

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

ΗΛΕΚΤΡΟΠΛΗΞΙΑ-ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΚΑΙ ΠΩΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΖΕΤΑΙ

Η επαφή με ηλεκτρικές διατάξεις περικλείει κινδύνους για τη ζωή και την υγεία του ανθρώπου. Οι κίνδυνοι είναι ιδιαίτερα αυξημένοι για όσους εργάζονται ή πειραματίζονται επί ηλεκτρικών διατάξεων, επειδή η συχνή επαφή και η ρουτίνα μειώνουν την προσοχή και αυξάνουν την πιθανότητα ατυχήματος.

Η αιτία της ηλεκτροπληξίας είναι η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ δύο σημείων του ανθρώπινου σώματος. Όμως, αυτό που την καθιστά επικίνδυνη είναι η ένταση και η χρονική διάρκεια του ηλεκτρικού ρεύματος που προκαλείται, ιδιαίτερα στην περιοχή της καρδιάς.

Στις χαμηλές τάσεις (50 V μέχρι 1000 V) διακρίνουμε τις παρακάτω περιοχές εντάσεων:

α) Ρεύματα από 1 mA μέχρι 10 mA προκαλούν μόνον ακίνδυνες μυϊκές συσπάσεις.

β) Ρεύματα από 10 mA μέχρι 25 mA δεν είναι επικίνδυνα, εκτός αν διαρκούν πολύ, για παράδειγμα μερικά λεπτά της ώρας.

γ) Ρεύματα από 25 mA μέχρι 75 mA είναι επικίνδυνα. Όταν διαρκούν περισσότερο από 30 sec, είναι θανατηφόρα, επειδή προκαλούν τη διακοπή της λειτουργίας της καρδιάς.

δ) Ρεύματα μεγαλύτερα από 75 mA προκαλούν τον θάνατο, ακόμη και αν διαρκέσουν κλάσματα του δευτερολέπτου.

Η διέλευση ρεύματος από το ανθρώπινο σώμα επί μεγάλο χρονικό διάστημα ή ρεύματος μεγάλης έντασης προκαλεί εγκαύματα περισσότερο ή λιγότερο σοβαρά. Η επίδραση που έχει το ηλεκτρικό ρεύμα εξαρτάται από τη φύση του. Το εναλλασσόμενο ρεύμα προκαλεί συσπάσεις των μυών και νευρικά χocs. Το συνεχές ρεύμα προκαλεί ηλεκτρολυτική διάσπαση των φυσιολογικών υγρών του σώματος. Οι υψηλές τάσεις προκαλούν σχεδόν πάντοτε ανακοπή της καρδιάς και εσωτερικά εγκαύματα.

Η αντίσταση της επιδερμίδας του ανθρώπινου σώματος κυμαίνεται από 5 kΩ μέχρι 100 kΩ, ανάλογα με τη θέση της στο σώμα και το είδος της επαφής με τον αγωγό (έντονη, απαλή επαφή κ.τ.λ.). Επειδή το όριο ασφαλείας είναι τα 10 mA, συμπεραίνουμε ότι τάσεις μικρότερες από

$$V = RI = 5000 \cdot 10^{-2} = 50 \text{ V}$$

είναι ακίνδυνες για τον άνθρωπο.

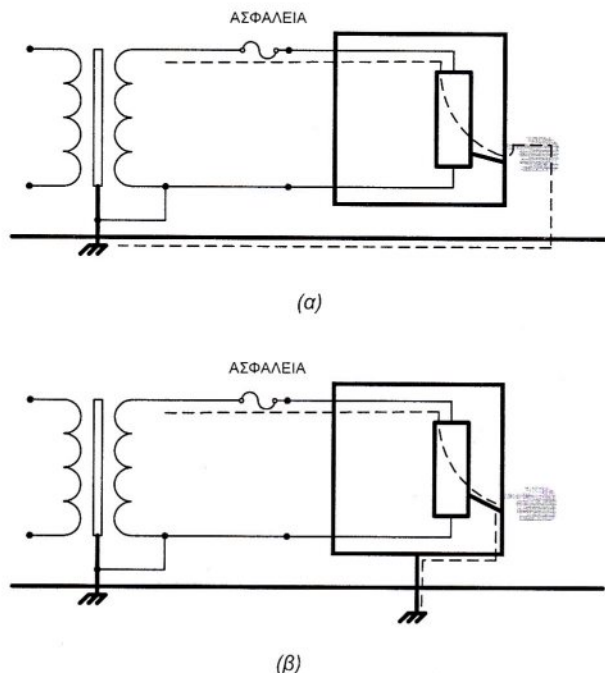
Τα παραπάνω ισχύουν υπό κανονικές συνθήκες. Όμως, αν το σώμα είναι ιδρωμένο ή βρεγμένο, τότε η αντίσταση της επιδερμίδας μειώνεται σημαντικά. Έχει αποδειχθεί ότι η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος στο ηλεκτρικό ρεύμα είναι συνάρτηση και της ψυχολογικής κατάστασης του ατόμου. Η κακή ψυχολογική κατάσταση και η κόπωση κάνουν τον άνθρωπο περισσότερο ευαίσθητο στον ηλεκτρισμό, αυξάνουν την πιθανότητα κακών χειρισμών και κατά συνέπεια αυξάνουν τους κινδύνους ηλεκτροπληξίας. Για τον περιορισμό ή την εξάλειψη των κινδύνων ηλεκτροπληξίας λαμβάνονται ορισμένα μέτρα. Τα σπουδαιότερα από αυτά είναι:

α) **Χρήση πηγών με τάση μικρότερη από 50 V.** Όπως αναφέρθηκε, οι τάσεις κάτω των 50 V είναι ακίνδυνες για τον άνθρωπο. Το μέτρο αυτό εφαρμόζεται σε εκπαιδευτικά εργαστήρια, για τον φωτισμό υπαίθριων χώρων κ.ά.

β) **Γείωση των μεταλλικών μερών των συσκευών που μπορούν να βρεθούν τυχαία υπό τάση.** Η γείωση προστατεύει από κινδύνους που οφείλονται στην καταστροφή των ηλε-

κτρικών μονώσεων. Όπως φαίνεται στο Σχ.1(α), αν η μόνωση του αγωγού καταστραφεί, τότε το περίβλημα της συσκευής έρχεται σε επαφή με τον αγωγό. Έτσι, αν κάποιος έρθει σε επαφή με το περίβλημα θα υποστεί ηλεκτροπληξία, επειδή μέσω αυτού θα κλείσει το κύκλωμα με τη γη. Αν η τάση είναι 220 V, τότε το ρεύμα που θα διέλθει από το ανθρώπινο σώμα θα είναι, υπό κανονικές συνθήκες, από 2,2 mA μέχρι 44 mA και ενδέχεται τα αποτελέσματα να είναι δυσάρεστα για τον άνθρωπο.

Αν το μεταλλικό περίβλημα της συσκευής είναι γειωμένο, όπως συμβαίνει στο Σχ.1(β), τότε η επαφή του αγωγού με το περίβλημα προκαλεί ένα βραχυκύκλωμα προς τη γη. Το περίβλημα έχει πάντοτε το δυναμικό της γης και το άτομο που θα έλθει σε επαφή με το περίβλημα δεν διατρέχει κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Επιπλέον, το έντονο ρεύμα διαρροής προς τη γη θα προκαλέσει την ενεργοποίηση των ασφαλειών της ηλεκτρικής εγκατάστασης (π.χ. τήξη φυσιγγίων ασφαλείας) και την διακοπή της παροχής. Η διακοπή της παροχής θα οδηγήσει στην αναζήτηση του σφάλματος και στη συνέχεια στον εντοπισμό του και στην αποκατάστασή του. Είναι προφανές ότι η αντίσταση του αγωγού σύνδεσης του περιβλήματος με τη γη πρέπει να παρουσιάζει πολύ μικρότερη αντίσταση από αυτήν του ανθρώπινου σώματος, διαφορετικά η γείωση δεν πα-
ρέχει καμιά προστασία.

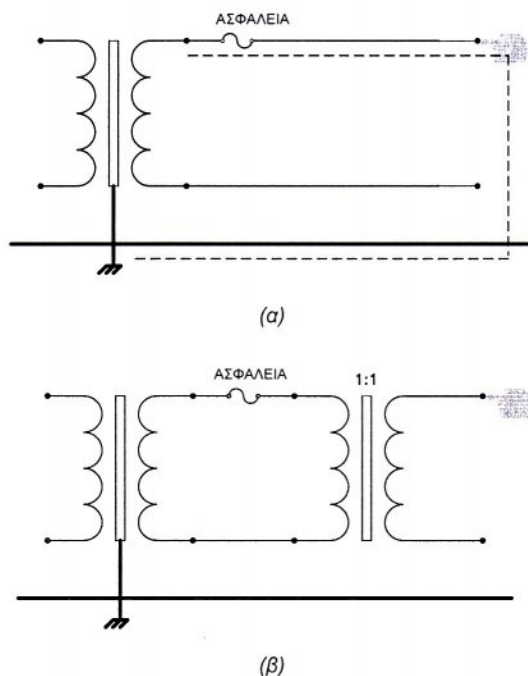


Σχήμα 1 Περιορισμός του κινδύνου ηλεκτροπληξίας με γείωση των μεταλλικών μερών των ηλεκτρικών συσκευών

γ) **Χρήση συσκευών διπλής προστασίας.** Οι συσκευές διπλής προστασίας έχουν διπλή μόνωση. Η μια μόνωση υπερτίθεται της άλλης και κατά συνέπεια η πιθανότητα ταυτόχρονης καταστροφής των μονώσεων είναι πολύ μικρή.

δ) **Χρήση μετασχηματιστών απομόνωσης.** Σ' ένα δίκτυο με γείωση, ηλεκτροπληξία προκαλείται με την επαφή ενός μόνον αγωγού. Όπως φαίνεται στο Σχ.2(α), το ανθρώπινο σώμα

κλείνει το κύκλωμα ανάμεσα στον αγωγό και στη γη. Η παρεμβολή ενός μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στο Σχ.2(β), προκαλεί τη γαλβανική απομόνωση του δικτύου. Για να προκληθεί ηλεκτροπληξία, απαιτείται πλέον η ταυτόχρονη επαφή και με τους δύο αγωγούς. Κάτι τέτοιο είναι λιγότερο πιθανό. Ο μετασχηματιστής που παρεμβάλλεται λέγεται *μετασχηματιστής απομόνωσης* και κατά κανόνα έχει λόγο μετασχηματισμού 1:1. Ο μετασχηματιστής απομόνωσης είναι το μέτρο προστασίας έναντι της ηλεκτροπληξίας, που χρησιμοποιείται στο εργαστήριό μας.



Σχήμα 2 Χρήση μετασχηματιστή απομόνωσης για προστασία από ηλεκτροπληξία

ε) **Χρήση ανιχνευτών ρεύματος διαρροής προς τη γη.** Όπως φαίνεται στα Σχ.1(α) και (β), η εμφάνιση ρεύματος διαρροής προς τη γη σημαίνει σφάλμα στην ηλεκτρική εγκατάσταση ή ηλεκτροπληξία. Ο ανιχνευτής ρεύματος διαρροής προς τη γη διακόπτει την παροχή, μόλις ανιχνεύσει ρεύμα διαρροής με ένταση μεγαλύτερη από κάποιο συγκεκριμένο όριο. Το όριο τίθεται ανάμεσα στα 10 mA και στα 30 mA περίπου.

Ο ανιχνευτής ρεύματος διαρροής είναι μια απλή και φθηνή συσκευή, που τοποθετείται στον ηλεκτρικό πίνακα, και εξασφαλίζει αποτελεσματική προστασία απέναντι στην ηλεκτροπληξία. Επιπλέον, ελέγχει και την καλή κατάσταση της ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Το γεγονός ότι το ευρύ καταναλωτικό κοινό δεν ενημερώνεται για την ύπαρξη και τις δυνατότητές των ανιχνευτών ρεύματος διαρροής μαζί με το γεγονός ότι η τοποθέτησή τους στις οικιακές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις δεν επιβάλλεται δια νόμου είναι δυστυχώς δείγμα πολύ χαμηλού πολιτιστικού επιπέδου, το οποίο δεν μας τιμά καθόλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θάνατοι από ηλεκτροπληξία είναι σημαντικά περισσότεροι από τους θανάτους που οφείλονται σ' όλες μαζί τις φυσικές καταστροφές (σεισμοί, πλημμύρες κ.ά.).

στ) **Αύξηση της αντίστασης του ανθρώπινου σώματος.** Η αύξηση της αντίστασης του ανθρώπινου σώματος επιτυγχάνεται *έμμεσα* με τη χρήση "*υποδημάτων με καπύματα εξ ελαστικού*", γαντιών και εργαλείων με κατάλληλη μόνωση. Αν το άτομο που υφίσταται ηλεκτροπληξία στο Σχ.1(α) φορούσε υποδήματα με σόλες από μονωτικό υλικό (καουτσούκ), τότε δεν θα μπορούσε να κλείσει το κύκλωμα ανάμεσα στον αγωγό της φάσης και τη γη, ώστε να υποστεί ηλεκτροπληξία.

