



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

(Study of a single-phase transformer)

Όνομ/μο Σπουδαστή: Φουρμούζης Στέφανος

Αρ. Μητρώου: 40017

Επιβλέπων : Δρ. Ηλ. Μηχ. Καραϊσάς Πέτρος, Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, 2018

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή – Ιστορική αναδρομή	4
Ορισμός	4
Ιστορική εξέλιξη	4
Βασικές αρχές	5
ΣΚΟΠΟΣ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	9
«ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ»	9
1.1. Γενικά	9
1.2. Ισχύς στους ιδανικούς Μ/Σ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	12
«ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ»	12
2.1. Θεωρητική ανάλυση λειτουργίας πραγματικού μετασχηματιστή.....	12
2.2. Ρεύμα μαγνήτισης ενός ιδανικού μετασχηματιστή	13
2.3. Λόγος ρευμάτων και υπολογισμός της πολικότητας πραγματικού μετασχηματιστή	16
2.4. Παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστή.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	20
«ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ»	20
3.1 Γενικά	20
3.2 Ανάπτυξη Ισοδύναμου κυκλώματος ενός Πραγματικού Μετασχηματιστή.....	20
3.3 Διακύμανση τάσης και απόδοση μετασχηματιστών	23
3.4 Διανυσματικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή.....	23
3.5 Αυτομετασχηματιστής.....	25
3.5.1 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα του Αυτομετασχηματιστή	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	29
«ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ»	29
4.1 Γενικά	29
4.1.1 Μέτρηση της στάθμης θορύβου των μετασχηματιστών	29
4.1.2 Αντιμετώπιση του θορύβου των μετασχηματιστών	29
4.2 Προστασία των μετασχηματιστών	29

4.2.1 Προστασία σε Βραχυκύκλωμα	30
4.2.2 Προστασία Μετασχηματιστή σε Υπερφόρτιση	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°	32
«ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ»	32
5.1 Γενικά	32
5.2 Αγωγή θερμότητας	32
5.3 Φορτίσεις μετασχηματιστή	32
5.4 Θέρμανση των τυλιγμάτων κατά το βραχυκύκλωμα	32
5.5 Ψύξη των μετασχηματιστών μετά το βραχυκύκλωμα.....	33
5.6 Δοχείο μετασχηματιστή.....	34
5.7 Δοχείο διαστολής.....	36
5.8 Ψύξη	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°	38
«ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ»	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°	39
«ΠΥΡΗΝΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ»	39
7.1 Μαγνητικές ιδιότητες ελάσματος του πυρήνα του μετασχηματιστή ...	39
7.2 Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα τριφασικού μετασχηματιστή	41
7.3 Απώλειες κενής λειτουργίας.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8°	44
«ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ»	44
8.1 Γενικά	44
8.2 Συνδεσμολογία Τριγώνου - Αστέρα.....	44
8.3 Συνδεσμολογία Αστέρα – Αστέρα και Αστέρα – Τεθλασμένου Αστέρα	47
8.4 Πεντάστηλος τριφασικός μετασχηματιστής	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9°	48
«ΠΕΔΙΟ ΣΚΕΔΑΣΗΣ»	48
9.1 Γενικά	48
9.2 Κύριο πεδίο σκέδασης.....	48
9.3 Εγκάρσιο πεδίο σκέδασης.....	51
9.4 Τάση βραχυκύκλωσης	53
9.5 Ωμική τάση βραχυκύκλωσης.....	53
9.6 Επαγωγική τάση βραχυκύκλωσης.....	53
9.5 Πτώση τάσης.....	54

9.6 Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης	55
9.7 Υπολογισμός αντοχής δοκών σύσφιξης	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10°	57
«ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΝΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ»	57
10.1 Γενικά	57
10.2 Δοκιμές σειράς	57
10.2.1 Μέτρηση της αντίστασης τυλιγμάτων	57
10.2.2 Μέτρηση σχέσης μέτρηση σχέσης μετασχηματισμού	57
10.2.3 Έλεγχος αριθμού σπειρών ενός πηνίου	59
10.2.4 Μέτρηση πολιτικότητας	59
10.3 Δοκιμές τύπου	60
10.3.1 Δοκιμές ανύψωσης θερμοκρασίας	60
10.3.2 Μέτρηση θερμοκρασίας των τυλιγμάτων	60
10.3.3 Μέτρηση θερμοκρασίας άνω στρώματος λαδιού	61
10.3.4 Δοκιμή κρουστικής τάσης	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11°	63
«ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ»	63
11.1 Υποσταθμός καταναλωτή μέσης τάσης	63
11.2 Εγκατάσταση της ΔΕΗ	63
11.3 Εγκατάσταση καταναλωτή μέσης τάσης	63
11.3.1 Πίνακας Μέσης Τάσης (20KV)	64
11.3.2 Γενικός Πίνακας Διανομής Χαμηλής Τάσης (400V)	64
11.3.3 Ζυγοί – Καλώδια	64
11.3.4 Γείωση Υποσταθμού	64
11.4 Μετασχηματιστές Ισχύος (20/0.4KV)	67
11.5 Μετασχηματιστής ξηρού τύπου	68
11.6 Μετασχηματιστής ελαίου	68

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

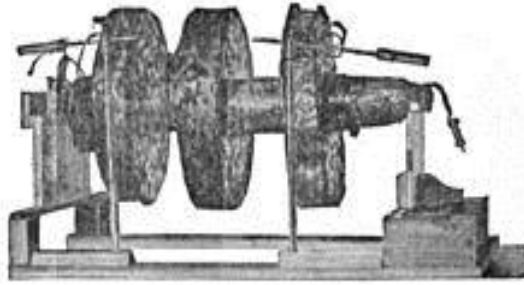
Εισαγωγή – Ιστορική αναδρομή

Ορισμός

Ο μετασχηματιστής είναι συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο κυκλωμάτων, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών. Οι Μ/Σ συγκαταλέγονται ανάμεσα στις πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές, με κάποιες μεγάλες μονάδες να αποδίδουν έως και το 99,75% της ισχύος εισόδου τους στην έξοδό τους. Οι Μ/Σ έχουν μεγάλο εύρος μεγεθών, που κυμαίνεται από μέγεθος νυχιού (όπως αυτοί που βρίσκονται μέσα σε ένα μικρόφωνο) έως τεράστιες μονάδες με βάρος εκατοντάδων τόνων που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση τμημάτων των εθνικών δικτύων ηλεκτροδότησης. Όλοι λειτουργούν με βάση τις ίδιες αρχές, αν και υπάρχει πληθώρα διαφορετικών υλοποιήσεων. Ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα στο πρώτο κύκλωμα (το "πρωτεύον") δημιουργεί ανάλογα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει μεταβαλλόμενη τάση στο δεύτερο κύκλωμα (το "δευτερεύον"). Το φαινόμενο αυτό καλείται αμοιβαία επαγωγή. Αν ένας ηλεκτρικός καταναλωτής είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα, τότε θα υπάρξει ροή ηλεκτρικού φορτίου στο δευτερεύον τύλιγμα του Μ/Σ. Αυτό το φορτίο θα μεταφέρει ενέργεια από το πρωτεύον κύκλωμα, στον καταναλωτή που είναι συνδεδεμένος στο δευτερεύον κύκλωμα.

Ιστορική εξέλιξη

Η αρχή λειτουργίας του Μ/Σ διατυπώθηκε το 1831 από τον Michael Faraday, αν και αν χρησιμοποίησε μόνο για επίδειξη των αρχών της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, νωρίς να προβλέψει την πρακτική της σημασία. Ο πρώτος Μ/Σ σε ευρεία χρήση ήταν το πηνίο επαγωγής, το οποίο εφηύρε ο Ιρλανδός κληρικός Nicolas Kalam το 1836. Ήταν ένας από τους πρώτους που κατάλαβαν την αρχή πως όσο περισσότερες περιελίξεις έχει το τύλιγμα ενός Μ/Σ, τόσο μεγαλύτερη ηλεκτρεγερτική δύναμη παράγει. Τα πηνία επαγωγής δημιουργήθηκαν από τις προσπάθειες των επιστημόνων για παροχή υψηλότερων τάσεων από μπαταρίες. Δεν τροφοδοτούνταν από εναλλασσόμενο ρεύμα, αλλά από συνεχές, προερχόμενο από μπαταρίες, το οποίο διακόπτονταν από ένα δονούμενο διακοπτικό μηχανισμό. Μεταξύ 1830-1870 οι προσπάθειες για δημιουργία καλύτερων επαγωγικών πηνίων, κυρίως με τη μέθοδο της δοκιμής και αποτυχίας (trial and error), αποκάλυψαν σταδιακά τις βασικές αρχές της λειτουργίας του Μ/Σ. Αποδοτικοί σχεδιασμοί δεν ανακαλύφθηκαν παρά μετά το 1880, όμως μέσα σε λιγότερο από μια δεκαετία ο Μ/Σ αποδείχτηκε ουσιώδης στην επικράτηση των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι αυτών του συνεχούς, θέση την οποία κρατούν μέχρι και σήμερα.



Το πηνίο του Κάλαν, 1836

Ο Ρώσος μηχανικός Πάβελ Γιαμπλότσκοφ εφηύρε το 1876 ένα σύστημα φωτισμού, βασισμένο ένα σύνολο από πηνία επαγωγής, όπου τα πρωτεύοντα τυλίγματα ήταν συνδεδεμένα σε πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ τα δευτερεύοντα μπορούσαν να συνδεθούν σε αρκετά "κεριά Γιαμπλότσκοφ" (είδος ηλεκτρικού λαμπτήρα τόξου). Στην πατέντα ισχυριζόταν ότι το σύστημα μπορούσε να "παρέχει ανεξάρτητα ισχύ σε διάφορους λαμπτήρες, με διαφορετική ισχύ φωτεινότητας, από μία πηγή ηλεκτρικής ισχύος". Προφανώς, το πηνίο επαγωγής σε αυτό το σύστημα λειτουργούσε ως Μ/Σ. Οι Λουσιέν Γκολάρ και Τζον Ντίξον Γκιμπς επέδειξαν πρώτοι το 1882 στο Λονδίνο μια συσκευή με ανοιχτό πυρήνα σιδήρου που αποκαλούσαν "δευτερεύουσα γεννήτρια", ιδέα που πούλησαν στη συνέχεια στην αμερικανική εταιρεία Ουέστινγκχαους. Την ίδια συσκευή επέδειξαν και το 1884 στο Τορίνο, όπου υιοθετήθηκε για ένα ηλεκτρικό σύστημα φωτισμού. Οι Ούγγροι μηχανικοί Κάρολι Ζιπερνόφσκι, Όττο Μπλάθι και Μίκσα Ντέρι, από την εταιρεία Γκαντζ στην Βουδαπέστη δημιούργησαν το αποδοτικό μοντέλο κλειστού πυρήνα "ZBD" το 1885, βασισμένοι σε ένα σχέδιο των Γκολάρ και Γκιμπς. Ένας φυσικός της Ουέστινγκχαους, ο Ουίλλιαμ Στάνλεϊ, δημιούργησε την πρώτη εμπορική υλοποίηση Μ/Σ το 1885, μετά την αγορά από τον Τζορτζ Ουέστινγκχαους των πατεντών των Γκολάρ και Γκιμπς. Ο πυρήνας ήταν κατασκευασμένος από πλάκες σιδήρου σχήματος "Ε", οι οποίες έμπαιναν η μία μέσα στην άλλη. Αυτό το σχέδιο χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1886. Η αίτηση ευρεσιτεχνίας έκανε για πρώτη φορά αναφορά στη λέξη "Μ/Σ". Ο Ρώσος μηχανικός Michael Dolivo Dobronolski ανέπτυξε τον πρώτο τριφασικό Μ/Σ το 1889. Το 1891 ο Νικόλα Τέσλα εφηύρε το πηνίο Τέσλα, ένα Μ/Σ συντονισμού με πυρήνα αέρα, για την παραγωγή πολύ υψηλών τάσεων σε υψηλές συχνότητες. Μετασχηματιστές ακουστών συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκαν για τα πρώτα πειράματα της ανάπτυξης του τηλεφώνου. Παρότι νέες τεχνολογίες έχουν καταστήσει τους μετασχηματιστές παρωχημένους για ορισμένες ηλεκτρονικές εφαρμογές, μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται ακόμα σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές. Οι μετασχηματιστές είναι επίσης βασικοί στην μετάδοση ρευμάτων υψηλής τάσης, τεχνική που κάνει οικονομικά βιώσιμη τη μετάδοση ηλεκτρικής ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.

Βασικές αρχές

Ο Μ/Σ βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον, ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει ένα μαγνητικό πεδίο (ηλεκτρομαγνητισμός) και, δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυλιγμένο σύρμα ("τύλιγμα"),

επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλίγματος (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή). Μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον

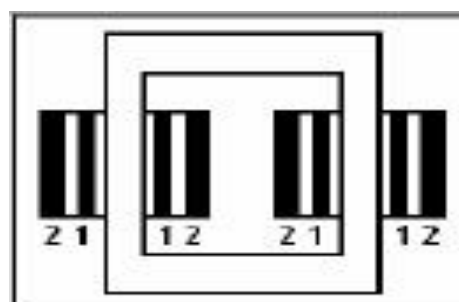
τύλιγμα, αλλάζει η ένταση του μαγνητικού του πεδίου. Εφόσον το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εκτείνεται και στο δευτερεύον τύλιγμα, επάγεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος. Ένας ιδανικός Μ/Σ υποβιβασμού τάσης με επισημασμένη την μαγνητική ροή στον πυρήνα του. Στο σχήμα φαίνεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα Μ/Σ. Ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο. Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα περιελίσσονται γύρω από ένα μαγνητικό πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, π.χ. από σίδηρο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι όσο το δυνατόν περισσότερες γραμμές του μαγνητικού πεδίου που παράγει το πρωτεύον ρεύμα, βρίσκονται εντός του πυρήνα και περνούν τόσο από το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον τύλιγμα.

ΣΚΟΠΟΣ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Βασικός σκοπός των Μ/Σ είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας ενός επιπέδου τάσεως σε ίδιας συχνότητας εναλλασσόμενη ηλεκτρική ενέργεια, αλλά διαφορετικού επιπέδου τάσεως. Επιπλέον οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται και σε άλλες εφαρμογές όπως η μέτρηση τάσεως ή ρεύματος κλπ. Οι μετασχηματιστές ισχύος κατασκευάζονται με δύο τρόπους. Στο πρώτο, τα τύλιγμα τοποθετούνται γύρω από τις δυο πλευρές ενός ορθογωνίου πυρήνα από φύλλα χάλυβα. Γύρω από τον πυρήνα τυλίγονται το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα που βρίσκεται σε μαγνητική σύζευξη μέσω του κοινού πυρήνα.

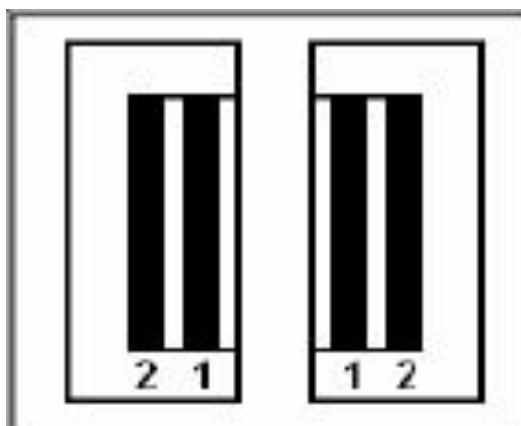
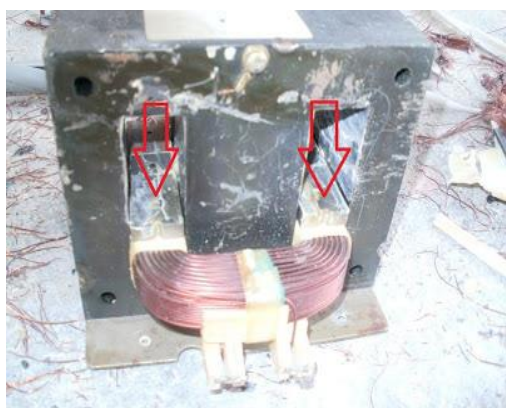
Πρωτεύον είναι το τύλιγμα το οποίο προσλαμβάνει ενέργεια και το **Δευτερεύον** το τύλιγμα που αποδίδει ενέργεια.

Ο πυρήνας είναι ο φορέας της εναλλασσόμενης μαγνητικής ροής η οποία διαρρέει και τα δυο τυλίγματα και επάγει σε αυτά τάσεις. Κατασκευάζεται από υλικό με μεγάλη διαπερατότητα και παρουσιάζει μικρή μαγνητική αντίσταση. Τα υλικά αυτά είναι ελάσματα σιδήρου πάχους 0,3 mm για να περιορίζουν τα διννορρέυματα τα οποία δημιουργούν αυξημένες απώλειες. Στην μια πλευρά τους έχουν μονωτικό υλικό για να εξασφαλίζεται η μεταξύ τους μόνωση.



Σχήμα 1: Μετασχηματιστής τύπου πυρήνα

Ο δεύτερος τρόπος κατασκευής Μ/Σ πραγματοποιείται σε έναν πυρήνα που αποτελείται από τρία στελέχη. Τα τυλίγματα του Μ/Σ τοποθετούνται στο μεσαίο στέλεχος και περιβάλλονται από τα δυο εξωτερικά στελέχη. Η διατομή του μεσαίου στελέχους είναι διπλάσια της διατομής των δυο άλλων και των ζυγωμάτων επειδή η μαγνητική ροή που διέρχεται από το μεσαίο στέλεχος είναι διπλάσια της ροής των άλλων τμημάτων. Αυτός ο Μ/Σ φαίνεται στο σχήμα 2 και ονομάζεται Μ/Σ τύπου μανδύα.



Σχήμα 2: Μετασχηματιστής τύπου μανδύα

Και στις δύο περιπτώσεις, οι πυρήνες είναι κατασκευασμένοι από λεπτά δυναμοελάσματα τα οποία είναι ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους και αυτό αποσκοπεί στη μείωση των δινορρευμάτων. Στους πραγματικούς μετασχηματιστές τα δυο τυλίγματα τοποθετούνται ομόκεντρα, ώστε το τύλιγμα με το χαμηλότερο επίπεδο τάσης να βρίσκεται στο εσωτερικό του άλλου τυλίγματος. Αυτό εξυπηρετεί τους παρακάτω σκοπούς :

- Επιλύει το πρόβλημα της μόνωσης μεταξύ του πυρήνα και του τυλίγματος υψηλής τάσης
- Η μαγνητική ροή διαρροής μειώνεται σημαντικά σε σχέση με οποιονδήποτε άλλο τρόπο κατασκευής.

Ανάλογα τη λειτουργία τους στο σύστημα ισχύος οι μετασχηματιστές παίρνουν διάφορες ονομασίες. Ο Μ/Σ που συνδέεται στην έξοδο μιας γεννήτριας και ανυψώνει το επίπεδο της τάσεως εξόδου της (π.χ. στα 100KV), πριν οδηγηθεί στη γραμμή μεταφοράς, ονομάζεται Μ/Σ μονάδος. Ο Μ/Σ στο άλλο άκρο της γραμμής μεταφοράς που υποβιβάζει το επίπεδο τάσης της γραμμής στα επίπεδα διανομής (2,3 - 34,5 KV) ονομάζεται Μ/Σ υποσταθμού. Τέλος, ο Μ/Σ που υποβιβάζει την τάση διανομής στα επίπεδα χρησιμοποίησης τάσης λέγεται Μ/Σ διανομής. Όλοι οι μετασχηματιστές παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους και η βασικότερη από αυτές βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται ο καθένας. Εκτός τους μετασχηματιστές ισχύος σημαντικοί είναι άλλοι δύο τύποι Μ/Σ. Ο Μ/Σ τάσης, όπου χρησιμοποιείται για τη μετατροπή υψηλής τάσης σε κάποια χαμηλή τιμή ανάλογη της πρώτης. Ο δεύτερος που λέγεται Μ/Σ ρεύματος, μετατρέπει

το υψηλό ρεύμα εισόδου σε χαμηλό ρεύμα δευτερεύοντος ανάλογο του
ρεύματος εισόδου.

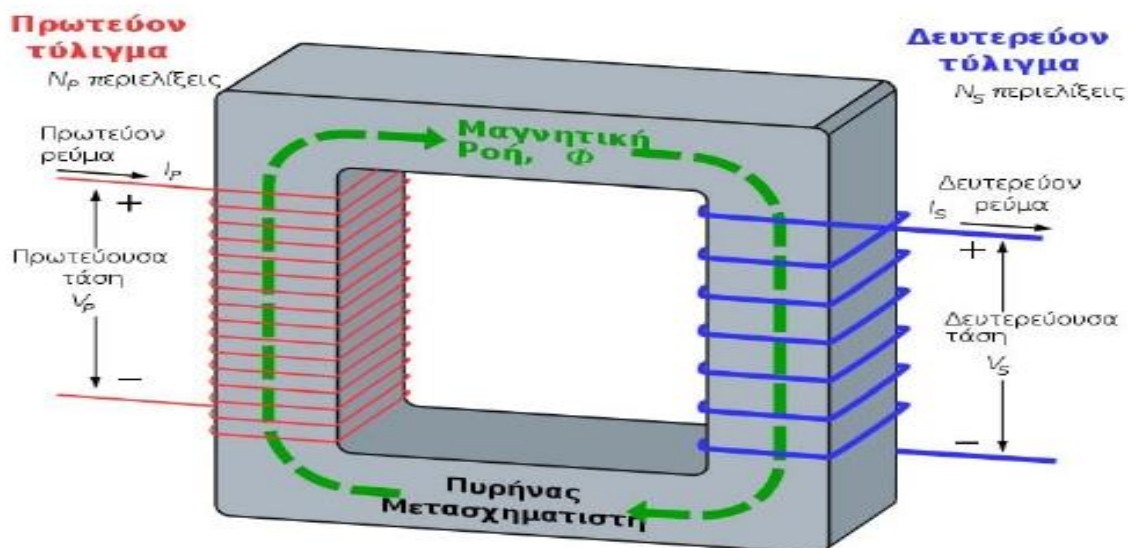
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°

«ΙΔΑΝΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ»

1.1. Γενικά

Ιδανικός Μ/Σ είναι η διάταξη που δεν παρουσιάζει απώλειες και διαθέτει μια περιέλιξη εισόδου και μια εξόδου. Οι σχέσεις μεταξύ τάσεων εισόδου-εξόδου και μεταξύ των ρευμάτων εισόδου και εξόδου δίνονται από δύο σχέσεις. Στο σχήμα 3 φαίνεται ένας ιδανικός Μ/Σ. Το πρωτεύον τύλιγμα του διαθέτει N_p σπείρες και το δευτερεύον του N_s σπείρες. Η εξίσωση που δίνει τη σχέση μεταξύ της εφαζόμενης τάσης στο πρωτεύον $V_p(t)$ και της τάσης στα άκρα του δευτερεύοντος $V_s(t)$ είναι η:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s} \quad (\text{Σχέση 1})$$



Σχήμα 3: Διάγραμμα ιδανικού Μ/Σ

$$N_p * I_p(t) = N_s * I_s(t) \quad (\text{Σχέση 2})$$

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{1}{a} \quad (\text{Σχέση 3})$$

Και στο πεδίο της συχνότητας οι παραπάνω εξισώσεις γίνονται:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (\text{Σχέση 4})$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{a} \quad (\text{Σχέση 5})$$

Από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται πως οι V_p και V_s όσο και τα I_p και I_s παρουσιάζουν μεταξύ τους ίδιες φάσεις. Αυτό σημαίνει πως ο λόγος μετασχηματισμού επηρεάζει μόνο τα μέτρα των τάσεων και των ρευμάτων

του Μ/Σ και όχι τις φάσεις τους. Οι εξισώσεις 1 – 5 αν και δίνουν ακριβείς σχέσεις μεταξύ τάσεων και ρευμάτων στα τυλίγματα ενός ιδανικού Μ/Σ, αφήνουν άλυτο το ζήτημα της πολικότητας τους τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον. Ο μόνος τρόπος για να βρεθεί η πολικότητα στο δευτερεύον ενός πραγματικού Μ/Σ είναι να ανοιχθεί το κέλυφος της συσκευής και να εξετασθεί το ίδιο τύλιγμα. Για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο, στο κυκλωματικό διάγραμμα του Μ/Σ χρησιμοποιούνται τελείες που δείχνουν τη πολικότητα της τάσεως και του ρεύματος. Η σύμβαση που εφαρμόζεται στα αντίστοιχα κυκλωματικά διαγράμματα είναι η εξής:

- Αν στο σημειωμένο με τελεία άκρο του πρωτεύοντος είναι θετικότερη σε σχέση με το μη σημειωμένο με τελεία άκρο του τότε και η τάση στο σημειωμένο με τελεία άκρο του δευτερεύοντος είναι θετικότερη σε σχέση με το άλλο άκρο του. Δηλαδή, οι πολικότητες των τάσεων στα δυο τυλίγματα του Μ/Σ είναι ίδιες σε σχέση με τα σημειωμένα άκρα τους.
- Αν το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα του Μ/Σ έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του, τότε το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα θα έχει φορά προς το μη σημειωμένο άκρο του.

