



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



ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Διδάσκοντες

- Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, Καθηγητής.
Γραφείο: 1.2.10 / Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων
- Ιωάννης Φ. Γκόνος, Αναπληρωτής Καθηγητής.
Γραφείο: 2.2.12 / Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων
- Νικολέτα Χ. Ηλία, ΕΔΙΠ.
Γραφείο: 1.2.11 / Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων
- Βασιλική Θ. Κονταργύρη, ΕΔΙΠ.
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων: 1.2.16 / Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων



Διδασκαλία του μαθήματος

Θεωρία

- Πέμπτη: 10:45 - 14:30
- Εξ αποστάσεως (MS Teams)
- Λογιστικές ασκήσεις

Εργαστήριο

- Πέμπτη: 15:00 - 19:30 (σε ομάδες)
- Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (Παλαιό κτίριο Ηλεκτρολόγων)

Πληροφορίες για το μάθημα

- http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php?cidReq=ECE1178

Εξέταση - Βαθμολογία

- Η τελική βαθμολογία του μαθήματος θα διαμορφωθεί από:
 - το βαθμό της Γραπτής Εξέτασης (βαρύτητα 70%)
 - το βαθμό του Εργαστηρίου (βαρύτητα 15%)
 - το βαθμό σε σειρές ασκήσεων (βαρύτητα 15%).
- Η εξέταση του μαθήματος πραγματοποιείται με ανοικτά βιβλία και σημειώσεις.
- Η συμμετοχή στη γραπτή εξέταση του μαθήματος προϋποθέτει την επιτυχή παρακολούθηση του εργαστηρίου.
- Ο βαθμός του εργαστηρίου συνυπολογίζεται μόνο κατά το έτος παρακολούθησης του εργαστηρίου. Για τους φοιτητές παλαιότερων ετών ο τελικός βαθμός προκύπτει μόνο από το βαθμό του γραπτού.

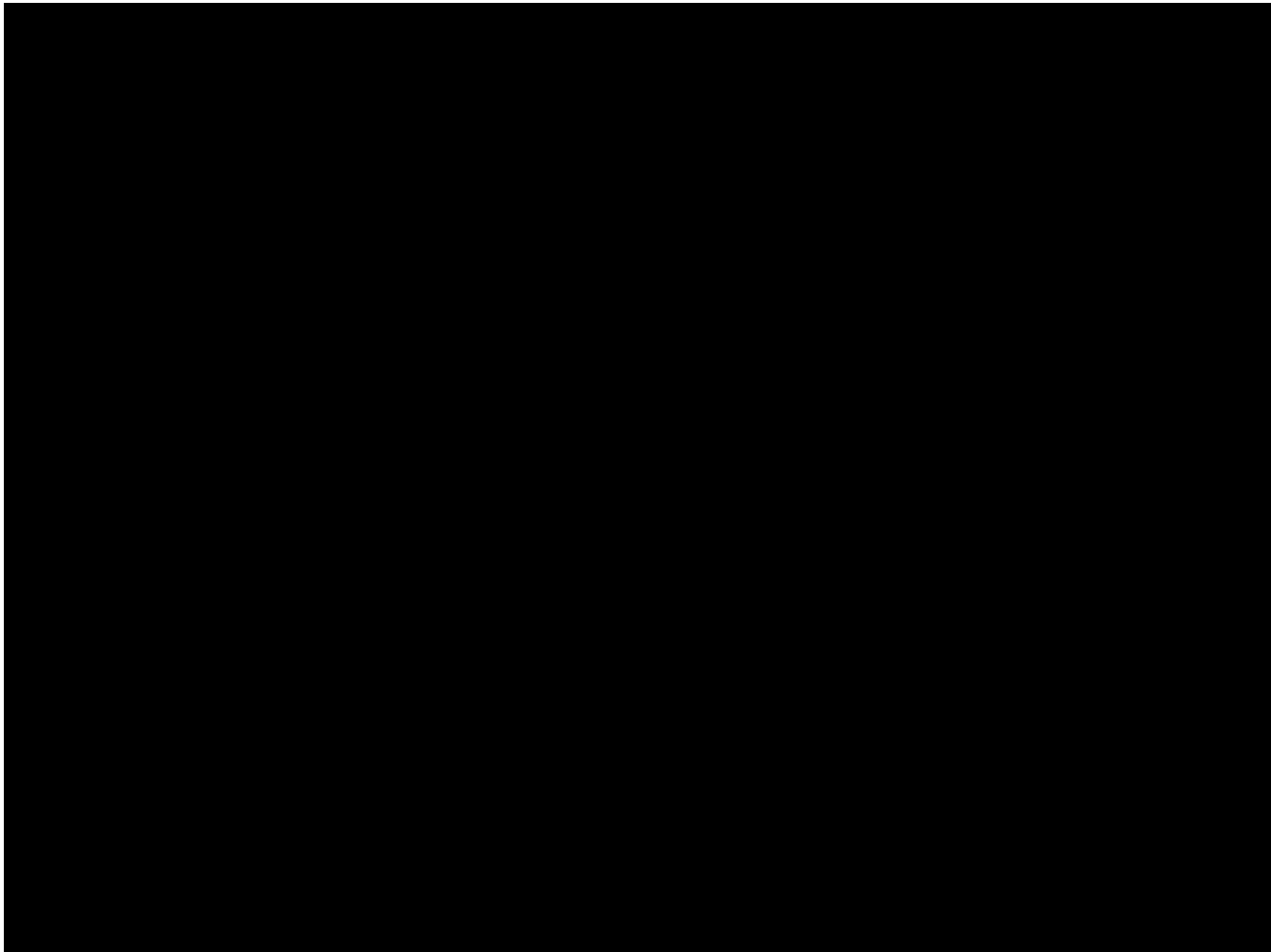
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (1)

- Το εργαστήριο είναι υποχρεωτικό για το μάθημα.
Απαιτούνται:
 - παρουσία των φοιτητών σε όλες τις εργαστηριακές ασκήσεις που διεξάγονται στη διάρκεια του εξαμήνου και
 - παράδοση γραπτής εργασίας. Η εργασία πρέπει να παραδοθεί την ημέρα διεξαγωγής της επόμενης εργαστηριακής άσκησης από τον καθένα φοιτητή.
- Οι φοιτητές, κατά την προσέλευσή τους στο εργαστήριο για την παρακολούθηση εργαστηριακής άσκησης, πρέπει να είναι προετοιμασμένοι ως προς το θεωρητικό μέρος της αντίστοιχης εργαστηριακής άσκησης.
- Τις εκφωνήσεις των εργαστηριακών ασκήσεων μπορείτε να τις βρείτε στην ιστοσελίδα του μαθήματος στο mycourses.
- Συμμετοχή στο εργαστήριο μία φορά μόνο, την πρώτη φορά που δίνεται το μάθημα.

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (2)

- Οι εργαστηριακές ασκήσεις θα διεξάγονται ημέρα Πέμπτη κατά τις εξής ώρες:
 - Τμήμα Α στις 15:00-16:30
 - Τμήμα Β στις 16:30-18:00
 - Τμήμα Γ στις 18:00-19:30
- Για την εγγραφή σας σε ομάδα απαιτείται:
 - να έχετε πρώτα εγγραφεί ως χρήστης του μαθήματος στο mycourses και
 - μετά να εγγραφείτε σε βάρδια στην ενότητα Εργαλεία-Ομάδες.
- Οι φοιτητές μπορούν να επιλέξουν, εφ' όσον αυτό καθίσταται δυνατόν, την ώρα που επιθυμούν να παρακολουθήσουν τις εργαστηριακές ασκήσεις. Είναι αυτονόητο ότι, όσο πιο γρήγορα κάνετε την εγγραφή σας, τόσο πιο εύκολο θα είναι να επιλέξετε ωράριο της αρεσκείας σας.

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων (3)



Υψηλές Τάσεις (1)

- Γιατί;
- Που / πότε εμφανίζονται Υψηλές Τάσεις;
- Επιθυμητές / ανεπιθύμητες;
- Διάρθρωση των παραδόσεων
 - Παραγωγή Υψηλών Τάσεων (7ο εξάμηνο)
 - Παραγωγή υψηλών τάσεων και ρευμάτων δοκιμής
 - Οδεύοντα κύματα
 - Μετρήσεις και Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων (8ο εξάμηνο)
 - Μετρήσεις στην Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων (ιδιαιτερότητες;)
 - Αριθμητικός υπολογισμός ηλεκτρικών πεδίων
 - Φυσική των εκκενώσεων – επίδραση των Υψηλών Τάσεων στον άνθρωπο ή/και σε τεχνικές εγκαταστάσεις

Υψηλές Τάσεις (2)

- Εργαστηριακές ασκήσεις
 - Παραγωγή Υψηλών Τάσεων (7ο εξάμηνο)
 - Κατανομή της επιβαλλόμενης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα τάσης
 - Μετασχηματιστής δοκιμών 500 kV - Υπερπήδηση και διάτρηση μονωτήρων
 - Παραγωγή και μέτρηση τάσεων διαφόρων μορφών
 - Μετρήσεις και Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων (8ο εξάμηνο)
 - Μετρητικό σύστημα γεννήτριας υψηλών κρουστικών τάσεων
 - Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών λαδιών - Διάσπαση ατμοσφαιρικού αέρα σε ανομοιογενές πεδίο με εναλλασσόμενη τάση
 - Απώλειες CORONA σε γραμμές υψηλής τάσης
- Δυνατότητα εργαστηριακής εμπάθυνσης
- Λογιστικές ασκήσεις

Γιατί υπάρχουν Υψηλές Τάσεις;

ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ

- Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας (AC)
- Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας (DC)
- Ιατρική
- Φυσική
- Τεχνολογία συντήξεως
- Εγκαταστάσεις δοκιμών
- Γεννήτριες ηλεκτομαγνητικών παλμών (EMP)
- Υψίσυχνες Υ.Τ.

Γιατί υπάρχουν Υψηλές Τάσεις;

ΑΝΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ

- Εσωτερικές υπερτάσεις
- Εξωτερικές υπερτάσεις
- Ηλεκτροστατική φόρτιση

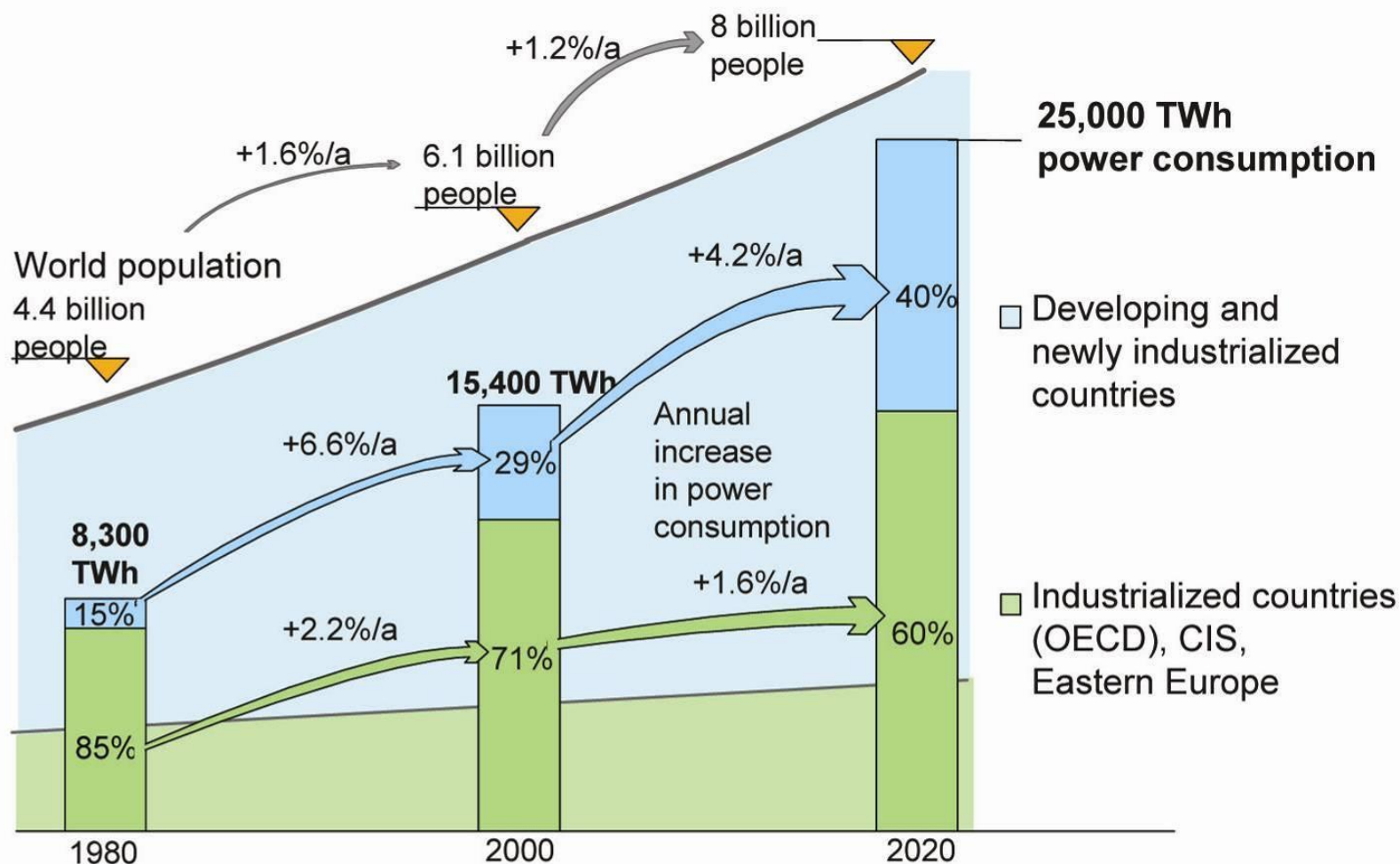
- Κίνδυνος για άνθρωπο
- Κίνδυνος για τεχνικές κατασκευές και εγκαταστάσεις

