

### **3. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ**

Είναι συνηθισμένο φαινόμενο να χρειάζεται η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας με τάση διαφορετική από αυτή που έχει το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο συνεχές ρεύμα αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με μία αντίσταση η πτώση τάσης στα άκρα της οποίας δίνει την απαραίτητη χαμηλή τάση τροφοδοσίας μιάς συσκευής με μικρότερη τάση. Το βασικό μειονέκτημα στην περίπτωση αυτή είναι οι μεγάλες απώλειες ενέργειας λόγω της θερμότητας που αναπτύσσεται στην αντίσταση. Σε σοβαρές περιπτώσεις θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ζεύγος γεννήτριας-κινητήρα με τον κινητήρα να τροφοδοτείται από το δίκτυο και την γεννήτρια να δίνει την απαραίτητη τάση με μεταβολή της έντασης διέγερσής της. Πάλι όμως ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος θα είναι χαμηλός. Η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας για να συμφέρει οικονομικά πρέπει να γίνεται με υψηλή τάση που θα διατηρεί χαμηλό το ρεύμα ώστε να μειώνονται οι θερμικές απώλειες μεταφοράς. Στην συνέχεια η υψηλή τάση πρέπει να μειώνεται σημαντικά ώστε να μπορεί να διανεμηθεί στους καταναλωτές χωρίς κίνδυνο.

Για το συνεχές ρεύμα τέτοιες μετατροπές τάσης δεν είναι οικονομικά δυνατές ενώ στο εναλλασσόμενο υπάρχουν συσκευές που μπορούν να κάνουν τις απαραίτητες μετατροπές χωρίς κινούμενα τμήματα με ελάχιστες απώλειες ισχύος. Οι συσκευές αυτές είναι γνωστές με το όνομα μετασχηματιστές και έχουν βαθμούς απόδοσης που ξεπερνούν και το 98%. Οι μετασχηματιστές κάνουν δυνατή την χρησιμοποίηση συσκευών σχεδιασμένων να λειτουργούν με οποιαδήποτε τάση αρκεί να υπάρχουν μετασχηματιστές που μπορούν να δώσουν τέτοιες τάσεις.

#### **3.1 Κατασκευή μετασχηματιστών**

Το κύριο μέρος κάθε μετασχηματιστή που ονομάζεται και ενεργό μέρος αποτελείται από ένα μαγνητικό κύκλωμα στο οποίο είναι τυλιγμένα δύο τυλίγματα, το τύλιγμα υψηλής τάσης και το τύλιγμα χαμηλής τάσης.

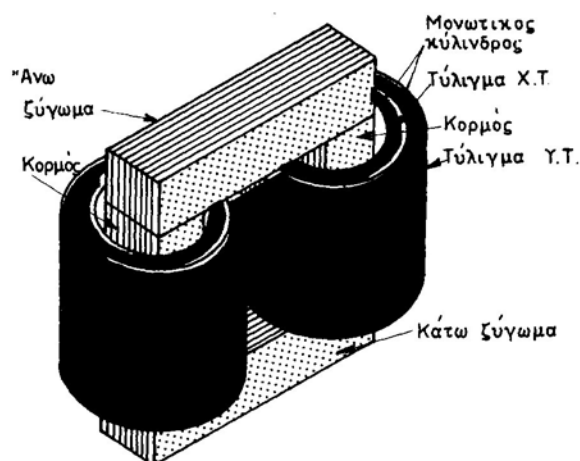
Το μαγνητικό κύκλωμα, που ονομάζεται και πυρήνας του μετασχηματιστή, κατασκευάζεται από πολλά μαγνητικά ελάσματα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του πυρήνα του επαγωγικού τυμπάνου των ηλεκτρικών μηχανών. Τα ελάσματα αυτά είναι επιφανειακά μονωμένα και έχουν εξαιρετικά χαμηλές ολικές απώλειες με αποτέλεσμα πολύ καλό βαθμό απόδοσης.

Το τύλιγμα υψηλής τάσης αποτελείται από πολλές σπείρες μονωμένου χάλκινου αγωγού κυκλικής διατομής. Το τύλιγμα χαμηλής τάσης κατασκευάζεται συνήθως από αγωγό ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής μονωμένο με χαρτί ή βαμβάκι, έχει μικρότερο αριθμό σπειρών από το τύλιγμα υψηλής τάσης και μεγαλύτερη διατομή. Και τα δύο τυλίγματα είναι πολύ καλά μονωμένα μεταξύ τους.

Στην περίπτωση μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσης, το τύλιγμα υψηλής τάσης συνδέεται με την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας και από το τύλιγμα χαμηλής τάσης τροφοδοτούνται οι καταναλωτές. Στην περίπτωση αυτή το τύλιγμα υψηλής τάσης ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα ή απλά πρωτεύον και το τύλιγμα χαμηλής τάσης ονομάζεται δευτερεύον τύλιγμα ή δευτερεύον. Στους μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης συμβαίνει το αντίθετο.

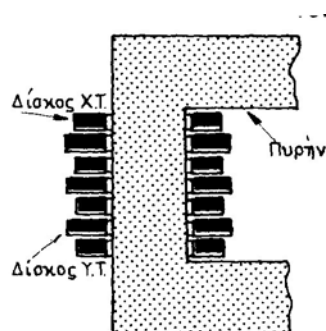
### Μονοφασικοί μετασχηματιστές

Το Σχήμα 3.1 παριστάνει μικρό μονοφασικό μετασχηματιστή. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από μαγνητικά ελάσματα, αποτελείται από τούς δύο κορμούς (τα κατακόρυφα τμήματα) και τα δύο ζυγώματα (τα οριζόντια τμήματα). Το άνω ζύγωμα αφαιρείται από τον υπόλοιπο πυρήνα για να είναι δυνατή η τοποθέτηση των τυλιγμάτων στους κορμούς.



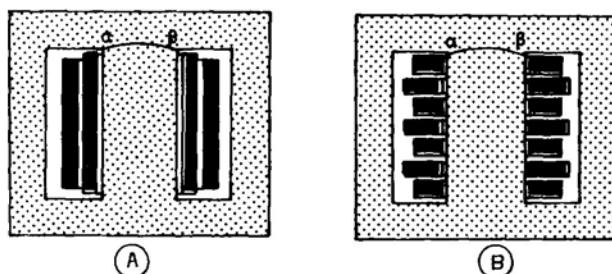
Σχήμα 3.1 Μονοφασικός μετασχηματιστής

Σε κάθε κορμό του μετασχηματιστή του Σχήματος 3.1 υπάρχει ένα τύλιγμα χαμηλής τάσης διαμορφωμένο υπό μορφή κυλίνδρου και ένα τύλιγμα υψηλής τάσης διαμορφωμένο επίσης με κυλινδρική μορφή. Το τύλιγμα υψηλής τάσης περιβάλλει το τύλιγμα χαμηλής τάσης και μονώνονται μεταξύ τους και προς τον κορμό. Τα τυλίγματα χαμηλής τάσης των δύο κορμών συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ώστε τελικά να μένουν ελεύθερα τα δύο άκρα του τυλίγματος χαμηλής τάσης. Με τον ίδιο τρόπο υπάρχουν δύο άκρα του τυλίγματος υψηλής τάσης. Τα τυλίγματα με τον παραπάνω τρόπο κατασκευής λέγονται συγκεντρικά ή κυλινδρικά τυλίγματα. Ένας άλλος τρόπος κατασκευής που φαίνεται στο Σχήμα 3.2 είναι η κατασκευή των τυλιγμάτων κατά δίσκους, στον οποίο τρόπο κάθε τύλιγμα αποτελείται από πολλά τμήματα διαμορφωμένα σε δίσκους τα οποία συνδέονται πάλι σε σειρά για να προκύψουν δύο άκρα σε κάθε τύλιγμα.



