



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων



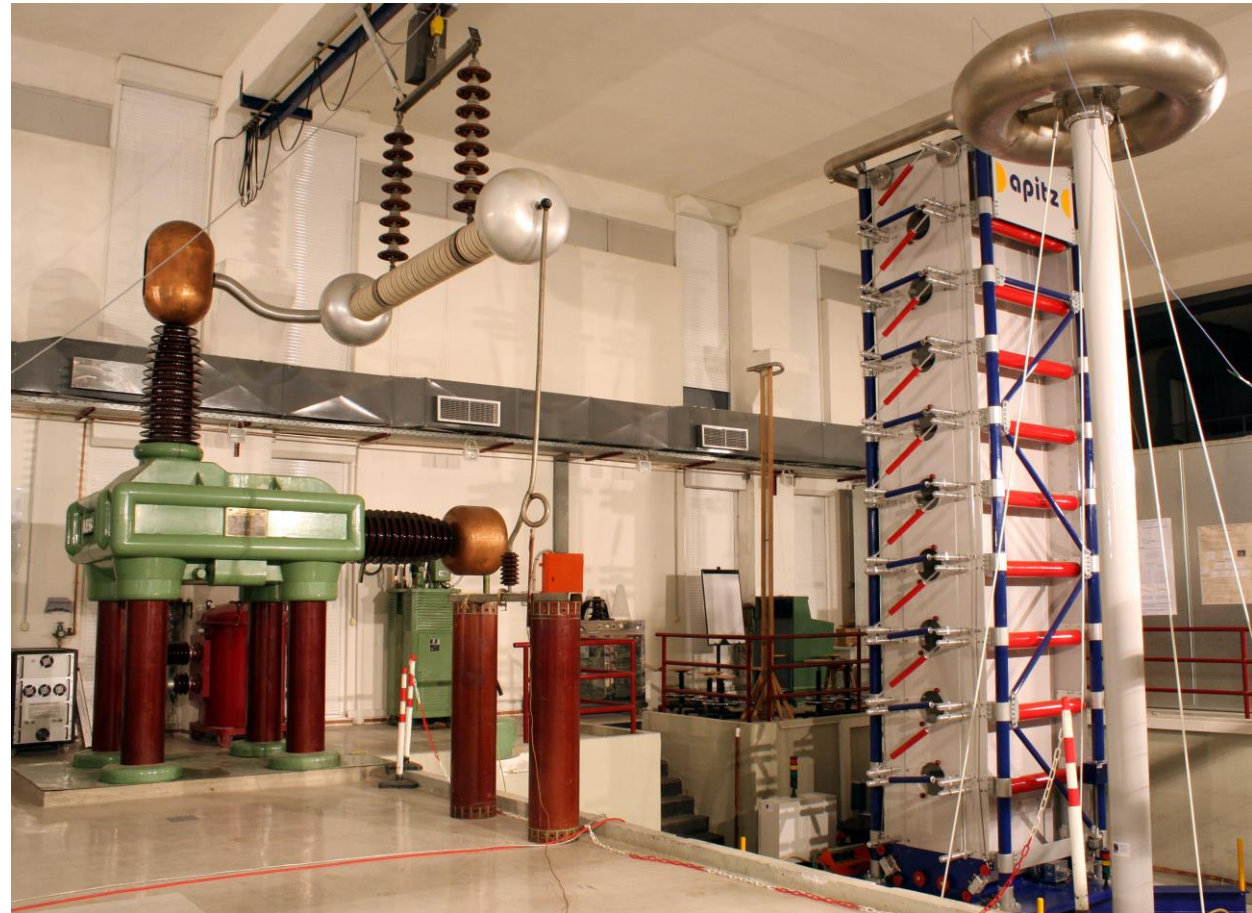
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Εργαστήρια Υψηλών Τάσεων

Εγκαταστάσεις δοκιμών

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

- Εναλλασσόμενη τάση
 - 1-2,5 MV
 - ΕΜΠ: 500 kV
- Συνεχής τάση
 - 1-10 MV
 - ΕΜΠ: 420 kV
- Κρουστική τάση
 - 1-10 MV
 - ΕΜΠ: 1,8 MV

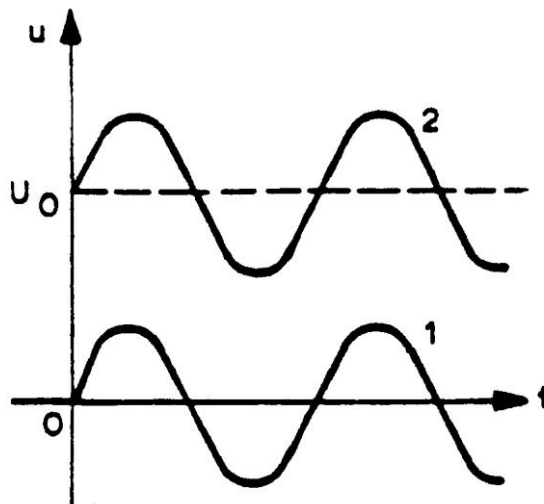


Μορφές υψηλών τάσεων δοκιμών (1)

■ Εναλλασσόμενη

1 χωρίς συνεχή συνιστώσα

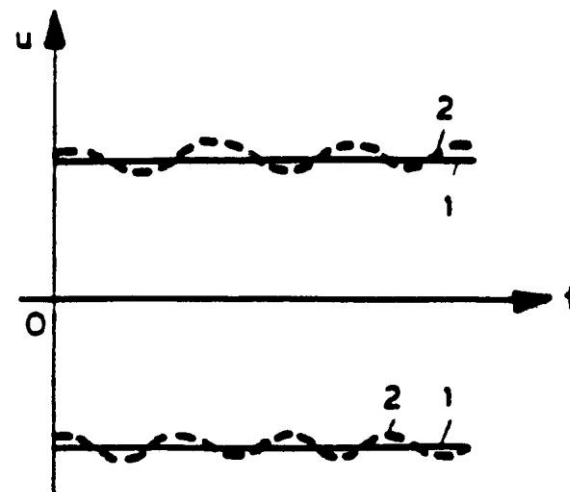
2 με συνεχή συνιστώσα



■ Συνεχής (θετική ή αρνητική)

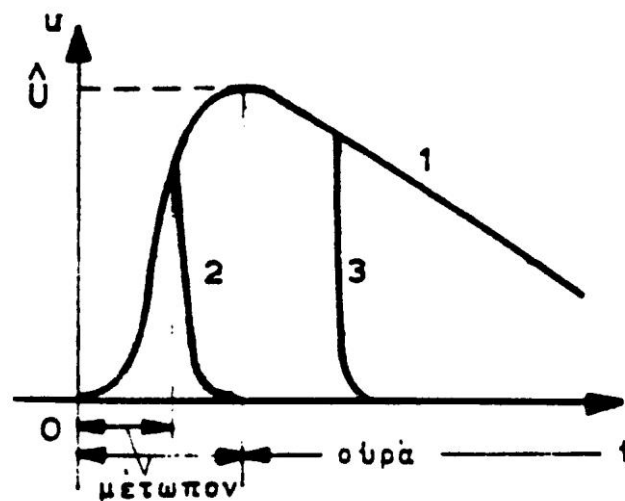
1 χωρίς κυματισμό

2 με κυματισμό

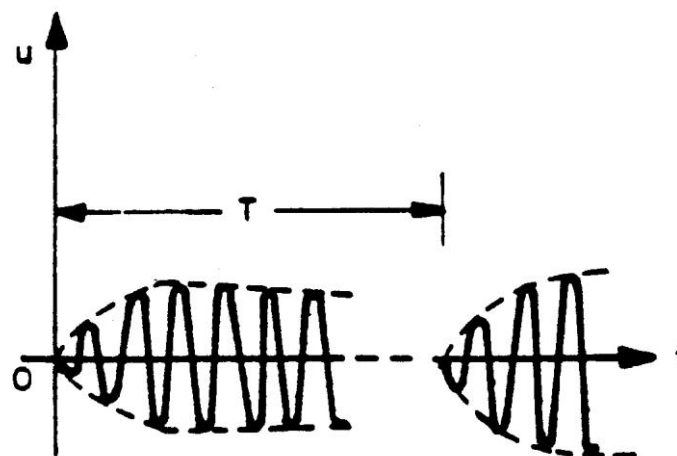


Μορφές υψηλών τάσεων δοκιμών (2)

- Κρουστική
 - 1 πλήρης
 - 2 αποκομμένη στο μέτωπο
 - 3 αποκομμένη στην ουρά

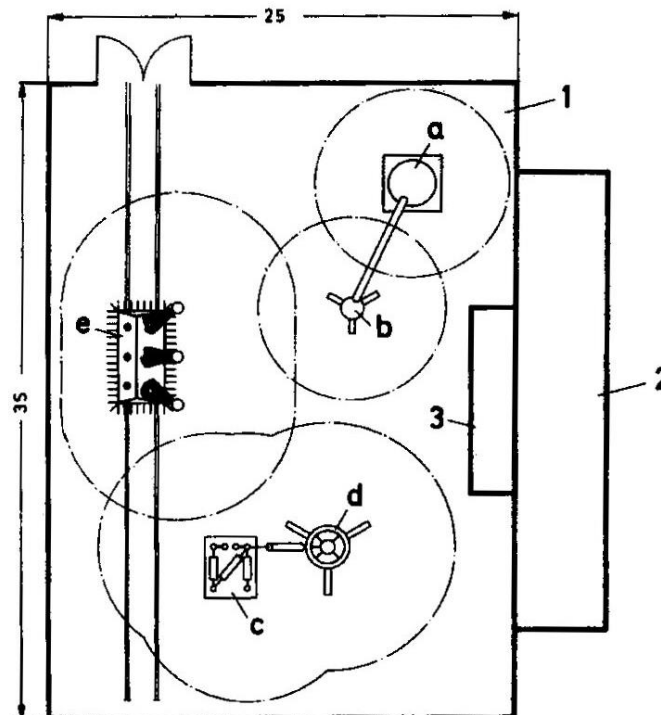
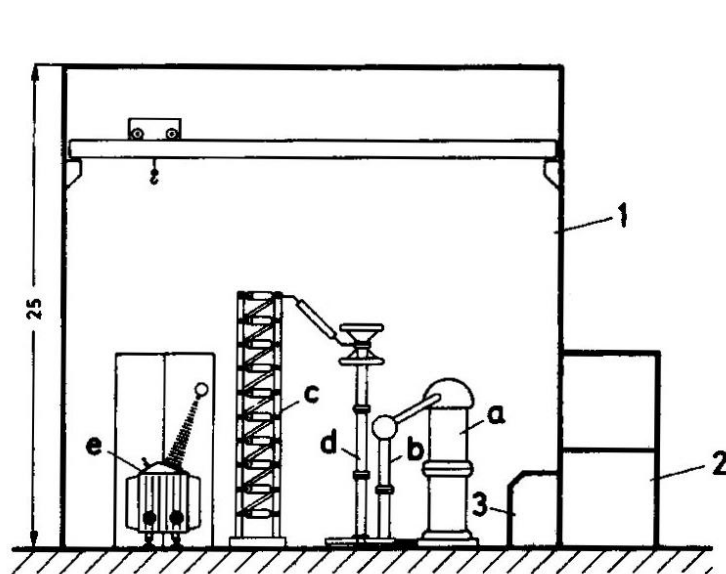


- Συρμός αποσβεννυμένων ταλαντώσεων



Εργαστήρια Υψηλών Τάσεων (1)

- Βιομηχανικά / Ερευνητικά / Εκπαιδευτικά Εργαστήρια
- Χώροι μεγάλου όγκου
 - Για εγκατάσταση Μ/Σ δοκιμών 1000kV → όγκος $25 \times 25 \times (15 \dots 18) \text{ m}^3$
 - Για δοκιμή τριφασικού Μ/Σ 400kV απαιτείται Μ/Σ δοκιμών 750kV και κρουστική γεννήτρια 3MV → όγκος $25 \times 35 \times 25 \text{ m}^3$



- 1 Περιφραγμένο πεδίο δοκιμών
 - a Μ/Σ δοκιμών 800kV
 - b Χωρητικότητα 800kV
 - c Κρουστική γεννήτρια 3MV
 - d Καταμεριστής 3MV
 - e Δοκίμιο (Μ/Σ 400kV)
- 2 Χώρος χειρισμών και ρυθμίσεων
- 3 Τράπεζα χειρισμών

Εργαστήρια Υψηλών Τάσεων (2)

- Αποστάσεις ασφαλείας (πλέγματα)
 - Για εναλλασσόμενες τάσεις: 5m για κάθε MV
 - Για συνεχείς τάσεις: 3,5m για κάθε MV
 - Για κρουστικές τάσεις: 2m για κάθε MV
- Σύστημα γείωσης
- Γαλβανική απόζευξη
- Θωράκιση
- Αποφυγή προεκκενώσεων
- Δυνατότητα συσκότισης
- Ηχητική μόνωση
- Αποθηκευτικοί χώροι
- Υπαίθριες δοκιμές

Εξοπλισμός Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π. (1)

- Γεννήτριες κρουστικών τάσεων έως 1800 kV
- Μετασχηματιστές δοκιμών έως 500 kV
- Γεννήτριες συνεχούς τάσεως έως 420 kV
- Γεννήτριες κρουστικών ρευμάτων έως 25 kA
- Ανηχωικός θάλαμος, κατάλληλα εξοπλισμένος για τη διεξαγωγή δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας και μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για σήμανση CE
- Κλωβοί Faraday