Εφαρμόζοντας περισσότερα από ένα από τα προαναφερθέντα μέτρα μπορούμε να εξασφαλίσουμε υψηλό βαθμό προστασίας κατά της ηλεκτροπληξίας. Όμως, αν τύχει και βρεθούμε μάρτυρες ενός τέτοιου συμβάντος, πρέπει να ενεργήσουμε ως εξής:

1) Φροντίζουμε να διακόψουμε την επαφή ανάμεσα στο άτομο που έχει υποστεί την ηλεκτροπληξία και τον ρευματοφόρο αγωγό, *χωρίς να έλθουμε σε επαφή ούτε με το άτομο, ούτε με τον αγωγό.* Το καλύτερο που έχουμε να κάνουμε είναι να διακόψουμε την παροχή κατεβάζοντας τον γενικό διακόπτη της ηλεκτρικής εγκατάστασης. Αν ο γενικός διακόπτης δεν είναι εκείνη τη στιγμή εύκολα προσπελάσιμος, τότε φροντίζουμε ν' απομακρύνουμε το άτομο πιάνοντάς το μ' ένα μονωτικό μέσο, για παράδειγμα μ' ένα στεγνό και χοντρό ρούχο. *Σημειώνουμε ότι πρέπει να γνωρίζουμε πολύ καλά την ακριβή θέση του ηλεκτρικού πίνακα και των γενικών διακοπών της ηλεκτρικής εγκατάστασης του χώρου στον οποίο κατοικούμε, εργαζόμαστε ή πειραματιζόμαστε, ώστε να είμαστε σε θέση να επέμβουμε αποτελεσματικά, όταν χρειαστεί.* Ακόμη, είναι καλό να έχουμε σκηνοθετήσει ένα ατύχημα, ώστε να γνωρίζουμε τις ενέργειες που πρέπει να κάνουμε, αν τύχει και συμβεί κάτι δυσάρεστο.

2) Στη συνέχεια πρέπει να βοηθήσουμε το άτομο, που έπαθε ηλεκτροπληξία, ν' αναπνεύσει. *Άμεση συνέπεια της ηλεκτροπληξίας είναι τα συμπτώματα ασφυξίας.* Αν το άτομο έχει περιέλθει σε κώμα, πρέπει να του κάνουμε αμέσως τεχνική αναπνοή ή ακόμη και να του δώσουμε το φιλί της ζωής. Οι ενέργειες αυτές πρέπει να συνεχιστούν μέχρι να φθάσει ο γιατρός, που στο μεταξύ έχουμε φροντίσει να κληθεί, ο οποίος θα συνεχίσει τη παροχή πρώτων βοηθειών ή θα διαπιστώσει τον θάνατο του παθόντος. *Ποτέ δεν διακόπτουμε την παροχή των πρώτων βοηθειών, πριν ο γιατρός διαπιστώσει τον θάνατο.*

Αν το άτομο που έχει υποστεί ηλεκτροπληξία μείνει αβοήθητο, κινδυνεύει σε μεγάλο βαθμό από ασφυξία, ακόμη και αν κατάφερε μόνο του ν' απεμπλακεί από τον ρευματοφόρο αγωγό. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι ηλεκτρολογικές εργασίες και τα πειράματα με ηλεκτρισμό πρέπει να γίνονται από ομάδες δύο τουλάχιστον ατόμων. Τα άτομα που συνεργάζονται πρέπει να γνωρίζονται καλά μεταξύ τους, για να μπορούν να συνεννοούνται αποτελεσματικά και να συντονίζουν τις ενέργειές τους.

Το παρακάτω εκπαιδευτικό υλικό δίνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία του σχετικού εξοπλισμού του εργαστηρίου ΣΗΕ της Σχολής ΗΜΜΥ. Αν χρειάζεστε βοήθεια για την μετάφραση των όρων στα ελληνικά, δείτε στην τελευταία σελίδα.

GENERAL QUESTIONS ABOUT TRANSFORMERS:

1: *Transformer or autotransformer: what is the difference?*

The autotransformers have some coils with a common part: there is no separation of the circuits contrary to the transformer.

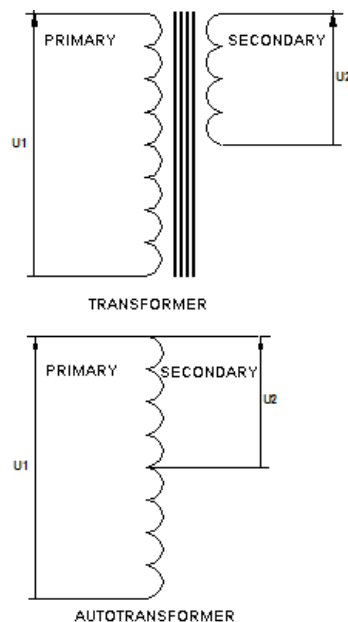


Figure 1

2: *What are the advantages of a insulation transformer (transformer with separated circuits)?*

This type of transformer is manufactured in a way to get a safety electrical separation between coils at the primary and secondary (source and use). In consequence, there is no electrocution hazard in case of defect on one phase (into the limit of the breaking voltage between the primary and the secondary).

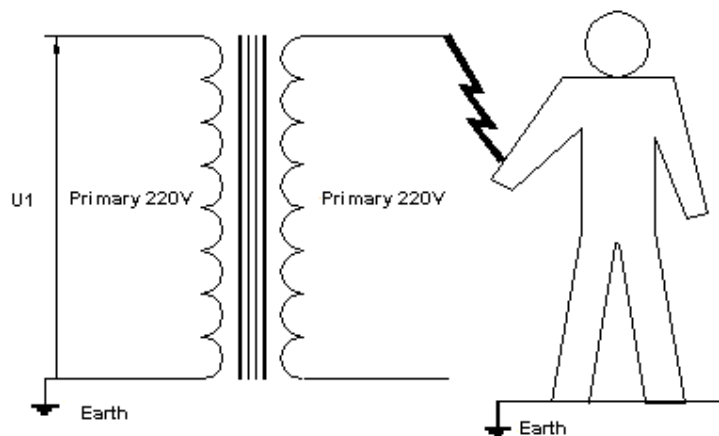


Figure 2

3: What are the advantages of a safety transformer ?

A safety transformer is made for the supply of a circuit, or a very low voltage appliance (below 50V).

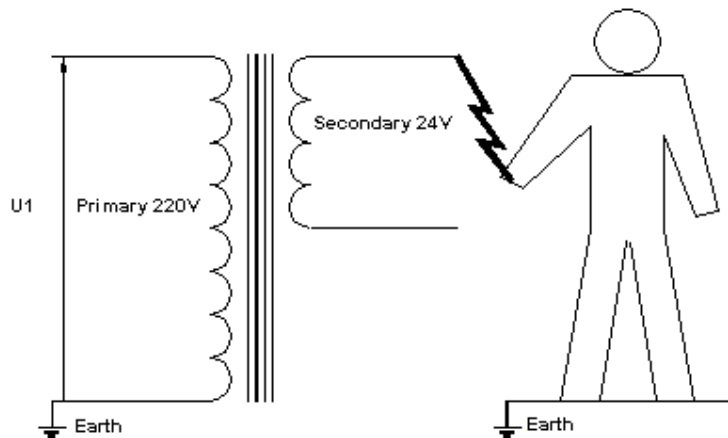


Figure 3

4: How the users are protected against indirect contacts?

The transformers are classified among three classes according the protection degree guarantee.

- **Class 0 transformer:**

This type of transformer has a functional isolation (for a suitable use and essential protection) without any device for the connection of electrical parts accessible for a protective conductor (earth wire). So, this type of transformer must be used inside a casing.

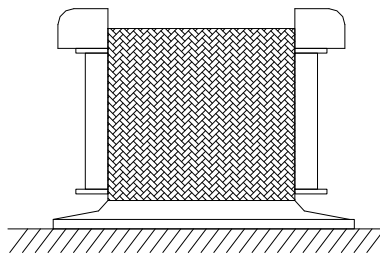


Figure 4

- **Class I transformer:**

This type of bare or covered transformer has a functional isolation and allows a connection of electrical parts accessible to the ground (earth wire).

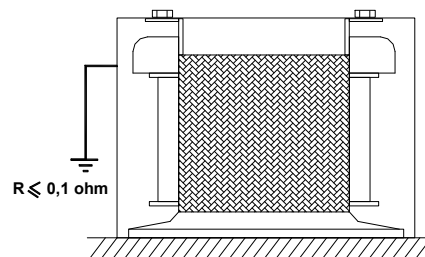


Figure 5

These appliances must be equipped with an earth socket of resistance lower or equal to 0,1 Ohm.

• **Class II transformer:**

For this type of transformer, the accessible parts are separated from the active parts for a double insulation or a reinforced insulation. The connection to a protective conductor is forbidden.

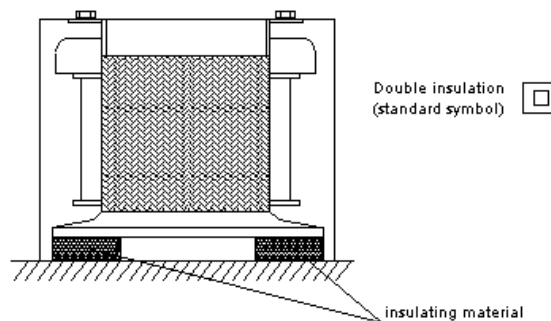


Figure 6

5: What are the maximum temperatures guaranteed by the insulation classes?

CLASS	TEMPERATURE in °C *
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	Above 180

*maximum limit of use

In general, the transformers are class E. The main features are done for an ambient temperature of 35 °C and an overheating of 85 °C.

6: Is it normal that a transformer gives out heat?

Yes, because unloaded or loaded, once the transformer is powered on, it works like a resistance. The Joule effect in the conductors and in the magnetization of the circuit gives out heat.

The temperatures are limited by the values set by the insulated classes.

7: What is exactly the rated power of a transformer?

The rated power is the apparent power, expressed in VA (Volts x Ampere) which is corresponding in rated conditions of use of voltage, current and frequency to Power Factor = 1.

The real power of use, expressed in Watts, depends on the Power Factor ($\cos \varphi$) of the studied wiring circuit.

$$P(W) = P(VA) \times \cos \varphi$$

8: What is the voltage drop in the case of a safety transformer?

It is the difference between the unloaded secondary voltage and the loaded secondary voltage. This value is expressed in %.

$$\Delta U\% = ((U_{\text{unloaded}}) - (U_{\text{loaded}})) / U_{\text{loaded}} \times 100$$

9: What is the short-circuit voltage (U_{cc}) of a transformer?

It is the voltage, expressed in percent (%) compared to the rated voltage at the primary, that is necessary to apply at the primary of the transformer to circulate the rated current at the primary when the secondary is in short-circuit.

The knowledge of this short-circuit voltage is useful for the calculation of the transformer protection and the one of the electrical line.

10: Is it possible to use 50Hz transformer in a 60Hz circuit?

Yes, this type of use creates light modifications in some specifications like for the unload current, the iron losses, but it is without major effect on the good working of the transformer.

11: What is the compensated reversibility?

If the “perfect” transformer is reversible, it is not the case for a real transformer. This one has a voltage drop due to losses.

To make a transformer reversible, turns must be added on one of the coils. This technology allows to compensate the voltage drop. This type of transformer is called transformer with compensated reversibility.

- Examples:

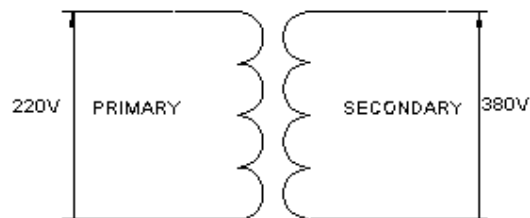
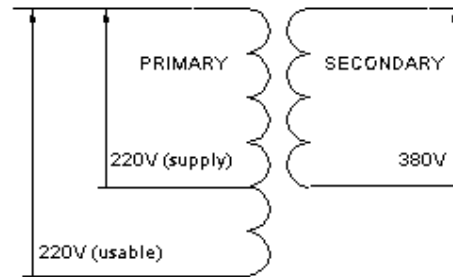
- Non-compensated transformer

Figure 7

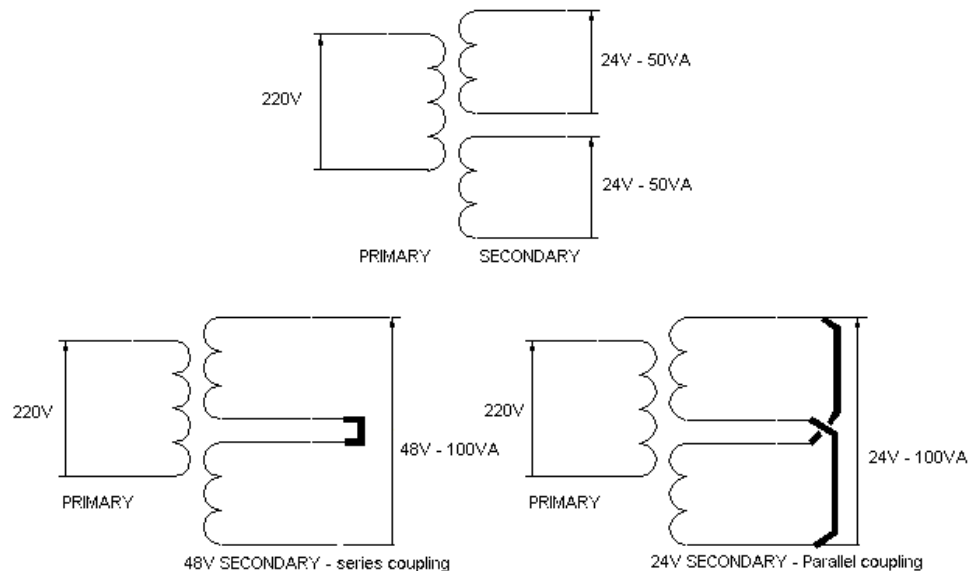
The supply in 220V at the primary will give 380V at the secondary. The supply 380V will give at maximum a voltage of 210V at the primary.

