπό δοκιμή Μ/Σ
- την ευκολία εντοπισμού κάποιας αστοχίας
- την επιτευχθείσα κυματομορφή της κρουστικής

Γενικά, η διαμορφωθείσα συνδεσμολογία πρέπει να επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αντιστοιχεί σε συνθήκες λειτουργίας. Εφαρμόζεται μόνο μονοφασική εξωτερική κρουστική, μιας και αυτή εμφανίζεται πιο συχνά, στο υπό δοκιμή τυλίγμα ενώ τα υπόλοιπα τυλίγματα που δεν ελέγχονται βραχυκυκλώνονται και γειώνονται. Στο σχήμα 4.35 απεικονίζονται τα πιο χρησιμοποιημένα κυκλώματα για την μέτρηση του ρεύματος του τυλίγματος.



Σχήμα 4.35 – Κυκλώματα για τη μέτρηση του ρεύματος του τυλίγματος [4.4]

Θέση μηχανισμού αλλαγής λήψεων

Σύμφωνα με IEC [4.22], εκτός αν έχει συμφωνηθεί κάτι διαφορετικό, προτείνεται η χρήση των δύο ακριανών θέσεων και της κύριας θέσης, μία θέση για κάθε μια από τις τρεις φάσεις. Αν όμως το εύρος μεταβολής των λήψεων είναι ίσο με 5% ή λιγότερο τότε θα επιλέγεται μόνο η κύρια θέση

4.10.5.2 Εσωτερική κρουστική τάση

Η διαμόρφωση των τυλίγμάτων του Μ/Σ αντιστοιχεί σε αυτή της δοκιμής της επαγόμενης τάσης. Η κατανομή της τάσης κατά μήκος του τυλίγματος είναι γραμμική, η ίδια που υπάρχει για την δοκιμή της επαγόμενης τάσης. Η τάση που αντιστοιχεί στο λόγο των τάσεων επάγεται στα τυλίγματα που δεν είναι υπό δοκιμή. Έτσι, δοκιμή σε περισσότερα από ένα τυλίγμα ανά φάση είναι περιττή.

Για την δοκιμή της εσωτερικής κρουστικής, ο Μ/Σ πρέπει να είναι συνδεδεμένος όπως είναι στη κανονική λειτουργία του. Έτσι, ο ουδέτερος γειώνεται και όλοι οι άλλοι ακροδέκτες αφήνονται ανοιχτοί ή συνδέονται με κάποια μετρητική συσκευή.

Η κρουστική, γενικά, εφαρμόζεται στον ακροδέκτη με την υψηλότερη ονομαστική τάση της κάθε φάσης. Αυτή η δοκιμή πρέπει να εκτελείται άμεσα στους ακροδέκτες της υψηλής τάσης, ενώ αν υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν μπορεί να εφαρμοστεί το αυτό, η εφαρμοζόμενη τάση πρέπει να ρυθμίζεται έτσι, ώστε η καθορισμένη τάση δοκιμής να αναπτύσσεται στον ακροδέκτη με την υψηλότερη τάση.

Στους τριφασικούς Μ/Σ, ίσως είναι προτιμότερο να βραχυκυκλώνονται οι άλλοι δύο μη-ελεγχόμενοι ακροδέκτες της υψηλής τάσης μεταξύ τους ώστε να εξασφαλίζεται η ισότιμη επαγόμενη τάση στις μη-δοκιμαζόμενες φάσεις.

Θέση μηχανισμού αλλαγής λήψεων

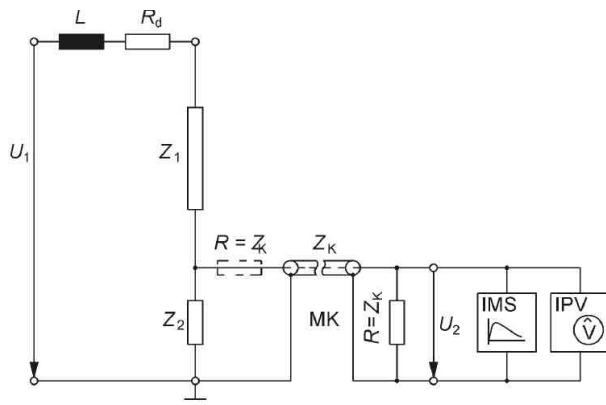
Γενικά, δεν υπάρχει απαίτηση συγκεκριμένης θέσης του μηχανισμού αλλαγής λήψεων για την δοκιμή της εσωτερικής κρουστικής τάσης. Υπάρχει μία εξαίρεση όταν δύο ή περισσότερα τυλίγματα πρέπει να ικανοποιούν απαιτήσεις για τη δοκιμή αυτή. Σε τέτοια περίπτωση η θέση του μηχανισμού αλλαγής λήψεων επιλέγεται αυτή ώστε η επαγόμενη τάση στα μη-ελεγχόμενα τυλίγματα να είναι κοντά στα καθορισμένα από το πρότυπο επίπεδα δοκιμής.

4.10.6 Μέτρηση υψηλών κρουστικών τάσεων

Σημαντικά συστατικά ενός μετρητικού συστήματος είναι [4.4]:

- Συνδέσεις παροχής
- Καταμεριστές τάσης
- Μετρητικά καλώδια ομοαξονικού τύπου
- Μετρητικό σύστημα (παλμογράφος) και βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης κορυφής

Στο πρώτο στάδιο, το κρουστικό κύμα μειώνεται σε επίπεδο το οποίο μπορεί να μετρηθεί από το παλμογράφος και το βολτόμετρο. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται ο καταμεριστής τάσης ο οποίος αποτελείται από την κύρια σύνθετη αντίσταση Z_1 και μια δευτερεύουσα σύνθετη αντίσταση Z_2 . Ο καταμεριστής μπορεί να αποτελείται από ωμικές αντιστάσεις, χωρητικές αντιστάσεις ή και από έναν συνδυασμό των δύο. Ο λόγος του καταμεριστή καθορίζεται από τις δύο σύνθετες αντιστάσεις Z_1 και Z_2 . Η τάση $U_2(t)$ που εμφανίζεται στην δευτερεύουσα σύνθετη αντίσταση Z_2 του καταμεριστή τροφοδοτεί το μετρητικό σύστημα ή το βολτόμετρο μέσω ενός ομοαξονικού χαμηλών απωλειών καλωδίου εφοδιασμένου με μία τερματική αντίσταση (σχήμα 4.36).



- Z_1 = voltage divider primary impedance
- Z_2 = voltage divider secondary impedance
- L = conductor stray inductivity
- R_d = damping resistor
- R = terminating resistor
- MK = coaxial measuring cable
- Z_k = measuring cable wave impedance
- IMS = impulse measuring system
- IPV = impulse peak voltmeter

Σχήμα 4.36 – Εξοπλισμός μέτρησης κρουστικής τάσης [3.4]

Επίσης, σύμφωνα με [4.30], το βολτόμετρο που χρησιμοποιείται στα παραπάνω κύκλωμα μετράει, όπως αναφέρθηκε, την τάση κορυφής και όχι την rms τιμή αφού οι διασπάσεις υλικού συνήθως λαμβάνουν μέρος στην κορυφή του κύματος AC. Επίσης, για τη μέτρηση της τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάκενο σφαιρών ή ηλεκτροστατικό βολτόμετρο.

Σύμφωνα με το νόμο του Paschen, υπάρχει σχέση μεταξύ της τάσης διάσπασης, του μήκους του διακένου και της πυκνότητας του αερίου. Έτσι, τα διεθνή πρότυπα έχουν συσχετίσει το μήκος διακένου και της τάσης διάσπασης. Συνήθως, μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια 3% περίπου. Πρότυπα όπως το IEC 60052 [4.31] περιέχουν πίνακες για σφαίρες διαφόρων διαμέτρων και μηκών διακένου. Όμως, σύμφωνα με [4.32], αν και η μέτρηση

μιας υψηλής τάσης με τη βοήθεια ενός διακένου γενικά βασίζεται στην αρχή πως ένα διάκενο με ορισμένο μήκος διασπάται σε ορισμένη τάση, η τάση διάσπασης του διακένου αυτού δεν έχει απόλυτα καθορισμένη τιμή αλλά παρουσιάζει στατιστική διασπορά που εξαρτάται από τη γεωμετρική μορφή του διακένου, τη μορφή της τάσης και κάποιους άλλους παράγοντες. Έτσι, για εναλλασσόμενη και κρουστική τάση, το διάκενο που παρουσιάζει τη μικρότερη διασπορά στη τάση διάσπασης είναι εκείνο που αποτελείται από δύο σφαίρες της ίδιας διαμέτρου και που η απόστασή τους είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με τη διάμετρό τους.

Ως προς το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο, η λειτουργία του στηρίζεται στη ελκτική δύναμη Coulomb μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που έχουν διαφορά δυναμική μεταξύ τους. Σύμφωνα με [4.32], το ηλεκτροστατικό βολτόμετρο αποτελείται από δύο παράλληλα δισκοειδή ηλεκτρόδια όπου στο ένα από αυτά εφαρμόζεται η τάση για μέτρηση και το άλλο γειώνεται. Στο μέσο του γειωμένου ηλεκτροδίου είναι τοποθετημένος ένας μικρός δίσκος και με τη δύναμη που ασκείται σε αυτόν να είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσεως. Η δύναμη αυτή μετριέται από τη μετακίνηση του μικρού δίσκου που χρειάζεται για να εξισορροπηθούν η ηλεκτροστατική και η ανταγωνιστική δύναμη που συγκρατεί το μικρό δίσκο στη θέση του. Η μετακίνηση αυτή μετριέται από τη απόκλιση μιας φωτεινής δέσμης πάνω σε ένα κάτοπτρο στερεωμένο πάνω στο κινητό σύστημα του μικρού δίσκου. Η περιοχή μετρήσεως του βολτομέτρου μεταβάλλεται με την απόσταση των δύο παραλλήλων δίσκων. Η ακρίβεια του βολτομέτρου χειροτερεύει όσο μεγαλώνει η απόσταση ανάμεσα στους δύο δίσκους και αυτό είναι που περιορίζει την μέγιστη τάση που μπορεί να μετρηθεί με ένα βολτόμετρο του τύπου αυτού.

Παράγοντες σφαλμάτων κατά τη μέτρηση κρουστικών τάσεων

Οι μεγάλες διαστάσεις των σύγχρονων συστημάτων μέτρησης υψηλών τάσεων δεν επιτρέπουν τη θεώρηση των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών απαλλαγμένων από παράσιτα στοιχεία. Οι γειτνιάζουσες διατάξεις, όπως επίσης και οι επιφάνειες της κτιριακής εγκατάστασης δεν μπορούν να απομακρυνθούν ικανοποιητικά με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου και την αναπόφευκτη εμφάνιση αγωγιμοτήτων προς γη και προς τις άλλες επιφάνειες. Επίσης, η ανάγκη για μείωση του μετρούμενου σήματος (λόγω της χρήσης ηλεκτρονικών καταγραφικών οργάνων) και συνεπώς η αύξηση των διαστάσεων των καταμεριστών αλλά και η χρησιμοποίηση ολοένα και αυξανόμενων τάσεων δοκιμής έχουν ως αποτέλεσμα μια ακόμα ισχυρότερη παραμόρφωση του καταγραφόμενου σήματος. Και με την αύξηση των τάσεων δοκιμής δημιουργείται

απαίτηση για μια επαρκή απόσταση μεταξύ του συστήματος παραγωγής και μέτρησης (για επαρκής μόνωση και για απομάκρυνση του συστήματος μέτρησης από το ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο), κάτι που επιτυγχάνεται με την αύξηση του μήκους του αγωγού τάσης και του καλωδίου μέτρησης. Όμως, αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη παραμόρφωση τόσο της παραγόμενης όσο και της μετρούμενης τάσης. Για την μείωση της επίδρασης των ανωτέρω διαταραχών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές όπως η χρησιμοποίηση καλωδίου διπλής θωράκισης, η τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης σε θωρακισμένο μεταλλικό θάλαμο και η χρησιμοποίηση συστήματος γείωσης με χαμηλή αντίσταση και αυτεπαγωγή [4.28].

4.10.7 Μέτρηση κρουστικού ρεύματος

Ταυτόχρονα με την καταγραφή σε παλμογράφο της κρουστικής τάσης πραγματοποιείται και καταγραφή του κρουστικού ρεύματος έτσι ώστε να εντοπιστούν μη-συμμορφώσεις. Η πιο χρησιμοποιημένη μέθοδος βασίζεται στη μέτρηση της πτώσης τάσης σε μία ωμική αντίσταση R_m η οποία είναι συνδεδεμένη σε σχετικό κύκλωμα (σχήματα 4.34 και 4.35). Κατόπιν, το σήμα μέτρησης τροφοδοτείται μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου (όπως και στη μέτρηση της κρουστικής τάσης) στο κρουστικό μετρητικό σύστημα [4.4].

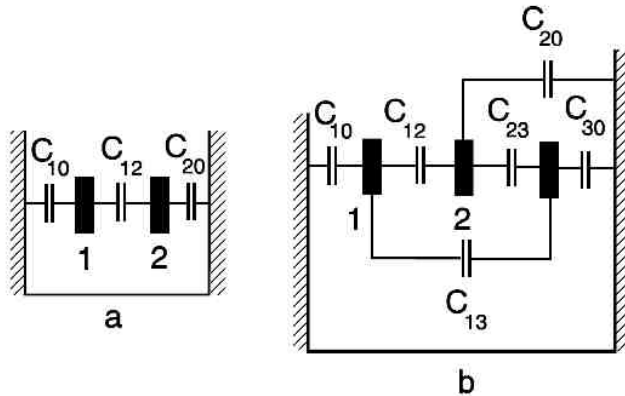
4.11 Προσδιορισμός των χωρητικότητων μεταξύ τυλιγμάτων-γη και μεταξύ των τυλιγμάτων

Ο σκοπός αυτής της μέτρησης είναι ο καθορισμός των χωρητικότητων μεταξύ των τυλιγμάτων και των γειωμένων μερών και μεταξύ των διαφορετικών τυλιγμάτων του Μ/Σ. Η γνώση των τιμών της χωρητικότητας απαιτείται για τον σχεδιασμό της προστασίας του Μ/Σ από τις υπερτάσεις και για τον υπολογισμό της επίδρασης στον Μ/Σ των υπερτάσεων. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιούνται από τον κατασκευαστή για σκοπούς που σχετίζονται με τον σχεδιασμό του Μ/Σ.

Εκτέλεση μέτρησης

Όλοι οι ακροδέκτες του κάθε τυλίγματος συνδέονται μεταξύ τους κατά την διάρκεια της μέτρησης. Οι χωρητικότητες των τυλιγμάτων των Μ/Σ με δύο και με τρία τυλίγματα απεικονίζονται στο σχήμα 4.37. Επειδή οι μερικές χωρητικότητες (C) του σχήματος 4.37

δεν μπορούν να μετρηθούν ξεχωριστά, οι τιμές των προκύπτουσών χωρητικοτήτων (K), οι οποίες λαμβάνονται από τον συνδυασμό των μερικών χωρητικοτήτων, μετρώνται και οι απαιτούμενες μερικές χωρητικότητες υπολογίζονται από τις μετρούμενες τιμές. Η μέτρηση πραγματοποιείται μέσω γέφυρας χωρητικοτήτων.



Σχήμα 4.37 – Χωρητικότητες Μ/Σ, (α):με δύο τυλίγματα (β):με τρία τυλίγματα [4.33]

Ένας Μ/Σ δύο τυλιγμάτων μετράται ως εξής:

- Η χωρητικότητα K_{10} μεταξύ γης και τυλιγματος Νο 1 μετράται, με το τύλιγμα Νο 2 να είναι γειωμένο.

$$K_{10} = C_{10} + C_{12} \quad (4.35)$$

- Η χωρητικότητα K_{20} μεταξύ γης και τυλιγματος Νο 2 μετράται, με το τύλιγμα Νο 1 να είναι γειωμένο.

$$K_{20} = C_{20} + C_{12} \quad (4.36)$$

- Η χωρητικότητα K_{12} από τα διασυνδεδεμένα τυλίγματα Νο 1 και Νο 2 προς της γη μετράται

$$K_{12} = C_{10} + C_{20} \quad (4.37)$$

Οι μερικές χωρητικότητες C_{10} , C_{12} και C_{20} υπολογίζονται με τη λύση των εξισώσεων (4.35), (4.36) και (4.37). Για Μ/Σ με τρία ή περισσότερα τυλίγματα χρησιμοποιείται μία παρόμοια μέθοδος. Ο αριθμός n_k των μερικών χωρητικοτήτων (και συνδυασμοί των μετρήσεων) είναι:

$$n_k = n(n+1)/2 \quad (4.38)$$

όπου n είναι ο αριθμός των τυλιγμάτων

Οι μερικές χωρητικότητες δίνονται ανά φάση, συνεπώς οι τριφασικές τιμές χωρητικότητας που λαμβάνονται από τη μέτρηση διαιρούνται με το 3 [4.33].

4.12 Μέτρηση αντίστασης μηδενικής ακολουθίας

4.12.1 Γενικά

Η τεχνική για τον υπολογισμό των συνθηκών του σφαλμάτων του συστήματος απαιτεί όχι μόνο την γνώση των συμμετρικών συνιστωσών αλλά και τις αντιστάσεις φασικής ακολουθίας των Μ/Σ.