Εξοπλισμός Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π. (2)

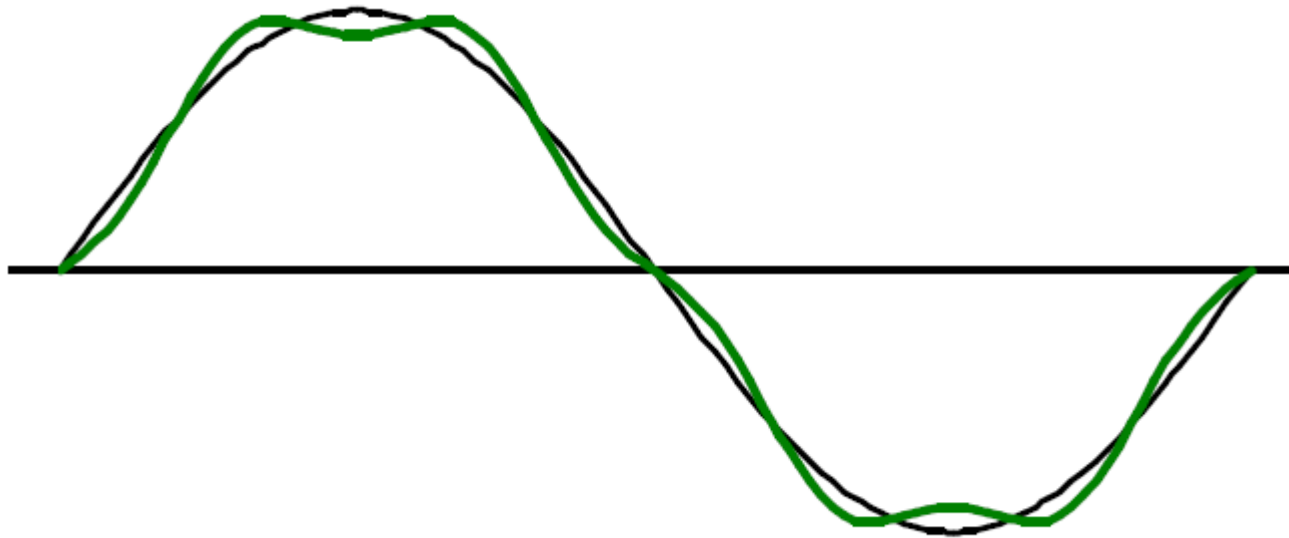
- Συστήματα για επιτόπου ηλεκτρικές δοκιμές σε καλώδια μέσης τάσης και εντοπισμό σφαλμάτων
- Καταμεριστές τάσεως, συστήματα καταγραφής ταχέως μεταβαλλομένων σημάτων και παλμογράφους
- Διατάξεις ελέγχου διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών ελαίων
- Θάλαμοι ρυθμιζομένων συνθηκών θερμοκρασίας - υγρασίας
- Καταγραφικά όργανα, ενισχυτές, γεννήτριες συχνοτήτων, τροφοδοτικά τάσεως και εντάσεως, πολύμετρα, γειωσόμετρα, μονωσιόμετρα, κ.ά.

Παραγωγή υψηλής εναλλασσόμενης τάσης

Παραγωγή υψηλής εναλλασσόμενης τάσης (1)

Απαίτηση (IEC 60060-1)

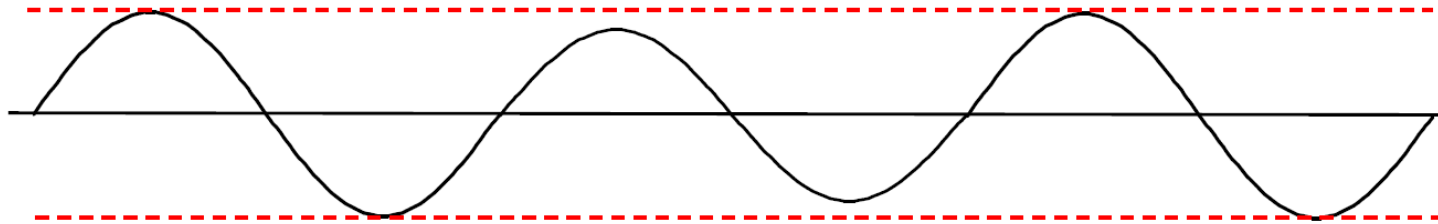
- Απόκλιση από την ημιτονοειδή μορφή: $\frac{\hat{u}}{U_{rms}} = \sqrt{2} \pm 5\%$



Παραγωγή υψηλής εναλλασσόμενης τάσης (2)

Απαίτηση (IEC 60060-1)

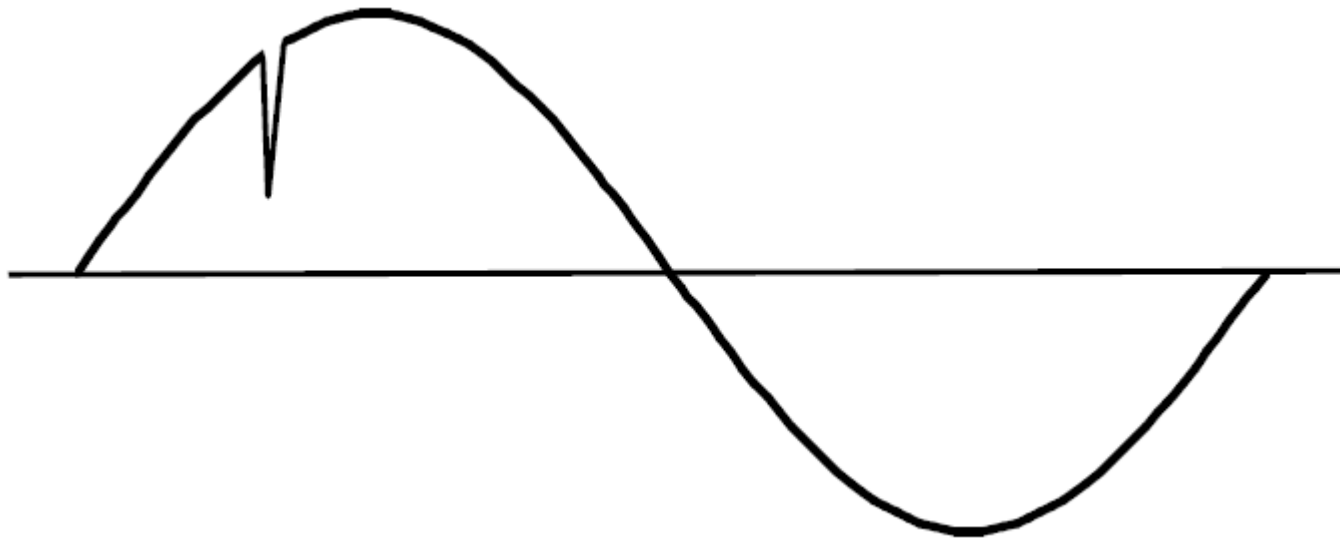
- Διαφορά στις τιμές κορυφής μεταξύ δύο διαδοχικών περιόδων $\leq 5\%$



Παραγωγή υψηλής εναλλασσόμενης τάσης (3)

Απαίτηση (IEC 60060-1)

- Βυθίσεις τάσης (ακόμα και μεταβατικές) $\leq 20\%$ της τιμής κορυφής

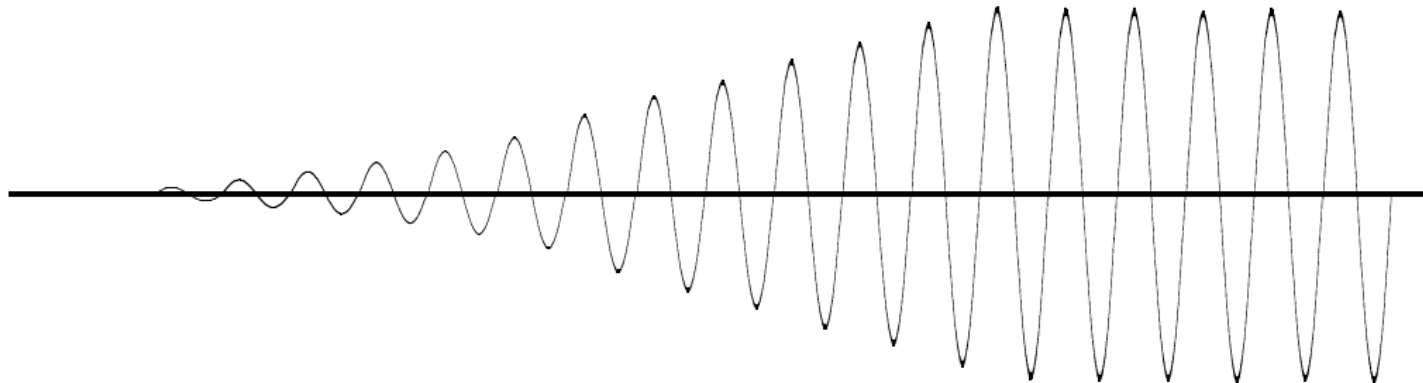


Παραγωγή υψηλής εναλλασσόμενης τάσης (4)

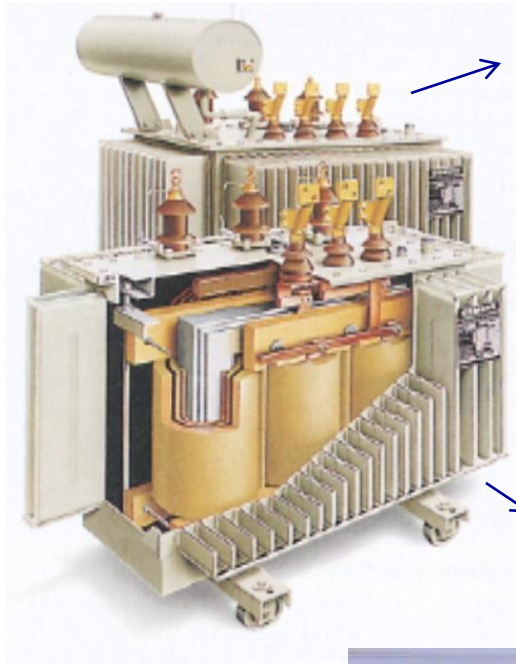
ΑΠΑΓΟΡΕΥΤΑΙ

Ξαφνική σύνδεση του μετασχηματιστή στο δοκίμιο, όταν η τάση είναι μεγαλύτερη του 50% της ονομαστικής τάσης εξόδου (Προκαλούνται ηχηρές ταλαντώσεις)

✓ Σταδιακή αύξηση της τάσης από το μηδέν!



Μετασχηματιστές ισχύος



Μ/Σ λαδιού με
δοχείο
διαστολής

Μ/Σ λαδιού
στεγανός



Μ/Σ ξηρού τύπου



Μετασχηματιστές δοκιμών



100kV



550kV



600kV

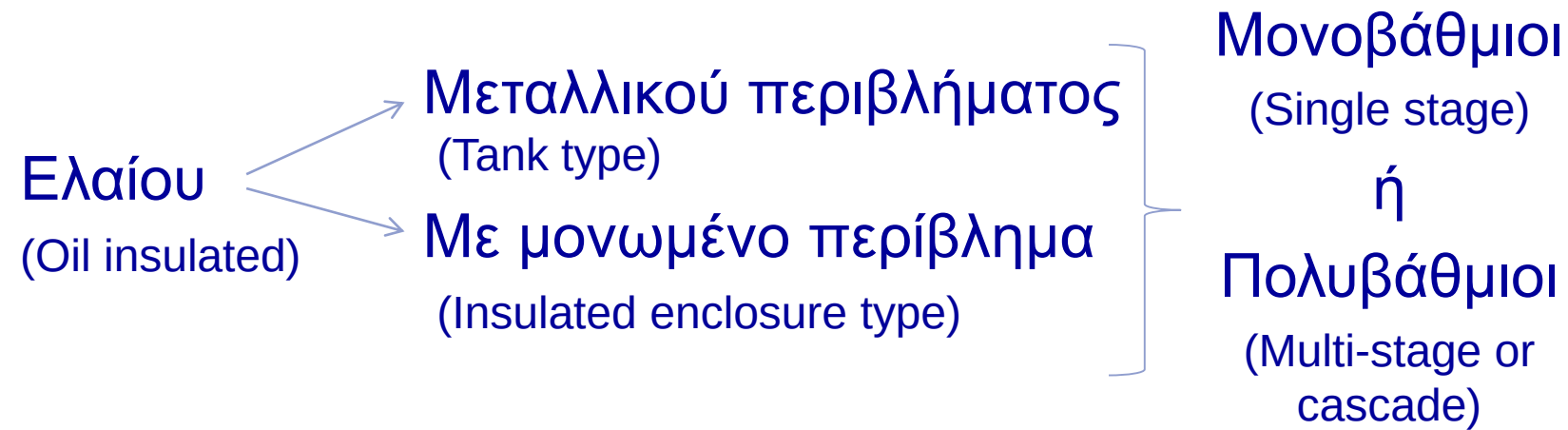


500kV

Διαφορές μεταξύ μετασχηματιστών ισχύος και δοκιμών

	ΜΣ ισχύος	ΜΣ δοκιμών
Ονομαστική ισχύς	Μεγάλη	Μικρή
Φάσεις	Τριφασικοί	Μονοφασικοί
Συντελεστής ασφαλείας της μόνωσης	$\gg 1$	≥ 1
Φασική τάση	μέχρι $750 / \sqrt{3}$ kV	> 2000 kV
Λειτουργία	Συνεχής	Μικρής διάρκειας
Όρια τάσης	$\pm 10\%$	$0 - V_{\max}$