- Compensated transformer**Figure 8**

The supply in 220V at the primary will give 380V at the secondary. The supply in 380V will give a voltage of 220V on the usable connection (compensated).

12 : What is a couple series-parallel?

When there are two identical coils at the secondary, two different possibilities of connection are available: series or parallel.

**Figure 9****13: The impregnation process extends the useful life of a transformer: why?**

The purpose of the impregnation process is made to avoid the penetration of moisture by filling all chinks of the winding with a varnish. This treatment allows maintaining the insulation specifications and improving the thermal exchange.

14: What is the purpose of tropicalization?

This “tropicalization” is made upon special request.

The tropicalization is a set of treatments made to protect the equipment in special conditions of use as extreme climatic conditions, thermal stress, vibrations, shocks, etc.

Reminder about electro-magnetic inductance:

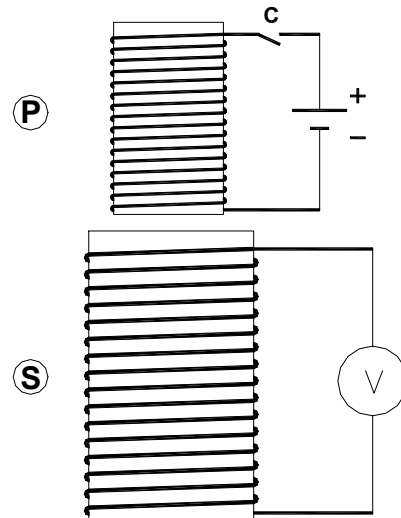


Figure 10

2 coils named P & S are assembled like in the picture above. The coil P is supplied by a DC supply and a voltmeter is placed in parallel on the safety sockets of the coil S.

During the opening or the closing of the switch C (so the current variation inside the coil P), we can see a variation of flux inside the coil S and the outbreak of an electromotive force detected by the voltmeter.

Now, the DC supply is replaced by an AC supply:

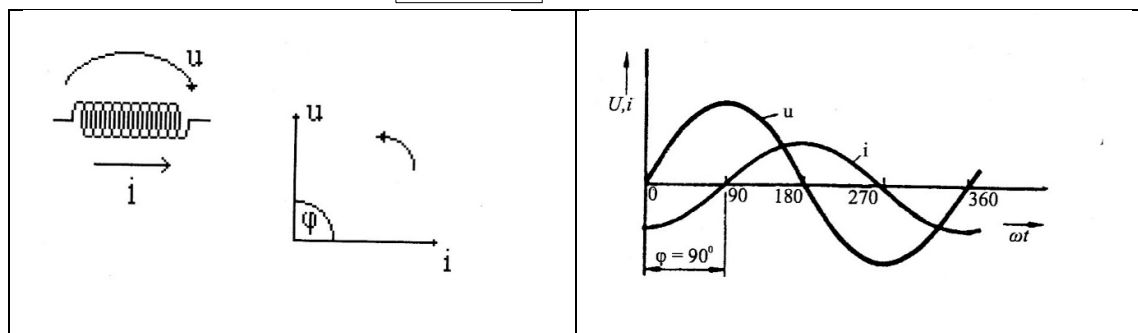
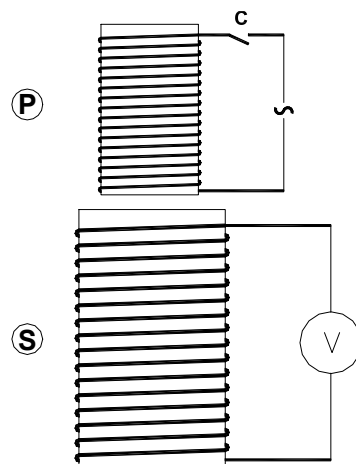


Figure 11 Η τάση στο πηνίο προηγείται του ρεύματος.

When the switch C is closed, the flux made through the coil P makes a flux through the coil S and the voltmeter indicates the production of a continuous alternative electromotive force.

This set made of a Primary coil P, and a Secondary coil S creates a transformer. In fact, the Primary coil is supplied by an alternative source and the Secondary coil is the place of an electromotive force.

A laminated magnetic circuit (stacking of soft steel sheets isolated from each others) allows to increase the magnetic effects and concentrates the lines of magnetic flux.

You can note that the induced electromotive force and the other electromotive force at the origin of this one have the same frequency.

We can say that a transformer is a static appliance, working only in alternative current. A transformer is mainly made up of:

- One magnetic laminated circuit (ελασματοποιημένος σιδηροπυρήνας)
- One Primary coil (Πηνίο εισόδου ή πρωτεύον)
- One Secondary coil (Πηνίο εξόδου ή δευτερεύον)

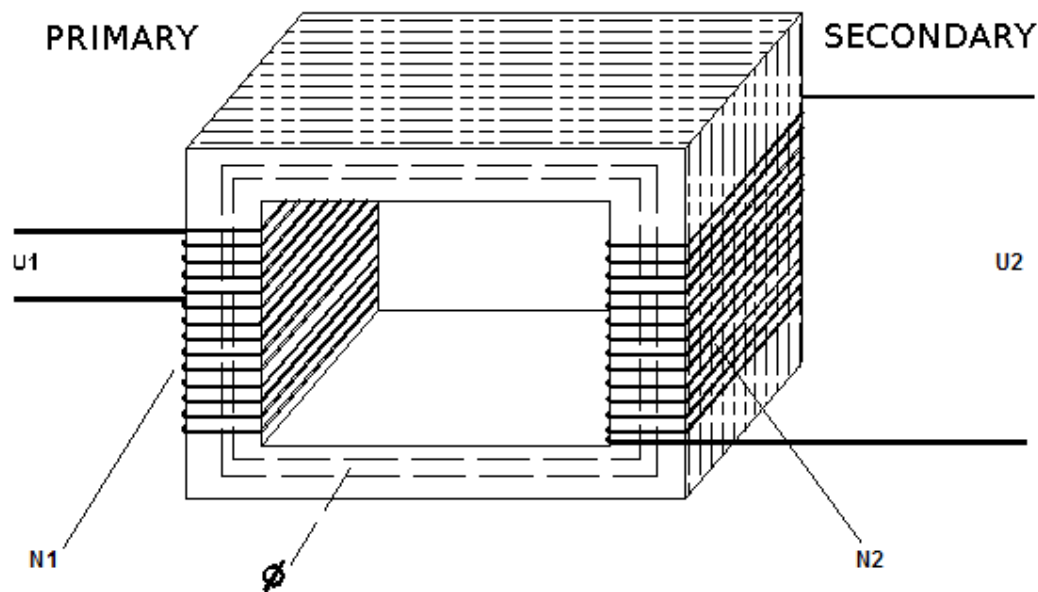


Figure 12

Representation of a transformer:

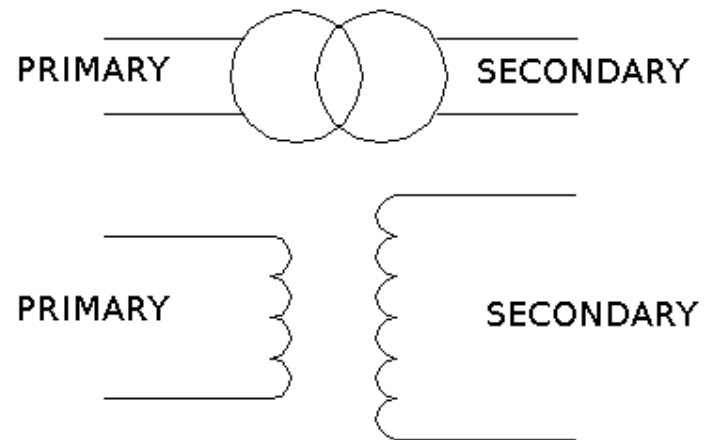


Figure 13

Electrical values chart

SYMBOL	Electrical quantity	UNIT
U1	Primary voltage	volts (V)
I1	Primary current	ampères (A)
U2	Secondary voltage	volts (V)
I2	Secondary current	ampères (A)
N1	Number of turns at the primary	
N2	Number of turns at the secondary	
L	Inductance	Henry(H)
θ	Flux in the magnetic circuit	Webers(Wb)
P	Apparent power of the transformer	watts (W)
S	Reactive power of the transformer	volts-ampères (VA)
η	Efficiency of the transformer	%
m	Transformation ratio of the transformer	
f	Mains network frequency	hertz (Hz)
$\cos\phi$	Power factor	

Study of the transformation ratio of a transformer

We say that N1 and N2 are the number of turns of the primary coil and the secondary coil, E1 and E2 is the “unload” voltage at the terminals of each coil. We call m, the «unload» transformation ratio or the ratio between the number of turns at the primary and the secondary.

$$m = E2 / E1 = N2 / N1$$

m is named “transformation ratio of a transformer”

We can note that:

- The coil with the higher voltage at its terminal is called: ‘HIGH VOLTAGE’
- The coil with the higher voltage at its terminal is called: ‘LOW VOLTAGE’

Working of an “unloaded” transformer

Because $m = E2 / E1$, we can write that the secondary voltage is: $E2 = m \times E1$

The current – at the secondary – is low compared to the rated current. The coil operates as a pure inductance of high value because it is fitted on a closed magnetic circuit.

The reactance X is very high ($X = L \times \omega$) with $\omega = 2 \pi f$

The unload current at the primary is called magnetizing current.

Working of a “loaded” transformer

- Secondary voltage:

The voltage drop at the secondary stays low. In consequence, we can write:

$$m = U_2 / U_1$$

- Power:

The different losses in a transformer are very low (perfect transformer), so the apparent and reactive powers at the primary and the secondary are in practice equal to:

$$P_2 \approx P_1$$

$$S_2 \approx S_1$$

- Power factor:

$$P_2 / S_2 \approx P_1 / S_1, \text{ we can deduce that } \cos\phi_1 = \cos\phi_2$$

- Secondary current:

If $S_1 \approx S_2$, we can deduce that $U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2$

By dividing by $U_1 \times I_2$ we reach this result:

$$I_1 / I_2 = U_2 / U_1 = m$$

So, we can say that:

$$m = I_1 / I_2 = U_2 / U_1 = N_2 / N_1$$

We say that a transformer is: voltage step-down when $U_2 < U_1$ and voltage step-up when $U_2 > U_1$

- Efficiency:

The efficiency is equal to: P_2 / P_1

The efficiency is more or less good according to the type of shape used for the magnetic sheet. Shapes are more or less efficient:

Some examples of single-phase magnetic circuits:

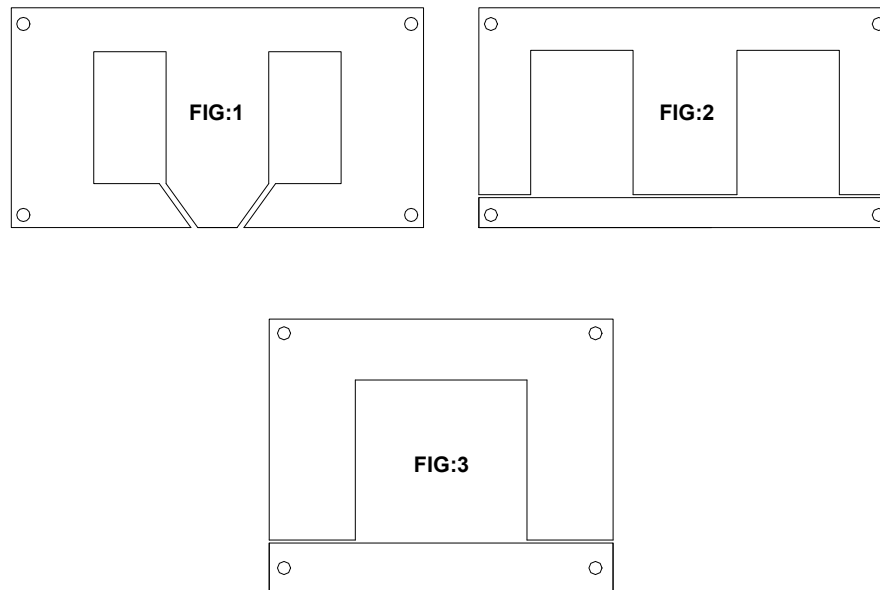


Figure 14 Ελασματοποιημένοι Πυρήνες Μ/Σ. Στα σχήματα FIG:1 και 2. Δείχνεται πυρήνας για κατασκευή Μ/Σ τύπου «μανδύα» (armour plated). Στο σχήμα FIG:3 τύπου «Πλαισίου» (2 columns shape).