Σχήμα 3.2 Τύλιγμα κατά δίσκους

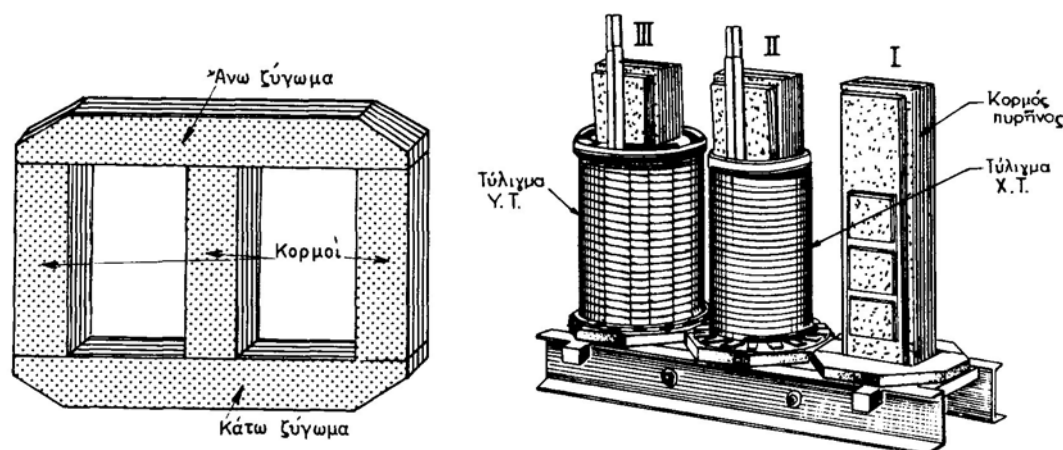
Οι μετασχηματιστές με τυλίγματα στους δύο κορμούς λέγονται μετασχηματιστές τύπου πυρήνα (Σχήμα 3.1). Ένας άλλος τύπος μετασχηματιστή είναι εκείνος του τύπου μανδύα που φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Στους μετασχηματιστές αυτούς ο πυρήνας έχει τρεις κορμούς των οποίων ο μεσαίος είναι διπλάσιας διατομής των ακραίων.



Σχήμα 3.3 Μονοφασικοί μετασχηματιστές τύπου μανδύα

### Τριφασικοί μετασχηματιστές

Το ενεργό μέρος των τριφασικών μετασχηματιστών αποτελείται, όπως και στους μονοφασικούς, από τον πυρήνα και τα τυλίγματα. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται η μορφή του πυρήνα ενός τριφασικού μετασχηματιστή τύπου πυρήνα με τρεις όμοιους κορμούς, σε καθέναν από τους οποίους τοποθετείται ένα τυλίγμα χαμηλής τάσης και ένα υψηλής τάσης με αποτέλεσμα τρία τυλίγματα φάσεων χαμηλής και τρία τυλίγματα φάσεων υψηλής τάσης και δώδεκα άκρα συνολικά που συνδέονται τόσο μεταξύ τους όσο και στους ακροδέκτες του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.4 Πυρήνας και τυλίγματα τριφασικού μετασχηματιστή

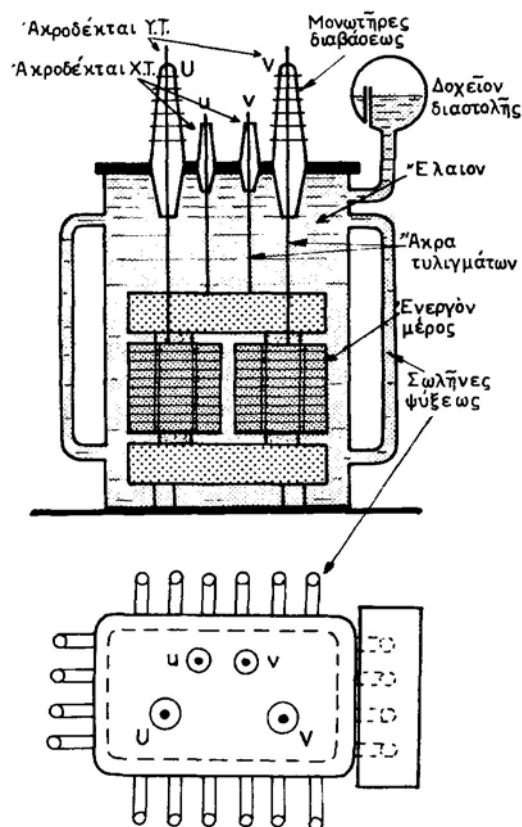
### Μονώσεις και ακροδέκτες

Τα τυλίγματα των μετασχηματιστών, αφού τοποθετηθούν στους πυρήνες, διαποτίζονται με βερνίκι και ξηραίνονται σε ειδικούς κλιβάνους με αποτέλεσμα καλύτερη μόνωση και δυσκαμψία που μειώνει τις δονήσεις στην λειτουργία.

Η μόνωση των μεταξύ των τυλιγμάτων συνδέσεων όπως και των ακροδεκτών χαμηλής τάσης δεν παρουσιάζει δυσκολίες. Οι συνδέσεις των τυλιγμάτων υψηλής

τάσης τοποθετούνται μέσα σε μονωτικούς κυλίνδρους από βακελίτη, τα άκρα των τυλιγμάτων στηρίζονται σε μονωτήρες πορσελάνης και αποτελούν τους ακροδέκτες υψηλής τάσης του μετασχηματιστή.

Όταν ο μετασχηματιστής είναι κατασκευασμένος για χαμηλές τάσεις τότε το ενεργό μέρος του είναι εκτεθειμένο στον αέρα και λέγεται ξηρός μετασχηματιστής. Όταν όμως ο μετασχηματιστής είναι κατασκευασμένος για δίκτυα υψηλών τάσεων, το ενεργό μέρος τοποθετείται μέσα σε λέβητα γεμάτο με ειδικό μονωτικό ορυκτέλαιο χωρίς ίχνος υγρασίας (μετασχηματιστές λαδιού). Το Σχήμα 3.5 δείχνει παραστατικά σε τομή έναν τέτοιο μονοφασικό μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.5 Μονοφασικός μετασχηματιστής λαδιού

