



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

Παραγωγή και Μέτρηση Υψηλών Τάσεων

Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας
Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Νικολέτα Χ. Ηλία
Ε.Δι.Π. Ε.Μ.Π.

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017

Παραγωγή και Μέτρηση Υψηλών Τάσεων

1. Εισαγωγή-Ιστορική αναδρομή

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των Υψηλών Τάσεων οφείλεται κυρίως στη χρησιμοποίησή τους για την οικονομική μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Βέβαια είναι φανερό, ακόμη και σήμερα, ότι η κύρια εφαρμογή τους εντοπίζεται στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δε χρησιμοποιούνται και σε άλλους τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας, όπως στις επιστήμες του περιβάλλοντος με τα ηλεκτροστατικά φίλτρα για την αφαίρεση τεραστίων ποσοτήτων σκόνης και στερεών σωματιδίων από τις καμινάδες εργοστασίων και σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη μείωση της μόλυνσης της ατμόσφαιρας. Επίσης, υψηλές τάσεις χρησιμοποιούνται για την παραγωγή όζοντος, το οποίο αποτελεί μέσο απόσπησης διαφόρων αστικών λυμάτων, στις ηλεκτροστατικές βαφές και στην ξηρογραφία, στην ιατρική για την παραγωγή ακτίνων X καθώς και για τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια, όπως και στην ηλεκτρονική σε τεχνικές εμφύτευσης ιόντων σε ημιαγωγούς [1]. Από πολύ παλαιότερα οι υψηλές τάσεις χρησιμοποιούνταν στις εφαρμογές καθοδικών σωλήνων σε τηλεοράσεις και παλμογράφους, στα radar και στους ασυρμάτους, αλλά και στους ηλεκτρικούς σιδηροδρόμους καθώς και στα πηνία αναφλέξεως των βενζινοκινητήρων.

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Commission-IEC) και με τα πρότυπα των υπόλοιπων διεθνών ινστιτούτων (IEEE, IET, κ.α.) και εθνικών επιτροπών ηλεκτροτεχνικής τυποποίησης (π.χ. VDE), ως υψηλή τάση ορίζεται, για μεν το εναλλασσόμενο ρεύμα κάθε τάση άνω των 1000V, για δε το συνεχές ρεύμα κάθε τάση άνω των 1500V [2], [3]. Βεβαίως, στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί, ότι το επίπεδο της τάσης σε όλες τις προαναφερόμενες εφαρμογές υπερβαίνει κατά δεκάδες ή και εκατοντάδες φορές τις ορισθέντες, κατά IEC, κατώτατες τιμές τάσης για τον ορισμό της υψηλής τάσης. Γι' αυτόν τον λόγο, ίσως με τον όρο «Υψηλή Τάση» θα μπορούσε να χαρακτηριστεί οποιαδήποτε τιμή τάσης, ικανή να θέσει σε κίνδυνο, άμεσα ή έμμεσα, τη διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων και να οδηγήσει σε φαινόμενα υπερπήδησης ή διάσπασης των μονωτικών διατάξεων.

Ενδεικτικά αναφέρονται οι ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ ενεργών μεταλλικών στελεχών υπό υψηλή τάση και γειωμένων αντικειμένων [4]:

- 50cm/100kV για εναλλασσόμενες και συνεχείς τάσεις, αλλά κατ' ελάχιστον 50cm από τα ενεργά μέρη υπό υψηλή τάση.
- 20cm/100kV για κρουστικές τάσεις, αλλά κατ' ελάχιστον 50cm από τα ενεργά μέρη υπό υψηλή τάση.