Όπως είναι γνωστό, κάθε διαδικασία υπολογισμού ενός συμμετρικού τριφασικού συστήματος (ρεύματα, τάσεις κτλ.) μπορεί να αναλυθεί για μία φάση μόνο μιας και οι τιμές των άλλων φάσεων είναι απλά μετατοπισμένες κατά 120° και έχουν το ίδιο πλάτος. Αυτό ισχύει επίσης και για ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα. Αλλά για ένα ασύμμετρο τριφασικό σύστημα, που μπορεί να προκύψει εξαιτίας π.χ. ενός μονοφασικού προς τη γη σφάλματος, κάθε φάση πρέπει να θεωρηθεί και να υπολογιστεί ξεχωριστά επειδή οι σύνθετες αντιστάσεις διαφέρουν από αυτές του συμμετρικού δικτύου. Έτσι, οποιοδήποτε τριφασικό σύστημα με ασύμμετρες φάσεις μπορεί να μετατραπεί σε τρία τριφασικά συστήματα, δύο συμμετρικά τριφασικά, ευθύ και αντίστροφο και ένα ομοπολικό [4.34]:

- Ευθύ σύστημα (θετικής ακολουθίας)
- Αντίστροφο σύστημα (αρνητικής ακολουθίας)
- Ομοπολικό σύστημα (μηδενικής ακολουθίας)

Για τη σχεδίαση των κυκλωμάτων ακολουθίας είναι απαραίτητη η γνώση των αντιστάσεων ακολουθίας όλων των συνιστώντων μερών του συστήματος, δηλαδή και των Μ/Σ. Αντιστάσεις ακολουθίας είναι οι αντιστάσεις με τις οποίες αντιδρά το τριφασικό κύκλωμα στο αντίστοιχο σύστημα συμμετρικών συνιστωσών τάσεων ή ρευμάτων.

Η αντίσταση θετικής ακολουθίας είναι η απλούστερη παράμετρος διότι είναι εκείνη την οποία παρουσιάζει το στοιχείο κατά τη μόνιμη συμμετρική κατάσταση λειτουργίας. Δηλαδή, κατά τη μόνιμη συμμετρική κατάσταση λειτουργίας τα στοιχεία του συστήματος λειτουργούν σε “ρυθμό θετικής ακολουθίας” και συνεπώς οι γνωστές αντιστάσεις των στοιχείων αποτελούν τις αντιστάσεις θετικής ακολουθίας.

Τα στατικά στοιχεία, όπως είναι οι Μ/Σ, είναι προφανές ότι παρουσιάζουν την ίδια ανταπόκριση σε ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων ή τάσεων αρνητικής ακολουθίας και σε ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων ή τάσεων θετικής ακολουθίας. Συνεπώς, στους Μ/Σ οι αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας είναι ίσες μεταξύ τους και ίσες με την τάση βραχυκυκλώσεως.

Η ομοπολική αντίσταση εξαρτάται κυρίως από τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων (αστέρας ή τρίγωνο), καθώς και από το αν είναι γειωμένοι ή όχι οι ουδέτεροι κόμβοι. Η

ομοπολική αντίσταση εξαρτάται επίσης, αλλά σε μικρό βαθμό, από το είδος του πυρήνα του Μ/Σ. Αντίθετα από ότι με τις αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας η αντίσταση μηδενικής ακολουθίας είναι γενικά διαφορετική για κάθε πλευρά του Μ/Σ, εφόσον εξαρτάται βασικά από το τύλιγμα της κάθε πλευράς και τη γείωσή του [4.34].

4.12.2 Ορισμός της ομοπολικής αντίστασης

Σύμφωνα με [4.33], η ομοπολική αντίσταση είναι η αντίσταση που μετράται μεταξύ των φάσεων και του ουδετέρου όταν οι ακροδέκτες των φάσεων είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Η ομοπολική αντίσταση μπορεί να αναπτυχθεί μόνο σε Μ/Σ με συνδεσμολογία τυλιγμάτων αστέρα ή ζιγκ-ζαγκ. Η ομοπολική αντίσταση που αποδίδεται σε κάθε μία φάση ξεχωριστά είναι ίση με τρεις φορές τη μετρούμενη τιμή:

$$Z_o = 3 \frac{U}{I} \quad (4.39)$$

όπου:

U είναι η ονομαστική τάση (φάση προς ουδέτερο)

I είναι το ρεύμα ουδετέρου

Η ομοπολική αντίσταση, συνήθως, δίνεται ως ποσοστό της τιμής βάσης της αντίστασης Z_b του Μ/Σ. Η τιμή βάσης της σύνθετης αντίστασης υπολογίζεται ως εξής:

$$Z_b = \frac{U_r^2}{S_r} \quad (4.40)$$

όπου

S_r είναι η ονομαστικής ισχύς

U_r είναι η ονομαστική πολική φάση

Η ανά μονάδα ομοπολική αντίσταση μπορεί να γραφεί ως εξής:

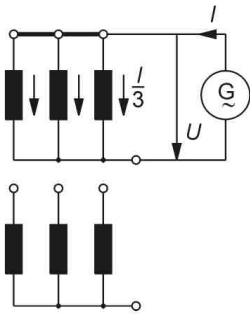
$$z_o = \frac{Z_o}{Z_b} \cdot 100 \quad \text{ή} \quad z_o = Z_o \frac{S_r}{U_r^2} \cdot 100 \quad (4.41)$$

Η ομοπολική αντίσταση, όπως κάθε σύνθετη αντίσταση, έχει δύο συνιστώσες: την ομοπολική ωμική αντίσταση R_o και την ομοπολική επαγωγική αντίσταση X_o . Στη πράξη, επειδή $R_o \ll X_o$, το ωμικό μέρος μπορεί να αμεληθεί. Έτσι, η ομοπολική αντίσταση είναι ίση με την ομοπολική επαγωγική αντίσταση.

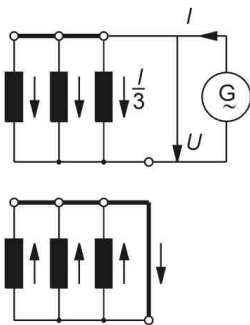
4.12.3 Είδη ομοπολικών αντιστάσεων

Η ομοπολική αντίσταση μπορεί να μετρηθεί ως:

- ανοιχτοκυκλωμένη ομοπολική αντίσταση (με τους ακροδέκτες των άλλων τυλιγμάτων να είναι ανοιχτοί), σχήμα 4.38 ή
- βραχυκυκλωμένη ομοπολική αντίσταση (με τους ακροδέκτες τουλάχιστον ενός τυλίγματος να είναι βραχυκυκλωμένα), σχήμα 4.39

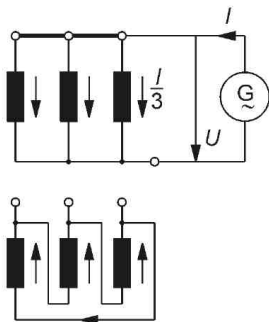


Σχήμα 4.38 – Ανοιχτοκυκλωμένη ομοπολική αντίσταση ενός Μ/Σ συνδεδεμένου κατά αστέρα-αστέρα [4.4]



Σχήμα 4.39 - Βραχυκυκλωμένη ομοπολική αντίσταση ενός Μ/Σ συνδεδεμένου κατά αστέρα-αστέρα [4.4]

Το ομοπολικό ρεύμα κυκλοφορεί στα τυλίγματα ενός Μ/Σ με συνδεσμολογία τριγώνου. Έτσι, όπως φαίνεται από τη πλευρά του τυλίγματος κατά αστέρα, το τύλιγμα κατά τρίγωνο είναι ισοδύναμο με βραχυκυκλωμένο τύλιγμα για το ομοπολικό ρεύμα (σχήμα 4.40)

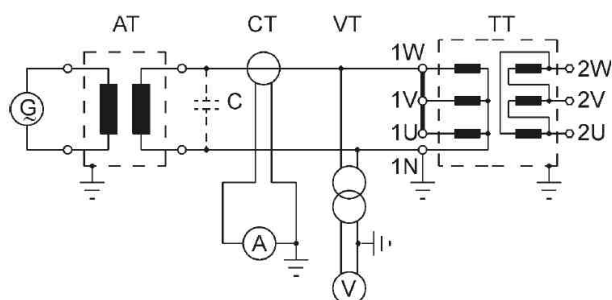


Σχήμα 4.40 – Ομοπολική αντίσταση ενός Μ/Σ με συνδεσμολογία αστέρα-τρίγωνο [4.4]

4.12.4 Διαδικασία μέτρησης

Το γενικό κύκλωμα μέτρησης απεικονίζεται στο σχήμα 4.41 ενώ οι κύριες συνδέσεις για τις μετρήσεις διαφορετικών συνθηκών δικτύου ή συνδεσμολογιών με τα αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα του ομοπολικού συστήματος δίνονται στο σχήμα 4.42.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ομοπολική μαγνητική ροή ίσως προκαλέσει υπερβολική θέρμανση στα μεταλλικά μέρη του Μ/Σ όπως την δεξαμενή και το καπάκι. Γι' αυτό το λόγο, το ρεύμα μέτρησης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το 30% του ονομαστικού ρεύματος. Ρεύματα έως την ονομαστική τιμή αυτού επιτρέπονται για πολύ μικρή περίοδο του χρόνου (μερικά δευτερόλεπτα). Επίσης, η εφαρμοζόμενη τάση δεν πρέπει να υπερβεί τη φασική τάση που εμφανίζεται κατά την διάρκεια της ομαλής λειτουργίας.



- G = voltage source (single-phase)
- C = bank of capacitors (eventually necessary for the compensation of the reactive power, can also be placed near the generator terminals)
- CT = current transformer
- VT = voltage transformer
- TT = transformer under test

Σχήμα 4.41 – Γενικό κύκλωμα μέτρησης της ομοπολικής αντίστασης [4.4]

| Nr. | transformer | measuring circuit | equivalent circuit for the zero sequence system |
|-----|-------------|---|--|
| 6 | | measurement of Z_{012} , 3 open measurement of Z_{013} measurement of Z_{023} | |
| 7 | | measurement of Z_{012} measurement of Z_{013} measurement of Z_{023} | |
| 8 | | measurement of Z_{012} , 3 open measurement of Z_{013} measurement of Z_{023} | $r = \frac{U_1}{U_2}$ |
| 9 | | measurement of Z_{012} measurement of Z_{013} measurement of Z_{023} | $r = \frac{U_1}{U_2}$ ideal transformer |

Σχήμα 4.42 - Κύριες συνδέσεις για τις μετρήσεις διαφορετικών συνθηκών δικτύου ή συνδεσμολογιών με τα αντίστοιχα ισοδύναμα κυκλώματα του ομοπολικού συστήματος [4.4]

4.13 Δοκιμή βραχυκυκλώματος

Με τη δοκιμή βραχυκυκλώματος αποδεικνύεται ότι ο ελεγχόμενος μετασχηματιστής αλλά και οι Μ/Σ του ίδιου τύπου και σχεδιασμού θα αντέξουν ενδεχόμενα βραχυκυκλώματα που θα προκληθούν από βλάβες του δικτύου. Οι Μ/Σ πρέπει να είναι ανθεκτικοί στο θερμικό και δυναμικό αποτέλεσμα του βραχυκυκλώματος. Η θερμική αντοχή στο βραχυκύκλωμα αποδεικνύεται υπολογιστικά ενώ η μηχανική αντοχή πρέπει να αποδειχθεί με δοκιμή. Έτσι, ο κύριος σκοπός της δοκιμής αυτής είναι το να επαληθεύσει την αντοχή του Μ/Σ στις επιβαρύνσεις, κυρίως μηχανικές, που αναπτύσσονται όταν ρεύμα βραχυκυκλώματος διαρρέει τον Μ/Σ.

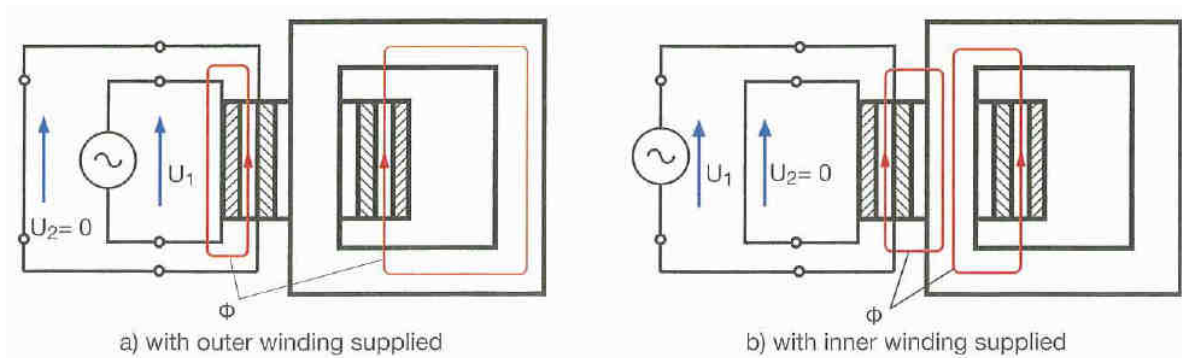
4.13.1 Συνθήκες δοκιμής

Βασικά, υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές για την πραγματοποίηση της δοκιμής βραχυκυκλώματος:

- α) με ένα ήδη εδραιωμένο ρεύμα βραχυκύκλωσης
- β) με ένα μεταγενέστερο ρεύμα βραχυκύκλωσης

Η μέθοδος (α) περιλαμβάνει το κλείσιμο ενός διακόπτη των ακροδεκτών της πηγής για την ηλέκτριση του βραχυκυκλωμένου μετασχηματιστή. Αυτό σημαίνει ότι το δευτερεύον τύλιγμα βραχυκυκλώνεται προκαταβολικά και τροφοδοτείται το πρωτεύον. Αυτή η μέθοδος λειτουργεί αρκετά καλά αν το δευτερεύον τύλιγμα είναι ένα εσωτερικό τύλιγμα ενός ομοκεντρικού πηνίου ενός Μ/Σ τύπου πυρήνα. Η μαγνητική ροή του πυρήνα θα είναι αρκετά χαμηλή, επειδή το πλησιέστερο τύλιγμα είναι βραχυκυκλωμένο και δεν θα επέλθει καμιά αλλαγή στη ροή (σχήμα 4.43.a).

Στην αντίθετη περίπτωση, όπου το πρωτεύον τύλιγμα είναι πιο κοντά στον πυρήνα και το βραχυκυκλωμένο τύλιγμα είναι από την εξωτερική πλευρά, η διαδρομή της ροής είναι εσωτερική (σχήμα 4.43.b). Τότε, θα υπάρξει σημαντική ποσότητα μεταβατικού ρεύματος, το οποίο απαιτείται για την μαγνήτιση του πυρήνα, που θα διαρρέει το πρωτεύον τύλιγμα και θα προστίθεται στο ρεύμα βραχυκυκλώματος. Η κατάσταση αυτή, οδηγεί στη μη-ισορροπία μεταξύ των μαγνητεγερτικών δυνάμεων των δύο τυλιγμάτων καθώς και στην αύξηση των εσωτερικών δυναμικών επιβαρύνσεων [4.35].



Σχήμα 4.43 – Βραχυκυκλωμένος Μ/Σ [4.35].

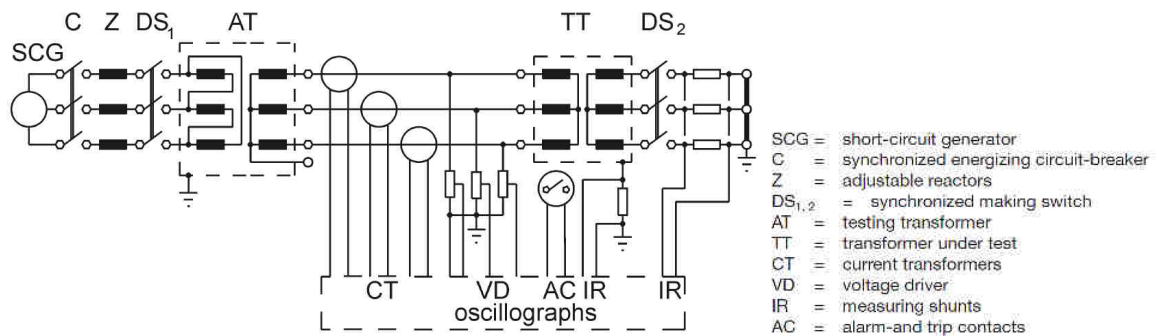
Η μέθοδος (β) περιλαμβάνει το κλείσιμο ενός διακόπτη σε ένα ακροδέκτη υπό σφάλμα για την εφαρμογή του βραχυκυκλώματος στον ενεργοποιημένο από πριν Μ/Σ. Με την υιοθέτηση αυτής της μεθόδου, η δυσκολία της ανεξέλεγκτης μαγνήτισης του πυρήνα παύει να υπάρχει. Έτσι, αρχικά εφαρμόζεται στον Μ/Σ η ονομαστική τάση χωρίς φορτίο και κατόπιν βραχυκυκλώνεται σε προκαθορισμένη γωνία φάσης.

Η μέθοδος (β) πρέπει να προτιμάται όσο το δυνατόν περισσότερο, επειδή αντιπροσωπεύει καλύτερα τις τυπικές συνθήκες κατά την διάρκεια των σφαλμάτων. Αν η σύνθετη αντίσταση της πηγής τροφοδοσίας δεν είναι αμελητέα συγκρινόμενη με αυτή του Μ/Σ, τότε η εφαρμοζόμενη εν κενώ τάση πριν το βραχυκύκλωμα πρέπει να αυξηθεί κατά ορισμένη ποσότητα σε σχέση με την ονομαστική τάση. Ο σκοπός είναι να διατηρηθεί η ονομαστική τάση στους ακροδέκτες του τυλίγματος τη χρονική στιγμή που πραγματοποιείται το βραχυκύκλωμα παρά τη πτώση τάσης που θα συμβεί στο σύστημα τροφοδοσίας και να εδραιωθεί η προκαθορισμένη τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώματος[4.35].