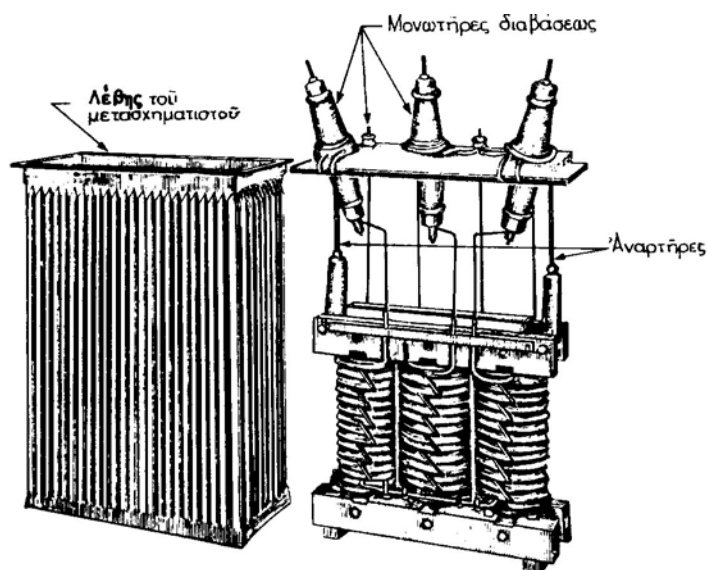
Σε ορισμένους μετασχηματιστές ο λέβητας επικοινωνεί με δοχείο διαστολής που επιτυγχάνει την ελεύθερη διαστολή του ελαίου χωρίς να μπαίνει αέρας στο δοχείο αποφεύγοντας την δημιουργία φυσαλλίδων στο δοχείο του ελαίου. Σε άλλους μετασχηματιστές που δεν έχουν δοχείο διαστολής και ο λέβητας είναι αεροστεγώς κλεισμένος, στο άνω μέρος του δοχείου υπάρχει στρώμα αζώτου που επιτρέπει την διαστολή του λαδιού. Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται τριφασικός μετασχηματιστής λαδιού.

### 3.2 Ψύξη μετασχηματιστών

Ανάλογα με τον τρόπο ψύξης οι μετασχηματιστές διακρίνονται σε

α) ξηρούς με φυσική ψύξη στους οποίους η εξωτερική επιφάνεια του ενεργού μέρους έρχεται σε επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος και αυτό είναι αρκετό για

ικανοποιητική ψύξη. Χρησιμοποιείται σε μικρής ισχύος μετασχηματιστές το πολύ μέχρι 25 KVA.



Σχήμα 3.6 Τριφασικός μετασχηματιστής λαδιού

β) Ξηρούς με εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα ψύξης στους οποίους χρησιμοποιείται ανεμιστήρας που μέσω καναλιών στον πυρήνα απομακρύνει την θερμότητα. Ο μετασχηματιστής βρίσκεται σε κλειστό περίβλημα.

γ) Λαδιού με φυσική κυκλοφορία λαδιού στους οποίους η φυσική κυκλοφορία του λαδιού στον λέβητα απομακρύνει μέρος της αναπτυσσόμενης θερμότητας στο ενεργό μέρος προς τα τοιχώματα του λέβητα και από εκεί στον εξωτερικό αέρα. Η αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης της θερμότητας μπορεί να γίνει με σωλήνες ή πτερύγια ή σώματα ψύξης μεταξύ των πλευρών του λέβητα. Βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση ανεμιστήρα σε ισχύς πάνω από 10 MVA.

δ) Λαδιού με εξαναγκασμένη κυκλοφορία λαδιού στους οποίους η κίνηση του λαδιού ψύξης γίνεται μέσω αντλιών και σωληνώσεων προς το ψυγείο, όπου το λάδι ψύχεται και ανακυκλοφορείται προς τα τοιχώματα του πυρήνα. Χρησιμοποιείται σε μεγάλες ισχύς πάνω από 50 MVA.

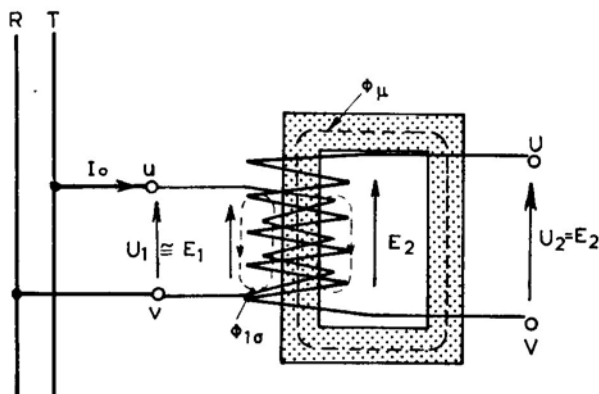
### 3.3 Αρχή λειτουργίας των μετασχηματιστών

#### **Μονοφασικοί Μετασχηματιστές**

Το Σχήμα 3.7 παριστάνει μονοφασικό μετασχηματιστή στον οποίο για λόγους απλότητας θεωρείται ότι υπάρχουν τυλίγματα μόνο στον ένα κορμό του πυρήνα. Το πρωτεύον τύλιγμα (χαμηλής τάσης) τροφοδοτείται από δίκτυο εναλλασσομένου με ενεργό τιμή τάσης  $U_1$ . Το δευτερεύον τύλιγμα (υψηλής τάσης) είναι ανοικτό.

Λόγω της τάσης τροφοδοσίας θα κυκλοφορήσει στο πρωτεύον εναλλασσόμενο ρεύμα  $I_0$  με αποτέλεσμα την ανάπτυξη στον πυρήνα μαγνητικής ροής που κλείνει κύκλωμα μέσω του σιδήρου του πυρήνα και είναι εναλλασσόμενη με συχνότητα την συχνότητα

της τάσης τροφοδοσίας. Έτσι στο δευτερεύον τύλιγμα θα αναπτυχθεί μία ΗΕΔ ενεργού τιμής  $E_2$  με επαγωγή που θα δίνεται από την σχέση



Σχήμα 3.7 Λειτουργία μετασχηματιστή στο κενό

$$E_2 = 4.44f w_2 \Phi_\mu$$

Όπου  $f$  η συχνότητα σε Hz

$w_2$  ο αριθμός σπειρών του δευτερεύοντος τυλίγματος

$\Phi_\mu$  το πλάτος της ημιτονοειδούς μεταβαλλόμενης ροής

Έτσι το δευτερεύον τύλιγμα λειτουργεί σαν μονοφασική γεννήτρια με ΗΕΔ  $E_2$  από την οποία μπορούν να τροφοδοτηθούν καταναλωτές συνδέοντάς τους στα άκρα  $U$  και  $V$ . Η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ είναι ανάλογη του αριθμού σπειρών  $w_2$  του δευτερεύοντος και επομένως μπορεί να γίνει όσο μεγάλη είναι επιθυμητό, αρκεί να τοποθετηθεί ο κατάλληλος αριθμός σπειρών.

Με όμοιο τρόπο, όπως εξηγήθηκε και στο δευτερεύον τύλιγμα, δημιουργείται και στο πρωτεύον τύλιγμα ΗΕΔ με επαγωγή που δρά σαν αντιηλεκτρεγερτική δύναμη στην  $U_1$ . Η ενεργός τιμή της δίνεται από την σχέση

$$E_1 = 4.44f w_1 \Phi_\mu$$

που εξαρτάται από τον αριθμό σπειρών  $w_1$  του πρωτεύοντος τυλίγματος.