Παρά το γεγονός ότι με τη συνεχή πρόοδο της τεχνολογίας, η υψηλή τάση βρίσκει συνεχώς νέα πεδία εφαρμογών, η κυριότερη χρήση της παραμένει στα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Η εισαγωγή των υψηλών τάσεων στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται, κυρίως, σε οικονομικούς λόγους. Λόγω της αλματώδους εκβιομηχανίσεως, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας άρχισε να σημειώνει αύξηση στα τέλη του προπερασμένου αιώνα, εκτοξεύθηκε κατά τη διάρκεια του

περασμένου αιώνα, συνεχίζει, δε, να διατηρεί ταχύτατο ρυθμό αύξησης τις τελευταίες δεκαετίες [5]. Η ενέργεια αυτή πρέπει να μεταφερθεί από τους σταθμούς παραγωγής προς την κατανάλωση, με ηλεκτρικές γραμμές, μήκους μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων ή και περισσότερο. Όσο μεγαλύτερη σε μέγεθος είναι η μεταφερόμενη ισχύς και όσο μεγαλύτερη η απόσταση μεταφοράς, τόσο υψηλότερη πρέπει να είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας της γραμμής. Αυτό καθορίζεται από διάφορους τεχνικούς και οικονομικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της αποτελεσματικότητας, της πτώσης τάσης, της ευστάθειας του συστήματος, και του πλήθους των απαραίτητων κυκλωμάτων για ασφαλή παροχή ισχύος.

Ο πρώτος δημόσιος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκε σε λειτουργία το 1882 στο Λονδίνο (Holborn). Τα πρώτα συστήματα παρήγαγαν συνεχές ρεύμα υπό χαμηλή τάση, αλλά η λειτουργία τους περιορίζονταν σε πολύ τοπικές περιοχές και χρησιμοποιούνταν κυρίως για ηλεκτρικό φωτισμό. Οι περιορισμοί για μεταφορά υπό συνεχές ρεύμα (DC) σε χαμηλή τάση έγιναν αμέσως φανεροί [6]. Στα τέλη της δεκαετίας του 1880 κατασκευάστηκε η πρώτη γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης στον κόσμο, η οποία μετέφερε 100kW με τάση 2kV σε απόσταση 20km κοντά στο Cerchi της Ιταλίας. Το φορτίο ήταν καθαρά φωτισμός δημόσιων κτιρίων [7]. Το 1890 στο Deptford τέθηκε σε λειτουργία ο πρώτος κύριος σταθμός παραγωγής εναλλασσομένου ρεύματος (AC) ο οποίος τροφοδοτούσε με ισχύ το κεντρικό Λονδίνο μέσω γραμμής 10kV σε μια απόσταση 45km [6]. Στη συνέχεια, το 1891 στη Γερμανία κατασκευάστηκε γραμμή 15kV μεταξύ Lauffen και Frankfurt. Έκτοτε, σημειώθηκε μία συνεχής αύξηση της ονομαστικής τάσεως, έτσι ώστε, το 1936 να τεθεί σε λειτουργία μία γραμμή των 287kV, το 1952 μία γραμμή 400kV στη Σουηδία (η πρώτη των 400kV στην Ευρώπη) και το 1965 μία γραμμή των 735kV [5]. Σημειώνεται ότι εναλλασσόμενες υπερυψηλές τάσεις (EHV) από 735kV έως 765kV χρησιμοποιούνται σήμερα στα συστήματα μεταφοράς των Καναδά, Βραζιλίας, Ρωσίας, Νοτίου Αφρικής, Νοτίου Κορέας και Η.Π.Α.

Γραμμές τάσεως άνω των 1000kV κατασκευάστηκαν στη Ρωσία και στην Ιαπωνία, αλλά σήμερα λειτουργούν στα 500kV. Γενικότερα, με την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος, ιδιαίτερα σε χώρες του αναπτυσσόμενου κόσμου, η ανάγκη για μεταφορά ισχύος μεγέθους άνω των 10GW σε απόσταση άνω των 500km, με μία γραμμή, έφερε στο προσκήνιο την ανάγκη χρήσης ακόμη υψηλότερων επιπέδων τάσης. Πρώτη η Κίνα, το 2009, έθεσε σε εμπορική λειτουργία γραμμή των 1000kV AC (UHV) (Jindongnan-Nanyang-Jingmen), μήκους 640km και ικανότητας μεταφοράς 5GW, ενώ σε επίσημη αναφορά της η κρατική εταιρεία δικτύων της Κίνας (State Grid Corporation of China-SGCC) αναφέρει ότι, εντός του έτους 2017, 30.000km δικτύου 1000kV (UHV) βρίσκονται υπό λειτουργία και κατασκευή [8].

