

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

- 1.2.1** Χαρακτηριστικά μεγέθη του μετασχηματιστή ισχύος
- 1.2.2** Πως είναι κατασκευασμένος ο μετασχηματιστής με μόνωση λαδιού
- 1.2.3** Πως είναι κατασκευασμένος ο μετασχηματιστής ξηρού τύπου με μόνωση χυτο-ρητίνης
- 1.2.4** Συνδεσμολογία τυλιγμάτων του μετασχηματιστή ισχύος
- 1.2.5** Απώλειες χαλκού και σιδήρου
- 1.2.6** Προστασία μετασχηματιστή ισχύος από υπερφόρτιση
- 1.2.7** Προστασία μετασχηματιστή λαδιού από εσωτερικά σφάλματα
- 1.2.8** Διαφορική προστασία μετασχηματιστή ισχύος
- 1.2.9** Επιλεκτική προστασία μεταξύ των οργάνων προστασίας στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή
- 1.2.10** Εγκατάσταση και ψύξη του μετασχηματιστή ισχύος



Διδακτικοί στόχοι

Στο τέλος αυτής της ενότητας, οι μαθητές θα πρέπει να είναι σε θέση:

- ☞ να διατυπώνουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του Μετασχηματιστή (Μ/Σ) Ισχύος.
- ☞ να αναφέρουν τα βασικά μέρη ενός Μετασχηματιστή με μόνωση λαδιού.
- ☞ να απαριθμούν τα βασικά μέρη ενός Μετασχηματιστή με μόνωση ρητίνης.
- ☞ να ξεχωρίζουν τους περιορισμούς του Μ/Σ λαδιού σε αντιδιαστολή με τον Μ/Σ ξηρού τύπου.
- ☞ να αναφέρουν το τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων των τριφασικών Μ/Σ ισχύος.
- ☞ να αναφέρουν και να ερμηνεύουν τα δύο είδη απωλειών που συναντάμε στους Μ/Σ.
- ☞ να περιγράφουν την προστασία του Μ/Σ από υπερφόρτιση.
- ☞ να περιγράφουν την προστασία του Μ/Σ από εσωτερικά σφάλματα.
- ☞ να περιγράφουν την επιλεκτική συνεργασία των οργάνων προστασίας του Μ/Σ.
- ☞ να διατυπώνουν την ανάγκη και τον τρόπο φυσικού αερισμού του χώρου που βρίσκεται ο Μ/Σ.

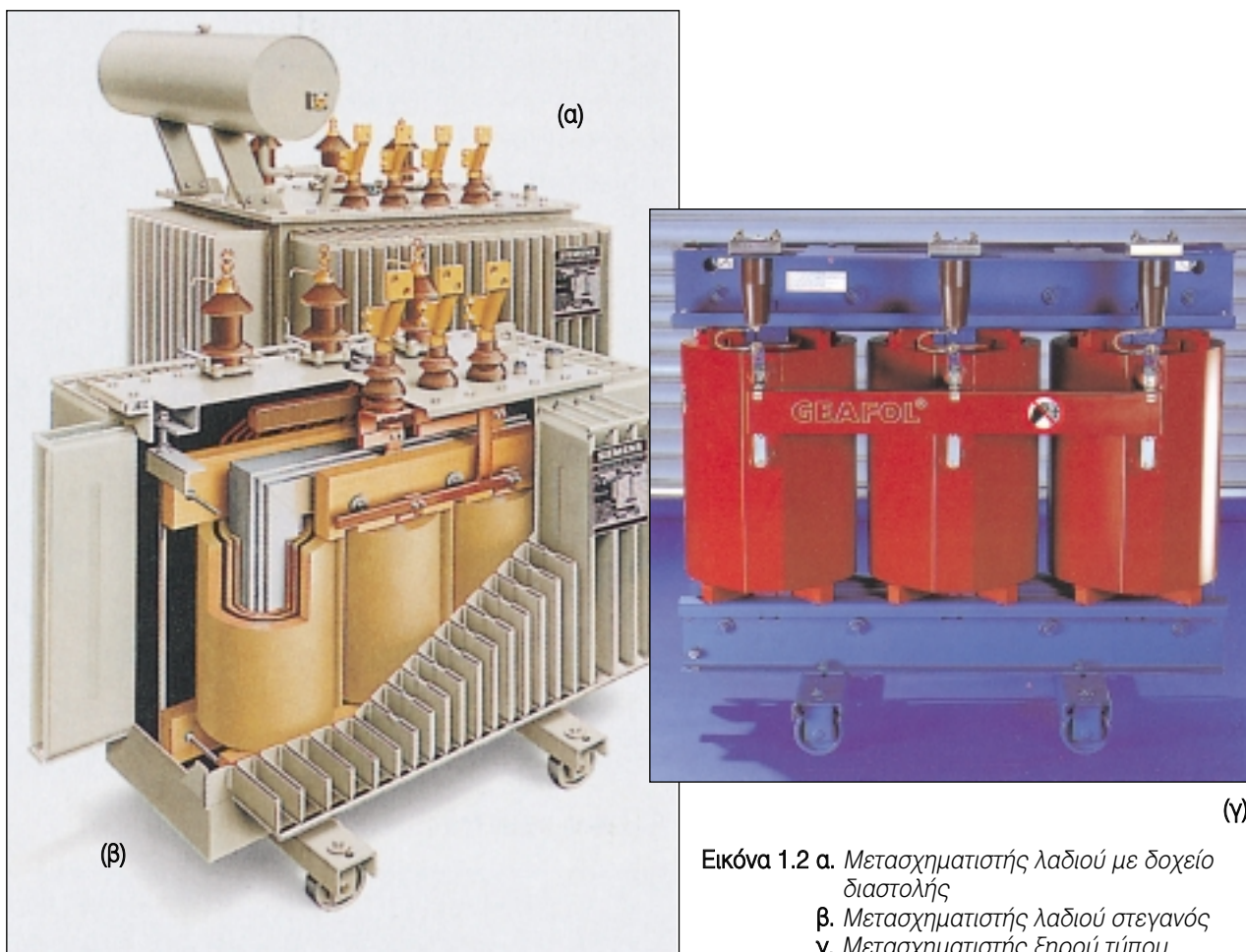
1.2 Μετασχηματιστής ισχύος

Ο μετασχηματιστής ισχύος (power transformer) ή απλά μετασχηματιστής (Μ/Σ) είναι η βασική συσκευή κάθε υποσταθμού μέσης τάσης, διότι υποβιβάζει την τάση μεταφοράς των 20 kV σε τάση διανομής 400 V.

Οι Μ/Σ ισχύος είναι συνήθως ελαιόψυκτοι (Εικόνα 1.2α και 1.2β), εκτός αν έχουμε ειδικές συνθήκες περιβάλλοντος, π.χ εύφλεκτα υλικά και κίνδυνο πυρκαγιάς. Στις περιπτώσεις αυτές επιλέγονται Μ/Σ ξηρού τύπου με μόνωση από χυτορητίνη (Εικόνα 1.2γ).

Σε υποσταθμούς με ζητούμενη ισχύ > 600 kVA έχουμε κατά κανόνα δύο Μ/Σ για λόγους ασφαλείας. Σε περίπτωση σφάλματος στον ένα Μ/Σ, αναλαμβάνει ο δεύτερος Μ/Σ να καλύψει το συνολικό φορτίο για όσο χρόνο διαρκέσει η επισκευή του πρώτου Μ/Σ.

Δύο Μ/Σ συναντάμε και σε υποσταθμούς - ανεξάρτητα από την εγκατεστημένη ισχύ - που τροφοδοτούν κρίσιμα φορτία όπως, νοσοκομεία, αεροδρόμια κ.ά.



Εικόνα 1.2 α. Μετασχηματιστής λαδιού με δοχείο διαστολής

β. Μετασχηματιστής λαδιού στεγανός

γ. Μετασχηματιστής ξηρού τύπου

1.2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη του Μετασχηματιστή ισχύος

Ονομαστική Ισχύς, θερμοκρασίες λειτουργίας, επιτρεπόμενη φόρτιση

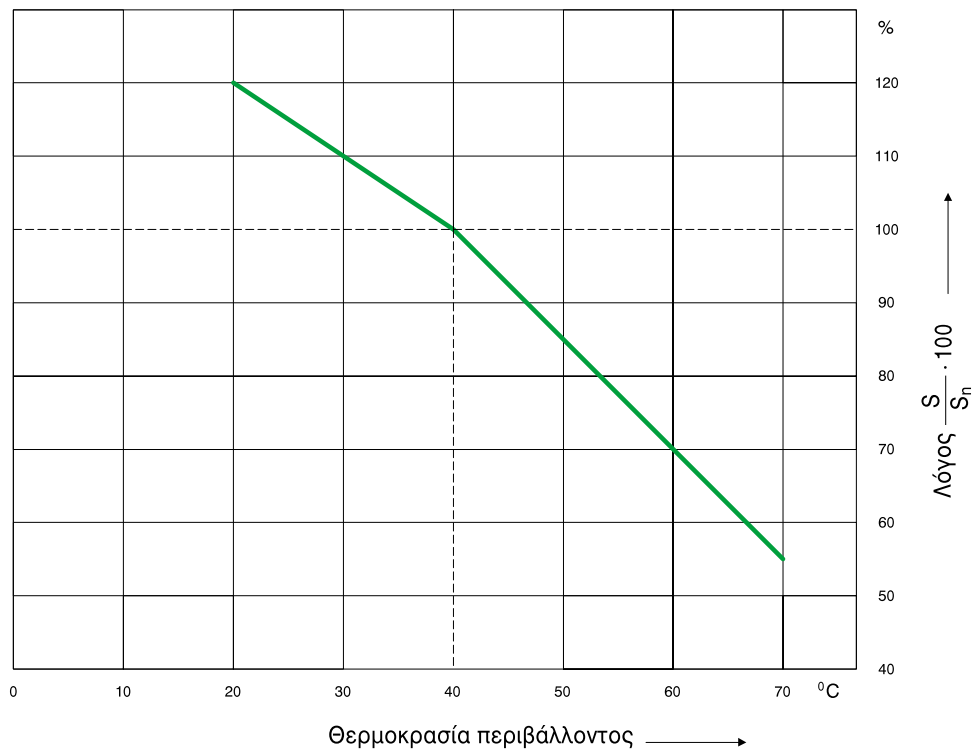
Το μέγεθος του Μ/Σ προσδιορίζεται από την προβλεπόμενη μέγιστη ζήτηση ισχύος σε kVA για τα επόμενα πέντε ως δέκα χρόνια από την ημέρα μελέτης-σχεδίασης του υποσταθμού.