Η μαγνητική ροή  $\Phi_\mu$  είναι η χρήσιμη μαγνητική ροή του μετασχηματιστή διότι συντελεί στην δημιουργία των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων. Το ρεύμα  $I_0$  που περνά από το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργεί και μία πρωτεύουσα ροή σκέδασης που δεν περνά από τον πυρήνα αλλά κλείνει κύκλωμα μέσω του αέρα ( $\Phi_{1\sigma}$ ). Αν και η ροή αυτή είναι μικρό ποσοστό της χρήσιμης (μικρότερο του 0.5%), έχει ιδιαίτερη σημασία στην λειτουργία του μετασχηματιστή διότι δημιουργεί αυτεπαγωγική πτώση τάσης.

### Τριφασικοί μετασχηματιστές

Σε κάθε κορμό του πυρήνα του τριφασικού μετασχηματιστή τοποθετείται ένα τύλιγμα χαμηλής τάσης και ένα τύλιγμα υψηλής τάσης, οπότε κάθε κορμός συμπεριφέρεται σαν μονοφασικός μετασχηματιστής και ισχύουν όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.

### **3.4 Λειτουργία μετασχηματιστών στο κενό**

Όταν ο μετασχηματιστής λειτουργεί στο κενό, το ρεύμα  $I_0$  είναι μικρό ποσοστό της ονομαστικής έντασης (1 ως 5% για τους μέτριου και μεγάλου μεγέθους ως 10% για τους μικρούς μετασχηματιστές). Έτσι η ωμική πτώση τάσης ( $I_0 R_1$ ) στο πρωτεύον τύλιγμα λόγω της ωμικής αντίστασης  $R_1$  του αγωγού, όσο και η επαγωγική πτώση τάσης ( $I_0 X_1$ ) λόγω της ροής σκέδασης, είναι πολύ μικρές.

Έτσι στην λειτουργία στο κενό η τάση  $U_1$  ισούται κατά προσέγγιση με την αναπτυσσόμενη στο πρωτεύον ηλεκτρεγερτική δύναμη  $E_1$  :

$$U_1 = E_1$$

Στο δευτερεύον τύλιγμα στην λειτουργία στο κενό

$$U_2 = E_2$$

Έτσι

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{4.44 f w_1 \Phi_{\mu}}{4.44 f w_2 \Phi_{\mu}} = \frac{w_1}{w_2} = k$$

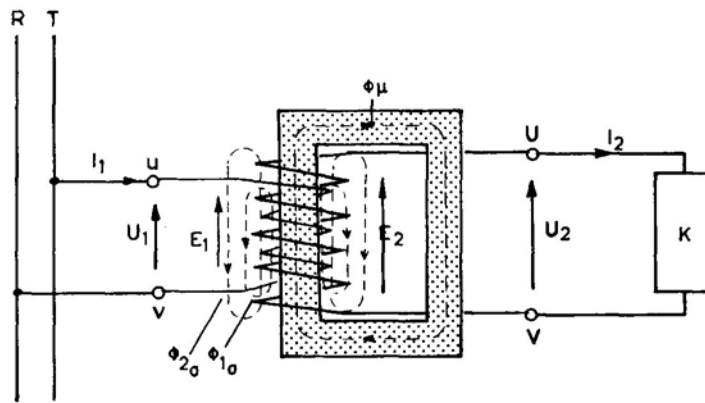
Δηλαδή στην λειτουργία του μετασχηματιστή στο κενό ο λόγος των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι ίσος με τον λόγο των αριθμών σπειρών των αντίστοιχων τυλιγμάτων. Ο τελευταίος αυτός λόγος λέγεται σχέση μεταφοράς  $k$  του μετασχηματιστή.

Οι μαγνητικές απώλειες του μετασχηματιστή είναι πρακτικά οι ίδιες στο κενό και υπό φορτίο και δεν ξεπερνούν τα 4 ως 5% της ονομαστικής ισχύος και μειώνονται μέχρι το 1% στους μετασχηματιστές με καλό βαθμό απόδοσης. Λόγω αυτών των πολύ μικρών απωλειών στο κενό οι μετασχηματιστές μπορεί να παραμένουν συνδεδεμένοι στο δίκτυο έστω και χωρίς φορτίο στο δευτερεύον.

### **3.5 Λειτουργία μετασχηματιστών υπό φορτίο**

Όταν συνδέεται ένας καταναλωτής στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, ενώ το πρωτεύον τροφοδοτείται με σταθερή τάση  $U_1$ , από το δευτερεύον θα περάσει εναλλασσόμενο ρεύμα με ενεργό τιμή  $I_2$ . Ταυτόχρονα το ρεύμα που απορροφά το πρωτεύον αυξάνει αυτόματα από  $I_0$  σε  $I_1$ . Τελικά την ισχύ που απορροφά ο καταναλωτής από το δευτερεύον μαζί με τις απώλειες του μετασχηματιστή την παρέχει το δίκτυο που τροφοδοτεί το πρωτεύον.

Η μαγνητική ροή  $\Phi_{\mu}$  από τον πυρήνα παραμένει η ίδια όσο και στην λειτουργία στο κενό. Αυτή εξαρτάται μόνο από τα κατασκευαστικά στοιχεία του μετασχηματιστή και όχι από τις συνθήκες φόρτισής του.



Σχήμα 3.8 Λειτουργία μετασχηματιστή υπό φορτίο

Αν μετρηθούν οι εντάσεις  $I_1$  και  $I_2$  θα διαπιστωθεί ότι με αρκετή προσέγγιση ισχύει η σχέση

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad \text{ή} \quad I_2 = kI_1$$

Με προσέγγιση επίσης ισχύει και υπό φορτίο η σχέση

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad \text{ή} \quad U_2 = \frac{U_1}{k}$$

Η προσέγγιση στις σχέσεις αυτές είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μικρότερες είναι οι απώλειες και οι ροές σκέδασης του μετασχηματιστή. Δηλαδή οι σχέσεις θα ισχύουν ακριβώς στον ιδανικό μετασχηματιστή.

Από τις παραπάνω σχέσεις διαπιστώνεται ότι αν ένας μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση στο δευτερεύον, τότε υποβιβάζει κατά την ίδια σχέση την ένταση που κυκλοφορεί σ' αυτό. Έτσι, το τύλιγμα χαμηλής τάσης και μεγάλης έντασης θα έχει μικρό αριθμό σπειρών και αγωγό μεγάλης διατομής ενώ το τύλιγμα υψηλής τάσης και μικρής έντασης θα έχει μεγάλο αριθμό σπειρών και αγωγό μικρής διατομής.

Με αμελητέες τις απώλειες του μετασχηματιστή, η ισχύς  $P_1$  που απορροφά το πρωτεύον από το δίκτυο είναι περίπου ίση με την ισχύ  $P_2$  που δίνει το δευτερεύον

$$P_1 = P_2 \quad \text{ή} \quad U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

Και με βάση τις σχέσεις υπολογισμού των μεγεθών του δευτερεύοντος

$$U_2 I_2 = U_1 I_1 \quad \text{οπότε} \quad \cos \varphi_1 = \cos \varphi_2$$

δηλαδή η φασική απόκλιση μεταξύ έντασης και τάσης στο πρωτεύον είναι ίση με αυτή που προκύπτει από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου του μετασχηματιστή

Καθένα από τα δύο τυλίγματα ενός πραγματικού μετασχηματιστή έχει ορισμένη ωμική αντίσταση και δημιουργεί ορισμένη ροή σκέδασης, με αποτέλεσμα όταν ο



μετασχηματιστής εργάζεται υπό φορτίο να δημιουργείται σε κάθε τύλιγμά του πτώση τάσης. Έτσι η τάση  $U_2$  υπό φορτίο ποτέ δεν είναι ίση με την τάση του δευτερεύοντος στο κενό.