Κατασκευαστικά στοιχεία μετασχηματιστών δοκιμών (1)



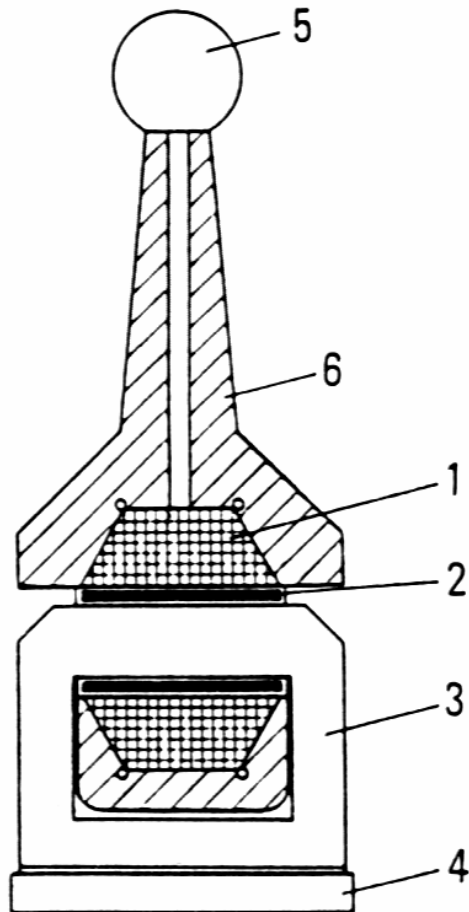
Εποξικής ρητίνης
(Epoxy resin insulated)

Εξαφθοριούχου θείου SF_6
(SF_6 insulated)

Κατασκευαστικά στοιχεία μετασχηματιστών δοκιμών (2)

Μ/Σ αέρος	Μ/Σ ελαίου
• Μικρό βάρος • Όχι μονωτήρες διέλευσης • Μεγάλη ευαισθησία έναντι σκόνης και υγρασίας • Μεγάλη ροή σκέδασης λόγω μεγάλων διαστάσεων • Αυξημένη ανηγμένη τάση βραχυκύκλωσης	• Εντός μεταλλικού (με μονωτήρες διέλευσης) ή μονωτικού δοχείου • Δυνατότητες απαγωγής θερμότητας

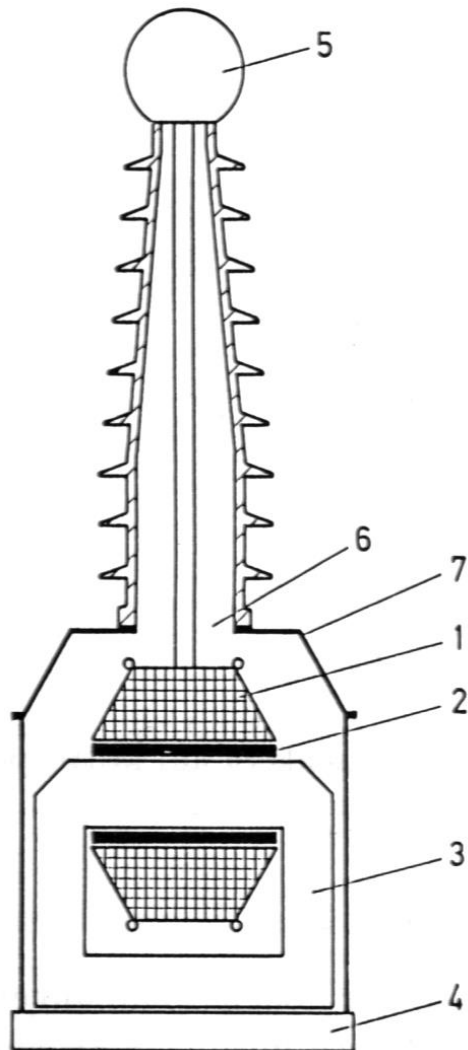
Μετασχηματιστές δοκιμών εποξικής ρητίνης



- 1 τύλιγμα υψηλής τάσης
- 2 τύλιγμα χαμηλής τάσης
- 3 πυρήνας
- 4 βάση
- 5 ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης
- 6 μόνωση εποξικής ρητίνης



Μετασχηματιστές δοκιμών – μεταλλικό περιβλήμα με μονωτικό λάδι



- 1 τύλιγμα υψηλής τάσης
- 2 τύλιγμα χαμηλής τάσης
- 3 πυρήνας
- 4 βάση
- 5 ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης
- 6 μονωτήρας διέλευσης
- 7 μεταλλικού κελύφους

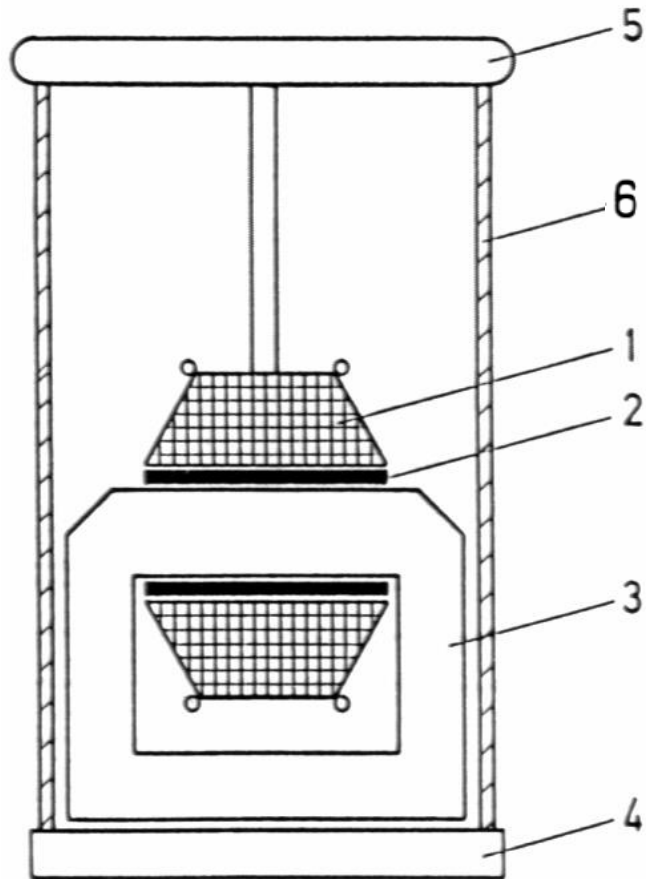


- Καλή ψύξη (μεταλλικό κέλυφος)
- Σχετικά μικρός όγκος λαδιού
- Υψηλή ισχύς

ΑΛΛΑ

- Ακριβοί μονωτήρες διέλευσης
- Ακριβά ηλεκτρόδια

Μετασχηματιστές δοκιμών – μονωμένο περίβλημα με μονωτικό λάδι



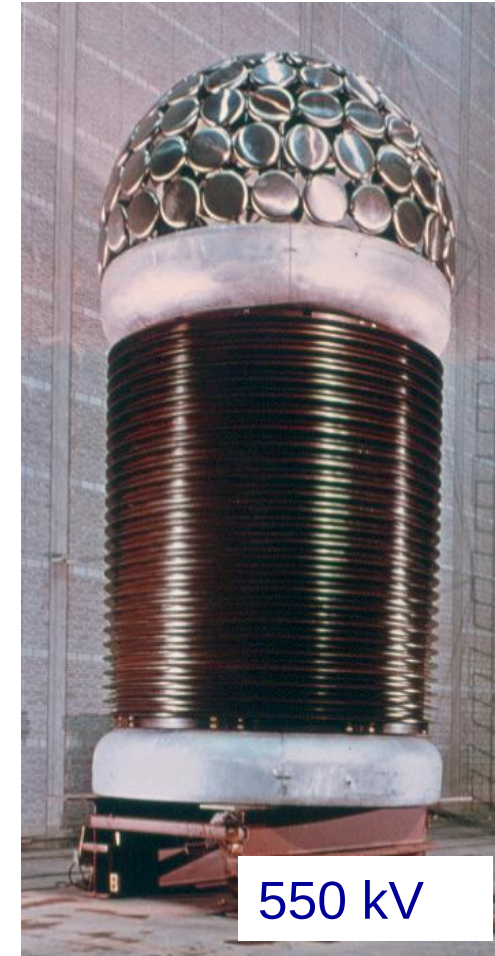
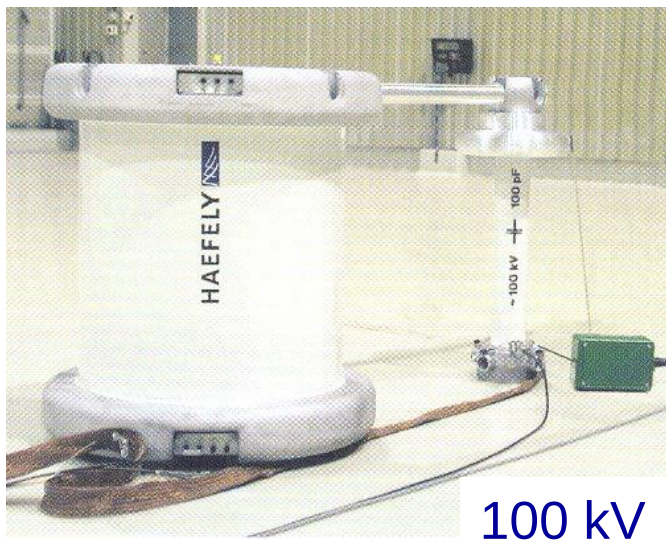
- 1 τύλιγμα υψηλής τάσης
- 2 τύλιγμα χαμηλής τάσης
- 3 πυρήνας
- 4 βάση
- 5 ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης
- 6 μονωμένο περίβλημα

- Δεν απαιτείται μονωτήρας διέλευσης
- Απλό ηλεκτρόδιο

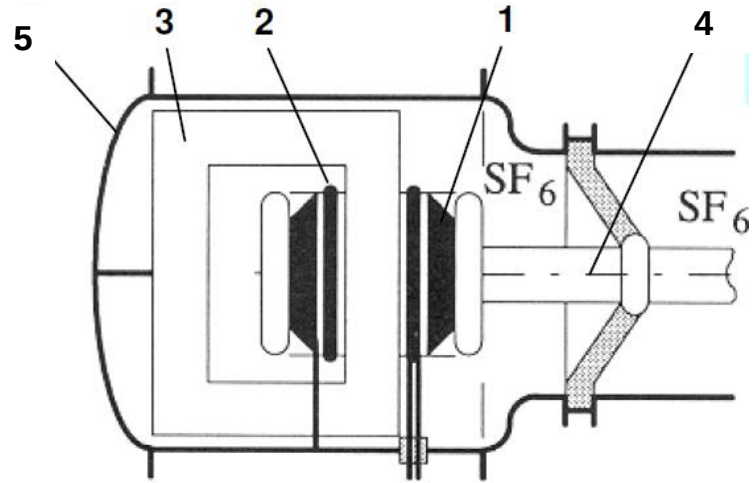
ΑΛΛΑ

- Μεγάλος όγκος λαδιού
- Κακή ψύξη

Μετασχηματιστές δοκιμών – μονωμένο περίβλημα με μονωτικό λάδι



Μετασχηματιστές δοκιμών εξαφθοριούχου θείου (SF_6)



- 1 τύλιγμα υψηλής τάσης
- 2 τύλιγμα χαμηλής τάσης
- 3 πυρήνας
- 4 ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης
- 5 δοχείο με αντοχή στην πίεση (χάλυβας, αλουμίνιο)



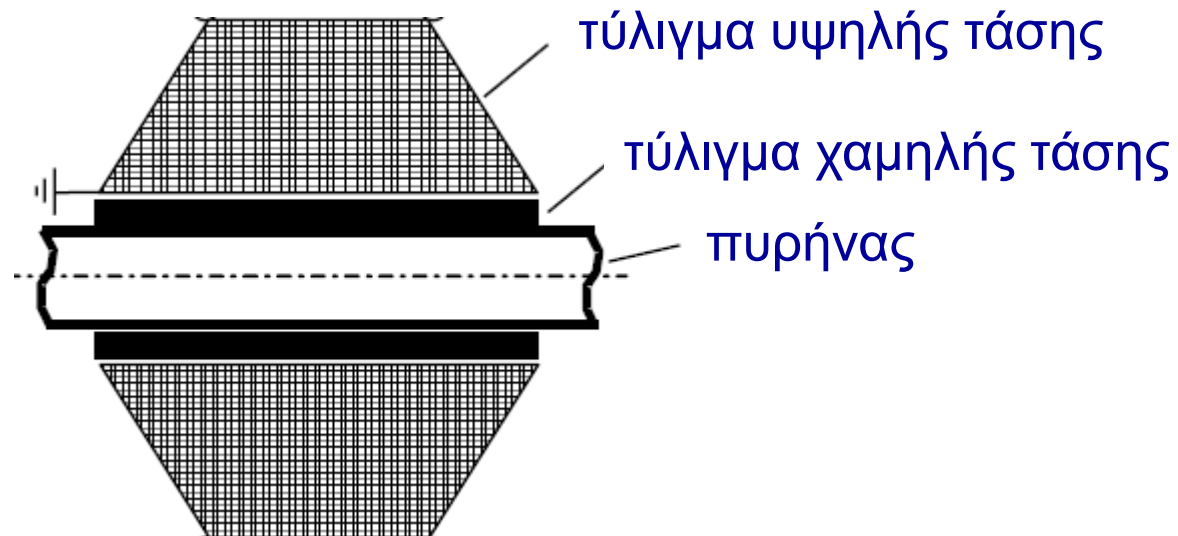
Χαρακτηριστικά μεγέθη μετασχηματιστών δοκιμών