1.2. Ισχύς στους ιδανικούς Μ/Σ

Η ισχύς εισόδου στο πρωτεύον έχει τιμή :

$$P_{in} = V_p * I_p * \cos\theta_p \quad (\text{Σχέση 6})$$

όπου θ_p , η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος στο πρωτεύον. Αντίστοιχα, η ισχύς που προσφέρει ο Μ/Σ στα φορτία του είναι ίση με :

$$P_{out} = V_s * I_s * \cos\theta_s \quad (\text{Σχέση 7})$$

όπου θ_s η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους τα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος στο δευτερεύον τύλιγμα. Επίσης, επειδή οι φάσεις των τάσεων και των ρευμάτων σε ένα ιδανικό Μ/Σ δεν επηρεάζονται, ισχύει ότι $\theta_s = \theta_p = \theta$. Αυτό σημαίνει ότι οι συντελεστές ισχύος του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος ενός ιδανικού Μ/Σ είναι ίσοι μεταξύ τους. Η σχέση μεταξύ της ισχύος εισόδου στο πρωτεύον κύκλωμα του ιδανικού Μ/Σ και της ισχύος εξόδου στο δευτερεύον είναι δυνατό να υπολογιστεί από τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων και των ρευμάτων στις δυο πλευρές του (σχ. 1 και 5). Η ισχύς εξόδου του Μ/Σ είναι :

$$P_{out} = V_s * I_s * \cos\theta \quad (\text{Σχέση 8})$$

Εφαρμόζοντας στη σχ.8 τις εξισώσεις μετασχηματισμού :

$$V_s = \frac{V_p}{a} \text{ και } I_s = \frac{a}{I_p} \text{ έχουμε:}$$

$$\left. \begin{aligned} P_{out} &= \frac{V_s}{a} * a * I_p * \cos\theta \\ P_{out} &= V_s * I_s * \cos\theta = P_{in} \end{aligned} \right\} \text{ (Σχέση 9)}$$

Δηλαδή, η ισχύς εξόδου ενός ιδανικού Μ/Σ είναι ίση με την ισχύ εισόδου. Το ίδιο ακριβώς ισχύει για την άεργο ισχύ Q, καθώς και για τη φαινόμενη ισχύ S ενός Μ/Σ

$$Q_{in} = V_p * I_p * \sin\theta = V_s * I_s * \sin\theta = Q_{out} \text{ (Σχέση 10) και}$$

$$S_{in} = V_p * I_p = V_s * I_s = S_{out} \text{ (Σχέση 11)}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

«ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ»

2.1. Θεωρητική ανάλυση λειτουργίας πραγματικού μετασχηματιστή

Ο ιδανικός Μ/Σ είναι μη υλοποιήσιμος σε αντίθεση με τον πραγματικό ο οποίος είναι υλοποιήσιμος. Κατασκευάζεται με δυο ή περισσότερα πηνία τυλιγμένα γύρω από κάποιο σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του πραγματικού Μ/Σ προσεγγίζουν αυτά του ιδανικού. Ο Μ/Σ του σχήματος 4, αποτελείται από δυο πηνία τυλιγμένα στις δυο πλευρές του πυρήνα του. Στα άκρα του πρωτεύοντος πηνίου εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση, ενώ το δευτερεύον πηνίο είναι ανοιχτό. Στο σχήμα 5, διατυπώνεται η καμπύλη υστέρησης του Μ/Σ. Ο νόμος του Faraday που δίνει την αρχή λειτουργίας του Μ/Σ γράφεται:

$$e_{\text{ind}} = \frac{d\lambda}{dt}$$

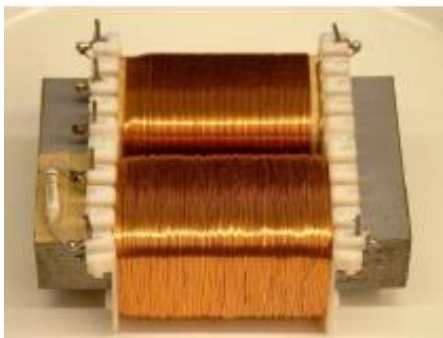
όπου λ είναι η πεπλεγμένη ροή του πηνίου στο οποίο επάγεται τάση. Η πεπλεγμένη ροή είναι το άθροισμα των ροών που διέρχονται από καθεμιά σπείρα

$$\text{του} \quad \text{πηνίου}$$
$$\sum_{i=1}^N \varphi_i$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή δεν είναι απλά ίση με $N\varphi$ ($N=0$ αριθμός σπειρών), επειδή η ροή που διέρχεται από την κάθε σπείρα δεν είναι ίδια για όλες τις σπείρες, αλλά διαφέρει ανάλογα με τη θέση της καθεμιάς στον πυρήνα. Αν η συνολική πεπλεγμένη ροή σε ολόκληρο το πηνίο είναι λ και ο αριθμός των σπειρών του είναι N , η μέση τιμή της ροής ανά σπείρα του πηνίου δίνεται από τη σχέση :

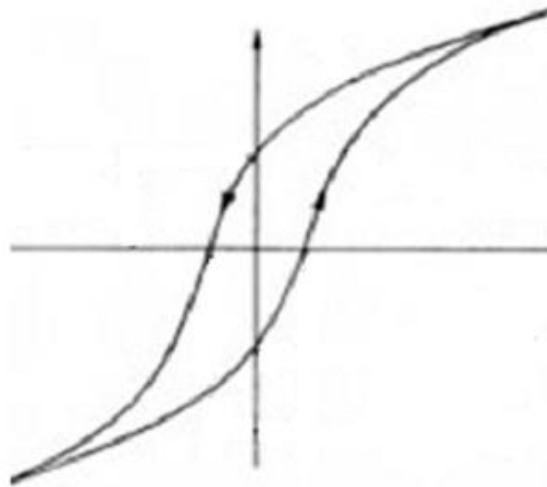
$$\varphi = \frac{\lambda}{N} \quad (\text{Σχέση12})$$

οπότε ο νόμος Faraday γίνεται : $e_{\text{ind}} = N * \frac{d\varphi}{dt}$ (Σχέση13)





Σχήμα 4 : Διάγραμμα ενός πραγματικού Μ/Σ χωρίς φορτίο στο δευτερεύον



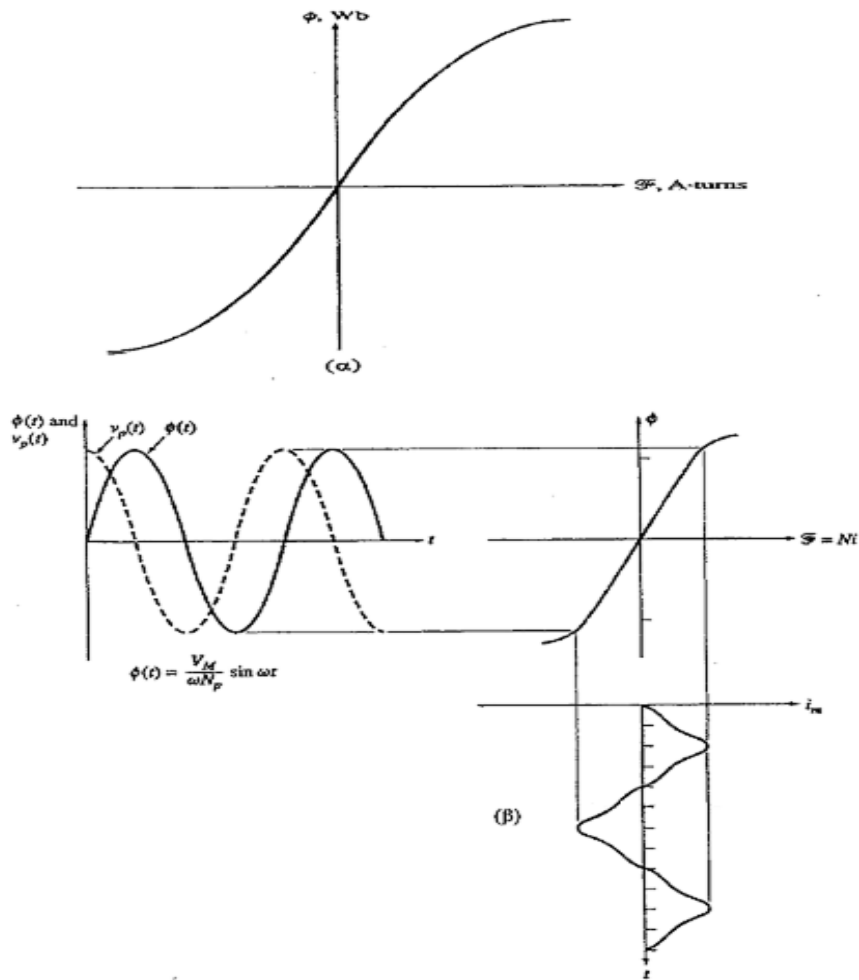
Σχήμα 5 : Καμπύλη υστέρησης Μ/Σ

2.2. Ρεύμα μαγνήτισης ενός ιδανικού μετασχηματιστή

Αν στο πρωτεύον ενός Μ/Σ εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση όπως στο σχήμα 4 τότε το τύλιγμα διαρρέεται από ρεύμα, ακόμη και αν στο δευτερεύον του δε συνδέεται κανένα φορτίο. Αυτό το ρεύμα, είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πυρήνα και αποτελείται από δυο συνιστώσες.

- Το ρεύμα μαγνήτισης i_M , που είναι η αιτία ανάπτυξης μαγνητικής ροής στον πυρήνα του Μ/Σ.
- Το ρεύμα απωλειών πυρήνα i_{h+e} , που αντιστοιχεί στο φαινόμενο της υστέρησης και στα δινορρεύματα του πυρήνα.

Στο σχήμα 7α φαίνεται η καμπύλη μαγνήτισης του πυρήνα ενός Μ/Σ. Αν είναι γνωστή η ροή στο εσωτερικό του πυρήνα, τότε το ρεύμα μαγνήτισης υπολογίζεται από την καμπύλη του σχήματος 7β.



**Σχήμα 6: (α) Η καμπύλη μαγνήτισης για τον πυρήνα του Μ/Σ
(β) Το ρεύμα μαγνήτισης που προκαλεί η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του πυρήνα ενός Μ/Σ**

Έστω ότι στον παραπάνω πυρήνα η ροή διαρροής αγνοείται. Η μέση τιμή της ροής στον πυρήνα θα δίνεται από τη σχέση 14,α

$$\Phi = \frac{1}{N_p} * \int V_p(t) dt \quad (\text{Σχέση 14,α})$$

Αν η τάση που εφαρμόζεται στο πρωτεύον δίνεται από την αντίστοιχη ροή θα είναι

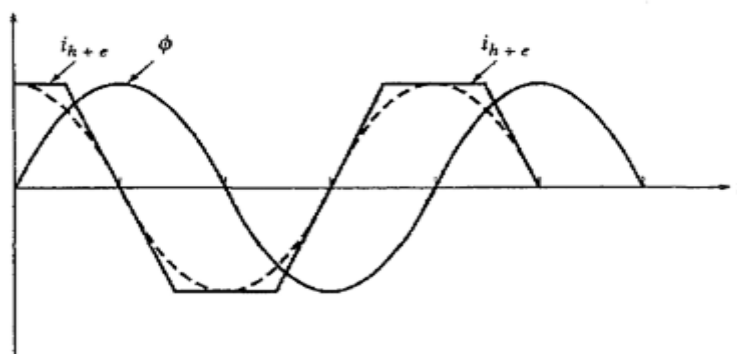
$$\Phi = \frac{1}{N_p} * \int VM \cos \omega t dt = \left(\frac{VM}{\omega N_p} \right) * \sin \omega t W_b \quad (\text{Σχέση 14,β})$$

Οι τιμές του ρεύματος που απαιτούνται για την ανάπτυξη μιας συγκεκριμένης μαγνητικής ροής στον πυρήνα (σχήμα 6α) συγκρίνονται με τις τιμές ροής σε διάφορες χρονικές στιγμές και δίνουν την κυματομορφή του ρεύματος μαγνήτισης του τυλίγματος. Αυτή η κυματομορφή φαίνεται στο σχήμα 6β.

Οι παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν σε αυτή την κυματομορφή είναι οι ακόλουθες:

- Το ρεύμα μαγνήτισης του τυλίγματος ενός Μ/Σ δε μεταβάλλεται ημιτονοειδώς. Οι αρμονικές υψηλών συχνοτήτων που παρουσιάζει η κυματομορφή του οφείλονται στον κορεσμό του πυρήνα.
- Κάθε φορά που η μέγιστη μαγνητική ροή φτάνει στο σημείο κορεσμού του πυρήνα, ακόμη και για μικρή αύξηση της ροής, απαιτείται μεγάλη αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης.
- Η κυματομορφή της βασικής συχνότητας του ρεύματος μαγνήτισης καθυστερεί σε σχέση με την κυματομορφή της κατά 90° .
- Οι αρμονικές υψηλών συχνοτήτων που παρουσιάζει η κυματομορφή του ρεύματος μαγνήτισης, μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερες σε πλάτος από τη βασική συχνότητα.

Η δεύτερη συνιστώσα του ρεύματος, που εμφανίζεται στην αφόρτιστη λειτουργία ενός πραγματικού Μ/Σ, είναι το ρεύμα που μεταφέρει την ισχύ η οποία καταναλώνεται στον πυρήνα με τη μορφή απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Έστω ότι η κυματομορφή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του πυρήνα είναι ημιτονοειδής. Επειδή τα δινορρεύματα που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του πυρήνα είναι ανάλογα της ποσότητας $d\phi/dt$, η τιμή τους είναι μέγιστη τη στιγμή που η ροή περνά από το 0. Οι απώλειες υστέρησης παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό μη γραμμικότητας αλλά γίνονται και αυτές μέγιστες τη στιγμή που η κυματομορφή της ροής περνά από το 0. Στο σχήμα 8 φαίνεται η κυματομορφή του ρεύματος απωλειών του πυρήνα.



Σχήμα 7: Το ρεύμα απωλειών πυρήνα σε ένα Μ/Σ

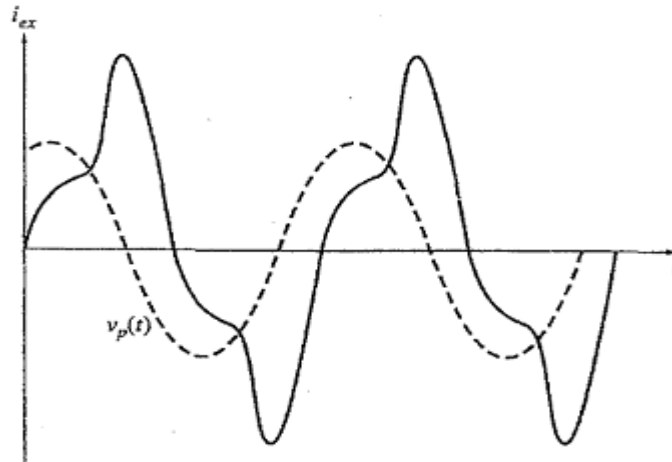
Σε αυτό το τμήμα του ρεύματος του Μ/Σ γίνονται οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Το ρεύμα απωλειών του πυρήνα είναι παραμορφωμένο εξαιτίας της μη γραμμικότητας των απωλειών υστέρησης.
- Η κυματομορφή της βασικής συχνότητας του ρεύματος απωλειών του πυρήνα βρίσκεται σε φάση με την κυματομορφή της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του Μ/Σ.

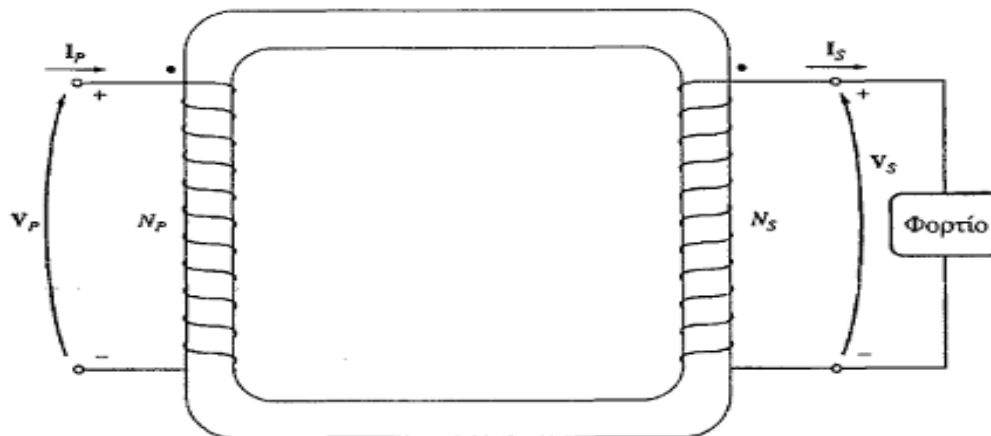
Το συνολικό ρεύμα στο τυλίγμα του Μ/Σ, ονομάζεται ρεύμα διέγερσης και είναι το άθροισμα του ρεύματος μαγνήτισης και του ρεύματος απωλειών πυρήνα:

$$I_{ex} = I_M + I_{h+e} \quad (\text{Σχέση 15})$$

Η κυματομορφή του ρεύματος διέγερσης ενός συνηθισμένου Μ/Σ δίνεται στο σχήμα 8.



Σχήμα 8: Το συνολικό ρεύμα διέγερσης



Σχήμα 9: Ένας πραγματικός Μ/Σ με το φορτίο συνδεδεμένο στο δευτερεύον

2.3. Λόγος ρευμάτων και υπολογισμός της πολικότητας πραγματικού μετασχηματιστή

Έστω ότι κάποιο φορτίο συνδέεται στα άκρα του Μ/Σ όπως στο σχήμα 10. Οι τελείες με τις οποίες σημειώνονται τα τυλίγματα του Μ/Σ βοηθούν, όπως και στους ιδανικούς Μ/Σ, στον υπολογισμό πολικότητας των τάσεων και των ρευμάτων στα δυο τυλίγματα, όταν είναι αδύνατη η φυσική τους εξέταση. Η φυσική εξήγηση της τοποθέτησης των τελειών είναι το ότι ένα ρεύμα που έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του τυλίγματος προκαλεί θετική

μαγνητεγερτική δύναμη, ενώ το ρεύμα που έχει φορά προς το μη σημειωμένο άκρο προκαλεί αρνητική μαγνητεγερτική δύναμη. Έτσι οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις που προκαλούνται από δυο ρεύματα με φορές προς τα σημειωμένα άκρα αντιστοίχων τυλίγμάτων προστίθενται. Αντίθετα, αν το ρεύμα ενός τυλίγματος έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του και το ρεύμα του άλλου τυλίγματος προς το σημειωμένο άκρο του, τότε οι δυο μαγνητεγερτικές δυνάμεις αφαιρούνται μεταξύ τους. Στο σχήμα 10, το ρεύμα του πρωτεύοντος προκαλεί θετική μαγνητεγερτική δύναμη στον πυρήνα $f_p = N_p * i_p$, ενώ το ρεύμα του δευτερεύοντος προκαλεί αρνητική μαγνητεγερτική δύναμη $f_s = - N_s * i_s$, δηλαδή η συνολική μαγνητεγερτική δύναμη στον πυρήνα θα έχει τιμή:

$$F_{net} = N_p * i_p - N_s * i_s \text{ (Σχέση 16)}$$

Αυτή η μαγνητεγερτική δύναμη παράγει τη συνολική μαγνητική ροή στο εσωτερικό του πυρήνα, δηλαδή είναι ίση με:

$$F_{net} = N_p * i_p - N_s * i_s = \Phi R \text{ (Σχέση 17)}$$

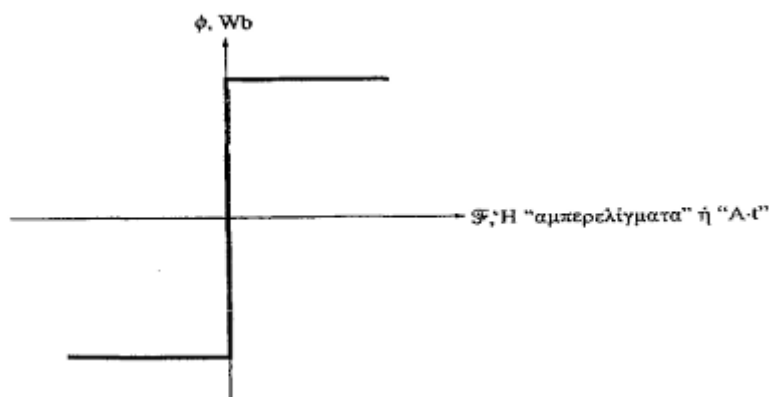
Όπου R η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα. Όμως στους καλά σχεδιασμένους Μ/Σ η μαγνητική αντίσταση του πυρήνα έχει πολύ μικρή τιμή, όσο ο πυρήνας είναι ακόρεστος. Έτσι η σχέση μεταξύ ρευμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι κατά προσέγγιση:

$$F_{net} = N_p * i_p - N_s * i_s \approx 0 \text{ (Σχέση 18)}$$

Όσο δηλαδή ο πυρήνας του Μ/Σ είναι ακόρεστος, ισχύει:

$$N_p * i_p \approx N_s * i_s \text{ (Σχέση 19)}$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{1}{a} \text{ (Σχέση 20)}$$



Σχήμα 10: Καμπύλη μαγνήτισης ιδανικού μετασχηματιστή

Δηλαδή στο γεγονός ότι η μαγνητεγερτική δύναμη στον πυρήνα είναι σχεδόν μηδενική, οφείλεται ο τρόπος τοποθέτησης των τελειών στα τυλίγματα του Μ/Σ. Έτσι το ένα ρεύμα του Μ/Σ θα πρέπει να έχει φορά προς το σημειωμένο άκρο του αντιστοίχου τυλίγματος, ενώ το άλλο ρεύμα να έχει φορά προς το μη σημειωμένο άκρο του τυλίγματός του. Κατά τον ίδιο τρόπο οι πολικότητες

των τάσεων στα δυο τυλίγματα θα πρέπει να είναι ίδιες ως προς τα σημειωμένα άκρα, ώστε να παράγονται οι παραπάνω φορές των ρευμάτων.

Οι υποθέσεις που πρέπει να γίνουν, ώστε ένας πραγματικός Μ/Σ να μετατραπεί στον αντίστοιχο ιδανικό είναι:

- Ο πυρήνας του δε θα πρέπει να παρουσιάζει απώλειες υστέρησης ή απώλειες δινορρευμάτων.
- Η καμπύλη μαγνήτισης του πυρήνα θα πρέπει να παρουσιάζει τη μορφή του σχήματος 12, δηλαδή όταν ο πυρήνας είναι ακόρεστος, να ισχύει $f = 0$ ώστε να ισχύει $N_p * i_p = N_s * i_s$.
- Η ροή διαροής του πυρήνα θα πρέπει να είναι μηδενική, ώστε η συνολική ροή να εμφανίζεται και στα δυο πλέγματα.
- Οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων του Μ/Σ πρέπει να είναι μηδενικές.

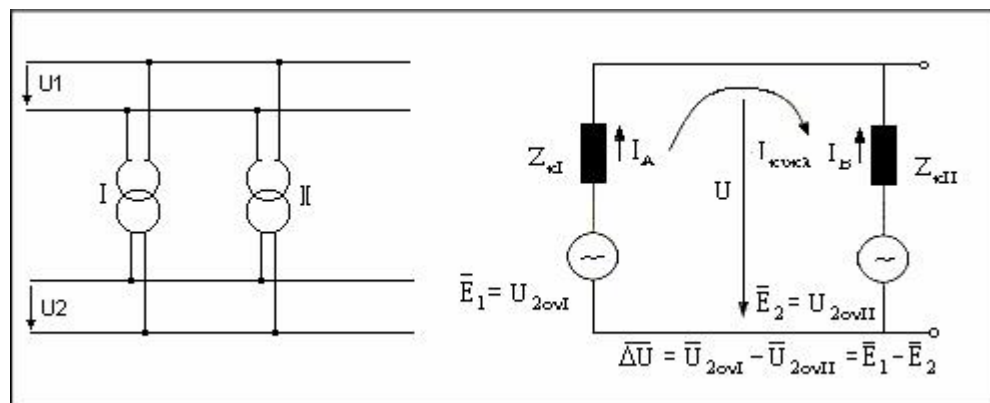
Ένας πραγματικός Μ/Σ δεν μπορεί ποτέ να ικανοποιήσει τις παραπάνω απαιτήσεις. Μια καλή σχεδίαση όμως, μπορεί να του προσφέρει χαρακτηριστικά σχεδόν παρόμοια με αυτά του Μ/Σ.

2.4. Παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστή

Η παράλληλη λειτουργία Μ/Σ ενδείκνυται στις περιπτώσεις κάλυψης αύξησης ισχύος. Προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται:

- Να ανήκουν στην ίδια ομάδα συνδεσμολογίας και οι συνδεσμολογίες να γίνουν με την σύνδεση των αντίστοιχων ακροδεκτών
- Να έχουν κατασκευαστεί έτσι ώστε να έχουν τις ίδιες τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα. Επιτρεπόμενη απόκλιση $\pm 0.5\%$.
- Να έχουν ίσες τάσεις βραχυκύκλωσης
- Ο λόγος ονομαστικών ισχύων να μην είναι μεγαλύτερος του 3:1

Έτσι, δύο ή περισσότεροι Μ/Τ μπορούν να συνδεθούν παράλληλα αν απαιτεί η κατανάλωση δηλαδή το πρωτεύον και το δευτερεύον αυτών να βρίσκεται υπό την ίδια τάση. Θα εξετάσουμε την περίπτωση δυο μονοφασικών μετασχηματιστών που είναι παράλληλα συνδεδεμένοι.



Σχήμα 11: Παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστή

Στο σχήμα ο κάθε Μ/Σ παριστάνεται με μια πηγή της οποίας η τάση εν κενό U_{20} εσωτερική αντίσταση είναι ίση με την αντίστοιχη βραχυκύκλωσης $Z=(R_1+R_2')+j(X_{σ1}+X_{σ2}')$. Όταν το ρεύμα του Μ/ΣΙΙ $I_2=0$ για να μην υπάρχει ρεύμα στον βρόγχο που σχηματίζεται πρέπει $U_{20I}=U_{20II}$. Η σχέση αυτή σημαίνει ότι οι τάσεις πρέπει να έχουν την ίδια φάση και το ίδιο μέτρο. Αυτό γίνεται αν οι δυο Μ/Σ έχουν τον ίδιο λόγο μετασχηματισμού. Το ίδιο συμβαίνει εάν οι Μ/Σ είναι τριφασικοί, όπως θα δούμε παρακάτω, όμως οι τριφασικοί πρέπει επιπλέον να έχουν την ίδια συνδεσμολογία πυρήνων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

«ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ»

3.1 Γενικά

Η ακρίβεια οποιουδήποτε μοντέλου του πραγματικού μετασχηματιστή εξαρτάται από το αν στην ανάπτυξη του λαμβάνονται υπόψη όλα τα είδη απωλειών κατά τη λειτουργία του.

Οι βασικότερες από αυτές είναι οι εξής:

Απώλειες διννορευμάτων: Θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα και είναι ανάλογες με το τετράγωνο της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του Μ/Σ.

Απώλειες χαλκού: Το σύρμα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, έχει μεγάλο μήκος και κατά συνέπεια κάποια υπολογίσιμη ωμική αντίσταση. Οι ωμικές αντιστάσεις των πηνίων σχηματίζουν μια επιπλέον απώλεια ισχύος στα τυλίγματα των πηνίων.

Ροή διαρροής: Πρόκειται για τις μαγνητικές ροές ΦLP και ΦLS που αναλύθηκαν στα προηγούμενα, οι οποίες ξεφεύγουν από τον πυρήνα προς τον αέρα που τον περιβάλλει και εμφανίζονται μόνο στο ένα από τα δυο τυλίγματα. Αυτές οι ροές παράγουν τις αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων του πυρήνα που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή.