Επίπεδα τάσης (IEC 60038)

- Χαμηλή τάση (Low Voltage) $\leq 1\text{kV}$
- Μέση τάση (Medium Voltage) $1\text{kV}-35\text{kV}$
- Πολύ υψηλή τάση (Very High Voltage) $35\text{kV}-230\text{kV}$
- Εξαιρετικά υψηλή τάση (Extra High Voltage) $230\text{kV}-800\text{kV}$
- Υπερυψηλή τάση (Ultra High Voltage) $>800\text{kV}$

Το ακριβές πλάτος της τάσης σε κάθε κατηγορία διαφέρει από χώρα σε χώρα. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η αριθμητική αναφορά του επιπέδου της τάσης.

Αύξηση της κατανάλωσης ισχύος



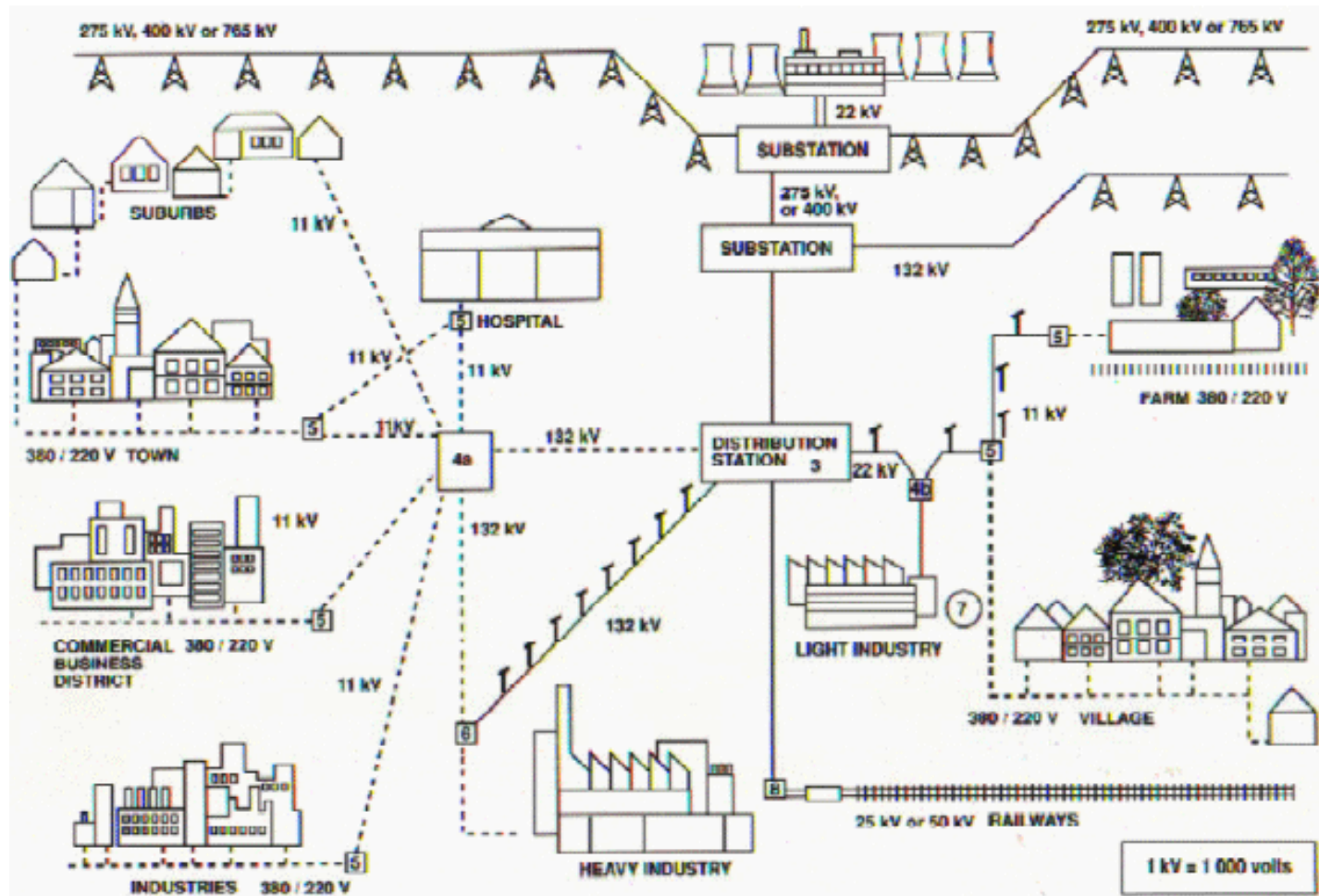
Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με εναλλασσόμενη τάση

AC Συστήματα 50Hz ή 60Hz
μέχρι 1000 kV.

Προγραμματισμός για
1100kV (Κίνα)
1200kV (Ινδία)



Σχηματική παρουσίαση ενός δικτύου



Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με εναλλασσόμενη τάση

■ Οικονομική λειτουργία

- Απώλειες μεταφοράς $P_j = 3 \cdot I^2 \cdot R = P^2 \cdot \frac{R}{3 \cdot U_{\Phi}^2 \cdot \cos^2 \varphi}$
- $U \uparrow \rightarrow P \uparrow \rightarrow P_j \downarrow$

■ Καλή λειτουργία

- Πτώση τάσης
- $\Delta U = I \cdot R = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi} \cdot R$

■ Ευσταθής λειτουργία

- $P_{\max} = C \cdot P_{\text{nat}} = C \cdot 3 \cdot I^2 \cdot Z_o = C \cdot 3 \cdot \frac{U_{\Phi}^2}{Z_o}$

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με εναλλασσόμενη τάση

■ Μεταβολές

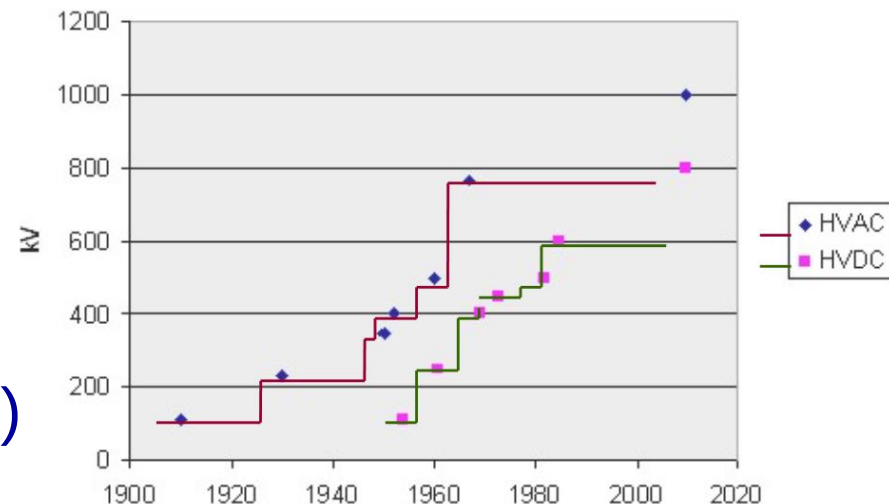
- $U \rightarrow 2U$ (20 χρόνια)
- $P \rightarrow 2P$ (10 χρόνια)

■ Εναέριες γραμμές

- 1000kV (επόμενο 1200kV)
- ~1m μόνωση / 100kV U_ϕ

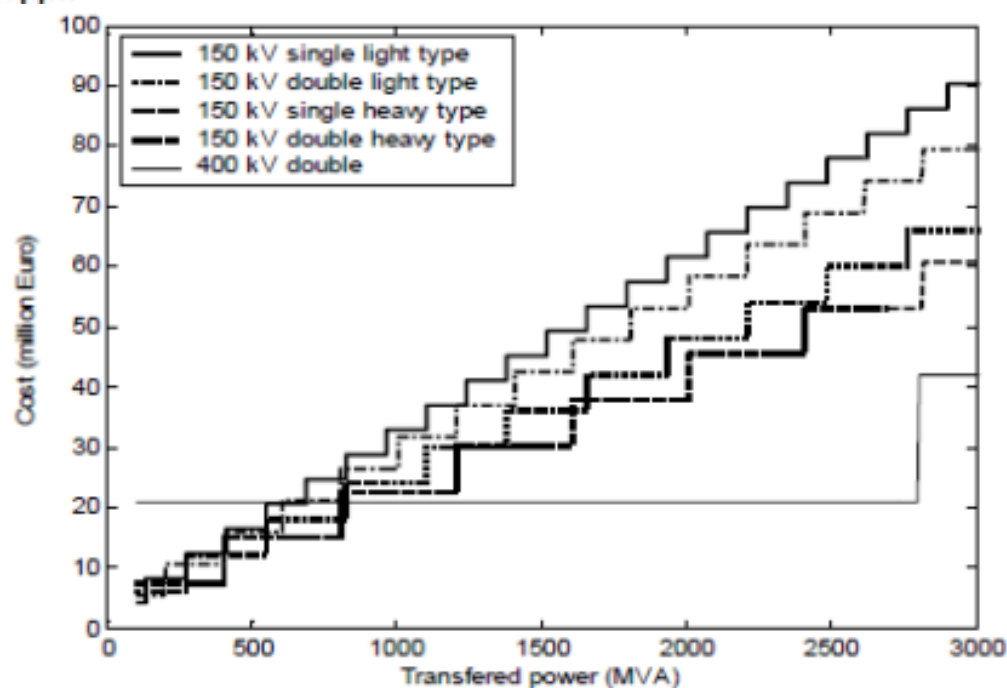
■ Καλώδια

- 500kV (~1000MW/καλώδιο, για $p=20\text{bars}$)



Επίπεδο τάσης (kV)	Κύκλωμα	Χαρακτηρισμός Γ.Μ.	Αριθμός & διατομή αγωγών ανά φάση (Τύπος ACSR)		Θερμικό όριο υπό ονομαστικές συνθήκες (MVA)	Θερμικό όριο υπό δυσμενείς συνθήκες (MVA)*
			(MCM)	(mm ²)		
66	Απλό	E/66	1x336,4	1x170	60,5	36
150	Απλό	E/150	1x336,4	1x170	138	117
150	Απλό	B/150	1x636,0	1x322	202	169
150	Διπλό	2B/150	1x636,0	1x322	2x202	2x169
400	Απλό	B'B'/400	2x954,0	2x483	1400	1100
400	Διπλό	2B'B'/400	2x954,0	2x483	2x1400	2x1100
400	Απλό	B'B'B'/400	3x954,0	3x483	2000	1600