Ονομαστική τάση [kV]	Ονομαστικό ρεύμα [A]	Ονομαστική ισχύς [kVA]	Ανηγγμένη τάση βραχυκύκλωσης [%]
100	0,1	10	10
300	0,3	100	10
800	0,5	400	15
1200	1	1200	25
2000	2	4000	25

Συνήθης διάρκεια λειτουργίας: 15min – 1h

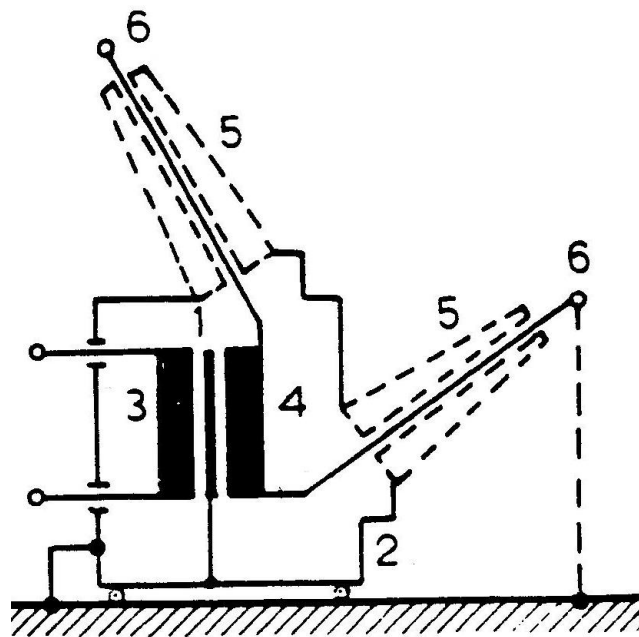
Μετασχηματιστές (1)

Διάταξη τυλιγμάτων μετασχηματιστή ως προς τον πυρήνα αυτού

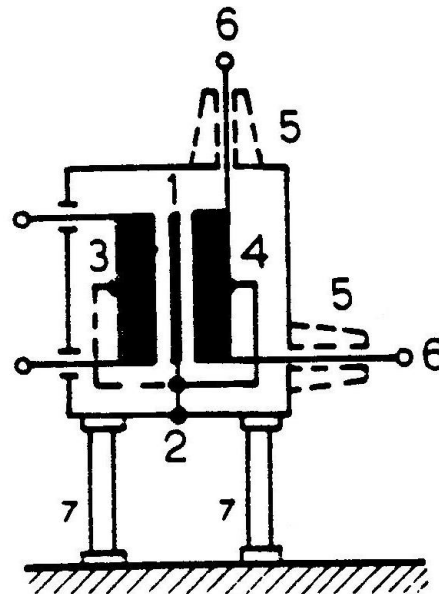


Μετασχηματιστές (2)

Δυνατότητες εγκατάστασης μεταλλικού κιβωτίου μετασχηματιστή ως προς το έδαφος



(α)



(β)

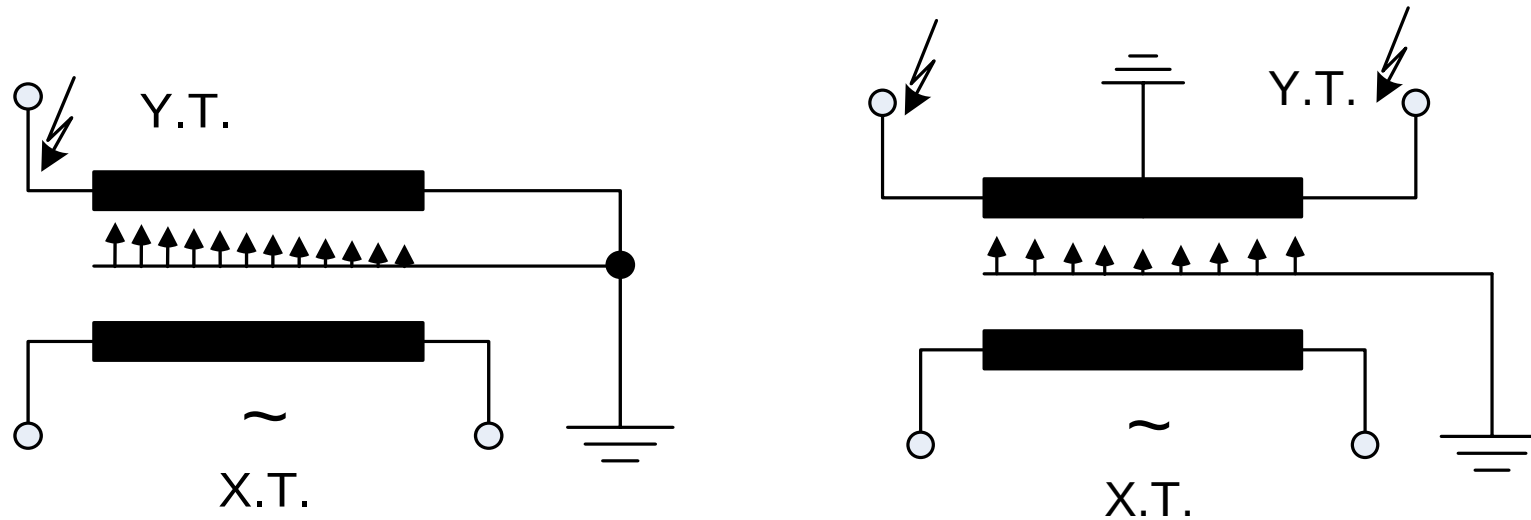
- 1 πυρήνας
- 2 μεταλλικό δοχείο
- 3 τύλιγμα χαμηλής τάσης
- 4 τύλιγμα υψηλής τάσης
- 5 μονωτήρες διέλευσης
- 6 ακροδέκτες υψηλής τάσεως
- 7 μονωτήρες στήριξης

α) Μεταλλικό κιβώτιο απ' ευθείας επί του εδάφους

β) Μεταλλικό κιβώτιο επί μονωτήρων στήριξης

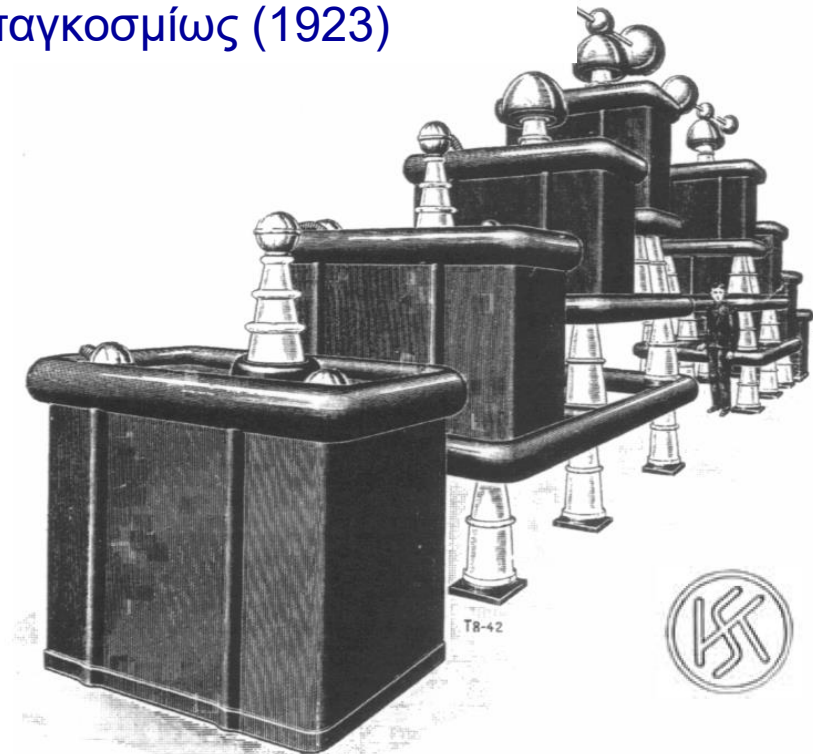
Μετασχηματιστές (3)

Συνήθεις συνδεσμολογίες μονοβάθμιων μετασχηματιστών δοκιμής



Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές (1)

1 MV Πρώτος Μ/Σ δοκιμής
παγκοσμίως (1923)



1,8MV



Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές (2)



1,2MV



3MV



1,2MV

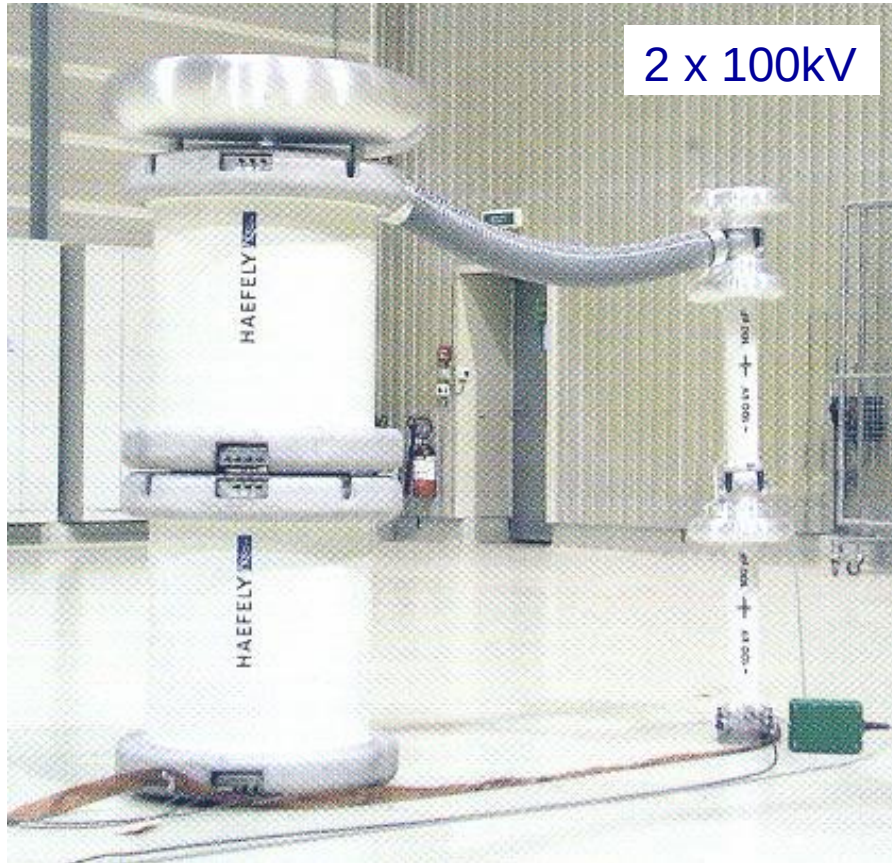


2,25MV

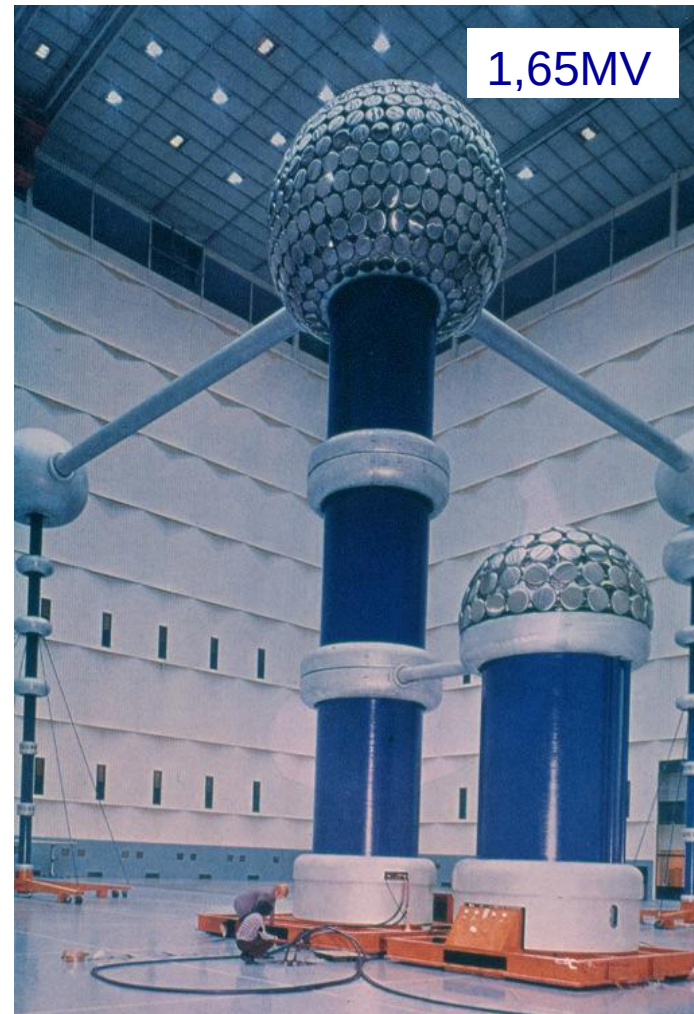


1,2MV

Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές (3)