Η ονομαστική ισχύς (S_n) των Μ/Σ κυμαίνεται από 25 kVA μέχρι 2500 kVA.

Λέγοντας ονομαστική ισχύ (Rated power) εννοούμε την ισχύ για την οποία έχει κατασκευαστεί ο Μ/Σ να λειτουργεί συνεχώς, εφόσον ισχύουν μια σειρά από συγκεκριμένες συνθήκες, οι κυριότερες των οποίων είναι:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος μικρότερη των 40°C
- Μέση ημερήσια θερμοκρασία μικρότερη των 30°C
- Μέση ετήσια θερμοκρασία μικρότερη των 20°C
- Υψόμετρο της εγκατάστασης μέχρι 1000 m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Αν οι συνθήκες λειτουργίας είναι διαφορετικές, τότε χρησιμοποιείται η επιτρεπόμενη φόρτιση S , η οποία διαφέρει από την ονομαστική S_n . Στην εικόνα 1.2.1 βλέπουμε ότι η ισχύς S μικραίνει όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μεγαλώνει. Αλλά και αντίστροφα, η ισχύς S αυξάνει όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη των 40 °C. Πρακτικά, το χειμώνα με εξωτερική θερμοκρασία 20 °C ένας Μ/Σ ονομαστικής ισχύος $S_n = 400$ kVA μπορεί να φορτιστεί μέχρι και 20% πάνω από την ονομαστική ισχύ, δηλαδή να φθάσει τα 480 kVA. Τις ζεστές ημέρες του καλοκαιριού, όταν η εξωτερική θερμοκρασία φθάνει τους 50 °C, η φόρτιση του Μ/Σ δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει το 85% της ονομαστικής ισχύος, δηλαδή τα 340 kVA.



Εικόνα 1.2.1α Επιτρεπόμενη διαρκής φόρτιση μετασχηματιστών ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος

Τάση βραχυκύκλωσης

Ονομάζουμε τάση βραχυκύκλωσης (u_k) την τάση που πρέπει να εφαρμόσουμε στο πρωτεύον τύλιγμα του Μ/Σ ώστε να έχουμε, με βραχυκυκλωμένο το δευτερεύον, το ονομαστικό ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα. Η τάση αυτή δίνεται ως ποσοστό επί τοις εκατό (%) της ονομαστικής τάσης του πρωτεύοντος, και έτσι έχουμε την ονομαστική τάση

βραχυκύκλωσης (u_k).

Η τάση βραχυκύκλωσης μας επιτρέπει να προσδιορίσουμε την εσωτερική σύνθετη (ωμική + επαγωγική) αντίσταση του Μ/Σ που είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της στάθμης του ρεύματος βραχυκυκλώματος (I_k) στην πλευρά χαμηλής τάσης του Μ/Σ.

Η γνώση της τιμής του ρεύματος βραχυκυκλώματος στην πλευρά χαμηλής τάσης του Μ/Σ είναι πολύ σημαντική, διότι με βάση αυτή την τιμή πρέπει να επιλέξουμε τον εξοπλισμό χαμηλής τάσης (διακόπτες ισχύος κ.λπ.) όσο αφορά την αντοχή του σε βραχυκύκλωμα.

Παράδειγμα

Να υπολογισθεί το ρεύμα βραχυκυκλώματος στο δευτερεύον ενός Μ/Σ 20/0,4 kV ονομαστικής ισχύος $S_n=630$ kVA και με τάση βραχυκύκλωσης $u_k = 4\%$.

Λύση

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος υπολογίζεται από τον τύπο:
$$I_k = \frac{100 \cdot S_n}{1,732 \cdot u_k \cdot U_2}$$

όπου: S_n = Ονομαστική ισχύς Μ/Σ σε kVA

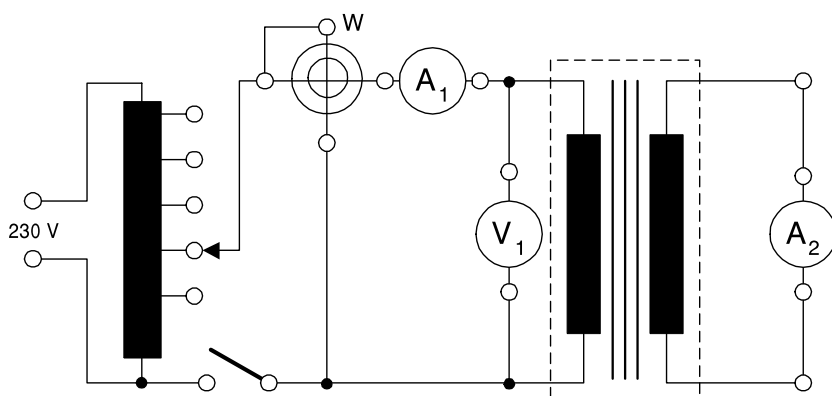
U_2 = Ονομαστική τάση δευτερεύοντος σε kV

u_k = τάση βραχυκύκλωσης σε %

I_k = ρεύμα βραχυκυκλώματος σε kA

Αντικαθιστούμε στον παραπάνω τύπο $S_n = 630$ kVA, $U_2 = 0,4$ kV, $u_k = 4\%$ και έχουμε

$$I_k = \frac{100 \cdot 630}{1,732 \cdot 4 \cdot 230} = 22,8 \text{ kA}$$



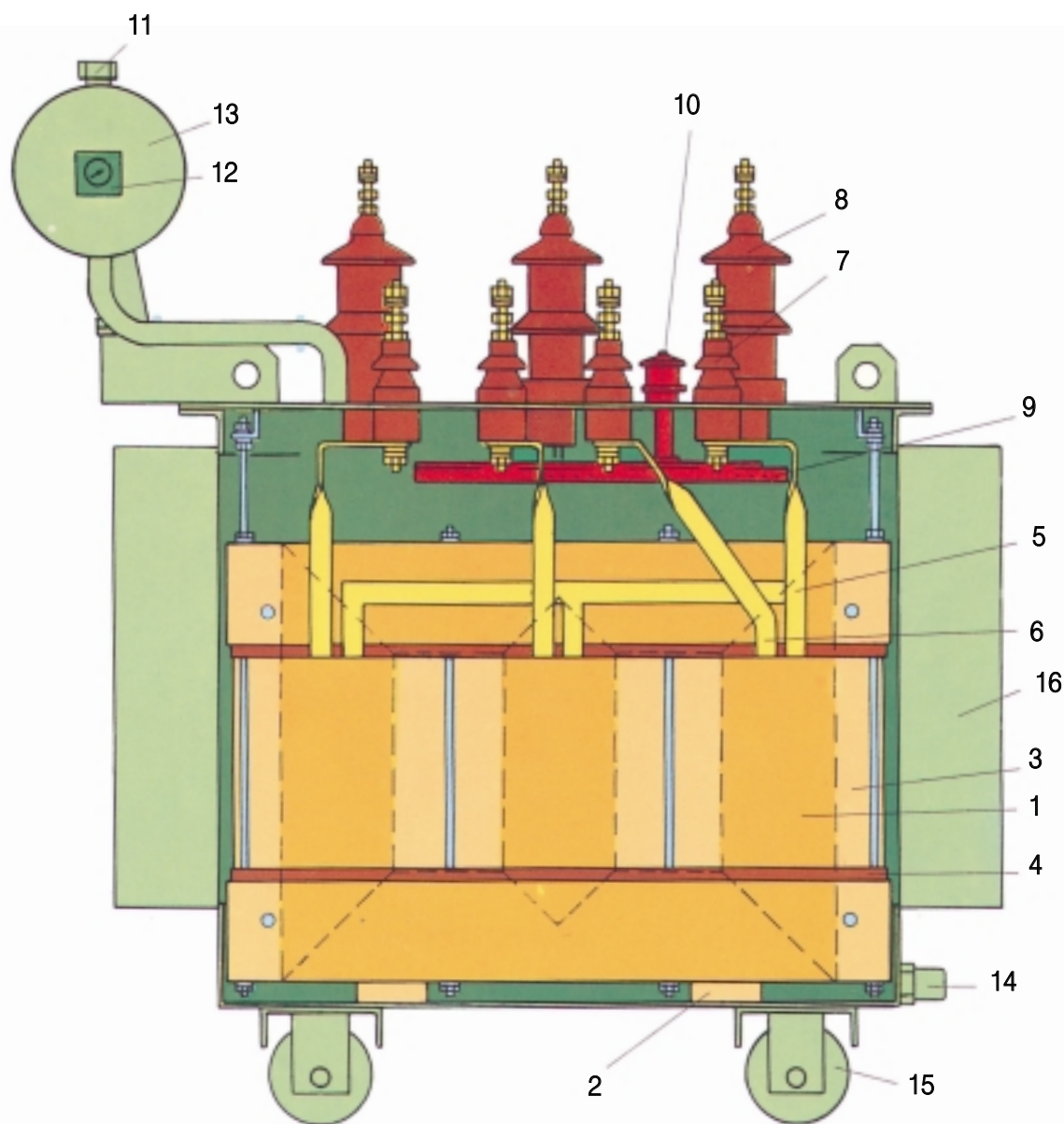
Εικόνα 1.2.1β Το πείραμα για τη μέτρηση της τάσης βραχυκύκλωσης του Μ/Σ

1.2.2 Πως είναι κατασκευασμένος ο μετασχηματιστής (Μ/Σ) με μόνωση λαδιού

Στην Εικόνα 1.2.2 βλέπουμε την τομή ενός τριφασικού Μ/Σ λαδιού. Τα μέρη του μετασχηματιστή έχουν αριθμηθεί από το 1 έως το 16 και αναλύονται παρακάτω.