Στο Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας υπάρχουν εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (150kV) μονού και διπλού κυκλώματος, καθώς και εναέριες γραμμές υπερυψηλής τάσης (400kV) διπλού κυκλώματος. Εκτός από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς, στο ελληνικό σύστημα λειτουργεί ένα μεγάλο δίκτυο υπογείων και υποβρυχίων καλωδίων 150kV και 400kV AC, με ιδιαίτερη μνεία στη γραμμή διασύνδεσης Ελλάδας – Ιταλίας η οποία αποτελείται από 107km εναέριας γραμμής και 160km υποβρυχίου καλωδίου 400kV DC [9].

2. Προβλήματα που δημιουργούν οι Υψηλές Τάσεις

Με την ανύψωση της ονομαστικής τάσης λειτουργίας μιας ηλεκτρικής γραμμής καθίστανται υψηλότερες και οι εμφανιζόμενες σε αυτήν εσωτερικές υπερτάσεις. Η ακριβής τιμή των τελευταίων εξαρτάται από την αλλαγή κατάστασης που λαμβάνει χώρα σε κάθε περίπτωση, καθώς και από τη χρονική στιγμή εμφάνισής της, σε σχέση με τη χρονική μεταβολή της τάσης της γραμμής. Σε θεωρητική βάση, είναι δυνατές εσωτερικές υπερτάσεις τιμής έως και το 7πλασιο της πολικής τάσης λειτουργίας της γραμμής, εντούτοις, αυτές είναι πολύ σπάνιες, περιπτώσεις όμως υπερτάσεων τιμής ίσης με το 3πλασιο της πολικής τάσης είναι πρακτικά δυνατές [5]. Οι υπερτάσεις αυτές, ανάλογα με τους λόγους εμφανίσεώς τους, ταξινομούνται στις εξής τρεις κύριες κατηγορίες:

1. *Υπερτάσεις χειρισμών ή εσωτερικές υπερτάσεις (Switching surges):* Αυτές εμφανίζονται στα δίκτυα με τη μορφή οδοντών κυμάτων και οφείλονται, σε χειρισμούς όπως η διακοπή χωρητικού ρεύματος (γραμμή μεταφοράς ή αφόρτιστο καλώδιο), σε ενεργοποίηση και επανάζευξη μιας γραμμής μεταφοράς με ανοικτό άκρο, σε διακοπή μικρών επαγωγικών ρευμάτων, ή διακοπή ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Συνήθως έχουν τη μορφή αποσβεννυμένης ταλάντωσης, το εύρος της οποίας μπορεί θεωρητικά να φθάσει και τα 7,5p.u. σε γραμμές με ανεπαρκή προστασία, αλλά συνήθως το εύρος δεν ξεπερνά τα 4p.u. σε καλά προστατευμένες γραμμές [1], [10].
2. *Υπερτάσεις από κεραυνούς ή εξωτερικές υπερτάσεις (Lightning surges):* Αυτές επίσης εμφανίζονται με τη μορφή οδοντών κυμάτων και οφείλονται είτε σε απευθείας πτώση κεραυνού πάνω στις γραμμές μεταφοράς, είτε λόγω δευτερογενών υπερπηδήσεων. Τέτοιες υπερτάσεις αποτελούν τις πιο επικίνδυνες μορφές υπερτάσεων για γραμμές μεταφοράς με τάση λειτουργίας έως 220kV.
3. *Υπερτάσεις από υπερπηδήσεις:* Αυτές εμφανίζονται κατά τη διάσπαση των μονώσεων ανάμεσα σε δύο κυκλώματα διαφορετικής τάσης, οπότε το κύκλωμα με τη χαμηλότερη τάση τίθεται ξαφνικά υπό τάση υψηλότερη από την τάση λειτουργίας του. Τέτοιες υπερτάσεις εμφανίζονται κυρίως στους μετασχηματιστές.