Τυποποιημένα είδη εναέριων γραμμών



Κόστος γραμμών μεταφοράς ανά μεταφερόμενη ισχύ για 100km

Τυπικοί υποσταθμοί



Υπαίθριος (132 kV)



GIS (132 kV)

Τυπικές εναέριες γραμμές



Πυλώνας 400 kV
απλού κυκλώματος



Πυλώνας 400 kV
διπλού κυκλώματος



Διανομή 22kV
(ξύλινος πυλώνας)

Τυπικές εναέριας γραμμές



Πυλώνας 400 kV
(νεότερη σχεδίαση)

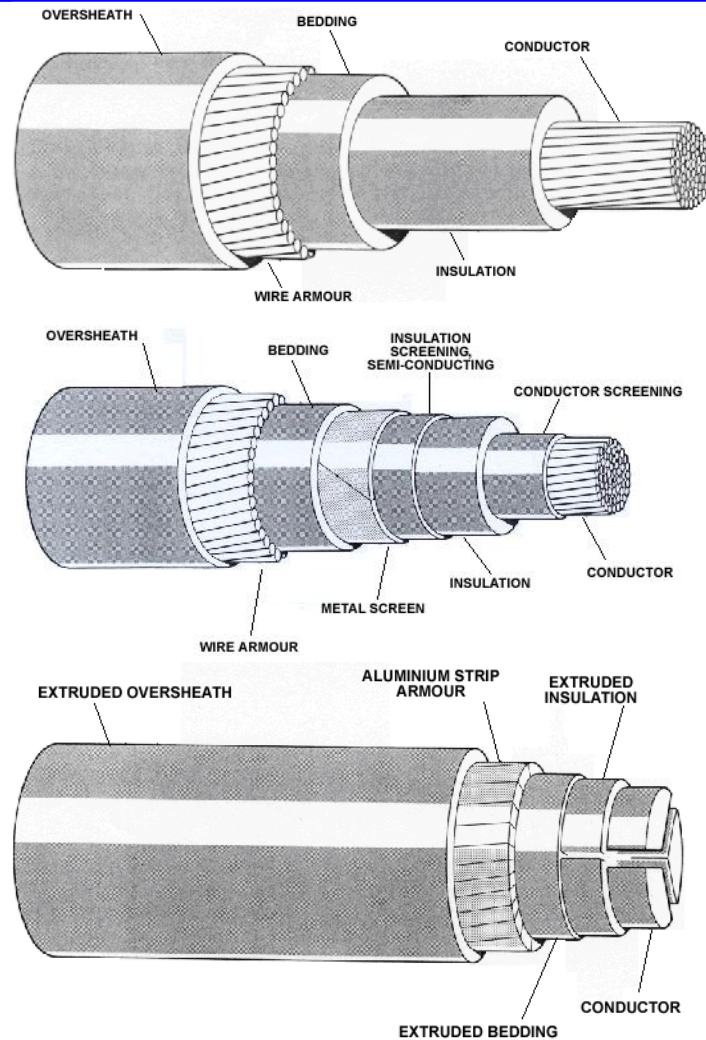


Πυλώνας 132 kV
(νεότερη σχεδίαση)

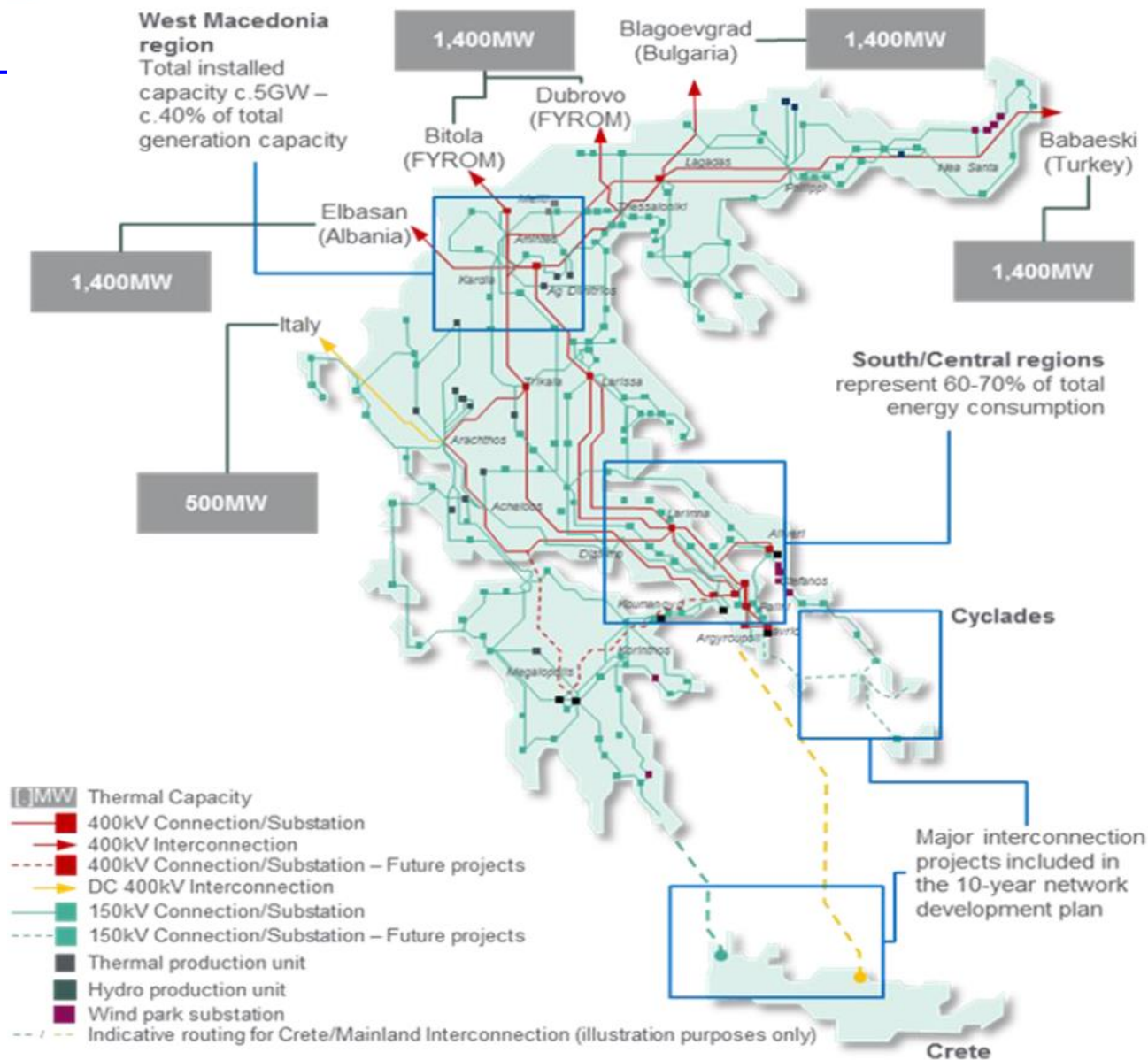
Τυπικοί μετασχηματιστές



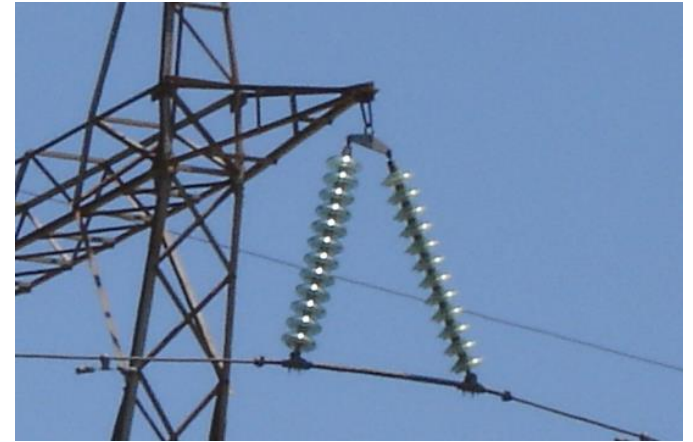
Διάφοροι τύποι καλωδίων



Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας



Ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (150kV)



Ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (400kV)



Κέντρο υπερυψηλής τάσης (KYT)



Κέντρο υπερυψηλής τάσης (KYT)



Κέντρο υπερυψηλής τάσης (ΚΥΤ)



Αυτομετασχηματιστής

Κέντρο υπερυψηλής τάσης (ΚΥΤ)



Αποξεύκτες

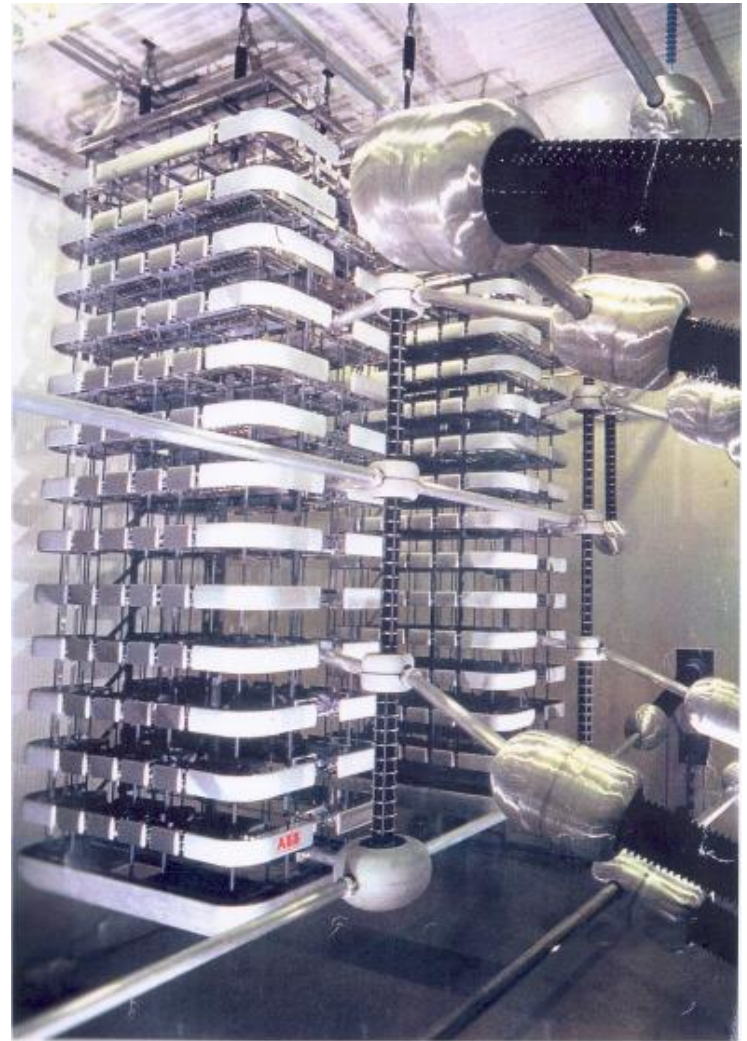
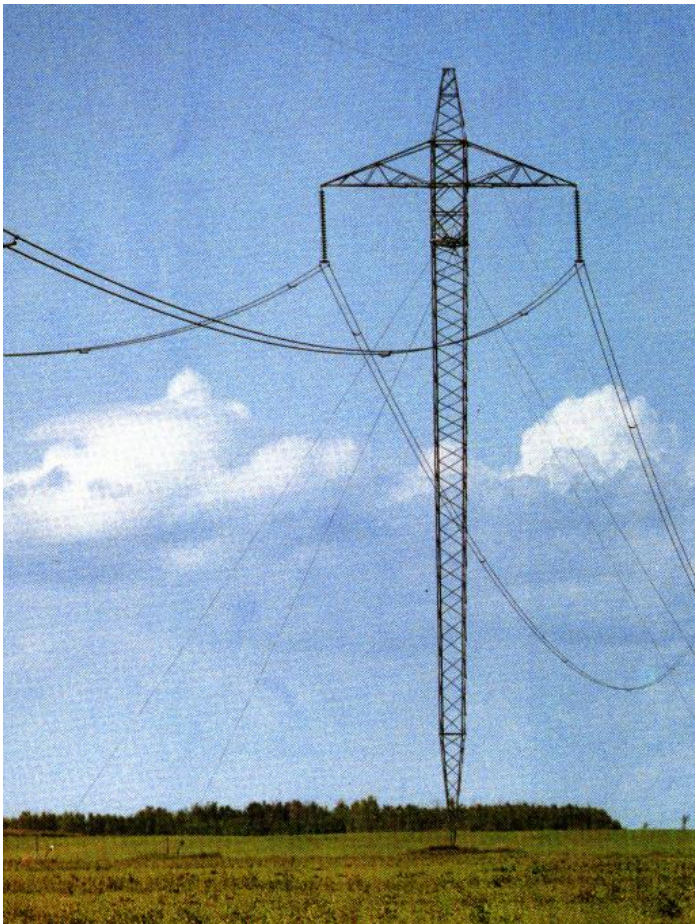
Κέντρο υπερυψηλής τάσης (ΚΥΤ)



Γειωτής

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχή τάση

DC Συστήματα μέχρι 1200 kV (Κίνα).



Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχή τάση

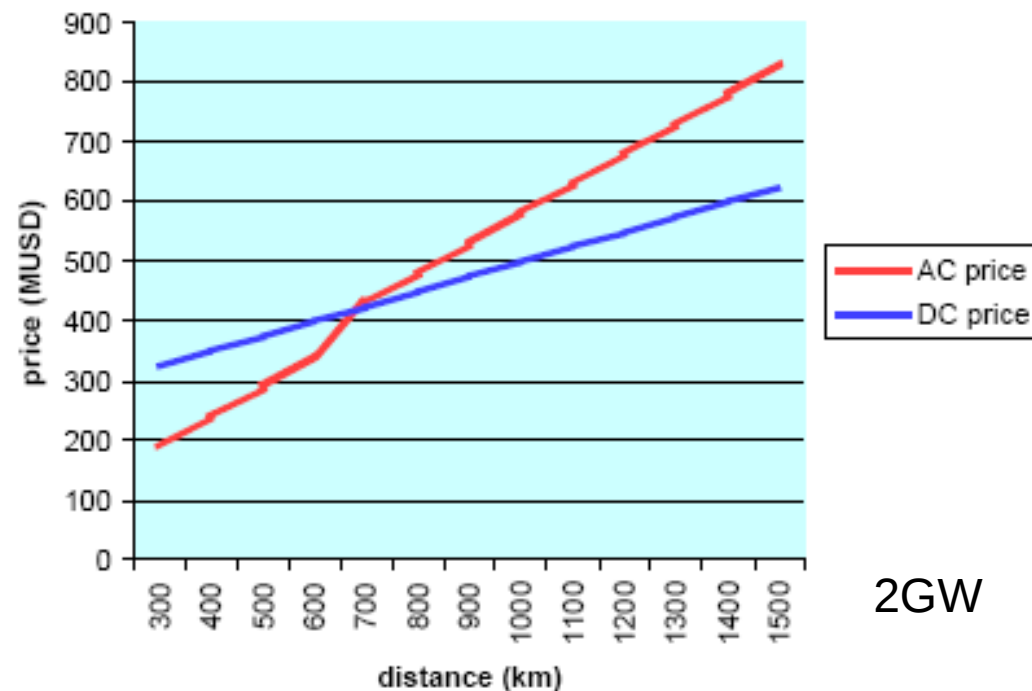
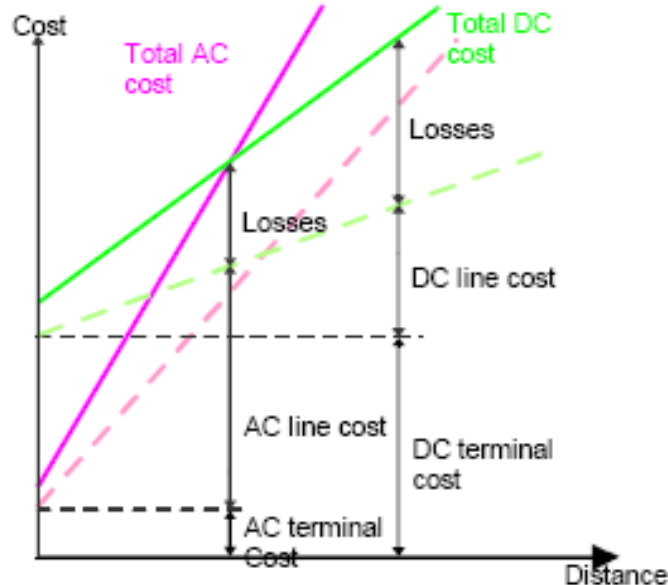
DC

■ Καλώδια

- >70km (100km)

■ Εναέριες γραμμές

- >700km (1000km)



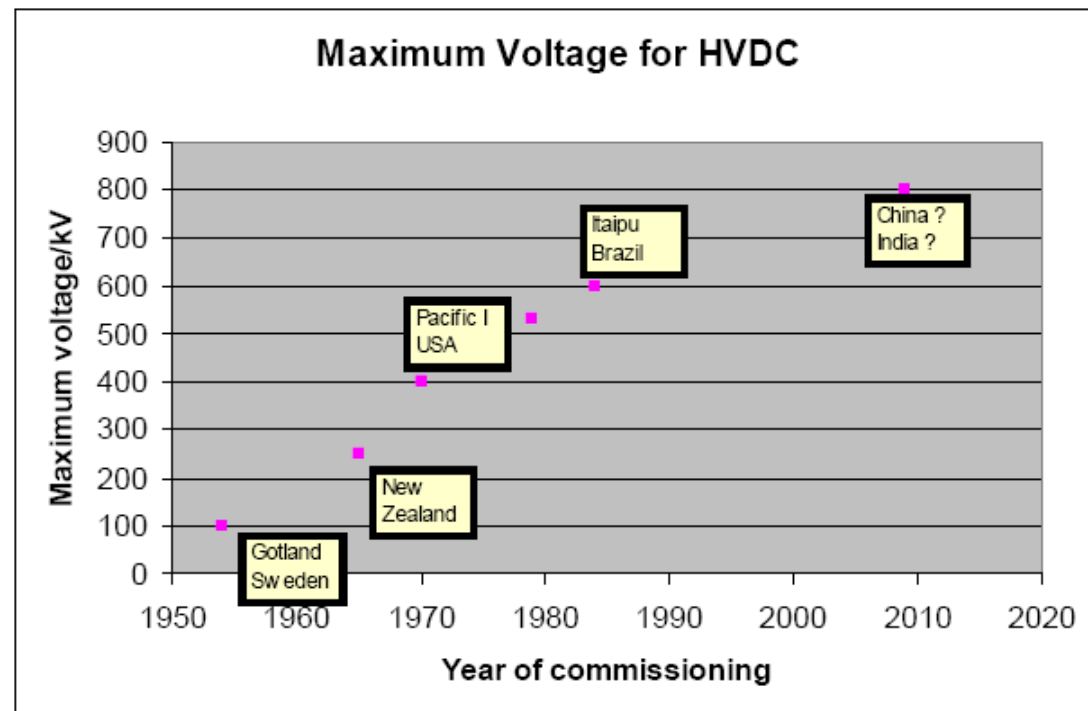
2GW

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχή τάση

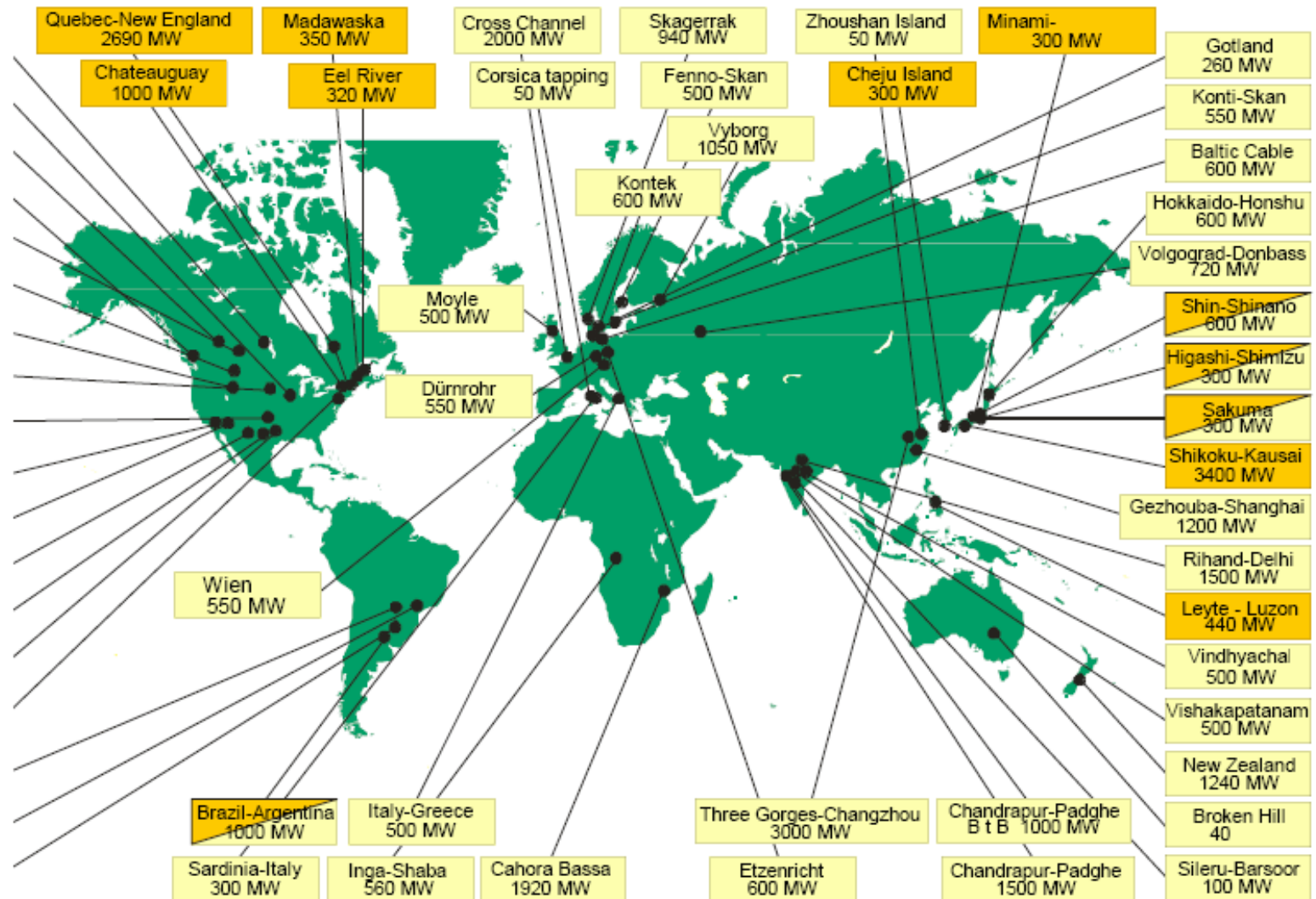
DC

- Για μεγάλες αποστάσεις
- Διασύνδεση δικτύων με διαφορετική συχνότητα
- Έλεγχος ισχύος
- >500MW, >500km
- Υποθαλάσσια