1. **Πυρήνας (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. **Στηρίγματα πυρήνα (Core support)**. Μεταξύ του πυθμένα του δοχείου και του πυρήνα μεσολαβεί κάποια απόσταση για να μπορεί να κυκλοφορεί το λάδι.
3. **Τυλίγματα (Winding)**. Σε κάθε σκέλος του πυρήνα υπάρχουν δύο τυλίγματα (πηνία). Στο εσωτερικό βρίσκεται το τύλιγμα της χαμηλής τάσης (Χ.Τ.) και εξωτερικά το τύλιγμα της μέσης τάσης. Το τύλιγμα Χ.Τ. είναι κατασκευασμένο από χάλκινες ή αλουμινένιες μπάρες, ενώ το τύλιγμα της Μ.Τ. είναι από χάλκινο σύρμα.
4. **Στηρίγματα τυλιγμάτων (winding support)**. Η στερέωση των τυλιγμάτων Χ.Τ. και Μ.Τ. τόσο μεταξύ τους όσο και πάνω στον πυρήνα είναι πολύ κρίσιμη και γίνεται με μονωτικά στηρίγματα. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, αναπτύσσονται στα τυλίγματα μεγάλες δυνάμεις Laplace που μπορούν να καταστρέψουν το Μ/Σ.
5. Τα τρία άκρα των τυλιγμάτων χαμηλής τάσης γεφυρώνονται με χάλκινη μπάρα και δημιουργείται ο ουδέτερος κόμβος. Ο ουδέτερος συνδέεται στο κάτω μέρος του μονωτήρα διέλευσης και προκύπτει έτσι ο **ακροδέκτης του ουδέτερου (η)**.
6. Τα τρία άλλα άκρα των τυλιγμάτων χαμηλής τάσης συνδέονται στους μονωτήρες διέλευσης και προκύπτουν οι **ακροδέκτες 2U, 2V, 2W**.
7. **Μονωτήρες διέλευσης Χ.Τ. (LV bushing)** από πορσελάνη. Ονομάζονται μονωτήρες διέλευσης διότι από μέσα τους διέρχεται το ρεύμα Χ.Τ. Στον ένα τους ακροδέκτη, που είναι μέσα στο λάδι, συνδέονται οι απολήξεις των τυλιγμάτων Χ.Τ. Στον άλλο τους ακροδέκτη, που είναι στον αέρα, συνδέονται τα καλώδια Χ.Τ. που αναχωρούν από το Μ/Σ.
8. **Μονωτήρες διέλευσης Μ.Τ. (MV bushing)** από πορσελάνη. Στον ένα τους ακροδέκτη, που είναι μέσα στο λάδι, συνδέονται οι απολήξεις των τυλιγμάτων Μ.Τ. Στον άλλο τους ακροδέκτη, που είναι στον αέρα, συνδέονται τα καλώδια Μ.Τ. που έρχονται από την κυψέλη προστασίας του Μ/Σ.
9. **Ρυθμιστής τάσης (off-circuit tap changer)**. Τα τυλίγματα μέσης τάσης 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. **Χειριστήριο ρυθμιστή τάσης**
11. **Δοχείο διαστολής (expansion vessel)**. Η θερμοκρασία του λαδιού σε κανονική λειτουργία του Μ/Σ φτάνει τους 100 °C, 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 διαστο-

Εικόνα 1.2.2 Τομή μετασχηματιστή λαδιού



λής. Οι στεγανοί (sealed tank) Μ/Σ δεν χρειάζονται συντήρηση, διότι το λάδι δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα και έτσι δεν αλλοιώνεται.

12. Δείκτης στάθμης λαδιού (oil-level indicator). Μας δείχνει τη στάθμη του λαδιού στο δοχείο διαστολής.

13. Τάπα αερισμού και πλήρωσης με λάδι (Ventilation and filling cap). Από εδώ εξέρχεται ο αέρας που υπάρχει στο δοχείο διαστολής όταν

θερμαίνεται το λάδι του Μ/Σ.

14. Βάνα αποχέτευσης του λαδιού (Drain plug). Από εδώ γίνεται η εκκένωση του λαδιού.

15. Τροχοί κύλησης (Roller). Η μετακίνηση του Μ/Σ μέχρι την τελική του θέση γίνεται με κύληση στους τέσσερις τροχούς του.

16. Ψυκτήρες (cooling ribs). Μοιάζουν με τις φέτες των θερμαντικών σωμάτων ακτινοβολίας και χρησιμεύουν για τη φυσική ψύξη του λαδιού.

1.2.3 Πως είναι κατασκευασμένος ο μετασχηματιστής ξηρού τύπου με μόνωση χυτο-ρητίνης

Ονομάζονται Μ/Σ ξηρού τύπου (dry-type transformers) διότι δεν έχουν λάδι. Εμφανίστηκαν στην αγορά τη δεκαετία του 1960. Αν και είναι ακριβότεροι από τους αντίστοιχους με λάδι, έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα που πολλές φορές τους κάνουν να είναι τελικά οικονομικότεροι. Δύο από τα σημαντικά τους πλεονεκτήματα είναι:

- Η στερεή μόνωσή τους είναι άκαυστη, σε αντίθεση με το λάδι που είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο. Έτσι δεν απαιτούνται μια σειρά από ειδικές προφυλάξεις όπως ελαιοδεξαμενή, τοίχοι πυράντοχοι, σύστημα πυρόσβεσης κ.ά. που συναντάμε σε Μ/Σ λαδιού.
- Μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιοδήποτε σημείο του κτιρίου σε αντίθεση με τους Μ/Σ λαδιού που πρέπει να εγκαθίστανται στο υπόγειο του κτιρίου ή σε ανεξάρτητα κτίρια. Έτσι τους συναντάμε σε πλοία, σήραγγες, πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου και γενικά όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο Μ/Σ λαδιού.

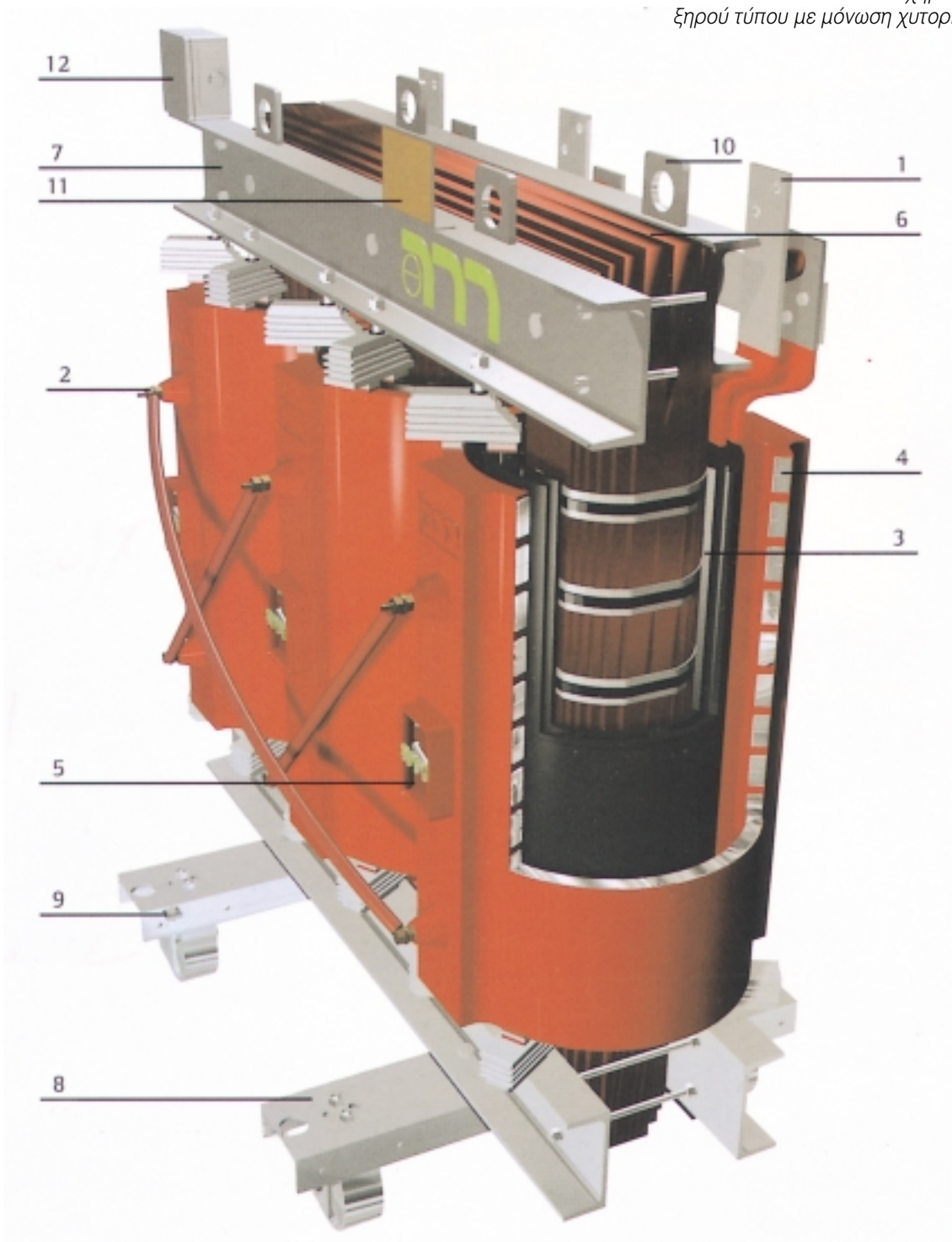
Στην Εικόνα 1.2.3 βλέπουμε την τομή ενός μετασχηματιστή ξηρού τύπου με μόνωση εποξειδικής χυτορητίνης. Τα μέρη του μετασχηματιστή έχουν αριθμηθεί από το 1 έως το 12 και αναλύονται παρακάτω.