Από τα παραπάνω, συνάγεται το συμπέρασμα ότι ο μηχανικός που ασχολείται με στοιχεία, υλικά, διατάξεις και εγκαταστάσεις υψηλών τάσεων, θα πρέπει να δίνει ιδιαίτερη έμφαση στον σωστό σχεδιασμό και υπολογισμό, καθώς και στη σωστή και τακτική συντήρηση της μόνωσης των δικτύων αυτών.

3. Μορφές Υψηλών Τάσεων

3.1 Εναλλασσόμενη Υψηλή Τάση (HVAC)

3.1.1. Εφαρμογές

Όπως προαναφέρθηκε, η εναλλασσόμενη υψηλή τάση χρησιμοποιείται, κυρίως, στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους. Αν U_ϕ η φασική τάση της γραμμής, I το ρεύμα ανά φάση, ϕ η γωνία φάσεως και R η

ωμική αντίσταση ανά φάση σε μία τριφασική γραμμή μεταφοράς, τότε, η μεν μεταφερόμενη από τη γραμμή ενεργός ισχύς θα είναι:

$$P = 3U_{\varphi} I \cos \varphi \quad (1)$$

οι δε κατά μήκος της γραμμής απώλειες ισχύος, λόγω του φαινομένου Joule, θα είναι:

$$P_j = 3I^2 R \quad (2)$$

Η σχέση (2), κατόπιν της (1), γράφεται:

$$P_j = P^2 \frac{R}{3U_{\varphi}^2 \cos^2 \varphi} \quad (3)$$

ή αλλιώς, αν r η ωμική αντίσταση/km της γραμμής και l το μήκος της γραμμής σε km, τότε η (3) γράφεται:

$$P_j = P^2 \frac{r \cdot l}{3U_{\varphi}^2 \cos^2 \varphi} \quad (4)$$

οπότε παρατηρείται ότι, για δεδομένη μεταφερόμενη ισχύ P , οι απώλειες ισχύος είναι ανάλογες προς την ωμική αντίσταση ανά φάση και αντιστρόφως ανάλογες προς το τετράγωνο της φασικής τάσεως της γραμμής [5]. Συνεπώς, οι υπ' όψιν απώλειες, οι οποίες δε θα πρέπει να υπερβαίνουν ένα ορισμένο ποσοστό της μεταφερόμενης ισχύος, καθίστανται τόσο μικρότερες, όσο η τάση λειτουργίας της γραμμής καθίσταται μεγαλύτερη.

Τα οικονομικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα, τα οποία προσφέρει ένα δίκτυο μεταφοράς σε υψηλή τάση, οδήγησαν σταδιακά στην αλματώδη αύξηση των δικτύων μεταφοράς. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται το κόστος μεταφοράς ανά MVAh και 100km γραμμής, για τις διάφορες γραμμές μεταφοράς απλού και διπλού κυκλώματος του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς [11].

Παράλληλα με την οικονομική λειτουργία μιας γραμμής, σημασία έχει και η ευσταθής λειτουργία της, η οποία εξαρτάται από την *ικανότητα μεταφοράς* ισχύος (ή αλλιώς φυσικής ισχύος) της γραμμής P_n . Πιο συγκεκριμένα, για ένα δεδομένο μήκος γραμμής, η μέγιστη ισχύς P_{max} , που μπορεί να μεταφερθεί με ευστάθεια, αποτελεί ορισμένο ποσοστό της ικανότητας μεταφοράς. Η ικανότητα μεταφοράς ισχύος δίνεται από τον τύπο:

$$P_n = \frac{U^2}{Z} \quad (5)$$

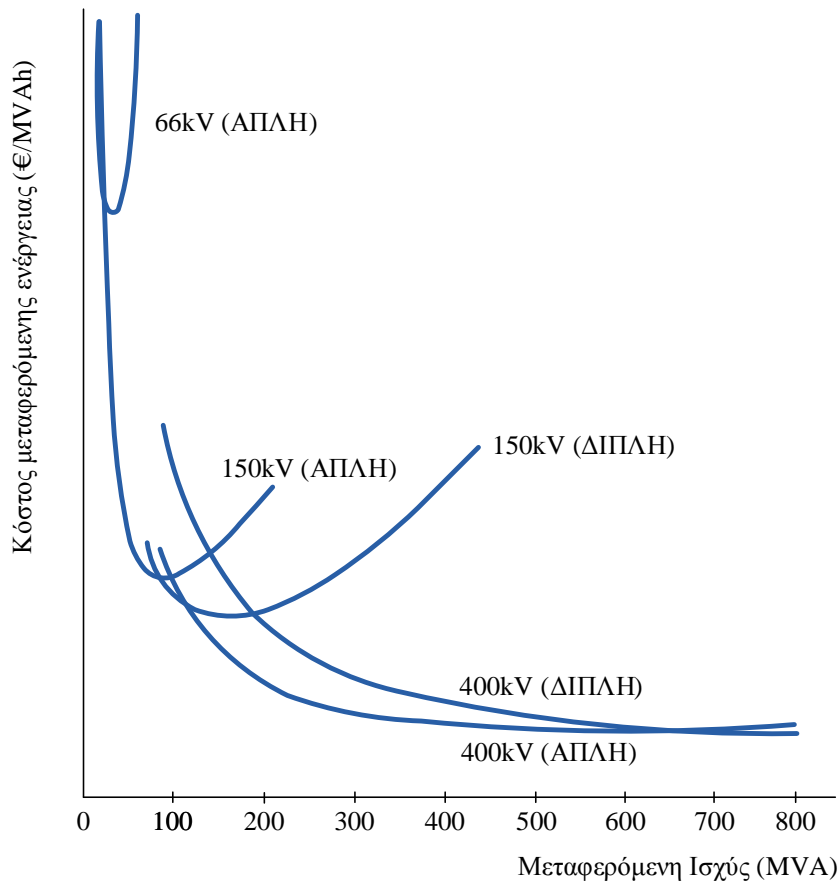
όπου Z η κυματική σύνθετη αντίσταση της γραμμής και η οποία έχει περίπου σταθερή τιμή (250Ω÷400Ω). Από την (5) προκύπτει η απαίτηση υψηλότερης τιμής τάσης για μεγαλύτερη μεταφερόμενη ισχύ.

Επίσης για γραμμές μεγάλου μήκους η *ποσοστιαία πτώση τάσεως* δίνεται από τον τύπο:

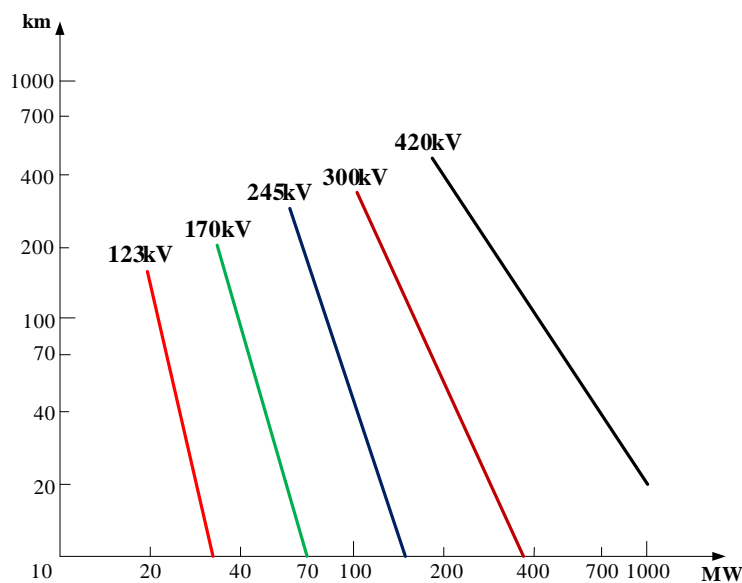
$$\frac{\Delta U}{U} = \left[\left(\frac{P^2}{P_n^2} - 1 \right) 19,72 \left(\frac{1}{\lambda} \right) \right] \quad (6)$$