In the case of diagram, FIG:1 and FIG:2 (armour-plated shape) the coils are concentric. Generally, the efficiency is higher than 70%.

In the case of diagram FIG:3 (2 columns shape), the coils are separated by the two cores. In this case, the efficiency is lower than 70%.

Conclusion

Of course, the above results are only valid in theory in the case of a supposed perfect transformer (that is to say that the power at the primary is totally released at the secondary).

This theoretical result is never reached because there are some losses:

- By hysteresis and Foucault current in the magnetic circuit
- By Joule effect
- By flux effect

User's manual of Experimental array "QUICK-G"

Description :

The QUICK-G is intended for the study of a single-phase 230V transformer with 3 secondary windings.

General presentation of the QUICK-G:

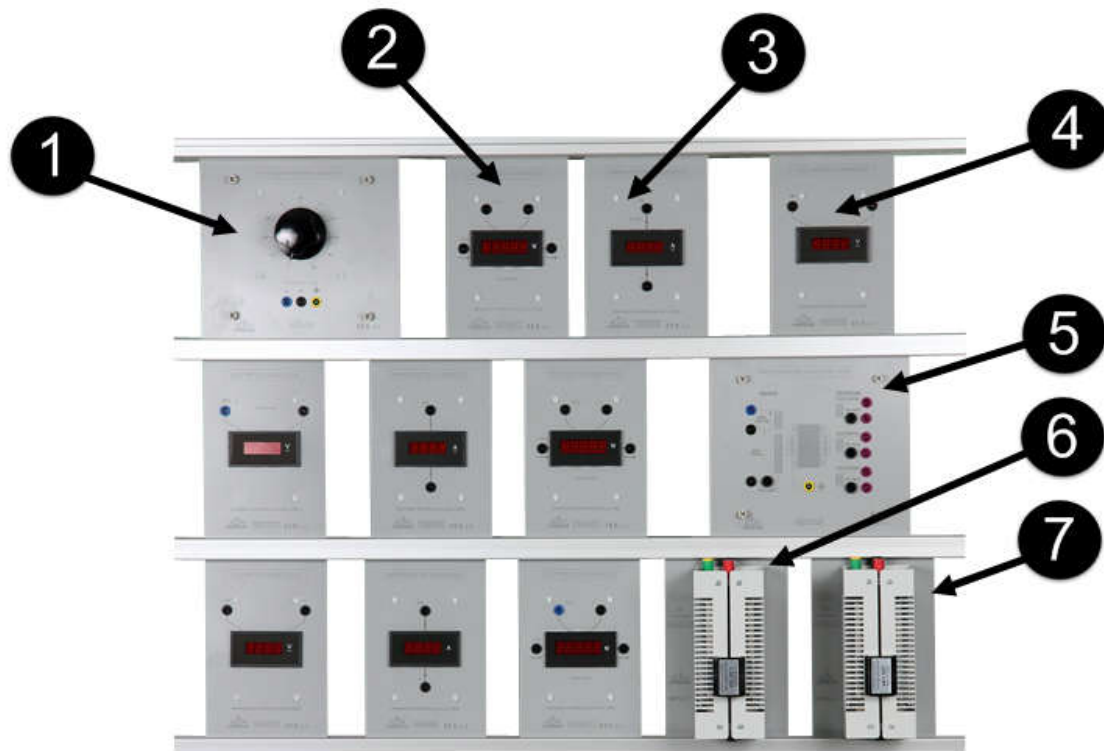


Figure 15

- 1) Autotransformer module variable from 0 to 250VAC – 5A.*
- 2) 3 Digital wattmeter modules 230VAC-5A.*
- 3) 3 Digital ammeter modules 5A.*
- 4) 3 Single-phase digital voltmeter modules 230VAC.*
- 5) Single Phase Transformer Module 140VA
 - Windings at the primary of 230V
 - A secondary winding of 15V/3.6A
 - 2 secondary windings of 12V/3.6A
 - Fuses protection (0.8A T 5x20 at primary ; 4A T 5x20 at secondary)
- 6) Variable rheostat module 0-220hm
- 7) 1 variable rheostat module 0-3.30hm

* These modules must be connected to a power outlet for their own power supply.

Nameplate of the transformer

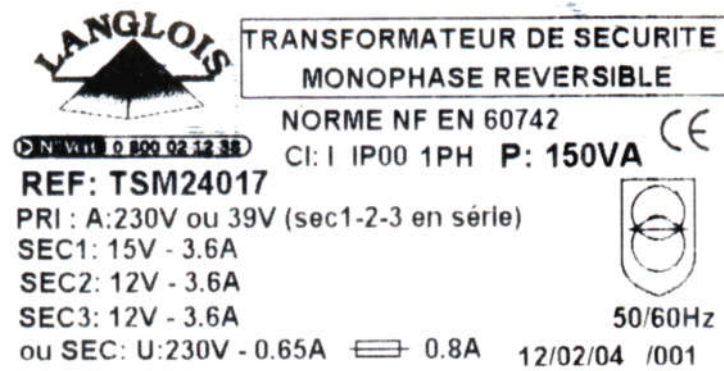
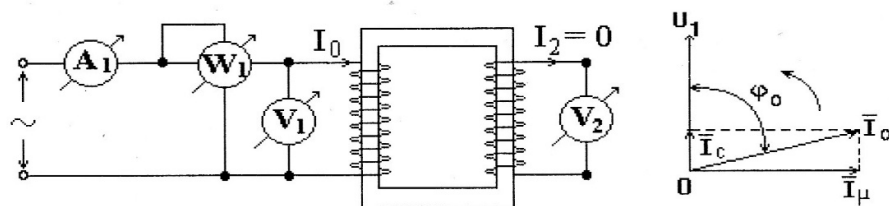
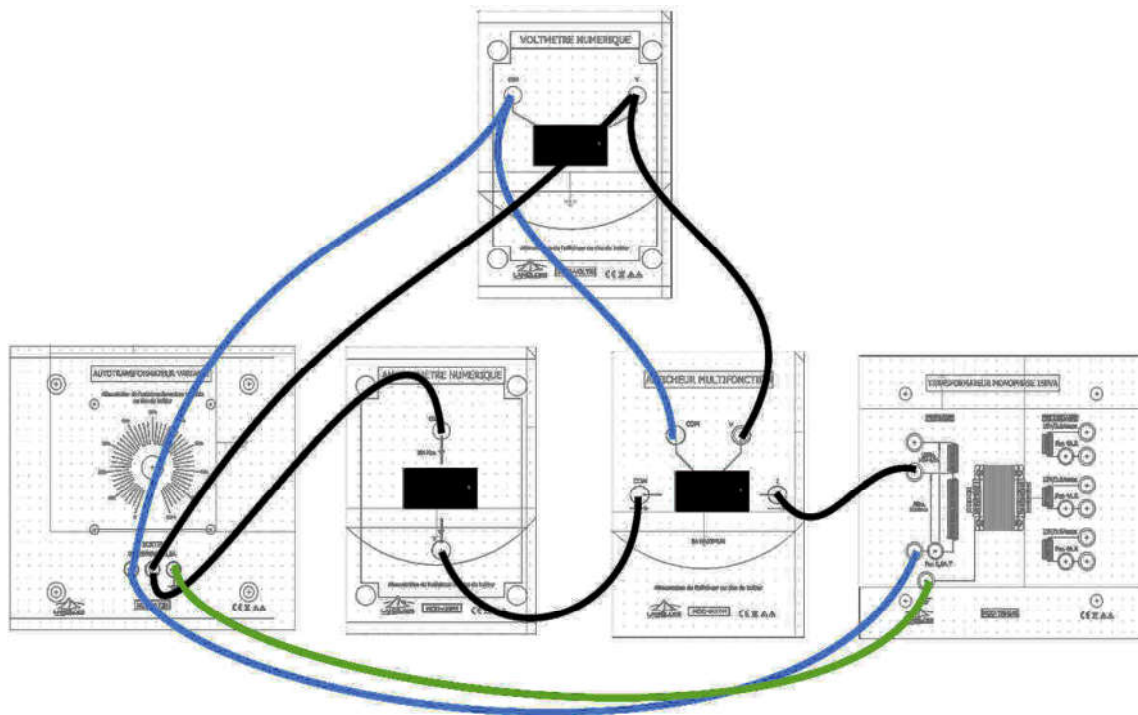


Figure 16

Principle of wiring

Wiring for voltage, current, and power measurements at the transformer primary.



Μονοφασικός Μ/Τ χωρίς φορτίο

όπου I_C = η πραγματική συνιστώσα του I_0 , που προκαλεί τις μαγνητικές απώλειες (P_{Fe}) και I_μ = η άεργος συνιστώσα του I_0 , που προκαλεί τη μαγνητική ροή.

Figure 17

Wiring for voltage, current and power measurements in 2 secondary wired in series.

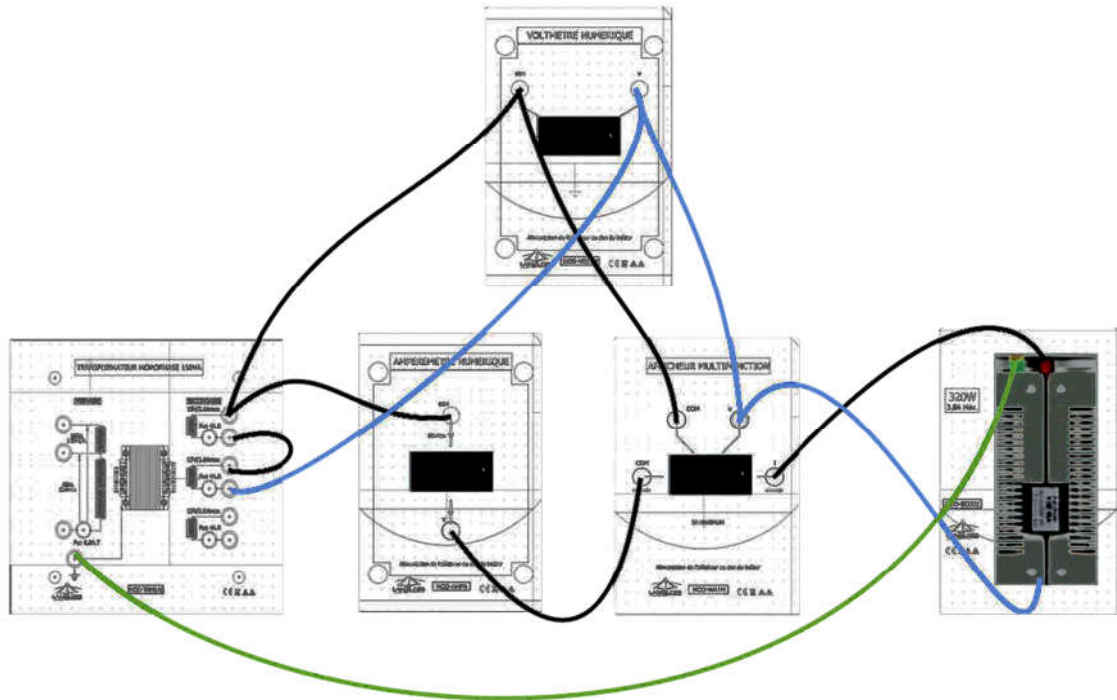
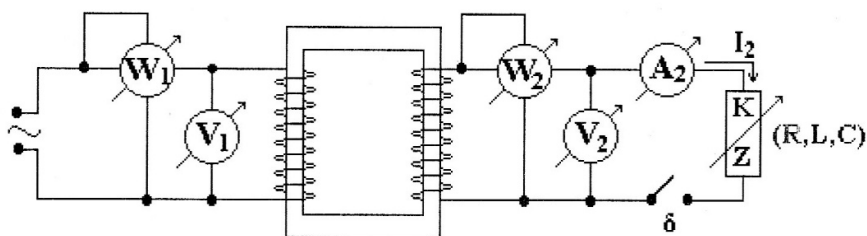


Figure 18 Wiring for voltage, current and power measurements in 2 secondary wired in series.



