



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



ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

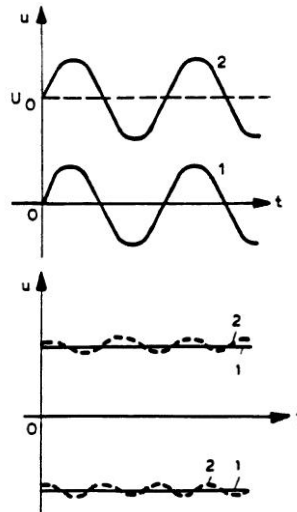
Εγκαταστάσεις δοκιμών

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

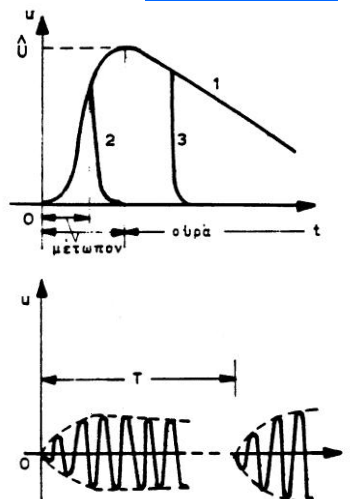
Μορφές υψηλών τάσεων δοκιμών (1)

- Εναλλασσόμενη
 - 1 χωρίς συνεχή συνιστώσα
 - 2 με συνεχή συνιστώσα
- Συνεχής (θετική ή αρνητική)
 - 1 χωρίς κυματισμό
 - 2 με κυματισμό



Μορφές υψηλών τάσεων δοκιμών (2)

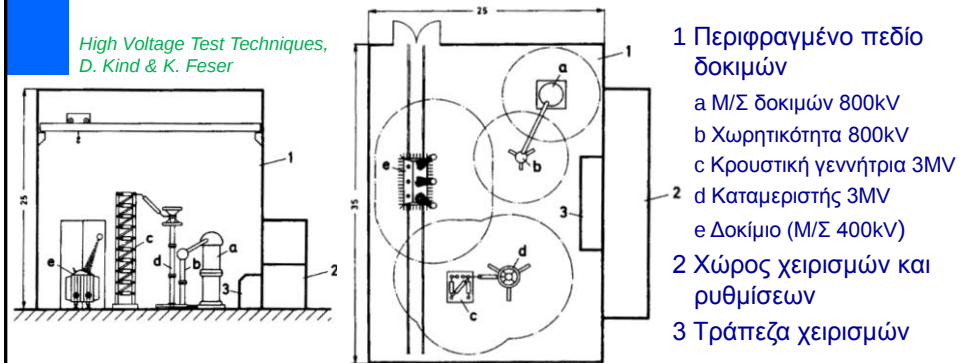
- Κρουστική
 - 1 πλήρης
 - 2 αποκομμένη στο μέτωπο
 - 3 αποκομμένη στην ουρά
- Συρμός αποσβεννυμένων ταλαντώσεων



Εργαστήρια Υψηλών Τάσεων (1)

- Βιομηχανικά / Ερευνητικά / Εκπαιδευτικά Εργαστήρια
- Χώροι μεγάλου όγκου
 - Για εγκατάσταση Μ/Σ δοκιμών 1000kV → όγκος 25×25×(15 ... 18) m³
 - Για δοκιμή τριφασικού Μ/Σ 400kV απαιτείται Μ/Σ δοκιμών 750kV και κρουστική γεννήτρια 3MV → όγκος 25×35×25 m³

*High Voltage Test Techniques,
D. Kind & K. Feser*



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
- Ανηχιακός θάλαμος, κατάλληλα εξοπλισμένος για τη διεξαγωγή δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας και μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για σήμανση CE
- Κλωβοί Faraday