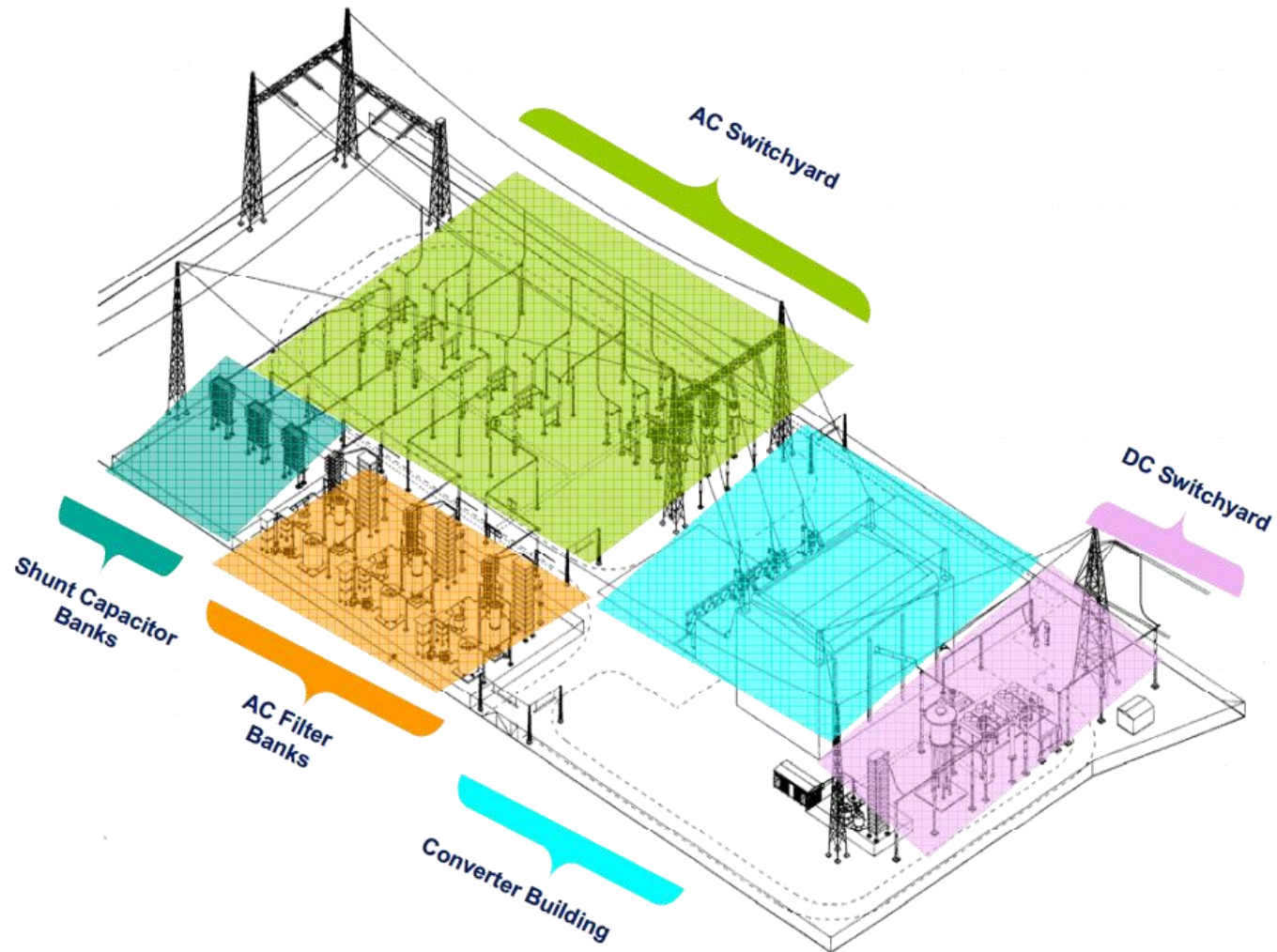
■ Κίνα (2018): 1200kV



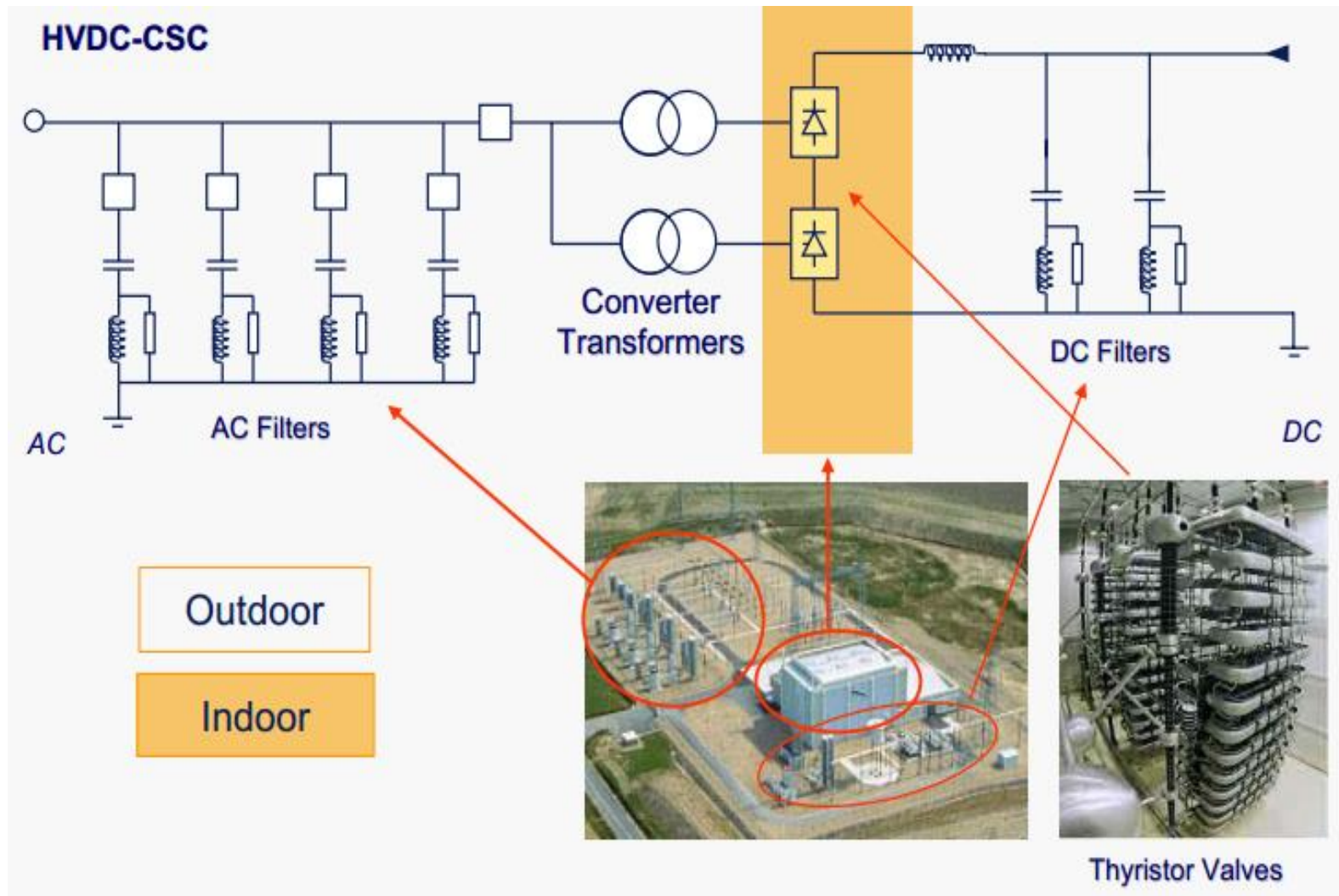
Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχή τάση



Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχή τάση - Σταθμός μετατροπής



Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχή τάση - Σταθμός μετατροπής



Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

■ Μεταβολές

- $U \rightarrow 2U$ (20 χρόνια) ($\sim\sqrt{3}$)
- $P \rightarrow 2 P$ (10 χρόνια) ($\sim 7\%$)

■ Δάσος γραμμών ($U \uparrow$)

- Περιβάλλον
- Επιδράσεις στον άνθρωπο
- Προβλήματα εσωτερικών υπερτάσεων
- Τι γίνεται εάν η γραμμή «βγει» εκτός
- Ανάγκη πειραματισμού για νέους πυλώνες
- Δουλεία διόδου
- RIV, Joule

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

■ Υπερτάσεις

- Εσωτερικές: $\times 7$ (πρακτικά $\times 3,2$)
- Εξωτερικές: Συσχέτιση με όγκο πυλώνα
- Ποιές είναι πιο επικίνδυνες;

■ Γήρανση

- Ανάγκη δοκιμών μακρού χρόνου
- Πολλοί λένε: U^2 και $t/2$
- Μάλλον: $U \cdot t^n = ct$, όπου $n \neq 1$
- Ισχύς των συμπερασμάτων; - αναπαραγωγιμότητα;

Υπερτάσεις



← Στη γραμμή μεταφοράς

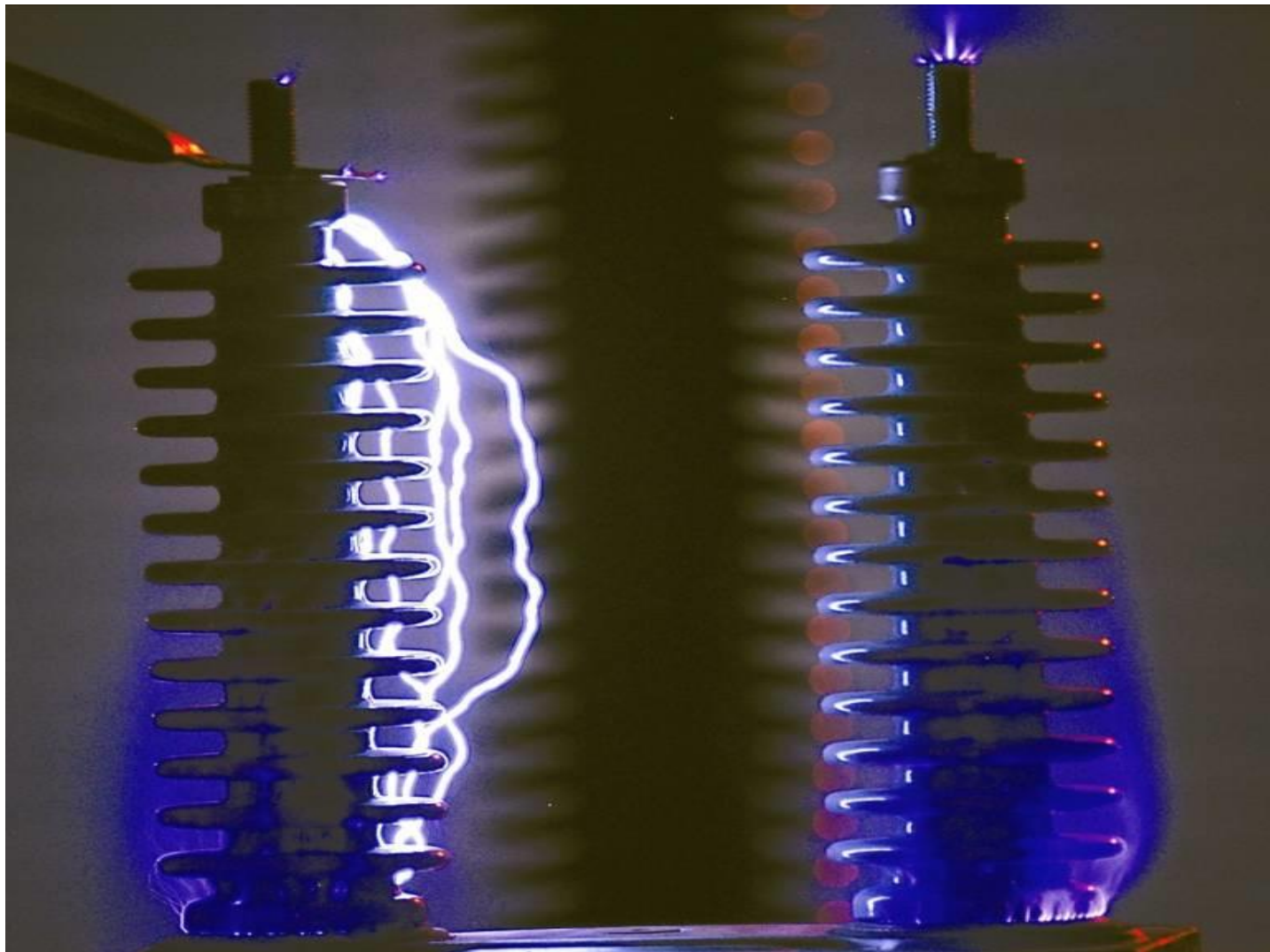


Στον αγωγό προστασίας →

Υπερτάσεις



Ηλεκτρική εκκένωση



Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

- Διατάξεις κλειστού τύπου
 - Π.χ. σε μία πόλη
 - Ανάγκη υλικού $E_d \uparrow \Rightarrow$ χρήση SF_6
- Ανάγκη μελετών (θεωρητικών και πειραματικών) για συσκευές / διατάξεις / εξαρτήματα / συνεργαζόμενα διηλεκτρικά
 - Τάση ανά θέση (κανονική και υπέρταση)
 - Μορφή ηλεκτρικού πεδίου (ιδίως στις κρίσιμες θέσεις)
 - Ιδιότητες μονωτικών (U_e , U_d)