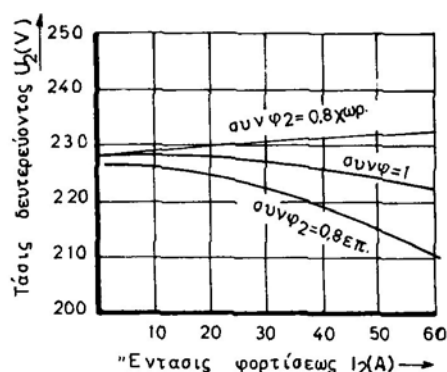
Η μεταβολή της τάσης του δευτερεύοντος από την λειτουργία στο κενό μέχρι την λειτουργία στο ονομαστικό φορτίο λέγεται διακύμανση τάσης και εκφράζεται σαν επι τοις εκατό ποσοστό της τάσης του δευτερεύοντος στο ονομαστικό φορτίο.

Επειδή στην λειτουργία στο κενό η τάση του δευτερεύοντος είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη, η διακύμανση τάσης θα είναι

$$\varepsilon\% = \frac{E - U_{2N}}{U_{2N}} 100\%$$

Το μέγεθος της  $\varepsilon\%$  ενός μετασχηματιστή είναι χαρακτηριστικό της ποιότητάς του και συνήθως δεν ξεπερνά το 5% για μετασχηματιστές μέσου και μεγάλου μεγέθους.

Χαρακτηριστική υπό φορτίο ενός μετασχηματιστή ονομάζεται η καμπύλη που δείχνει πως μεταβάλλεται η τάση του δευτερεύοντός του όταν μεταβάλλεται το φορτίο του, ενώ η τάση του πρωτεύοντος και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου παραμένουν σταθερά. Το Σχήμα 3.9 δίνει τις χαρακτηριστικές υπό φορτίο ενός μετασχηματιστή για τρεις διάφορους συντελεστές ισχύος του φορτίου. Γενικά η τάση υπό φορτίο είναι μικρότερη της τάσης λειτουργίας στο κενό εκτός αν το φορτίο είναι πυκνωτής.



Σχήμα 3.9 Χαρακτηριστικές υπό φορτίο μετασχηματιστή

Ένα άλλο χρήσιμο μέγεθος του μετασχηματιστή είναι η τάση βραχυκύκλωσης που ορίζεται από την σχέση

$$u_k = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} 100\%$$

όπου  $U_{1K}$  η τάση στο πρωτεύον όταν το βραχυκυκλωμένο δευτερεύον διαρρέεται από το ονομαστικό ρεύμα  $I_{2N}$ . Η τάση βραχυκύκλωσης καθορίζει την διανομή των φορτίων σε παράλληλα λειτουργούντες μετασχηματιστές και συνήθως δεν ξεπερνά το 6 με 7%.

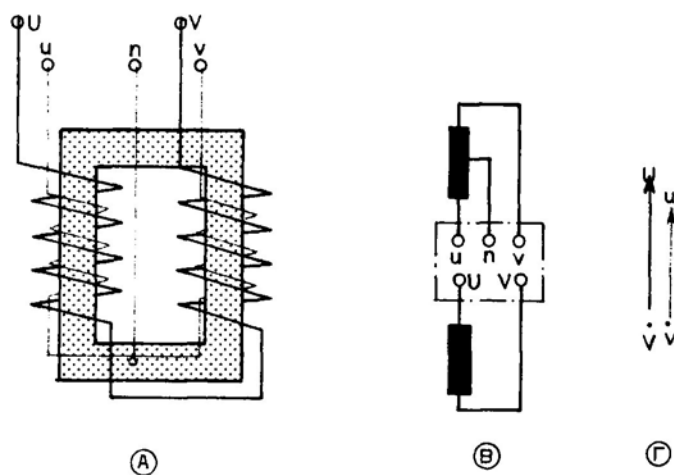
Με γνωστή την τάση βραχυκύκλωσης είναι δυνατό να υπολογισθεί η πιθανή ένταση βραχυκύκλωσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή όταν το πρωτεύον τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση από την σχέση

$$I_{2K} = \frac{I_{2N}}{u_K} 100$$

### 3.6 Συνδεσμολογία τυλιγμάτων

#### Μονοφασικοί μετασχηματιστές

Το Σχήμα 3.10 παριστάνονται διάφορες σχεδιάσεις της συνδεσμολογίας ενός μονοφασικού μετασχηματιστή που θεωρούνται τοποθετημένα στους δύο κορμούς του πυρήνα.

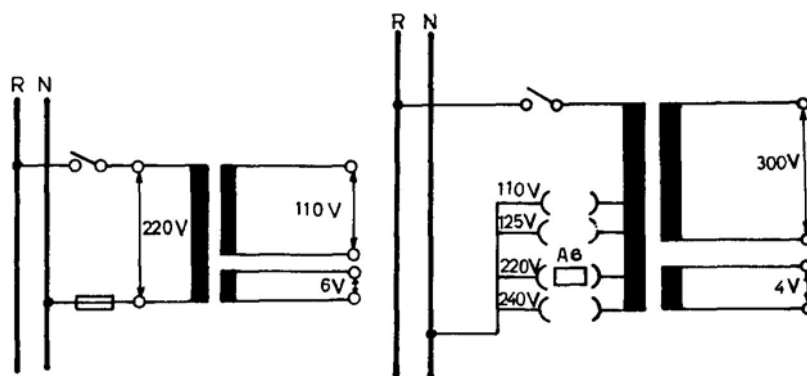


Σχήμα 3.10 Συνδεσμολογία τυλιγμάτων μονοφασικού μετασχηματιστή

Οι ακροδέκτες υψηλής τάσης σημειώνονται με τα κεφαλαία γράμματα U και V (ή A και B ή  $H_1$  και  $H_2$ ) και οι ακροδέκτες του τυλίγματος χαμηλής τάσης με τα μικρά γράμματα u και v (ή a και b ή  $x_1$  και  $x_2$ ). Εάν υπάρχει και μεσαία λήψη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10, ο αντίστοιχος ακροδέκτης τοποθετείται μεταξύ των άλλων και σημειώνεται με τα μικρά γράμματα n ή  $n_p$  ή  $x_0$ .

Απέναντι από τον ακροδέκτη U της υψηλής τοποθετείται ο ακροδέκτης u της χαμηλής που έχει την ίδια πολικότητα με τον U.

Στους μετασχηματιστές με μεσαία λήψη, μεταξύ του ακροδέκτη n και ενός από τους άλλους δύο ακροδέκτες u και v υπάρχει η μισή τάση του δευτερεύοντος, οπότε ο μετασχηματιστής δίνει δύο τάσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Με τον ίδιο τρόπο είναι δυνατό να υπάρχουν περισσότερες από μία λήψεις στο δευτερεύον τύλιγμα με αποτέλεσμα να μπορούν να ληφθούν περισσότερες τάσεις με μεγέθη που εξαρτώνται από τον αριθμό των σπειρών του αντίστοιχου σημείου λήψης. Σε περιπτώσεις που στο δευτερεύον πρέπει να υπάρχουν τάσεις ανεξάρτητες μεταξύ τους ή το πρωτεύον τύλιγμα να μπορεί να τροφοδοτηθεί με περισσότερες τάσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετασχηματιστές ανάλογοι εκείνου του Σχήματος 3.11.