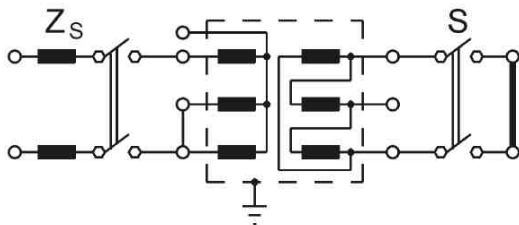
4.13.2 Κύκλωμα δοκιμής

Στο σχήμα 4.44 απεικονίζεται το βασικό κύκλωμα δοκιμής για έναν Μ/Σ δύο τυλιγμάτων και με τριφασική παροχή. Ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο, χρησιμοποιείται είτε ο διακόπτης DS_1 είτε ο DS_2 για την πρόκληση βραχυκυκλώματος[4.33]. Για τριφασικούς Μ/Σ, πρέπει να χρησιμοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο η τριφασική παροχή όταν επιλέγεται η μέθοδος (β). Για Μ/Σ με τυλίγματα συνδεδεμένα κατά αστέρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ισοδύναμη μονοφασική κυκλωματική διάταξη. Με αυτή τη διάταξη, μονοφασική τάση τροφοδοτείται στον Μ/Σ με την σύνδεση ενός από τους ακροδέκτες στη μία από τις γραμμές παροχής του τριφασικού

δικτύου και με τις άλλους ακροδέκτες συνδεδεμένους μαζί με μία άλλη γραμμή του ίδιου δικτύου [4.35], όπως στο σχήμα 4.45.



Σχήμα 4.44 – Βασικό κύκλωμα δοκιμής βραχυκυκλώματος [4.33]



Σχήμα 4.45 – Μονοφασικό κύκλωμα δοκιμής ενός Μ/Σ κατά αστέρα-τρίγωνο[4.33]

4.13.3 Απαιτήσεις δοκιμής

4.13.3.1 Ρεύμα δοκιμής

4.13.3.1.1 Συμμετρικό ρεύμα βραχυκυκλώματος

Σύμφωνα με [4.36] και [4.4], ο υπολογισμός της rms τιμής του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης γίνεται ως εξής:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3}(Z_t + Z_s)} \quad (4.42)$$

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S} \quad [\Omega/\text{φάση}] \quad (4.43)$$

όπου:

Z_s η σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης του συστήματος

U_s η ονομαστική τάση του συστήματος σε kV

S η φαινόμενη ισχύς βραχυκυκλώματος του συστήματος σε MVA

U και Z_t ορίζονται ως εξής:

U είναι η ονομαστική τάση του υπό συζήτηση τυλίγματος ή η τάση ορισμένης λήψης, αν η δοκιμή εκτελείται σε λήψη διαφορετική από τη κύρια λήψη.

Z_t είναι η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος του Μ/Σ αναγόμενη στο υπό συζήτηση τύλιγμα. Υπολογίζεται ως εξής:

$$Z_t = \frac{z_t \cdot U_r^2}{100 \cdot S_r} \quad (4.44)$$

όπου:

z_t η μετρούμενη σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης αναγόμενη στο υπό συζήτηση τύλιγμα (%)

S_r η ονομαστική ισχύς του Μ/Σ (MVA)

4.13.3.1.2 Ασύμμετρο ρεύμα δοκιμής κορυφής \hat{i}

Η δοκιμή πρέπει να εκτελείται με το ρεύμα να έχει την μέγιστη ασυμμετρία όσον αφορά την υπό δοκιμή φάση. Το πλάτος \hat{i} της πρώτης κορυφής του ασύμμετρου ρεύματος δοκιμής υπολογίζεται ως εξής [4.36]:

$$\hat{i} = I \cdot k\sqrt{2} \quad (4.45)$$

όπου το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από τον τύπο (4.42).

Ο συντελεστής $k\sqrt{2}$ ή συντελεστής κορυφής εξαρτάται από το λόγο X/R

όπου:

X το άθροισμα των επαγωγικών αντιστάσεων του Μ/Σ και του συστήματος (X_t + X_s) σε Ω

R το άθροισμα των ωμικών αντιστάσεων του Μ/Σ και του συστήματος (R_t + R_s) σε Ω, όπου η R_t είναι αυτή στη θερμοκρασία αναφοράς

Αν η σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης του συστήματος συμπεριλαμβάνεται στον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ο λόγος X/R του συστήματος, αν δεν καθορίζεται, θα θεωρείται ίσος με αυτόν του Μ/Σ. Ο πίνακας 4.2 καθορίζει τη τιμή του συντελεστή κορυφής σε συνάρτηση με τον λόγο X/R.

| X/R | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 14 |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $k \cdot \sqrt{2}$ | 1,51 | 1,64 | 1,76 | 1,95 | 2,09 | 2,19 | 2,27 | 2,38 | 2,46 | 2,55 |

Πίνακας 4.2 – Τιμές του συντελεστή κορυφής (για ενδιάμεσες τιμές, ο συντελεστής καθορίζεται με γραμμική παρεμβολή, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του X/R ο συντελεστής κορυφής είναι ίσος με 2,55 και 2,69 για Μ/Σ κατηγορίας II και III αντίστοιχα) [4.36]

4.13.3.2 Ανοχές ρευμάτων

Αν η διάρκεια της δοκιμής είναι επαρκώς μεγάλη, το ασύμμετρο ρεύμα πρώτου πλάτους κορυφής \hat{i} θα μεταβληθεί σε συμμετρικό ρεύμα με rms τιμή I .

Επίσης [4.4]:

- Η τιμή του ρεύματος κορυφής \hat{i} δεν πρέπει να αποκλίνει περισσότερο από 5% σύμφωνα με [4.36]
- Η μέγιστη απόκλιση του συμμετρικού ρεύματος I είναι 10% σύμφωνα με [4.36] ή 5% σύμφωνα με [4.3]

4.13.3.3 Συχνότητα δοκιμής

Η συχνότητα της τροφοδοσίας πρέπει να είναι η ονομαστική συχνότητα του Μ/Σ. Αν όμως συμφωνηθεί μεταξύ κατασκευαστή και πελάτη, είναι δυνατός ο έλεγχος Μ/Σ συχνότητας 60Hz με παροχή συχνότητας 50Hz ή και το αντίστροφο εφόσον οι καθορισμένες τιμές των ρευμάτων επιτευχθούν [4.36].

4.13.4 Διαδικασία δοκιμής

Η χρονική στιγμή της ζεύξης του διακόπτη ρυθμίζεται με ένα συγχρονισμένο διακόπτη ώστε να επιτευχθεί το μέγιστο ασύμμετρο ρεύμα στη υπό δοκιμή φάση. Για να υπάρξει αυτή η μέγιστη ασυμμετρία του ρεύματος, πρέπει η ζεύξη του διακόπτη να επέλθει τη χρονική στιγμή όπου η τάση που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο τύλιγμα διέρχεται από το μηδέν [4.4].

Βαθμονόμηση

Πρέπει να εκτελούνται δοκιμές βαθμονόμησης ώστε να διαπιστώνεται η απαιτούμενη πηγή τάσης ή οι χρόνοι ζεύξεων σε επίπεδα τάσεων όχι μεγαλύτερα του 50% της τιμής εκείνης που θα προκαλούσε το απαιτούμενο συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης [4.4].

Όρια τάσης

Αν χρησιμοποιείται η μέθοδος (β) του μεταγενέστερου ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση δεν πρέπει να υπερβεί κατά 1,15 φορές (σύμφωνα με IEEΕ 1,10 φορές) της ονομαστικής τάσης του τυλίγματος. [4.4].

Μετρήσεις ρεύματος και τάσης

Πρέπει να λαμβάνονται παλμογραφικές καταγραφές για τον έλεγχο των τιμών του ασύμμετρου ρεύματος δοκιμής \hat{i} και του συμμετρικού ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Τα ρεύματα του πρωτεύοντος μετρώνται με τη χρήση ειδικών Μ/Σ έντασης, οι οποίοι είναι ικανοί στο να μεταδίδουν μεταβατικά φαινόμενα χωρίς παραμόρφωση. Τα ρεύματα του δευτερεύοντος (δηλαδή στη γειωμένη και βραχυκυκλωμένη πλευρά του υπό δοκιμή Μ/Σ) μετρώνται μέσω ειδικών διακλαδώσεων (shunts) ενώ η τάση του υπό δοκιμή Μ/Σ καθορίζεται με τη χρήση RC καταμεριστών (σχήμα 4.44) [4.4].

Θέση χειριστηρίου λήψεων, αριθμός επιμέρους δοκιμών και διάρκεια δοκιμής

Σύμφωνα με IEC 60076-5 [4.36]:

Για Μ/Σ κατηγοριών I (25 kVA έως 2500 kVA) και II (2501 kVA έως 100000 kVA), το πρότυπο καθορίζει ένα σύνολο εννέα επιμέρους δοκιμών για ένα τριφασικό Μ/Σ. Όσον αφορά Μ/Σ με θέσεις λήψεων, τότε οι επιμέρους δοκιμές εκτελούνται σε διαφορετικές θέσεις του χειριστηρίου λήψεων: τρεις δοκιμές στη θέση λήψης που αντιστοιχεί στον υψηλότερο λόγο μετασχηματισμού, τρεις δοκιμές στη κύρια θέση λήψης και τρεις δοκιμές στη θέση λήψης που αντιστοιχεί στο μικρότερο λόγο μετασχηματισμού. Κάθε επιμέρους δοκιμή πρέπει να έχει διάρκεια 0,5 sec για Μ/Σ κατηγορίας I και 0,25 sec για Μ/Σ κατηγορίας II, με ανοχή και για τις δύο παραπάνω κατηγορίες $\pm 10\%$.

Για Μ/Σ κατηγοριών III (μεγαλύτεροι από 1000000 kVA), το ανωτέρω πρότυπο προτείνει τη συμφωνία μεταξύ κατασκευαστή και πελάτη σχετικά με τον αριθμό των δοκιμών και τη θέση του χειριστηρίου αλλαγής λήψεων. Αλλά όμως, για την καλύτερη εξομοίωση των επιδράσεων των επαναλαμβανόμενων βραχυκυκλωμάτων που ενδεχόμενα συμβούν κατά τη λειτουργία του Μ/Σ, προτείνεται ο αριθμός των επιμέρους δοκιμών σε ένα τριφασικό Μ/Σ να είναι εννιά.

4.13.5 Εντοπισμός σφαλμάτων, αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Ο εντοπισμός σφαλμάτων και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της δοκιμής βασίζεται κυρίως στις παλμογραφικές καταγραφές της έντασης και τάσης, συνδυασμένες με επιπρόσθετες μετρήσεις και δοκιμές, και τέλος με τον οπτικό έλεγχο του ενεργού μέρους αφού πρώτα αφαιρεθεί από την δεξαμενή του Μ/Σ.

Το αποδεικτικό υλικό για την ικανοποιητική λειτουργία του Μ/Σ περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνθήκες [4.35]:

- Τα παλμογραφήματα των τάσεων που εφαρμόζονται μεταξύ των ακροδεκτών και των ρευμάτων βραχυκύκλωσης να εμφανίζονται κανονικά σχηματοποιημένες, χωρίς αιφνίδιες αλλαγές ή ανωμαλίες, που να φανερώνουν αλλαγές στην σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης, κατά τη διάρκεια της δοκιμής
- Να μην παρατηρούνται αφύσικα φαινόμενα κατά τη διάρκεια της δοκιμής αλλά και να μην εντοπιστούν αέρια στον ηλεκτρονόμο στάθμης αερίου
- Η επαγωγική αντίσταση της κάθε φάσης μετά από κάθε επιμέρους δοκιμή δεν θα διαφέρει από την αρχική τιμή εκείνη που μετρήθηκε στην αρχική κατάσταση περισσότερο από 2% για Μ/Σ κατηγορίας I και II, και 1% για Μ/Σ κατηγορίας III[4.35]. Το όριο αυτό για τους Μ/Σ των κατηγοριών I και II, σύμφωνα με [4.36] μεταβάλλεται σε 7,5% εφόσον ο Μ/Σ έχει μη-κυκλικά, ομόκεντρα πηνία και η τάση βραχυκύκλωσής του είναι 3% ή μεγαλύτερη.
- Οι διηλεκτρικές δοκιμές να έχουν επαναληφτεί επιτυχώς
- Το ρεύμα μαγνήτισης που μετράται μετά το πέρας των δοκιμών να μην διαφέρει από εκείνο που μετρήθηκε πριν τις δοκιμές
- Οι οπτικοί έλεγχοι του ενεργού μέρους, το οποίο έχει αφαιρεθεί από τη δεξαμενή, δεν θα αποκαλύπτει αστοχίες, όπως μετατόπιση ελασμάτων, παραμόρφωση τυλιγμάτων, μετακινήσεις ακροδεκτών πηνίου, συνδέσεων και δομών που θα μπορούσαν να διακινδυνεύσουν την ομαλή λειτουργία του Μ/Σ.
- Να μην υπάρχουν ίχνη ηλεκτρικών εκκενώσεων [4.35].

4.14 Προσδιορισμός των επιπέδων θορύβου

Τα αίτια δημιουργίας του θορύβου έχουν ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 1.3.9. Λόγω του ότι οι Μ/Σ τοποθετούνται και σε πυκνά κατοικημένες περιοχές, υπάρχει αυξημένη ανησυχία για τις εκπομπές θορύβου από αυτούς. Γι' αυτό το λόγο στις περισσότερες χώρες έχουν θεσπιστεί μέγιστες επιτρεπτές οριακές τιμές θορύβου.

4.14.1 Μέτρηση και μετρητικό κύκλωμα

Το επίπεδο θορύβου μετράται ως στάθμη ηχητικής πίεσης (sound pressure level) ή ως φυσιολογική στάθμη ηχητικής έντασης (normal sound intensity level), τα οποία ορίζονται στο πρότυπο IEC 60076-10 [4.37]:

- Στάθμη ηχητικής πίεσης, L_p (dB). Δίνεται από τον τύπο:

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} \quad (4.46)$$

όπου:

- p ηχητική πίεση (κυμαινόμενη πίεση που υπερτίθεται στη στατική πίεση μέσω της παρουσίας του θορύβου)
- p_0 ηχητική πίεση αναφοράς και ίση με $20 \cdot 10^{-6}$ Pa

- Στάθμη ηχητικής έντασης, L_I (dB). Δίνεται από τον τύπο:

$$L_I = 10 \lg \frac{|I_n|}{I_0} \quad (4.47)$$

όπου:

- I_n συνιστώσα της ηχητικής έντασης (διάνυσμα που περιγράφει την ποσότητα και την κατεύθυνση της ροής της ενέργειας του θορύβου σε συγκεκριμένη θέση) σε διεύθυνση φυσιολογική της μετρούμενης επιφάνειας
- I_0 ηχητική ένταση αναφοράς και ίση με $1 \cdot 10^{-12}$ Wm^{-2}

Σύμφωνα με [4.4], συνήθως πραγματοποιούνται μετρήσεις της Α-σταθμισμένης στάθμης ηχητικής πίεσης, ενώ μετρήσεις της στάθμης ηχητικής έντασης πραγματοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις όπου υπάρχει πληθώρα πηγών θορύβου οι οποίες καθιστούν δύσκολη ή ακόμα αδύνατη τη συμβατική (Α-σταθμισμένης στάθμης ηχητικής πίεσης) μέτρηση. Για παράδειγμα, αν η διαφορά της στάθμης θορύβου και του υπόβαθρου θορύβου είναι μικρότερη από 3dB.

Σύμφωνα με [4.37], ο υπό δοκιμή Μ/Σ πρέπει να είναι ενεργοποιημένος (είτε σε συνθήκες φορτίου είτε εν κενώ) όπως έχει συμφωνηθεί μεταξύ κατασκευαστή και πελάτη. Οι αποδεκτοί συνδυασμοί είναι οι εξής:

- Μ/Σ ενεργοποιημένος, εξοπλισμός ψύξης και αντλίες εκτός λειτουργίας
- Μ/Σ ενεργοποιημένος, εξοπλισμός ψύξης και αντλίες εκτός λειτουργίας
- Μ/Σ ενεργοποιημένος, εξοπλισμός ψύξης εκτός λειτουργίας και αντλίες σε λειτουργία
- Μ/Σ απενεργοποιημένος, εξοπλισμός ψύξης και αντλίες σε λειτουργία

Το πρότυπο IEEE [4.3] δηλώνει ότι ο εξοπλισμός ψύξης θα λειτουργεί κατάλληλα για την ονομαστική ισχύ του υπό δοκιμή Μ/Σ.