Μονοφασικός Μ/Τ με φορτίο

Πλήρης διάταξη για την μέτρηση τάσης, ρεύματος και ισχύος στο πρωτεύον και το δευτερεύον του Μ/Σ σε λειτουργία με φορτίο. Στο κύκλωμα εισόδου του Μ/Σ (πρωτεύων) μπορεί να προστεθεί σε σειρά αμπερόμετρο Α1 για να μετρά το ρεύμα στην είσοδο του Μ/Σ.

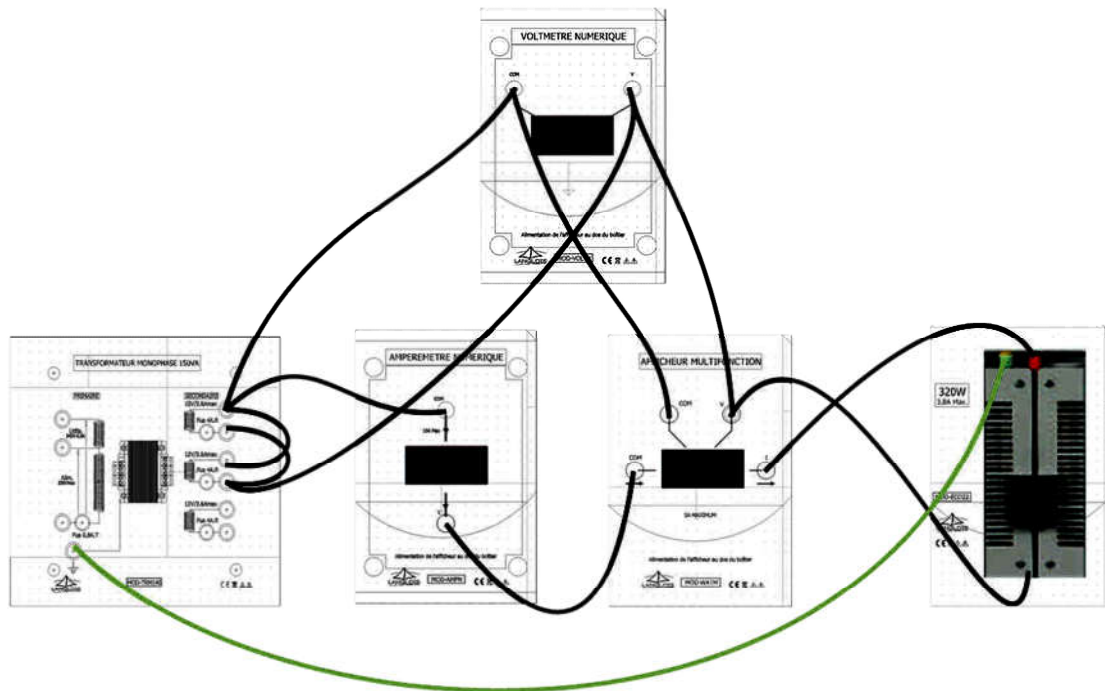


Figure 19 Wiring for voltage, current and power measurements in 2 secondary wired in parallel.

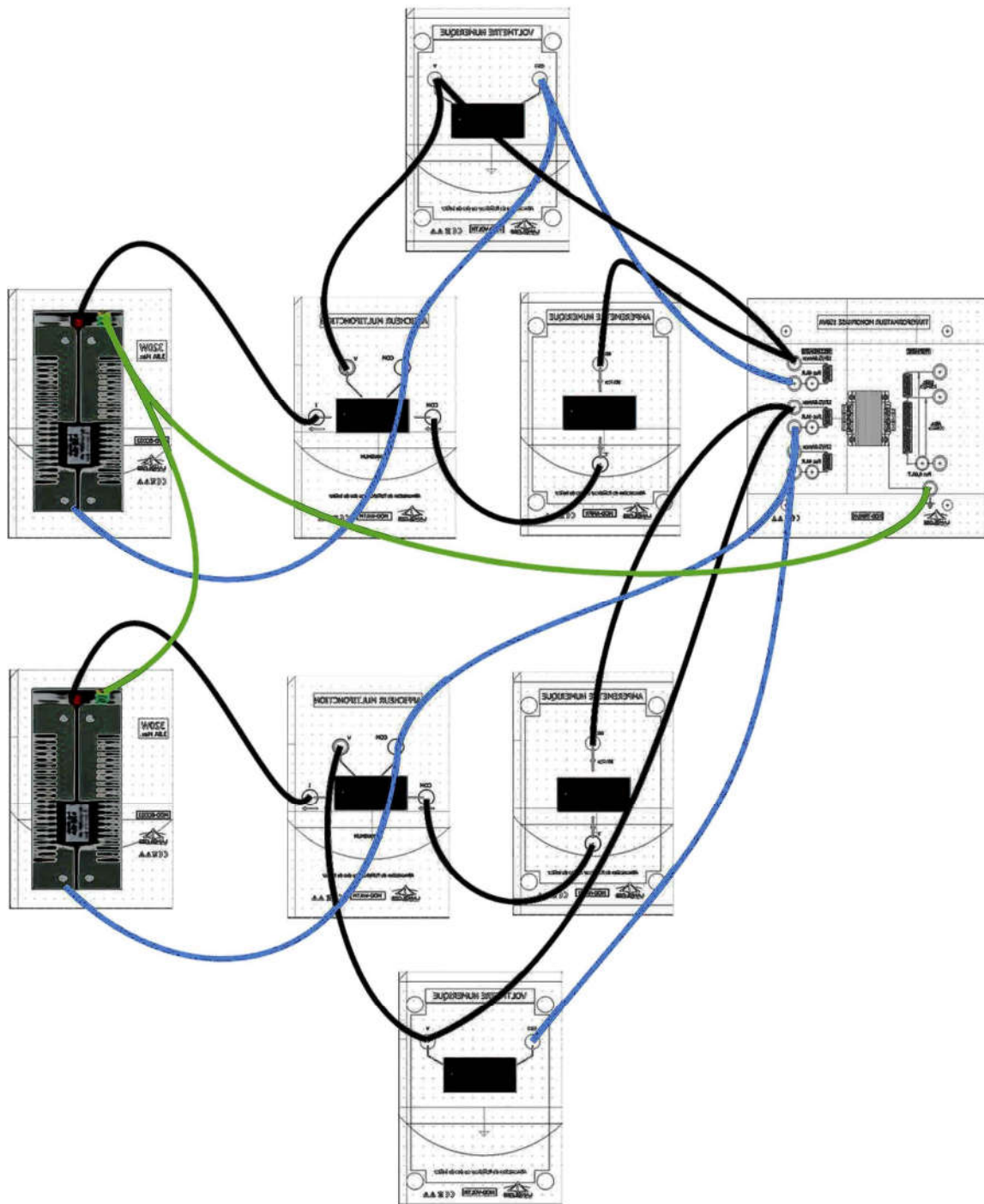


Figure 20

Wiring for voltage, current, and power measurements in 2 independently wired secondary.

Transformer wiring in reverse.

Be very carefull with max.voltage and max. current of secondaries wired in primary windings!

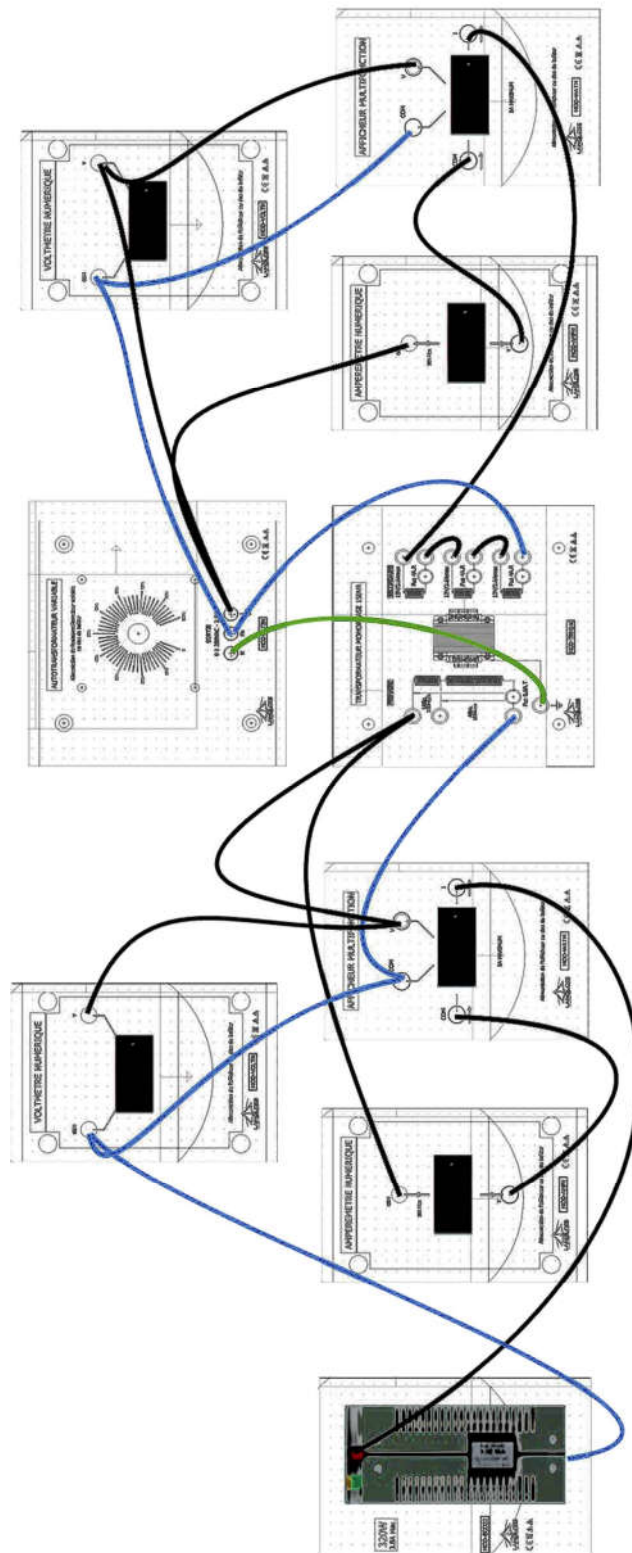


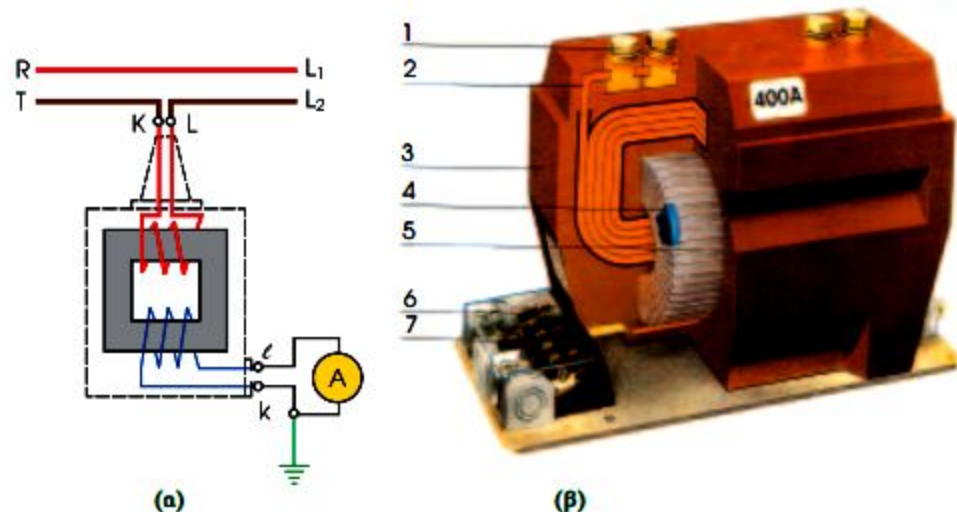
Figure 21 Secondaries wired in primary windings.

1. **Autotransformers** αυτομετασχηματιστής
2. **Insulation transformer (transformer with separated circuits)** Μετασχηματιστής μόνωσης
(μετασχηματιστής με διαχωρισμένα κυκλώματα)
3. **Non-compensated transformer** Μη αντισταθμισμένος μετασχηματιστής
4. **Transformer with compensated reversibility** Μετασχηματιστής με αντισταθμισμένη
αντιστρεψιμότητα
5. **Transformer voltage drop** εκατοστιαία πτώση τάσης μετασχηματιστή
6. **Short-circuit voltage (U_{cc}) of a transformer** τάση βραχυκύκλωσης μετασχηματιστή
7. **Rated voltage** ονομαστική τάση
8. **Reversible transformer** Αναστρέψιμος μετασχηματιστής
9. **Impregnation process** Διαδικασία εμποτισμού
10. **Electro-magnetic inductance** Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή
11. **Electromotive force** Ηλεκτροκινητική δύναμη
12. **Apparent power (Q)** άεργος ισχύς
13. **Reactive power (S)** φαινόμενη ισχύς
14. **“transformation ratio of a transformer”** “λόγος μετασχηματισμού ενός μετασχηματιστή”
15. **Reactance (X)** επαγωγική αντίσταση
16. **Magnetizing current** ρεύμα μαγνήτισης
17. **Magnetic laminated circuit** ελασματοποιημένος σιδηροπυρήνας
18. **Primary coil** Πηνίο εισόδου ή πρωτεύον
19. **Secondary coil** Πηνίο εξόδου ή δευτερεύον

3) Μ/Σ έντασης

Η συνδεσμολογία και η πραγματική μορφή Μ/Σ έντασης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.24.