Άλλες χρήσεις των Υψηλών Τάσεων

- Ιατρική

- Διαγνωστική: 100kV, 300kW

- Θεραπεία: 300kV, 100W

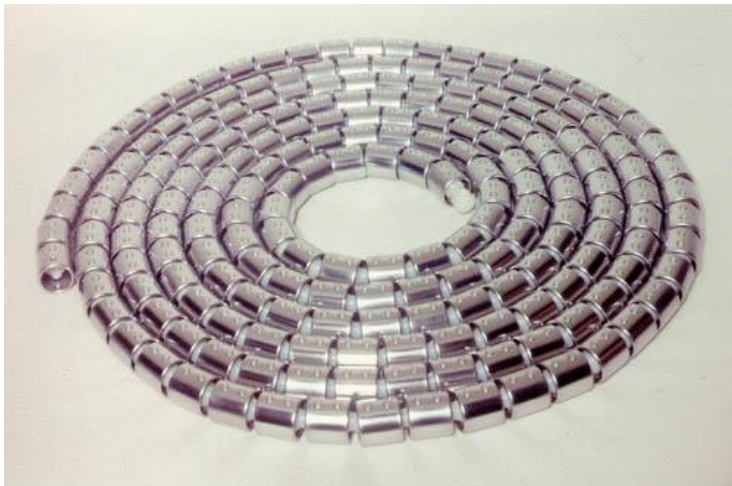
- Τεχνολογία συντήξεως (40kV, 1000kWs)

- Γεννήτριες ($dU/dt \uparrow \dots 50\text{MV}/\mu\text{s}$, [EMP])

- Υψίσυχνες YT

Υψηλές Τάσεις στη Φυσική

- Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο
- Επιταχυντές (Oak Ridge National Laboratory, 25MV, NEC, pelletron)
- Γεννήτρια Greinacher ή Cockcroft-Walton (4MV)
- Γεννήτρια Van de Graaff (~10MV, [25MV HVEC])
- Συστήματα Laser



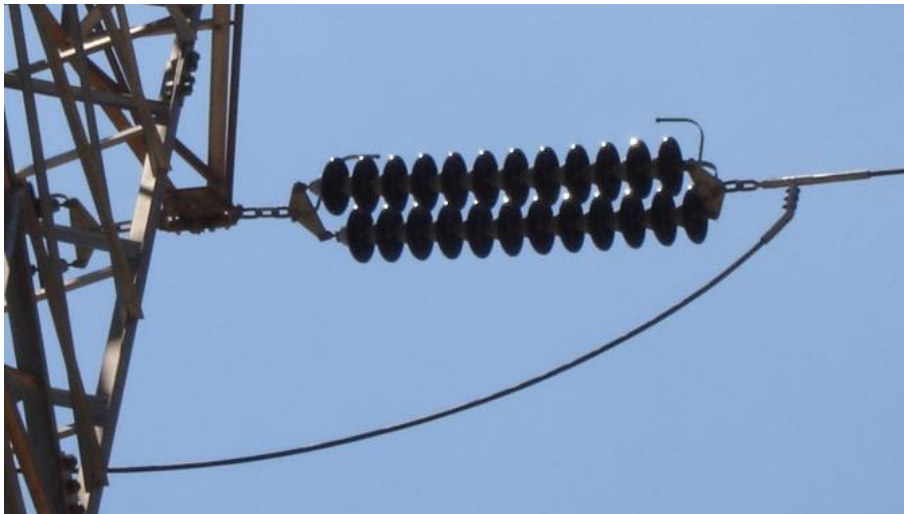
Κατανομή της επιβαλλόμενης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα τάσης

Κατηγορίες μονωτήρων, ανάλογα με τη χρήση τους:

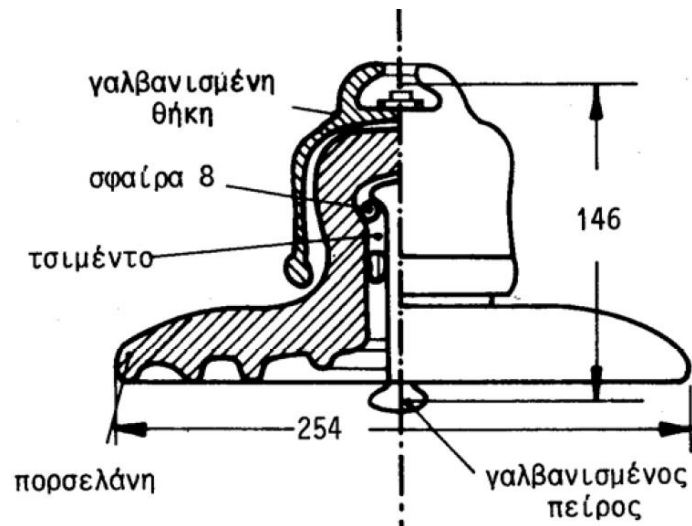
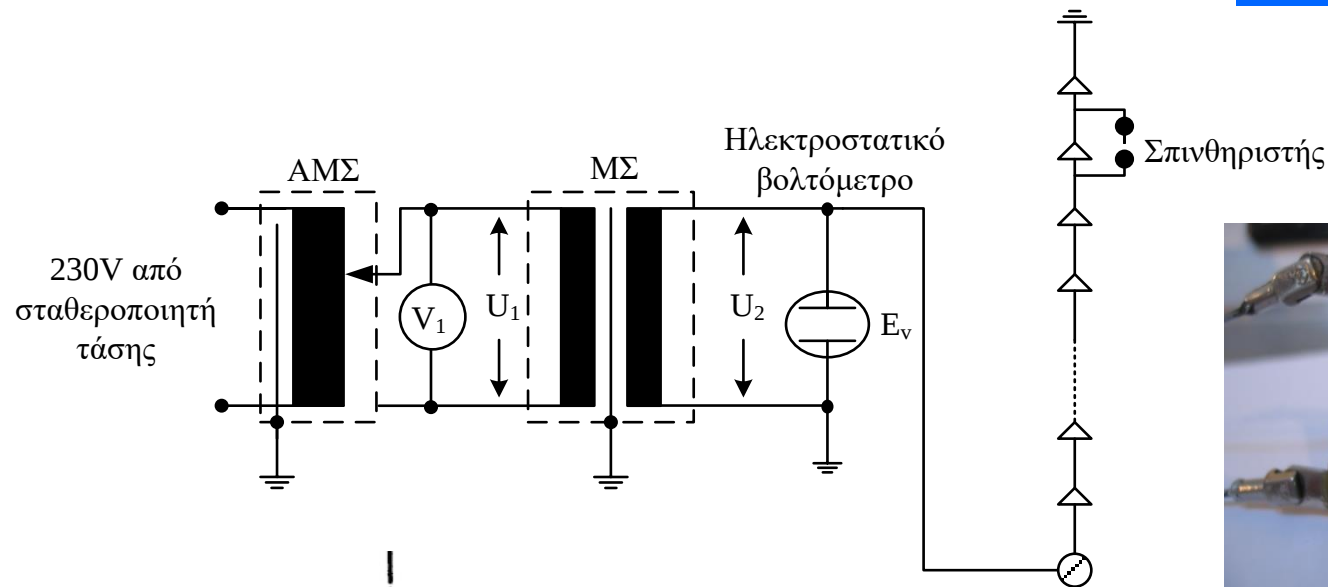
- Μονωτήρες ανάρτησης
- Μονωτήρες στήριξης
- Μονωτήρες διέλευσης

Κατηγορίες μονωτήρων, ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους:

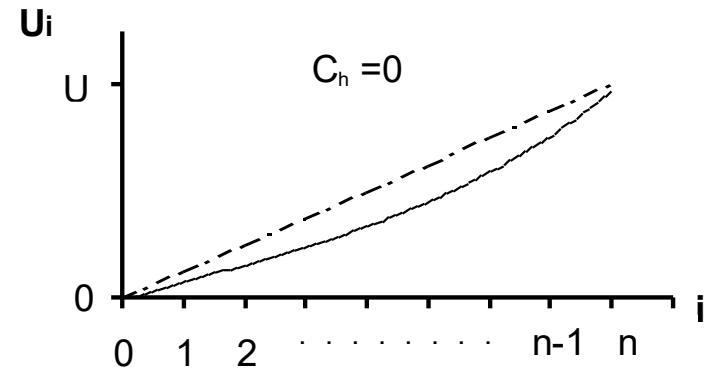
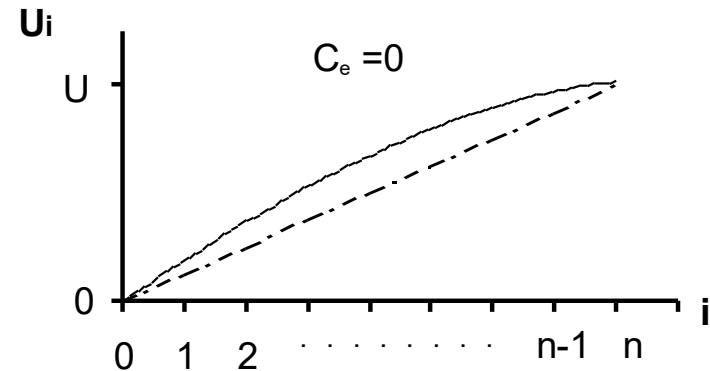
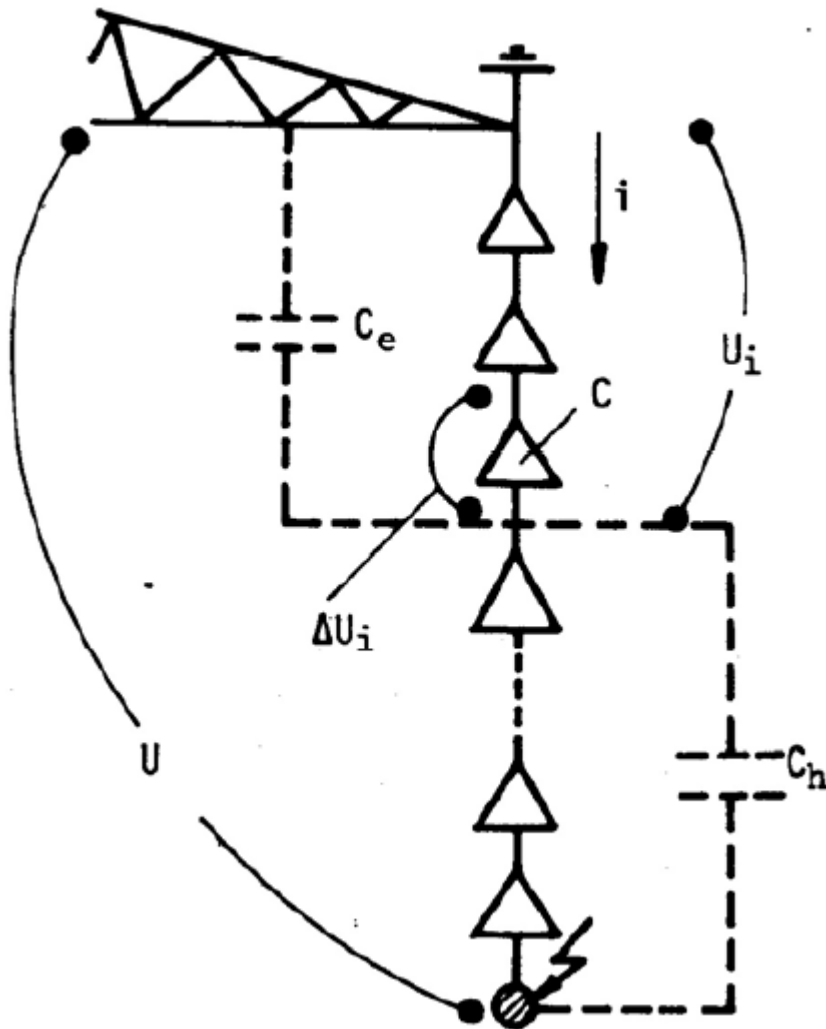
- Κεραμικοί μονωτήρες (πορσελάνης ή υάλου)
- Συνθετικοί μονωτήρες