Για τη μέτρηση του εν κενώ θορύβου (μέτρηση της στάθμης ηχητικής πίεσης σύμφωνα με IEC και IEEE ή μέτρηση στάθμης ηχητικής έντασης σύμφωνα με IEC), το κύκλωμα

μέτρησης είναι παρόμοιο με αυτό της μέτρησης των απωλειών σιδήρου. Για τη μέτρηση του θορύβου υπό φορτίο σύμφωνα με IEC [4.37], το κύκλωμα μέτρησης είναι παρόμοιο με αυτό της μέτρησης των απωλειών φορτίου. Για να λάβουμε τη συνολική στάθμη θορύβου, ο θόρυβος υπό φορτίο πρέπει να προστεθεί σε αυτόν του εν κενώ με τη χρήση της παρακάτω εξίσωσης [4.4]:

$$L_{WASN} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{0,1L_{WAUN}} + 10^{0,1L_{WAIN}} \right) \quad (4.48)$$

όπου:

L_{WASN} είναι η A-σταθμισμένη στάθμη ηχητικής ισχύος του Μ/Σ σε ονομαστική τάση, ονομαστική ένταση και ονομαστική συχνότητα (στάθμη θορύβου υπό φορτίο)

L_{WAUN} είναι η A-σταθμισμένη στάθμη ηχητικής ισχύος του Μ/Σ σε ονομαστική τάση, ονομαστική συχνότητα και εν κενώ (στάθμη θορύβου εν κενώ)

L_{WAIN} είναι η A-σταθμισμένη στάθμη ηχητικής ισχύος ονομαστικού ρεύματος

με τη στάθμη ηχητικής ισχύος να δίνεται από την εξίσωση:

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (4.49)$$

όπου:

W ρυθμός στον οποίο ο ήχος μέσω του αέρα εκπέμπεται από τη πηγή (W)

W_0 ηχητική ισχύς αναφοράς και ίση με $1 \cdot 10^{-12} W$

Εξαιτίας της συσχέτισης του θορύβου λόγω του ρεύματος φορτίου και του θορύβου του ρεύματος μαγνήτισης, η πραγματική στάθμη ηχητικής ισχύος L_{WASN} θα είναι μικρότερη από εκείνη που λαμβάνεται από την παραπάνω εξίσωση. Οι διαφορές, όμως, είναι εντός των αβεβαιοτήτων της μέτρησης [4.37].

4.14.2 Διαδικασία μέτρησης

4.14.2.1 Μετρητικά σημεία και όργανα μέτρησης

Σύμφωνα με [4.4] και [4.37]:

- Για Μ/Σ με ψύξη φυσική ροή αέρα (ή με τη βεβαιωμένη ροή αέρα εκτός λειτουργίας), το καθορισμένο περίγραμμα των σημείων μέτρησης πρέπει να απέχει 0,3m από την κύρια επιφάνεια εκπομπής.

- Για Μ/Σ με ψύξη βεβιασμένη ροή αέρα, το καθορισμένο περίγραμμα πρέπει να απέχει 2m από την κύρια επιφάνεια εκπομπής.
- Για Μ/Σ με ύψος δεξαμενής μικρότερο από 2,5m, οι μετρήσεις θα πραγματοποιούνται σε καθορισμένο περίγραμμα που βρίσκεται σε οριζόντιο επίπεδο ύψους μισού από το ύψος της δεξαμενής του Μ/Σ.
- Για Μ/Σ με ύψος δεξαμενής μεγαλύτερο από 2,5m, θα πραγματοποιούνται δύο σειρές μετρήσεων σε καθορισμένο περίγραμμα σημείων που βρίσκονται σε οριζόντια επίπεδα σε ύψος 1/3 και 2/3 αντίστοιχα του ύψους της δεξαμενής.

Οι θέσεις του μικροφώνου θα βρίσκονται σε ισαπέχουσα, και όχι περισσότερο από 1m μεταξύ τους, σημεία του καθορισμένου περιγράμματος. Θα υπάρχουν το λιγότερο έξι θέσεις μικροφώνου. Σύμφωνα με [4.4], η μέτρηση θα γίνεται με τη χρήση ενός ηχομέτρου τύπου 1 που υπακούει στο πρότυπο IEC 60651 και διακριβώνεται σύμφωνα με το πρότυπο ISO 3746. Επίσης ο μετρητικός εξοπλισμός πρέπει να διακριβώνεται με ένα διακριβωτή πριν και μετά των μετρήσεων. Αν διαπιστωθεί όμως τότε ότι υπάρχει απόκλιση μεγαλύτερη από 0,3dB, σύμφωνα με το IEC [4.37], τότε οι μετρήσεις θεωρούνται άκυρες.

4.14.2.2 Υπολογισμός της περιβαλλοντολογικής διόρθωσης K

Η περιβαλλοντολογική διόρθωση K αναφέρεται στην επίδραση των ανεπιθύμητων ανακλάσεων του ήχου από τα όρια του δωματίου και από τα αντικείμενα που ενδεχόμενα υπάρχουν κοντά στον υπό δοκιμή Μ/Σ. Το πλάτος του K εξαρτάται κυρίως από το λόγο της περιοχής απορρόφησης του ήχου του δωματίου δοκιμής A προς την περιοχή της μετρούμενης επιφάνειας S. Ένας τρόπος υπολογισμού της διόρθωσης αυτής είναι μέσω του ακόλουθου τύπου:

$$K = 10 \log \left(1 + \frac{4}{A/S} \right) \quad (4.50)$$

όπου το S δίνεται ανάλογα από τους ακόλουθους τύπους:

$$S = 1,25hl_m \quad \text{για μετρήσεις σε απόσταση } 0,3\text{m} \quad (4.51)$$

$$S = (h+2)l_m \quad \text{για μετρήσεις σε απόσταση } 2\text{m} \quad (4.52)$$

$$S = (h+1)l_m \quad \text{για μετρήσεις σε απόσταση } 1\text{m} \quad (4.53)$$

$$S = \frac{3}{4\pi} l_m^2 \quad \text{για αποστάσεις μεγαλύτερες από τις ανωτέρω} \quad (4.54)$$

όπου:

- l_m το μήκος του καθορισμένου περιγράμματος
- h το ύψος του Μ/Σ (χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι μονωτήρες διέλευσης σε περίπτωση που αυτοί υπάρχουν)

και η τιμή του A δίνεται από το τύπο: $A = \alpha S_v$

όπου:

- α ο συντελεστής μέσης ακουστικής απορρόφησης (και δίνεται από πίνακα του προτύπου IEC [4.37])
- S_v η συνολική επιφάνεια του δωματίου δοκιμής

4.14.2.3 Μέτρηση της στάθμης του υπόβαθρου θορύβου

Η Α-σταθμισμένη στάθμη ηχητικής πίεσης του υπόβαθρου πρέπει να μετράται αμέσως πριν τις μετρήσεις στον υπό δοκιμή Μ/Σ. Τα ύψη των μικροφώνων πρέπει να είναι τα ίδια με αυτά της μέτρησης του Μ/Σ και οι μετρήσεις του υπόβαθρου θορύβου να λαμβάνονται σε σημεία του καθορισμένου περιγράμματος. Ο θόρυβος υπόβαθρου είναι ο αριθμητικός μέσος όρος αυτών των μετρήσεων, αν η διακύμανση αυτών είναι μικρότερη από 5dB [4.4]. Σε διαφορετική περίπτωση, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος [4.37]:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{bgAi}} \right) \quad (4.55)$$

όπου:

- M ο αριθμός των σημείων μέτρησης (μεταξύ 1 και 10)
- L_{bgAi} η μετρούμενη Α-σταθμική στάθμη ηχητικής πίεσης στο σημείο μέτρησης i

Κύρια μέτρηση

Αμέσως μετά τις μετρήσεις του υπόβαθρου θορύβου, εκτελούνται μετρήσεις της Α-σταθμισμένης ηχητικής πίεσης σε κάθε θέση μέτρησης. Η γρήγορη ανταπόκριση της ένδειξης του ηχομέτρου πρέπει να χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση και αποφυγή των σφαλμάτων μέτρησης εξαιτίας του μεταβατικού υπόβαθρου θορύβου.

Η μη-διορθωμένη μέση Α-σταθμισμένη στάθμη ηχητική ισχύος $\overline{L_{pA0}}$ πρέπει να υπολογιστεί από τις μετρούμενες Α-σταθμικές στάθμες ηχητικής πίεσης L_{pAi} . Αν το εύρος των τιμών αυτών δεν υπερβεί τα 5 dB, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέση αριθμητική τιμή. Σε διαφορετική περίπτωση, χρησιμοποιείται η ακόλουθη εξίσωση [4.37]:

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pAi}} \right) \quad (4.56)$$

όπου:

N ο αριθμός των σημείων μέτρησης

L_{pAi} η μετρούμενη Α-σταθμική στάθμη ηχητικής πίεσης στο σημείο μέτρησης i

Μετά την μέτρηση, πραγματοποιείται μία δεύτερη μέτρηση του υπόβαθρου θορύβου.

Η δοκιμή θεωρείται επιτυχής εφόσον ικανοποιούνται τα κριτήρια όπως αυτά αναφέρονται στον πίνακα 4.3 .

| $\overline{L_{pA0}}$ – τη μέγιστη $\overline{L_{bgA}}$ | αρχική $\overline{L_{bgA}}$ – τελική $\overline{L_{bgA}}$ | Αποτέλεσμα δοκιμής |
|--|---|--------------------|
| ≥ 8 dB | - | Επιτυχής |
| < 8 dB | < 3 dB | Επιτυχής |
| < 8 dB | > 3 dB | Επανάληψη (σημ.) |
| < 3 dB | - | Επανάληψη (σημ.) |

Σημ.: Εκτός αν η τιμή $\overline{L_{pA0}}$ είναι μικρότερη από την εγγυημένη τιμή, οπότε σε αυτή τη περίπτωση η δοκιμή θεωρείται επιτυχής.

Πίνακας 4.3 – Πίνακας κριτηρίων αποδοχής [4.37]

Η διορθωμένη μέση Α-σταθμική στάθμη ηχητικής πίεσης $\overline{L_{pA}}$ υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\overline{L_{pA}} = 10 \log \left(10^{0,1\overline{L_{pA0}}} - 10^{0,1\overline{L_{pgA}}} \right) - K \quad (4.57)$$

όπου $\overline{L_{pgA}}$ είναι η μικρότερη από τις δύο υπολογισμένες τιμές της μέσης Α-σταθμισμένης στάθμης ηχητικής πίεσης υπόβαθρου.

Υπολογισμός στάθμης ηχητικής ισχύος

Σύμφωνα με [4.37], η Α-σταθμική στάθμη ηχητικής ισχύος μπορεί να υπολογιστεί βάσει του παρακάτω τύπου:

$$L_{wA} = \overline{L_{pA}} + 10 \cdot \log \frac{S}{S_0} \quad (4.58)$$

όπου:

S η επιφάνεια μέτρησης (m^2) που υπολογίζεται από τους τύπους (4.51) έως (4.54)

S_0 η περιοχή αναφοράς και ίση με $1 m^2$

4.14.3 Αβεβαιότητα μέτρησης

Αν ο μετρητικός εξοπλισμός χρησιμοποιηθεί σωστά και σύμφωνα με τα πρότυπα, η αβεβαιότητα μέτρησης πρέπει να είναι μικρότερη από 1 dB. Αλλά, οι ακόλουθες παράμετροι ίσως επιδράσουν δραστικά την αβεβαιότητα μέτρησης:

- ρύθμιση τάσης: μεταβολή της τάσης κατά 1% έχει ως αποτέλεσμα σφάλμα του 0,5 dB για επαγωγές περίπου 1,6 T και 1 dB για επαγωγές περίπου 1,8 T
- ρύθμιση συχνότητας: μεταβολή κατά 1 Hz οδηγεί σε σφάλμα 0,4 dB
- αρμονικές στη τάση διέγερσης
- ενδεχόμενη παραμένουσα μαγνήτιση στο πυρήνα (έως 3 dB αν η έναρξη της δοκιμής γίνει αρκετά νωρίς)
- σφάλμα στις αποστάσεις μέτρησης
- η απόσταση μεταξύ κάτω μέρους της δεξαμενής και του πατώματος είναι πολύ μικρή (ο θόρυβος αυξάνεται έως 4 dB)
- ανάκλαση από τοιχώματα της περιοχής μέτρησης
- η διαφορά μεταξύ του θορύβου υπόβαθρου και του θορύβου από τον Μ/Σ είναι πολύ μικρή

4.15 Μέτρηση αρμονικών του ρεύματος μαγνήτισης

Σύμφωνα με [4.38], οι αρμονικές βιομηχανικής συχνότητας υπάρχουν στο σύστημα διανομής εξαιτίας της επικράτησης των μη-γραμμικών φορτίων. Είναι επίσης γνωστό ότι το ρεύμα μαγνήτισης των Μ/Σ περιέχει αρκετές αρμονικές. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μη-γραμμικής σχέσης μεταξύ της πυκνότητας της ροής και της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο πυρήνα του Μ/Σ. Αλλά, και άλλοι παράγοντες όπως η μέθοδος του στοιβάγματος, το υλικό του πυρήνα και η μέγιστη επιτρεπόμενη πυκνότητα ροής επηρεάζουν το περιεχόμενο των αρμονικών στο ρεύμα μαγνήτισης. Οι αρμονικές Μ/Σ μπορούν να προκαλέσουν τα παρακάτω φαινόμενα:

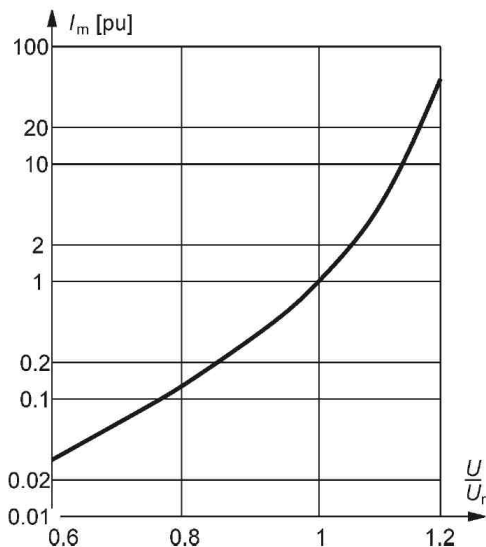
- Διατάραξη της ομαλής λειτουργίας της αυτόματης προστασίας του δικτύου
- Παρεμβαίνει στη λειτουργία του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού

- Αυξάνει την θερμοκρασία των συνδεδεμένων κατά τρίγωνο τυλιγμάτων εξαιτίας των μονών πολλαπλάσιων του τρία ($3^{\text{η}}$, $9^{\text{η}}$, $15^{\text{η}}$, $21^{\text{η}}$ κτλ) κυκλοφορούντων ρευμάτων
- Υπερφόρτιση του ουδέτερου αγωγού των συνδεδεμένων κατά αστέρα τυλιγμάτων

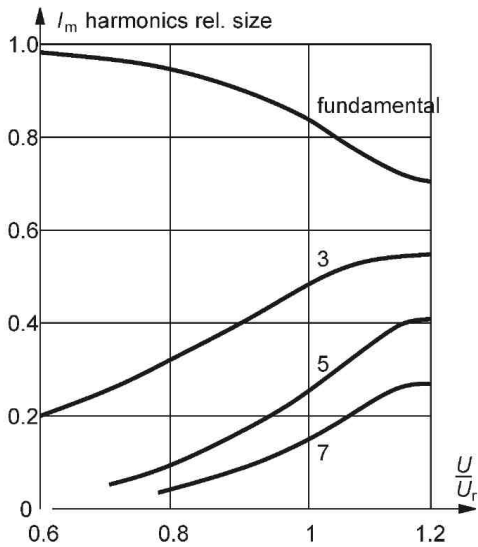
Το πρότυπο IEC [4.2] αναφέρει ότι οι αρμονικές των τριών φάσεων μετρώνται και το μέγεθος αυτών εκφράζεται ως ποσοστό της θεμελιώδους συνιστώσας. Επίσης, το πρότυπο αυτό δεν αναφέρει κάποιο όριο αποδοχής [4.38].

Σύμφωνα με [4.4], λόγω των πολύ χαμηλών τιμών των ρευμάτων μαγνήτισης των σύγχρονων Μ/Σ ισχύος, που περίπου είναι στο 0,1-0,5%, η γνώση των αρμονικών που περιέχονται στο ρεύμα μαγνήτισης είναι μικρής σημασίας. Η γνώση των αρμονικών των παλιότερων Μ/Σ περιστασιακά είναι χρήσιμη με σκοπό τη ρύθμιση των προστατευτικών ηλεκτρονόμων, ειδικότερα αν χρησιμοποιούνται ακόμη συμβατικοί ηλεκτρομηχανικοί ηλεκτρονόμοι.