- 1. Ακροδέκτες χαμηλής τάσης.** Κάθε ένα από τα τρία τυλίγματα Χ.Τ. καταλήγει σε δύο ακροδέκτες. Οι τρεις ακροδέκτες γεφυρώνονται με αλουμινένια ή χάλκινη μπάρα και προκύπτει ο ακροδέκτης του ουδετέρου. Τα υπόλοιπα τρία άκρα καταλήγουν στους ακροδέκτες Χ.Τ., όπου συνδέονται τα καλώδια των 400 V.
- 2. Ακροδέκτες μέσης τάσης.** Κάθε ένα από τα τρία τυλίγματα Μ.Τ. καταλήγει σε δύο ακροδέκτες. Οι ακροδέκτες γεφυρώνονται χιαστί με μονωμένους αγωγούς για να δημιουργήσουν το τρίγωνο (Δ) των τυλιγμάτων της μέσης τάσης.
- 3. Τύλιγμα χαμηλής τάσης.** Κατασκευάζονται συνήθως από φύλλο αλουμινίου που τυλίγεται σε

μορφή κυλίνδρου. Τα φύλλα μονώνονται μεταξύ τους, ώστε να σχηματίσουν έναν συμπαγή κύλινδρο. Κατόπιν εμποτίζονται με εποξεική ρητίνη και ψήνονται σε ειδικούς φούρνους.

- 4. Τύλιγμα μέσης τάσης.** Κατασκευάζονται συνήθως από φύλλο αλουμινίου που τυλίγεται σε μορφή πηνίου. Κατόπιν χυτεύονται σε καλούπια με χυτορητίνη. Η διαδικασία της χύτευσης αποτελεί το πιο κρίσιμο σημείο στην κατασκευή του Μ/Σ.
- 5. Ρυθμιστής τάσης.** Κάθε τύλιγμα μέσης τάσης έχει ενδιάμεσες λήψεις που καταλήγουν σε ένα κιβώτιο ακροδεκτών στο μπροστινό μέρος κάθε τυλίγματος. 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).
- 6. Πυρήνας (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.
- 7. Σφικτήρες πυρήνα.** Στο πάνω και στο κάτω μέρος του Μ/Σ υπάρχουν σιδερένια δοκάρια που σχηματίζουν το πλαίσιο του Μ/Σ και ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται για τη σύσφιξη των ελασμάτων του πυρήνα.
- 8. Τροχοί κύλησης (Roller).** Η μετακίνηση του Μ/Σ μέχρι την τελική του θέση γίνεται με κύληση στους τέσσερις τροχούς του.
- 9. Ακροδέκτης γείωσης.** Στον ακροδέκτη αυτό γειώνονται όλα τα μεταλλικά μέρη του Μ/Σ (πυρήνας, πλαίσιο κ.λπ.) που δε διαρρέονται από ρεύμα.
- 10. Άγκιστρα ανύψωσης.** Χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του Μ/Σ.

Εικόνα 1.2.3 Μετασχηματιστής ξηρού τύπου με μόνωση χυτορητίνης



11. Πινακίδα. Στην πινακίδα αυτή αναγράφονται τα τεχνικά στοιχεία του Μ/Σ, το εργοστάσιο και το έτος κατασκευής του.

12. Κουτί με ηλεκτρονόμους προστασίας. Στο κου-

τί αυτό καταλήγουν τα καλώδια από τους θερμίστορες που υπάρχουν στα τυλίγματα ΧΤ και μας επιτρέπουν να προστατεύουμε το Μ/Σ από υπερφόρτιση.

1.2.4 Συνδεσμολογία τυλιγμάτων μετασχηματιστή ισχύος

Όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία των τριφασικών εναλασσόμενων ρευμάτων, ένα τριφασικό σύστημα αποτελείται από τρία πηνία που συνδέονται σε τρίγωνο ή αστέρα.

Η εναλλασσόμενη τάση κάθε πηνίου παριστάνεται με ένα διάνυσμα, δηλαδή ένα βέλος.

Στην περίπτωση συνδεσμολογίας τριγώνου, τα διανύσματα των τριών φάσεων σχηματίζουν ένα ισόπλευρο τρίγωνο ή το κεφαλαίο γράμμα Δ .

Στην περίπτωση συνδεσμολογίας αστέρα, τα διανύσματα των τριών φάσεων σχηματίζουν ένα αστέρα ή το κεφαλαίο γράμμα Y .

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η γωνία μεταξύ δύο διαδοχικών διανυσμάτων είναι 120° ή αλλιώς μπορούμε να πούμε, ότι η φασική διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων είναι 120 μοίρες.

Στην περίπτωση του Μ/Σ έχουμε δύο τριφασικά συστήματα, ένα στην πλευρά της μέσης και ένα στην πλευρά της χαμηλής τάσης.

Για να μπορέσουμε να χαρακτηρίσουμε τη συνδεσμολογία κάθε πλευράς του Μ/Σ και ταυτόχρονα και τη φασική διαφορά μεταξύ των δύο πλευρών, χρησιμοποιούμε τα γράμματα D και Y σε συνδυασμό με έναν αριθμό από το 1 ως το 12.

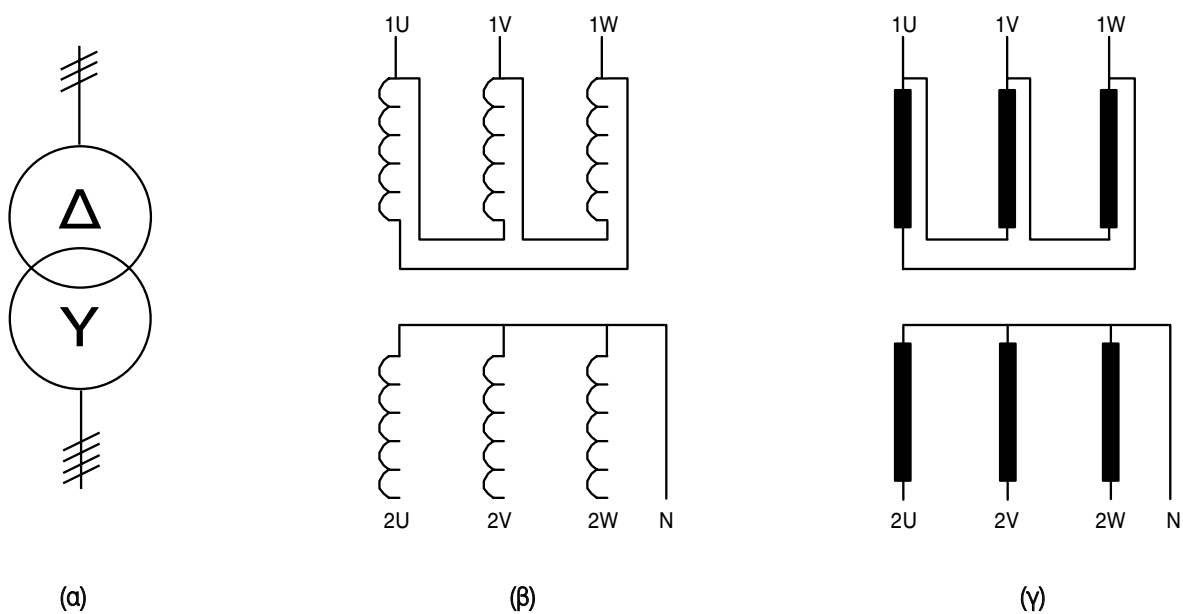
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2.4δ, η συνδεσμολογία των Μ/Σ είναι συνήθως **Dyn5** ή **Dyn11** - (το Dyn5 διαβάζεται δέλτα-ύψιλον-νι-πέντε).