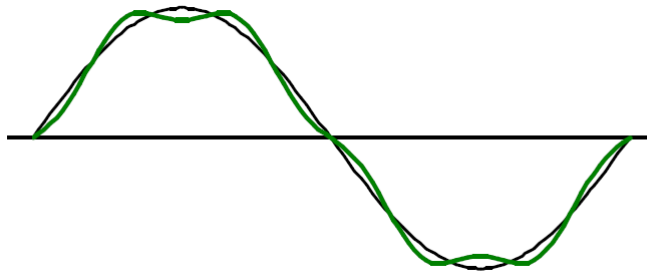
Εξοπλισμός Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π. (2)

- 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 (1)

Απαίτηση (IEC 60060-1)

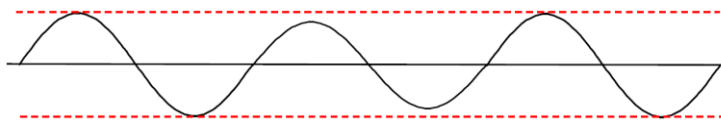
- Απόκλιση από την ημιτονοειδή μορφή: $\frac{\hat{u}}{U_{rms}} = \sqrt{2} \pm 5\%$



Παραγωγή υψηλής εναλλασσόμενης τάσης (2)

Απαίτηση (IEC 60060-1)

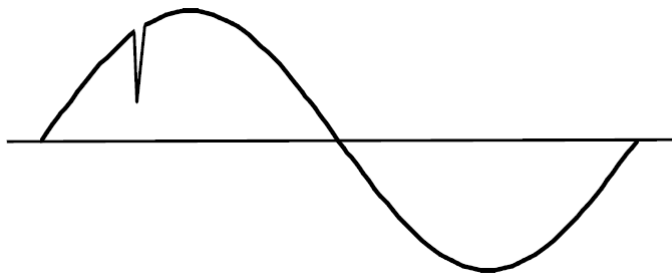
- Διαφορά στις τιμές κορυφής μεταξύ δύο διαδοχικών περιόδων $\leq 5\%$



Παραγωγή υψηλής εναλλασσόμενης τάσης (3)

Απαίτηση (IEC 60060-1)

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

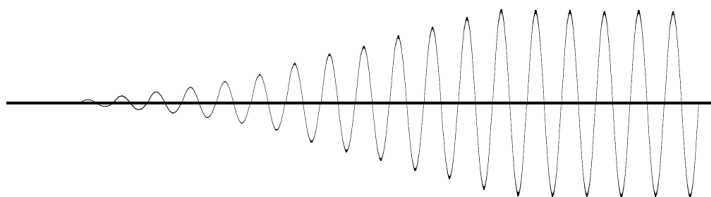


Παραγωγή υψηλής εναλλασσόμενης τάσης (4)