Απώλειες υστέρησης: Αυτές έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων στο εσωτερικό του πυρήνα η οποία συμβαίνει σε κάθε ημιπερίοδο της τάσης εισόδου. Η μεταβολή τους με το χρόνο είναι μια περίπλοκη, μη γραμμική συνάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στο Μ/Σ.

3.2 Ανάπτυξη Ισοδύναμου κυκλώματος ενός Πραγματικού Μετασχηματιστή

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πραγματικού Μ/Σ θα πρέπει να παίρνει υπόψη του όλες τις βασικές ατέλειες που παρουσιάζει η συμπεριφορά του. Εδώ αυτές οι ατέλειες εξετάζονται με τη σειρά και προστίθενται στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Οι απώλειες χαλκού που είναι ωμικές απώλειες στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων είναι πολύ εύκολο να συμπεριληφθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα. Παρουσιάζονται απλά με την προσθήκη δυο αντιστάσεων. Της R_p που

αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος και της R_{sp} που αντιστοιχεί στην ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος.

Αναφερθήκαμε ότι η ροή διαροής του πρωτεύοντος Φ_{LP} παράγει την τάση e_{LP} που δίνεται από τη σχέση:

$$e_{LP}(t) = N_p * \frac{d\Phi_p}{dt} \quad (\text{Σχέση 21})$$

ενώ η ροή διαροής του πρωτεύοντος Φ_{LS} παράγει την τάση e_{LS}

$$\text{που δίνεται από τη σχέση: } e_{LS}(t) = N_s * \frac{d\Phi_{LS}}{dt} \quad (\text{Σχέση 22})$$

Επειδή οι διαδρομές των ροών διαροής βρίσκονται στον αέρα του οποίου η μαγνητική αντίστασή είναι σταθερή και πολύ μεγαλύτερη της μαγνητικής αντίστασης του πυρήνα, η ροή Φ_{LP} είναι ανάλογη του ρεύματος του πρωτεύοντος i_p , ενώ η Φ_{LS} είναι ανάλογη του ρεύματος του δευτερεύοντος i_s :

$$\Phi_{LP} = P N_p * i_p \quad (\text{Σχέση 23})$$

$$\Phi_{LS} = P N_s * i_s \quad (\text{Σχέση 24})$$

Όπου: P = μαγνητική αγωγιμότητα της διαδρομής της μαγνητικής ροής

N_p = ο αριθμός των σπειρών στο πρωτεύον

N_s = ο αριθμός των σπειρών στο δευτερεύον

Η αντικατάσταση των σχ.25 έως 28 δίνει

$$e_{LP}(t) = N_p * \frac{d}{dt} * P N_p * i_p = N_p^2 * P * \frac{di_p}{dt} \quad (\text{Σχέση 25})$$

$$e_{LS}(t) = N_s * \frac{d}{dt} * P N_p * i_p = N_s^2 * P * \frac{di_s}{dt} \quad (\text{Σχέση 26})$$

και αν όλες οι σταθερές συμπυκνωθούν σε μία οι παραπάνω σχέσεις γίνονται:

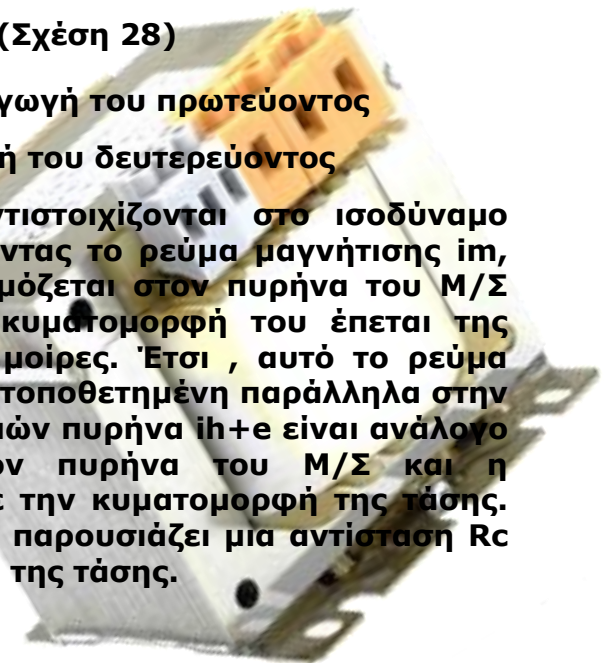
$$e_{LP}(t) = L_P * \frac{di_p}{dt} \quad (\text{Σχέση 27})$$

$$e_{LS}(t) = L_S * \frac{di_s}{dt} \quad (\text{Σχέση 28})$$

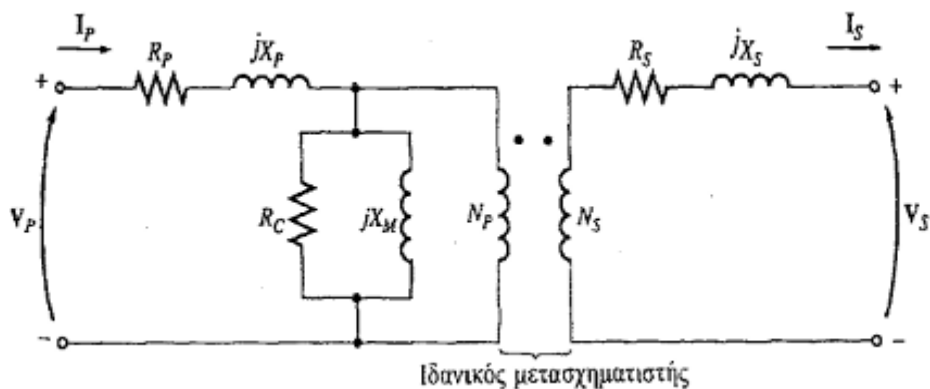
όπου $L_P = N_p^2 * P$ η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος

$L_S = N_s^2 * P$ η αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος

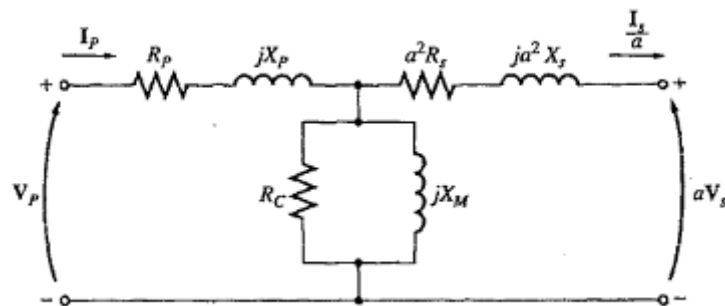
Δηλαδή οι δυο ροές διαροής αντιστοιχίζονται στο ισοδύναμο κύκλωμα σε αυτεπαγωγές. Συνεχίζοντας το ρεύμα μαγνήτισης i_m , είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του Μ/Σ (στην ακόρεστη περιοχή), ενώ η κυματομορφή του έπεται της κυματομορφής της τάσης κατά 90 μοίρες. Έτσι, αυτό το ρεύμα αντιστοιχίζεται σε μια αντίδραση ΧΜ τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή τάσης. Τέλος, το ρεύμα απωλειών πυρήνα i_{h+e} είναι ανάλογο της τάσης που εφαρμόζεται στον πυρήνα του Μ/Σ και η κυματομορφή του είναι σε φάση με την κυματομορφή της τάσης. Έτσι αυτό το ρεύμα είναι δυνατό να παρουσιάζει μια αντίσταση R_c τοποθετημένη παράλληλα στην πηγή της τάσης.



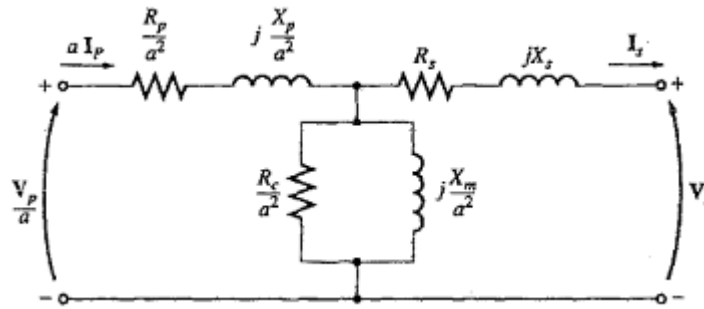
Στο σχήμα 13, φαίνεται το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο κλάδος διέγερσης τοποθετείται μετά την αντίσταση και την αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος. Αυτό συμβαίνει διότι η τάση που εφαρμόζεται στον πυρήνα είναι ίση με την τάση εισόδου, μείον την πτώση τάσης στο πρωτεύον. Για την ανάλυση ενός κυκλώματος που περιλαμβάνει Μ/Σ είναι απαραίτητη η μετατροπή του αρχικού κυκλώματος σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα που παρουσιάζει ένα μόνο επίπεδο τάσης. Έτσι το παραπάνω κύκλωμα μετασχηματίζεται, ώστε το επίπεδο τάσης να ισούται με το επίπεδο τάσης του πρωτεύοντος ή του δευτερεύοντος. Στο σχήμα 14 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ ως προς το πρωτεύον του, ενώ στο σχήμα 15 ως προς το δευτερεύον.



Σχήμα 12: Ισοδύναμο κύκλωμα πραγματικού Μ/Σ



Σχήμα 13: Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ ανηγμένο στο επίπεδο τάσης του πρωτεύοντος



Σχήμα 14: Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ ανηγμένο στο επίπεδο τάσης του δευτερεύοντος

3.3 Διακύμανση τάσης και απόδοση μετασχηματιστών

Ο Μ/Σ στο κύκλωμά του διαθέτει κάποια σύνθετη αντίσταση σειράς, η τάση εξόδου μεταβάλλεται με τη μεταβολή του φορτίου, ακόμη και όταν η τάση τροφοδοσίας μένει σταθερή. Έτσι για να είναι ευκολότερη η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών Μ/Σ, ορίζεται η διακύμανση τάσης. Με αυτό το μέγεθος συγκρίνονται μεταξύ τους η τάση εξόδου στη λειτουργία χωρίς φορτίο με την τάση εξόδου στην πλήρη φόρτισή του. Επίσης ορίζεται και ο βαθμός απόδοσης ενός Μ/Σ όπως παρακάτω:

3.1.1. Διακύμανση τάσης

$$V_R = \frac{V_{s,no\ load} - V_{s,rated\ load}}{V_{s,rated\ load}} = \frac{\left(\frac{V_p}{a}\right) - V_{s,rated\ load}}{V_{s,rated\ load}} \quad (\text{Σχέση 29})$$

3.1.2. Βαθμός απόδοσης

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{V_s * I_s * \cos\theta_s}{P_w + P_{core} + V_s * I_s * \cos\theta_s} \quad (\text{Σχέση 30})$$

όπου: P_w = απώλειες χαλκού

P_{core} = απώλειες δινორρευμάτων και υστέρησης

3.4 Διανυσματικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή

Για τον υπολογισμό της διακύμανσης τάσης ενός Μ/Σ, όπως προαναφέρθηκε, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των πτώσεων τάσης στο εσωτερικό του. Εδώ μπορούν να αγνοηθούν τα φαινόμενα στον κλάδο διέγερσης και στους

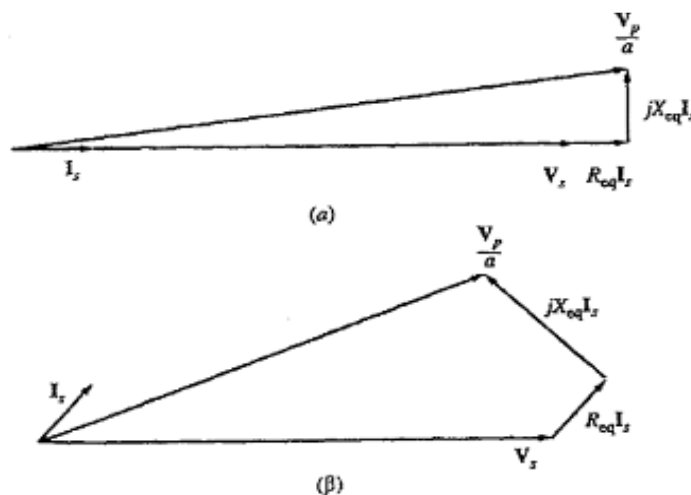
υπολογισμούς να συμπεριληφθούν μόνο οι σύνθετες αντιστάσεις σειράς. Η διακύμανση τάσης ενός Μ/Σ εξαρτάται τόσο από τις σύνθετες αντιστάσεις σειράς όσο και από τη φάση του ρεύματος. Αυτές οι ποσότητες είναι πολύ εύκολο να παρατηρηθούν με το σχεδιασμό του διανυσματικού διαγράμματος του Μ/Σ, δηλαδή με τη σχεδίαση των διανυσμάτων των ρευμάτων και των τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του. Σε όλα τα επόμενα διανυσματικά διαγράμματα το διάνυσμα της τάσης V_s θεωρείται ότι έχει μηδενική φάση και λαμβάνεται ως αναφορά όλων των στρεφόμενων διανυσμάτων. Εφαρμόζοντας το νόμο των τάσεων του Kirchhoff τάση του πρωτεύοντος δίνεται από την:

$$\frac{V_p}{a} = V_s + R_{eq} * I_s + jX_{eq} * I_s \text{ (Σχέση 31)}$$

Το διανυσματικό διάγραμμα ενός Μ/Σ είναι απλά η γραφική παρουσίαση της προηγούμενης σχέσης. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 16 όπου ο Μ/Σ λειτουργεί με επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Εδώ ισχύει $V_p / a > V_s$ επειδή το φορτίο είναι επαγωγικό, οπότε η αντίστοιχη διακύμανση τάσης θα είναι σε αυτή τη περίπτωση θετική. Στο σχήμα 17α, φαίνεται ένα διαφορετικό διανυσματικό διάγραμμα ενός Μ/Σ με ωμικό φορτίο. Η τάση στο πρωτεύον είναι και πάλι μεγαλύτερη από την τάση του δευτερεύοντος και η διακύμανση τάσης είναι θετική. Σε αυτή τη περίπτωση όμως η διακύμανση τάσης έχει μικρότερη τιμή από αυτή της προηγούμενης περίπτωσης. Τέλος, όταν το φορτίο του Μ/Σ είναι χωρητικό, η τάση στο δευτερεύον μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πρωτεύοντος. Τότε η διακύμανση τάσης του Μ/Σ είναι αρνητική όπως φαίνεται στο σχήμα 16β.



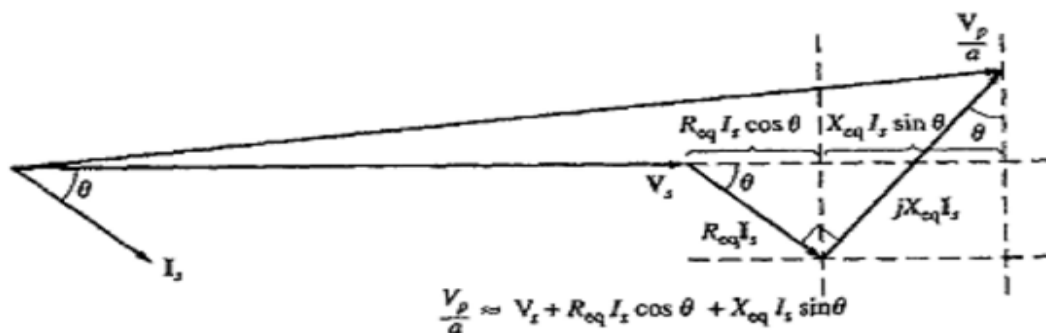
Σχήμα 15: Διανυσματικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή που λειτουργεί με επαγωγικό συντελεστή ισχύος.



Σχήμα 16: Διανυσματικό διάγραμμα ενός μετασχηματιστή που λειτουργεί α) με μοναδιαίο και β) με χωρητικό συντελεστή ισχύος

Στο τρίγωνο που σχηματίζει το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 17 η οριζόντια πλευρά είναι σχεδόν ίση με την υποτεινούσα και οι κατακόρυφες συνιστώσες των πτώσεων τάσης στην αντίσταση και στην αυτεπαγωγή σειράς του Μ/Σ περιλαμβάνονται μόνο στους υπολογισμούς της κατακόρυφης πλευράς του διαγράμματος που είναι πολύ μικρή. Έτσι αυτές οι συνιστώσες είναι αδύνατο να αγνοηθούν κατά τον υπολογισμό της τάσης εισόδου. Σε αυτή την περίπτωση η προσεγγιστική τιμή της τάσης εισόδου είναι:

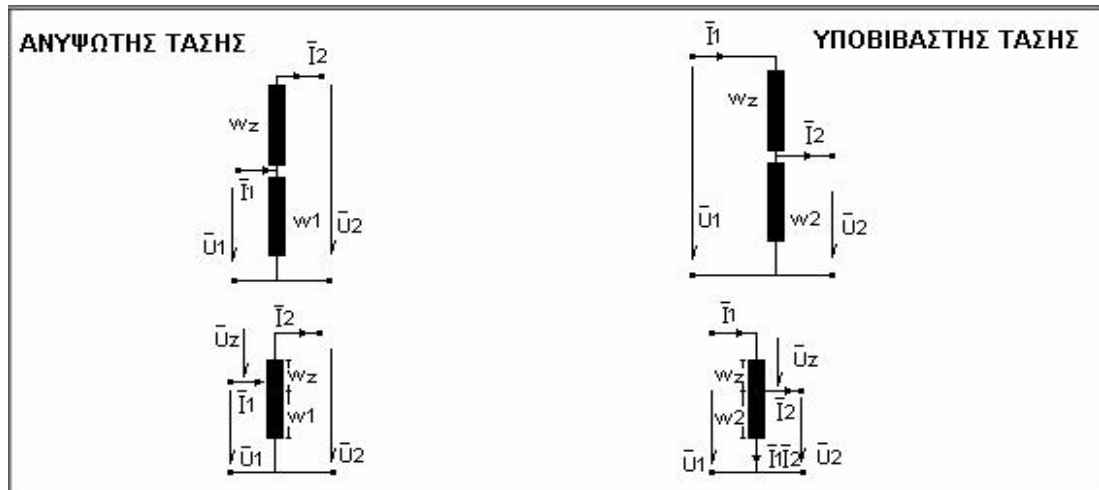
$$\frac{V_p}{a} = V_s + R_{eq} * I_s * \cos\theta + jX_{eq} * I_s * \sin\theta \quad (\text{Σχέση 32})$$



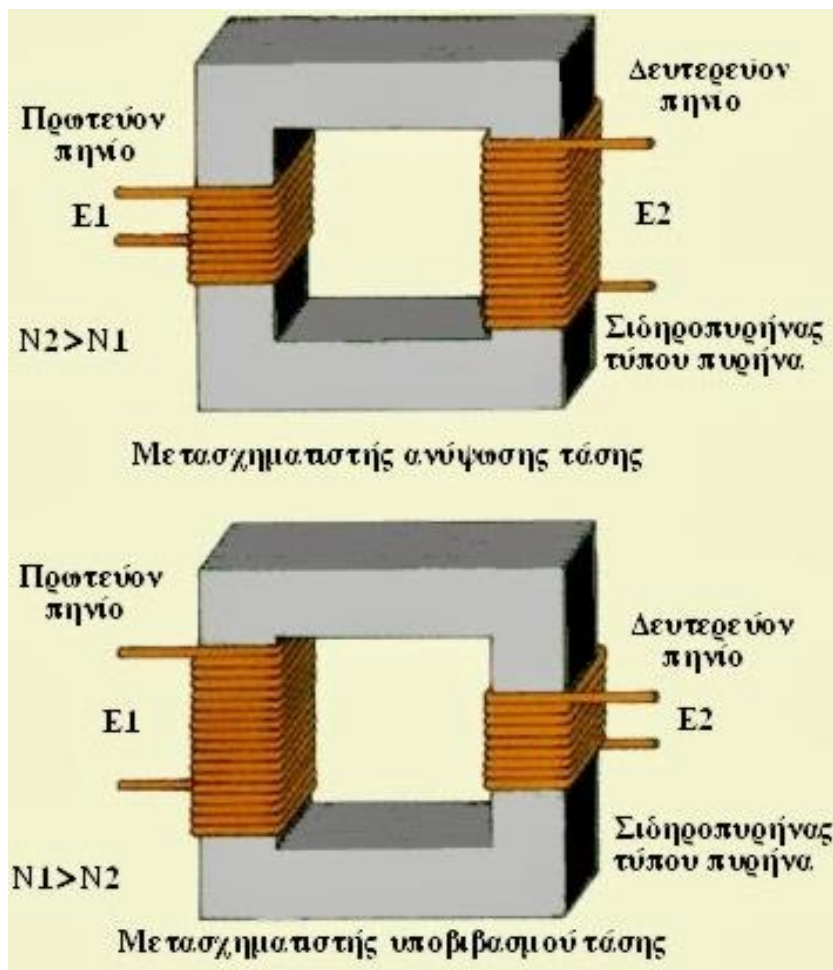
Σχήμα 17: Εξαγωγή της προσεγγιστικής εξίσωσης για τον όρο V_p/a

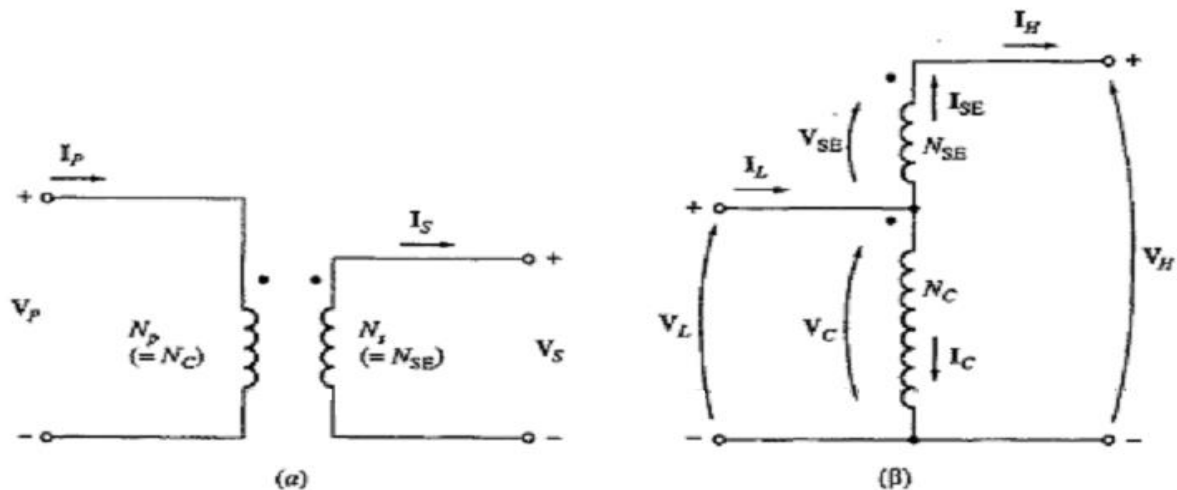
3.5 Αυτομετασχηματιστής

Οι ΑΜΣ αποτελούνται από ένα πηνίο με σιδηροπυρήνα, το οποίο διαθέτει μία ή περισσότερες λήψεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση που λαμβάνεται ανάμεσα σε μία λήψη και ένα κοινό σημείο να είναι μικρότερη από την τάση εισόδου. Έτσι πετυχαίνουμε υποβιβασμό τάσης. Για ανύψωση τάσης κάνουμε την αντίστροφη διαδικασία, τροφοδοτούμε τον ΑΜΣ από το τύλιγμα λήψης και ένα κοινό σημείο και παίρνουμε μεγαλύτερη τάση στα δύο άκρα του. Αν η λήψη του ΑΜΣ είναι μεταβλητή, τότε θα παίρνουμε διάφορες τάσεις στην έξοδό του.



Σχήμα 18: Αυτομετασχηματιστής





Σχήμα 19: Μετασχηματιστής με τα τυλίγματα του (α) κανονικά συνδεδεμένα και (β) επαναδυνδεδεμένα ώστε να λειτουργεί ως αυτομετασχηματιστής.

Οι αυτομετασχηματιστές χρησιμοποιούνται για να εξουδετερώνουν διακυμάνσεις των τάσεων στα δίκτυα, για την εκκίνηση ασύγχρονων κινητήρων καθώς και για τη σύνδεση δικτύων με διαφορετική τάση. Ας δούμε τι συμβαίνει σε ένα αυτομετασχηματιστή εξετάζοντας το σχήμα του. Θεωρούμε ότι οι ωμικές απώλειες, το ρεύμα μαγνήτισης και η σκέδαση είναι αμελητέα μεγέθη, τότε έχουμε:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_2 + W_z}{W_2} = 1 + \frac{W_z}{W_2} \quad (\text{Σχέση 33})$$

Το τύλιγμα w_z λέγεται τύλιγμα σειράς με ρεύμα I_1 και είναι το πρωτεύον, ενώ το τύλιγμα w_2 δευτερεύον τύλιγμα και λέγεται παράλληλο με ρεύμα $I_1 - I_2$.

Αν πάρουμε το νόμο διαρρεύματος θα έχουμε :

$$W_z * I_1 + W_2 * (I_1 - I_2) = 0 \rightarrow I_1 = \frac{W_2 + W_z}{W_2} * I_2 = \frac{W_2}{W_1} * I_2$$

(Σχέση 34)

Ο αυτομετασχηματιστής προσλαμβάνει από ένα δίκτυο την ισχύ S_D και την αποδίδει στο άλλο. Αυτή η ισχύς λέγεται ισχύς διέλευσης. Ένα μέρος από αυτή μεταφέρεται επαγωγικά μέσω του τυλίγματος σειράς και ονομάζεται ιδιοισχύς S_E . Η S_E καθορίζει το μέγεθος του αυτομετασχηματιστή. Από το σχήμα έχουμε :

$$S_D(t) = U_1 * I_1 \quad (\text{Σχέση 35})$$

$$S_E(t) = U_z * I_1 = \frac{W_z}{W_2 + W_z} * U_1 * I_1 = \frac{U_1 - U_2}{U_1} * U_1 * I_1 = (U_1 - U_2) * I_1$$

(Σχέση 36)

Αν πάρουμε το λόγο των SD , SE θα έχουμε :

$$\frac{SE}{SD} = \frac{U_1 - U_2}{U_1 * I_1} * I_1 = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (\text{Σχέση 37})$$

$$S_E = (U_1 - U_2) * \frac{SD}{U_1} = 1 - \frac{U_2}{U_1} * S_D \quad (\text{Σχέση 38})$$

Από τη σχέση αυτή βλέπουμε ότι το μέγεθος των Μ/Σ είναι τόσο μικρότερο όσο μικρότερη είναι η διαφορά των τάσεων U_1/U_2 . Σύγκριση τώρα ενός Μ/Σ και ενός ΑΜΤ που πρέπει ίδιες τάσεις ο ΑΜΤ πρέπει να είναι ίσος με $1 - (U_2/U_1)$ του κανονικού. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε τον ΑΜΤ μια ανύψωση τάσης τότε η σχέση των S_E, S_D είναι η εξής :

$$\frac{SE}{SD} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = 1 - \frac{U_2}{U_1} \quad (\text{Σχέση 39})$$

3.5.1 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα του Αυτομετασχηματιστή

Πλεονεκτήματα: Έχει μικρότερο μέγεθος, συνεπώς μικρότερο κόστος λιγότερη και μικρότερη πτώση τάσης.