Κατανομή της επιβαλλόμενης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα τάσης



Κατανομή της επιβαλλόμενης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα τάσης



Κατανομή της επιβαλλόμενης σε έναν αλυσοειδή μονωτήρα τάσης

Προκειμένου να υπολογίσουμε την τάση διάσπασης U_d του σπινθηριστή και στη συνέχεια το ποσοστό της τάσης π_i που επιβάλλεται στον i -οστό δίσκο τοποθετούμε τον σπινθηριστή σε κάθε δίσκο και κάθε φορά αυξάνουμε μέσω του αυτο-μετασχηματιστή την επιβαλλόμενη τάση $U_{ολ,i}$ μέχρι να διασπαστεί ο σπινθηριστής. Το ποσοστό της τάσης π_i που επιβάλλεται στον i -οστό δίσκο δίνεται από τη σχέση:

$$\pi_i = \frac{U_d}{U_{ολ,i}} 100\%$$

$$\sum_{i=1}^{10} \pi_i = 1 \Rightarrow U_d \sum_{i=1}^{10} \frac{1}{U_{ολ,i}} = 1 \Rightarrow U_d = \frac{1}{\sum_{i=1}^{10} \frac{1}{U_{ολ,i}}}$$

Μετασχηματιστής δοκιμών 500kV - Υπερπήδηση και διάτρηση μονωτήρων

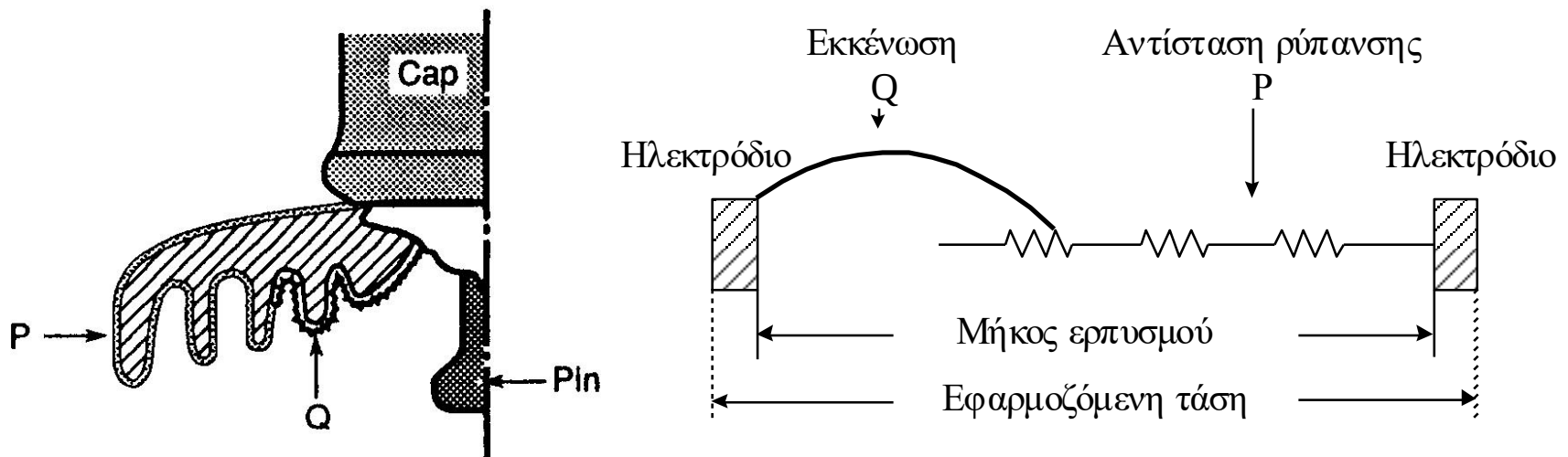


University of Stellenbosch, South Africa



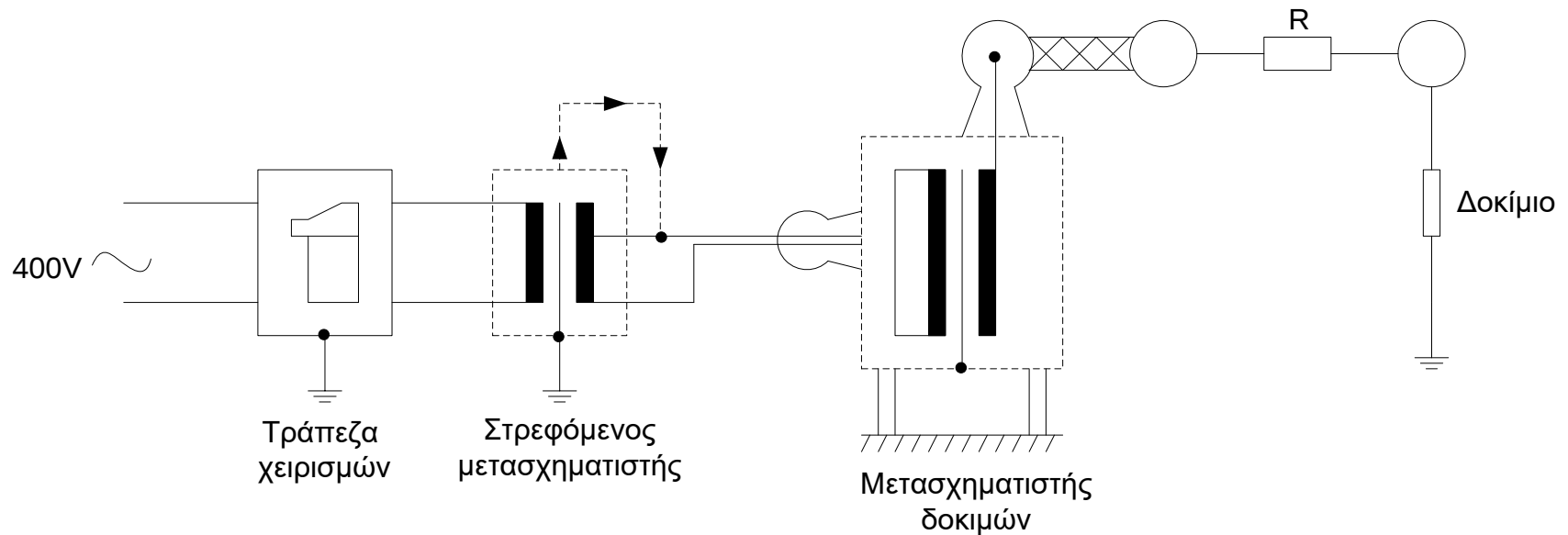
NGK - High Voltage Laboratory

Μετασχηματιστής δοκιμών 500kV - Υπερπήδηση και διάτρηση μονωτήρων



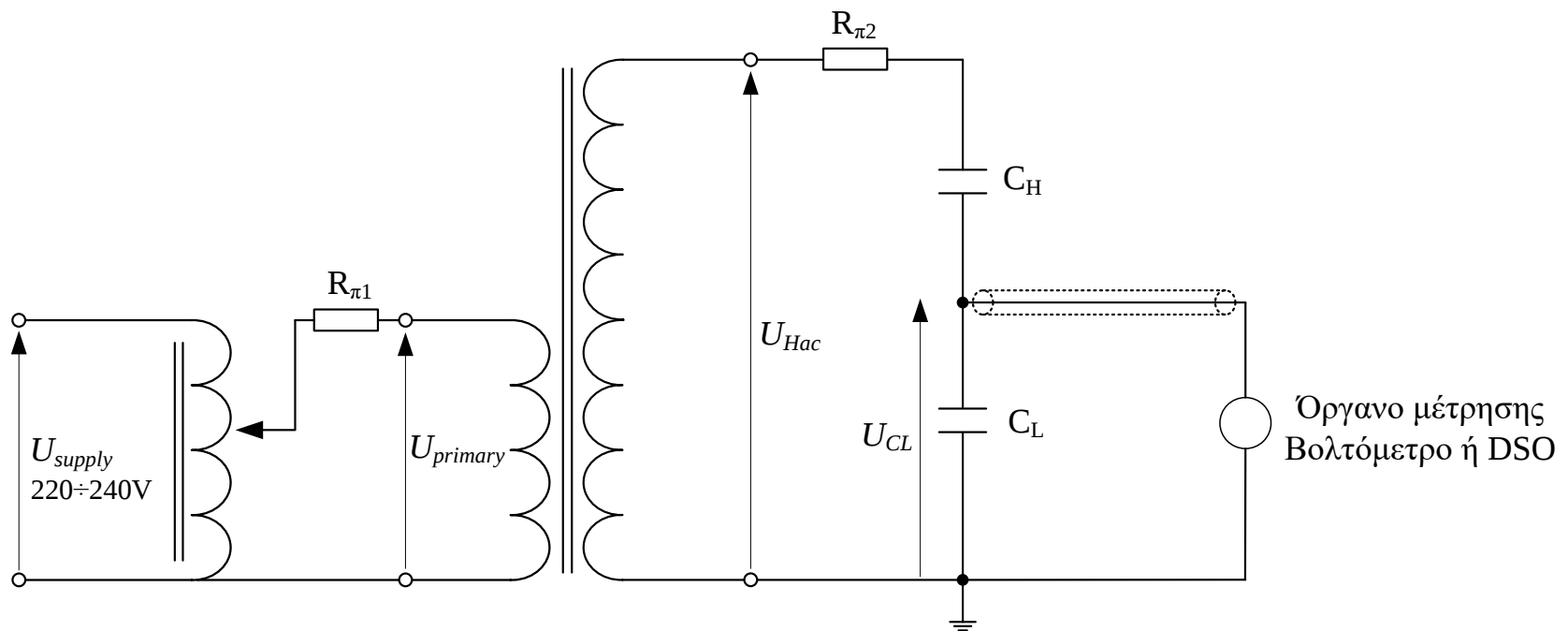
P : Στρώμα ρύπανσης,
 Q : Ξηρό στρώμα γεφυρωμένο με τόξο