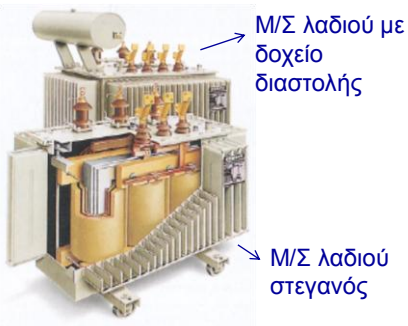
ΑΠΑΓΟΡΕΥΤΑΙ

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 ξηρού τύπου



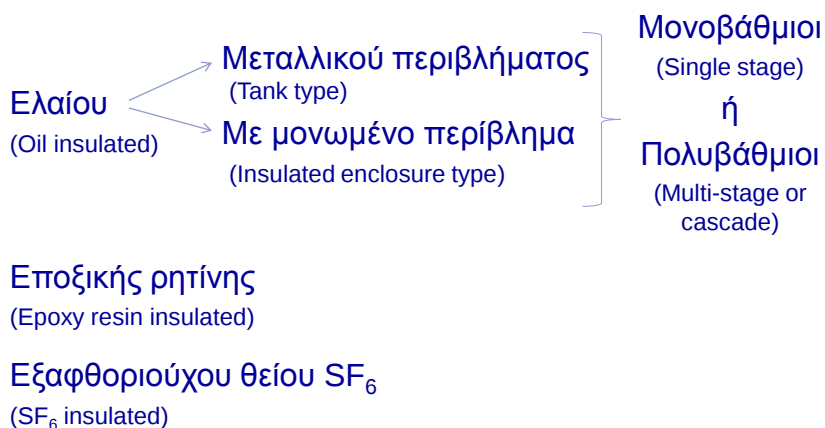
Μετασχηματιστές δοκιμών



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	$\pm 10\%$	$0 - V_{\max}$

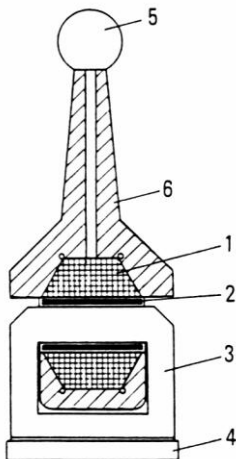
Κατασκευαστικά στοιχεία μετασχηματιστών δοκιμών (2)



Κατασκευαστικά στοιχεία μετασχηματιστών δοκιμών (1)

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

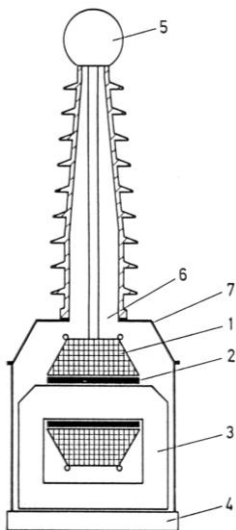


- 1 τύλιγμα υψηλής τάσης
- 2 τύλιγμα χαμηλής τάσης
- 3 πυρήνας
- 4 βάση
- 5 ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης
- 6 μόνωση εποξικής ρητίνης



High Voltage Test Techniques,
D. Kind & K. Feser

Μετασχηματιστές δοκιμών – μεταλλικό περιβλήμα με μονωτικό λάδι



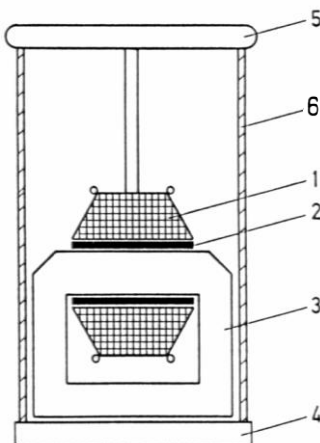
- 1 τύλιγμα υψηλής τάσης
- 2 τύλιγμα χαμηλής τάσης
- 3 πυρήνας
- 4 βάση
- 5 ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης
- 6 μονωτήρας διέλευσης
- 7 μεταλλικού κελύφους



- Καλή ψύξη (μεταλλικό κέλυφος)
 - Σχετικά μικρός όγκος λαδιού
 - Υψηλή ισχύς
- ΑΛΛΑ
- Ακριβοί μονωτήρες διέλευσης
 - Ακριβά ηλεκτρόδια

High Voltage Test Techniques, D. Kind & K. Feser

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

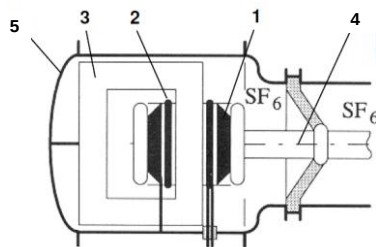
- Δεν απαιτείται μονωτήρας διέλευσης
 - Απλό ηλεκτρόδιο
- ΑΛΛΑ
- Μεγάλος όγκος λαδιού
 - Κακή ψύξη

High Voltage Test Techniques, D. Kind & K. Feser

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)