Το πρωτεύον τύλιγμα, που αποτελείται από πολύ λίγες σπείρες και αγωγό μεγάλης διατομής, συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα, στο οποίο θέλουμε να μετρήσουμε την ένταση, ενώ το δευτερεύον συνδέεται σε σειρά με το αμπερόμετρο.



Σχ. 1.24: Συνδεσμολογία (α) και πραγματική μορφή Μ/Σ έντασης (β).

Στους Μ/Σ έντασης χρησιμοποιείται η γνωστή μας σχέση:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{W_1}{W_2} = K$$

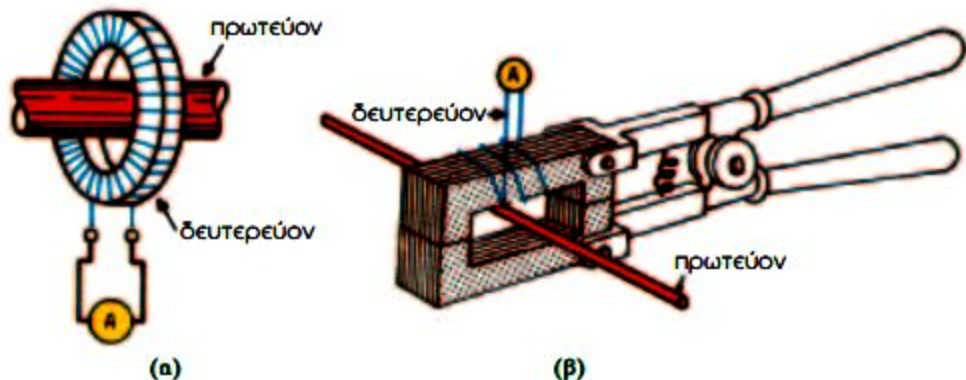
Έτσι, για να βρούμε το μεγάλο ρεύμα μιας κατανάλωσης (ή δικτύου) πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την ένδειξη του αμπερομέτρου επί τον αντίστροφο λόγο της σχέσης μεταφοράς του Μ/Σ, δηλ. επί $1/K$, γιατί:

$$I_1 = \frac{1}{K} \cdot I_2 \quad \text{ή} \quad I_1 = \frac{I_2}{K} \quad (1.15)$$

Το δευτερεύον των Μ/Σ έντασης κατασκευάζεται για ονομαστικό ρεύμα 0-5Α, ενώ η σχέση μεταφοράς και το ρεύμα πρωτεύοντος εξαρτώνται από τη μετρούμενη ένταση (I_1). Οι Μ/Σ έντασης, ανάλογα με την ένταση του ρεύματος που προορίζονται, κατασκευάζονται σε διάφορες μορφές και τύπους. Έτσι, π.χ. οι Μ/Σ που χρησιμοποιούνται για πολύ μεγάλες εντάσεις, έχουν στο πρωτεύον τους ένα μόνο αγωγό, απ' τον οποίο περνά όλο το ρεύμα που θέλουμε να μετρήσουμε, ενώ το δευτερεύον τους έχει μορφή δακτυλιδιού και πολλές σπείρες (σχ. 1.25α).

Σε άλλο τύπο Μ/Σ έντασης, το μαγνητικό κύκλωμα αποτελείται από δύο μισά, που ανοίγουν όπως η τανάλια, για να περάσει ο αγωγός, στον οποίο θέλουμε να μετρήσουμε την ένταση (σχ. 1.25β).

Ι. ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ (Μ/Σ)

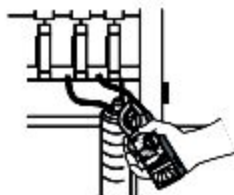


Σχ. 1.25: Μ/Σ έντασης για μεγάλες εντάσεις ρεύματος.

Εξέλιξη του Μ/Σ έντασης "τύπου τανάλιας" αποτελεί ένας ειδικός συνδυασμός Μ/Σ έντασης και αμπερόμετρου, η γνωστή μας **αμπερομετρική πένσα** (σχ. 1.26α), που είναι ένα φορητό όργανο πολύ εύχρηστο για τη μέτρηση εντάσεων χωρίς διακοπή του κυκλώματος (σχ. 1.26β).



(α)



(β)

Σχ. 1.26: Αμπερομετρική πένσα (α) και χρήσεις της (β).

Ο **πυρήνας** της αμπερομετρικής πένσας (ή αμπεροταιμπίδας) **αποτελείται από δύο μέρη** (ταιμπίδες), απ' τα οποία το δεύτερο (2) μπορεί να κινηθεί σε σχέση με το πρώτο (1). Όταν πιέζουμε το στέλεχος (3), το μέρος (2) απομακρύνεται από το (1), οπότε μπορούμε να περάσουμε τον αγωγό στο εσωτερικό του πυρήνα της. Το **ρεύμα** του αγωγού που αποτελεί το **πρωτεύον** του Μ/Σ, **διαβάζεται κατευθείαν** από το αμπερόμετρο που συνδέεται στο **δευτερεύον** του.

5.2 Απαραίτητες γνώσεις

Νόμος Faraday στον ηλεκτρισμό, νόμος Ampère, κανόνας του Lenz, νόμος του Ohm, μαγνητική σύζευξη, άεργη αντίσταση, σύνθετη αντίσταση, πηνίο, επαγωγικό φορτίο, μαγνητική ροή, χωρητικότητα, χωρητικό φορτίο, στιγμιαία, μέση, ενεργή τιμή περιοδικών σημάτων.

5.3 Πείραμα 1

5.3.1 Σκοπός

- Μελέτη της λειτουργίας του Μ/Σ.
- Επαλήθευση σχέσης τάσεων, ρεύματος εισόδου – εξόδου Μ/Σ με το λόγο των τυλιγμάτων του.
- Μελέτη Μ/Σ εν κενώ χωρίς φορτίο, με ανοικτό το δευτερεύον πηνίο στην έξοδο.
- Μελέτη Μ/Σ σε βραχυκύκλωση, χωρίς φορτίο με κλειστό το δευτερεύον πηνίο στην έξοδο.
- Μελέτη της επίδρασης χωρητικών και επαγωγικών φορτίων στη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος μέσω του Μ/Σ.
- Πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων Μ/Σ.

5.3.2 Στοιχεία Θεωρίας

5.3.2.1 Τι είναι ο Μ/Σ

Ο μετασχηματιστής ή Μ/Σ (transformer) ηλεκτρικής τάσης είναι μια εύχρηστη ηλεκτρική διάταξη. Το γεωμετρικό του μέγεθος και βάρος αλλάζει από πολύ μικρό σε πολύ μεγάλο (λίγα κιλά έως τόνους) ανάλογα με τις ανάγκες εφαρμογής του. Η λειτουργία του όμως είναι ανεξάρτητη του μεγέθους του.

Όλοι οι Μ/Σ περιέχουν ένα πρωτεύον πηνίο, ηλεκτρικά μονωμένο, από ένα ή περισσότερα δευτερεύοντα πηνία και το σιδηροπυρήνα. Ο σιδηροπυρήνας αποτελείται από λεπτά, ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους ελάσματα χάλυβα.

Οι Μ/Σ μετασχηματίζουν (υποβιβάζουν ή ανυψώνουν) AC τάσεις ή ρεύματα σε AC πάλι μεγέθη ίδιας συχνότητας. Άλλες χρήσεις τους είναι η ζεύξη ανάμεσα στις διάφορες βαθμίδες ενισχυτών και η γαλβανική μόνωση ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων στις οποίες λειτουργούν, οι μετασχηματιστές κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες: (i) στους μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων και (ii) στους μετασχηματιστές χαμηλών συχνοτήτων (μέχρι 100kHz). Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται οι μετασχηματιστές ραδιοσυχνοτήτων και στη δεύτερη οι μετασχηματιστές ραδιοσυχνοτήτων και οι μετασχηματιστές ισχύος.

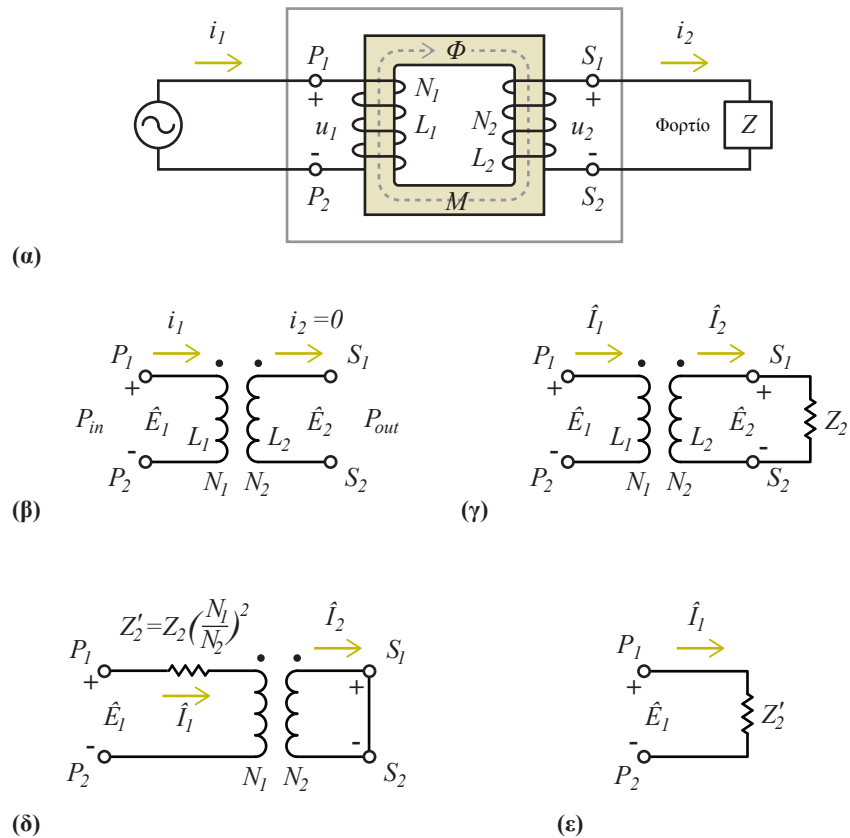
Το πρωτεύον πηνίο (primary coil) δέχεται ηλεκτρική ενέργεια (άεργο ισχύ, VAR) από μια πηγή εναλλασσόμενου τάσης και μέσω της μαγνητικής σύζευξης τη μεταφέρει μέσω ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου (μαγνητικής ροής) σε διαφορετικές τιμές τάσης ρεύματος, ίδιας συχνότητας με την πηγή στο δευτερεύον πηνίο (secondary coil). Η μαγνητική σύζευξη ενισχύεται σημαντικά από την παρουσία του σιδηροπυρήνα.

Οι νόμοι που εξηγούν τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δύο μονωμένων ηλεκτρικών κυκλωμάτων και την ανάπτυξη ηλεκτρικής τάσης δίνονται στη συνέχεια.

- Νόμος Ampère:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

όπου H η ένταση του μαγνητικού πεδίου και I η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει έναν ηλεκτρικό αγωγό δημιουργεί μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτόν.

5.3.2.2 Αρχή λειτουργίας M/Σ 

Σχήμα 5.1 – (α) Σχηματική αναπαράσταση μονοφασικού M/Σ , (β) Κυκλωματική παράσταση ιδανικού M/Σ σε λειτουργία εν κενώ, (γ) Κυκλωματική παράσταση ιδανικού M/Σ σε λειτουργία με φορτίο, (δ) και (ε) Αναγωγή αντίστασης του δευτερεύοντος στο πρωτεύον ιδανικού M/Σ (πώς βλέπει η είσοδος το φορτίο Z , στην έξοδο). Όπου: 1 και 2 δείκτες πρωτεύοντος (P) και δευτερεύοντος (S) πηνίου, M ο συντελεστής αλληλεπαγωγής, L οι συντελεστές αυτεπαγωγής των πηνίων, N το πλήθος των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, Φ η κοινή μαγνητική ροή, u οι ηλεκτρικές τάσεις στην είσοδο και έξοδο του M/Σ (στιγμιαίες τιμές), i τα ρεύματα που διαρρέουν τα πηνία (στιγμιαίες τιμές), \hat{E} τάσεις στην είσοδο και έξοδο του M/Σ (παραστατικοί μιγαδικοί).

■ Νόμος Faraday:

$$e_{\varepsilon\pi} = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

όπου Φ_B μαγνητική ροή (magnetic flux) και $e_{\varepsilon\pi}$ ηλεκτρεγερτική δύναμη ή ΗΕΔ (electromagnetic induction ή induced emf). Το ηλεκτρικό πηνίο, όταν διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, αναπτύσσει στα άκρα του ηλεκτρική τάση εξ' επαγωγής (induced voltage), η οποία δημιουργεί με τη σειρά της μαγνητικό πεδίο που προσπαθεί να εξουδετερώσει τη μεταβολή της μαγνητικής ροής (κανόνας του Lenz).