Παρακάτω αναλύεται η σημασία του κάθε γράμματος-αριθμού:

- Το πρώτο κεφαλαίο γράμμα **D** σημαίνει ότι τα τρία τυλίγματα στην πλευρά των 20 kV είναι συνδεδεμένα σε τρίγωνο, δηλαδή σχηματίζουν το γράμμα Δ .
- Το δεύτερο μικρό γράμμα **y** σημαίνει ότι τα τρία τυλίγματα στην πλευρά των 400 V είναι συνδεδεμένα σε αστέρα, δηλαδή σχηματίζουν το γράμμα Y . Για να δηλώσουμε ότι είμαστε στη χαμηλή τάση το γράφουμε μικρό **y**.
- Το τρίτο μικρό γράμμα **n** σημαίνει ότι στην πλευρά χαμηλής τάσης υπάρχει ακροδέκτης ουδέτερου (neutral)
- Ο τέταρτος αριθμός δείχνει τη φασική διαφορά μεταξύ των διανυσμάτων των τάσεων της ίδιας φάσης στην πλευρά μέσης και της χαμηλής τάσης. Αν το διάνυσμα τάσης της μέσης τάσης (1 V) το θεωρήσουμε ότι είναι στη θέση 12 του ρολογιού, τότε το αντίστοιχο διάνυσμα της χαμηλής τάσης (2V) είναι στην ώρα 5. Συνεπώς η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων 1V και 2V είναι $5 \times 30 = 150^\circ$.

Σημειώνουμε ότι ικανή και αναγκαία συνθήκη για να μπορέσουν δύο Μ/Σ να λειτουργήσουν παράλληλα (να παραλληλιστούν) είναι:

- να έχουν τον ίδιο λόγο μετασχηματισμού π.χ 20/0,4 kV
- να έχουν την ίδια συνδεσμολογία π.χ Dyn5
- να μη διαφέρουν σημαντικά οι ονομαστικές ισχείς τους.



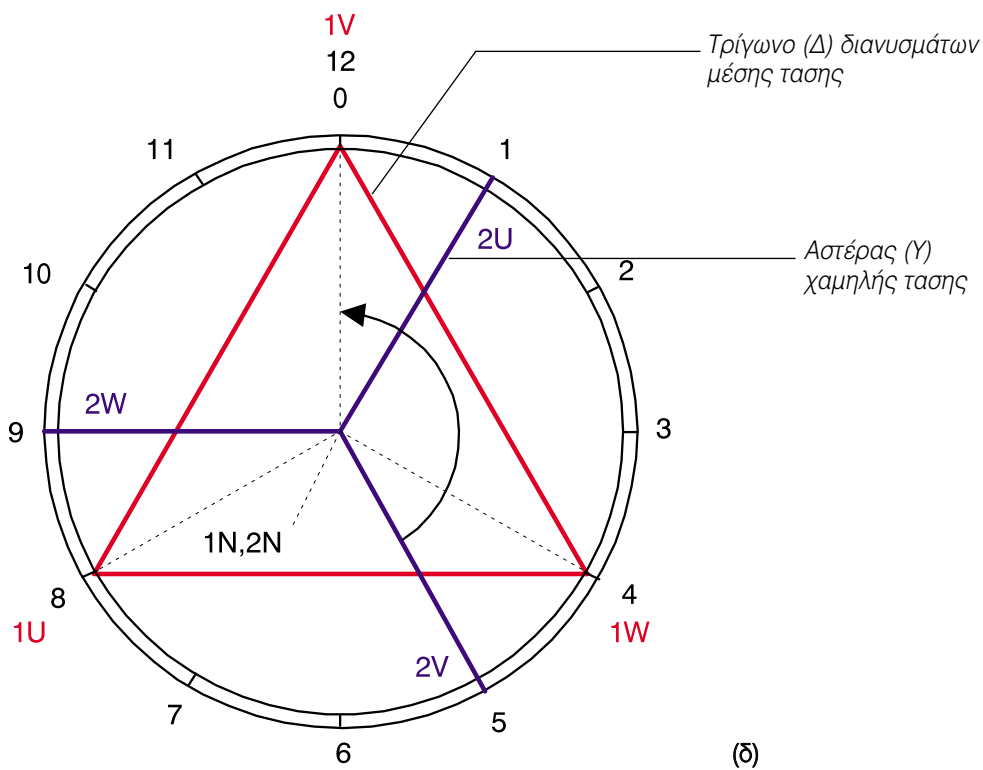
Εικόνα 1.2.4 Συμβολισμοί τριφασικού μετασχηματιστή

α. Μονογραμμικό σύμβολο

β. Σύμβολο με ακροδέκτες κατά IEC

γ. Σύμβολο με ακροδέκτες (παλαιό σύμβολο)

δ. Ομάδα διανυσμάτων Dyn5



1.2.5 Απώλειες χαλκού και σιδήρου

Οι απώλειες στο εσωτερικό του Μ/Σ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- Μαγνητικές απώλειες
- Ηλεκτρικές απώλειες

Οι **μαγνητικές απώλειες** οφείλονται στη μαγνητική υστέρηση και τα δινορρεύματα που εμφανίζονται στο σιδερένιο πυρήνα του Μ/Σ. Γι'αυτό ονομάζονται και απώλειες σιδήρου (P_{Fe}) ή **απώλειες κενού**, διότι υπάρχουν όσο ο Μ/Σ είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο μέσης τάσης, ανεξάρτητα από το φορτίο που υπάρχει στην πλευρά της χαμηλής τάσης.

Οι ωμικές αντιστάσεις στα χάλκινα τυλίγματα της μέσης και της χαμηλής τάσης του Μ/Σ δημιουργούν ηλεκτρικές απώλειες που αυξάνονται με το τετράγωνο του ρεύματος ($P_{Cu} = R \cdot I^2$). Οι απώλειες αυτές ονομάζονται και **απώλειες χαλκού** και είναι συνάρτηση του φορτίου, δηλαδή, όταν ο Μ/Σ λειτουργεί εν κενώ είναι μηδενικές ενώ σε πλήρες φορτίο φθάνουν στη μέγιστη τιμή τους.

Το σύνολο των απωλειών χαλκού και σιδήρου φθάνει για μικρούς Μ/Σ μέχρι το 5% και για μεγάλους μέχρι το 2.5% του ονομαστικού φορτίου.

Πίνακας 1.2 Τεχνικά στοιχεία ματασχηματιστών λαδιού ονομαστικής τάσης 20/0,4 kV

Ισχύς ΜΣ S_n (kVA)	Απώλειες κενού P_{Fe} (W)	Απώλειες φορτίου P_{Cu} (W)	Ονομαστική τάση βραχυκύκλωσης u_k
25	115	700	4,0
50	190	1050	4,0
75	260	1420	4,0
100	320	1750	4,0
150	435	2250	4,0
200	550	2850	4,0
250	650	3250	4,0 (6,0)
400	930	4600	4,0 (6,0)
500	1100	5500	4,0 (6,0)
630	1300	6500	4,0 (6,0)
750	1430	7600	6,0
1000	1650	10500	6,0
1250	1900	13500	6,0
1600	2550	18100	6,0

Παράδειγμα υπολογισμού

Ενας Μ/Σ έχει $S_n = 630$ kVA και εργάζεται 10 ώρες την ημέρα στο 50% του ονομαστικού ρεύματος. Να βρείτε τις ημερήσιες απώλειες ενέργειας σε kWh.

Λύση

Από τον Πίνακα 1.2 βρίσκουμε ότι οι απώλειες σιδήρου είναι 1300 W, δηλαδή

$$P_{cu} = 1300 \text{ W}$$

Από τον Πίνακα βρίσκουμε επίσης ότι οι απώλειες χαλκού είναι 6500W για το 100% του ονομαστικού ρεύματος (I_n). Επειδή οι απώλειες χαλκού είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος λειτουργίας για $I = 0,5 \cdot I_n$ είναι:

$$P_{cu} = (0.5)^2 \cdot 6500 = 1625 \text{ W.}$$

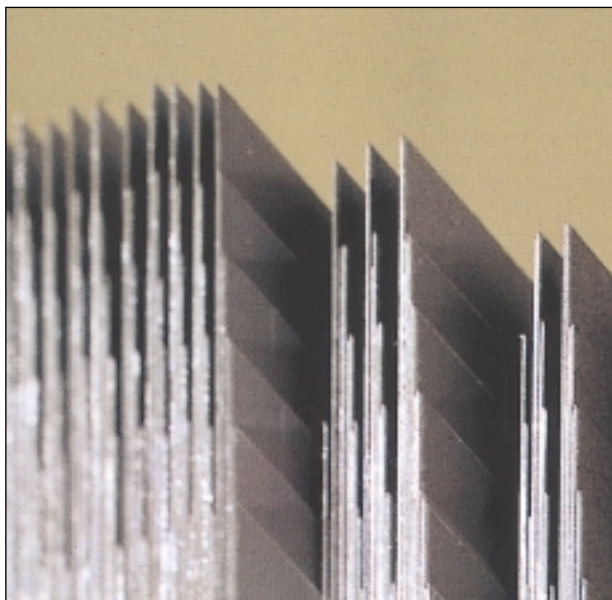
Για λειτουργία 10 ωρών ημερησίως, οι απώλειες ενέργειας ημερησίως είναι ($E = P \cdot t$):

$$E_{\mu} = 1300 \cdot 24 + 1625 \cdot 10 = 47450 \text{ Wh} = 47,45 \text{ kWh/ημέρα}$$

Για να αντιληφθούμε το μέγεθος αυτών των απωλειών, ας τις συγκρίνουμε με την ενέργεια E_{θ} που καταναλώνει ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνας ($P=3.0$ kW) του σπιτιού μας, όταν τον ανάβουμε για $t=0.5$ ώρα την ημέρα έχουμε:

$$E_{\theta} = P_{\theta} \cdot t = 3 \cdot 0.5 = 1,5 \text{ kWh/ημέρα}$$

Συγκρίνοντας τις δύο παραπάνω ενέργειες βλέπουμε ότι οι απώλειες μιας ημέρας του Μ/Σ είναι αρκετές για να θερμάνουν το νερό χρήσης ενός νοικοκυριού για ένα μήνα ($47,45/1,5 = 30$ ημέρες).