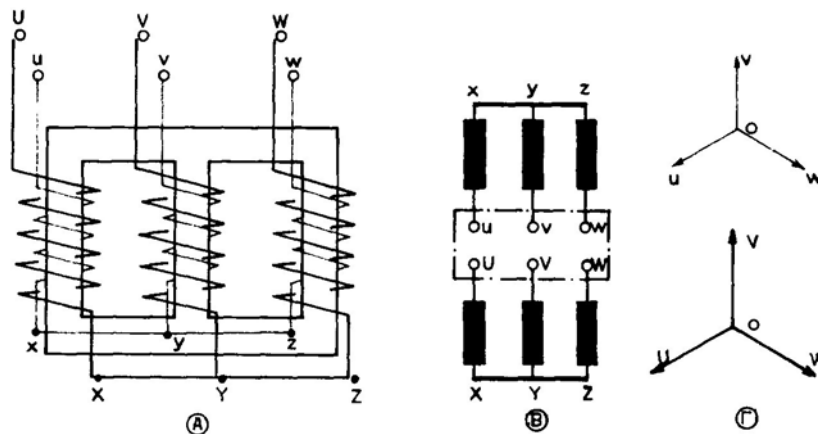


Σχήμα 3.11 Μετασχηματιστές με πολλαπλά τυλίγματα

Η τάση των δικτύων διανομής, λόγω των διαφόρων πτώσεων τάσεως δεν είναι παντού η ίδια. Για να μην επιδρά αυτή η ανομοιομορφία στις τάσεις δευτερεύοντος των μετασχηματιστών διανομής, τα πρωτεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών της ΔΕΗ κατασκευάζονται με λήψεις στο πρωτεύον που με κυμαινόμενες τάσεις σε ορισμένα όρια, τους επιτρέπουν να δίνουν την ίδια τάση στο δευτερεύον. Έτσι αν οι λήψεις είναι πχ.  $\pm 5\%$  και  $\pm 2.5\%$  στα 15kV αυτό επιτρέπει την λειτουργία με τάσεις 14250V ως 15750V. Η αλλαγή των λήψεων μπορεί να γίνεται είτε όταν ο μετασχηματιστής είναι εκτός λειτουργίας ή ακόμα και υπό λειτουργία σε άλλες περιπτώσεις ή και αυτόματα ανάλογα με την μεταβολή της τάσης του δικτύου.

### Τριφασικοί μετασχηματιστές

Στο Σχήμα 3.12 φαίνεται η τοποθέτηση των τριών τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης ενός τριφασικού μετασχηματιστή σε συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα.



Σχήμα 3.12 Τριφασικός μετασχηματιστής σε συνδεσμολογία αστέρα – αστέρα

Τα ελεύθερα άκρα των τριών φάσεων υψηλής έχουν συνδεθεί στους αντίστοιχους ακροδέκτες του καλύμματος του μετασχηματιστή που χαρακτηρίζονται με κεφαλαία γράμματα U, V, W (ή A, B, C ή H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>). Αντίστοιχα οι τρεις ακροδέκτες χαμηλής τάσης χαρακτηρίζονται με τα μικρά γράμματα u, v, w (ή a, b, c ή x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>). Οι συνδέσεις των άκρων X, Y, Z και x, y, z γίνονται μέσα στον μετασχηματιστή και σχηματίζουν τους ουδέτερους κόμβους. Σε ορισμένους μετασχηματιστές οι ουδέτεροι

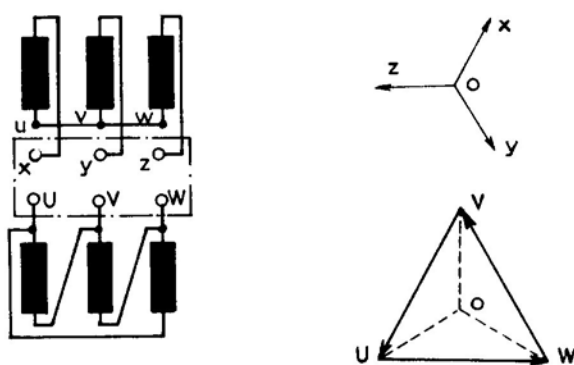
αυτοί κόμβοι συνδέονται με ιδιαίτερους ακροδέκτες στο κάλυμμα, οι οποίοι φέρουν τότε το γράμμα N (ή M<sub>p</sub> ή H<sub>0</sub>) για την υψηλή και n (ή m<sub>p</sub> ή x<sub>0</sub>) για την χαμηλή.

Στην συνδεσμολογία αστέρα ισχύουν οι γνωστές σχέσεις

$$U_{\phi} = U/1.73 \text{ και } I_{\phi} = I$$

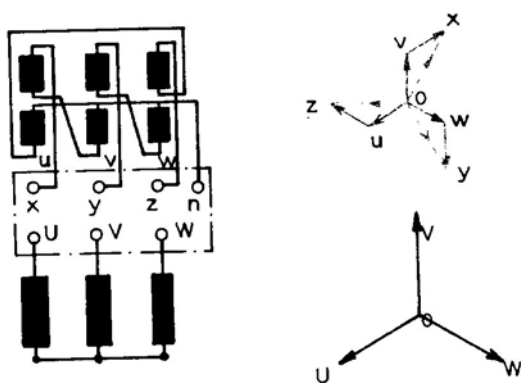
Στο Σχήμα 3.13 φαίνεται η τοποθέτηση των τυλιγμάτων μετασχηματιστή με συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα (υψηλή – χαμηλή). Στην περίπτωση αυτή η πολική τάση του δικτύου εφαρμόζεται στην φάση του τυλίγματος υψηλής οπότε ισχύουν οι σχέσεις

$$U_{\phi} = U \text{ και } I_{\phi} = I/1.73$$



Σχήμα 3.13 Τριφασικός μετασχηματιστής με συνδεσμολογία τριγώνου – αστέρα.

Στα τριφασικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με ουδέτερο, πολλές φορές χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές υποβιβασμού που έχουν το δευτερεύον τους συνδεδεμένο σε συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα (ζίγκ – ζάγκ). Στην περίπτωση αυτή το τύλιγμα χαμηλής τάσης κάθε κορμού είναι χωρισμένο σε δύο τμήματα και το κάθε τμήμα συνδέεται σε σειρά με άλλο τμήμα του τυλίγματος χαμηλής τάσης άλλου κορμού. Ένας τέτοιος μετασχηματιστής φαίνεται στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14 Τριφασικός μετασχηματιστής αστέρα – τεθλασμένου αστέρα

Το τύλιγμα δευτερεύοντος σε τεθλασμένο αστέρα απαιτεί λίγο περισσότερες σπείρες αλλά η συνδεσμολογία αυτή είναι χρήσιμη ώστε να εξομαλύνει την ανομοιομορφία φόρτισης που μπορεί να εμφανίζεται στην φόρτιση των τριών φάσεων αλλά και

υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής ουδετέρου που είναι απαραίτητη σε τριφασικά δίκτυα διανομής τεσσάρων αγωγών.