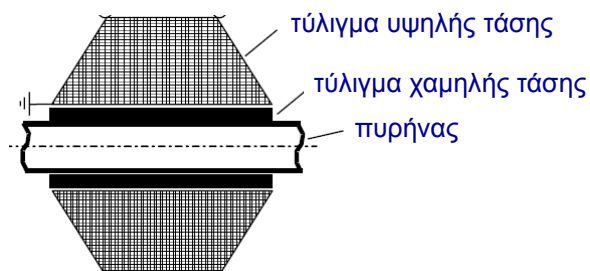
Χαρακτηριστικά μεγέθη μετασχηματιστών δοκιμών

Ονομαστική τάση [kV]	Ονομαστικό ρεύμα [A]	Ονομαστική ισχύς [kVA]	Ανηγγεμένη 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

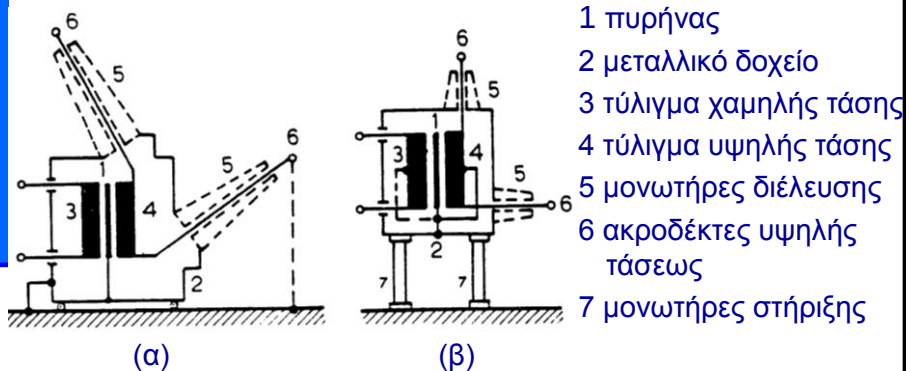
Μετασχηματιστές (1)

Διάταξη τυλιγμάτων μετασχηματιστή ως προς τον
πυρήνα αυτού



Μετασχηματιστές (2)

Δυνατότητες εγκατάστασης μεταλλικού κιβωτίου μετασχηματιστή ως προς το έδαφος

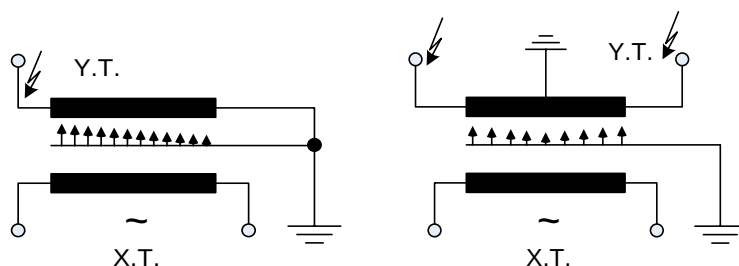


α) Μεταλλικό κιβώτιο απ' ευθείας επί του εδάφους

β) Μεταλλικό κιβώτιο επί μονωτήρων στήριξης

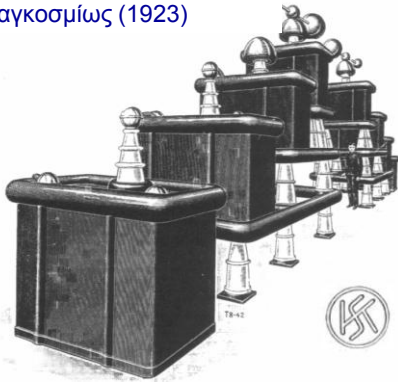
Μετασχηματιστές (3)

Συνήθεις συνδεσμολογίες μονοβάθμιων μετασχηματιστών δοκιμής



Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές (1)