Το ρεύμα μαγνήτισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.46, είναι εντόνως εξαρτώμενο από την πυκνότητα ροής. Επίσης, οι αρμονικές εξαρτώνται από την πυκνότητα ροής. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι όσο η πυκνότητα ροής αυξάνεται, τόσο αυξάνεται το περιεχόμενο σε αρμονικές. Οι πιο σημαντικές αρμονικές είναι η $3^{\text{η}}$, $5^{\text{η}}$ και $7^{\text{η}}$ (σχήμα 4.47)



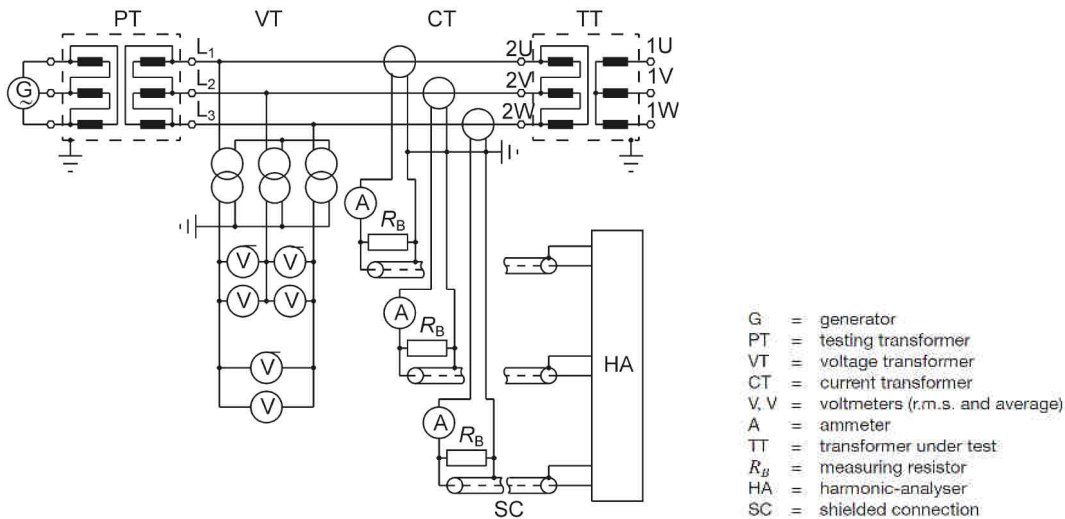
Σχήμα 4.46 – Ρεύμα μαγνήτισης (α.μ.) σε συνάρτηση με την πυκνότητα ροής [4.4]



Σχήμα 4.47 – Αρμονικές σε συνάρτηση με τη πυκνότητα ροής [4.4]

4.15.1 Κύκλωμα μέτρησης

Το κύκλωμα μέτρησης είναι ακριβώς το ίδιο με εκείνο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των απωλειών σιδήρου και του ρεύματος μαγνήτισης αλλά στη συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιείται επιπρόσθετα και ένας ενεργειακός αναλυτής (σχήμα 4.48).



Σχήμα 4.48 – Κύκλωμα μέτρησης για την ανάλυση των αρμονικών του ρεύματος μαγνήτισης [4.4]

Το πρόβλημα της παραμόρφωσης της τάσης είναι πολύ σημαντικό για τη δοκιμή αυτή. Οι αρμονικές πρέπει να αναλυθούν με την εφαρμογή ημιτονοειδούς τάσης. Έτσι, είναι

σημαντικό να επιλεγούν οι κατάλληλες συνδέσεις της γεννήτριας και του Μ/Σ προσαρμογής ώστε ο εξοπλισμός αυτός να παρουσιάζει γραμμικά μαγνητικά χαρακτηριστικά.

4.15.2 Διαδικασία μέτρησης

Η τάση που απαιτείται για τη δοκιμή ρυθμίζεται με τη χρήση ενός βολτομέτρου μέτρησης της μέσης τάσης. Συνήθως, εκτελούνται μετρήσεις στο 90%, 100% και 110% της ονομαστικής τάσης. Η τάση αυξάνεται σταδιακά από το μηδέν στη τελική τάση. Η άμεση ζεύξη θα δημιουργούσε μεταβατικά φαινόμενα συμπεριλαμβανομένων και DC συνιστωσών. Αυτές οι DC συνιστώσες θα προκαλούσαν το κορεσμό του πυρήνα του Μ/Σ τάσης και θα αύξαναν την αβεβαιότητα της μέτρησης. Για τον ίδιο λόγο, η τάση δοκιμής πρέπει να μειώνεται σταδιακά αντί της άμεσης απόζευξης.

4.16 Μέτρηση της απορροφημένης ισχύς από ανεμιστήρες και κινητήρες αντλιών λαδιού

Πρέπει να παρέχεται συμπληρωματική εγκατάσταση για τον έλεγχο και λειτουργία εγκατάστασης βεβαιωμένης ψύξης μέσω βοηθητικής τάσης τροφοδοσίας και μέσα ελέγχου. Ο βασικός σχεδιασμός αυτής της συμπληρωματικής εγκατάστασης συνίσταται στην χειροκίνητη ζεύξη και απόζευξη από τοπικούς πίνακες, οι οποίοι περιλαμβάνουν βοηθητική τάση τροφοδοσίας, ασφάλειες και ηλεκτρονόμους προστασίας. Όμως, εξαιτίας του υψηλού εργατικού κόστους, η φιλοσοφία είναι το να μειωθεί ο έλεγχος εκ του σύνεγγυς και να υπάρξει αυτόματη λειτουργία και απομακρυσμένος έλεγχος.

Η απλούστερη μορφή του αυτομάτου ελέγχου χρησιμοποιεί τις επαφές του οργάνου μέτρησης της θερμοκρασίας του τυλίγματος για την έναρξη και παύση των αντλιών και ανεμιστήρων. Μπορεί να εισαχθεί περαιτέρω πολυπλοκότητα για τον περιορισμό της απώλειας της βεβαιωμένης ψύξης σε περίπτωση που αστοχήσει μία αντλία ή ένας ανεμιστήρας. Μία προσέγγιση είναι το να υποδιαιρεθεί η εγκατάσταση ψύξης σε δύο ίσα μέρη, τα οποία θα χρησιμοποιούν το 50% των αντλιών και ανεμιστήρων. Έτσι, σε περίπτωση αστοχίας δεν θα υπάρξει απώλεια μεγαλύτερη του 50% του συστήματος ψύξης.

Ένας μεγάλος Μ/Σ ανύψωσης σχεδόν δεν έχει ισχύ φυσικής ροής, με συνέπεια οι αντλίες να ξεκινούν τη λειτουργία τους από έναν ηλεκτρονόμο προστασίας τάσης, τροφοδοτούμενος από έναν Μ/Σ τάσης ο οποίος ενεργοποιείται όποτε ενεργοποιείται ο

M/Σ. Επίσης, υπάρχουν αντλίες λαδιού σε αναμονή ώστε σε περίπτωση που ανιχνευτεί αστοχία ροής στη κύρια αντλία να τεθούν αυτές αυτόματα σε λειτουργία. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ανεμιστήρες ελέγχονται από το όργανο μέτρησης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων αλλά είναι σύνηθες να διαιρούνται σε δύο ομάδες που τίθενται σε λειτουργία σε στάδια, με τη πρώτη ομάδα να ξεκινά τη λειτουργία της όταν η θερμοκρασία του τυλίγματος είναι 80°C και να σταματά στους 70°C. Ενώ, οι αντίστοιχες θερμοκρασίες της δεύτερης ομάδας είναι 95°C και 80°C αντίστοιχα..

Για τους M/Σ ανύψωσης με ψυκτικό μέσο το νερό, οι ανεμιστήρες αντικαθίστώνται από αντλίες νερού, οι οποίες ελέγχονται από M/Σ τάσης με τον ίδιο τρόπο όπως οι αντλίες λαδιού. Υπάρχουν κύριες και εν αναμονή αντλίες που ενεργοποιούνται με έναν διακόπτη ροής, οποίος ανιχνεύει απώλεια ροής της επιλεγόμενης κύριας αντλίας [4.1].

Σύμφωνα με [4.39], η μέτρηση της ισχύος ανεμιστήρων και αντλιών γίνεται ώστε να εξακριβωθούν οι απαιτήσεις ισχύος του συστήματος ψύξης του M/Σ και να ληφθούν υπόψη στις συνολικές απώλειες του M/Σ που θα εγγυηθούν από τον κατασκευαστή. Η μέτρηση αυτή εκτελείται ταυτόχρονα με την δοκιμή ανύψωσης θερμοκρασίας. Τυχόν υπέρβαση των εγγυημένων απωλειών θα επιβαρύνει όχι μόνο τον υπό δοκιμή M/Σ αλλά το σύνολο των τεμαχίων της παραγγελίας.

4.17 Μέτρηση της αντίστασης της μόνωσης των τυλιγμάτων ως προς γη

Η μέτρηση αυτή πραγματοποιείται με σκοπό τον καθορισμό της αντίστασης της μόνωσης μεταξύ του τυλίγματος προς τη γη ή μεταξύ των τυλιγμάτων. Η γνώση της αντίστασης είναι χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της κατάστασης της μόνωσης του M/Σ.

Η μονάδα μέτρησης της αντίστασης της μόνωσης είναι τα ΜΩ. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεταβολές στην τιμή της αντίστασης μόνωσης μπορούν να προκληθούν από διάφορους παράγοντες, όπως: το σχέδιο, η θερμοκρασία, η ξηρότητα και η καθαρότητα των μερών και ειδικότερα των μονωτήρων διέλευσης. Αν η αντίσταση μόνωσης υποχωρήσει κάτω από συγκεκριμένα όρια, συχνά μπορεί να επανέλθει στην απαιτούμενη τιμή με την διαδικασία του καθαρισμού και της ξήρανσης. Οι τιμές της αντίστασης μόνωσης μεταβάλλονται με την εφαρμοζόμενη τάση. Έτσι, οποιεσδήποτε συγκρίσεις μετρήσεων πρέπει να πραγματοποιούνται στην ίδια τάση.

Το πρότυπο IEEE [4.27] αναφέρεται στη μέτρηση της αντίστασης μόνωσης μεταξύ πυρήνα και γης. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, η αντίσταση μόνωσης πρέπει να μετράται

μετά το πέρας της συναρμολόγησης του Μ/Σ με επίπεδο τάσης τουλάχιστον 0,5 kV DC και διάρκειας 1 min [4.4].

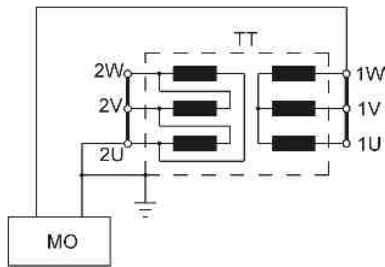
Σύμφωνα με [4.40], οι ενδείξεις της αντίστασης μόνωσης είναι σχετικές, και μπορούν να είναι διαφορετικές για τον ίδιο Μ/Σ ακόμα και αν αυτές οι μετρήσεις πραγματοποιηθούν επί τρεις ημέρες κατά σειρά χωρίς να οφείλεται στη κακή μόνωση. Αυτό που πραγματικά μετράει είναι η τάση των ενδείξεων κατά την διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, με την τάση μείωσης της αντίστασης να προειδοποιεί για επερχόμενα προβλήματα. Έτσι, οι περιοδικές μετρήσεις είναι η καλύτερη προσέγγιση για την προληπτική συντήρηση του ηλεκτρικού εξοπλισμού, εφόσον όμως εκτελούνται με τον ίδιο τρόπο κάθε φορά. Δηλαδή με τις ίδιες συνδέσεις δοκιμής, με την ίδια τάση δοκιμής και την ίδια διάρκεια χρόνου. Επίσης, οι μετρήσεις πρέπει να εκτελούνται στην ίδια θερμοκρασία ή, αν όχι, αυτές να διορθώνονται στην ίδια θερμοκρασία. Το ιστορικό της σχετικής υγρασίας στο χώρο του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια της δοκιμής βοηθάει επίσης στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Κάθε τύπος μονωτικού υλικού έχει διαφορετικό βαθμό μεταβολής της αντίστασης με τη θερμοκρασία. Για την απλοποίηση της διόρθωσης των τιμών της αντίστασης έχουν αναπτυχθεί σχετικοί συντελεστές για διάφορες θερμοκρασίες. Στον πίνακα 4.4 δίδονται τέτοιοι συντελεστές, με τον αντίστοιχο συντελεστή να πολλαπλασιάζεται με την ένδειξη του οργάνου μέτρησης της αντίστασης μόνωσης.

| TEMP. | | OIL-FILLED TRANSFORMERS |
|-------|-----|-------------------------|
| °C | °F | |
| 0 | 32 | 0.25 |
| 5 | 41 | 0.36 |
| 10 | 50 | 0.50 |
| 15.6 | 60 | 0.74 |
| 20 | 68 | 1.00 |
| 25 | 77 | 1.40 |
| 30 | 86 | 1.98 |
| 35 | 95 | 2.80 |
| 40 | 104 | 3.95 |
| 45 | 113 | 5.60 |
| 50 | 122 | 7.85 |
| 55 | 131 | 11.20 |
| 60 | 140 | 15.85 |
| 65 | 149 | 22.40 |
| 70 | 158 | 31.75 |
| 75 | 167 | 44.70 |

Πίνακας 4.4 – Πίνακας συντελεστή διόρθωσης θερμοκρασίας σε θερμοκρασία αναφοράς 20°C [4.40]

4.17.1 Μετρητικό κύκλωμα-Διαδικασία μέτρησης

Το κύκλωμα μέτρησης είναι αρκετά παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται για τη διηλεκτρική δοκιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Η δοκιμή πρέπει να εκτελείται με όλους τους ακροδέκτες του κάθε τυλίγματος να είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους, δηλαδή της υψηλής τάσης προς εκείνους της χαμηλής τάσης και τη γη, και της χαμηλής τάσης προς της τους ακροδέκτες της υψηλής τάσης (σχήμα 4.49). Συνήθως χρησιμοποιούνται μετρητικά όργανα με ενσωματωμένη πηγή DC τάσης [4.4].



Σχήμα 4.49 – Κύκλωμα μέτρησης για τη δοκιμή μέτρησης της αντίστασης μόνωσης [4.4]

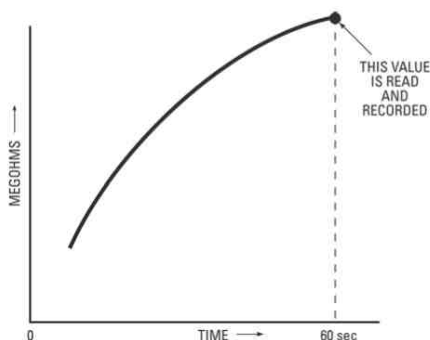
4.17.2 Κατηγορίες δοκιμών μέτρησης αντίστασης μόνωσης

Οι δυνατές κατηγορίες είναι [4.40]:

- Δοκιμή μικρής διάρκειας ή στιγμιαίας καταγραφής ενδείξεων
- Με τη μέθοδο Χρόνου-Αντίστασης
- Με τον Ρυθμό διηλεκτρικής απορρόφησης

Δοκιμή Μικρής Διάρκειας ή Στιγμιαίας Καταγραφής Ενδείξεων

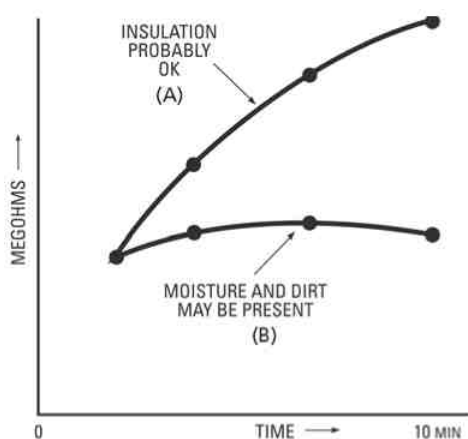
Με την μέθοδο αυτή, απλά συνδέεται το όργανο μέτρησης και τίθεται σε λειτουργία για μία μικρή συγκεκριμένη περίοδο χρόνου (συνήθως 60 sec). Το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι η ένδειξη που έχει το όργανο τη χρονική στιγμή της συμπλήρωσης του χρόνου δοκιμή ενώ το αποτέλεσμα αυτό εξαρτάται από την θερμοκρασία και την υγρασία (σχήμα 4.50).



Σχήμα 4.50 – Καμπύλη μέτρησης της αντίστασης μόνωσης βάσει της μεθόδου Μικρής Διάρκειας [4.40]

Μέθοδος Χρόνου-Αντίστασης

Το αποτέλεσμα της μεθόδου αυτής είναι ανεξάρτητο από την θερμοκρασία και μπορεί να δώσει πληροφορίες για την κατάσταση της μόνωσης χωρίς να υπάρχουν παλαιότερες μετρήσεις. Βασίζεται στο φαινόμενο της απορρόφησης της “καλής” μόνωσης σε σύγκριση με την “κακή” μόνωση. Σύμφωνα με τη μέθοδο, καταγράφονται διαδοχικές τιμές των ενδείξεων σε συγκεκριμένους χρόνους και σημειώνονται οι διαφορές των ενδείξεων (σχήμα 4.51). Όταν η ελεγχόμενη μόνωση είναι “καλή”, υπάρχει συνεχόμενη αύξηση της αντίστασης (καμπύλη Α) για μία χρονική περίοδο (της τάξης των 5 και 10 min).



Σχήμα 4.51 – Καμπύλες απεικόνισης του φαινομένου διηλεκτρικής απορρόφησης [4.40]

Με τον Ρυθμό διηλεκτρικής απορρόφησης

Ο λόγος των ενδείξεων σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές (όπως το πηλίκο της ένδειξης των 60 sec προς την ένδειξη των 30 sec) καλείται ρυθμός διηλεκτρικής απορρόφησης και είναι χρήσιμος για την εξαγωγή πληροφοριών για την κατάσταση της μόνωσης. Αν ο λόγος είναι το πηλίκο της ένδειξης των 10 min προς την ένδειξη του 1 min, η τιμή ονομάζεται δείκτης πόλωσης. Στον πίνακα 4.5 γίνεται η αντιστοίχιση των λόγων και της κατάστασης της μόνωσης.

| Κατάσταση μόνωσης | Λόγος 60sec/30sec | Λόγος 10min/1min |
|-------------------|---------------------|-------------------|
| Επικίνδυνη | - | Μικρότερος από 1 |
| Αμφιλεγόμενη | 1 έως 1,25 | 1 έως 2 |
| Καλή | 1,4 έως 1,6 | 2 έως 4 |
| Άριστη | Μεγαλύτερος από 1,6 | Μεγαλύτερος από 4 |

Πίνακας 4.5 - Αντιστοίχιση των λόγων και της κατάστασης της μόνωσης [4.40]

4.18 Μέτρηση εφαπτομένης δ των χωρητικότητων του μονωτικού συστήματος

Η δοκιμή του συντελεστή ισχύος, παρόμοια με τη δοκιμή μέτρησης της αντίστασης της μόνωσης, βοηθάει στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την κατάσταση της μόνωσης, αν και υπάρχουν διάφορες απόψεις για την σημαντικότητα των αποτελεσμάτων.