**Κατάταξη τριφασικών μετασχηματιστών σε ομάδες**

Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται όλες οι πρακτικά χρησιμοποιούμενες συνδεσμολογίες και περιέχεται τόσο ο σχετικός διεθνής συμβολισμός όσο και τα αντίστοιχα διανυσματικά διαγράμματα και οι συνδεσμολογίες των τυλιγμάτων.

**Π Ι Ν Α Κ Σ 2.7.1**  
**Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών**

Όμας	Συμβολισμός	Διανυσματικών διαγράμματα		Συνδεσμολογία	
		Υ.Τ.	Χ.Τ.	Υ.Τ.	Χ.Τ.
0	Dd 0				
	Yy 0				
	Dz 0				
5	Dy 5				
	Yd 5				
	Yz 5				
6	Dd 6				
	Yy 6				
	Dz 6				
11	Dy 11				
	Yd 11				
	Yz 11				

Πίνακας 3.1 Συνδεσμολογίες τριφασικών μετασχηματιστών

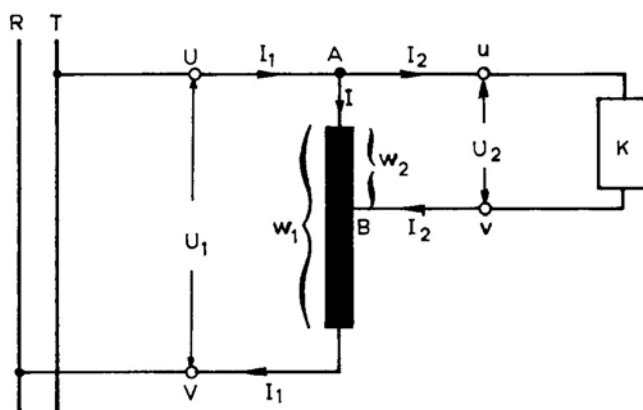
Τα γράμματα που χρησιμοποιούνται δίνουν και το αντίστοιχο είδος συνδεσμολογίας με κεφαλαία για την υψηλή και μικρά για την χαμηλή τάση. Έτσι

D, d συνδεσμολογία τριγώνου  
 Y, y συνδεσμολογία αστέρα  
 Z, z συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα

Μετά τα δύο γράμματα ακολουθεί αριθμός (0, 5, 6, 11) που είναι ο αριθμός της ομάδας στην οποία ανήκει ο μετασχηματιστής και έχει την εξής σημασία. Αν ο αριθμός πολλαπλασιασθεί με  $30^\circ$  δίνει την γωνία κατά την οποία τα διανύσματα των τάσεων χαμηλής καθυστερούν ως προς τα αντίστοιχα διανύσματα των τάσεων υψηλής τάσης.

### 3.7 Αυτομετασχηματιστές

Μονοφασικός αυτομετασχηματιστής είναι ο μετασχηματιστής που έχει μόνο ένα τύλιγμα, του οποίου τα άκρα αποτελούν τους ακροδέκτες U και V της υψηλής τάσης. Οι ακροδέκτες u και v της χαμηλής τάσης είναι συνδεδεμένοι με το ένα άκρο A του τυλίγματος και με μία ενδιάμεση λήψη B όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Άρα το τμήμα AB του τυλίγματος ανήκει και στο πρωτεύον και στο δευτερεύον.



Σχήμα 3.15 Συνδεσμολογία μονοφασικού αυτομετασχηματιστή.

Όλες οι σχέσεις τάσεων και ρευμάτων του μονοφασικού μετασχηματιστή ισχύουν και για τον μονοφασικό αυτομετασχηματιστή, αλλά το κοινό τμήμα διαρρέεται από την διαφορά των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος και για τον λόγο αυτό κατασκευάζεται από αγωγό μικρότερης διατομής. Οι αυτομετασχηματιστές έχουν ένα βασικό μειονέκτημα που αφορά το ότι το τύλιγμα χαμηλής τάσης δεν είναι μονωμένο από την πλευρά υψηλής, πράγμα που συνεπάγεται κινδύνους στην χρήση τους.

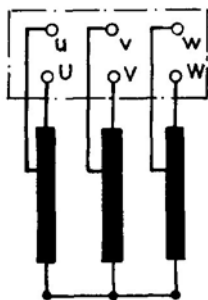
Στο Σχήμα 3.16 φαίνεται τριφασικός αυτομετασχηματιστής με ένα τύλιγμα ανά κορμό.

### 3.8 Χαρακτηριστικά στοιχεία μετασχηματιστών

Στην πινακίδα που φέρει κάθε μετασχηματιστής, εκτός του ονόματος του εργοστασίου κατασκευής και του αριθμού κατασκευής γράφονται και τα στοιχεία :

α) η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή σε VA ή KVA. Είναι η φαινομένη ισχύς την οποία μπορεί να αποδίδει συνεχώς στο δευτερεύον υπό ονομαστική τάση χωρίς

κίνδυνο υπερθέρμανσης όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος δεν ξεπερνά ορισμένα όρια.



Σχήμα 3.16 Τριφασικός αυτομετασχηματιστής.

β) ο αριθμός φάσεων του μετασχηματιστή

γ) η ονομαστική συχνότητα

δ) η ονομαστική τάση πρωτεύοντος και η ονομαστική τάση δευτερεύοντος για την λειτουργία στο κενό σε V. Πχ. όταν η πινακίδα γράφει 20000-231/400V αυτό σημαίνει ότι όταν το πρωτεύον τροφοδοτηθεί με τάση 20KV θα δώσει στο δευτερεύον στο κενό φασική τάση 231V και πολική τάση 400V. Σε ορισμένους μετασχηματιστές αντί της τάσης στο κενό στο δευτερεύον δίνεται η τάση στο ονομαστικό φορτίο.

ε) η τάση βραχυκύκλωσης σε %

στ) η ομάδα στην οποία ανήκει από άποψη συνδεσμολογίας ο μετασχηματιστής πχ Dd1.

Η πινακίδα δεν γράφει συνήθως τις ονομαστικές εντάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αλλά είναι εύκολο να υπολογισθούν από την ονομαστική ισχύ και τις αντίστοιχες ονομαστικές τάσεις.

### **3.9 Βαθμός απόδοσης μετασχηματιστή**

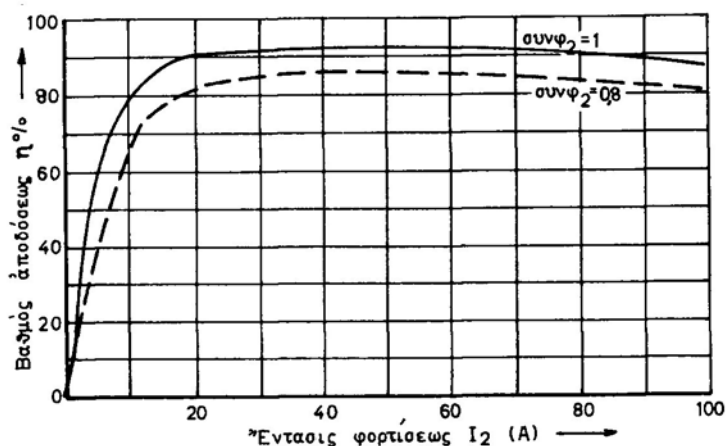
Εφόσον ο μετασχηματιστής δεν έχει κινούμενα μέρη δεν θα έχει και μηχανικές απώλειες, έχει όμως ηλεκτρικές απώλειες ( $P_\eta$ ) λόγω θέρμανσης των τυλιγμάτων και μαγνητικές απώλειες που εδώ λέγονται απώλειες σιδήρου ( $P_\sigma$ ).