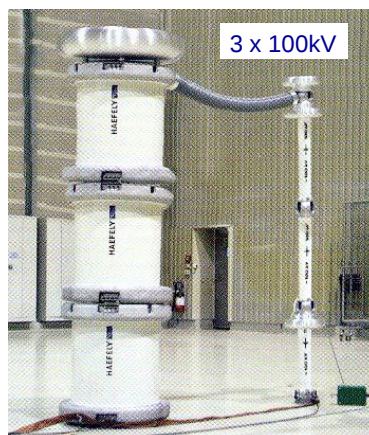
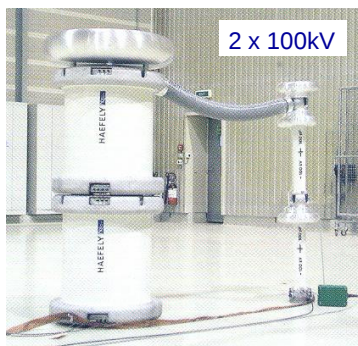
1 MV Πρώτος Μ/Σ δοκιμής
παγκοσμίως (1923)



Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές (2)



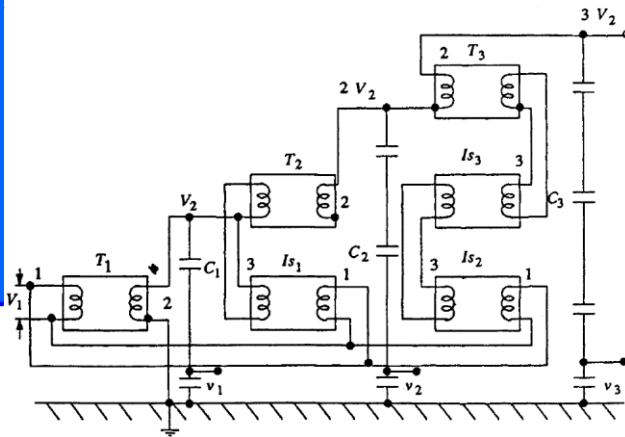
Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές (3)



Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές (4)



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

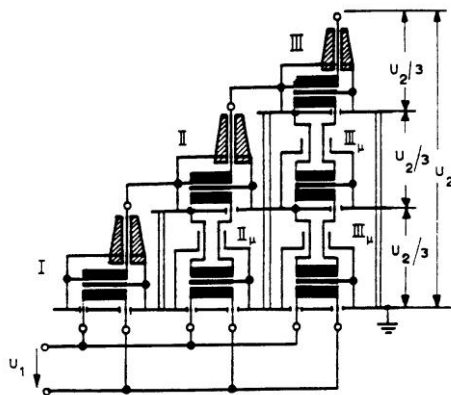


T_1, T_2, T_3 : βαθμίδες
πολυβάθμιου Μ/Σ
 I_{s1}, I_{s2}, I_{s3} : βαθμίδες Μ/Σ
μονώσεως
 C_1, C_2, C_3 : Χωρητικοί
καταμεριστές μέτρησης
 V_1, V_2, V_3 : Μετρούμενη
τάση

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

- Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας απ' ευθείας από το δίκτυο

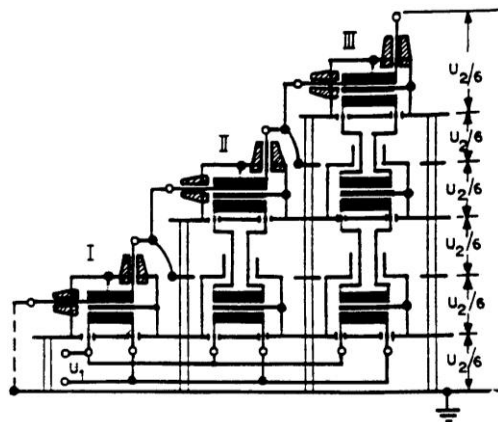
(α)



I, II, III : επί μέρους μετασχηματιστές δοκιμής (βαθμίδες)
 I_μ, II_μ, III_μ : μετασχηματιστές μονώσεως