Το πρότυπο IEC ορίζει τον συντελεστή ισχύος ως το πηλίκο της απορροφημένης ενεργό ισχύ προς την απόλυτη τιμή της άεργος ισχύος. Αυτό αντιστοιχεί στον συντελεστή απωλειών [4.4].

Το πρότυπο [4.3], από την άλλη πλευρά, ορίζει τον συντελεστή ισχύος της μόνωσης ως το πηλίκο της ισχύς (W) που “χάνεται” στη μόνωση προς το γινόμενο της εφαρμοζόμενης τάσης και του ρεύματος (VA-που αντιστοιχεί στη φαινόμενη ισχύ) όταν εφαρμόζεται ημιτονοειδής τάση. Ο συντελεστής ισχύος, συνήθως, εκφράζεται ως ποσοστό %.

Οι τιμές της μέτρησης στο εργοστάσιο του συντελεστή ισχύος είναι, συνήθως, χρήσιμες για σύγκριση με τις μετρήσεις του συντελεστή στο πεδίο εργασίας και αξιολογούν την πιθανή κατάσταση της μόνωσης.

Δεν έχει γίνει δυνατό να καθιερωθούν τυποποιημένες τιμές του συντελεστή ισχύος για τους ακόλουθους λόγους:

- Υπάρχει μικρή ή και καμιά σχέση μεταξύ του συντελεστή ισχύος και της ικανότητας του Μ/Σ να αντέχει στις προδιαγεγραμμένες διηλεκτρικές δοκιμές
- Η μεταβολή του συντελεστή ισχύος με τη θερμοκρασία είναι σημαντική και ασυνεπής
- Τα διάφορα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους Μ/Σ προκαλούν μεγάλες μεταβολές των συντελεστών ισχύος [4.4]

4.18.1 Κύκλωμα μέτρησης

Ο συντελεστής ισχύος μετράται με δύο τρόπους [4.4]:

- Με τη χρήση ειδικών γεφυρών
- Με τη μέθοδο Doble

4.18.2 Μέτρηση με τη χρήση γέφυρας

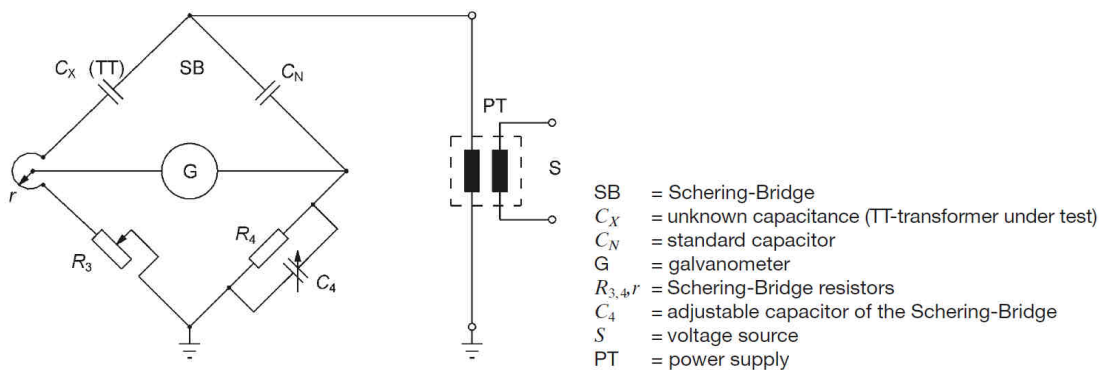
Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη σύγκριση της χωρητικότητας C_X (ο υπό δοκιμή Μ/Σ) με μία γνωστή χωρητικότητα C_N . Στο σχήμα 4.52 απεικονίζεται η γέφυρα Schering που

χρησιμοποιείται για την μέτρηση του συντελεστή ισχύος ενός Μ/Σ δύο τυλιγμάτων. Όταν η γέφυρα ισορροπεί, η άγνωστη χωρητικότητα C_X και ο συντελεστής απωλειών μπορούν να υπολογιστούν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$C_X = \frac{C_N \cdot R_4}{R_3 + r} \quad (4.59)$$

$$\tan \delta = C_4 \cdot \omega \cdot R_4 \quad (4.60)$$

όπου $\omega = 2\pi f$

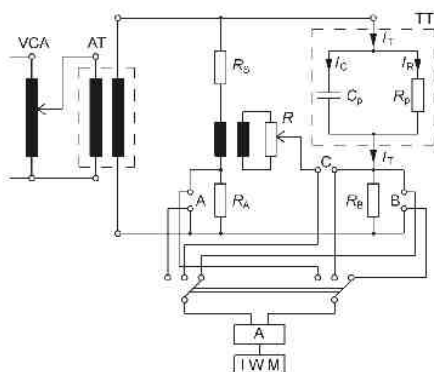


Σχήμα 4.52 – Κύκλωμα μέτρησης του συντελεστή ισχύος και των χωρητικότητων των τυλιγμάτων [4.4]

4.18.3 Μέτρηση με τη μέθοδο Doble

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη μέτρηση του AC ρεύματος φόρτισης, των AC απωλειών και της χωρητικότητας ενός μονωτικού δείγματος, το οποίο στη περίπτωση μας είναι ο υπό δοκιμή Μ/Σ. Ο συντελεστής ισχύος (%) υπολογίζεται από το ρεύμα φόρτισης και τις καταγραφόμενες απώλειες.

Πριν τη δοκιμή όλα τα τυλίγματα βραχυκυκλώνονται και οι δοκιμές συντελεστή ισχύος εκτελούνται μεταξύ τυλιγμάτων και γης αλλά και μεταξύ τυλιγμάτων [4.4]



Σχήμα 4.53 – Κύκλωμα μέτρησης με τη μέθοδο Doble (όπου TT ο υπό δοκιμή Μ/Σ) [4.4]

Παράρτημα Α

Table 1 – Requirements and tests for different categories of windings

| Category of winding | Highest voltage for equipment U_m kV | Tests | | | | |
|------------------------------------|---|--|---|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
| | | Lightning impulse (LI) (see clause 13 and 14) | Switching impulse (SI) (see clause 15) | Long duration AC (ACLD) (see 12.4) | Short duration AC (ACSD) (see 12.2 or 12.3) | Separate source AC (see clause 11) |
| Uniform insulation | $U_m \leq 72,5$ | Type (note 1) | Not applicable | Not applicable (note 1) | Routine | Routine |
| Uniform and non-uniform insulation | $72,5 < U_m \leq 170$ | Routine | Not applicable | Special | Routine | Routine |
| | $170 < U_m < 300$ | Routine | Routine (note 2) | Routine | Special (note 2) | Routine |
| | $U_m \geq 300$ | Routine | Routine | Routine | Special | Routine |

NOTE 1 In some countries, for transformers with $U_m \leq 72,5$ kV, LI tests are required as routine tests, and ACLD tests are required as routine or type tests.

NOTE 2 If the ACSD test is specified, the SI test is not required. This should be clearly stated in the enquiry document.

Table 2 – Rated withstand voltages for transformer windings with highest voltage for equipment $U_m \leq 170$ kV – Series I based on European practice

| Highest voltage for equipment U_m kV r.m.s. | Rated lightning impulse withstand voltage kV peak | Rated short duration induced or separate source AC withstand voltage kV r.m.s. |
|--|--|---|
| 3,6 | 20 | 10 |
| 7,2 | 40 | 20 |
| 12 | 60 | 28 |
| 17,5 | 75 | 38 |
| 24 | 95 | 50 |
| 36 | 145 | 70 |
| 52 | 170 | 95 |
| 60 | 250 | 115 |
| 72,5 | 280 | 140 |
| 100 | 325 | 150 |
| 123 | 380 | 185 |
| 145 | 450 | 230 |
| 170 | 550 | 275 |
| | 650 | 325 |
| | 750 | |

NOTE Dotted lines may require additional phase-to-phase withstand tests to prove that the required phase-to-phase withstand voltages are met.

Low-voltage windings with $U_m \leq 1,1$ kV shall be tested with 3 kV separate source AC withstand voltage.

[4.22]

**Table 3 – Rated withstand voltages for transformer windings
with highest voltage for equipment $U_m \leq 169$ kV –
Series II based on North American practice**

| Highest voltage for equipment U_m kV r.m.s. | Rated lightning impulse withstand voltage kV peak | | Rated short-duration induced or separate source AC withstand voltage kV r.m.s. | |
|--|---|--------------------------------|---|-----------------------|
| | Distribution (note 1) and class I transformers (note 2) | Class II transformers (note 3) | Distribution and class I transformers | Class II transformers |
| | 15 | 95 125 | 110 – | 34 40 |
| 26,4 | 150 | 150 | 50 | 50 |
| 36,5 | 200 | 200 | 70 | 70 |
| 48,3 | 250 | 250 | 95 | 95 |
| 72,5 | 350 | 350 | 140 | 140 |
| 121 | | 350 | | 140 |
| | | 450 | | 185 |
| 145 | | 550 | | 230 |
| | | 650 | | 275 |
| 169 | | 750 | | 325 |

NOTE 1 Distribution transformers transfer electrical energy from a primary distribution circuit to a secondary distribution circuit.

NOTE 2 Class I power transformers include high-voltage windings of $U_m \leq 72,5$ kV.

NOTE 3 Class II power transformers include high-voltage windings of $U_m \geq 121$ kV.

**Table 4 – Rated withstand voltages for transformer windings
with $U_m > 170$ kV**

| Highest voltage for equipment U_m kV r.m.s. | Rated switching impulse withstand voltage phase-to-earth kV peak | Rated lightning impulse withstand voltage kV peak | Rated short-duration induced or separate source AC withstand voltage kV r.m.s. |
|--|--|--|---|
| 245 | 550 650 | 650 750 | 325 360 |
| 300 | 750 | 850 | 395 |
| 362 | 850 950 | 950 1 050 | 460 510 |
| | | 1 175 | |
| 420 | 850 950 | 1 050 1 175 | 460 510 |
| 550 | 1 050 1 175 | 1 300 1 425 | 570 630 |
| 800 | 1 300 1 425 1 550 | 1 550 1 675 1 800 | 680 Note 3 Note 3 |
| | | 1 950 2 100 | Note 3 Note 3 |

NOTE 1 Dotted lines are not in line with IEC 60071-1 but are current practice in some countries.

NOTE 2 For uniformly insulated transformers with extremely low values of rated AC insulation levels, special measures may have to be taken to perform the short-duration AC induced test, see 12.2.

NOTE 3 Not applicable, unless otherwise agreed.

NOTE 4 For voltages given in the last column, higher test voltages may be required to prove that the required phase-to-phase withstand voltages are met. This is valid for the lower insulation levels assigned to the different U_m in the table.

[4.22]

ACSD

Table D.1 – Test voltages for short-duration withstand voltage test for uniformly insulated transformers with $U_m > 72,5$ kV according to tables 2 and 4 and subclause 12.2.2

| Highest voltage for equipment U_m kV r.m.s. | Rated short-duration induced or separate source a.c. withstand voltage according to tables 2, 3 or 4 kV r.m.s. | Test voltage U_1 phase-to-phase kV r.m.s. | Partial discharge evaluation level phase-to-earth $U_2 = 1,3 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ kV r.m.s. | Partial discharge evaluation level phase-to-phase $U_2 = 1,3 U_m$ kV r.m.s. |
|--|---|--|--|---|
| 100 | 150 | 150 | 75 | 130 |
| 100 | 185 | 185 | 75 | 130 |
| 123 | 185 | 185 | 92 | 160 |
| 123 | 230 | 230 | 92 | 160 |
| 145 | 185 | 185 | 110 | 185 |
| 145 | 230 | 230 | 110 | 185 |
| 145 | 275 | 275 | 110 | 185 |
| 170 | 230 | 230 | 130 | 225 |
| 170 | 275 | 275 | 130 | 225 |
| 170 | 325 | 325 | 130 | 225 |
| 245 | 325 | 325 | 185 | 320 |
| 245 | 360 | 360 | 185 | 320 |
| 245 | 395 | 395 | 185 | 320 |
| 245 | 460 | 460 | 185 | 320 |
| 300 | 395 | 395 | 225 | 390 |
| 300 | 460 | 460 | 225 | 390 |
| 362 | 460 | 460 | 270 | 470 |
| 362 | 510 | 510 | 270 | 470 |
| 420 | 460 | 460 | 290 | 505 |
| 420 | 510 | 510 | 290 | 505 |
| 420 | 570 | 570 | 315 | 545 |
| 420 | 630 | 630 | 315 | 545 |
| 550 | 510 | 510 | 380 | 660 |
| 550 | 570 | 570 | 380 | 660 |
| 550 | 630 | 630 | 380 | 660 |
| 550 | 680 | 680 | 380 | 660 |

NOTE 1 For $U_m = 550$ kV and part of $U_m = 420$ kV, the p.d. evaluation level should be reduced to $1,2 U_m/\sqrt{3}$ and $1,2 U_m$ respectively.

NOTE 2 When the ACSD withstand voltage U_1 is smaller than the p.d. phase-to-phase evaluation level U_2 , U_1 should be taken as equal to U_2 . Internal and external clearances should be designed accordingly.

[4.22]

Table D.2. – Test voltages for short-duration withstand voltage test for non-uniformly insulated transformers with $U_m > 72,5$ kV according to tables 2 and 4 and subclause 12.3

| Highest voltage for equipment U_m kV r.m.s. | Rated short-duration induced or separate source a.c. withstand voltage according to tables 2, 3 or 4 kV r.m.s. | Test voltage U_1 phase-to-earth equal to phase-to-phase kV r.m.s. | Partial discharge evaluation level phase-to-earth $U_2 = 1,5 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ kV r.m.s. | Partial discharge evaluation level phase-to-phase $U_2 = 1,3 U_m$ kV r.m.s. |
|--|---|--|--|---|
| 100 | 150 | 150 | 87 | 130 |
| 100 | 185 | 185 | 87 | 130 |
| 123 | 185 | 185 | 107 | 160 |
| 123 | 230 | 230 | 107 | 160 |
| 145 | 185 | 185 | 125 | 185 |
| 145 | 230 | 230 | 125 | 185 |
| 145 | 275 | 275 | 125 | 185 |
| 170 | 230 | 230 | 145 | 225 |
| 170 | 275 | 275 | 145 | 225 |
| 170 | 325 | 325 | 145 | 225 |
| 245 | 325 | 325 | 215 | 320 |
| 245 | 360 | 360 | 215 | 320 |
| 245 | 395 | 395 | 215 | 320 |
| 245 | 460 | 460 | 215 | 320 |
| 300 | 395 | 395 | 260 | 390 |
| 300 | 460 | 460 | 260 | 390 |
| 362 | 460 | 460 | 315 | 460 |
| 362 | 510 | 510 | 315 | 460 |
| 420 | 460 | 460 | 365 | 504 |
| 420 | 510 | 510 | 365 | 504 |
| 420 | 570 | 570 | 365 | 545 |
| 420 | 630 | 630 | 365 | 545 |
| 550 | 510 | 510 | 475 | 660 |
| 550 | 570 | 570 | 475 | 660 |
| 550 | 630 | 630 | 475 | 660 |
| 550 | 680 | 680 | 475 | 660 |

NOTE 1 For $U_m = 550$ kV and part of $U_m = 420$ kV, the p.d. evaluation level should be reduced to $1,2 U_m / \sqrt{3}$ and $1,2 U_m$ respectively.

NOTE 2 When the ACSD withstand voltage U_1 is smaller than the p.d. phase-to-phase evaluation level U_2 , U_1 should be taken as equal to U_2 . Internal and external clearances should be designed accordingly.