Εικόνα 1.2.5 α. Μαγνητικά ελάσματα του πυρήνα

β. Πηνία χαμηλής τάσης Μ/Σ ξηρού τύπου πριν από τη συναρμολόγησή τους

1.2.6 Προστασία μετασχηματιστή ισχύος από υπερφόρτιση

Οι απώλειες χαλκού και σιδήρου του Μ/Σ μετατρέπονται στο εσωτερικό του σε θερμότητα που έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού (αν ο Μ/Σ είναι ελαιόψυκτος) ή της χυτορητίνης (αν ο Μ/Σ είναι ξηρού τύπου).

Μια από τις βασικές απαιτήσεις της σωστής προστασίας του Μ/Σ είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας (λαδιού ή χυτορητίνης), ώστε να μην ξεπεράσει τα όρια που έχει ορίσει ο κατασκευαστής του Μ/Σ.

Για Μ/Σ λαδιού χρησιμοποιούνται τα θερμόμετρα λαδιού (Εικόνα 1.2.6) που παρακολουθούν τη θερμοκρασία του ανώτερου στρώματος λαδιού. Αυτή πρέπει να είναι μικρότερη των 100 °C.

Το θερμόμετρο είναι εφοδιασμένο με δύο ανοιχτές επαφές. Όταν η βελόνα ξεπεράσει το πρώτο όριο των 90 °C τότε κλείνει η πρώτη επαφή και κτυπά ο συναγερμός του υποσταθμού.

Ο συντηρητής θα πρέπει αμέσως να ελέγξει, αν υπάρχει κάποιο πρόβλημα στο σύστημα ψύξης του Μ/Σ ή, στην ανάγκη, να απορρίψει άμεσα κάποια από τα φορτία του Μ/Σ.

Αν η θερμοκρασία του λαδιού συνεχίζει να ανεβαίνει και η βελόνα του θερμομέτρου ξεπεράσει το δεύτερο όριο, π.χ 100 °C, αυτόματα δίνεται εντολή απόζευξης (trip) του διακόπτη ισχύος στην πλευρά χαμηλής τάσης του Μ/Σ.

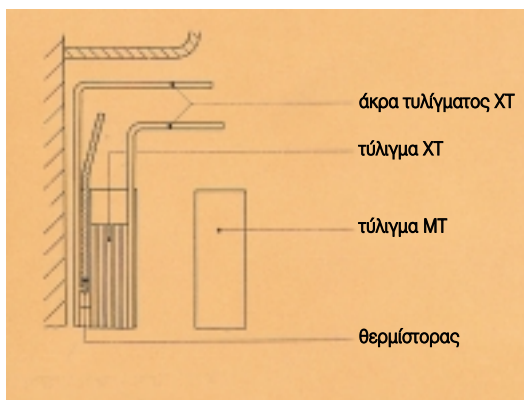
Στους Μ/Σ χυτορητίνης υπάρχουν τοποθετημένα μέσα στα τυλίγματα της χαμηλής τάσης θερμίστορες (συνήθως δύο θερμίστορες σε κάθε φάση). Οι θερμίστορες είναι ηλεκτρονικά στοιχεία που η αντίστασή τους μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία τους.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2.6β οι θερμίστορες είναι οργανωμένοι σε δύο ομάδες. Η πρώτη ομάδα δίνει εντολή οπτικού και ηχητικού συναγερμού (ρελέ K2) και η δεύτερη ομάδα δίνει εντολή απόζευξης (trip) (ρελέ K1) του διακόπτη ισχύος στην πλευρά χαμηλής τάσης του Μ/Σ.

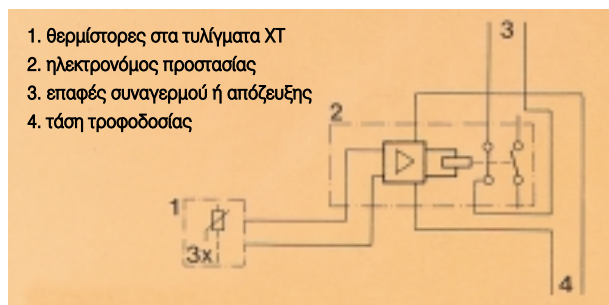
Το θερμόμετρο (στους Μ/Σ λαδιού) ή οι θερμίστορες (στους Μ/Σ χυτορητίνης) δίνουν εντολή απόζευξης στο διακόπτη ισχύος στην πλευρά χαμηλής τάσης.



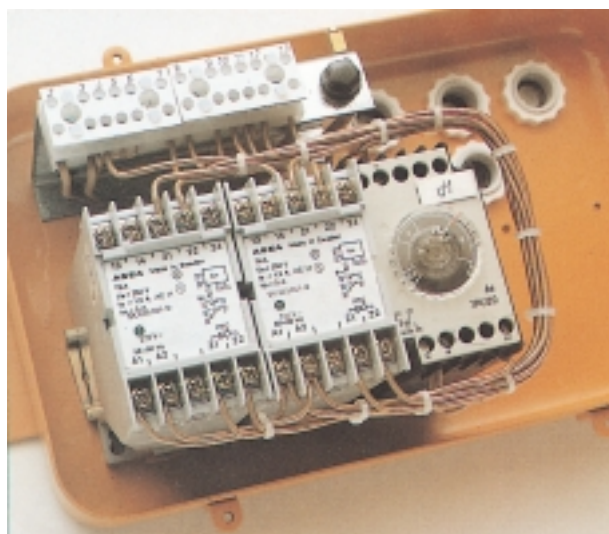
Εικόνα 1.2.6 Θερμόμετρο μέτρησης και προστασίας μετασχηματιστή λαδιού.



(α)



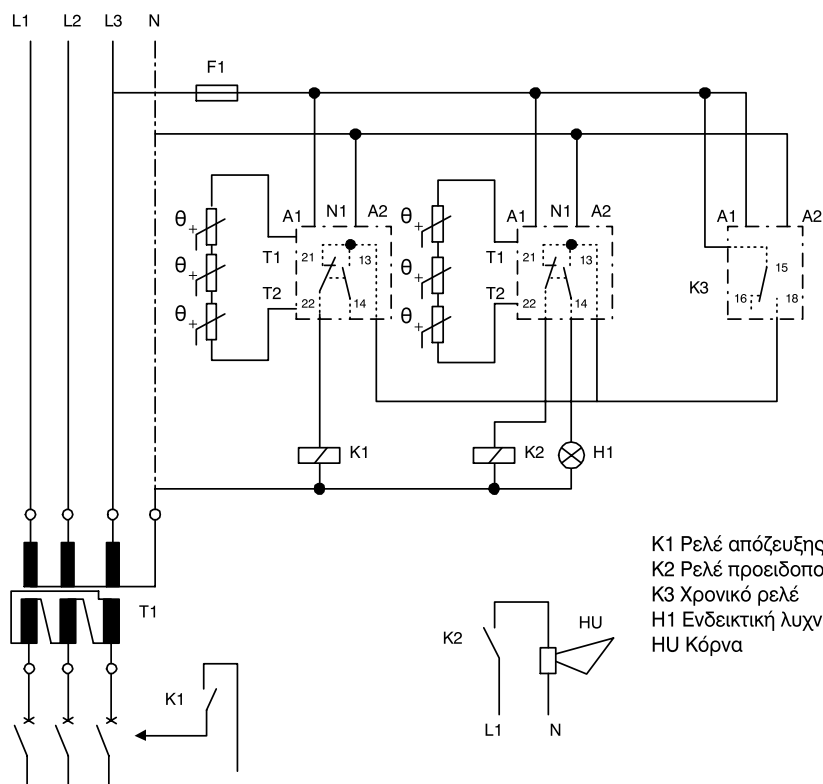
(β)



(γ)

Εικόνα 1.2.6

- α. Τοποθέτηση των θερμιστόρων στα τυλίγματα χαμηλής τάσης
- β. Αρχή λειτουργίας της προστασίας με θερμίστορες
- γ. Κουτί με ηλεκτρονόμους προστασίας
- δ. Λειτουργικό διάγραμμα προστασίας ΜΣ με θερμίστορες



(δ)

1.2.7 Προστασία μετασχηματιστή λαδιού από εσωτερικά σφάλματα

Σε περίπτωση εσωτερικού σφάλματος στο Μ/Σ λαδιού, π.χ βραχυκύκλωμα μεταξύ των σπειρών στα πηνία μέσης ή χαμηλής τάσης, εξαιτίας αστοχίας στη μόνωση, τοπικά η θερμοκρασία του λαδιού ανεβαίνει απότομα με συνέπεια:

- την εξάτμισή του και τη δημιουργία φουσαλίδων (αερίου) που οδεύουν προς τα πάνω
- την έντονη ροή του λαδιού

Ο Ηλεκτρονόμος (Η/Ν) Buchholz τοποθετείται στο σωλήνα που συνδέει το δοχείο του Μ/Σ με το δοχείο διαστολής. Για λόγους οικονομικούς τον συναντάμε συνήθως σε Μ/Σ μεγαλύτερους από 630 kVA. Ο Η/Ν Buchholz περιέχει ξεχωριστές επαφές για σήμανση κινδύνου (alarm) και απόζευξη (tripping).