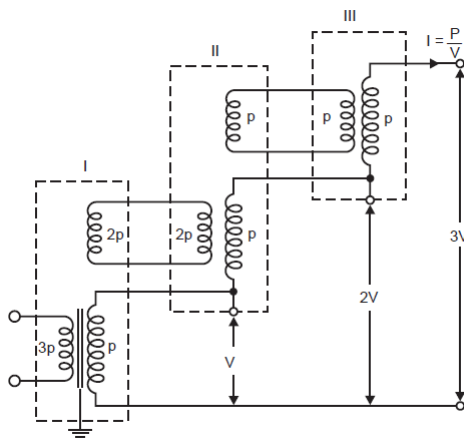
Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές - Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας απ' ευθείας από το δίκτυο (3)

(β)

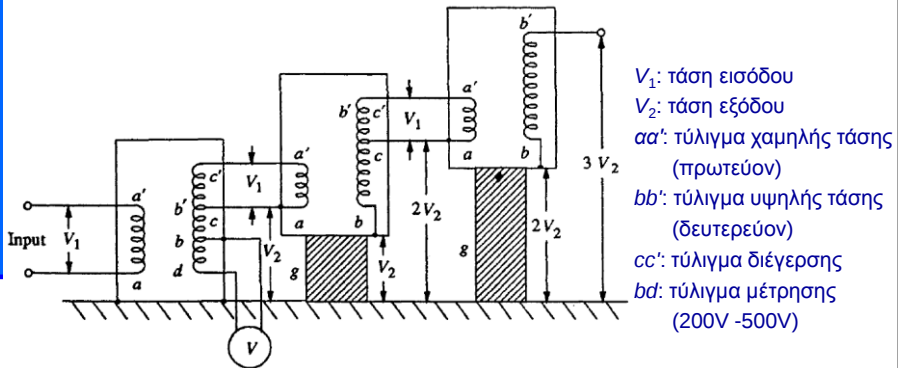


I, II, III : επί μέρους μετασχηματιστές δοκιμής (βαθμίδες)

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

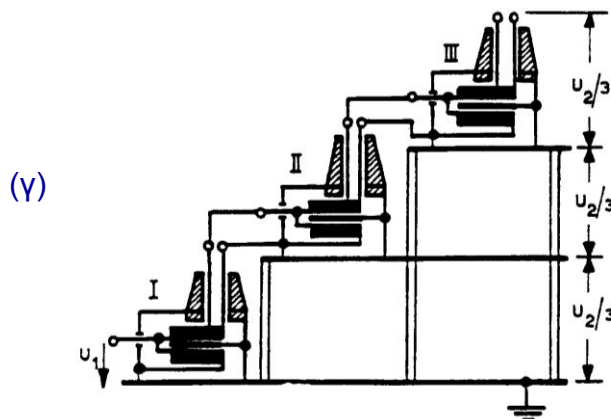


Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές - Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (2)



High Voltage Test Techniques, D. Kind & K. Feser

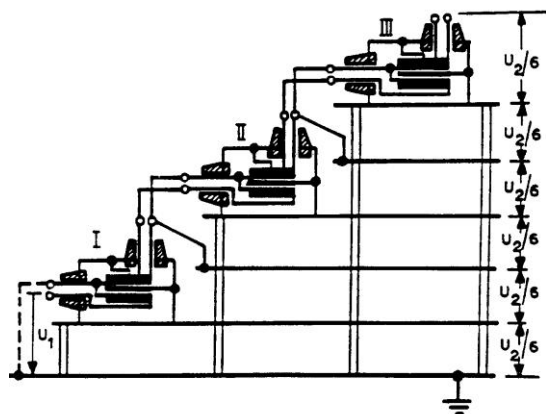
Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές - Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (3)



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)