[4.22]

Table 5—Dielectric insulation levels for distribution transformers and Class I power transformers^a

| Application | Basic lightning impulse insulation level (BIL) (kV crest) | Chopped-wave impulse levels | | Front-of-wave impulse levels | | |
|--------------|---|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| | | Minimum voltage (kV crest) | Minimum time to flashover (μs) | Minimum voltage (kV crest) | Specific time to sparkover (μs) | Low-frequency test level (kV rms) |
| | Column 1 | Column 2 | Column 3 | Column 4 | Column 5 | Column 6 |
| Distribution | 30 | 36 | 1.0 | — | — | 10 |
| | 45 | 54 | 1.5 | — | — | 15 |
| | 60 | 69 | 1.5 | — | — | 19 |
| | 75 | 88 | 1.6 | — | — | 26 |
| | 95 | 110 | 1.8 | — | — | 34 |
| | 125 | 145 | 2.25 | — | — | 40 |
| | 150 | 175 | 3.0 | — | — | 50 |
| | 200 | 230 | 3.0 | — | — | 70 |
| | 250 | 290 | 3.0 | — | — | 95 |
| | 350 | 400 | 3.0 | — | — | 140 |
| Power | 45 | 50 | 1.5 | — | — | 10 |
| | 60 | 66 | 1.5 | — | — | 15 |
| | 75 | 83 | 1.5 | — | — | 19 |
| | 95 | 105 | 1.8 | 165 | 0.5 | 26 |
| | 110 | 120 | 2.0 | 195 | 0.5 | 34 |
| | 150 | 165 | 3.0 | 260 | 0.5 | 50 |
| | 200 | 220 | 3.0 | 345 | 0.5 | 70 |
| | 250 | 275 | 3.0 | 435 | 0.5 | 95 |
| | 350 | 385 | 3.0 | 580 | 0.58 | 140 |

[4.27]

Table 6—Dielectric insulation levels for Class II power transformers^a

| Nominal system voltage (kV) | Basic lightning impulse insulation level (BIL) (kV crest) | Chopped wave level (kV crest) | Switching impulse level (BSL) (kV crest) | Low frequency test levels | | |
|-----------------------------|---|-------------------------------|--|--|----------------------------|-------------------------------------|
| | | | | Induced-voltage test (phase to ground) | | Applied-voltage test level (kV rms) |
| | | | | One hour level (kV rms) | Enhancement level (kV rms) | |
| Column 1 | Column 2 | Column 3 | Column 4 | Column 5 | Column 6 | Column 7 |
| 15 and below | 110 | 120 | — | — | — | 34 |
| 25 | 150 | 165 | — | — | — | 50 |
| 34.5 | 200 | 220 | — | — | — | 70 |
| 46 | 250 | 275 | — | — | — | 95 |
| 69 | 250 | 275 | — | — | — | 95 |
| | 350 | 385 | — | — | — | 140 |
| 115 | 350 | 385 | 280 | 105 | 120 | 140 |
| | 450 | 495 | 375 | 105 | 120 | 185 |
| | 550 | 605 | 460 | 105 | 120 | 230 |
| 138 | 450 | 495 | 375 | 125 | 145 | 185 |
| | 550 | 605 | 460 | 125 | 145 | 230 |
| | 650 | 715 | 540 | 125 | 145 | 275 |
| 161 | 550 | 605 | 460 | 145 | 170 | 230 |
| | 650 | 715 | 540 | 145 | 170 | 275 |
| | 750 | 825 | 620 | 145 | 170 | 325 |
| 230 | 650 | 715 | 540 | 210 | 240 | 275 |
| | 750 | 825 | 620 | 210 | 240 | 325 |
| | 825 | 905 | 685 | 210 | 240 | 360 |
| | 900 | 990 | 745 | 210 | 240 | 395 |
| 345 | 900 | 990 | 745 | 315 | 360 | 395 |
| | 1050 | 1155 | 870 | 315 | 360 | 460 |
| | 1175 | 1290 | 975 | 315 | 360 | 520 |
| 500 | 1130 | 1430 | 1080 | 475 | 550 | — |
| | 1425 | 1570 | 1180 | 475 | 550 | — |
| | 1550 | 1705 | 1290 | 475 | 550 | — |
| | 1675 | 1845 | 1390 | 475 | 550 | — |
| 765 | 1800 | 1980 | 1500 | 690 | 800 | — |
| | 1925 | 2120 | 1600 | 690 | 800 | — |
| | 2050 | 2255 | 1700 | 690 | 800 | — |

[4.27]

Παράρτημα Β

Μέτρηση Μερικών Εκκενώσεων

Σύμφωνα με [4.1], οι μερικές εκκενώσεις είναι ηλεκτρικές εκκενώσεις που μερικώς “γεφυρώνουν” την μόνωση μεταξύ των αγωγών. Τέτοιες εκκενώσεις γενικά θεωρούνται ότι είναι προπομποί της ολικής αστοχίας μόνωσης αλλά ίσως και να υπάρχουν για μεγάλη χρονική περίοδο, ακόμα και χρόνια, προτού επέλθει τελική διάσπαση. Σε μερικές περιπτώσεις η ύπαρξη των εκκενώσεων θα μεταβάλλει τη κατανομή της επιβάρυνσης με τέτοιο τρόπο ώστε αρχικά να μειώσει τη ροπή προς την ολική διάσπαση. Όμως, με τη πάροδο του χρόνου, θα επέλθει η ολική διάσπαση, συχνά επειδή οι ίδιες οι εκκενώσεις οδηγούν σε χημική διάσπαση της μόνωσης και συνεπώς μειώνεται η ηλεκτρική αντοχή.

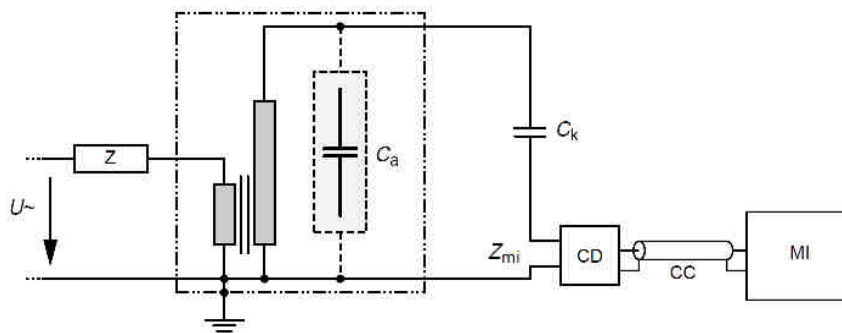
Ο εντοπισμός των μερικών εκκενώσεων βασίζεται στο γεγονός ότι σε έναν Μ/Σ αυτές προκαλούν μεταβατικές αλλαγές της τάσης ως προς γη σε κάθε ακροδέκτη τυλίγματος.

Το πραγματικό φορτίο που μεταφέρεται στο σημείο που πραγματοποιούνται οι μερικές εκκενώσεις δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Η προτιμώμενη μέτρηση της σφοδρότητας των μερικών εκκενώσεων είναι το εμφανές φορτίο “q” ενός παλμού μερικής εκκένωσης, το οποίο σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60270 [4.41], είναι εκείνο το φορτίο το οποίο, όταν εγχυθεί εντός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος μεταξύ των ακροδεκτών του υπό δοκιμή αντικειμένου σε καθορισμένο κύκλωμα δοκιμής, θα δώσει την ίδια ένδειξη στο μετρητικό όργανο με το παλμό ρεύματος της μερικής εκκένωσης.

Κύκλωμα δοκιμής

Εκτός από την ενεργοποίηση του κυκλώματος δοκιμής με την κατάλληλη τάση (όπως έχει αναλυθεί στις παραγράφους 4.7.1.2, 4.7.2 και 4.7.3), το σημαντικό μέρος κυκλώματος της δοκιμής μερικών εκκενώσεων είναι να παρέχει τις κατάλληλες συνθήκες για τον εντοπισμό των μερικών εκκενώσεων εντός του υπό δοκιμή Μ/Σ σε καθορισμένη τάση δοκιμής μερικών εκκενώσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον καλύτερο τρόπο όταν τα διάφορα συστατικά που συνιστούν το κύκλωμα μέτρησης είναι συγχρονισμένα με τέτοιο τρόπο ώστε οι παλμοί του ρεύματος που απορρέουν από τις μερικές εκκενώσεις έχουν μεγέθη και μορφές που είναι πολύ ευνοϊκές για τον εντοπισμό. Υπάρχουν τέσσερα βασικά κυκλώματα από τα οποία μπορούν να προκύψουν παραλλαγμένα κυκλώματα μέτρησης των μερικών

εκκενώσεων. Ένα τέτοιο ισοδύναμο κύκλωμα απεικονίζεται στο σχήμα Β1 με την τάση δοκιμής να επάγεται στον υπό δοκιμή Μ/Σ [4.41].



- U_{\sim} low- or high-voltage supply
- Z_{mi} input impedance of measuring system
- CC connecting cable
- C_k coupling capacitor
- CD coupling device
- C_a test object
- MI measuring instrument
- Z filter

Σχήμα Β1 – Κύκλωμα μέτρησης μερικών εκκενώσεων [4.41]

Βιβλιογραφία

- [4.1] “J&P Transformer Book”, Martin J. Heathcote, Twelfth edition, 1998
- [4.2] “Power Transformers – Part 1: General”, IEC 60076-1, Edition 2.1, 2004-04
- [4.3] “IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers”, IEEE Std C57.12.90.1999
- [4.4] “Testing of Power Transformers, Routine tests, Type tests and Special tests”, Ake Carlson, Jitka Fuhr, Gottfried Schemel, Franz Wegscheider, 1st Edition, ABB
- [4.5] “Spotlight on Modern Transformer Design”, Pavlos S. Georgilakis, 2009
- [4.6] “Interpretation of Low DC Current Measurements of a Transformer’s Winding Resistance and the Effect of the Tapchanger’s Contacts”, Paul G. Slade, 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), Charleston SC, 4-7 October 2010, pp 1-10
- [4.7] “The art and science of measuring the winding resistance of Power Transformers”, Oleh W. Iwansiw
- [4.8] “Transformer Turn Ratio Testing”, Jeff Jowelt, Neta World The Official Publication of the InterNational Electrical Testing Association, Winter 2005-2006
- [4.9] “Three Phase Transformer Winding Configurations and Differential Relay Compensation”, Larry Lawhead, Randy Hamilton, John Horak, 60th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference, May 2-5, 2006
- [4.10] “IEEE Guide for Transformer Loss Measurement”, IEEE C57.123-2002
- [4.11] “Measured Variability of Performance Parameters of Power & Distribution Transformers”, teNyenhnis E.G., Girgis R.S., IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas TX, 21-24 May 2006, pp 523-528
- [4.12] “Study of Parameters Influencing the Performance of Connectors Used for Load and Temperature Tests on Transformers”, Fofana I., Loiselle L., Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R., Georgilakis P.S., Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), San Juan PR, 10-13 June 2012, pp 311-314
- [4.13] “Discussion on Transformer testing in the factory”, William R.Herron III, HV Testing Monitoring and Diagnostics Workshop, paper No.: 7, Alexandria Virginia 13 & 14 September 2000

- [4.14] “Guide for Testing Power Transformers – Routine test”, Tesar, 2002
- [4.15] “Analytical Description of the Load-Loss Asymmetry Phenomenon in Three-Phase Three-Limb Transformers”, R. Escarela-Perez, S.V. Kulkarni, J. Alvarez-Ramirez and K. Kaushik, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 2, April 2009, pp 695-702
- [4.16] “Asymmetry During Load-Loss Measurement of Three-Phase Three-Limb Transformers”, R. Escarela-Perez, S.V. Kulkarni, N.K. Kodela, J.C. Olivares-Galvan, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, July 2007, pp 1566-1574
- [4.17] “Study of the Apparent Load Loss Unbalance in Three-Phase Transformers”, Patrick Picher, Leonard Bolduc, Richard Gagnon, Gilbert Sybille, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Saskatoon Sask., 1-4 May 2005
- [4.18] “Transformers for the Electric Power Industry”, R.L. Bean, N. Chackan Jr., H.R. Moore, E.C. Wentz, 1959
- [4.19] “The Importance of the Short-Circuit Impedance Measurement to the Operation of the Transformer Units”, Traian Chiulan, Brandusa Pantelimon, 15th IMEKO TC 4 International Symposium, Wednesday 19 September 2007, Astoria Hotel
- [4.20] “Measurements and Correction of No-Load Losses of Power Transformers”, Rejean Arseneau, Eddy So and Ernst Hanique, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 54, No. 2, April 2005, pp 503-506
- [4.21] “Calculation of No-Load Loss in Power Transformers with Five-Limb Magnetic Core – A Case Study”, Farzad Zhalefar, Majid Sanaye-Pasand, International Colloquium Transformer Research and Asset Management, Cavtat Croatia, November 12-14, 2009
- [4.22] “Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air”, IEC 60076-3, Second edition, 2000-03
- [4.23] “Dielectric Withstand Voltage Tests and Test Conversion Factors for Oil-filled Transformers”, Okabe S., IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, April 2008, Vol. 15, No. 2, pp 583-590
- [4.24] “Τριφασικοί Μετασχηματιστές 40/50 MVA, 150/21-23 kV” Προδιαγραφή Νο SS-25/1A, ΔΕΗ ΑΕ, Οκτώβριος 2008
- [4.25] “Transformer Tests”, Haluk Odoglu, 3rd Edition, June 2009
- [4.26] “Power transformers – Part 2: Temperature rise”, IEC 76-2, Second edition, 1993-04

- [4.27] “IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers”, IEEE Std. C57.12.00-2000
- [4.28] “Υψηλές Τάσεις”, Φ.Β. Τοπαλής, Αθήνα 1991
- [4.29] “Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων Έναντι Υπερτάσεων”, Ι.Α. Σταθόπουλος, Αθήνα 1989
- [4.30] “High Voltage Engineering – Practice and Theory”, JP Holtzhausen, WL Vosloo
- [4.31] “Voltage measurement by means of standard air gaps”, IEC 60052, Third edition, 2002-10
- [4.32] “Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων”, Π. Κούκος, 2003
- [4.33] “Testing of Power Transformers”, KT 80 GB 2000-01, ABB Oy
- [4.34] “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας – Τόμος ΙΙ: Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις”, Βασιλείου Κ. Παπαδιά, Αθήνα 1985
- [4.35] “Short-circuit Duty of Power Transformers”, ABB, Giorgio Bertagnolli, Third edition, June 2006
- [4.36] “Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit”, IEC 60076-5, Third edition, 2006-02
- [4.37] “Power transformers – Part 10: Determination of sound levels”, IEC 60076-10, First edition, 2001-05
- [4.38] “Factors that influence transformer no-load current harmonics”, Al-Haj A.H., El-Amin I., IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp 163-166, January 2000
- [4.39] “Τριφασικοί Αυτομετασχηματιστές 280 MVA, 400/157,5/30 kV”, ΔΕΗ, Προδιαγραφή Νο SS-57, Αναθεώρηση Νο 15, Οκτώβριος 2008
- [4.40] “A Stitch in Time – The Complete Guide to Electrical Insulation Testing”, Megger, 2006
- [4.41] “High-voltage test techniques – Partial discharge measurements”, IEC 60270, Third edition, 2000-12

Κεφάλαιο 5

Υπολογισμός αβεβαιοτήτων

5.1 Αντικείμενο μετρήσεων

Σε 10 Μετασχηματιστές διανομής με τα ακόλουθα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:

- Ισχύς: 160 kVA
- Ονομαστικών τάσεων: 20/0.4 kV
- Ομάδας συνδεσμολογίας: Dyn11
- Είδος ψύξης: ONAN
- Τύπος λαδιού: σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60296

καταγράφηκαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δοκιμών σειράς που πραγματοποιήσε ο Ποιοτικός Έλεγχος του εργοστασίου της Schneider Electric. Από τις δοκιμές σειράς θα πραγματοποιηθεί υπολογισμός, μέσω στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των προαναφερθέντων δέκα Μ/Σ, των αβεβαιοτήτων τύπου Α των ακολούθων δοκιμών:

- Μέτρηση της αντίστασης μεταξύ των φάσεων (μέσος όρος αντιστάσεων)
- Μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού
- Μέτρηση απωλειών εν κενώ
- Μέτρηση απωλειών φορτίου

Η αβεβαιότητα μέτρησης ορίζεται ως η εκτίμηση εύρους τιμών γύρω από την μετρούμενη τιμή (\pm), το οποίο περιέχει την “πραγματική” τιμή του μετρούμενου μεγέθους με μία συγκεκριμένη πιθανότητα [5.1]. Το διάστημα αυτό, το οποίο θα περιέχει την άγνωστη τιμή της παραμέτρου με καθορισμένη πιθανότητα, ονομάζεται διάστημα εμπιστοσύνης με αντίστοιχο βαθμό εμπιστοσύνης [5.2].

Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί κατά σειρά είναι η ακόλουθη:

- Αναγραφή των μετρούμενων μεγεθών στους αντίστοιχους πίνακες
- Δημιουργία πινάκων τιμών στους οποίους υπολογίζονται και αναγράφονται, εκτός από τη σειρά των δέκα μετρήσεων (στήλη 2), η μέση τιμή των μετρήσεων (στήλη 3), οι μέσες αποκλίσεις καθεμιάς από τις δέκα μετρήσεις από τη μέση τιμή (στήλη 4), το τετράγωνο της καθεμιάς από τις μέσες αποκλίσεις (στήλη 5) και το άθροισμα των τετραγώνων των μέσων αποκλίσεων (στήλη 6)

- Υπολογισμός του απόλυτου σφάλματος της μέσης τιμής (ή τυπικής απόκλισης της μέσης τιμής)

$$\delta \bar{x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \quad (5.1)$$

- Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης του δείγματος

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (5.2)$$

- Υπολογισμός του σχετικού σφάλματος

$$\frac{\delta \bar{x}}{\bar{x}} \quad (5.3)$$

- Υπολογισμός της αβεβαιότητας μέσω της ακόλουθης εξίσωσης, η οποία χρησιμοποιείται για μικρό αριθμό μετρήσεων [5.3], όπως στη παρούσα περίπτωση (N=10)

$$U_r = \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{N}} \quad (5.4)$$

όπου:

- t ο συντελεστής Student και ίσος με 2,262 για βαθμό εμπιστοσύνης 0,95 σύμφωνα με [5.2] και [5.3]
- s_x η τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων
- N ο αριθμός των μετρήσεων

5.2 Υπολογισμός αβεβαιοτήτων της μέτρησης της αντίστασης της χαμηλής τάσης

Οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων μετρήθηκαν σε θερμοκρασία που είχαν τα τυλίγματα κατά τη δοκιμή. Για τη χρήση αυτών των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε η αναγωγή τους στη θερμοκρασία αναφοράς (75 °C). Βάσει της σχέσης 5.5, υπολογίστηκαν οι αντιστάσεις του τυλιγματος της χαμηλής τάσης στη θερμοκρασία αυτή και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

$$R_2 = R_1 \frac{310}{235 + T_1} \quad (5.5)$$

| A/A | Μετρούμενη αντίσταση a-b (mΩ) | Μετρούμενη αντίσταση a-c (mΩ) | Μετρούμενη αντίσταση b-c (mΩ) | Μέσος όρος μετρούμενης αντίστασης (mΩ) | Θερμοκρασία δοκιμής (°C) | Αντίσταση στους 75 °C (mΩ) |
|-----|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|----------------------------|
| 1 | 10,810 | 10,950 | 10,730 | 10,8300 | 19 | 13,2177 |
| 2 | 10,670 | 10,720 | 10,770 | 10,7200 | 18 | 13,1352 |
| 3 | 10,800 | 10,860 | 10,850 | 10,8367 | 19 | 13,2259 |
| 4 | 10,820 | 10,900 | 10,740 | 10,8200 | 19 | 13,2055 |
| 5 | 10,830 | 10,890 | 10,740 | 10,8200 | 19 | 13,2055 |
| 6 | 10,840 | 10,900 | 10,730 | 10,8233 | 19 | 13,2095 |
| 7 | 10,550 | 10,680 | 10,700 | 10,6433 | 16 | 13,1451 |
| 8 | 10,750 | 10,710 | 10,630 | 10,6967 | 16 | 13,2111 |
| 9 | 10,780 | 10,650 | 10,700 | 10,7100 | 16 | 13,2275 |
| 10 | 10,700 | 10,780 | 10,710 | 10,7300 | 16 | 13,2522 |

Πίνακας 5.2 – Τιμές αντιστάσεων τυλίγματος χαμηλής τάσης δείγματος δέκα Μ/Σ

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|---------------|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| A/A | x_i (mΩ) | \bar{x} (mΩ) | $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ (mΩ) | $(\Delta x_i)^2$ (mΩ) ² | $\sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2$ (mΩ) ² |
| 1 | 13,2177 | 13,2035 | 0,01420 | 0,0002015198 | 0,0118288455 |
| 2 | 13,1352 | | -0,06834 | 0,0046707521 | |
| 3 | 13,2259 | | 0,02237 | 0,0005005482 | |
| 4 | 13,2055 | | 0,00199 | 0,0000039643 | |
| 5 | 13,2055 | | 0,00199 | 0,0000039643 | |
| 6 | 13,2095 | | 0,00602 | 0,0000362236 | |
| 7 | 13,1451 | | -0,05841 | 0,0034116362 | |
| 8 | 13,2111 | | 0,00754 | 0,0000568965 | |
| 9 | 13,2275 | | 0,02397 | 0,0005745261 | |
| 10 | 13,2522 | | 0,04867 | 0,0023688145 | |

Πίνακας 5.3 – Πίνακας για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης μέσης τιμής

Συνεπώς, βάσει της εξίσωσης (5.1), η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής υπολογίζεται ότι είναι ίση με:

$$\overline{\delta x} = \sqrt{\frac{0,0118288455}{10(10-1)}} = 0,0114643629 \text{ m}\Omega$$

Η τυπική απόκλιση του δείγματος, βάσει της εξίσωσης (5.2):

$$s_x = \sqrt{\frac{0,0118288455}{10-1}} = 0,0362534987 \text{ m}\Omega$$

Το σχετικό σφάλμα, βάσει της εξίσωσης (5.3):

$$\frac{\overline{\delta x}}{\bar{x}} = \frac{0,0118288455}{13,2035} = 0,0000099543$$

Η αβεβαιότητα, βάσει της εξίσωσης (5.4):

$$U_r = \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{N}} = \frac{2,262 \cdot 0,0362534987}{\sqrt{10}} = 0,0259323889 \text{ m}\Omega$$

Συνοπτικά: **$R_x = (13,2035 \pm 0,0259) \text{ m}\Omega$**

5.3 Υπολογισμός αβεβαιοτήτων της μέτρησης της αντίστασης της μέσης τάσης

| A/A | Μετρούμενη αντίσταση A-B (Ω) | Μετρούμενη αντίσταση A-C (Ω) | Μετρούμενη αντίσταση B-C (Ω) | Μέσος όρος μετρούμενης αντίστασης (Ω) | Θερμοκρασία δοκιμής (°C) | Αντίσταση στους 75 °C (Ω) |
|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | 32,300 | 32,450 | 32,160 | 32,3033 | 19 | 39,4253 |
| 2 | 30,920 | 31,530 | 31,600 | 31,3500 | 18 | 38,4130 |
| 3 | 32,350 | 32,320 | 32,310 | 32,3267 | 19 | 39,4538 |
| 4 | 32,400 | 32,450 | 32,210 | 32,3533 | 19 | 39,4863 |
| 5 | 32,160 | 32,290 | 31,990 | 32,1467 | 19 | 39,2342 |
| 6 | 32,300 | 32,420 | 32,250 | 32,3233 | 19 | 39,4497 |
| 7 | 31,800 | 31,500 | 31,660 | 31,6533 | 16 | 39,0937 |
| 8 | 31,500 | 31,800 | 31,650 | 31,6500 | 16 | 39,0896 |
| 9 | 31,550 | 31,320 | 31,600 | 31,4900 | 16 | 38,8920 |
| 10 | 31,800 | 31,320 | 31,460 | 31,5267 | 16 | 38,9374 |

Πίνακας 5.4 - Τιμές αντιστάσεων τυλίγματος μέσης τάσης δείγματος δέκα M/Σ

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|-----------------------|---------------------------|--|------------------------------------|---|
| A/A | x_i (Ω) | \bar{x} (Ω) | $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ (Ω) | $(\Delta x_i)^2$ (Ω^2) | $\sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2$ (Ω^2) |
| 1 | 39,4253 | 39,1475 | 0,27778 | 0,0771605275 | 1,0397300179 |
| 2 | 38,4130 | | -0,73447 | 0,5394404299 | |
| 3 | 39,4538 | | 0,30634 | 0,0938422923 | |
| 4 | 39,4863 | | 0,33880 | 0,1147864296 | |
| 5 | 39,2342 | | 0,08665 | 0,0075085438 | |
| 6 | 39,4497 | | 0,30219 | 0,0913171566 | |
| 7 | 39,0937 | | -0,05379 | 0,0028936257 | |
| 8 | 39,0896 | | -0,05787 | 0,0033487203 | |
| 9 | 38,8920 | | -0,25548 | 0,0652688504 | |
| 10 | 38,9374 | | -0,21015 | 0,0441634417 | |

Πίνακας 5.5 - Πίνακας για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης μέσης τιμής

Όμοια με τη προηγούμενη παράγραφο, η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής υπολογίζεται ότι είναι ίση με:

$$\delta \bar{x} = \sqrt{\frac{1,0397300179}{10(10-1)}} = 0,1074828161 \Omega$$

Η τυπική απόκλιση του δείγματος:

$$s_x = \sqrt{\frac{1,0397300179}{10-1}} = 0,3398905082 \Omega$$

Το σχετικό σφάλμα:

$$\frac{\delta \bar{x}}{\bar{x}} = \frac{1,0397300179}{39,1475} = 0,0265592889$$

Η αβεβαιότητα:

$$U_r = \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{N}} = \frac{2,262 \cdot 0,3398905082}{\sqrt{10}} = 0,2431261300 \Omega$$

Συνοπτικά: $\mathbf{R_M = (39,1475 \pm 0,2431) \Omega}$

5.4 Υπολογισμός αβεβαιοτήτων της μέτρησης του λόγου μετασχηματισμού

Στο δείγμα των συγκεκριμένων μετασχηματιστών μετρήθηκαν οι τριφασικοί λόγοι μετασχηματισμού. Από το κάθε ένα Μ/Σ μετρήθηκαν τρεις λόγοι μετασχηματισμού, ένας για κάθε πηνίο και από τους τρεις αυτούς λόγους προέκυψε ο μέσος όρος, ο οποίος και θα αντιπροσωπεύει τον αντίστοιχο Μ/Σ.

| A/A | Πηνίο U | Πηνίο V | Πηνίο W | Μέσος όρος |
|-----|---------|---------|---------|------------|
| 1 | 57,72 | 57,71 | 57,72 | 57,7167 |
| 2 | 57,76 | 57,78 | 57,76 | 57,7667 |
| 3 | 57,74 | 57,76 | 57,76 | 57,7533 |
| 4 | 57,7 | 57,71 | 57,71 | 57,7067 |
| 5 | 57,72 | 57,72 | 57,73 | 57,7233 |
| 6 | 57,71 | 57,7 | 57,69 | 57,7000 |
| 7 | 57,72 | 57,71 | 57,7 | 57,7100 |
| 8 | 57,74 | 57,74 | 57,73 | 57,7367 |
| 9 | 57,74 | 57,7 | 57,72 | 57,7200 |
| 10 | 57,7 | 57,72 | 57,69 | 57,7033 |

Πίνακας 5.6 – Πίνακας τιμών τριφασικού λόγου μετασχηματισμού

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|---------|-----------|------------------------------|------------------|-------------------------------|
| A/A | x_i | \bar{x} | $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ | $(\Delta x_i)^2$ | $\sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2$ |
| 1 | 57,7167 | 57,7237 | -0,0070000 | 0,0000490 | 0,00441 |
| 2 | 57,7667 | | 0,0430000 | 0,0018490 | |
| 3 | 57,7533 | | 0,0296667 | 0,0008801 | |
| 4 | 57,7067 | | -0,0170000 | 0,0002890 | |
| 5 | 57,7233 | | -0,0003333 | 0,0000001 | |
| 6 | 57,7000 | | -0,0236667 | 0,0005601 | |
| 7 | 57,7100 | | -0,0136667 | 0,0001868 | |
| 8 | 57,7367 | | 0,0130000 | 0,0001690 | |
| 9 | 57,7200 | | -0,0036667 | 0,0000134 | |
| 10 | 57,7033 | | -0,0203333 | 0,0004134 | |

Πίνακας 5.7 - Πίνακας για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης μέσης τιμής

Η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής υπολογίζεται ότι είναι ίση με:

$$\delta \bar{x} = \sqrt{\frac{0,00441}{10(10-1)}} = 0,00700$$

Η τυπική απόκλιση του δείγματος:

$$s_x = \sqrt{\frac{0,00441}{10-1}} = 0,0221359436$$

Το σχετικό σφάλμα:

$$\frac{\delta \bar{x}}{\bar{x}} = \frac{0,007}{57,7237} = 0,0001212674$$

Η αβεβαιότητα:

$$U_r = \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{N}} = \frac{2,262 \cdot 0,0221359436}{\sqrt{10}} = 0,0158340000$$

Συνοπτικά: $\alpha = (57,7237 \pm 0,0158)$

5.5 Υπολογισμός αβεβαιοτήτων της μέτρησης των απωλειών εν κενώ

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|--------------|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|
| A/A | x_i (W) | \bar{x} (W) | $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ (W) | $(\Delta x_i)^2$ (W) ² | $\sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2$ (W) ² |
| 1 | 308,4 | 308,18 | 0,22 | 0,0484 | 173,696 |
| 2 | 308,4 | | 0,22 | 0,0484 | |
| 3 | 304,5 | | -3,68 | 13,5424 | |
| 4 | 305,8 | | -2,38 | 5,6644 | |
| 5 | 312,5 | | 4,32 | 18,6624 | |
| 6 | 299,5 | | -8,68 | 75,3424 | |
| 7 | 314,1 | | 5,92 | 35,0464 | |
| 8 | 305,9 | | -2,28 | 5,1984 | |
| 9 | 311,2 | | 3,02 | 9,1204 | |
| 10 | 311,5 | | 3,32 | 11,0224 | |

Πίνακας 5.8 - Πίνακας για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης μέσης τιμής

Η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής υπολογίζεται ότι είναι ίση με:

$$\delta \bar{x} = \sqrt{\frac{173,696}{10(10-1)}} = 1,3892284029 \text{ W}$$

Η τυπική απόκλιση του δείγματος:

$$s_x = \sqrt{\frac{173,696}{10-1}} = 4,3931259435 \text{ W}$$

Το σχετικό σφάλμα:

$$\frac{\delta \bar{x}}{\bar{x}} = \frac{1,3892284029}{308,18} = 0,004507847$$

Η αβεβαιότητα:

$$U_r = \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{N}} = \frac{2,262 \cdot 4,3931259435}{\sqrt{10}} = 3,1424346475 \text{ W}$$

Συνοπτικά: $\mathbf{P_{Fe} = (308,18 \pm 3,14) \text{ W}}$

5.6 Υπολογισμός αβεβαιοτήτων της μέτρησης των απωλειών φορτίου

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|--------------|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|
| A/A | x_i (W) | \bar{x} (W) | $\Delta x_i = x_i - \bar{x}$ (W) | $(\Delta x_i)^2$ (W) ² | $\sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2$ (W) ² |
| 1 | 2385,7 | 2388,47 | -2,77 | 7,6729 | 1209,401 |
| 2 | 2365,8 | | -22,67 | 513,9289 | |
| 3 | 2406 | | 17,53 | 307,3009 | |
| 4 | 2387,9 | | -0,57 | 0,3249 | |
| 5 | 2388,8 | | 0,33 | 0,1089 | |
| 6 | 2383,1 | | -5,37 | 28,8369 | |
| 7 | 2406,3 | | 17,83 | 317,9089 | |
| 8 | 2383,1 | | -5,37 | 28,8369 | |
| 9 | 2387,6 | | -0,87 | 0,7569 | |
| 10 | 2390,4 | | 1,93 | 3,7249 | |

Πίνακας 5.9 - Πίνακας για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης μέσης τιμής

Η τυπική απόκλιση της μέσης τιμής υπολογίζεται ότι είναι ίση με:

$$\delta\bar{x} = \sqrt{\frac{1209,401}{10(10-1)}} = 3,6657589786 \text{ W}$$

Η τυπική απόκλιση του δείγματος:

$$s_x = \sqrt{\frac{1209,401}{10-1}} = 11,5921477255 \text{ W}$$

Το σχετικό σφάλμα:

$$\frac{\delta\bar{x}}{\bar{x}} = \frac{3,6657589786}{2388,47} = 0,001534773$$

Η αβεβαιότητα:

$$U_r = \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{N}} = \frac{2,262 \cdot 11,5921477255}{\sqrt{10}} = 8,2919468095 \text{ W}$$

Συνοπτικά: **$P_{Cu} = (2388,47 \pm 8,29) \text{ W}$**

Βιβλιογραφία

- [5.1] “Απαιτήσεις Διακρίβωσης Εξοπλισμού Κλινικών Εργαστηρίων – Ο Ρόλος του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας (ΕΙΜ)”, Δρ. Αλέξανδρος Λευκόπουλος, Εργαστήριο Πίεσης Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας, 2010
- [5.2] “Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική”, Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, Εκδόσεις Συμεών, 1999, Έκδοση 3^η
- [5.3] “Fundamentals of Industrial Quality Control”, Lawrence S. Aft, 1998, Third Edition

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα – Επόμενη ημέρα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναλύθηκαν αρχικά τα επιμέρους μέρη (πυρήνας, τυλίγματα και λάδι) του μετασχηματιστή, καταγράφηκαν οι τρόποι επηρεασμού των ανωτέρω μερών στα χαρακτηριστικά (απώλειες, θόρυβος κ.α.) του μετασχηματιστή ενώ το κύριο μέρος της εργασίας περιελάμβανε σχετική ανάλυση των δοκιμών και μετρήσεων που πραγματοποιούνται σε εργοστάσιο κατασκευής μετασχηματιστών μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής αυτών και πριν την αποστολή τους στο πελάτη.

Για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής επωφελήθηκα της εμπειρίας μου ως Επόπτη Παραγωγής και ως Υπευθύνου Ποιοτικού Ελέγχου στο εργοστάσιο παραγωγής μετασχηματιστών διανομής της Schneider Electric στα Οινόφυτα Βοιωτίας αλλά και της εμπειρίας μου ως υπευθύνου ολοκλήρωσης των Six-Sigma Projects που ανέλαβα με θεματικά αντικείμενα τη “Βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας της ανόπτησης των μετασχηματιστών μέσης τάσης”, την “Ελαχιστοποίηση των ελαττωματικών μετασχηματιστών” και την “Ελαχιστοποίηση των οπτικών αστοχιών των μετασχηματιστών”. Έτσι, η γνώση που αποκόμισα μέσω της ανωτέρω εμπειρίας μου αλλά και του αντίστοιχου θεωρητικού υπόβαθρου βοήθησαν αποτελεσματικά στην καταγραφή των δοκιμών και μετρήσεων των μετασχηματιστών, των δυνατών συνδεσμολογιών μέτρησης, των διαδικασιών μέτρησης όπως αυτές καθορίζονται βάσει των δύο βασικών προτύπων IEC και IEEE και στον υπολογισμό στις συγκεκριμένες δοκιμές των αβεβαιοτήτων τύπου A. Ο σκοπός της καταγραφής των ανωτέρω ήταν στο να αποτελέσει η εργασία αυτή ένας οδηγός προς κάθε ενδιαφερόμενο ως προς την πρακτική και θεωρητική πλευρά των δοκιμών και μετρήσεων των μετασχηματιστών.

Ένα συμπληρωματικό πεδίο έρευνας μίας άλλης διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να ήταν ο υπολογισμός της αβεβαιότητας τύπου B των συγκεκριμένων ή και περισσότερων δοκιμών. Επίσης θα ήταν δυνατή η επιλογή θέματος σχετικού με τη καταγραφή και την ανάλυση των δοκιμών που εκτελούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας της κατασκευής των μετασχηματιστών όπως είναι οι δοκιμές στις πρώτες ύλες (χάλυβας, μεταλλικά, λάδι) και στα ημιέτοιμα προϊόντα (πυρήνας, πηνίο).