Ο νόμος του Ampère περιγράφει ότι σε ηλεκτρικό αγωγό, οποιουδήποτε σχήματος, όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα (ρεύμα διέγερσης), αναπτύσσεται γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Καθώς το μέτρο και η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος διέγερσης αλλάζει, αλλάζει ανάλογα και το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο.

Όταν ένα ηλεκτρικό πηνίο διαρρέεται από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα (ρεύμα διέγερσης), δημιουργείται γύρω του μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο με ίδια συχνότητα. Αν δεύτερο ηλεκτρικό πηνίο βρίσκεται μέσα σε αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, τότε η μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή $\Phi_B(t)$ θα δημιουργήσει στα άκρα του ηλεκτρική τάση εξ' επαγωγής $e_{\varepsilon\pi}$, που περιγράφεται από νόμο του Faraday.

Στην περίπτωση στην οποία το δεύτερο ηλεκτρικό πηνίο, εντός του οποίου αναπτύσσεται η εξ' επαγωγής $e_{\varepsilon\pi}$, είναι κλειστό κύκλωμα, επακόλουθο είναι η δημιουργία ηλεκτρικού

ρεύματος (επαγωγικό ρεύμα), του οποίου η ένταση εξαρτάται, κατά το νόμο του Ohm, από την ολική ωμική αντίσταση R του κυκλώματος. Η ΗΕΔ αποτελεί το κύριο φαινόμενο της επαγωγής, το οποίο συμβαίνει ανεξάρτητα του αν το κύκλωμα είναι κλειστό ή ανοικτό, ενώ το επαγωγικό ρεύμα είναι δευτερεύον φαινόμενο, που εμφανίζεται μόνο, όταν το δεύτερο ηλεκτρικό πηνίο είναι κλειστό.

Επιπλέον η μεταβαλλόμενη ηλεκτρική τάση e_{π} στο δεύτερο πηνίο θα δημιουργήσει με τη σειρά της λόγω των ίδιων φαινομένων αντieleκτρεργετική δύναμη στο πρώτο πηνίο. Θεωρητικά η αντieleκτρεργετική δύναμη στο πρώτο πηνίο είναι ίση με την εξωτερική τάση που δημιούργησε το αρχικό ρεύμα διέγερσης.

Αν σε έναν μονοφασικό Μ/Σ, που αποτελείται από δύο πηνία αριθμού σπειρών N_1 και N_2 (βλέπε σχήμα 5.1.α), εφαρμοστεί ηλεκτρική ισχύς P_{in} στους ακροδέκτες του πρωτεύοντος πηνίου, θα δώσει στην έξοδο του δευτερεύοντος ηλεκτρική ισχύ P_{out} .

5.3.2.3 Απώλειες Μ/Σ

Όταν ο Μ/Σ είναι σε λειτουργία, οι συνιστώσες του ρεύματος διέγερσης i_{ϕ} που κυκλοφορεί στα πηνία του δημιουργούν ωμικές απώλειες που το θερμαίνουν. Αυτές οι απώλειες που ονομάζονται **απώλειες χαλκού** και **σιδήρου**, είναι ενεργή ισχύς (Watt). Το ρεύμα διέγερσης i_{ϕ} αναλύεται σε δύο συνιστώσες.

Η μια ονομάζεται ρεύμα μαγνήτισης i_m , παράγει το μαγνητικό πεδίο (έχει διαφορά φάσης -90° με την αντieleκτρεργετική τάση του πρωτεύοντος e_1 και δημιουργεί τις απώλειες χαλκού), και η άλλη ονομάζεται ρεύμα απωλειών πυρήνα i_{ϕ} είναι συμφασική με την e_1 και δημιουργεί τις απώλειες σιδήρου.

Αυτές οι συνιστώσες του ρεύματος θερμαίνουν τον Μ/Σ. Ο σιδηροπυρήνας του Μ/Σ, που συνήθως έχει κυκλικό ή τετραγωνικό σχήμα, δεν είναι συμπαγής αλλά αποτελείται από πολλά σιδερένια ελάσματα. Αυτό συμβαίνει, για να περιοριστούν τα ρεύματα μαγνήτισης και να αποφευχθεί η υπερθέρμανση του συστήματος.

5.3.2.4 Ιδανικός Μ/Σ

Η κυκλωματική αναπαράσταση ενός ιδανικού Μ/Σ δείχνεται στο σχήμα 5.1.β. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν απώλειες και η τιμή της ισχύος εξόδου (ισχύς που παρέχει ο Μ/Σ) είναι ίση με την τιμή της ισχύος εισόδου (την ισχύ που λαμβάνει), ή αλλιώς $P_{out} = P_{in}$. Η ισότητα ισχύων εισόδου-εξόδου ισχύει για πραγματικές τιμές ισχύος (W), φαινόμενες τιμές ισχύος (VA) και άεργες τιμές ισχύος (VAR). Ισχύει η σχέση:

$$P_{in} = P_{out} \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5.1)$$

5.3.2.5 Ιδανικός Μ/Σ χωρίς φορτίο στην έξοδό του (εν κενώ)

Στο σχήμα 5.1.β δείχνεται η εν κενώ λειτουργία Μ/Σ. Το δευτερεύον δεν διαρρέεται από ρεύμα. Ο ιδανικός Μ/Σ λειτουργεί με το πρωτεύον πηνίο συνδεδεμένο σε εξωτερική AC πηγή, π.χ. ημιτονοειδούς τάσης, και με το δευτερεύον πηνίο να μη συνδέεται με φορτίο (unloaded transformer), δηλαδή τα άκρα του είναι ανοικτά.

Κατά τη λειτουργία του Μ/Σ χωρίς φορτίο, δεδομένου ότι το δευτερεύον δε διαρρέεται από ρεύμα, το πρωτεύον συμπεριφέρεται σαν πηνίο, με μικρή ωμική αντίσταση αλλά με μεγάλη επαγωγική αντίσταση, λόγω του πυρήνα σιδήρου. Επομένως η σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος είναι πάντοτε μεγάλη και η ένταση του ρεύματος διέγερσης i_{ϕ} μικρή. Η φάση της έντασης ρεύματος υστερεί της φάσης της εφαρμοζόμενης τάσης, περίπου κατά 90° .

Η τάση u_1 , που εφαρμόζεται στο πρωτεύον πηνίο από εξωτερική πηγή, θα είναι ίση με την επαγόμενη αντieleκτρεργετική τάση ή ΑΗΕΔ (back-electromotive force) e_1 που αναπτύσσεται στο πρωτεύον λόγω του ρεύματος διέγερσης i_{ϕ} . Στην εν κενώ λειτουργία το ρεύμα

διέγερσης είναι πολύ μικρό και, επειδή και η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος είναι πολύ μικρή, μπορεί να παραληφθεί η πτώση τάσης στα άκρα της ωμικής αντίστασης και να θεωρηθεί ότι η τάση της εξωτερικής πηγής ισούται προσεγγιστικά με την αντιηλεκτρεγερτική τάση:

$$u_1 = e_1 = -N_1 \frac{d\phi_B}{dt} \quad e_2 = -N_2 \frac{d\phi_B}{dt} \quad \Rightarrow \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5.2)$$

όπου N_1 και N_2 ο αριθμός των σπειρών στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο αντίστοιχα. Το πρωτεύον και το δευτερεύον το διαρρέει η ίδια μαγνητική ροή Φ_B (flux linkage). Επομένως, η επαγόμενη ΗΕΔ ανά σπείρα είναι ίδια στο κάθε πηνίο.

5.3.2.6 Ιδανικός Μ/Σ με φορτίο στην έξοδό του

Στο σχήμα 5.1.γ δείχνεται η λειτουργία Μ/Σ με φορτίο (loaded transformer). Στα άκρα του δευτερεύοντος είναι συνδεδεμένο φορτίο σύνθετης αντίστασης Z_2 (impedance), π.χ. κινητήρες, λάμπες, θέρμανση κ.λπ. Το δευτερεύον διαρρέεται από ρεύμα:

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_2}{Z_2} \quad (5.3)$$

Το ρεύμα I_2 είναι αιτία να δημιουργηθεί μαγνητική ροή Φ_2 , που αντιτίθεται στην αρχική ροή Φ (τη ροή που δημιουργήθηκε λόγω του ρεύματος διέγερσης στο πρωτεύον) του Μ/Σ. Για να διατηρηθεί η αρχική ροή Φ σταθερή, αναπτύσσεται πρόσθετη μαγνητική ροή Φ_1 στο πρωτεύον, η οποία εξουδετερώνει τη Φ_2 . Έτσι εξισώνεται η επαγόμενη τάση στο πρωτεύον με την τάση της πηγής. Η ισχύς που παρέχει το πρωτεύον είναι ίση με αυτήν που καταναλώνεται στο φορτίο Z_2 . Από τις σχέσεις (5.1) έως (5.3) προκύπτει:

$$\frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \frac{Z_2}{\left(N_2/N_1\right)^2} \quad (5.4)$$

Όταν στο δευτερεύον του Μ/Σ συνδεθεί φορτίο Z_2 , την αντίσταση αυτή, όταν τη βλέπουμε ως προς τα άκρα του πρωτεύοντος, ονομάζεται ανηγμένη του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον και συμβολίζεται Z_2' . Στο σχήμα 5.1.δ δείχνεται η κυκλωματική αναπαράσταση της ανηγμένης του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον. Η Z_2' υπολογίζεται από το νόμο του Ohm και τη σχέση (5.4) ως εξής:

$$Z_2' = \frac{\hat{V}_1}{\hat{I}_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} \hat{V}_2}{\frac{N_2}{N_1} \hat{I}_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{\hat{V}_2}{\hat{I}_2} = \frac{Z_2}{\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2} \Rightarrow Z_2' = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \Rightarrow Z_2' = Z_2 a^2 \quad (5.5)$$

Προέκυψε ότι η Z_2' είναι ίση με την αντίσταση Z_2 του φορτίου επί το τετράγωνο του πηλίκου του αριθμού των τυλιγμάτων.

Αντίστοιχα μια αντίσταση Z_1 συνδεδεμένη στο πρωτεύον τη βλέπουμε στο δευτερεύον ως:

$$Z_1'' = Z_1 / a^2 \quad (5.6)$$

Κατά τη λειτουργία του Μ/Σ με φορτίο, η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον παίρνει σημαντική τιμή που υπολογίζεται από το Νόμο του Ohm, βλέπε σχέση (5.3).

Κατά τη λειτουργία του Μ/Σ χωρίς φορτίο, το ρεύμα του πρωτεύοντος είναι μικρό. Αυτό εξηγείται, επειδή οι ΗΕΔ στο κύκλωμα του πρωτεύοντος είναι δύο.

- ΗΕΔ εξωτερικής πηγής στο πρωτεύον $u_1 = E_1 \sqrt{2} \sin(\omega t)$.
- ΗΕΔ λόγω επαγωγής στο πηνίο $N_1 \frac{d\phi_B}{dt}$.

Επειδή η ωμική αντίσταση του πρωτεύοντος είναι αμελητέα, ο δεύτερος κανόνας του Kirchhoff δίνει:

$$E_1 \sqrt{2} \sin(\omega t) - N_1 \frac{d\phi_B}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\phi_B}{dt} = \frac{E_1 \sqrt{2}}{N_1} \sin(\omega t) \Rightarrow \phi_B = \frac{E_1 \sqrt{2}}{N_1 \omega} \cos(\omega t) \quad (5.7)$$

που ισχύει για κάθε τιμή του φορτίου.

Αποδεικνύεται ότι η μέγιστη τιμή Φ_{max} της μαγνητικής ροής στον πυρήνα του Μ/Σ δίνεται από τον τύπο:

$$\phi_{max} = \frac{E_1}{4,44 f N_1} \quad (5.8)$$

Αριθμητικό παράδειγμα: Όταν εξωτερική πηγή τάσης 220V rms, 50Hz εισάγει ισχύ σε Μ/Σ με $N_1=200$ σπείρες, τότε:

$$\phi_{max} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 200} \approx 5 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

Συμπέρασμα: Κατά τη λειτουργία του Μ/Σ χωρίς φορτίο, η μαγνητική ροή Φ_{max} οφείλεται αποκλειστικά στο ρεύμα του πρωτεύοντος. Κατά τη λειτουργία με φορτίο το ρεύμα του δευτερεύοντος δημιουργεί μια νέα μαγνητική ροή Φ_2 που, σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, έχει αντίθετο πρόσημο με την μαγνητική ροή Φ_1 που δημιουργεί το ρεύμα του πρωτεύοντος. Η ολική ροή Φ θα είναι ίση με $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$. Με βάση όμως τη σχέση (5.7) ή (5.8), το πλάτος της ολικής ροής Φ πρέπει να διατηρείται σταθερό και ανεξάρτητο του φορτίου. Άρα, όταν αυξάνεται το Φ_1 , θα αυξάνεται αντίστοιχα και το Φ_2 , ώστε η διαφορά τους να παραμένει σταθερή. Επομένως κάθε αύξηση της έντασης του ρεύματος στο δευτερεύον πρέπει να συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της έντασης του ρεύματος στο πρωτεύον.