Σαν βαθμός απόδοσης ορίζεται ο λόγος της πραγματικής ισχύος που αποδίδεται στο φορτίο του δευτερεύοντος προς την πραγματική ισχύ που απορροφά το πρωτεύον τυλίγμα όταν αυτό τροφοδοτείται από την ονομαστική του τάση

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_\eta + P_\sigma}$$

Έτσι για να προσδιορισθούν οι ακριβείς συνθήκες κάτω από τις οποίες ισχύει ένας ορισμένος βαθμός απόδοσης, πρέπει να είναι γνωστή η ένταση φόρτισης του δευτερεύοντος και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου.

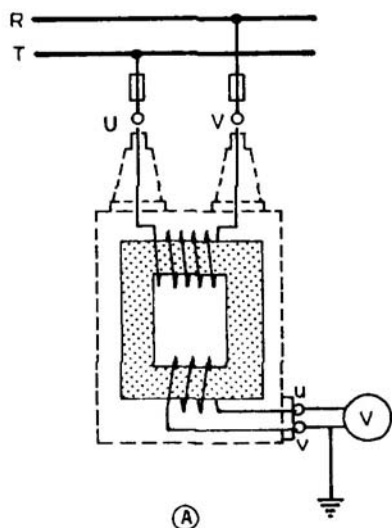
Στο Σχήμα 3.17 φαίνεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης ενός μετασχηματιστή όταν μεταβάλλεται η ένταση φορτίου του δευτερεύοντος με σταθερό συντελεστή ισχύος. Σε κάθε περίπτωση ο μέγιστος βαθμός απόδοσης βρίσκεται κοντά στο ονομαστικό φορτίο του μετασχηματιστή.



Σχήμα 3.17 Μεταβολή βαθμού απόδοσης μετασχηματιστή

### 3.10 Μετασχηματιστές μετρήσεων

Όλοι οι μετασχηματιστές που εξετάστηκαν προηγουμένα λέγονται μετασχηματιστές ισχύος για να διακρίνονται από τους μετασχηματιστές μετρήσεων που χρησιμεύουν μόνο για να υποβιβάζουν κατά ένα γνωστό λόγο μια τάση ή ένα ρεύμα που πρέπει να μετρηθούν. Ανάλογα με τον προορισμό τους οι μετασχηματιστές μετρήσεων διακρίνονται σε μετασχηματιστές τάσης και μετασχηματιστές έντασης.



Σχήμα 3.18 Συνδεσμολογία μονοφασικού μετασχηματιστή τάσης.

### **Μετασχηματιστές τάσης**

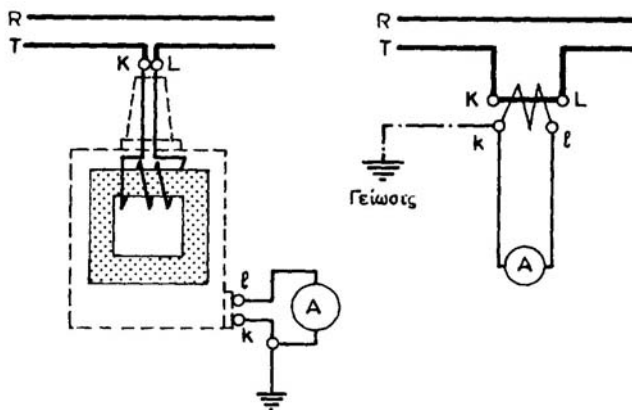
Το πρωτεύον τύλιγμα συνδέεται στους ακροδέκτες της προς μέτρηση υψηλής τάσης ενώ στο δευτερεύον συνδέονται οι ακροδέκτες του βολτομέτρου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.18.



Οι μετασχηματιστές αυτοί εργάζονται με πολύ μικρό φορτίο, σχεδόν στο κενό διότι πρέπει να τροφοδοτήσουν μόνο το πολύ μικρό ρεύμα του βολτομέτρου που έχει πολύ μεγάλη αντίσταση. Πρέπει να διατηρούν αυστηρά σταθερή σχέση μεταφοράς σε όλη την κλίμακα της μέτρησης, ένας ακροδέκτης χαμηλής τάσης γειώνεται και πάντα τοποθετούνται ασφάλειες στην σύνδεση πρωτεύοντος με την υψηλή τάση.

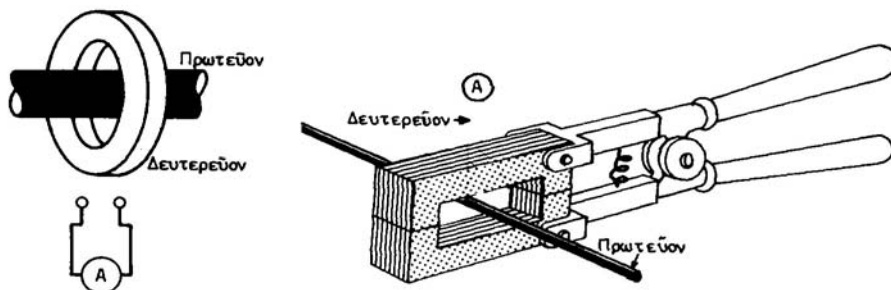
### Μετασχηματιστές έντασης

Το πρωτεύον των μετασχηματιστών έντασης συνδέεται σε σειρά στο κύκλωμα του οποίου απαιτείται η μέτρηση της έντασης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19. Στο δεξιό μέρος του σχήματος φαίνεται η συμβολική παράσταση του μετασχηματιστή έντασης.



Σχήμα 3.19 Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης.

Η σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή έντασης πρέπει να είναι πολύ μικρή, όπως είναι η αντίσταση ενός αμπερομέτρου συνεχούς ρεύματος, οπότε το πρωτεύον έχει λίγες σπείρες αγωγού με διατομή ικανή να φέρει το προς μέτρηση ρεύμα. Σε περιπτώσεις μεγάλων εντάσεων το πρωτεύον αποτελείται μόνο από έναν αγωγό που φέρει το προς μέτρηση ρεύμα και το δευτερεύον έχει την μορφή κυλινδρικού δακτυλίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.20 ή αποτελείται από δύο μισά που ανοίγουν όπως η αρπάγη μέσα από την οποία περνά ο αγωγός το ρεύμα του οποίου πρέπει να μετρηθεί.



Σχήμα 3.20 Μετασχηματιστές έντασης για μέτρηση μεγάλων εντάσεων

Σε κάθε περίπτωση, το δευτερεύον τύλιγμα ποτέ δεν πρέπει να μένει ανοικτό όταν το πρωτεύον διαρρέεται από ρεύμα διότι στα άκρα του δευτερεύοντος δημιουργείται μεγάλη επικίνδυνη τάση.