Ο Η/Ν Buchholz δίνει εντολές (κλείνοντας τις αντίστοιχες επαφές) όταν ανιχνεύσει:

- τη συγκέντρωση φουσαλίδων. Όταν ο όγκος του

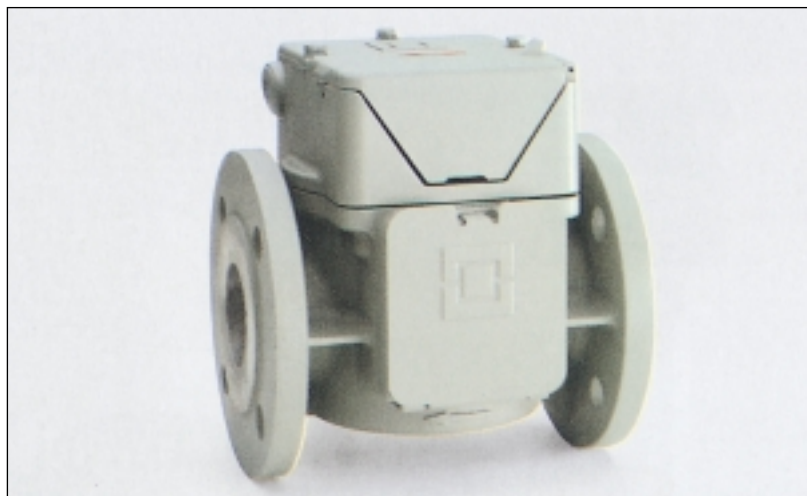
αερίου ξεπεράσει κάποιο όριο δίνει αρχικά εντολή σήμανσης κινδύνου και, αν ο όγκος εξακολουθεί να αυξάνει, εντολή απόζευξης.

- την έντονη ροή του λαδιού στο σωλήνα που συνδέει το δοχείο διαστολής με το δοχείο του Μ/Σ. Δίνει αμέσως εντολή απόζευξης.
- την πτώση στάθμης του λαδιού (λόγω διαρροής). Όταν η στάθμη του λαδιού κατέβει κάτω από το επιτρεπτό όριο δίνει αρχικά σήμανση κινδύνου. Αν η στάθμη εξακολουθεί να κατεβαίνει και πέσει κάτω και από το όριο ασφαλείας τότε δίνει εντολή απόζευξης.

Η ανίχνευση δεν διορθώνει προφανώς το σφάλμα, αλλά μας προειδοποιεί να σταματήσουμε άμεσα τον Μ/Σ, αλλιώς υπάρχει κίνδυνος μεγάλης ζημιάς.

Πρακτικά, η απόζευξη με Η/Ν Buchholz σημαίνει ότι ο Μ/Σ πρέπει να σταματήσει τη λειτουργία του, να επιθεωρηθεί και, ενδεχομένως, να επισκευαστεί.

Ο Η/Ν Buchholz δίνει εντολή απόζευξης στο διακόπτη ισχύος ή διακόπτη φορτίου στην πλευρά μέσης τάσης για να έχουμε πλήρη απομόνωση του Μ/Σ από το δίκτυο των 20 kV.



Εικόνα 1.2.7
Τύποι ηλεκτρονόμων (ΗΝ) Buchholz

1.2.8 Διαφορική προστασία μετασχηματιστή ισχύος

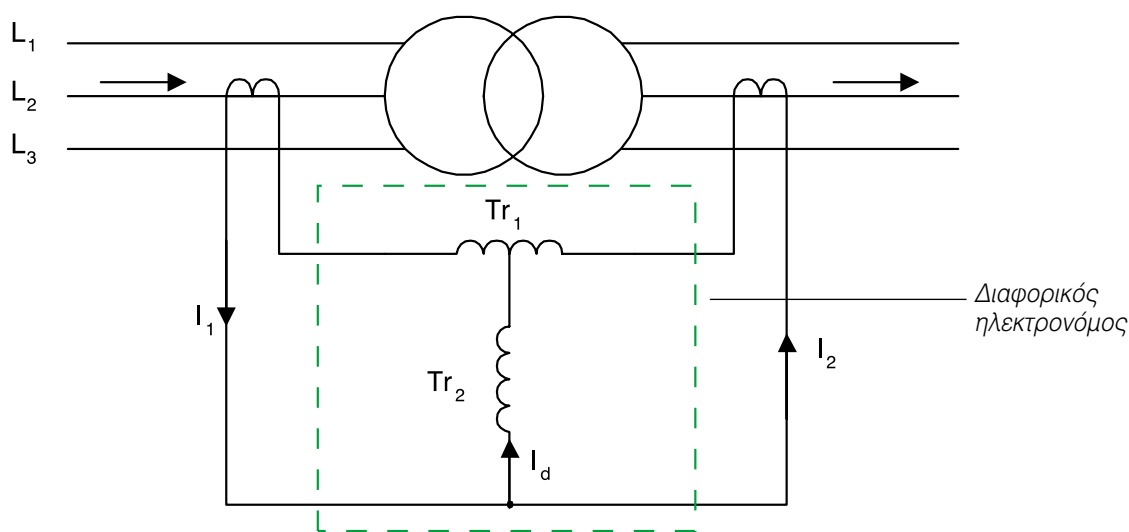
Στη διαφορική προστασία γίνεται σύγκριση των ανηγμένων ρευμάτων, πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Για να γίνει αυτό χρειαζόμαστε από τρεις Μ/Σ έντασης στη μέση και χαμηλή τάση αντίστοιχα.

Τα δευτερεύοντα των έξι Μ/Σ καταλήγουν στο διαφορικό Η/Ν, που ελέγχει ότι τα ανηγμένα εισερχόμενα ρεύματα είναι ίσα με τα εξερχόμενα ρεύματα. Αν η **διαφορά** των δύο ρευμάτων (απ' όπου και το όνομα διαφορικός Η/Ν) ξεπερνά ένα όριο, π.χ 100 mA, τότε ο Η/Ν δίνει εντολή απόζευξης στο διακόπτη ισχύος στην πλευρά μέσης τάσης.

Η διαφορική προστασία έχει το πλεονέκτημα ότι

περιορίζει τη ζημιά στο ελάχιστο, σε σχέση με την προστασία του Η/Ν Buchholz. Επειδή όμως είναι μια σχετικά ακριβή προστασία τη συναντάμε σε πολύ μεγάλους Μ/Σ (πάνω από 1600 kVA)

Αξίζει να σημειώσουμε ότι, η διαφορική προστασία θυμίζει το γνωστό Δ.Δ.Ε. (διακόπτη διαρροής έντασης) που συναντάμε στους ηλεκτρικούς πίνακες των Ε.Η.Ε. Ο Δ.Ε.Ε. συγκρίνει το ρεύμα της φάσης με το ρεύμα του ουδετέρου (για μονοφασικούς πίνακες). Αν η διαφορά των δύο ρευμάτων ξεπεράσει τα 30 mA, τότε ανοίγει αυτόματα, δηλαδή δίνει εντολή απόζευξης στον εαυτό του.



Εικόνα 1.2.8 Αρχή λειτουργίας διαφορικής προστασίας Μ/Σ
(για λόγους απλοποίησης έχουν σχεδιασθεί δύο από τους έξι Μ/Σ έντασης)

1.2.9 Επιλεκτική συνεργασία μεταξύ των οργάνων προστασίας στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή

Μια από τις βασικές απαιτήσεις της προστασίας ενός Μ/Σ είναι η επιλεκτική (ή επιλογική) συνεργασία (discriminative operation) μεταξύ των ασφαλειών στην πλευρά μέσης τάσης και του διακόπτη ισχύος ή των ασφαλειών στην πλευρά της χαμηλής τάσης.

Με τον όρο επιλεκτική συνεργασία εννοούμε ότι το όργανο προστασίας που είναι πλησιέστερο στο σφάλμα πρέπει να διακόπτει πρώτο. Για παράδειγμα, αν το σφάλμα (βραχυκύκλωμα) γίνει στην πλευρά της χαμηλής τάσης του Μ/Σ πρέπει να ανοίξει μόνο ο διακόπτης ισχύος της Χ.Τ. ενώ οι ασφάλειες της ΜΤ πρέπει να μείνουν ανεπηρέαστες.

Για να μπορέσουμε να μελετήσουμε την επιλεκτική συνεργασία χρησιμοποιούμε τις χαρακτηριστικές απόζευξης (tripping characteristics) που περιγράφουν το κάθε όργανο προστασίας.

Στην Εικόνα 1.2.9. έχουμε σχεδιάσει σε κοινό σύστημα αξόνων:

- τη χαρακτηριστική απόζευξης της ασφάλειας μέσης τάσης (κόκκινη καμπύλη)
- τη χαρακτηριστική απόζευξης του διακόπτη ισχύος χαμηλής τάσης (μπλέ καμπύλη)

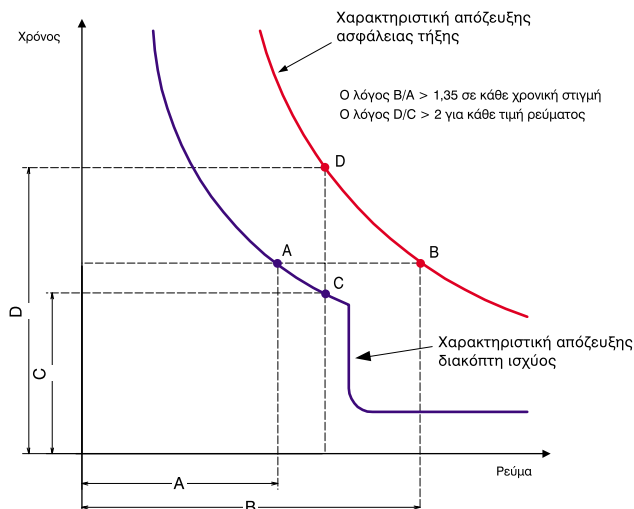
Ο οριζόντιος άξονας είναι βαθμολογημένος σε kA ενώ ο κατακόρυφος σε s.