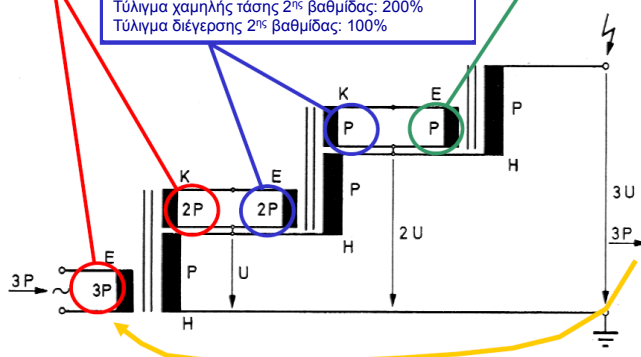
Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές - Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (5)

Απαίτηση σε ισχύ

Τύλιγμα χαμηλής τάσης 1ης βαθμίδας: 300%
Τύλιγμα διέγερσης 1ης βαθμίδας: 200%

Τύλιγμα χαμηλής τάσης 2ης βαθμίδας: 200%
Τύλιγμα διέγερσης 2ης βαθμίδας: 100%

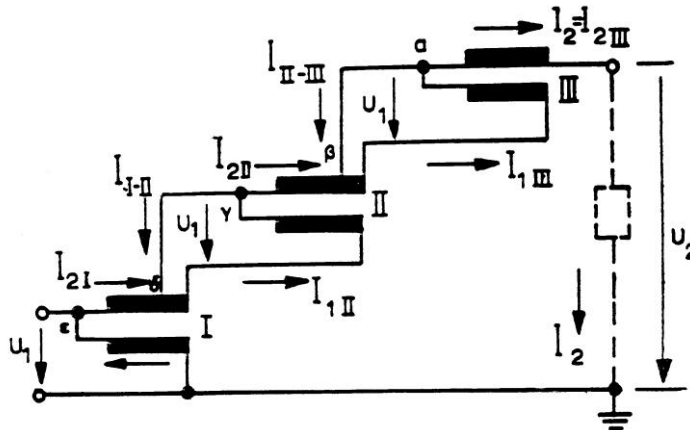
Τύλιγμα χαμηλής τάσης 3ης βαθμ.: 100%



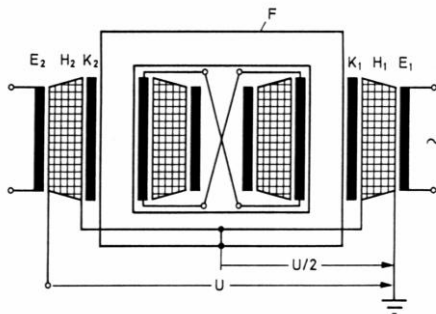
Πολυβάθμιοι μετασχηματιστές -

Τροφοδότηση κάθε βαθμίδας από την προηγούμενη (6)

Υπολογισμός της επιφόρτισης κάθε βαθμίδας τριβάθμιου μετασχηματιστή δοκιμής



Μετασχηματιστής με δύο βαθμίδες σε έναν πυρήνα (1)



High Voltage Test Techniques, D. Kind & K. Feser

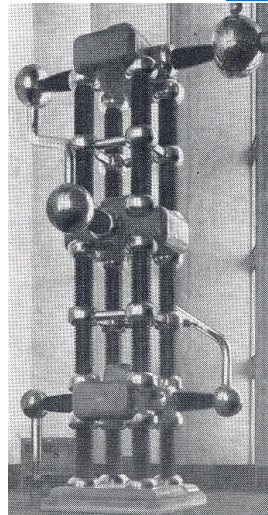
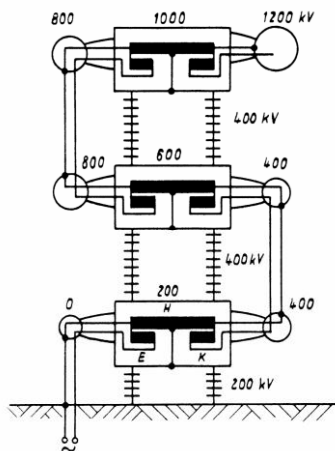
E_1, E_2 τύλιγμα πρωτεύοντος
 H_1, H_2 τύλιγμα υψηλής τάσης
 K_1, K_2 τύλιγμα διέγερσης
 F πυρήνας