όπου λ το μήκος κύματος της τάσεως πάνω στη γραμμή. Από την (6) γίνεται φανερό ότι η ύπαρξη υψηλότερης τάσης, άρα και μεγαλύτερης φυσικής ισχύος, συνεπάγεται και μικρότερη πτώση τάσεως κατά μήκος της γραμμής [1].

Τα παραπάνω αποτυπώνονται γραφικά στο διάγραμμα του σχήματος 2, στο οποίο φαίνεται το ποσό της μεταφερόμενης ισχύος σε συνάρτηση με την απόσταση μεταφοράς (μήκος γραμμής), για οικονομική μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις υπό υψηλή εναλλασσόμενη τάση.



Σχήμα 1: Κόστος μεταφοράς σε διάφορα επίπεδα τάσης ως συνάρτηση της μεταφερόμενης ισχύος [11].



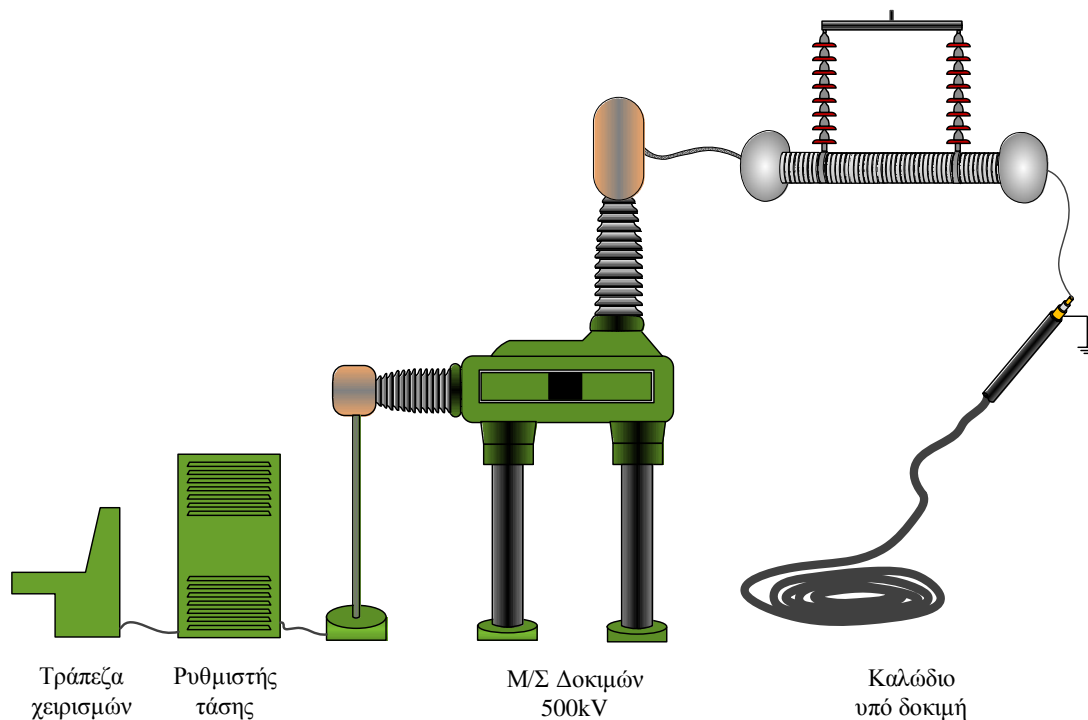
Σχήμα 2: Οικονομική τάση μεταφοράς HVAC ως συνάρτηση της ισχύος και της απόστασης [1].