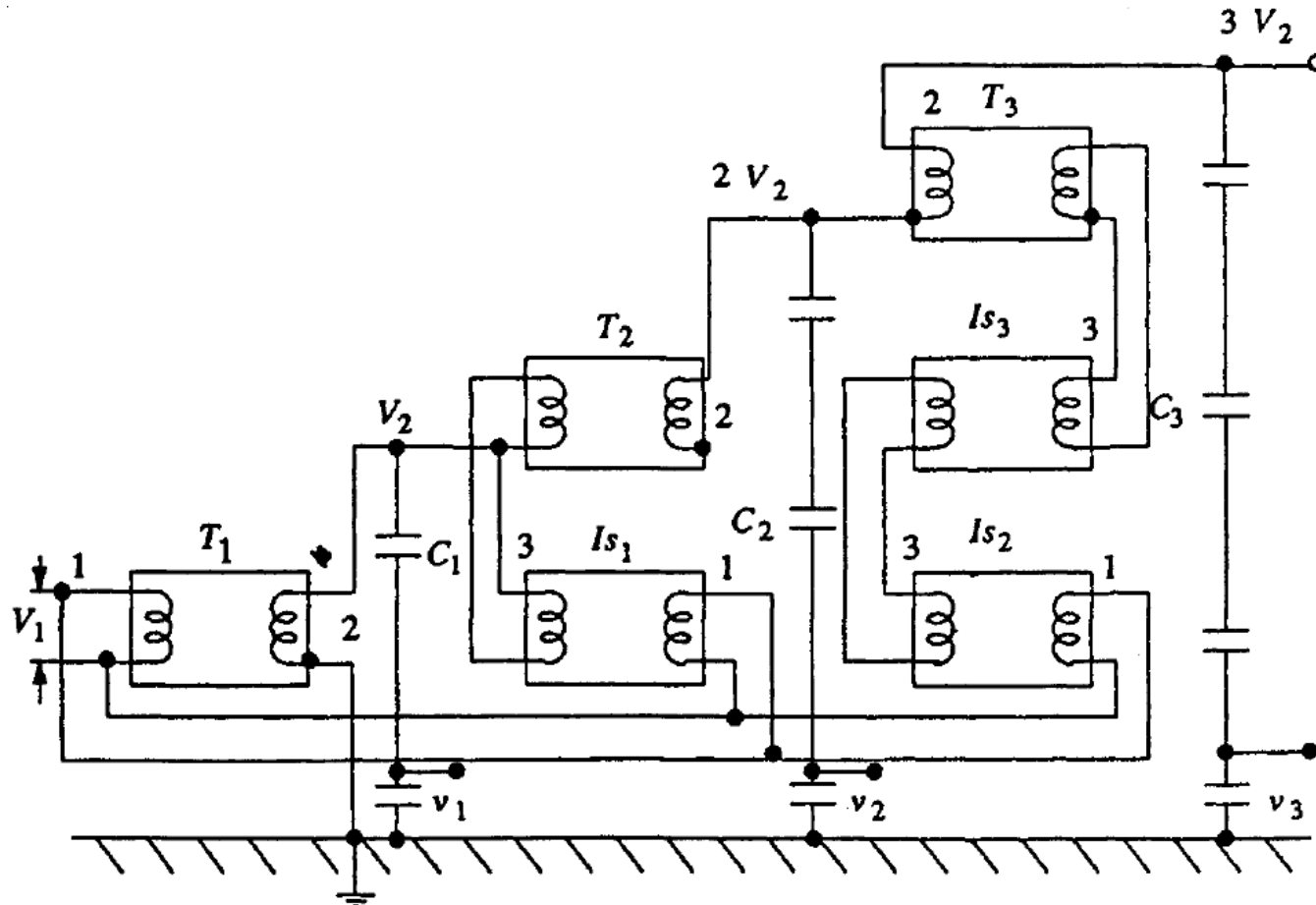


Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές (4)



Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές –

Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας απ' ευθείας από το δίκτυο (1)



T_1, T_2, T_3 : βαθμίδες πολυβάθμιου Μ/Σ

I_{s1}, I_{s2}, I_{s3} : βαθμίδες Μ/Σ μονώσεως

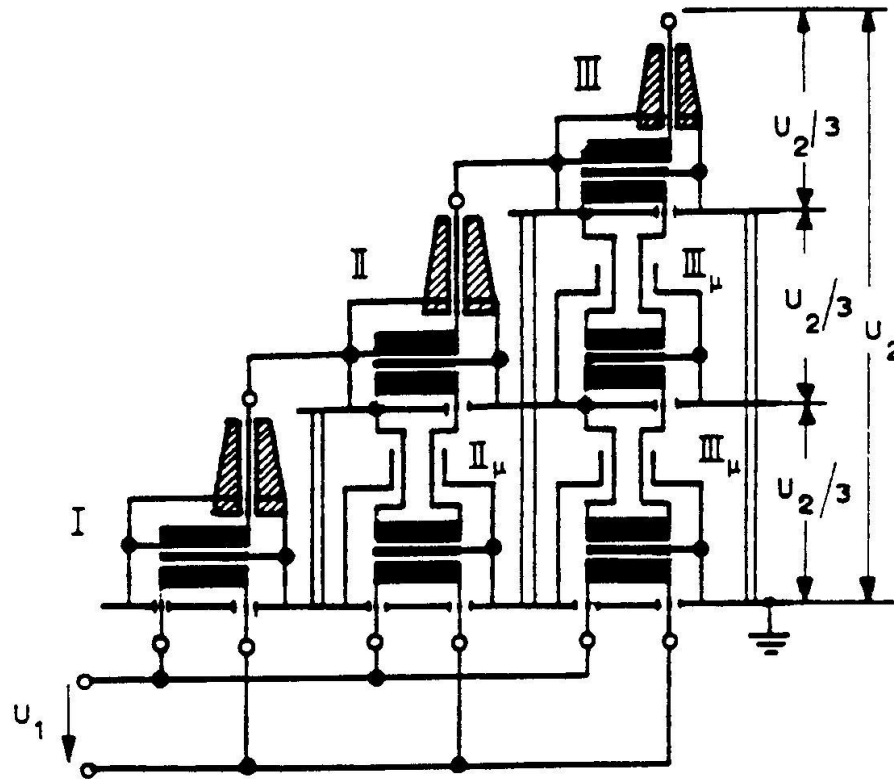
C_1, C_2, C_3 : Χωρητικοί καταμεριστές μέτρησης

V_1, V_2, V_3 : Μετρούμενη τάση

Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές – Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας απ' ευθείας από το δίκτυο (2)

- Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας απ' ευθείας από το δίκτυο

(α)

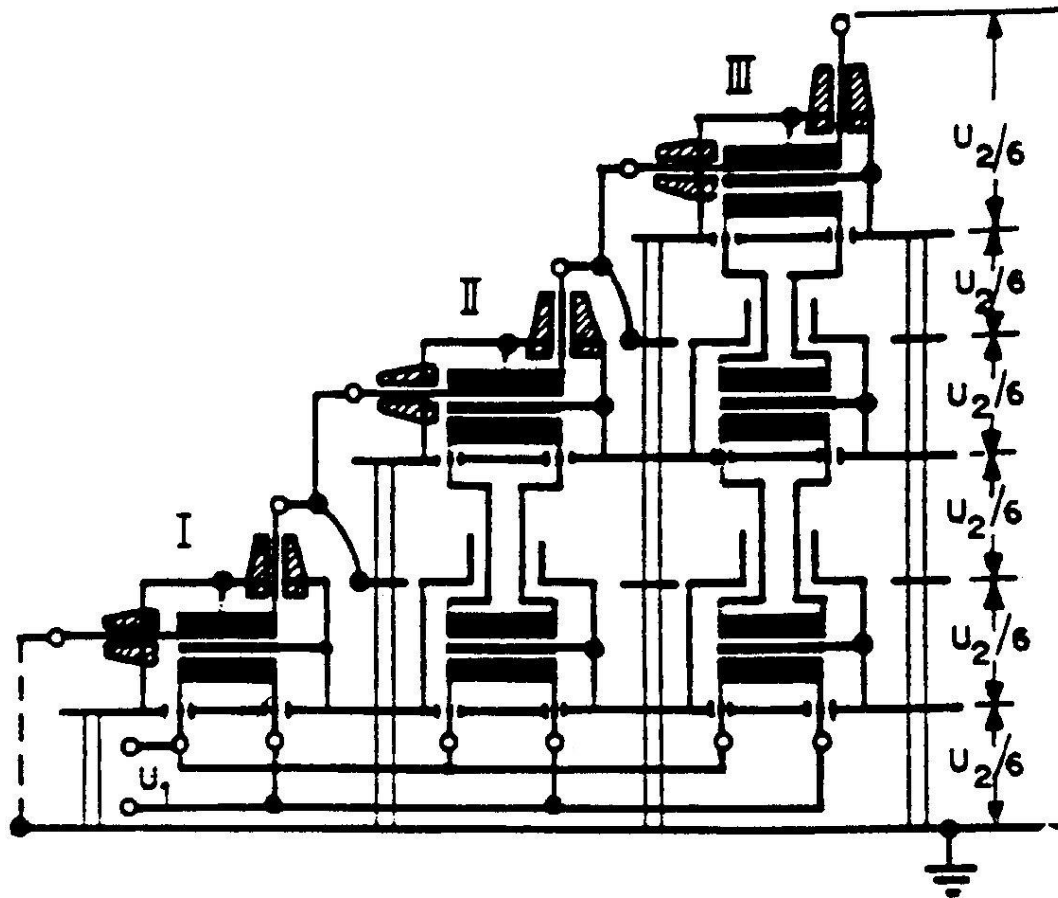


I, II, III : επί μέρους μετασχηματιστές δοκιμής (βαθμίδες)

I_μ , II_μ , III_μ : μετασχηματιστές μονώσεως

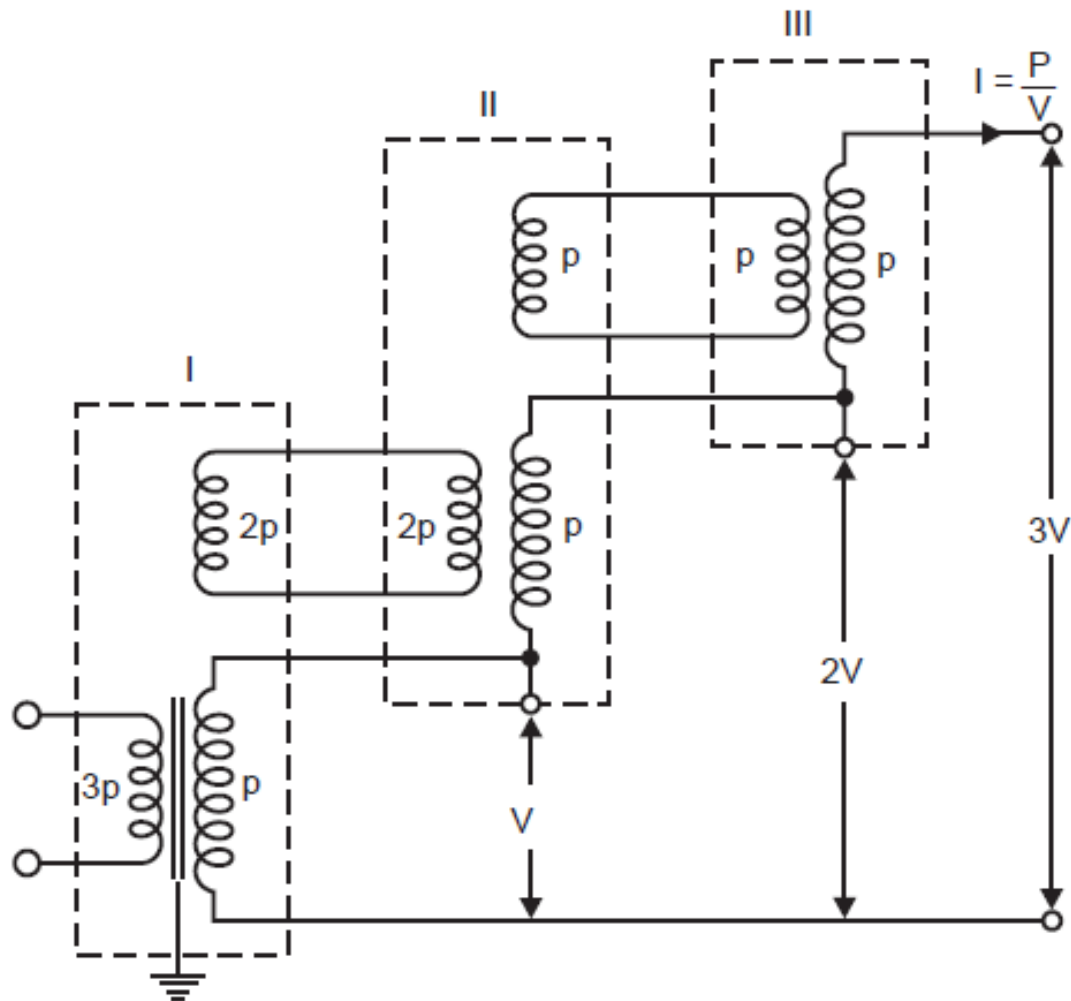
Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές – Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας απ' ευθείας από το δίκτυο (3)

(β)