Μειονεκτήματα : Υπάρχει γαλβανική σύνδεση των δικτύων Υ.Τ. και Χ.Τ. με αποτέλεσμα οι δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας του ενός δικτύου να μεταφέρονται και στο άλλο. Για αυτό το λόγο οι μονώσεις του δικτύου χαμηλής τάσης πρέπει να αντέχουν στην υψηλή τάση. Το μεγάλο αυτό μειονέκτημα που έχει καθιστά την χρήση του σε πολύ ειδικές εφαρμογές. Επειδή έχει μμεγάλο ρεύμα βραχυκύκλωσης πρέπει ο ΑΜΤ να προστατεύεται με πηνία. Όλα όσα αναφέραμε για τους μονοφασικούς αυτομετασχηματιστές ισχύουν και για τους τριφασικούς με την προϋπόθεση στην ισχύ να υπάρχει το $\sqrt{3}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°

«ΘΟΡΥΒΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ»

4.1 Γενικά

Η βασικότερη αιτία δημιουργίας θορύβου στους Μ/Σ είναι οι ταλαντώσεις του πυρήνα τους, σαν αποτέλεσμα της αλλαγής του μήκους των ελασμάτων τους λόγω μαγνητοσυστολής, οι οποίες μεταδίδονται μέσω του λαδιού, στο λέβητα και μετά στον αέρα. Κατά το παρελθόν έγιναν πολλές προσπάθειες ελάττωσης του θορύβου υποβιβάζοντας τη μαγνητοσυστολή των ελασμάτων.

4.1.1 Μέτρηση της στάθμης θορύβου των μετασχηματιστών

Λόγω της τοποθέτησης Μ/Σ σε κατοικημένες περιοχές, σε χαμηλά ύψη, είναι αναγκαίος ο περιορισμός του θορύβου των Μ/Σ. Επίσης προς αυτή την κατεύθυνση οδηγεί και η τοποθέτηση Μ/Σ μέσα σε κτήρια, λόγω της ραγδαίας αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα όργανα μέτρησης του θορύβου των Μ/Σ πρέπει να πληρούν τις προϋποθέσεις του προτύπου IEC 651/79.

4.1.2 Αντιμετώπιση του θορύβου των μετασχηματιστών

Για την ελαχιστοποίηση του θορύβου χρησιμοποιούνται πλέον οι παρακάτω μέθοδοι:

- με βελτίωση των ελασμάτων
- με προσεκτική κατασκευή του πυρήνα όσον αφορά την τοποθέτηση των ελασμάτων και την σύνδεση των στελεχών με τα ζυγώματα
- με κατάλληλο σχεδιασμό. Έχει διαπιστωθεί ότι κατασκευάζοντας τον πυρήνα από τρία ξεχωριστά πλαίσια η μμαγνητική και ακουστική ζεύξη μεταξύ τους μειώνει αρκετά την ένταση του ήχου

4.2 Προστασία των μετασχηματιστών

Ένας Μ/Σ μπορεί να υποστεί βλάβη στις εξής περιπτώσεις :

- Παρατεταμένο βραχυκύκλωμα μέσα ή έξω από το δοχείο στην πλευρά της χαμηλής ή της υψηλής τάσης

- Από διαρκή υπερφόρτιση
- Από σφάλμα στην μόνωση, όπως βραχυκύκλωμα σπειρών και τυλιγμάτων ως προς τη γη.

Η προστασία ενός Μ/Σ σε βραχυκυκλώματα πρέπει να γίνει οπωσδήποτε γιατί μπορεί να δημιουργηθεί πυρκαγιά.

4.2.1 Προστασία σε Βραχυκύκλωμα

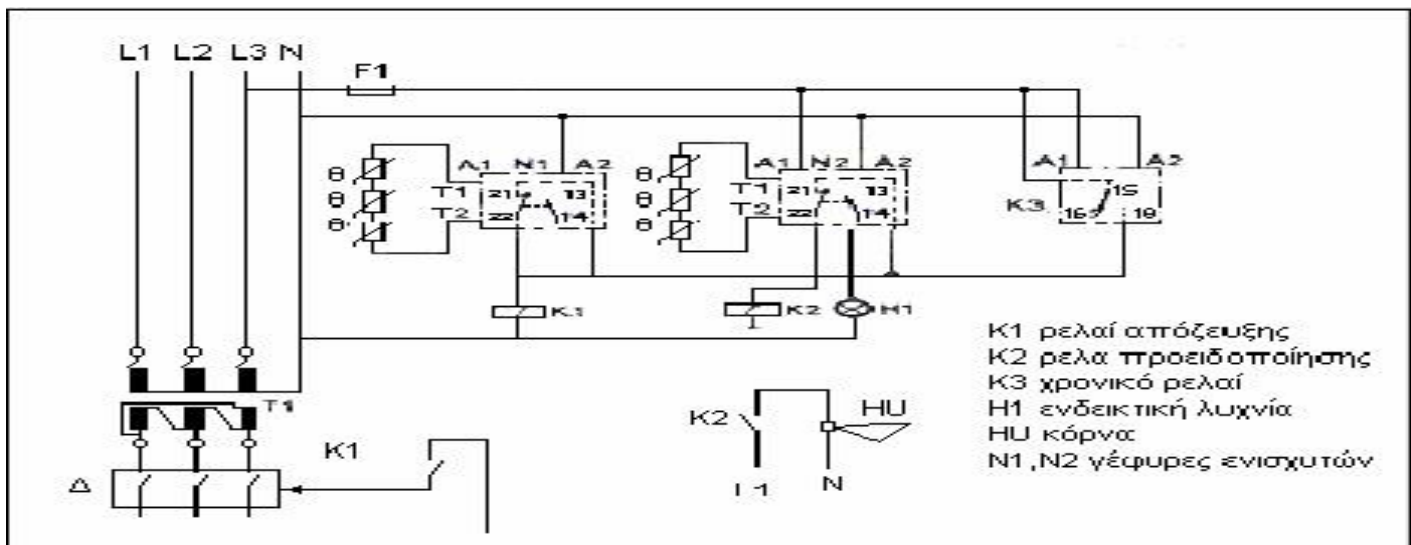
Οι Μ/Σ αντέχουν χωρίς βλάβες ή άλλα μειονεκτήματα σε ρεύματα βραχυκυκλωμάτων για 2-3 δευτερόλεπτα όπως δείχνει ο παρακάτω πίνακας. Μέγιστα επιτρεπόμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης Μ/Σ για διάφορους χρόνους κατά VDE 0532, Τειβί

Ισχύς (KVA)	0-630	630-1250	1250-3150
Τάση βραχυκύκλωσης (%)	4	5	6,25
Μέγιστος χρόνος βραχυκύκλωσης (sec)	2	3	4
Ρεύμα βραχυκύκλωσης / ονομ. ρεύμα = I_k / I_N	25	20	16

και μάλιστα όταν το βραχυκύκλωμα γίνεται στους ακροδέκτες του δευτερεύοντος οπότε τα ρεύματα είναι 16-25 φορές μεγαλύτερα του ονομαστικού.

4.2.2 Προστασία Μετασχηματιστή σε Υπερφόρτιση

Η προστασία σε παρατεταμένη συνεχή υπερφόρτιση γίνεται χρησιμοποιώντας θερμόμετρολαδίου ή θερμίστορες που είναι εμφυτευμένοι στα τυλίγματα του Μ/Σ όταν κατασκευάζεται. Επιπρόσθετα χρησιμοποιούνται αυτόματοι διακόπτες ισχύος στην Χ.Τ. ή και ασφάλειες που έχουν σκοπό να περιορίζουν την υπερφόρτιση. Οι ασφάλειες χρησιμοποιούνται μμέχρι 400 Α, έχουν την ονομαστική ένταση του δευτερεύοντος και είναι τύπου ΝΗ. Οι αυτόματοι ρυθμίζονται στην ονομαστική σύσταση του Μ/Σ. Τα θερμόμετρα λαδίου παρακολουθούν τη θερμοκρασία του ανωτέρου στρώματος λαδίου. Αυτή πρέπει να είναι κατώτερη των 100°C. Μπορεί να έχουμε σε υπερθερμοκρασίες μια σήμανση οπτική, ακουστική ή και υψηλότερες θερμοκρασίες απόξευξη του Μ/Σ. Έτσι σε κάθε θερμόμετρο υπάρχουν συνήθως δυο οριακοί δείκτες, ο μπλε για σήμανση και ο κόκκινος για απόξευξη.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

«ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ»

5.1 Γενικά

Η μέγιστη μέση επιτρεπόμενη θερμοκρασία των τυλιγμάτων είναι 105°C για θερμοκρασία περιβάλλοντος 40°C. Τα τυλιγмата αποτελούν πηγή θερμότητας, η οποία πρέπει να απαχθεί ώστε να αποφευχθεί αύξησης της θερμοκρασίας τους. Η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται θερμική επιφανειακή φόρτιση ή πυκνότητα ροής θερμότητας. Εκφράζεται με το λόγο της παραγόμενης θερμικής ροής W και επιφάνειας:

$$W_F = \frac{dW}{dF} \text{ (Σχέση 40)}$$

5.2 Αγωγή θερμότητας

Όταν τα σημεία ενός σώματος έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες, η ροή μπορεί να εκφραστεί από την πυκνότητα ροής θερμότητας W_F , η οποία προσδιορίζεται από το μέγεθος και τη διεύθυνσή της. Η σχέση μεταξύ του διανυσματικού πεδίου της θερμοκρασίας και του πεδίου είναι γραμμική και έχει την έκφραση:

$W = -\lambda * \text{grad}\theta$, όπου ο λ ο σταθερός συντελεστής θερμοαγωγιμότητας.

5.3 Φορτίσεις μετασχηματιστή

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας του χαλκού, αφού οι μονώσεις έχουν χαμηλή θερμοκρασία καταστροφής, γι' αυτό και από τις προδιαγραφές καθορίζονται οριακές θερμοκρασίες. Κάθε Μ/Σ υπολογίζεται έτσι, ώστε υπό συνεχή φόρτιση με πλήρες φορτίο, η θερμοκρασία του χαλκού να μην υπερβαίνει την οριακή θερμοκρασία. Κάθε Μ/Σ μπορεί να φορτιστεί πάνω από το ονομαστικό του φορτίο για κάποιο χρονικό διάστημα, όταν η επικρατούσα σε αυτόν θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την οριακή.

5.4 Θέρμανση των τυλιγμάτων κατά το βραχυκύκλωμα

Επειδή ο χρόνος βραχυκύκλωσης t_k είναι πολύ μικρός ως προς τη θερμική σταθερά χρόνου T του λαδιού, θερμότητα που προκαλείται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά τη διάρκεια βραχυκύκλωσης αποθηκεύεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου στο υλικό αγωγών. Θεωρώντας ότι οι εμφανιζόμενες ωμικές απώλειες N_{cuk} κατά το βραχυκύκλωμα αποθηκεύονται πλήρως στους

αγωγούς, τότε στο χρόνο dt_k αυξάνεται η θερμοκρασία κατά $d\theta_k$, επομένως:

$$V_{cuk} * dt = G * c * d\theta_k \quad (\text{Σχέση 41})$$

Όπου: G = το βάρος των τυλιγμάτων

c = η ειδική θερμότητα των αγωγών

Οι απώλειες προκύπτουν από την εξίσωση:

$$V_{cu} = 1.97 * \frac{235+\theta_k}{255} * Jk^2 * G \text{ [W]} \quad (\text{Σχέση 42})$$

Θέτοντας $c = 390 \text{ W/kg}\cdot\text{C}$ προκύπτει:

$$dt_k = \frac{50480}{Jk * Jk} * \frac{d\theta_k}{235+\theta_k} \quad (\text{Σχέση 43})$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση αυτή παίρνουμε:

$$t_k = \frac{50480}{Jk * Jk} * \ln(235 + \theta_k) + \text{const} \quad (\text{Σχέση 44})$$

Για $t_k = 0$ και $\theta_k = \theta_0$ υπολογίζεται η σταθερά ολοκλήρωσης

$$\text{const} = - \frac{50480}{Jk * Jk} * \ln \frac{235+\theta_k}{235+\theta_0} \text{ [s]} \quad (\text{Σχέση 45})$$

Τελικά για το χρόνο βραχυκύκλωσης, μέχρι τη θερμοκρασία θ_k ισχύει:

$$t_k = \frac{50480}{Jk * Jk} * \ln \frac{235+\theta_k}{235+\theta_0} \text{ [s]} \quad (\text{Σχέση 46})$$

Ο χρόνος διάρκειας του βραχυκυκλώματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 2s.

5.5 Ψύξη των μετασχηματιστών μετά το βραχυκύκλωμα

Μετά τη διακοπή του βραχυκυκλώματος, η αποθηκευμένη στα τυλιγμένα, στον πυρήνα και στο λάδι θερμότητα διοχετεύεται μέσω του δοχείου, στο περιβάλλον. Επειδή ο αέρας θεωρείται απεριόριστης ποσότητας, η θερμοκρασία του λαμβάνεται πρακτικά ως αμετάβλητη. Επομένως το άθροισμα της αποθηκευμένης και της αποδοθείσας στο περιβάλλον θερμότητας θα είναι:

$$C * d\theta + K_1 * \theta * dt = 0 \quad (\text{Σχέση 47})$$

Όπου: C = η θερμιχωρητικότητα του σώματος

K_1 = ο συντελεστής θερμικής απαγωγής

Από τη λύση της παραπάνω διαφορικής προκύπτει:

$$\theta = \theta_k * e^{-(k_1/c) * t} \quad (\text{Σχέση 48})$$

Όπου θ η υπερύψωση της θερμοκρασίας του λαδιού σε μια τυχαία στιγμή.

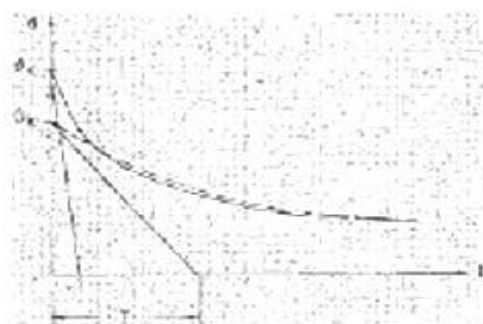
Αν τα τυλίγματα έχουν μια υπερύψωση θερμοκρασίας θ_k τη στιγμή της διακοπής του βραχυκυκλώματος, τότε η θερμοκρασία του τυλίγματος έναντι του λαδιού είναι :

$$\Theta = \theta_k * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{Σχέση 49})$$

όπου τ η σταθερά χρόνου του χαλκού

$$\tau = \frac{C}{V_{cuk}} * \theta_{bk} = \frac{G * C}{V_{cuk}} * \theta_{bk} \quad (\text{Σχέση 50})$$

και θ_{bk} το άλμα θερμοκρασίας του έναντι του λαδιού και V_{cuk} οι απώλειες βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 21: Κατανομή θερμοκρασιών του λαδιού και των τυλιγμάτων μετά τη διακοπή του βραχυκυκλώματος

Για η σταθερά χρόνου τα του χαλκού ισχύει:

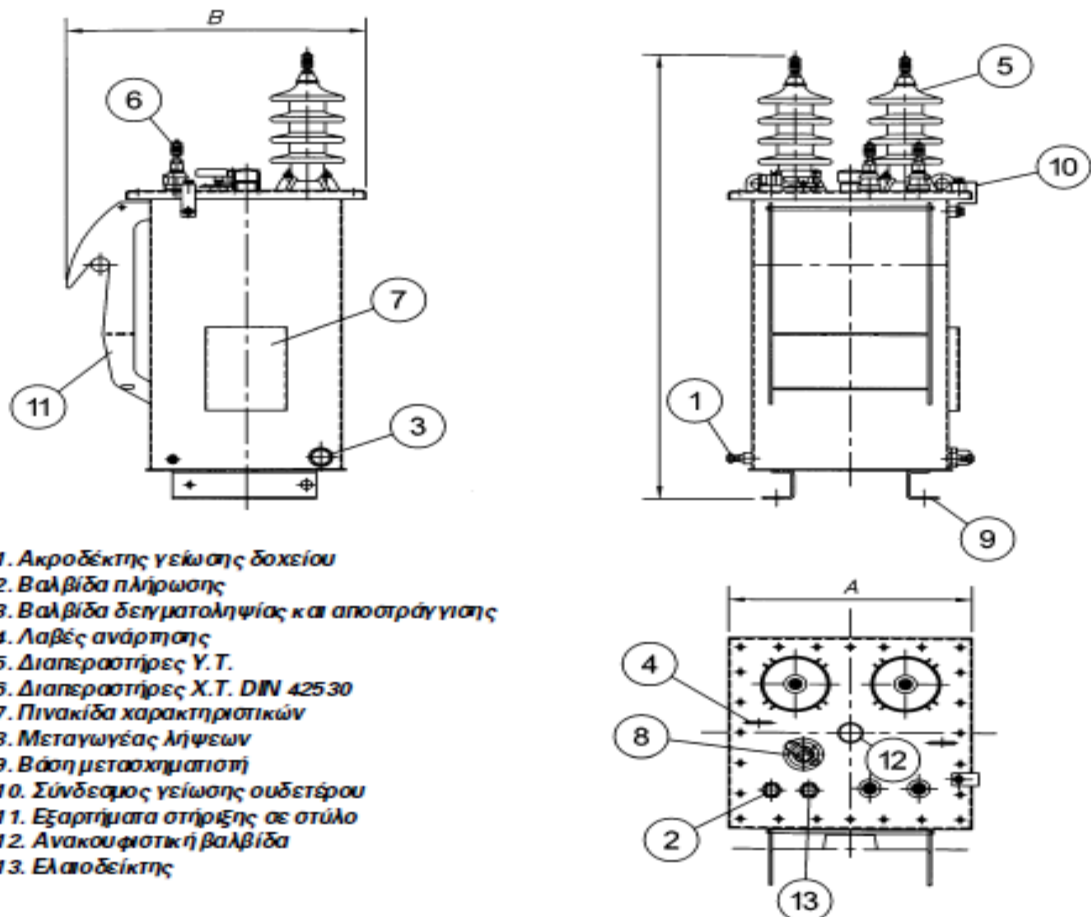
$$\tau_a = 2,43 * \frac{\theta_{bk}}{J_k * J_k} \quad [\text{min}] \quad (\text{Σχέση 51})$$

5.6 Δοχείο μετασχηματιστή

Το δοχείο ενός Μ/Σ, στο οποίο τοποθετείται το ενεργό μέρος, γεμίζει με μονωτικό λάδι. Οι αποστάσεις του γειωμένου δοχείου, για να προκύψουν οικονομικές λύσεις, από τα υπό τάση τυλίγματα είναι τέτοιες, ώστε να μην προκαλούνται διασπάσεις με τα γειωμένα μέρη σε όλες τις διηλεκτρικές καταπονήσεις. Το λάδι απορροφά την παραγόμενη θερμότητα στον πυρήνα και τα τυλίγματα θερμότητα. Για να ακολουθήσει μεταφορά της θερμότητας αυτής στο περιβάλλον, ώστε ο πυρήνας και τα τυλίγματα να μην υπερβαίνουν την ανώτατη θερμοκρασία λειτουργίας, η επιφάνεια των τοιχωμάτων του δοχείου είναι έτσι ώστε να ευνοεί τη λειτουργία αυτή. Κατασκευάζονται από πτυχωτό έλασμα, ενώ στα δοχεία των μεγάλων Μ/Σ τοποθετούνται ψυκτικά σώματα για να αυξηθεί η ψυκτική τους επιφάνεια. Στις περιπτώσεις Μ/Σ μεγάλης ισχύος τοποθετούνται ανεμιστήρες στο κάτω μέρος των ψυκτικών σωμάτων για γρηγορότερη απαγωγή της θερμότητας, έτσι αυξάνεται και η ισχύς του Μ/Σ.

Στους Μ/Σ με ψυκτικά σώματα τοποθετούνται στο δοχείο βάνες για να μπορεί το σώμα του να μεταφερθεί ξεχωριστά από τα ψυκτικά σώματα, τα

οποία τοποθετούνται στον τόπο λειτουργίας του. Ακολουθεί η πλήρωση τους με λάδι, αφού ανοιχθούν οι βάνες. Η ποσότητα του λαδιού είναι τόση, ώστε να υπερκαλύπτει τα μέρη του Μ/Σ, ενώ το υπόλοιπο δοχείο γεμίζει με άζωτο για την αποφυγή απορρόφησης υγρασίας. Οι μεγάλοι Μ/Σ αντέχουν σε κενό μιας ατμόσφαιρας. Γι' αυτό τα εξωτερικά τοιχώματα ενισχύονται με μορφοποιημένο σίδηρο ή κατακόρυφες λάμες σιδήρου, η ροπή αντίστασης των οποίων πρέπει να είναι τέτοια, ώστε σε κανένα σημείο του δοχείου να μην προκύψουν πλαστικές παραμορφώσεις.

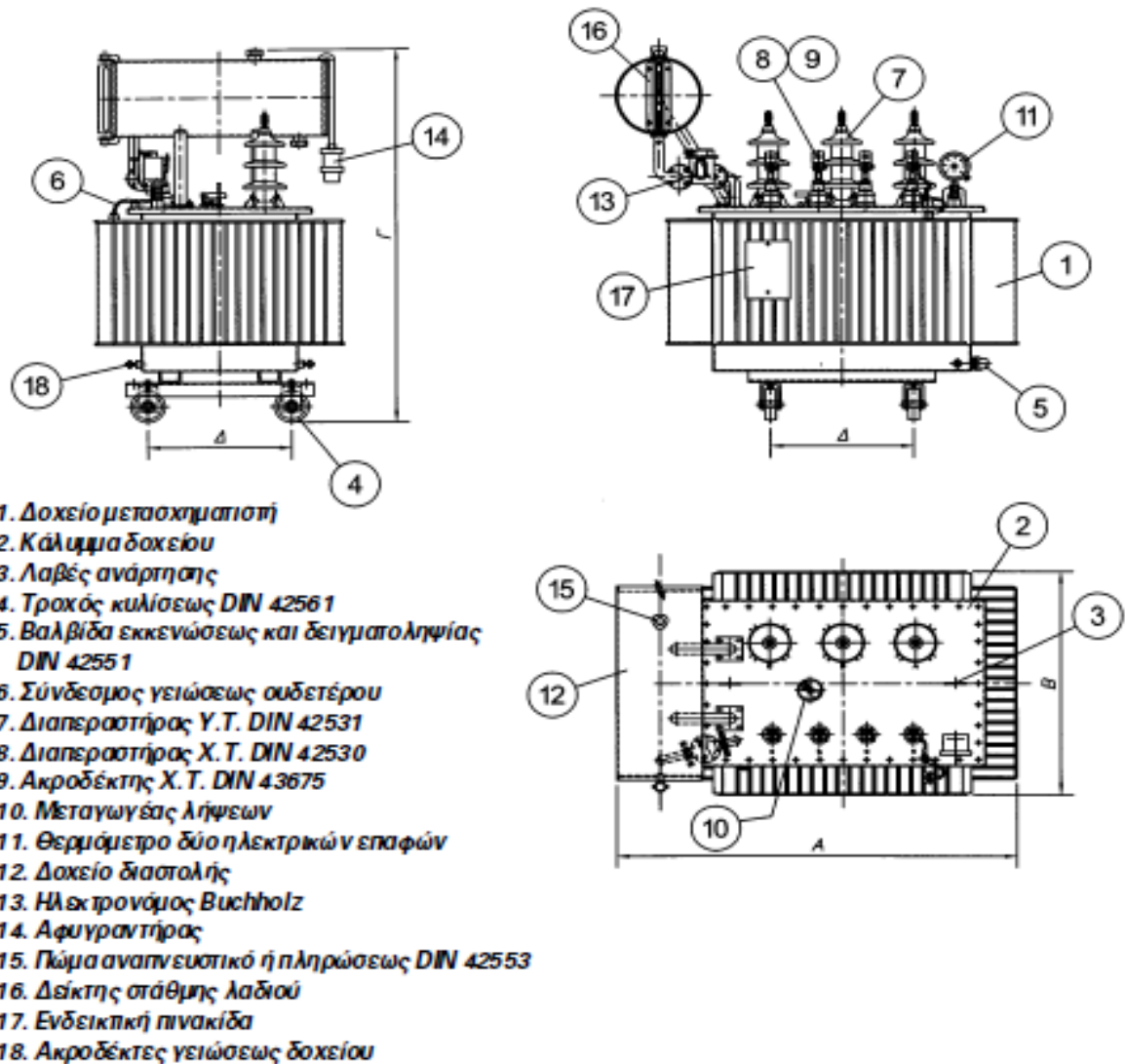


Σχήμα 20: Γενική διάταξη μονοφασικών Μ/Σ, 5 – 50 kVA, 20/0.231 kV

Παρακάτω ακολουθεί και η γενική διάταξη ενός τριφασικού μετασχηματιστή. Το κεφάλαιο της θερμικής μελέτης αφορά τόσο του μονοφασικούς Μ/Σ αυτής της ενότητας, όσο και τους τριφασικούς Μ/Σ της επόμενης ενότητας.