- 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)

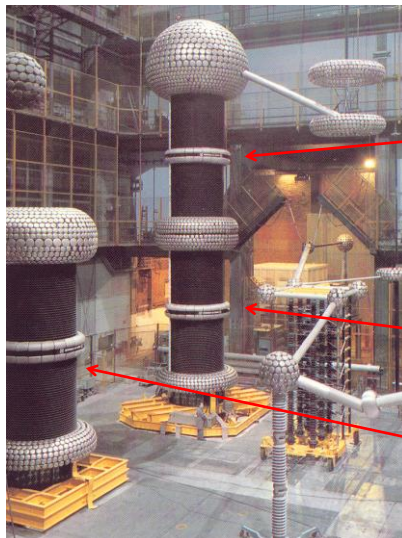


Μετασχηματιστής με δύο βαθμίδες σε έναν πυρήνα (3)



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 δοκιμών

- 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

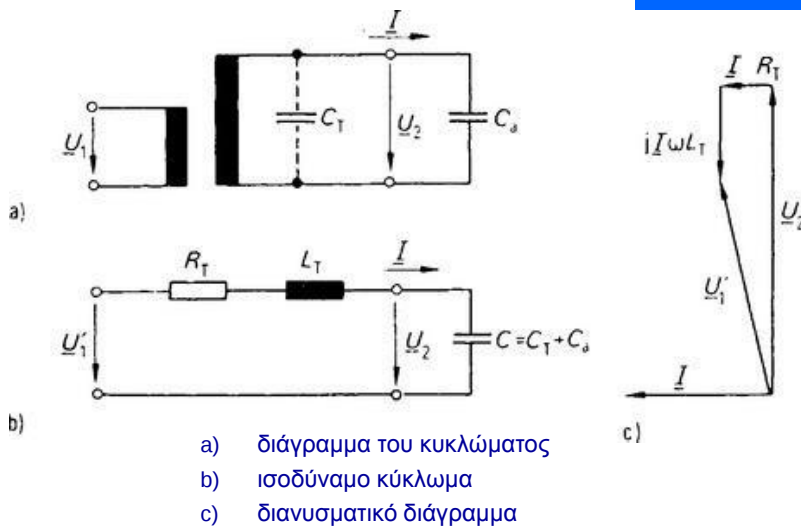
- Ηλεκτρόδια
- Συνδέσεις υψηλής τάσης
- Συστήματα μέτρησης τάσης (π.χ. χωρητικός καταμεριστής)

- 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 ιδιαίτερα 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



High Voltage Test Techniques, D. Kind & K. Feser

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

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

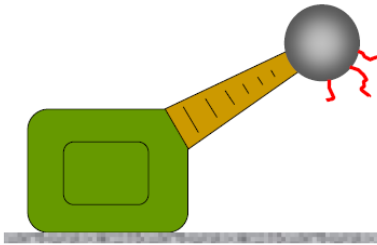
Ισχύς

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

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:

$$E_{\max} = 25 \text{ kV/cm}$$

Απαιτούμενη ακτίνα της σφαίρας:

$$E_{\max} = \frac{U}{r} \Rightarrow r = \frac{U}{E_{\max}} = \frac{1,4 \text{ MV}}{25 \text{ kV/cm}} = 56 \text{ cm}$$

Χωρητικότητα του ηλεκτροδίου:

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot r = 1,11 \cdot r [\text{cm}] = 62 \text{ pF}$$