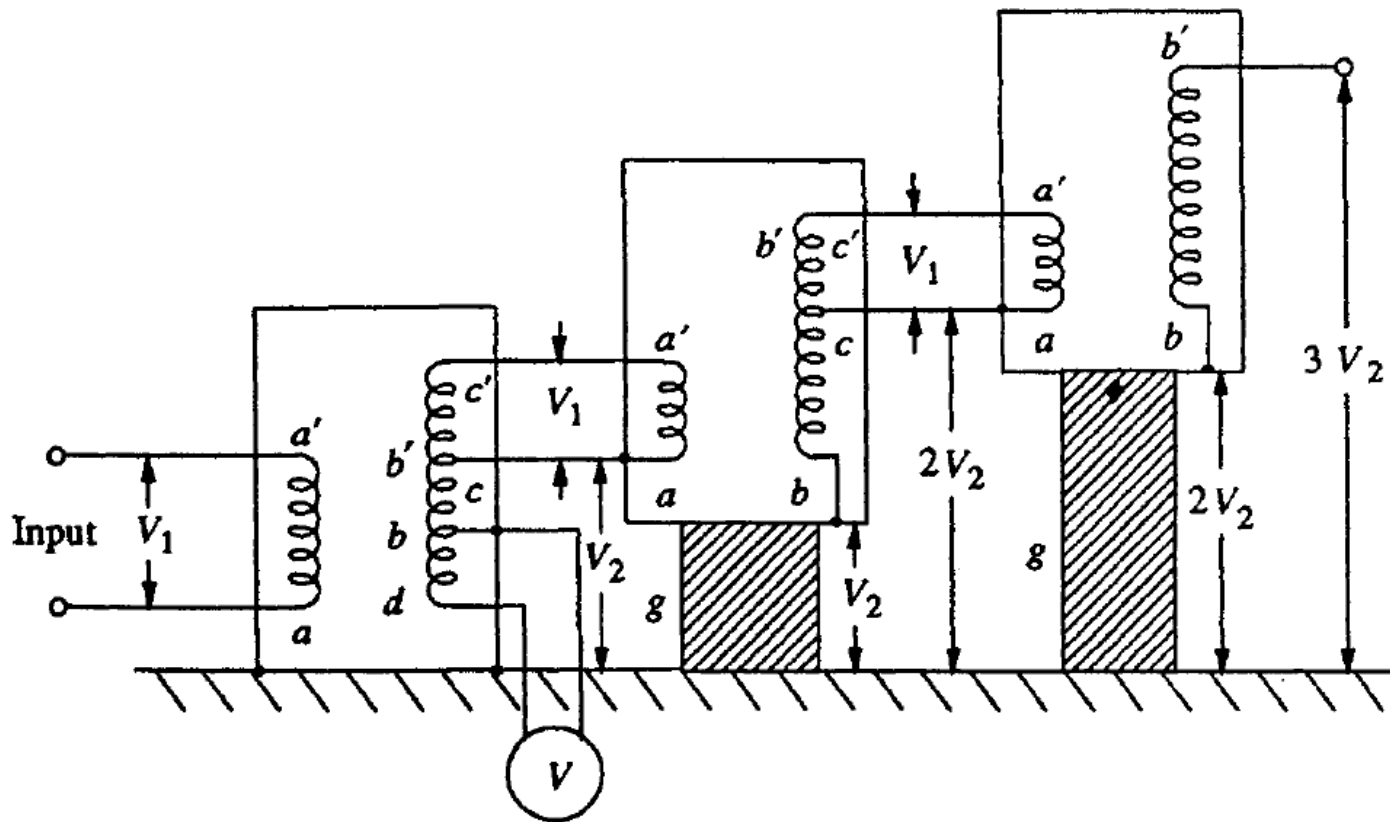


I, II, III : επί μέρους μετασχηματιστές δοκιμής (βαθμίδες)

Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές – Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (1)



Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές – Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (2)



V_1 : τάση εισόδου

V_2 : τάση εξόδου

αα': τύλιγμα χαμηλής τάσης (πρωτεύον)

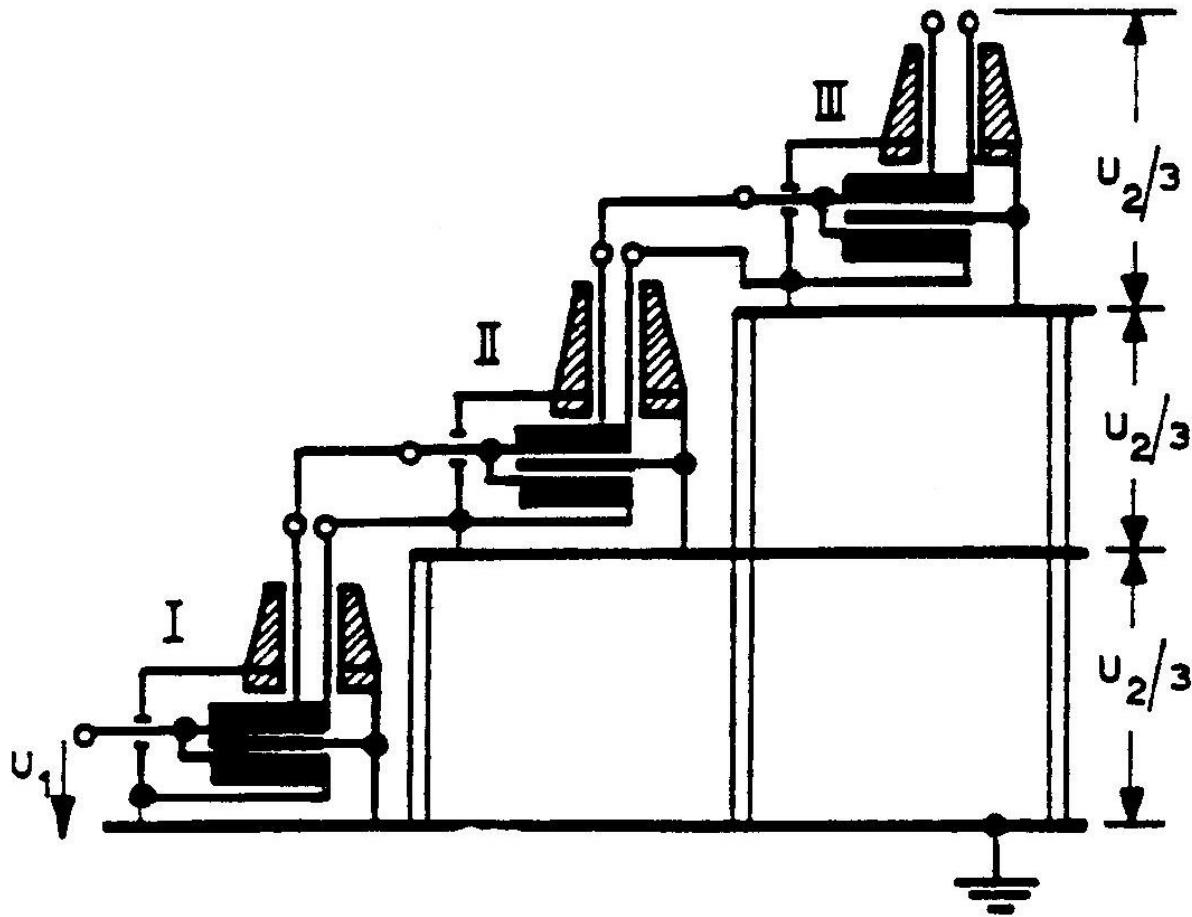
bb': τύλιγμα υψηλής τάσης (δευτερεύον)

cc': τύλιγμα διέγερσης

bd: τύλιγμα μέτρησης (200V - 500V)

Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές – Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (3)

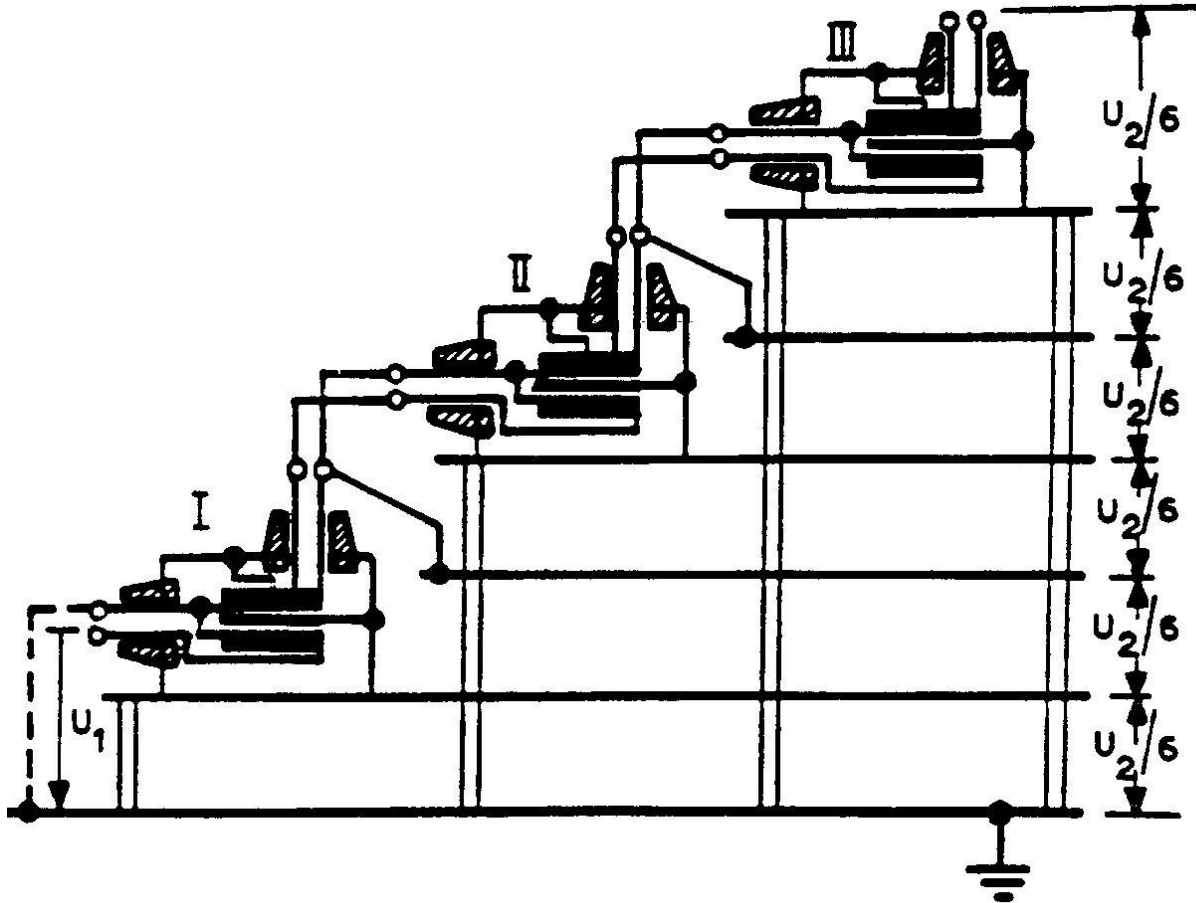
(Υ)



I, II, III : επί μέρους μετασχηματιστές δοκιμής (βαθμίδες)

Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές – Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (4)

(δ)



I, II, III : επί μέρους μετασχηματιστές δοκιμής (βαθμίδες)

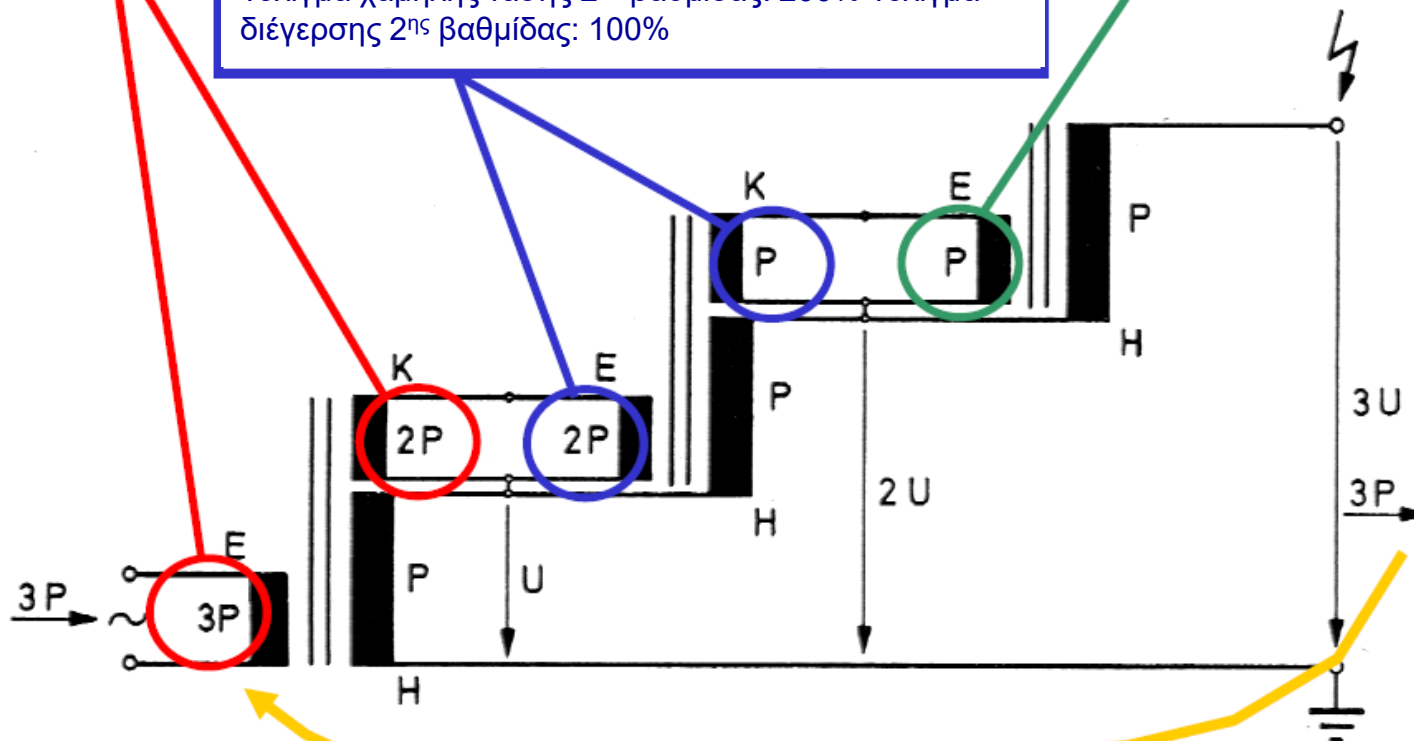
Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές – Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (5)