Στους μετασχηματιστές πολύ μεγάλης ισχύος, άνω των 100 MVA, όπως στη διάταξη που ακολουθεί, τα ψυκτικά σώματα τοποθετούνται σε ξεχωριστούς χώρους. Το λάδι οδηγείται με μεγάλους σωλήνες, συγκολλημένους κάτω από το κάλυμμα του Μ/Σ, στα ψυκτικά σώματα, όπου ψύχεται είτε με νερό και οδηγείται με σωλήνα στο κάτω μέρος του δοχείου. Στους Μ/Σ των μονάδων

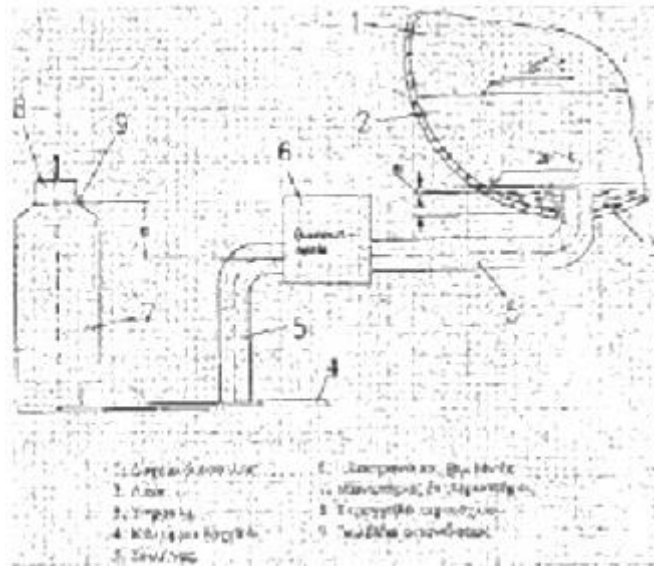
παραγωγής προβλέπεται ψύξη με νερό, λόγω της μεγάλης διαθεσιμότητάς του.



Σχήμα 21: Γενική διάταξη τριφασικών Μ/Σ, 250 – 1600 kvA, 20/0.4 kV

5.7 Δοχείο διαστολής

Το δοχείο διαστολής χρησιμεύει στην αποφυγή υπερπιέσεων στο δοχείο, εξ' αιτίας της διαστολής του λαδιού, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας. Τοποθετείται στο υψηλότερο σημείο του δοχείου ή των ψυκτικών σωμάτων, όταν αυτά είναι τοποθετημένα σε ξεχωριστούς χώρους. Έτσι αποφεύγεται και η επαφή του θερμού λαδιού με το οξυγόνο του αέρα, το οποίο θα οδηγούσε σε οξείδωση του λαδιού.



Σχήμα 22: Δοχείο διαστολής μετασχηματιστή

Το δοχείο διαστολής, το οποίο έρχεται σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, είναι συνδεδεμένο μέσω ενός σωλήνα με το κάλυμμα του δοχείου. Ο σωλήνας αυτός διακόπτεται και παρεμβάλλεται ηλεκτρονόμος Buchholz. Ο σωλήνας εισέρχεται στο δοχείο διαστολής μερικά εκατοστά του μέτρου και έτσι η υγρασία που δημιουργείται από συμπυκνώσεις σ' αυτό, χωρίς να εισέλθει στο δοχείο του Μ/Σ. Στους μεγάλους Μ/Σ τοποθετείται αφυγραντήρας, μέσα στον οποίο ανθυγρό υλικό, απ' όπου εισέρχεται ο ατμοσφαιρικός αέρας. Το ανθυγρό αυτό υλικό, απ' όπου υπάρχει ανθυγρό υλικό κατακρατά την υγρασία του εισερχόμενου αέρα. Το δοχείο διαστολής είναι αποσπώμενο, για να διευκολύνεται η μεταφορά του Μ/Σ.

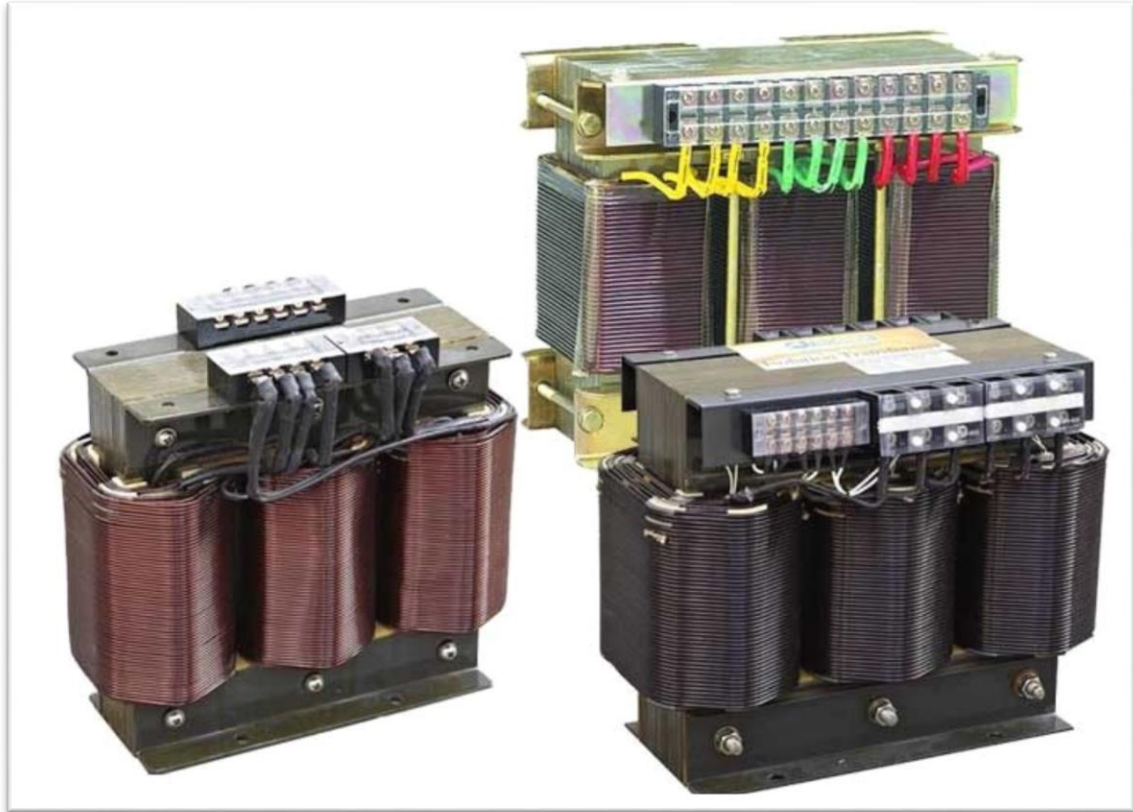
5.8 Ψύξη

Για την ψύξη των Μ/Σ χρησιμοποιείται αέρας περιβάλλοντος ή τεχνητά κινούμενος αέρας ή και νερό. Η ποσότητα του ψυκτικού μέσου πρέπει να είναι επαρκής, ώστε να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του Μ/Σ. Στους ξηρούς Μ/Σ χωρίς περίβλημα το ψυκτικό μέσο επιδρά άμεσα στις επιφάνειες του πυρήνα και των τυλιγμάτων, που ακτινοβολούν θερμότητα στο περιβάλλον. Αντίθετα στους ξηρούς Μ/Σ με προστατευτικό περίβλημα καθώς και στους Μ/Σ λαδιού οι θερμικές απώλειες του πυρήνα και των τυλιγμάτων μεταφέρονται στο ρευστό του δοχείου και των ψυκτικών σωμάτων του στο περιβάλλον. Οι τρόποι ψύξης των Μ/Σ διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Φυσική κυκλοφορία λαδιού μέσα στο δοχείο για την ψύξη των τυλιγμάτων και του πυρήνα
- Φυσική κυκλοφορία αέρα για την ψύξη του δοχείου
- Βεβιασμένη και κατευθυνόμενη κυκλοφορία λαδιού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°

«ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΙ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ»



Όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια οι Μ/Σ είναι ηλεκτρικές μηχανές, οι οποίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια την οποία παίρνουν (Α.С.) μίας ορισμένης τάσεως σε ηλεκτρική ενέργεια (Α.С.) μίας άλλης τάσεως (μικρότερης ή μεγαλύτερης) της ίδιας συχνότητας, χωρίς ενδιάμεσα να έχουμε μετατροπή σε μηχανική ενέργεια (δηλαδή χωρίς κινητά μέρη). Ο μετασχηματισμός αυτός έχει την ακόλουθη σειρά:

Ηλεκτρική ενέργεια → μετατροπή σε μαγνητική ενέργεια → μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής ουσιαστικά αποτελείται από τρεις μονοφασικούς Μ/Σ, στους οποίους συνδέουμε τα άκρα κατάλληλα. Κάθε μονοφασικός Μ/Σ μπορεί να έχει δικό του πυρήνα, ή εναλλακτικά μπορούν και οι τρεις να μοιράζονται τον ίδιο. Για να προκύψει ο τριφασικός Μ/Σ ενώνονται τα τυλίγματα του σε κάθε πλευρά (ΥΤ/ΧΤ) με συγκεκριμένο τρόπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

«ΠΥΡΗΝΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ»

7.1 Μαγνητικές ιδιότητες ελάσματος του πυρήνα του μετασχηματιστή

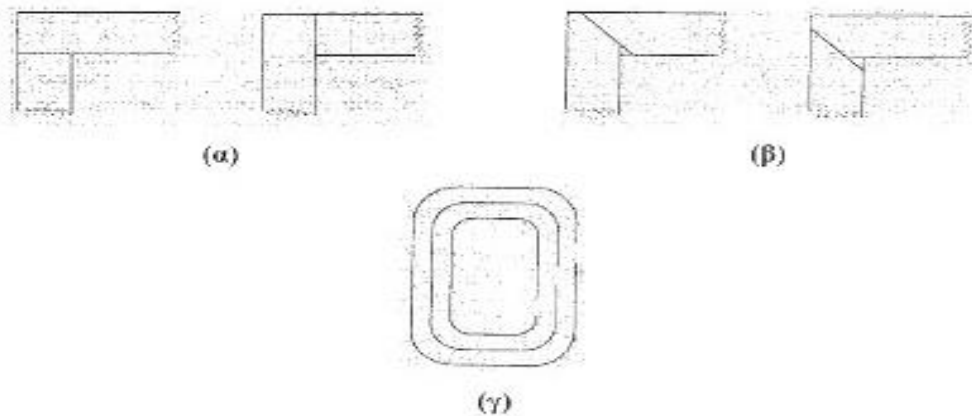
Έχει παρατηρηθεί ότι οι μαγνητικές ιδιότητες πρακτικά δεν μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια ζωής ενός Μ/Σ, παρατηρείται δηλαδή μηδενική γήρανση.

Τα ελάσματα του πυρήνα του Μ/Σ είναι κράματα σιδήρου, τα οποία περιέχουν μέχρι 4,5% πυρίτιο. Οι απώλειες ενός μετασχηματιστή είναι τόσο μικρότερες όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα των ελασμάτων σε πυρίτιο (σαν ανώτερο όριο θεωρείται το 4,5% της μάζας του πυρήνα σε πυρίτιο, λόγω της αυξανόμενης σκλήρυνσης και ψαθυρότητας.

Τα ελάσματα είναι ψυχρής ή θερμής εξέλασης που έχει πλέον εγκαταλειφθεί. Το πάχος των ελασμάτων είναι περί τα 0,23 mm. Είναι προσανατολισμένων κόκκων στη διεύθυνση της εξέλασης και μονώνονται και από τις δυο πλευρές με μια λεπτή στρώση εφυάλωσης λίγων μm, ώστε κατά τη στοίβαξη του πυρήνα να προκύψει πλήρωση του με σίδηρο κατ'όγκο 96% περίπου.

Κατά τη διαδικασία κοπής των ελασμάτων επιβάλλεται η χρήση ιδιαίτερα κοφτερών εργαλείων, ώστε να αποφεύγετε η δημιουργία εξογκωμάτων (γρέζι), τα οποία προκαλούν βραχυκύκλωμα με συνέπεια αύξηση των απωλειών. Έτσι προτιμάται συνήθως αιχμή, των χρησιμοποιούμενων εργαλείων, από διαμάντι.

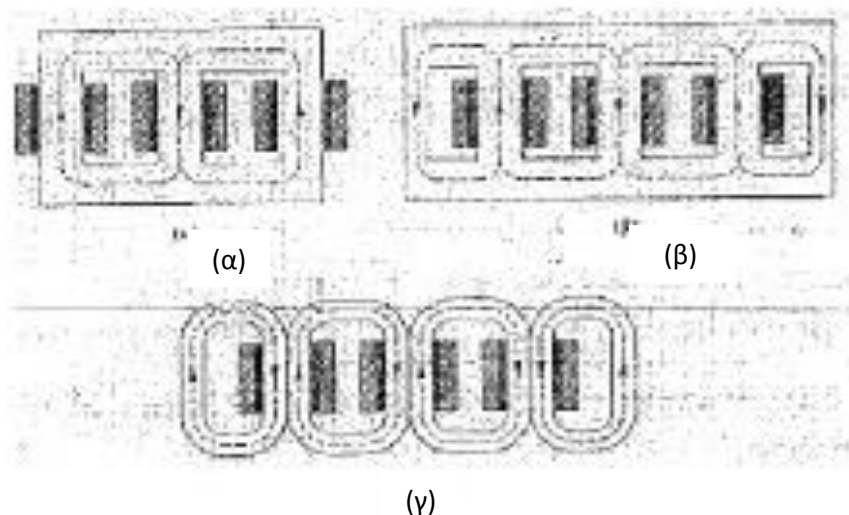
Η πλέξη των ελασμάτων του πυρήνα γίνεται με φύλλο προς φύλλο, είτε ομάδα με ομάδα φύλλων. Πρέπει η διαπλοκή των ελασμάτων, ή των ομάδων, να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε αφενός να αποφεύγεται η σύμπτωση ενώσεων και αφετέρου το δημιουργούμενο διάκενο να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, γιατί η μαγνητική αντίσταση του γίνεται πολύ μεγάλη, λόγω της μικρής διαπερατότητας του αέρα σε σχέση με αυτή του σιδήρου.



**Σχήμα 23: Πλέξιμο ελασμάτων με ένωση: (α) υπό γωνία 90°
 (β) υπό γωνία 45°
 (γ) τυλιχτού τύπου πυρήνα**

Ο πυρήνας του Μ/Σ είναι φορέας της μαγνητικής ροής, η οποία συμπλέκει τα ελάσματα μεταξύ τους.

Στο στοιβαχτό τύπο πυρήνα τα περιελιγμένα του μέρη συνδέονται μεταξύ τους με τα ζυγώματα, ώστε να δημιουργείται ένα μαγνητικό κύκλωμα, κάτι που δεν συμβαίνει στους τυλιχτούς πυρήνες Μ/Σ.



Σχήμα 24: Τριφασικοί μετασχηματιστές

Οι δυο ακραίες στήλες δεν είναι περιπλεγμένες. Χρησιμοποιούνται στην περίπτωση μεγάλων Μ/Σ για τη γείωση του ύψους, ώστε να αποφεύγονται διάφορα προβλήματα (όπως π.χ , όταν μεταφέρονται οδικώς, κατά τη διέλευση τους κάτω από γέφυρες).

Στις εφαρμογές που γίνονται στην Ελλάδα προτιμάται ο πεντάστηλος τριφασικός Μ/Σ, όπου χρησιμοποιεί τον τύπο (γ) του σχήματος 2.

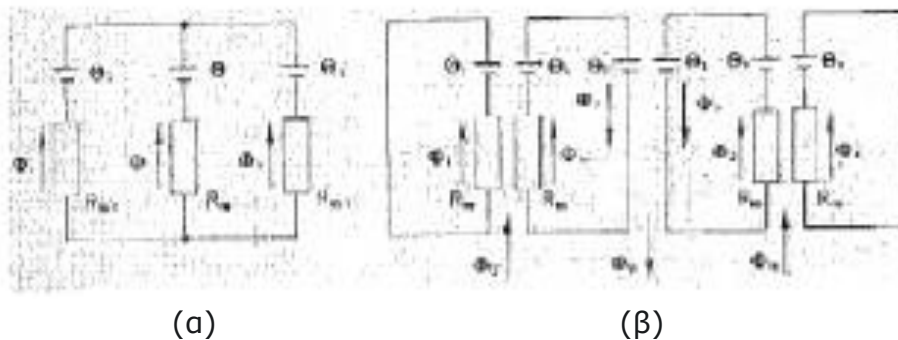
7.2 Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα τριφασικού μετασχηματιστή

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη Θ (διάρρευμα) αντιστοιχεί στην τάση, η μαγνητική ροή Φ στην ένταση και η μαγνητική αντίσταση R_m στην ηλεκτρική αντίσταση R .

Στην περίπτωση του τριφασικού πυρήνα στοιβαχτού τύπου (σχήμα 3α) οι απόλυτες τιμές των μαγνητικών ροών και στους τρεις κλάδους του πυρήνα είναι ίσες μεταξύ τους, αλλά φασικά μετατοπισμένες κατά 120° , αφού είναι προϊόντα των αντίστοιχων φάσεων της τριφασικής τροφοδότησης. Αθροιζόμενες δίνουν αποτελέσματα μηδέν, δηλαδή ισχύει:

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

Οι μαγνητικές αντιστάσεις των εξωτερικών κλάδων (R_{m1}) είναι ίσες μεταξύ τους, αν θεωρηθούν ίσες και οι μαγνητικές αντιστάσεις των ενώσεων. Λόγω της μικρότερης μαγνητικής αντίστασης του μεσαίου κλάδου (R_m) προκύπτει και διαφορά στα ρεύματα μαγνητίσεως.



Σχήμα 25: Ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα

Ο τυλιχτός τύπος πυρήνα αποτελείται από τέσσερις κλάδους όπως το σχήμα 2γ. Οι μαγνητικές αντιστάσεις σε όλους τους κλάδους είναι μεταξύ τους ίσες (σχήμα 3β). Οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις ($\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$) όπως και οι ροές ($\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$) είναι μετατοπισμένες. Από τις ροές Φ_1, Φ_2 προκύπτει μια συντονισμένη ροή Φ_u (από όπου προκύπτει η τάση του δευτερεύοντος). Το ίδιο ισχύει και με τις ροές Φ_2, Φ_3 και Φ_3 και Φ_4 , από τις οποίες προκύπτουν οι συνιστάμενες ροές Φ_n και Φ_w αντίστοιχα, για να καταλήξουμε σε άθροισμα ροών ίσο με το μηδέν, όπως ακριβώς και στην περίπτωση του στοιβαχτού πυρήνα δηλαδή:

$$\Phi_u + \Phi_v + \Phi_w = 0$$

Schneider Electric

Elvim Mineral Oil ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ

ΤΥΠΟΣ **T1250/10044** ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ **2010**
 ΙΣΧΥΣ ΚΒΑ **1250** ΒΑΡΟΣ ΠΥΡ. + ΤΥΛΙΓ. **1475 Kg**
 ΦΑΣΕΙΣ **3** ΟΓΚΟΣ ΛΑΔΙΟΥ **1045 Lt**
 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ **50 Hz** ΟΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ **3600 Kg**
 ΤΑΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ **5,63 %** ΜΕΓ. ΘΕΡΜ. ΠΕΡΙΒ. **45 °C**
 ΖΕΥΞΗ **Dyn 11** ΥΠΕΡΥΨ. ΘΕΡ. ΤΥΛΙΓ. **60 K**
 ΕΙΔΟΣ ΨΥΞΗΣ **ONAN** ΥΠΕΡΥΨ. ΘΕΡ. ΛΑΔΙΟΥ **55 K**

ΟΝΟΜΑΣΤ. ΥΨΗΛΗ ΤΑΣΗ **V 20000**
 ΟΝΟΜΑΣΤ. ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΗ **V 400**
 ΟΝΟΜΑΣΤ. ΕΝΤΑΣΗ Υ.Τ. **A 36,08**
 ΟΝΟΜΑΣΤ. ΕΝΤΑΣΗ Χ.Τ. **A 1804,22**
 ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΕΙΡΑΣ **XXXX**

ΜΕΤΑΓΩΓΕΑΣ

ΘΕΣΗ	V
1	19000
2	19500
3	20000
4	20500
5	21000
6	
7	

ΠΡΟΣΟΧΗ
 Η ΑΛΛΑΓΗ ΛΗΨΕΩΝ
 ΘΑ ΓΙΝΕΤΑΙ ΜΕ ΤΟΝ
 Μ/Σ ΕΚΤΟΣ ΤΑΣΕΩΣ

Κατασκευάστηκε από την Schneider Electric A.E.B.E.
 14ο χλμ. Εθν. Οδού Αθηνών - Λαμίας GR-145 64 Ν. Κηφισιά Τηλ (+30)210 6295200 Fax (+30)210 6295211
 Εργοστάσιο: Οινόφυτα Βοιωτίας GR-320 11 Τηλ. (+30)210 6295300 Fax (+30)210 6295311

ΑΕΓ ΕΛΛΑΣ
 Licence Trafo Union

ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ

ΤΥΠΟΣ **TS 5944 C** ΑΡ. Μ/Τ **XXXX** ΕΤΟΣ ΚΑΤΑΣΚ. **XXXX**

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΚΒΑ **800** ΕΙΔΟΣ **LT** ΝΟΕ 0532/71

1	22000	ΣΥΧΝΟΤΗΣ Ηz	50
2	21500	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	DB
3	21000	ΣΥΝΔΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ	Dyn 3/1
4	20500	ΣΕΙΡΑ	20w/05
5	20000	ΚΛΑΣΙΣ ΜΟΝΩΣ.	A
6	19500	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ	P43/P..
7	19000	ΕΝΤΑΣΙΣ ΒΡΑΧ.ΚΑ	100%

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΙΣ **400** ΚΛΑΣΙΣ ΜΟΝΩΣ. **A**
 ΟΝΟΜΑΣΤ.ΕΝΤΑΣΙΑ **23,1** **1155** ΜΕΓΑΙΑΡΚ.ΒΡΑΧ. sec **4**
 ΤΑΣΙΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛ. **% 5,63** ΕΙΔΟΣ ΨΥΞΕΩΣ **ONAN**
 ΣΥΝΟΛΙΚΟΝ ΒΑΡΟΣ Kg **2515** ΒΑΡΟΣ ΕΛΑΙΟΥ Kg **800**

ΥΨΗΛΗ ΤΑΣΙΣ

ΧΑΜΗΛΗ ΤΑΣΙΣ

ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΓΩΓΕΩΣ ΜΟΝΟΝ ΟΤΑΝ Ο ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΕΙΝΑΙ ΕΚΤΟΣ ΤΑΣΕΩΣ.

7.3 Απώλειες κενής λειτουργίας

Οι απώλειες μαγνήτισης δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$W_{FE} = k_h * F * B^X + K_w * \delta^2 * f^2 * B^2 \quad \{W/Kg\} \quad (\text{Σχέση 52})$$

Όπου : k_h = συντελεστής υστέρησης

F = συχνότητα

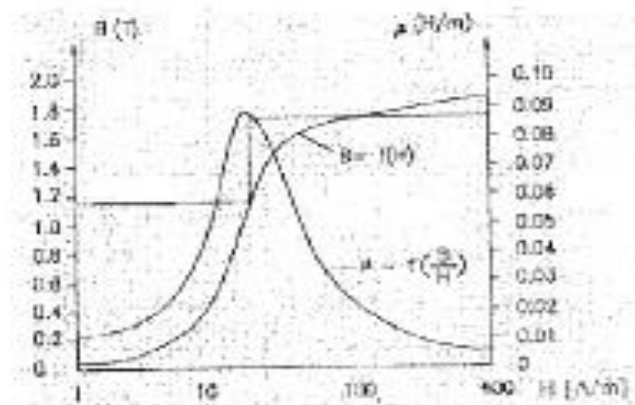
K_w = συντελεστής δινορρευμάτων

B = επαγωγή

δ = πάχος ελάσματος

X = συντελεστής που λαμβάνει τιμές από 1,6-2 (εμπειρικός για κάθε έλασμα)

Μεταξύ μαγνητικής επαγωγής και ενεργού τιμής του ρεύματος μαγνήτισης ανά μονάδα μήκους ισχύει η καμπύλη μαγνήτισης $B=f(H)$, η οποία είναι χαρακτηριστική κάθε ελάσματος.



Σχήμα 26: Καμπύλη μαγνήτισης του υλικού του πυρήνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

«ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ»

8.1 Γενικά

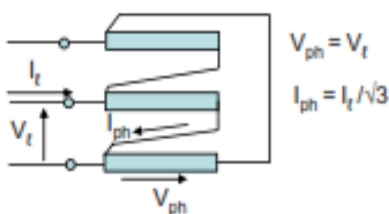
Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή για να προκύψει ο τριφασικός Μ/Σ ενώνονται τα τυλίγματα σε κάθε πλευρά (ΥΤ/ΧΤ) με συγκεκριμένο τρόπο. Τα τυλίγματα σε κάθε πλευρά μπορούν να συνδεθούν σε:

- Αστέρα
- Τρίγωνο
- Τεθλασμένο Αστέρα (Ζικ-Ζαγκ)

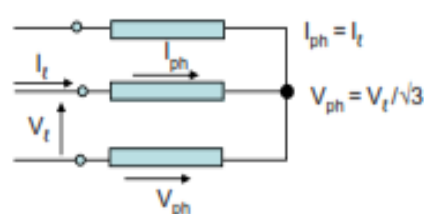
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Όμας	Συμβολισμός	Διανυσματικών διάγραμμα		Συνδεσμολογία		Σχέσις μεταφοράς
		Υ.Τ.	Χ.Τ.	Υ.Τ.	Χ.Τ.	
0	Dd0					N_1/N_2
	Yy0					N_1/N_2
	Dz0					$2N_1/3N_2$
5	Dy5					$N_1/\sqrt{3}N_2$
	Yd5					$\sqrt{3}N_1/N_2$
	Yz5					$2N_1/\sqrt{3}N_2$
6	Dd6					N_1/N_2
	Yy6					N_1/N_2
	Dz6					$2N_1/3N_2$
11	Dy11					$N_1/\sqrt{3}N_2$
	Yd11					$\sqrt{3}N_1/N_2$
	Yz11					$2N_1/\sqrt{3}N_2$

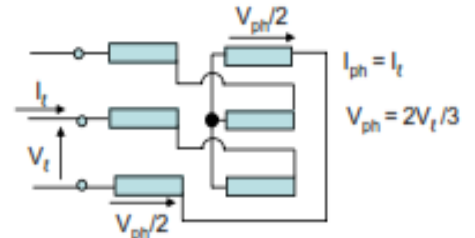
ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΡΙΓΩΝΟΥ (D)



ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΑΣΤΕΡΑ (Y)



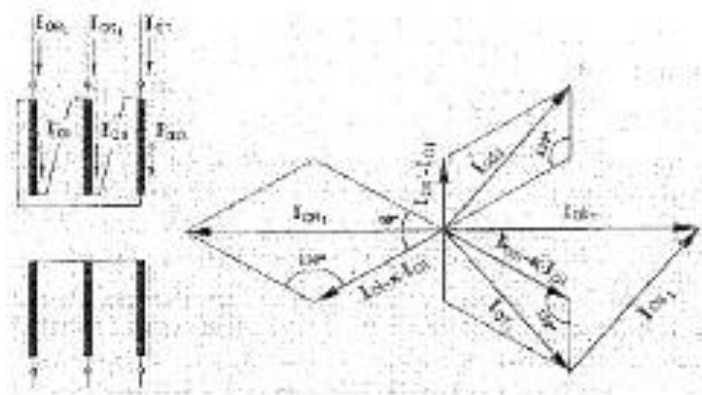
ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΤΕΘΛΑΣΜΕΝΟΥ ΑΣΤΕΡΑ (Z)



8.2 Συνδεσμολογία Τριγώνου - Αστέρα

Στη συνδεσμολογία τριγώνου στο πρωτεύον, τα απαιτούμενα ρεύματα μαγνήτισης στις τρεις στήλες, μπορούν να διαμορφωθούν ελεύθερα. Αυτά

είναι παραμορφωμένα και άνισα μεταξύ τους. Το αλγεβρικό άθροισμα, όμως των τριών ρευμάτων των αγωγών τροφοδότησης είναι ίσο με το μηδέν.