Μετασχηματιστής δοκιμών 500kV - Υπερπήδηση και διάτρηση μονωτήρων



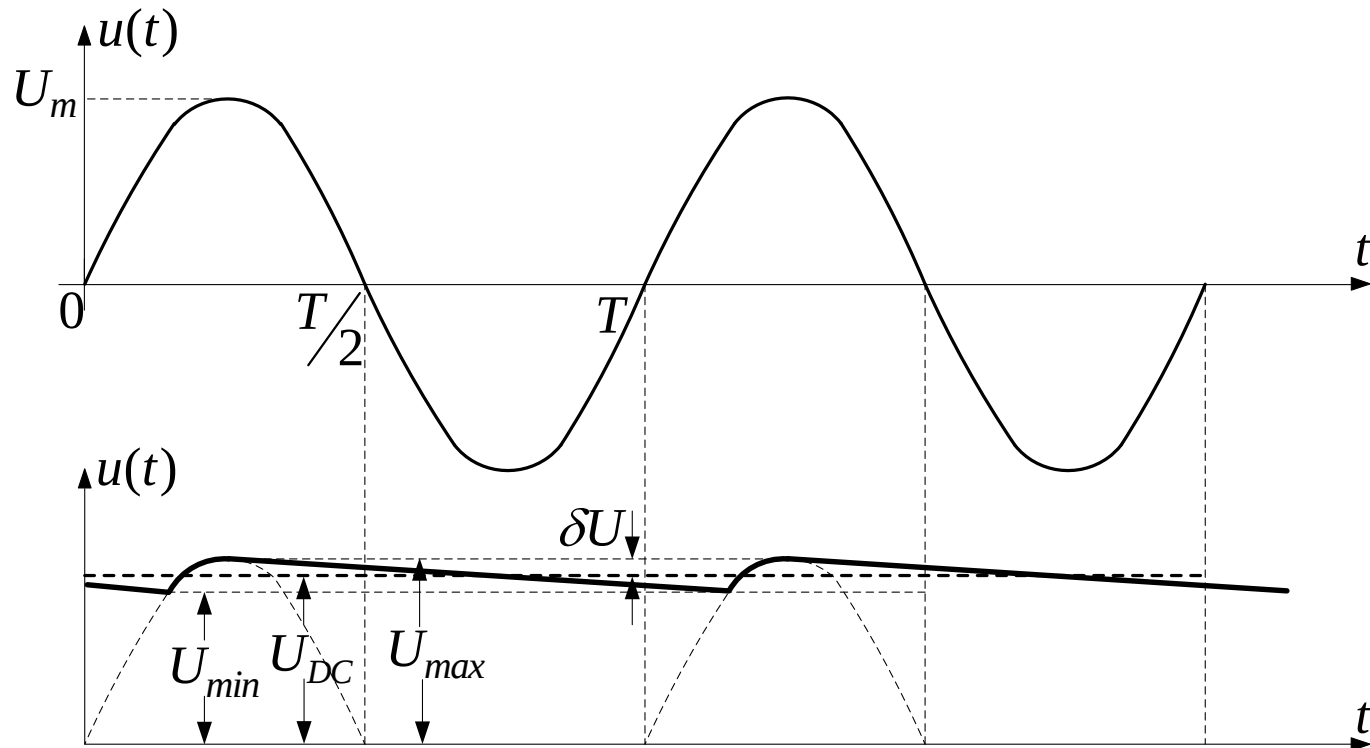
Παραγωγή και μέτρηση τάσεων διαφόρων μορφών

Διάταξη παραγωγής και μέτρησης εναλλασσομένων υψηλών τάσεων



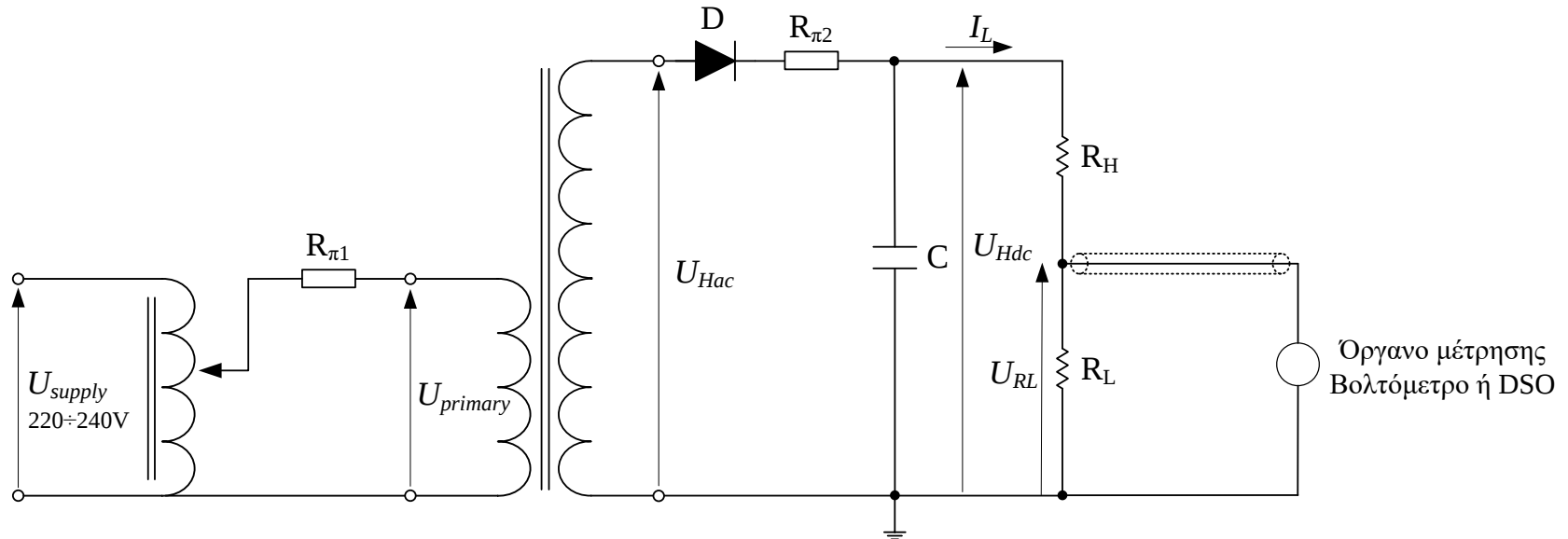
Παραγωγή και μέτρηση τάσεων διαφόρων μορφών

Συνεχής υψηλή τάση



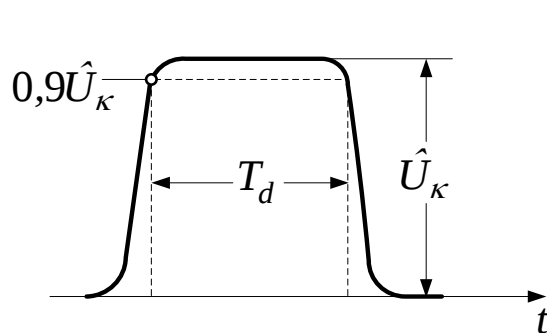
Παραγωγή και μέτρηση τάσεων διαφόρων μορφών

Διάταξη παραγωγής και μέτρησης συνεχών υψηλών τάσεων

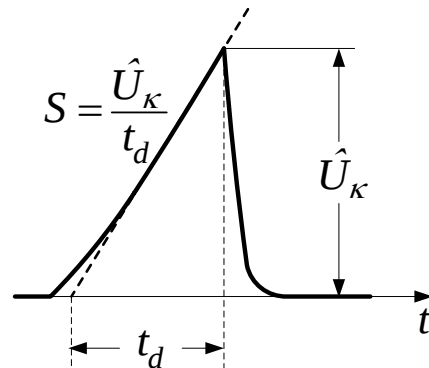


Παραγωγή και μέτρηση τάσεων διαφόρων μορφών

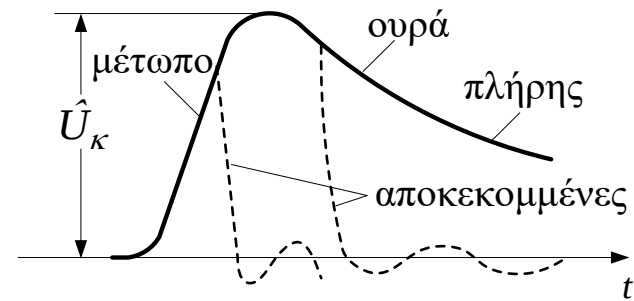
Κρουστική τάση



Ορθογωνική



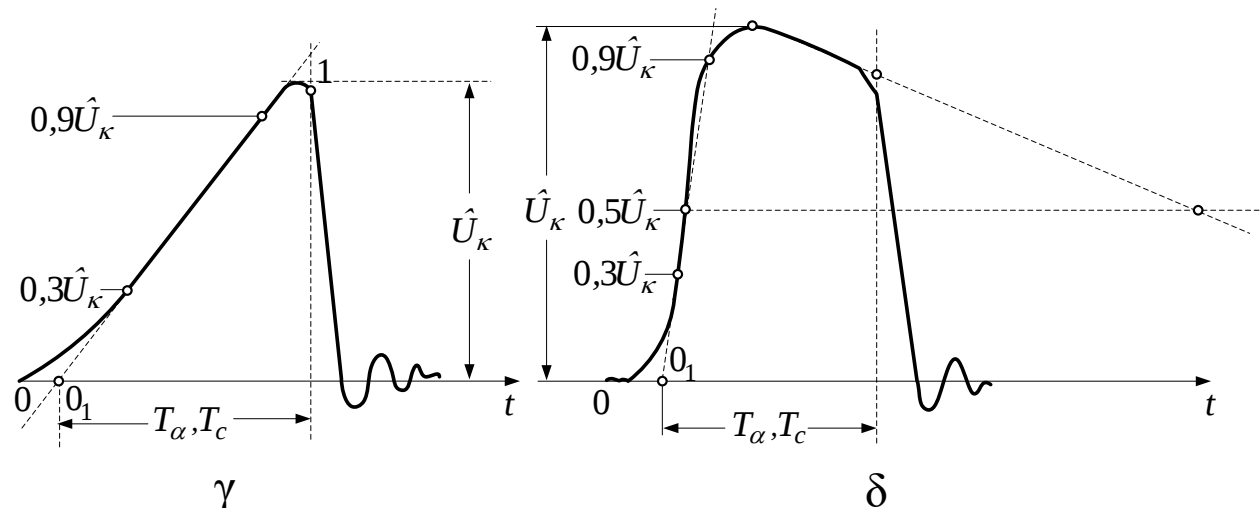
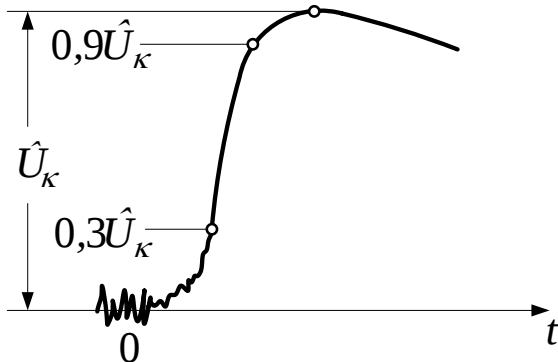
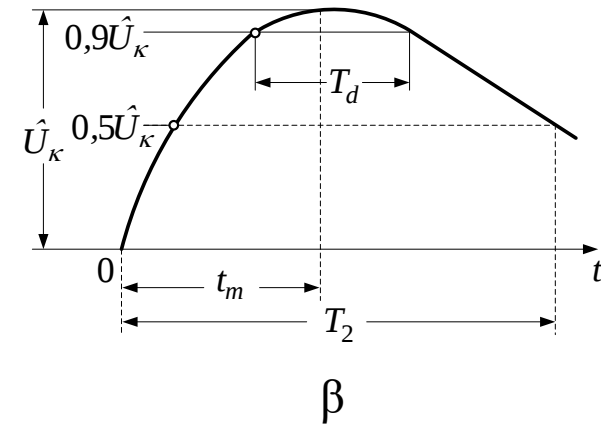
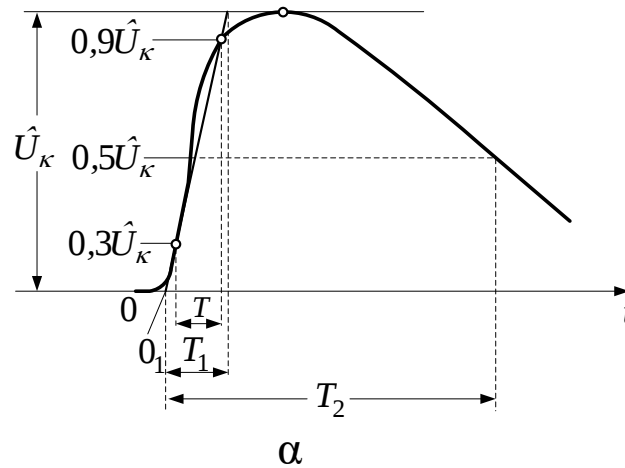
Σφηνοειδής



Διπλοεκθετική

Παραγωγή και μέτρηση τάσεων διαφόρων μορφών

Κρουστική τάση



Παραγωγή και μέτρηση τάσεων διαφόρων μορφών

Κύκλωμα γεννήτριας κρουστικών τάσεων