Απαίτηση σε ισχύ

Τύλιγμα χαμηλής τάσης 1^{ης} βαθμίδας: 300%
Τύλιγμα διέγερσης 1^{ης} βαθμίδας: 200%

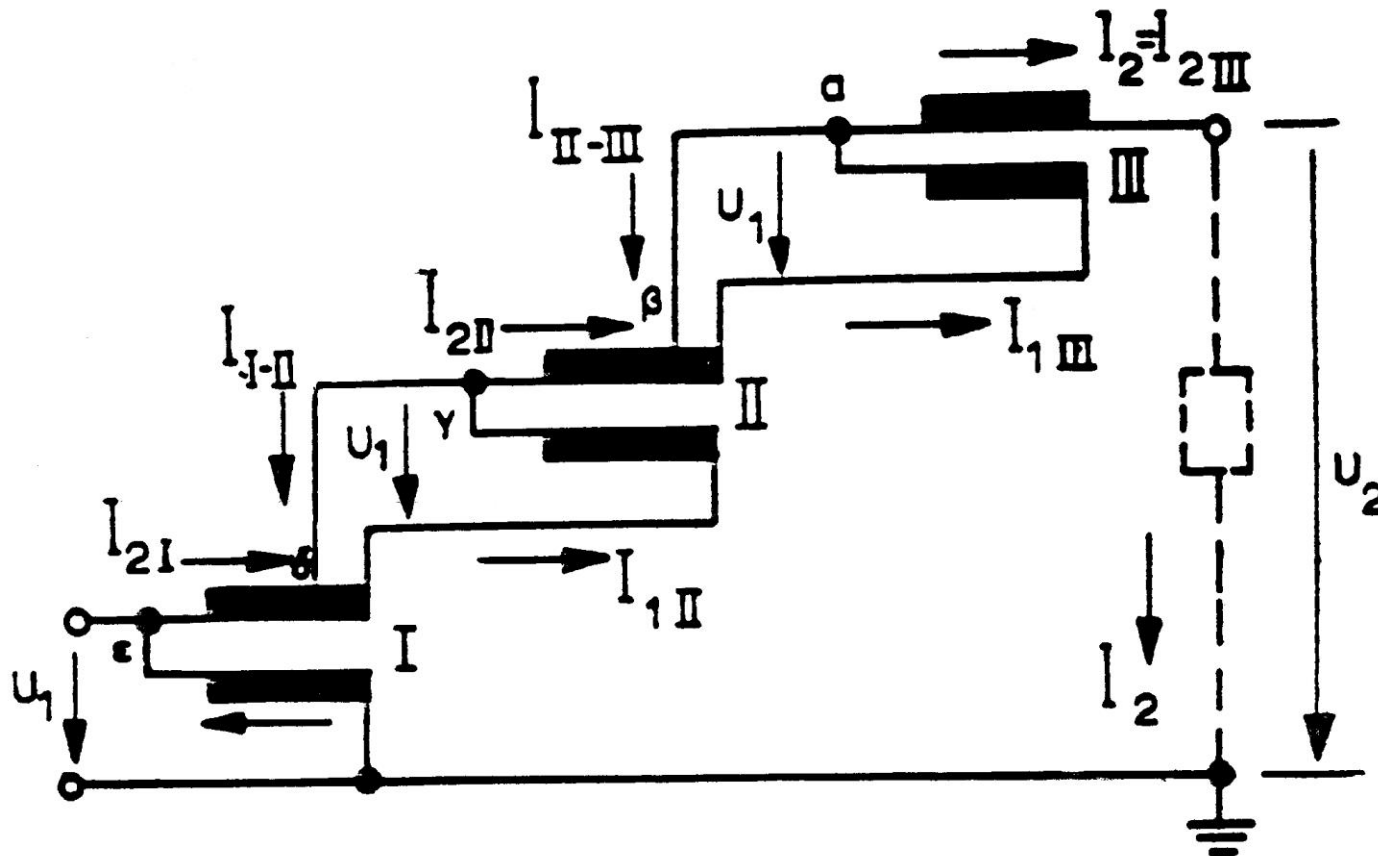
Τύλιγμα χαμηλής τάσης 2^{ης} βαθμίδας: 200% Τύλιγμα
διέγερσης 2^{ης} βαθμίδας: 100%

Τύλιγμα χαμηλής τάσης 3^{ης} βαθμ.: 100%

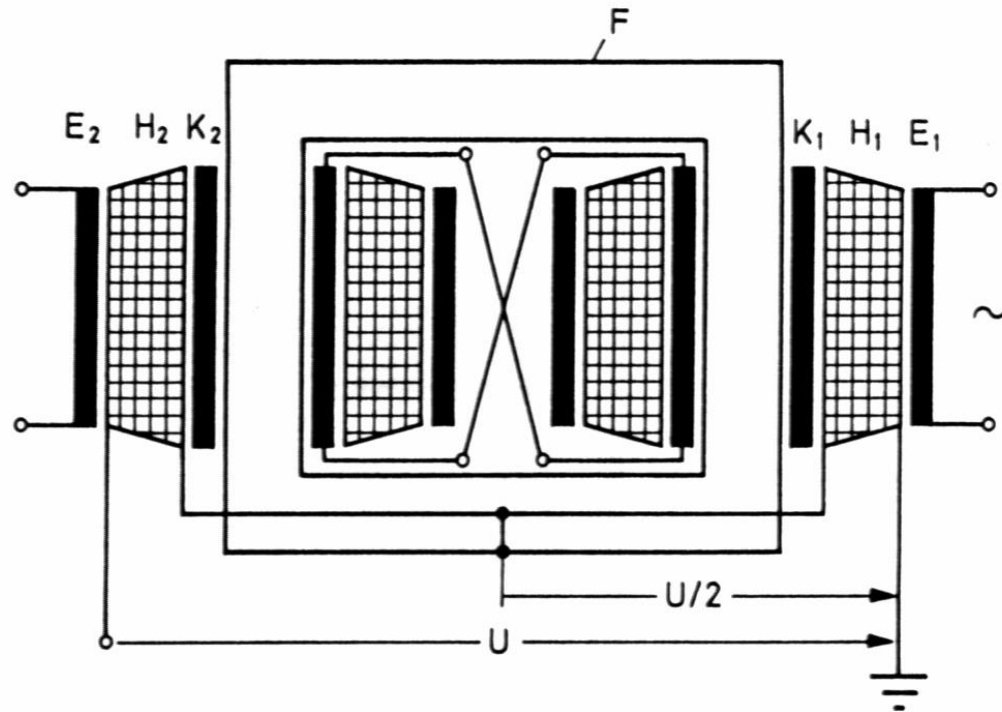


Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές – Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (6)

Υπολογισμός της επιφόρτισης κάθε βαθμίδας τριβάθμιου μετασχηματιστή δοκιμής



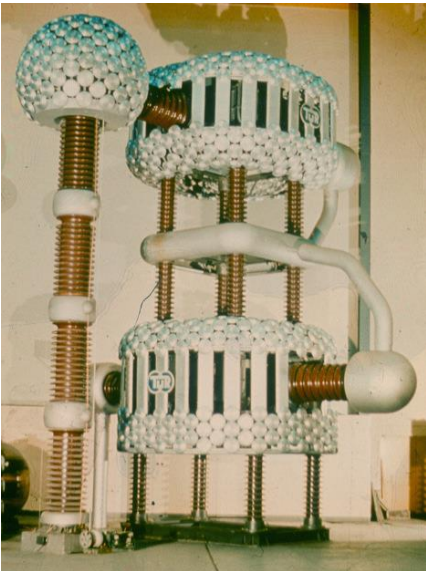
Μετασχηματιστής με δύο βαθμίδες σε έναν πυρήνα (1)



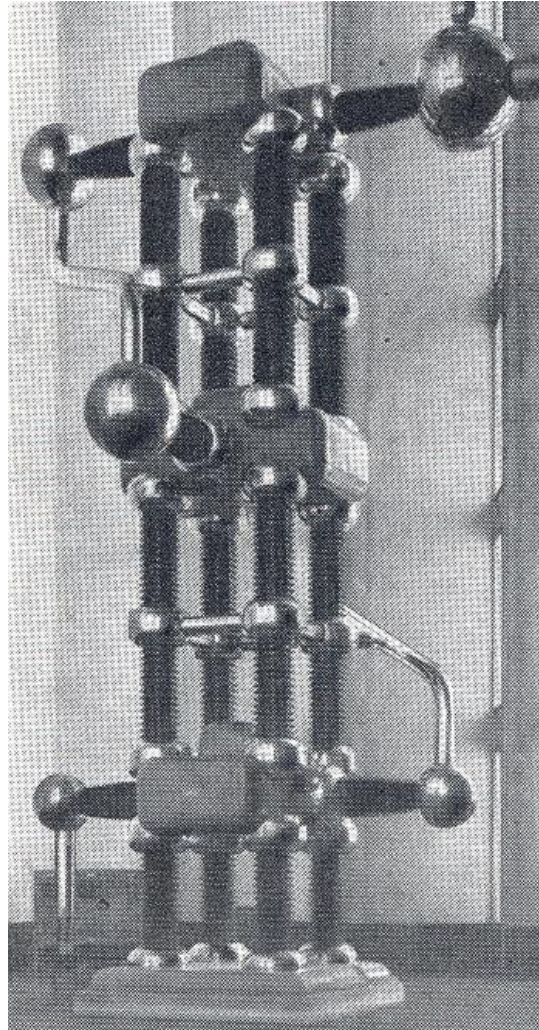
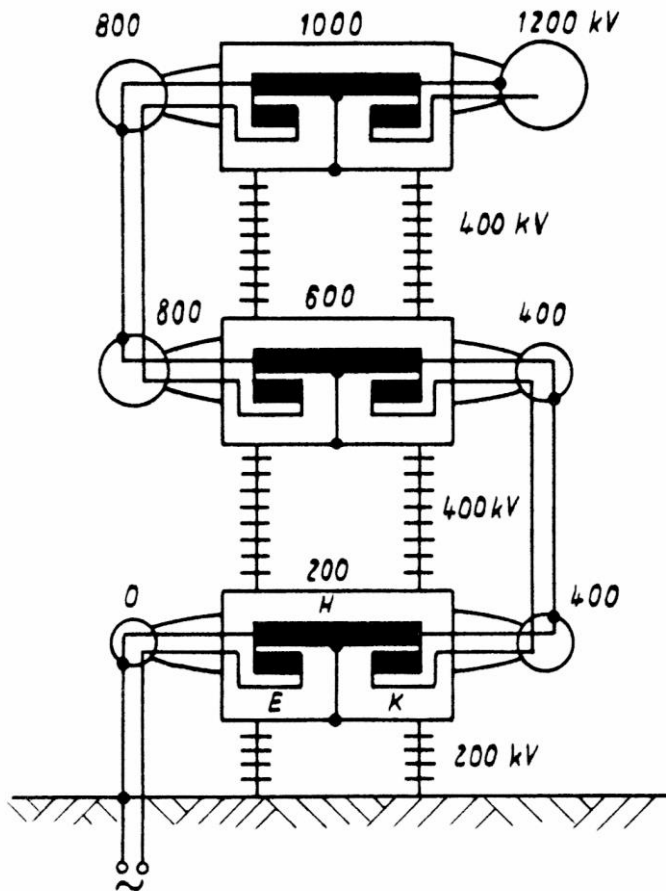
E_1, E_2 τύλιγμα πρωτεύοντος
 H_1, H_2 τύλιγμα υψηλής τάσης
 K_1, K_2 τύλιγμα διέγερσης
 F πυρήνας

- Πυρήνας στο 50% του δυναμικού
- Χαμηλότερες απαιτήσεις σε μόνωση του τυλίγματος υψηλής τάσης έναντι του πυρήνα
- Απαιτεί δύο μονωτήρες διέλευσης
- Μόνο ένα τύλιγμα χαμηλής τάσης
- Το άλλο τύλιγμα χαμηλής τάσης χρησιμοποιείται ως τύλιγμα διέγερσης για την επόμενη βαθμίδα

Μετασχηματιστής με δύο βαθμίδες σε έναν πυρήνα (2)