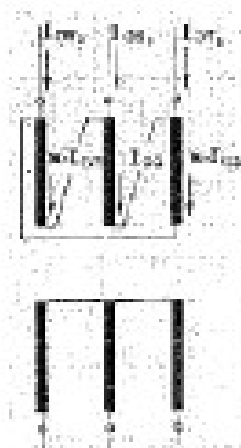


Σχήμα 27: Συνδεσμολογία τριγώνου - αστέρα (διανυσματικό διάγραμμα)

Από το διάγραμμα του σχήματος 4 ισχύει για τη βασική αρμονική των ρευμάτων των αγωγών τροφοδότησης:

$$I_{0R1} = \sqrt{3} * k * I_{01} \text{ (Σχέση 53)}$$

$$I_{0s1} = I_{0T1} = I_{01} = \sqrt{1 + k^2 + k} \text{ (Σχέση 54)}$$

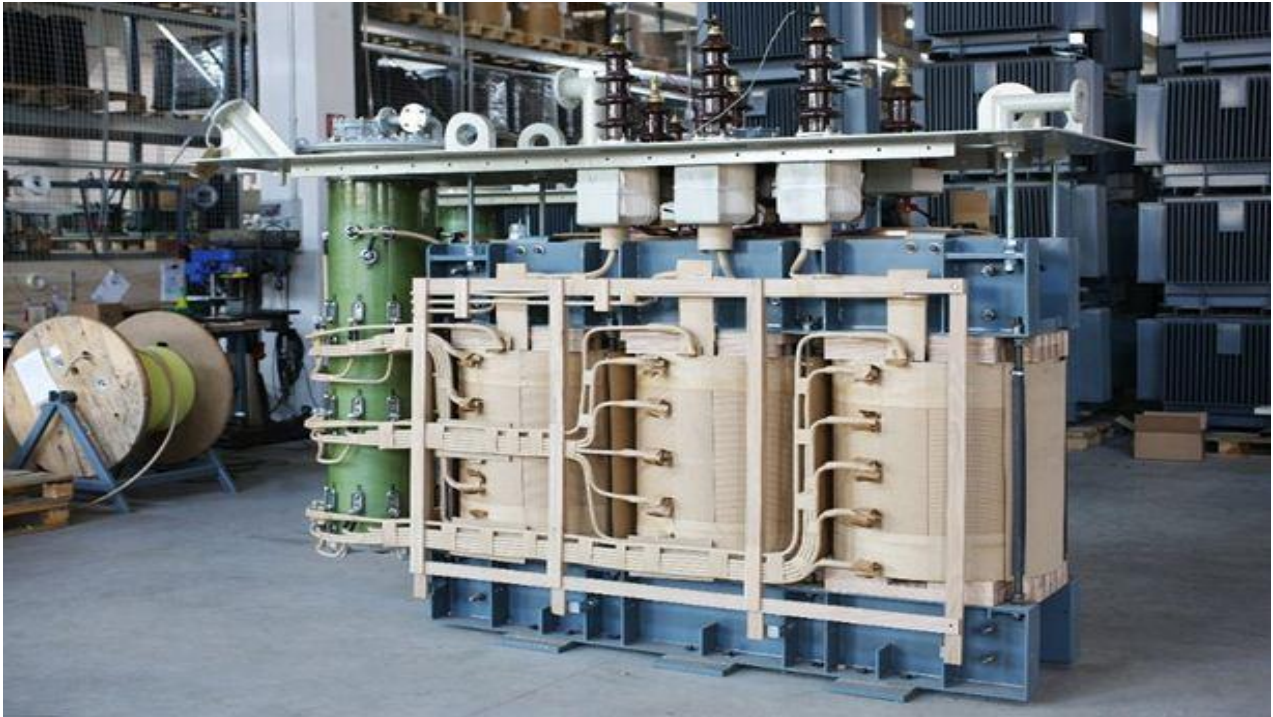


Σχήμα 28: Κατανομή της τρίτης αρμονικής

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα ισχύει:

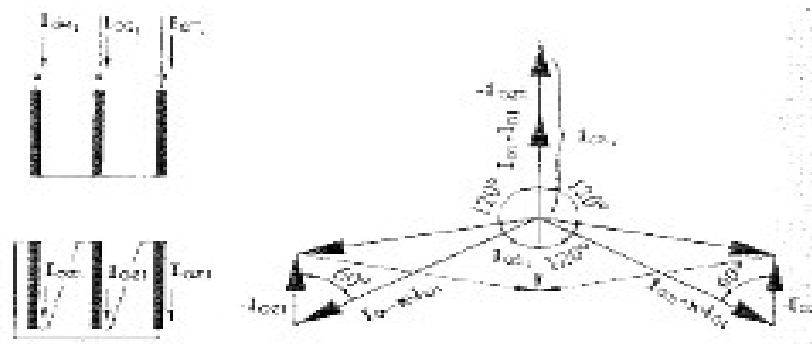
$$I_{0R3} = k * I_{03} - k * I_{03} = 0 \text{ (Σχέση 55)}$$

$$I_{0s3} = I_{03} * (k - 1) \text{ (Σχέση 56)}$$



8.1. ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΑΣΤΕΡΑ - ΤΡΙΓΩΝΟΥ

Η συνδεσμολογία του πρωτεύοντος τυλίγματος κατά αστέρα απαιτεί το σύνολο των ρευμάτων να είναι ίσο με μηδέν. Αυτή η απαίτηση είναι αντίθετη στην απαίτηση του μαγνητικού κυκλώματος. Αποτέλεσμα αυτών είναι η εμφάνιση πρόσθετων ρευμάτων στους αγωγούς τροφοδότησης της ίδιας διεύθυνσης. Οι τάσεις από επαγωγή στο τύλιγμα του τριγώνου είναι συνδεδεμένες σε σειρά και προκαλούν ρεύμα στο εσωτερικό του. Τα διαρρέυματα στο πρωτεύον τύλιγμα έχουν την ίδια διεύθυνση και αντισταθμίζονται από το διάρρευμα του τυλίγματος τριγώνου.



Σχήμα 29: Συνδεσμολογία αστέρα- τριγώνου (διανυσματικό διάγραμμα)

Από το διάγραμμα του σχήματος 34 προκύπτει η διανυσματική εξίσωση του ρεύματος μαγνήτισης, για σχέση μετασχηματισμό 1:1 :

$$I_{0I} + I_{0II} + I_{0III} = 3 * I_{0ZI} \quad (\text{Σχέση 57})$$

απ' όπου με $I_{0I} = I_{0II} = κ * I_{0II}$ να έχουμε:

$$I_{0ZI} = \frac{κ-3}{3} * I_{0I} \quad (\text{Σχέση 58})$$

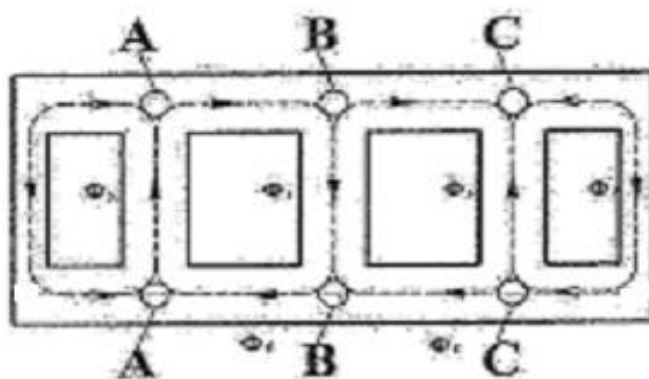
8.3 Συνδεσμολογία Αστέρα – Αστέρα και Αστέρα – Τεθλασμένου Αστέρα

Η συνδεσμολογία αυτή επιλέγεται σε μικρές ισχύς τριφασικών Μ/Σ, όταν η τάση του δικτύου είναι αρκετά υψηλή και πάρα το γεγονός της σημαντικής αύξησης του κόστους κατασκευής του Μ/Σ αφού απαιτείται περισσότερο υλικό λόγω της γωνίας των 120^0 μεταξύ των δυο τυλιγμάτων που δημιουργούν αυτή τη συνδεσμολογία.

Με τη συνδεσμολογία αυτή αυξάνεται η διάμετρος του αγωγού, με επακόλουθη αύξηση της αντοχής από διηλεκτρικές καταπονήσεις, εξ' αιτίας της μείωσης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

8.4 Πεντάστηλος τριφασικός μετασχηματιστής

Στην περίπτωση αυτή όλες τις χρησιμοποιούμενες συνδεσμολογίες πρέπει να περιλαμβάνουν ένα τρίγωνο, αφού τα ζυγώματα συνδέονται με τις στήλες επιστροφής (μικρή μαγνητική αντίσταση) διευκολύνοντας έτσι τη δημιουργία μιας ομοπολικής ροής κατά την ασύμμετρη φόρτιση



Σχήμα 30: Κατανομή των ροών στον πεντάστηλο τριφασικό μετασχηματιστή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

«ΠΕΔΙΟ ΣΚΕΔΑΣΗΣ»

9.1 Γενικά

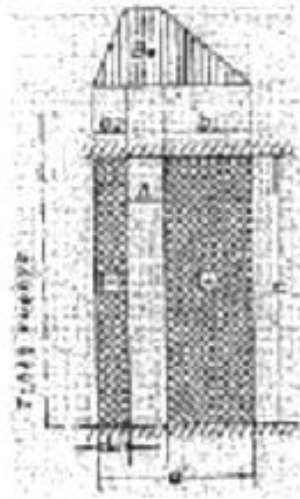
Πεδία σκέδασης χαρακτηρίζονται όλα τα πεδία, των οποίων οι μαγνητικές γραμμές δεν διέρχονται από το σιδηροπυρήνα. Στους τριφασικούς Μ/Σ εμφανίζονται πολλά τέτοια πεδία, ανάλογα με την αιτία που προκαλεί τη δράση τους. Όταν ένας Μ/Σ είναι αφόρτιστος, εμφανίζεται πεδίο σκέδασης κενής λειτουργίας, το οποίο προκαλείται από το ρεύμα μαγνήτισης στο πρωτεύον τυλίγμα. Εξαιρέση αποτελεί το φαινόμενο ζεύξης κατά το οποίο ο πυρήνας τείνει στον κορεσμό, οπότε το πεδίο σκέδασης λαμβάνει υψηλές τιμές. Όταν ένας Μ/Σ βρίσκεται υπό φορτίο, προκαλείται ένα πρόσθετο πεδίο σκέδασης από τα ρεύματα φορτίου. Πρόκειται για το κύριο πεδίο σκέδασης, που προκαλεί το μεγαλύτερο μέρος της άεργου πτώσης τάσης του Μ/Σ και τα δινορρεύματα στα τυλίγματα, ενώ επηρεάζει και το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

9.2 Κύριο πεδίο σκέδασης

Οι βασικοί μελετητές του κυρίου πεδίου σκέδασης ήταν οι Karr και Rogowski, με βάση τις εξής παραδοχές:

- Οι μετωπικές πλευρές των τυλιγμάτων εφάπτονται σε επίπεδες παράλληλες απείρων διαστάσεων πλάκες με άπειρη μαγνητική διαπερατότητα.
- Οι διατομές των τυλιγμάτων κατακλύζονται από ρεύμα
- Οι αναδράσεις στο πεδίο σκέδασης από το ρεύμα εκτόπισης στους αγωγούς είναι αμελητέες.

Μια ομάδα σκέδασης αποτελείται από δυο πηνία ή δυο τυλίγματα με ίσα αλλά αντίθετα διαρρεύματα. Έτσι προκύπτει η κατανομή του εξιδανικευμένου πεδίου σκέδασης.



Σχήμα 31: Κατανομή κύριου πεδίου σκέδασης του ιδανικού μετασχηματιστή

Επειδή στην ιδανική αυτή περίπτωση όλες οι μαγνητικές γραμμές στο διάυλο σκέδασης είναι παράλληλες, η μαγνητική επαγωγή είναι σταθερή κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών. Η εκάστοτε τιμή της είναι εσωτερικά του πλάτους Δ του διαύλου η ίδια και έχει πτωτική τάση από μια μέγιστη τιμή κατά πλάτος του πηνίου ή του τυλίγματος. Στην ουσία η πρώτη παραδοχή δεν πληρείται. Στα κυλινδρικά τυλίγματα τα ζυγώματα του πυρήνα βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τις μετωπικές πλευρές των τυλιγμάτων. Αποτέλεσμα αυτού είναι πολλές πεδιακές γραμμές να εξέρχονται πλευρικά από την ομάδα σκέδασης και να κλείνουν μέσω του περιβάλλοντος χώρου. Τελικά στο μεγαλύτερο μέρος των τυλιγμάτων υπάρχει η εξιδανικευμένη κατανομή του πεδίου, όταν το μήκος των τυλιγμάτων είναι μεγάλο.

Η τάση σκέδασης είναι ανάλογη της πεδιακής ενέργειας. Η τάση της εξιδανικευμένης μορφής διορθώθηκε από το Rogowski με χρήση της ενός συντελεστή, η τιμή του οποίου δίνεται από τη σχέση :

$$K_R = 1 - \frac{a}{\pi * h} * (1 - e^{nh/a}) \quad \text{(Σχέση 59)}$$

Η τάση σκέδασης προκύπτει από την ένταση του ρεύματος επί την επαγωγική αντίσταση, η οποία δίδεται από την επαγωγικότητα σκέδασης L_σ επί την κυκλική συχνότητα ω και εκφράζεται σε ποσοστά της ονομαστικής τάσης. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U_x = \frac{\Phi_\sigma + \Phi_{\sigma q}}{\phi} * 100\% \quad \text{(Σχέση 60)}$$

Όπου: Φ_σ = η κύρια σκέδαση

$\Phi_{\sigma q}$ = η εγκάρσια σκέδαση

Φ = η ονομαστική ροή στον πυρήνα κατά τη κενή λειτουργία

Η επαγωγικότητα μπορεί να υπολογιστεί μέσω της μαγνητικής ενέργειας. Η αποθηκευμένη ενέργεια ενός πηνίου δίνεται από τη σχέση:

$$W = \frac{1}{2\mu} * L_\sigma * I^2 \quad \text{(Σχέση 61)}$$

Για την πεδιακή ενέργεια ισχύει ότι:

$$W = \frac{1}{2\mu} * \int_1^V B\sigma * Vol \quad (\text{Σχέση 62})$$

Όπου : $L\sigma$ = η επαγωγικότητα

$B\sigma$ = η μαγνητική επαγωγή σκέδασης

Vol = ο όγκος

Από το νόμο του διαρρέυματος, για την ένταση του μαγνητικού πεδίου H_Δ μέσα στον δίαυλο Δ ισχύει η σχέση:

$$H_\Delta = \frac{I * N}{l_s} \quad (\text{Σχέση 63})$$

Όπου l_s το μήκος του πεδίου σκέδασης.

Για την πυκνότητα ενέργειας ισχύει η σχέση:

$$W = \frac{1}{2} * H_\Delta * B = \frac{1}{2} * \mu_0 * H_\Delta^2 = \frac{1}{2} * \mu_0 * \frac{I * N}{l_s * l\sigma} \quad (\text{Σχέση 64})$$

Στο εσωτερικό των τυλιγμάτων η ένταση του μαγνητικού πεδίου H_x έχει την τιμή:

$$H_x = H_\Delta * (x / b) \quad (\text{Σχέση 65})$$

Όπου: x = η απόσταση από το άκρο του διαύλου

b = το πλάτος ενός τυλιγματος

Για την πυκνότητα ενέργειας ισχύει:

$$W = \frac{1}{2} * H_x^2 = \frac{1}{2} * \mu_0 * \frac{x}{b * b} * H_\Delta^2 \quad (\text{Σχέση 66})$$

Σε ολόκληρη την περιοχή σκέδασης η μαγνητική ενέργεια γίνεται:

$$W = \left[\int_b^{b1} \frac{x * x}{b1 * b1} * dx + \Delta + \int_b^{b2} \frac{x * x}{b2 * b2} * dx \right] * \frac{1}{2} * \mu_0 * H_\Delta^2 * \pi * d\sigma * L\sigma \quad (\text{Σχέση 67})$$

Και τελικά:

$$W = \frac{b1}{3} + \Delta + \frac{b2}{3} * \frac{1}{2} * \mu_0 * H_\Delta^2 * \pi * d\sigma * L\sigma \quad (\text{Σχέση 68})$$

Όπου: $L\sigma$ = το μήκος του πεδίου σκέδασης που λαμβάνεται ίσο με το μαγνητικό ύψος h

των τυλιγμάτων

$\pi d\sigma$ = η μέση περίμετρος του ισοδύναμου χώρου σκέδασης

Το πλάτος του ισοδύναμου χώρου σκέδασης είναι:

$$\Delta' = \frac{b1}{3} + \Delta + \frac{b2}{3} \quad (\text{Σχέση 69})$$

$$d\sigma = d_{\sigma 1} + \Delta'$$

όπου: d_{a1} η εσωτερική διάμετρος του τυλιγματος Χ.Τ. Τελικά, για την επαγωγικότητα, λαμβάνοντας υπόψη και το συντελεστή Rogowski, προκύπτει:

$$L\sigma = \mu_0 * N^2 * \frac{(b1/3) + \Delta + (b2/3) * \pi * d\sigma}{h} * K_1 \text{ (Σχέση 70)}$$

Στην περίπτωση που το ένα τυλίγμα διαιρείται σε δυο μέρη, τα οποία χωρίζονται μεταξύ τους με ένα διάυλο δ , το ισοδύναμο πλάτος του όλου τυλιγματος b_2 στη σχέση 45 είναι:

$$b_2 = b_{21} * [(\frac{\theta_1}{\theta})^2 + 3 * (\frac{\theta_2}{\theta})] + b_{22} + 3 * \delta * (\frac{\theta_2}{\theta})^2 \text{ (Σχέση 71)}$$

$$\text{όπου: } \Theta = I_2 * N_2$$

$$\Theta_1 = I_2 * N_{21}$$

$$\Theta_2 = I_2 * N_{22}$$

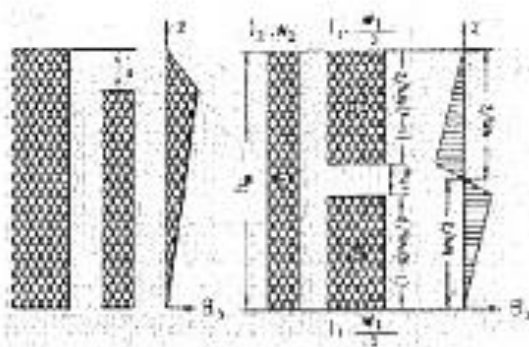
b_{21} , b_{22} τα αντίστοιχα πλάτη

Αν $\Theta_1 = \Theta_2$ και $b_{21} = b_{22}$ τότε το ισοδύναμο πλάτος είναι:

$$b_2 = b_{21} + b_{22} + \frac{3}{4} * \delta \text{ (Σχέση 72)}$$

9.3 Εγκάρσιο πεδίο σκέδασης

Δημιουργείται μεταξύ των εγκάρσιων διαύλων που υπάρχουν σε τυλίγματα μεμονωμένων πηνίων και της διαφοράς υψών των τυλιγμάτων, κυρίως στη μονόπλευρη μείωση του ύψους ενός τυλιγματος.



Σχήμα 32: Εγκάρσια πεδία σκέδασης

Το εγκάρσιο πεδίο σκέδασης εκφράζεται σε ποσοστά του κυρίου πεδίου σκέδασης. Υπολογίζεται με τη βοήθεια των διαρρευμάτων και των μηκών των πηνίων και των εγκάρσιων διαύλων και για την περίπτωση δυο πηνίων δίδεται από τη σχέση:

$$\lambda = \frac{1}{\theta * h} * [\Theta_1 * z + \Theta_1 * s + (\Theta_1 + \Theta_2) * (z - h_1 - s)] - 1 \text{ (Σχέση 73)}$$

όπου : λ = ένας συντελεστής

h = το ύψος του τυλίγματος

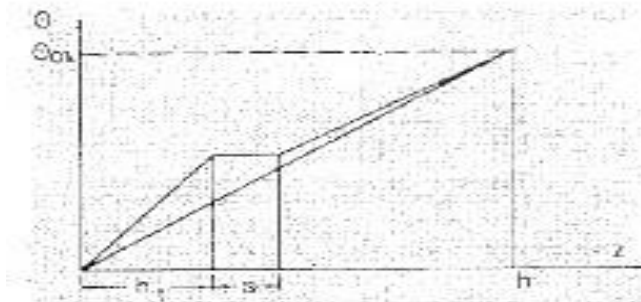
h_1 = το ύψος του πρώτου πηνίου

s = το πλάτος του εγκάρσιου διαύλου

$\Theta_{ολ}$ = $\Theta_1 + \Theta_2$ το συνολικό διάρρευμα του τυλίγματος

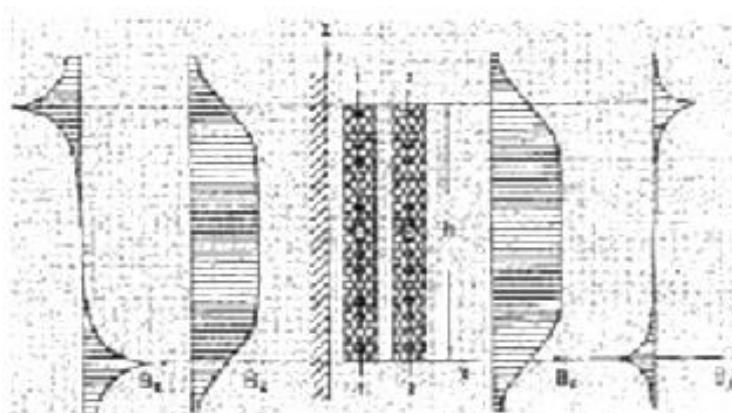
Αν ο συντελεστής $\lambda > 0$, τότε προστίθενται στην κύρια σκέδαση, ενώ αν $\lambda < 0$ αφαιρείται.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η γραφική παράσταση προσδιορισμού του συντελεστή λ .



Σχήμα 33: Κατανομή εγκάρσιου πεδίου σκέδασης τυλίγματος με δυο πηνία και εγκάρσιο δίαυλο

Από το λόγο των επιφανειών του παραπάνω γραφήματος υπολογίζεται ο συντελεστής λ . Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή των συνιστωσών της μαγνητικής επαγωγής, οριζόντιας B_x , κατακόρυφης B_z , κατά μήκος του άξονα των τυλιγμάτων. Παρατηρείται ότι η οριζόντια συνιστώσα έχει τη μέγιστη τιμή της στα μέτωπα των τυλιγμάτων.



Σχήμα 34: Κατανομή των συνιστωσών της μαγνητικής επαγωγής κατά μήκος του άξονα Z

9.4 Τάση βραχυκύκλωσης

Τάση βραχυκύκλωσης U_k λέγεται η τάση εκείνη, που πρέπει να επιβληθεί στο πρωτεύον του Μ/Σ, ώστε με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον να διέλθει από αυτό ονομαστική ένταση ρεύματος. Αποτελείται από δυο μέρη: το ωμικό U_R και το επαγωγικό U_x για τα οποία ισχύει:

$$U_R = I * R \quad (\text{Σχέση 74})$$

$$U_k = I * \omega * L_s \quad (\text{Σχέση 75})$$

Και οι οποίες αθροίζονται γεωμετρικά: $U_k = \sqrt{U_R^2 + U_k^2}$ (Σχέση 76)

Το μέγεθος της σε σχέση προς την ονομαστική τάση: $U_k = \sqrt{U_R^2 + U_k^2}$

Όπου: $u_r = U_R / U_N$ και $u_x = U_x / U_N$, το ενεργό και το επαγωγικό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης αντίστοιχα, εκφράζεται επί τοις % και U_N η ονομαστική τάση. Η u_k είναι υπεύθυνη τόσο για την πώση τάσης που δημιουργείται εσωτερικά του Μ/Σ όσο και για το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k που θα προκύψει με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον. Το ρεύμα αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$I_k = I_N * \frac{100}{U_k} \quad (\text{Σχέση 77})$$

όπου I_N το ονομαστικό ρεύμα. Η τελευταία σχέση ισχύει για τους τριφασικούς Μ/Σ, όταν πρόκειται για τριπολικό βραχυκύκλωμα.