Συμπέρασμα: Η τάση u_2 του δευτερεύοντος είναι μέγιστη, εφόσον ο Μ/Σ λειτουργεί χωρίς φορτίο, μειώνεται, όταν το ρεύμα i_2 του δευτερεύοντος αυξάνεται και μηδενίζεται, όταν βραχυκυκλώνουμε το δευτερεύον.

5.3.2.7 Πραγματικός Μ/Σ

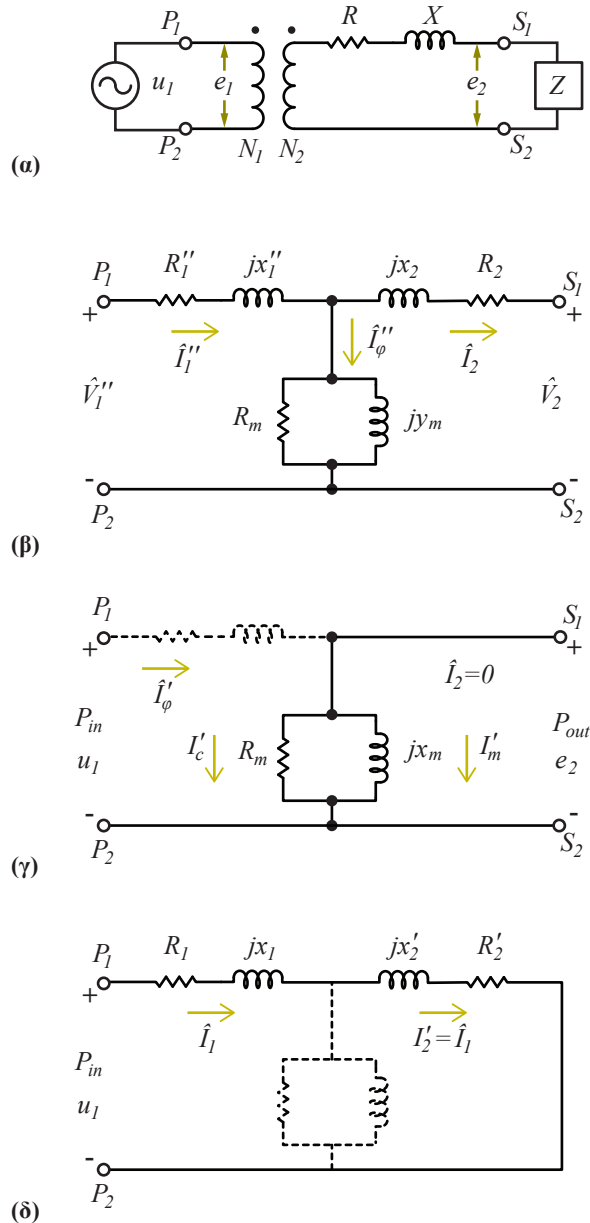
Οι πραγματικοί Μ/Σ έχουν αντίσταση τυλιγμάτων και απαιτούν άεργο ισχύ για τη δημιουργία των μαγνητικών τους πεδίων. Οι σπείρες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος έχουν συνολική ωμική αντίσταση R και μια συνολική επαγωγική αντίσταση X .

Στο σχήμα 5.2.α δείχνεται ένας πραγματικός Μ/Σ σε λειτουργία. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός Μ/Σ 1:1 μπορεί να προσεγγιστεί από το κύκλωμα του σχήματος 5.2.β. Στους πραγματικούς Μ/Σ δίνονται από τον κατασκευαστή οι ονομαστικές τιμές των τάσεων πρωτεύοντος, δευτερεύοντος, τα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος και η ονομαστική τιμή της φαινόμενης ισχύος S_N .

Το ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ δείχνεται στο σχήμα 5.2.β, γ και δ. Η αντίσταση R_m εκφράζει απώλειες που εξαρτώνται από την κατάσταση μαγνήτισης του πυρήνα του Μ/Σ. Αυτές οι απώλειες θεωρούνται ανάλογες του τετραγώνου του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή του τετραγώνου της τάσης. Αυτές οι απώλειες προστίθενται στο ισοδύναμο κύκλωμα, παράλληλα με

την αντίσταση μαγνήτισης x_m . Γενικά ισχύουν ότι $x_l \ll x_m$ και $R_l \ll x_m, z_m \gg R_2$ ενώ τα x_2 και z_m είναι περίπου εκατονταπλάσια της αντίστασης του φορτίου Z .

Αν η εξωτερική τάση u_1 στο πρωτεύων διατηρείται σταθερή, είναι φανερό ότι η τάση του δευτερεύοντος e_2 θα μεταβάλλεται με τη μεταβολή του φορτίου R και X . Όταν το φορτίο είναι χωρητικό, αναπτύσσεται μερικός συντονισμός μεταξύ της χωρητικότητας (capacitance) και της επαγωγής (reactance of inductor) X , με αποτέλεσμα η τάση e_2 του δευτερεύοντος να αυξάνεται ανάλογα με το χωρητικό φορτίο.



Σχήμα 5.2 – Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ. (α) Πραγματικός Μ/Σ σε λειτουργία, (β) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ, ανηγμένο στο δευτερεύον, (γ) απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ, με αναγωγή στο πρωτεύον, όταν λειτουργεί σε δοκιμή ανοικτοκύκλωσης (το ρεύμα διέγερσης είναι πολύ μικρό, η πτώση στα άκρα της $Z_l = R_l' + jx_l'$ είναι αμελητέα και εκφράζει τις απώλειες χαλκού), (δ) Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Μ/Σ με αναγωγή στο πρωτεύον, όταν λειτουργεί σε δοκιμή βραχυκύκλωσης (το ρεύμα διέγερσης είναι πολύ μικρό σε σχέση με το ρεύμα του δευτερεύοντος και ο κλάδος διέγερσης παραλείπεται).

Στους πραγματικούς Μ/Σ, ο μετασχηματισμός τάσεων ρευμάτων υπολογίζεται από την ίδια σχέση (5.1) με τους ιδανικούς Μ/Σ. Ο λόγος του πλήθους των σπειρών των τυλιγμάτων αφορά μόνο στην αναλογία των ονομαστικών τιμών τάσεων και ρευμάτων του Μ/Σ (βλέπε σχέσεις (5.9) και (5.10)):

$$\frac{V_N'}{V_N''} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5.9)$$

Ο δείκτης $_N$ συμβολίζει ονομαστική τιμή.

Από τη σχέση αναλογίας τάσεων – πλήθους σπειρών (5.9) και από την εφαρμογή του νόμου του Ohm για την ονομαστική τιμή της φαινόμενης ισχύος S_N , υπολογίζεται το ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος:

$$I'_N = \frac{S_N}{V'_N}, I''_N = \frac{S_N}{V''_N} \Rightarrow \frac{I''_N}{I'_N} = \frac{V''_N}{V'_N} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (5.10)$$

5.3.2.8 Απόδοση πραγματικού Μ/Σ

Η απόδοση οποιασδήποτε ηλεκτρικής συσκευής ή μηχανής δίνεται από το λόγο της ενεργούς τιμής ισχύος εξόδου προς την ενεργό τιμή ισχύος εισόδου της (active power). Η εξίσωση της εκατοστιαίας απόδοσης είναι: %Απόδοση = Ενεργός τιμή ισχύος εξόδου / Ενεργός τιμή ισχύος εισόδου $\times 100\%$, ή:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_1 I_1 \cos \theta_1} \times 100\% \quad (5.11)$$

Η εκατοστιαία πτώση τάσης Μ/Σ (transformer regulation) δείχνει πόσο μεταβάλλεται η τάση του δευτερεύοντος ενός Μ/Σ, όταν η τάση του πρωτεύοντος είναι σταθερή και η φόρτιση του Μ/Σ μεταβάλλεται από την εν κενώ λειτουργία ($I_2=0$, $Z=\infty$) μέχρι το πλήρες φορτίο.

$$r = \frac{V_1 / a - V_2}{V_1 / a} \times 100\% \quad (5.12)$$

5.3.2.9 Χαρακτηριστική φορτίου Μ/Σ

Χαρακτηριστική φορτίου Μ/Σ ή καμπύλη φορτίου, ονομάζεται η γραφική παράσταση της τάσης του δευτερεύοντος ως προς την έντασή του, όταν η τάση του πρωτεύοντος και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου παραμένουν σταθερά.

Όταν το φορτίο που υπερισχύει είναι ωμικό ή επαγωγικό, η τάση με φορτίο είναι χαμηλότερη της τάσης χωρίς φορτίο. Όταν το φορτίο που υπερισχύει είναι χωρητικό, η τάση με φορτίο είναι ανυψώνεται ελαφρά της τάσης χωρίς φορτίο.

5.3.3 Εκτέλεση

1. **Δοκιμή ανοικτού κυκλώματος.** Να κατασκευάσετε το κύκλωμα λειτουργίας του Μ/Σ εν κενώ, όπως στο σχήμα 5.3. Επιλέξτε οι σπείρες του πρωτεύοντος να είναι λιγότερες από εκείνες του δευτερεύοντος ($2N_1=N_2$). Ενώ δεν υπάρχει φορτίο στην έξοδο ($Z_2=\infty$, $I_2=0$), εφαρμόζουμε τάση u_1 στο πηνίο με τις λιγότερες σπείρες.

Ο λόγος που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ως πρωτεύον εκείνο με τις λιγότερες σπείρες είναι ότι, κατά τη δοκιμή ανοικτού κυκλώματος, αν χρησιμοποιηθεί ως πρωτεύον το πηνίο με τις περισσότερες σπείρες, το ρεύμα θα είναι πολύ μικρό και το σφάλμα μέτρησης μεγαλύτερο.

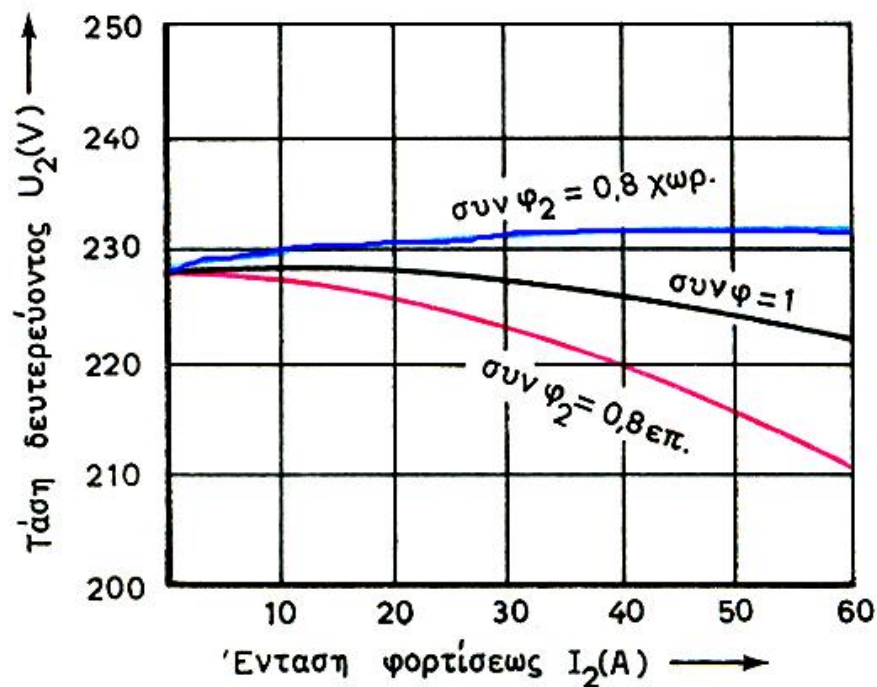
Για λόγους ασφάλειας η εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον δεν πρέπει να ξεπεράσει το 1/10 της ονομαστικής τιμής τάσης του πηνίου.

5.4.2 Θεωρία

Λειτουργία μετασχηματιστή με φορτίο

Χαρακτηριστική φορτίου ενός Μ/Σ ονομάζεται η γραφική παράσταση της τάσης του δευτερεύοντος ως προς την έντασή του όταν η τάση του πρωτεύοντος και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου παραμένουν σταθερά.

Όταν το φορτίο που υπερσχύει είναι ωμικό ή επαγωγικό η τάση με φορτίο είναι χαμηλότερη της τάσης χωρίς φορτίο. Όταν το φορτίο που υπερσχύει είναι χωρητικό η τάση με φορτίο είναι ανυψώνεται ελαφρά της τάσης χωρίς φορτίο.



Σχήμα 5.4.β. Απεικόνιση της χαρακτηριστικής φορτίου μονοφασικού Μ/Σ για τρεις περιπτώσεις φορτίου.