Και οι δύο χαρακτηριστικές έχουν την ιδιότητα του αντίστροφου χρόνου, δηλαδή όσο μεγαλώνει

το ρεύμα τόσο ελαττώνεται ο χρόνος απόζευξης. Η χαρακτηριστική της ασφάλειας είναι μια συνεχής καμπύλη ενώ η χαρακτηριστική του αυτόματου διακόπτη έχει ένα απότομο σκαλοπάτι που οφείλεται στη λειτουργία του μαγνητικού στοιχείου.

Για να πετύχουμε την επιλεκτική συνεργασία πρέπει να ισχύουν τα παρακάτω:

- Όλα τα σημεία της καμπύλης της ασφάλειας να είναι πάνω και δεξιά από την καμπύλη του αυτόματου διακόπτη.
- Αν φέρουμε μια οριζόντια ευθεία, που κόβει τις καμπύλες του αυτόματου διακόπτη και της ασφάλειας στα σημεία Α και Β αντίστοιχα, πρέπει $B/A > 1,35$, δηλαδή, αν το ρεύμα στο σημείο Α είναι 1000 A, το ρεύμα στο σημείο Β της ασφάλειας να είναι τουλάχιστον 1350 A.
- Αν φέρουμε μια κάθετη ευθεία που κόβει τις καμπύλες του αυτόματου διακόπτη και της ασφάλειας στα σημεία C και D αντίστοιχα, πρέπει $D/C > 2$, δηλαδή, αν ο χρόνος στο σημείο C είναι 1,5 s ο χρόνος στο σημείο D της ασφάλειας να είναι τουλάχιστον 3,0 s



Εικόνα 1.2.9 Επιλεκτικότητα μεταξύ των ασφαλειών ΜΤ και του διακόπτη ισχύος Χ.Τ που χρησιμοποιούνται στην προστασία ενός μετασχηματιστή

1.2.10 Εγκατάσταση και ψύξη του μετασχηματιστή ισχύος

Οι Μ/Σ εγκαθίστανται πάντοτε σε δικό τους ανεξάρτητο χώρο.

Οι Μ/Σ λαδιού εγκαθίστανται στο υπόγειο του κτιρίου ή σε ανεξάρτητο οικίσκο, ενώ οι Μ/Σ ξηρού τύπου μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιοδήποτε όροφο του κτιρίου. Βασική απαίτηση για τη απρόσκοπτη λειτουργία του Μ/Σ είναι ο σωστός φυσικός ή τεχνητός αερισμός του χώρου εγκατάστασής του, για να απάγεται η θερμότητα (=απώλειες) που δημιουργείται.

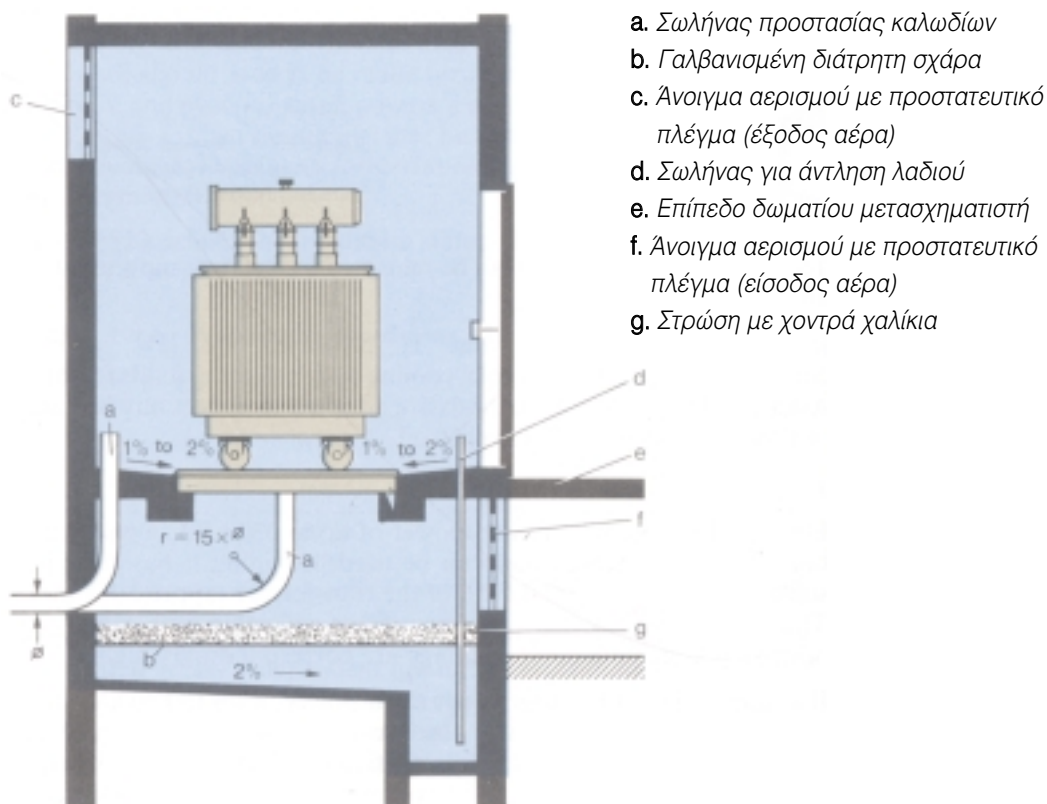
Στην Εικόνα 1.2.10 βλέπουμε την τομή του δωματίου ενός Μ/Σ λαδιού. Κάτω από το Μ/Σ υπάρχει ένας στεγανός λάκκος από σκυρόδεμα για τη συγκέντρωση του λαδιού σε περίπτωση διαρροής. Η

στρώση με τα χαλίκια (g) έχει σκοπό να μειωθεί η ποσότητα του λαδιού που μπορεί να καεί σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Ο Μ/Σ πατάει πάνω σε σιδηροτροχιές.

Η είσοδος του αέρα είναι στο χαμηλότερο σημείο (f) και η έξοδος στο υψηλότερο σημείο (c). Το μέγεθος των ανοιγμάτων υπολογίζεται από το μέγεθος των μετασχηματιστών. Έτσι σχηματίζεται ένα φυσικό ρεύμα αέρα γύρω από το Μ/Σ που είναι απαραίτητο για τη σωστή ψύξη του.

Οι διαστάσεις του δωματίου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να εξασφαλίζεται διάδρομος πλάτους τουλάχιστον 70 cm γύρω από το Μ/Σ.



Εικόνα 1.2.10 Παράδειγμα εσωτερικής εγκατάστασης Μ/Σ λαδιού

Μετασχηματιστής ισχύος

Ερωτήσεις

1. Ποιά είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός μετασχηματιστή (Μ/Σ) ισχύος;
2. Μπορεί ένας Μ/Σ ονομαστικής ισχύος 630 kVA να χρησιμοποιηθεί στα 800 kVA.
Αν ναι τότε μπορεί να συμβεί;
3. Τι ονομάζουμε τάση βραχυκύκλωσης ενός Μ/Σ;
4. Ποια είναι η λειτουργία του δοχείου διαστολής σε ένα Μ/Σ λαδιού;
5. Ποια είναι τα βασικά πλεονεκτήματα του Μ/Σ ξηρού τύπου σε σχέση με το Μ/Σ λαδιού
6. Στη πινακίδα ενός Μ/Σ μεταξύ των άλλων γράφει
Συνδεσμολογία τυλιγμάτων: Dyn5
Να εξηγήσετε τι σημαίνει.
7. Σε περίπτωση υπερθέρμανσης του λαδιού του Μ/Σ δίνεται εντολή ανοίγματος στην πλευρά χαμηλής ή μέσης τάσης; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.
8. Τι είναι οι απώλειες χαλκού και τι οι απώλειες σιδήρου σε ένα Μ/Σ;
9. Πως λειτουργεί η διαφορική προστασία σε ένα Μ/Σ;
Γιατί τη συναντάμε μόνο στους μεγάλους (σε kVA) Μ;

Ασκήσεις

1. Ένας υπαίθριος Μ/Σ διανομής της ΔΕΗ έχει ονομαστική ισχύ 250 kVA. Να βρείτε:
 - α. το επιτρεπτό φορτίο του σε kVA για τις κρύες ημέρες του χειμώνα όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι 0°C
 - β. το ρεύμα σε A στο δευτερεύον του Μ/Σ.
2. Η πινακίδα ενός Μ/Σ γράφει:

$$S_n = 1000 \text{ kVA}$$

$$U_1 = 20 \text{ kV}$$

$$U_2 = 0,4 \text{ kV}$$

$$u_k = 5 \%$$
 Να βρείτε το ρεύμα βραχυκυκλώματος στην πλευρά χαμηλής τάσης.
3. Να σχεδιάσετε τα διανύσματα των τάσεων στη μέση και χαμηλή τάση ενός Μ/Σ με συνδεσμολογία Dyn5.
4. Ένας μετασχηματιστής έχει $S_n = 1000 \text{ kVA}$ και εργάζεται 10 ώρες την ημέρα στο 50% του ονομαστικού ρεύματος. Να βρείτε:
 - α. τις απώλειες σιδήρου σε W
 - β. τις απώλειες χαλκού σε W
 - γ. τις ημερήσιες απώλειες ενέργειας σε kWh.