9.5 Ωμική τάση βραχυκύκλωσης

Το ενεργό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης δίνεται από το λόγο των απωλειών V_{cu} δια της ονομαστικής ισχύος P_N του Μ/Σ:

$$U_r = \frac{V_{cu}}{P_n} * 100\% \quad (\text{Σχέση 78})$$

9.6 Επαγωγική τάση βραχυκύκλωσης

Για την επαγωγική τάση βραχυκύκλωσης προκύπτει με τη χρήση των παραπάνω εξισώσεων:

$$U_x = \frac{B\sigma * \Delta' * \pi * D_s}{\phi} * K_R * 100\% = \frac{4\pi * \sqrt{2} * I * N}{h} * \frac{\Delta' * \pi * D_s}{\phi} * K_R * 100\%$$

(Σχέση 79)

Όπου: $D_1 = d_{\sigma 1} + \Delta' - (2/3) * b_1$ η ισοδύναμη μέση διάμετρος

$d_{\sigma 1}$ = η εξωτερική διάμετρος του τυλίγματος

b_2 = το πάχος του εσωτερικού τυλίγματος

h = το μέσο μαγνητικό ύψος των τυλιγμάτων

Εισάγωντας την τάση ανά σπείρα:

$$U_w = \pi * \sqrt{2} * \Phi * f \text{ (Σχέση 80)}$$

τότε η u_x γίνεται:

$$U_x = \frac{4\pi * \sqrt{2} * I * N}{\Phi} * \frac{\Delta' * \pi * D_s * \pi * \sqrt{2} * f}{h} * K_R * 100\% * \frac{50}{50} =$$

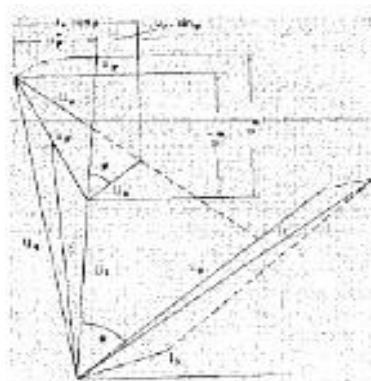
$$= 395 * \frac{I * N}{h} * \frac{\Delta' * \pi * D_s}{U_w} * \frac{f}{50} * K_R \% \text{ (Σχέση 81)}$$

Θέτοντας Δ' , D_s και h σε cm έχουμε ότι:

$$U_x = 1.24 * \frac{I * N}{h} * \frac{\Delta' * D_s}{U_w} * \frac{f}{50} * 10^{-3} * K_R \% \text{ (Σχέση 82)}$$

9.5 Πτώση τάσης

Πτώση τάσης U_ϕ είναι η διαφορά της ονομαστικής τάσης που εμφανίζεται σε επί μέρους φορτίσεις στο άλλο τύλιγμα της ίδιας στήλης, με την παραδοχή ότι η σχέση μετασχηματισμού 1:1, αφού οι σχετικές μεταβολές της τάσης και της έντασης δεν επηρεάζονται από τη σχέση. Στο διάγραμμα του επόμενου σχήματος φαίνονται οι μεταβολές της τάσης και της έντασης.



Σχήμα 35: Διάγραμμα τάσεων και εντάσεων μετασχηματιστή κατά τη φόρτιση

Κατά τη χάραξη του ωμικού μέρους U_R και του επαγωγικού μέρους U_x της πτώσης τάσης, η γωνία μεταξύ των ρευμάτων εισόδου και εξόδου θεωρείται αμελητέα και παραλείπεται. Έτσι η τάση U_R είναι παράλληλη προς το ρεύμα λειτουργίας I_N και η τάση U_x κάθετη σε αυτό. Για την πτώση τάσης U_ϕ προκύπτει από το διάγραμμα του προηγούμενο σχήματος:

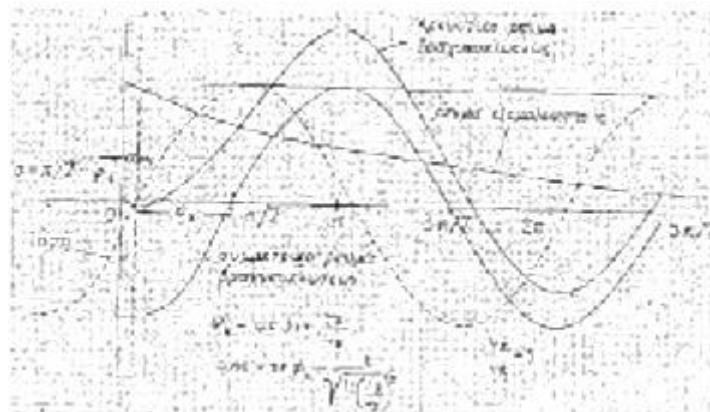
$$U_\phi = U_x * \sin\phi + U_R * \cos\phi + U_N - \sqrt{U_N^2 - (U_x * \cos\phi - U_R * \sin\phi)^2}$$

(Σχέση 83)

Το τρίγωνο που περιγράφεται από τις τάσεις u_ϕ, u_r και u_x ονομάζεται τρίγωνο του Kapp.

9.6 Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης

Το κρουστικό βραχυκύκλωμα είναι φαινόμενο που εξαρτάται από τη στιγμή βραχυκύκλωσης του Μ/Σ, παίρνοντας στους μεγάλους Μ/Σ διπλάσια τιμή από το συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Με την εμφάνιση του ρεύματος βραχυκύκλωσης εμφανίζονται στο Μ/Σ υψηλές μηχανικές καταπονήσεις.



Σχήμα 36: Κατανομή του κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης

Στον τριφασικό Μ/Σ, όταν βραχυκυκλώνει η μια φάση, τότε οι άλλες φάσεις καταπονούνται ελάχιστα. Για να γίνει ο υπολογισμός του κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης λαμβάνεται υπόψη η δυσμενέστερη περίπτωση. Η αρχική τιμή του ρεύματος είναι μηδέν, οπότε ισχύει η σχέση:

$$R * i = L * \frac{di}{dt} = \sqrt{2} * U_1 * \cos(\omega * t + \phi) \quad \text{(Σχέση 84)}$$

Και λύνοντας την προηγούμενη διαφορική σχέση παίρνουμε το κρουστικό ρεύμα:

$$I_k = \sqrt{2} * I_k * (e^{(R/L)*t} - \cos\omega t) \quad \text{(Σχέση 85)}$$

Το συνεχές μέρος του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι:

$$I_R = \sqrt{2} * I_k * (e^{(R/L)*t}) \quad \text{(Σχέση 86)}$$

Θέτοντας $T = L/R \rightarrow T = \frac{1}{\omega} * \frac{Ur}{Ur}$ τότε το ρεύμα γίνεται $I_g = \sqrt{2} * I_k * e^{1/T}$
(Σχέση 87)

Τελικά για το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης έχουμε:

$$I_k = \sqrt{2} * I_k * (1 + e^{(-n*(Ur/Ux)})} \quad \text{(Σχέση 88)}$$

Από την τελευταία σχέση δίνεται το πλάτος του κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης.

9.7 Υπολογισμός αντοχής δοκών σύσφιξης

Οι δοκοί σύσφιξης είναι μεταλλικές, για όλες τις ισχύς Μ/Σ, ή ξύλινοι , από οξιά, για τους Μ/Σ διανομής. Οι πάνω δοκοί αναλαμβάνουν μόνο τη δύναμη σύσφιξης, ενώ οι κάτω αναλαμβάνουν επιπλέον το βάρος του πυρήνα και των τυλιγμάτων του Μ/Σ. Ο υπολογισμός της αντοχής και η επιλογή των δοκών σύσφιξης γίνεται με τη βοήθεια πρότυπων πινάκων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10°

«ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΝΟΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ»

10.1 Γενικά

Κάθε Μ/Σ υποβάλλεται σε μια σειρά δοκιμών και μετρήσεων προς επιβεβαίωση των στοιχείων της μελέτης. Πρόκειται για:

- δοκιμές σειράς (για όλους του Μ/Σ)
- δοκιμές τύπου (για Μ/Σ ίδιου τύπου)
- ειδικές δοκιμές (για ένα συγκεκριμένο Μ/Σ)

10.2 Δοκιμές σειράς

10.2.1 Μέτρηση της αντίστασης τυλιγμάτων

Πρόκειται για την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$R_w = R_c * \frac{235+\theta_w}{235+\theta_c} \text{ για τύλιγμα χαλκού (Σχέση 89)}$$

$$R_w = R_c * \frac{255+\theta_w}{255+\theta_c} \text{ για τύλιγμα αλουμινίου (Σχέση 90)}$$

Όπου : R_w = ωμική αντίσταση σε θερμοκρασία θ_w (warm)

R_c = ωμική αντίσταση σε θερμοκρασία θ_c (cold)

Η παραπάνω μέτρηση είναι απαραίτητη για την επιβεβαίωση της ισοδυναμίας των αντιστάσεων των τριών φάσεων στους τριφασικούς Μ/Σ. Για την πραγματοποίηση της μέτρησης χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα. Υπάρχουν δυο διαφορετικές μέθοδοι: η μέθοδος τάσης – έντασης, όπου η ωμική αντίσταση κάθε τυλιγματος μετρείται μεταξύ των ακροδεκτών κάθε φάσης και η μέθοδος με γέφυρα Wheatstone, όπου χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μεγάλων αντιστάσεων με τη χρήση τριών γνωστών αντιστάσεων, κατά τη γνωστή συνδεσμολογία και ενός γανβανομέτρου.

10.2.2 Μέτρηση σχέσης μέτρηση σχέσης μετασχηματισμού

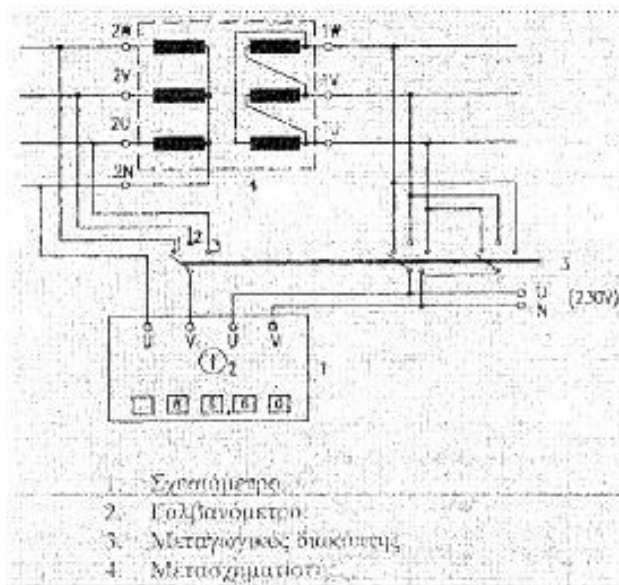
Η τροφοδότηση γίνεται στην περίπτωση, με ρεύμα 230V από την πλευρά της υψηλής τάσης, για να μην υπάρξουν ανυψώσεις τάσης στην πλευρά του δευτερεύοντος. Για τον προσδιορισμό της σχέσης μετασχηματισμού ρυθμίζουμε κατά τέτοιο τρόπο το σχεσιόμετρο, έως ότου το γαλβανόμετρο να μηδενιστεί. Για τη μέτρηση της σχέσης μετασχηματισμού στις συνήθεις συνδεσμολογίες (Dyn11, Yzn11) συνδέονται οι ακροδέκτες:

2N,2U και 1U,1V

2N,2U και 1V,1W

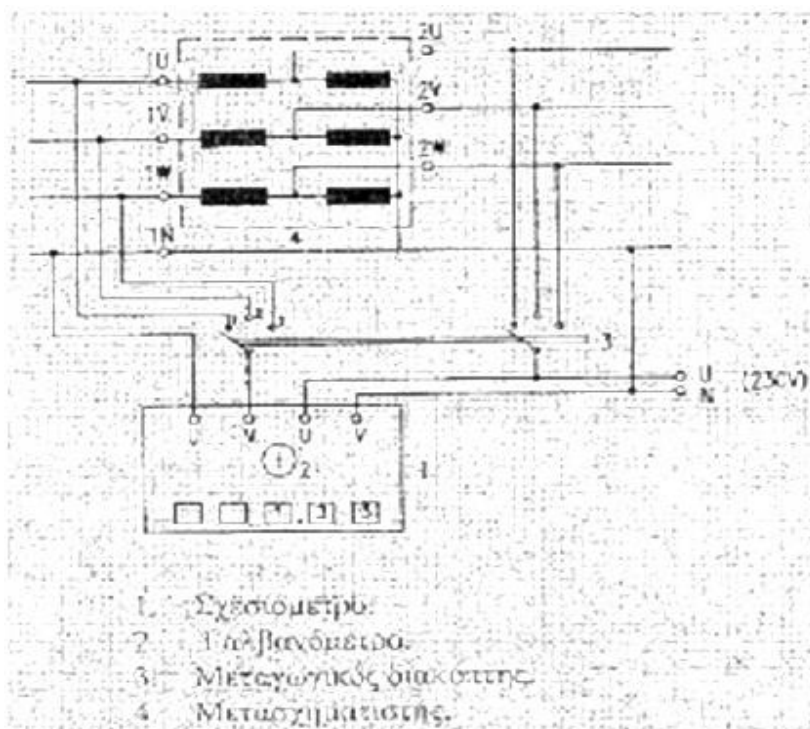
2N, 2W και 1W,1U

Για τις υπόλοιπες συνδεσμολογίες γίνεται αντιμετάθεση των αγωγών που συνδέουν τους ακροδέκτες 1U και 1W



Σχήμα 37: Μέτρηση σχέσης μετασχηματισμού σε συνδεσμολογία

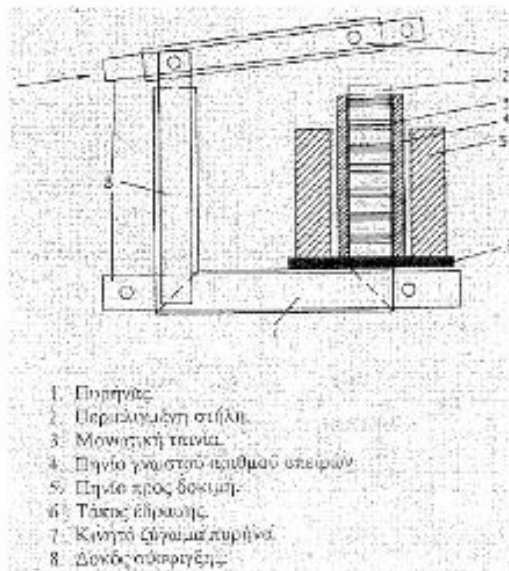
Στους αυτομετασχηματιστές η μέτρηση γίνεται με τον ίδιο τρόπο, με τον κοινό πόλο να συνδέεται και στις δυο πλευρές του σχησιόμετρου.



Σχήμα 38: Μέτρηση σχέσης μετασχηματισμού σε αυτομετασχηματιστή

10.2.3 Έλεγχος αριθμού σπειρών ενός πηνίου

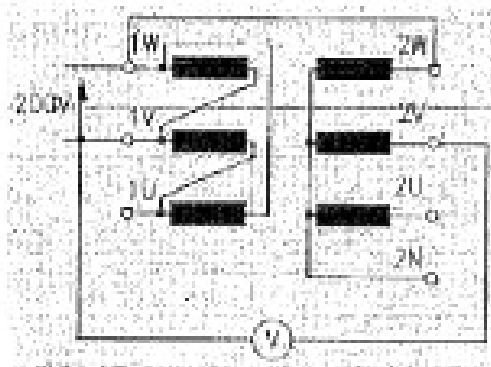
Πριν την τοποθέτηση του πυρήνα του Μ/Σ γίνεται η μέτρηση του αριθμού των σπειρών του πηνίου. Για να πραγματοποιηθεί αυτή η μέτρηση χρησιμοποιείται ένας μονοφασικός πυρήνας, η μιας στήλη του οποίου είναι περιελιγμένη με ένα πρότυπο πηνίο για την αποφυγή σκεδάσεων. Πάνω από το γνωστό πηνίο, τοποθετείται το προς μέτρηση πηνίο και τροφοδοτείται με τάση 230V. Ο αριθμός των σπειρών υπολογίζεται τελικά με τη βοήθεια σχεσιόμετρου.



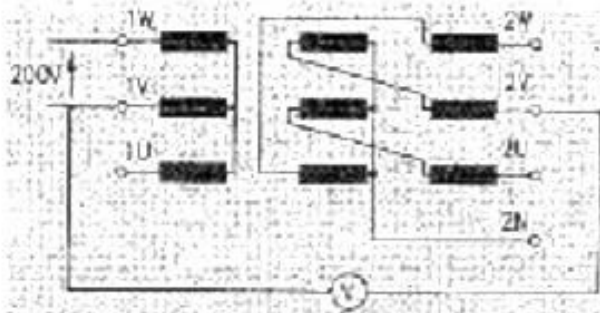
Σχήμα 39: Διάταξη μέτρησης του αριθμού σπειρών πηνίου μετασχηματιστή

10.2.4 Μέτρηση πολικότητας

Μαζί με τη μέτρηση της σχέσης μετασχηματισμού, αναγκαία είναι και η επαλήθευση της πολικότητας των τυλίγμάτων. Η διαδικασία αυτή έχει ως εξής: τροφοδοτούμε δυο ακροδέκτες του τυλίγματος Υ.Τ. με 230V. Στη συνέχεια παρατηρούμε σε ποιες ενδείξεις η πολικότητα είναι αφαιρετική, με τυλίγματα ομόρροπα και σε ποιες προσθετική, με αντίρροπα τυλίγματα.



Σχήμα 40: Μέτρηση πολικότητας συνδεσμολογίας τριγώνου-αστέρα



Σχήμα 41: Μέτρηση πολικότητας συνδεσμολογίας αστέρα – τεθλασμένου αστέρα

10.3 Δοκιμές τύπου

10.3.1 Δοκιμές ανύψωσης θερμοκρασίας

Κατά τη μέτρηση αυτή ελέγχονται οι θερμοκρασίες του λαδιού και των τυλιγμάτων. Η δοκιμή γίνεται με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον του Μ/Σ. Η σημασία της μέτρησης αυτής είναι εξαιρετικά κρίσιμη, δεδομένου ότι τα υλικά των Μ/Σ υφίστανται αλλοίωση στις υψηλές θερμοκρασίες με επακόλουθη επίδραση στη διάρκεια ζωής των μηχανών. Για το λόγο αυτό έχουν τεθεί όρια για την υπερύψωση της θερμοκρασίας του λαδιού και των τυλιγμάτων του χαλκού, όπως και για τις επιτρεπόμενες υπερφορτίσεις. Η θερμοκρασία του αέρα ψύξης Μ/Σ μετράται με τη βοήθεια πληθώρας θερμομέτρων κατάλληλα διατεταγμένων, ώστε να λαμβάνονται αξιόπιστες μετρήσεις, αλλά και τα όργανα να είναι προστατευμένα από ρεύματα αέρα και μη κανονική ακτινοβολία θερμότητας. Τα θερμομέτρα βρίσκονται εντός θηκών με υγρό, ώστε να διατηρούν μια σταθερά χρόνου, ώστε να αποφεύγονται σφάλματα λόγω χρονοκαθυστέρησης στη μεταβολή της θερμοκρασίας Μ/Σ και αέρα. Οι τιμές που τελικά λαμβάνουμε από τη συστοιχία των θερμομέτρων είναι αυτές που τα όργανα δείχνουν κατά το τελευταίο τέταρτο της διάρκειας δοκιμής, ώστε να έχει παρέλθει το αναγκαίο για την «προσαρμογή» του στις επικρατούσες συνθήκες διάστημα και οι μετρήσεις να είναι αξιόπιστες. Η παραπάνω διάταξη χρησιμοποιείται και στις περιπτώσεις που η ψύξη γίνεται με φυσική αλλά και με βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα. Αν η ψύξη του Μ/Σ γίνεται με κυκλοφορία νερού, η θερμοκρασία του νερού πρέπει να μετρηθεί στην είσοδο του ψυγείου, ενώ ως θερμοκρασία λαμβάνεται ο μέσος όρος τριών τουλάχιστον ενδείξεων σε διάστημα μιας ώρας.

10.3.2 Μέτρηση θερμοκρασίας των τυλιγμάτων

Η μέτρηση αυτή γίνεται με τη μέθοδο της μεταβολής των αντιστάσεων. Η θερμοκρασία (Θ_2) ενός τυλιγματος στο τέλος μιας περιόδου δοκιμής υπολογίζεται από την αντίσταση (R_2) που έχει στο τέλος της δοκιμής και της αντίστασης (R_1) σε μια άλλη θερμοκρασία (Θ_1):

$$\Theta_2 = \frac{R_2}{R_1} * (235 + \Theta_1) - 235 \text{ [K] για τυλίγματα χαλκού (Σχέση 91)}$$

$$\Theta_2 = \frac{R_2}{R_1} * (225 + \Theta_1) - 225 \text{ [K] για τυλίγματα αλουμινίου (Σχέση 92)}$$

Η αντίσταση R1 είναι συνήθως η ψυχρή αντίσταση και μετριέται με τη χρήση γέφυρας Wheatstone ή Thomson, ενώ η αντίσταση R2 μετριέται κατά κανόνα με διακοπή της τροφοδότησης, σύμφωνα με το πρότυπο IEC279.

10.3.3 Μέτρηση θερμοκρασίας άνω στρώματος λαδιού

Για τη μέτρηση αυτή υπάρχει ειδική θέση για την τοποθέτηση θερμομέτρου, η οποία βρίσκεται στο κάλυμμα και είναι γεμάτη με λάδι. Στην περίπτωση μεγάλων Μ/Σ τοποθετείται στη σωλήνα εξόδου προς τα ψυκτικά σώματα ή στην περίπτωση χωριστών ψυκτικών σωμάτων τοποθετείται στο σωλήνα εξόδου του λαδιού κοντά στο μετασχηματιστή. Ο προσδιορισμός της ανύψωσης του άνω στρώματος λαδιού γίνεται με αφαίρεση της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσω της θερμοκρασία του άνω στρώματος λαδιού που μετρήθηκε. Κατά τη βραχυκύκλωση έχουμε μηδενισμό των απωλειών σιδήρου, λόγω ελάχιστης επαγωγής. Για τη μέτρηση όμως, της θερμοκρασίας του λαδιού απαιτούνται οι συνολικές απώλειες ($P_{cu} + P_o$), με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε ουσιαστικά στην παραγωγή απωλειών σιδήρου από τα τυλίγματα, με συνακόλουθη αύξηση του ρεύματος και της τάσης τροφοδότησης.

$$I_{o\lambda} = I_N * \frac{P_{cu} + P_o}{P_{cu}} = k * I_N \text{ (Σχέση 93)}$$

$$U_{o\lambda} = k * U_k \text{ (Σχέση 94)}$$

Όπου: $I_{o\lambda}$ = ρεύμα βραχυκύκλωσης

I_N = ονομαστικό ρεύμα

$U_{o\lambda}$ = τάση τροφοδοσίας

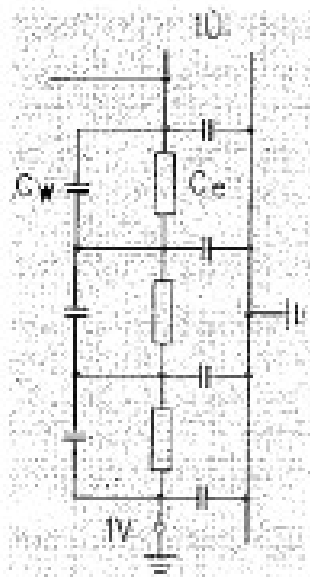
U_k = τάση βραχυκύκλωσης

10.3.4 Δοκιμή κρουστικής τάσης

Οι Μ/Σ ισχύος δέχονται σε διάφορες στιγμές μέσα στη διάρκεια ζωής τους υπερτάσεις, που προκαλούν σοβαρότατη καταπόνηση στα μονωτικά τους υλικά. Τα κύρια αίτια δημιουργίας υπερτάσεων είναι δύο: οι φυσικές υπερτάσεις που δημιουργούνται από πτώσεις κεραυνών στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι υπερτάσεις που προκαλούνται από χειρισμούς των διακοπών. Στη πρώτη περίπτωση δημιουργείται ένα μη περιοδικό κύμα, το οποίο οδεύει από το σημείο πρόσπτωσης του στο δίκτυο προς το σημείο γείωσης.

Το κύμα αυτό αποτελείται από ένα μέτωπο λίγων μs και μια ουρά της τάξης των 100 μs πριν την απόσβεσή του. Για να αποτραπούν οι σοβαρότερες βλάβες που είναι δυνατόν να προκαλέσει ένας κεραυνός, χρησιμοποιούνται

διατάξεις όπως τα αλεξικέραυνα και οι κοίλες ακίδες. Για τις δοκιμές των Μ/Σ στις κρουστικές τάσεις χρησιμοποιείται το πρότυπο IEC 60076-3/2000. Όπως είναι γνωστό κάθε τυλίγμα του Μ/Σ, εκτός από τη δεδομένη επαγωγικότητά του, παρουσιάζει και χωρητικότητες C_w μεταξύ των σπειρών του, αλλά και χωρητικότητες C_e μεταξύ των σπειρών και γειωμένων μερών.



Σχήμα 42: Ισοδύναμο κύκλωμα τυλίγματος μετασχηματιστή

Το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος ρέει προς τις χωρητικότητες C_w και C_e . Το μέρος αυτό είναι τόσο μεγαλύτερο όσο πιο απότομο είναι το μέτωπο της κρουστικής τάσης, η οποία προσδιορίζεται από τις παραπάνω χωρητικότητες, με τη μεταξύ τους σχέση:

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_e}{C_w}} \quad (\text{Σχέση 95})$$

να χαρακτηρίζεται σαν μέτρο μεταφοράς.

Η επιβάρυνση των μονώσεων του τυλίγματος αυξάνεται αναλογικά με το μέγεθος της χωρητικότητας γης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11°

«ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΣΕ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥΣ»

11.1 Υποσταθμός καταναλωτή μέσης τάσης

Με τον όρο υποσταθμός καταναλωτή μέσης τάσης ή απλά ΥΣ. εννοούμε το σύνολο του εξοπλισμού που έχει σαν στόχο τον ασφαλή υποβιβασμό της Μέσης Τάσης (20 kV) σε Χαμηλή Τάση (400 V). Χαμηλή Τάση χαρακτηρίζεται η τάση που είναι μικρότερη από 1000 V. Μέση Τάση χαρακτηρίζεται η τάση που είναι μεγαλύτερη από 1000 V και μικρότερη από 30.000 V. Στην Ελλάδα, αλλά και σε όλη την Ευρώπη, η χαμηλή τάση που χρησιμοποιείται είναι η τάση 400/230 V. Η τροφοδότηση ενός καταναλωτή από το δίκτυο της μέσης τάσης γίνεται όταν η απαίτηση ισχύος ξεπερνά τα 135kVA. Σε κάποιες περιπτώσεις η σύνδεση με τη μέση τάση επιβάλλεται από τη ΔΕΗ για τεχνικούς λόγους ή μπορεί να συμφέρει οικονομικά λόγω τιμολογίου. Τα δίκτυα ΜΤ στην Ελλάδα μπορεί να έχουν τάση 6,6kV, 15 kV, 20 kV, ή 22 kV. Σχεδιάζεται όμως όλα τα δίκτυα μέσης τάσης να μετατραπούν σε δίκτυα των 20 kV.

11.2 Εγκατάσταση της ΔΕΗ

Ειδικά διαμορφωμένος χώρος για τον πίνακα ΜΤ της ΔΕΗ, σε περίπτωση υπόγειας παροχής. Στις εναέριες παροχές ΜΤ το καλώδιο της ΔΕΗ τερματίζει σε στύλο. Σε κάθε περίπτωση η ΔΕΗ εγκαθιστά μέσα προστασίας της παροχής από βραχυκυκλώματα και διατάξεις μέτρησης ισχύος και ενέργειας.