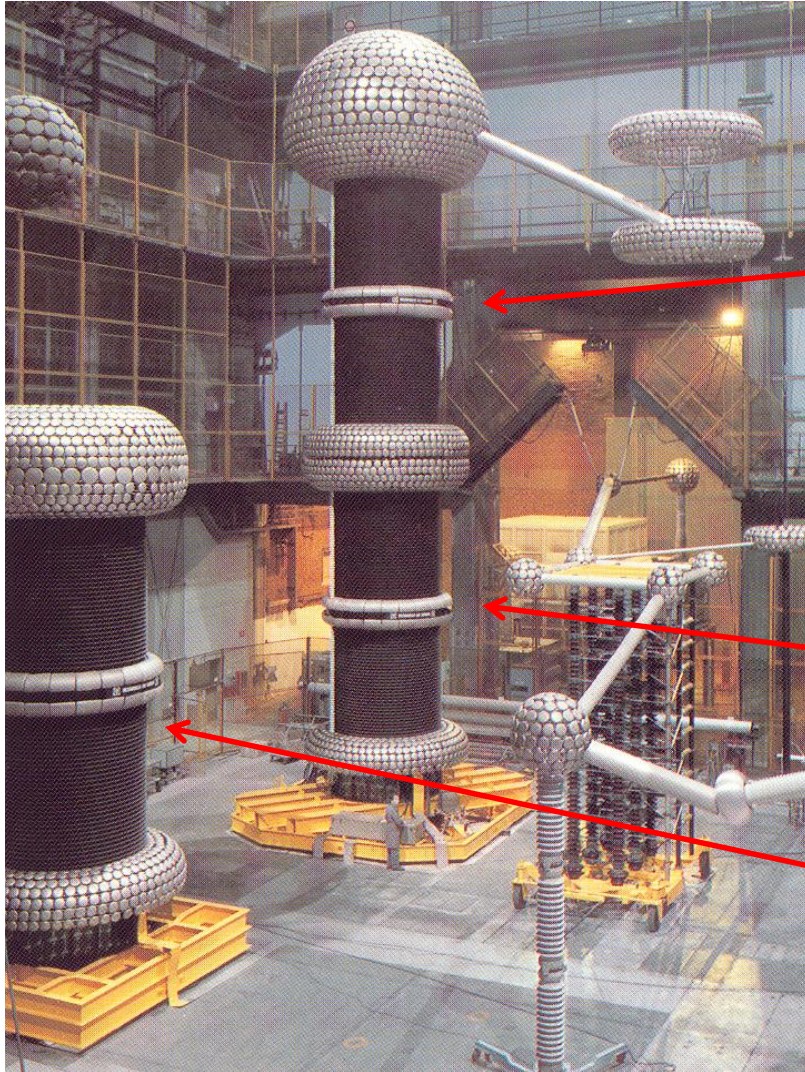


Μετασχηματιστής με δύο βαθμίδες σε έναν πυρήνα (3)



1,2MV
(3 x 2 x 200kV)

Μετασχηματιστής με δύο βαθμίδες σε έναν πυρήνα (4)



2 x 400kV

2 x 400kV

2 x 400kV

Υπολογισμός της τάσης δοκιμής

Τάση λειτουργίας [kV]	Εναλλασσόμενη τάση [kV]	Κρουστική τάση [kV]		Ελάχιστο μήκος διακένου [m]
		Βραχείας διάρκειας	Μακράς διάρκειας	
20	55	125	-	-
30	85	170	-	-
110	260	550	-	-
220	505	1050	-	-
400	640	1425	900	4
765	960	2300	1300	12
1100	1400	2800	1800	20
1500	1900	3500	2200	30

Συντελεστές

Εναλλασσόμενη τάση: 1,1

Συνεχής τάση: 1,7

Βραχείας διάρκειας κρουστική τάση: 2,0

Μακράς διάρκειας κρουστική τάση: 2,6

Χωρητικότητες δοκιμίων

- Μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης: 20 – 50 pF
- Μονωτήρες διέλευσης: 200 – 400 pF
- Μετασχηματιστές ισχύος ($S < 1 \text{ MVA}$): 3000 pF
($1 \text{ MVA} < S < 100 \text{ MVA}$): 3000 – 25000 pF
- Μετασχηματιστές μέτρησης: 200 – 400 pF
- Καλώδια (ανά τρέχον m): 150 – 1000 pF
- Πυκνωτής μέτρησης (Τάση δοκιμής $< 100 \text{ kV}$): 100 pF
($100 \text{ kV} < \text{Τάση δοκιμής} < 1000 \text{ kV}$): 100 – 1000 pF

Ονομαστική ισχύς: $S = k \cdot \omega \cdot C_p \cdot U^2$

όπου $k = 5 \dots 10$, C_p η χωρητικότητα του δοκιμίου και U η τάση δοκιμής

Πρόσθετες χωρητικότητες

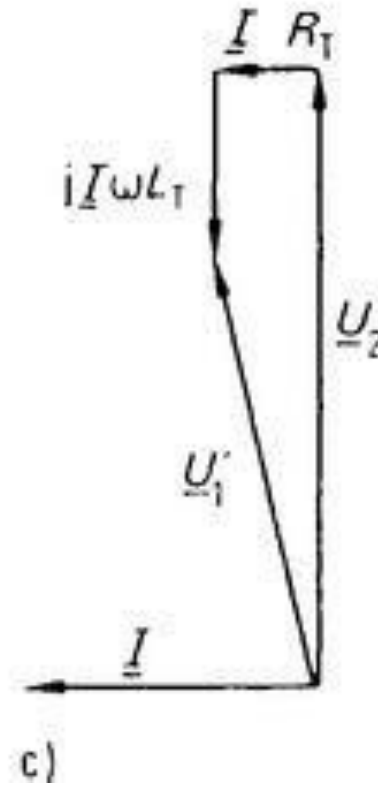
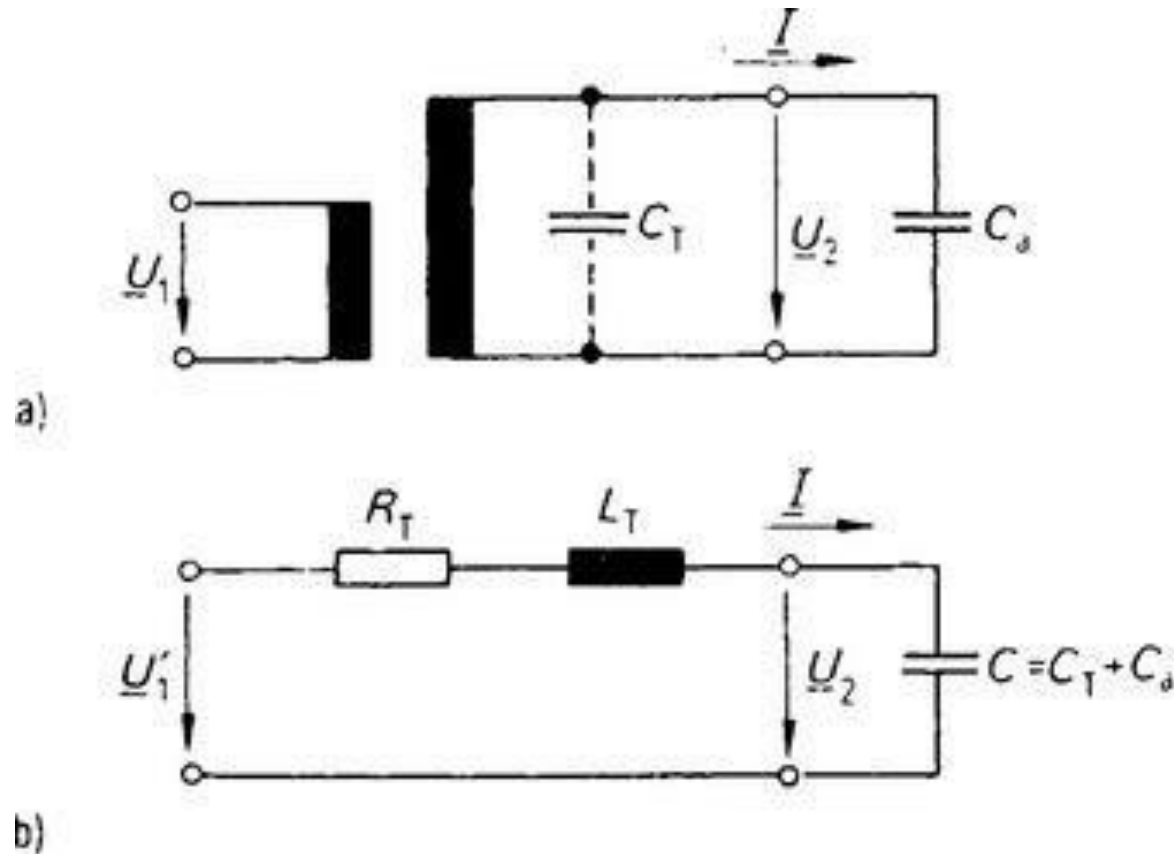
- Ηλεκτρόδια
- Συνδέσεις υψηλής τάσης
- Συστήματα μέτρησης τάσης (π.χ. χωρητικός καταμεριστής)

- Μέχρι 100kV τάση δοκιμής $\Rightarrow$ 100pF
- Μέχρι 1000kV τάση δοκιμής $\Rightarrow$ 1000pF

Τροφοδοσία Μ/Σ δοκιμών

- Διάταξη χειρισμών
- Διάταξη μέτρησης
- Τροφοδοσία:
 - ❖ Με στρεφόμενο Μ/Σ
 - ❖ Με μετακίνηση του σιδηρού πυρήνα
 - ❖ Με ιδιαίτερη γεννήτρια (εφαρμόζεται όταν επιδιώκεται και αλλαγή συχνότητας, π.χ. για να γίνει η δοκιμή επαγόμενης τάσης ή όταν η ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου είναι μικρή)

Ηλεκτρική συμπεριφορά Μ/Σ



- a) διάγραμμα του κυκλώματος
- b) ισοδύναμο κύκλωμα
- c) διανυσματικό διάγραμμα

Ηλεκτρική συμπεριφορά Μ/Σ

C_T η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων υψηλής τάσης

C_a η χωρητικότητα του δοκιμίου (συμπεριλαμβανομένης και της μετρητικής διάταξης)

Το ρεύμα μαγνήτισης μπορεί να αγνοηθεί όσο ο σιδηροπυρήνας δεν βρίσκεται σε κορεσμό.

$R_T + j\omega L_T$ η εμπέδηση βραχυκυκλώματος

$C = C_T + C_a$ η συνολική χωρητικότητα στην πλευρά υψηλής τάσης

Επειδή $R_T \ll j\omega L_T$ και επειδή η τάση δευτερεύοντος $\underline{U}_2$ είναι σχεδόν συμφασική με την τάση πρωτεύοντος $\underline{U}_1$ ισχύει:

$$\begin{array}{l} \text{(Ανύψωση τάσης)} \\ \text{(Φαινόμενο Ferranti)} \end{array} \quad U_2 \approx U_1' \frac{1}{1 - \omega^2 L_T C} \quad \left(\text{Πάντα ισχύει: } \frac{1}{1 - \omega^2 L_T C} > 1 \right)$$

Η ανηγμένη τάση βραχυκύκλωσης του ΜΣ u_k , όταν το χωρητικό φορτίο C βρίσκεται υπό ονομαστική τάση U_n , υπό ονομαστική συχνότητα και απορροφά το ονομαστικό ρεύμα I_n , δίνεται από τη σχέση:

$$u_k = \frac{I_n \omega L_T}{U_n} = \omega^2 L_T C$$

Παράδειγμα

- Τάση δοκιμής: 1 MV
- Χωρητικότητα φορτίου: 3,2 nF

Ρεύμα

$$I = U \cdot \omega \cdot C = 1 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 1 \text{ A}$$

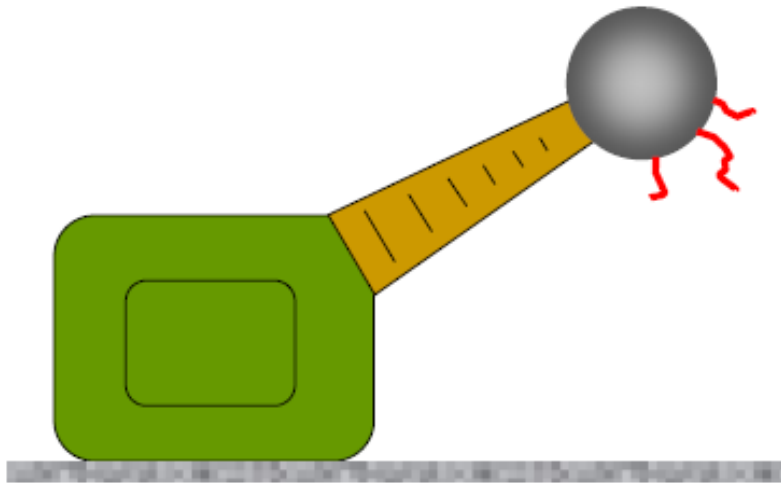
Ισχύς

$$S = U^2 \cdot \omega \cdot C = (1 \cdot 10^6 \text{ V})^2 \cdot 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 1 \text{ MVA}$$

Παράδειγμα

Επιλογή ακτίνας ηλεκτροδίου, ώστε να μην υπάρχουν μερικές εκκενώσεις:

- Σφαιρικό ηλεκτρόδιο για εναλλασσόμενη τάση δοκιμής: 1 MV



Μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση
ηλεκτρικού πεδίου στον αέρα:
 $E_{\max} = 15 \text{ kV/cm}$

Απαιτούμενη ακτίνα της σφαίρας:

$$E_{\max} = \frac{U}{r} \Rightarrow r = \frac{U}{E_{\max}} = \frac{1,41 \text{ MV}}{15 \text{ kV/cm}} = 94 \text{ cm}$$

Χωρητικότητα του ηλεκτροδίου:

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot r = 1,11 \cdot r [\text{cm}] = 104,34 \text{ pF}$$