11.3 Εγκατάσταση καταναλωτή μέσης τάσης

Η εγκατάσταση του καταναλωτή είναι συνήθως στεγασμένη και αποτελείται από:

- τον πίνακα ΜΤ
- τον Μ/Σ ισχύος
- το γενικό πίνακα διανομής ΧΤ
- τους ζυγούς χαμηλής και μέσης τάσης
- τα καλώδια χαμηλής και μέσης τάσης
- την εγκατάσταση γείωσης και
- τα όργανα μέτρησης και αυτοματισμού

11.3.1 Πίνακας Μέσης Τάσης (20KV)

Στον πίνακα 20 kV έρχεται το καλώδιο από το δίκτυο της ΔΕΗ και αναχωρεί το καλώδιο προς το Μ/Σ . Αν ο υποσταθμός έχει και δεύτερο Μ/Σ τότε για καθένα απ' αυτούς υπάρχει ξεχωριστή γραμμή από τον πίνακα 20 kV. Κάθε Μ/Σ προστατεύεται με ασφάλειες σκόνης ή διακόπτη ισχύος με ηλεκτρονόμους προστασίας.

11.3.2 Γενικός Πίνακας Διανομής Χαμηλής Τάσης (400V)

Ανάλογα με το μέγεθος και το είδος της εγκατάστασης ο Γενικός Πίνακας ΧΤ διαμορφώνεται ανάλογα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ένας γενικός πίνακας χαμηλής τάσης, αποτελείται από το κεντρικό πεδίο εισόδου, τα πεδία αναχωρήσεων προς τα φορτία και το πεδίο αντιστάθμισης. Στο γενικό πίνακα 400 V έρχεται το ρεύμα χαμηλής τάσης με τη βοήθεια καλωδίων ή εγκιβωτισμένων ζυγών, αν το ρεύμα είναι πολύ μεγάλο (> 2000 A). Στην άφιξη του πίνακα υπάρχει ένας διακόπτης ισχύος με θερμική και μαγνητική προστασία. Οι αναχωρήσεις προστατεύονται με διακόπτες ισχύος ή τηκτές ασφάλειες και τροφοδοτούν τους πίνακες διανομής 400/230 V που υπάρχουν στην εγκατάσταση του καταναλωτή. Όταν ο Υ/Σ έχει δύο Μ/Σ τότε ο Πίνακας 400 V διαθέτει δύο αφίξεις (εισόδους) και οι ζυγοί του χωρίζονται σε δύο μέρη. Τα δύο μέρη των ζυγών συνδέονται με διακόπτη ισχύος.

11.3.3 Ζυγοί – Καλώδια

Για την επιλογή των ζυγών και των καλωδίων του ΥΣ πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω:

- Ικανότητα θερμικής φόρτισης στη στάσιμη κατάσταση (ονομαστική ένταση)
- Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμική φόρτιση (υπερφόρτωση/βραχυκύκλωμα)
- Μηχανική αντοχή
- Τάση και συχνότητα δικτύου
- Υλικό αγωγών και μόνωσης

11.3.4 Γείωση Υποσταθμού

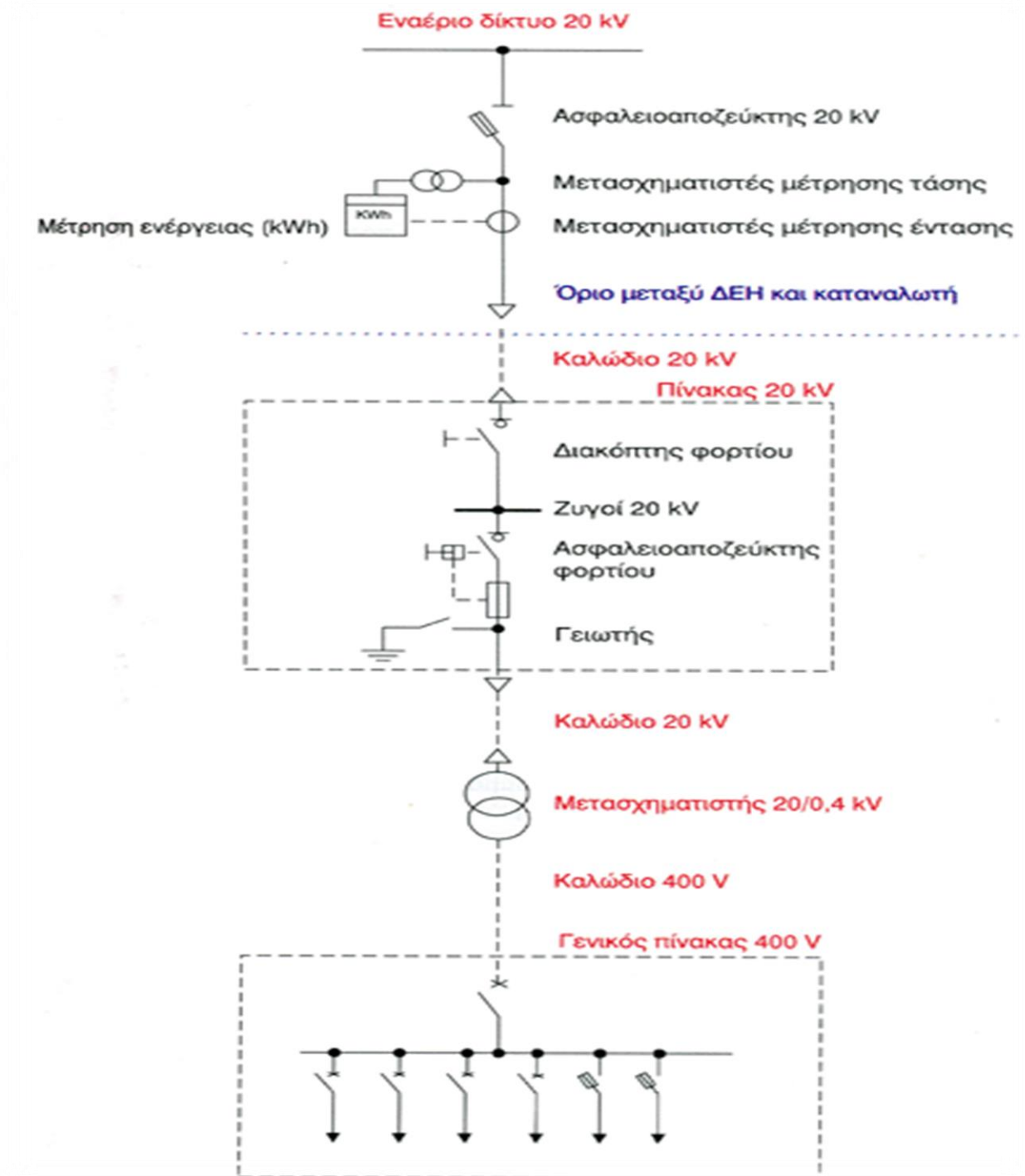
Η αντίσταση γείωσης του Υ/Σ του καταναλωτή πρέπει να είναι μικρής τιμής για να εξασφαλίζει το προσωπικό από επικίνδυνες τάσεις επαφής. Για το λόγο αυτό συνιστάται / επιβάλλεται η κατασκευή θεμελιακής γείωσης (βλέπε ΦΕΚ 1525/B-15/31.12.73).

Η κατασκευή της γείωσης πρέπει να είναι σύμφωνη με τους Κανονισμούς Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων. Αν η αντίσταση γείωσης είναι:

- Μικρότερη του 1Ω, τότε συνιστάται στη γείωση αυτή να συνδέσει ο καταναλωτής και τον ουδέτερο της εσωτερικής του εγκατάστασης Χ.Τ.
- Μεγαλύτερη από 1Ω, τότε πρέπει να διαχωρίζεται η γείωση ουδέτερου της εσωτερικής εγκατάστασης Χ.Τ. από τη γείωση των μεταλλικών μερών του Υ/Σ. Σ' αυτή την περίπτωση ο καταναλωτής υποχρεούται να δημιουργήσει ισοδυναμικές επιφάνειες στον Υ/Σ του.

Ειδικά στο χώρο που διαθέτει ο πελάτης στη ΔΕΗ, αλλά και σε όλους τους χώρους της μέσης τάσης, πρέπει να κατασκευάζεται ισοδυναμικό πλέγμα σε όλη την επιφάνεια των χώρων για την αποφυγή βηματικών τάσεων. Ο καταναλωτής πρέπει να φέρει στο χώρο άφιξης ΔΕΗ (παροχή Β) ή στη θέση του τερματικού σύλου (παροχή τύπου Α), αγωγό χάλκινο διατομής τουλάχιστον 50mmCu για τη γείωση και των μεταλλικών μερών των συσκευών που εγκαθιστά η ΔΕΗ. Συνήθης τεχνική για την ισοδυναμική σύνδεση των μεταλλικών του ΥΣ, είναι η εγκατάσταση λάμα γείωσης περιμετρικά στους χώρους και η σύνδεση σ'αυτήν όλων των μεταλλικών μερών. Δε συνιστάται η εκ προθέσεως γείωση της πόρτας εισόδου.

Παρακάτω, στα σχήματα 43 και 44 ακολουθούν διατάξεις, όπως το μονογραμμικό διάγραμμα ενός υποσταθμού αλλά και η διάταξη στο χώρο ενός πραγματικού ΥΣ. μέσης τάσης, που παρουσιάζουν τη λειτουργικότητα και την αναγκαιότητα χρήσης των Μ/Σ στους ΥΣ.



Σχήμα 43: Μονογραμμικό διάγραμμα υποσταθμού

Στη μέση τάση εντάσσονται εγκαταστάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος, με ονομαστική πολική τάση 1000 V και έως 35 kV τριφασικού συστήματος ή άνω των 1400 V και έως 50 kV ονομαστικής τάσης συνεχούς ρεύματος. Η τροφοδότηση ενός καταναλωτή γίνεται συνήθως από το δίκτυο μέσης τάσης αν ο καταναλωτής έχει προβλεπόμενη ισχύ μεγαλύτερη από 135 kVA. Ακόμα όμως και σε μικρότερες ισχύς, η σύνδεση με την μέση τάση μπορεί να

επιβάλλεται από τη ΔΕΗ για τεχνικούς λόγους ή αν συμφέρει οικονομικά λόγω τιμολογίου.



Σχήμα 44: Υποσταθμός μέσης τάσης, (1) Πίνακας μέσης τάσης, (2) Μ/Σ ισχύος, (3) Γενικός Πίνακας διανομής χαμηλής τάσης

11.4 Μετασχηματιστές Ισχύος (20/0.4KV)

Ο Μ/Σ ισχύος υποβιβάζει την τάση των 20 kV σε τάση διανομής 400 V για τα φορτία του καταναλωτή. Το πρωτεύον τύλιγμά του είναι σε τρίγωνο (Δ) και το δευτερεύον τύλιγμά του σε αστέρα (Y) με γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο. Η επιλογή του κατάλληλου ΜΣ ισχύος για μια εγκατάσταση πρέπει να προσδιορίζεται:

- Από την προβλεπόμενη μέγιστη ζήτηση μετά από ένα χρονικό διάστημα (πχ 10 χρόνια)
- Από τη χρήση του και άρα τις αναμενόμενες απώλειες
- Από το διαθέσιμο χώρο στο κτίριο (αν πρόκειται για υπάρχον κτίριο)
- Από την τάση του δικτύου Μ/Τ της ΔΕΗ
- Από την ανάγκη ύπαρξης εφεδρικού ΜΣ

Σύμφωνα με τη ΔΕΗ, ο Μ/Σ ισχύος του καταναλωτή πρέπει να πληροί τα παρακάτω:

- Η συνδεσμολογία των ΜΣ ισχύος πρέπει να είναι τρίγωνο-αστέρα (Dyn11 ή Dyn5) ή αστέρας-τεθλασμένος αστέρας. Άλλες συνδεσμολογίες μπορεί να γίνουν αποδεκτές μετά από συνεννόηση με τη ΔΕΗ.
- Στην περίπτωση που ο ΜΣ έχει ουδέτερο κόμβο στην πλευρά ΜΤ απαγορεύεται η γείωση του.
- Για τους ΥΣ που θα συνδεθούν εξ' αρχής στο δίκτυο 20kV συνιστάται οι ΜΣ ισχύος τους να έχουν λήψεις στο τύλιγμα ΜΤ: $\pm 2,5$ και ± 5 % της ονομαστικής τάσης, δηλαδή λήψεις για τάσεις: 19 - 19,5 - 20 - 20,5 - 21 / 0,4 kV.
- Για τους ΥΣ που θα τροφοδοτηθούν από την αρχή από το δίκτυο 6,6 KV συνιστάται οι ΜΣ ισχύος να είναι κατάλληλοι να λειτουργήσουν και στην τάση των 20 kV, δηλαδή να έχουν λήψεις: [6-6,15 - 6,3 - 6,45 - 6,6] / 0,4kV

11.5 Μετασχηματιστής ξηρού τύπου

Οι Μ/Σ ξηρού τύπου κατασκευάζονται σύμφωνα με τα πρότυπα DIN42523 και τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά περιγράφονται στα πρότυπα DIN-VDE 57532 και IEC76.

- Προτιμώνται σε περιπτώσεις με περιορισμένο χώρο εγκατάστασης.
- Για την προστασία τους από υπερφόρτωση απαιτείται η παρακολούθηση της θερμοκρασίας του χώρου και των τυλιγμάτων του Μ/Σ με θερμίστορ και τη λειτουργία κατάλληλου αυτοματισμού ψύξης και ειδοποίησης.

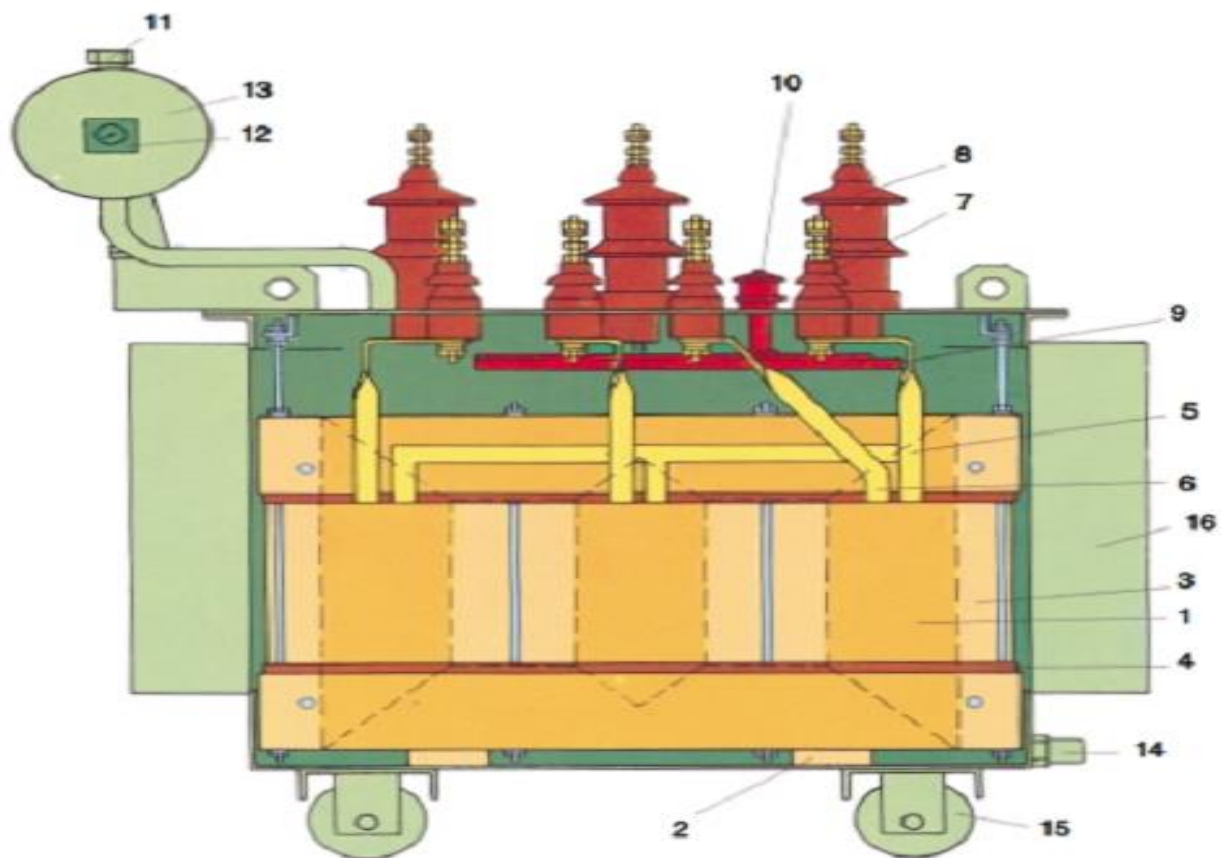
11.6 Μετασχηματιστής ελαίου

- Οι Μ/Σ ελαίου κατασκευάζονται σύμφωνα με τα πρότυπα DIN42500 και τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά περιγράφονται στα πρότυπα DIN-VDE 57532 και IEC76.
- Η εγκατάσταση τέτοιων ΜΣ είναι πιο πολύπλοκη, καθώς απαιτούν την κατασκευή ελαιολεκάνης, για την συγκέντρωση του λαδιού σε περίπτωση διαρροής.
- Για την προστασία των ΜΣ ελαίου από υπερφόρτωση απαιτείται η παρακολούθηση της θερμοκρασίας (μέσω θερμομέτρου-θερμοστάτη) του λαδιού και του χώρου εγκατάστασης. Επιπλέον πρέπει να ελέγχεται η στάθμη του λαδιού του ΜΣ και η ύπαρξη αερίων (μέσω ηλεκτρονόμου Buchholz). Οι έλεγχοι αυτοί προϋποθέτουν και τη λειτουργία κατάλληλου αυτοματισμού για την ψύξη και την τηλε-ειδοποίηση.

Στο σχήμα 45 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένας Μ/Σ λαδιού μιας εταιρείας και όλα τα μέρη από τα οποία αυτός αποτελείται:



**Σχήμα 45: α) Μετασχηματιστής διανομής λαδιού
β) Αναλυτικά όλα τα επιμέρους τμήματα ενός μετασχηματιστή λαδιού**



- 1. ΠΥΡΗΝΑΣ (Core):** Κατασκευάζεται από ειδικά σιδερένια ελάσματα που μεταξύ τους είναι μονωμένα για να ελαττώσουμε τις μαγνητικές απώλειες. Ο πυρήνας έχει τρία σκέλη, ένα για κάθε φάση.
- 2. ΣΤΗΡΙΓΜΑΤΑ ΠΥΡΗΝΑ (Coresupport):** Μεταξύ του πυθμένα του δοχείου και του πυρήνα μεσολαβεί κάποια απόσταση για να μπορεί να κυκλοφορεί το λάδι.
- 3. ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ (Winding):** Σε κάθε σκέλος του πυρήνα υπάρχουν δύο τυλίγματα, της ΧΤ και εξωτερικά το τυλίγμα της ΜΤ. Το τυλίγμα ΧΤ είναι κατασκευασμένο από χάλκινες ή αλουμιένιες μπάρες, ενώ το τυλίγμα της ΜΤ είναι από χάλκινο σύρμα.
- 4. ΣΤΗΡΙΓΜΑΤΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ (Windingsupport):** Η στερέωση των τυλιγμάτων ΧΤ και ΜΤ τόσο μεταξύ τους όσο και πιο πάνω στον πυρήνα είναι πολύ κρίσιμη και γίνεται με μονωτικά στηρίγματα.
- 5.** Τα τρία άκρα των τυλιγμάτων ΧΤ γεφυρώνονται με χάλκινη μπάρα και δημιουργείται ο ουδέτερος κόμβος. Ο ουδέτερος συνδέεται στο κάτω μέρος του μονωτήρα διέλευσης και προκύπτει έτσι ο ακροδέκτης του ουδετέρου.
- 6.** Τα τρία άλλα άκρα των τυλιγμάτων ΧΤ συνδέονται στους μονωτήρες διέλευσης και προκύπτουν οι ακροδέκτες 2U, 2V και 2W.
- 7. ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΧΤ (LVBushing)** από πορσελάνη: Ονομάζονται μονωτήρες διέλευσης διότι από μέσα τους διέρχεται το ρεύμα ΧΤ. Στον ένα τους ακροδέκτη που είναι μέσα στο λάδι συνδέονται οι απολήξεις των τυλιγμάτων ΧΤ. Στον άλλο τους ακροδέκτη, που είναι στον αέρα, συνδέονται τα καλώδια ΧΤ που αναχωρούν από το Μ/Σ.
- 8. ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ ΜΤ (MVBushing)** από πορσελάνη: Στον ένα τους ακροδέκτη, που είναι μέσα στο λάδι, συνδέονται οι απολήξεις των τυλιγμάτων ΜΤ. Στον άλλον τους ακροδέκτη, που είναι στον αέρα, συνδέονται τα καλώδια ΜΤ που έρχονται από την κυψέλη προστασίας του Μ/Σ.
- 9. ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΤΑΣΗΣ (Off-circuit tap changer):** Τα τυλίγματα ΜΤ έχουν ενδιάμεσα λήψεις που καταλήγουν σε ένα περιστροφικό διακόπτη. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα διαφορετικών λήψεων, δηλαδή να χρησιμοποιούμε περισσότερες ή λιγότερες σπείρες στο πρωτεύον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή του λόγου των σπειρών του Μ/Σ και συνεπώς, τη ρύθμιση της τάσης του δευτερεύοντος. Η ρύθμιση αυτή γίνεται όταν ο Μ/Σ είναι εκτός κυκλώματος ((Off-circuit))
- 10. ΧΕΙΡΙΣΤΗΡΙΟ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ**
- 11. ΔΟΧΕΙΟ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ (Expansion vessel):** Η θερμοκρασία του λαδιού σε κανονική λειτουργία του Μ/Σ φτάνει τους 100 βαθμούς Κελσίου με αποτέλεσμα τη διαστολή του. Το δοχείο διαστολής συνδέεται με σωλήνα με το δοχείο του Μ/Σ και όσο η θερμοκρασία του λαδιού ανεβαίνει, ανεβαίνει η στάθμη του λαδιού, διώχνοντας τον αέρα που βρίσκεται στο πάνω μέρος του δοχείου. Το αντίθετο συμβαίνει όταν η θερμοκρασία του λαδιού κατεβαίνει. Σήμερα κατασκευάζονται στεγανοί Μ/Σ λαδιού, με ειδικά σχεδιασμένα πτερύγια ψύξης που παίρνουν τις διαστολές του λαδιού και συνεπώς δεν χρειάζονται δοχείο διαστολής. Οι στεγανοί (sealed tank) Μ/Σ δεν χρειάζονται συντήρηση, διότι το λάδι δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα και έτσι δεν αλλοιώνεται.
- 12. ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΛΑΔΙΟΥ (oil-level indicator):** Μας δείχνει τη στάθμη του λαδιού στο δοχείο διαστολής.
- 13. ΤΑΠΑ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΛΗΡΩΣΗΣ ΜΕ ΛΑΔΙ (ventilation and filling cap):** Από εδώ εξέρχεται ο αέρας που υπάρχει στο

δοχείο διαστολής όταν θερμαίνεται το λάδι του Μ/Σ.

- 14. ΒΑΝΑ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ ΤΟΥ ΛΑΔΙΟΥ**(drain plug): Από εδώ γίνεται η εκκένωση του λαδιού.
- 15. ΤΡΟΧΟΙ ΚΥΛΗΣΗΣ** (Roller): Η μετακίνηση του Μ/Σ μέχρι την τελική του θέση γίνεται με κύλιση στους τέσσερις τροχούς του.
- 16. ΨΥΚΤΗΡΕΣ** (cooling ribs): Μοιάζουν με τις φέτες των θερμαντικών σωμάτων ακτινοβολίας και χρησιμεύουν για τη φυσική ψύξη του λαδιού.

Συντομογραφίες:

Μ/Σ: Μετασχηματιστής

ΑΜΣ: Αυτομετασχηματιστής

ΥΤ: Υψηλή τάση

ΜΤ: Μέση τάση

ΧΤ: Χαμηλή τάση

ΥΣ.: Υποσταθμός

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Συμεών, «Συστήματα Οδήγησης Ηλεκτρικών Κινητήρων», Π.Μαλατέστας
2. Τζιόλα , «Ηλεκτρική Κίνηση», Π.Μαλατέστας
3. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας - «Μελέτη μετασχηματιστών», Παύλος Ε. Ραΐσιος
4. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, «Η Σημασία του Υποσταθμού, Τύποι Υποσταθμών, Μονογραμμικά Διαγράμματα Υποσταθμών (1996)», Β. Σαμοίλης
5. «Μετασχηματιστές Ξηρού Τύπου Μέσης Τάσης» (1996), Ι. Στρουμπουλής
6. «Μετασχηματιστές Ελαίου Μέσης Τάσης» (1996), Δ. Σπηλιόπουλος
7. «Μετασχηματιστές και Στοιχεία Υποσταθμών 150 KV» (1996), Χ. Βούρδας - Α. Βρίγγας
8. «Μετασχηματιστές» (1991), Δ. Σπηλιόπουλος
9. Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών (2006), «Ειδικά κεφάλαια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας», Μέρος Α, Δ. Τσανάκας
10. «Μελέτη Υποσταθμού» (1991), Ι. Σαββόπουλος
11. «Μελέτη του Υποσταθμού Μέσης Τάσης» (1995) , Π. Μπούρκας
12. «Έλεγχος - Δοκιμές Υλικών Υποσταθμών» (1991), Π. Παπαβασιλόπουλος
13. «Βοηθητικά Κυκλώματα και Χώρος Υποσταθμού» (1996), Θ. Σταθόπουλος
14. Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις, «Μετασχηματιστές και Ηλεκτρικές Μηχανές», Gregor Haberle, Heinz Haberle
15. «Έλεγχος - Δοκιμές Υλικών Υποσταθμών» (1991),
16. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1988, «*Electronic Devices*», M. Sanderson

- 17.** Τζιόλα Θεσ/νίκη 2003, «Ηλεκτρικές Μηχανές», Stephen J.Charman
- 18.** Ίων, «Μετασχηματιστές – Λειτουργία σε κενό και με φορτίο, ισχύς, απόδοση, παράλληλη λειτουργία, εφαρμογές, υπολογισμοί κατασκευή», Σ. Αντωνόπουλος