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση του επιπέδου τάσεως στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας έχει μεν όλα τα προαναφερόμενα πλεονεκτήματα των χαμηλών απωλειών ισχύος, της αυξημένης ευστάθειας κ.ο.κ., επιφέρει δε σημαντική αύξηση στο κόστος κατασκευής και συντήρησης του δικτύου μεταφοράς, λόγω του υψηλού κόστους του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στις εγκαταστάσεις υψηλής τάσης. Στις προηγούμενες δεκαετίες, η αύξηση του επιπέδου της τάσεως στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείτο με αργούς σχετικά ρυθμούς και έπειτα από μακροχρόνιες οικονομοτεχνικές μελέτες για την οικονομική λειτουργία των δικτύων, λόγω του απαγορευτικού κόστους προμήθειας και συντήρησης του εξοπλισμού. Σήμερα, με την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας στα μονωτικά υλικά και στις διατάξεις υψηλής τάσης, καθώς και με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (ανάγκες μεταφοράς ισχύος δεκάδων GW μέσω πολύ μακρινών αποστάσεων στα μεγάλα αστικά κέντρα), οι τεχνικοί και οικονομικοί περιορισμοί αίρονται με ταχύτατους ρυθμούς, με αποτέλεσμα η έρευνα να έχει επικεντρωθεί σε τάσεις μεταφοράς των 1500kV και άνω.

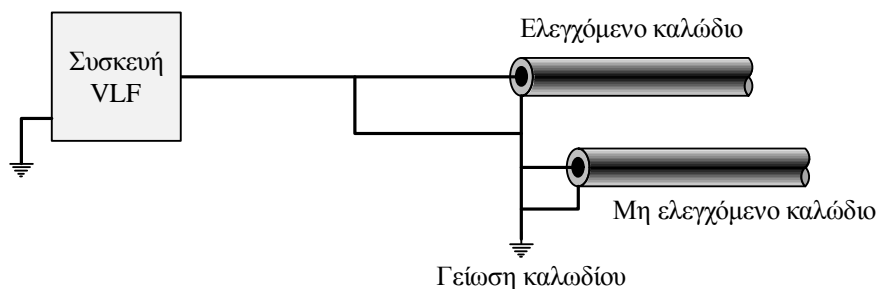
Εκτός από την εφαρμογή της υψηλής εναλλασσόμενης τάσεως στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, υψηλές εναλλασσόμενες τάσεις (βιομηχανικής συχνότητας αλλά και πολύ χαμηλών συχνοτήτων) χρησιμοποιούνται, επίσης, σ' ένα ευρύ φάσμα δοκιμών σε ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό υψηλής τάσεως, με σκοπό τον έλεγχο της αντοχής της μόνωσης σε προκαθορισμένα, από τα διεθνή ή/και εθνικά Πρότυπα, επίπεδα τάσεως και για τον προσδιορισμό των τιμών χαρακτηριστικών παραμέτρων και μεγεθών που αφορούν στην αξιοπιστία και στη συντήρηση του εξοπλισμού.

Παραδείγματα τέτοιων διατάξεων αποτελούν τα μονωτικά αέρια και έλαια, καθώς και τα καλώδια Μ.Τ. και Υ.Τ. Πιο συγκεκριμένα, εναλλασσόμενη υψηλή τάση εφαρμόζεται:

1. Στον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών ελαίων, με χρήση ειδικής συσκευής στην οποία τοποθετείται το δείγμα ελαίου και η οποία ανυψώνει την τάση με σταθερό και προκαθορισμένο, από τα εφαρμοζόμενα Πρότυπα, ρυθμό [12].
2. Στη μέτρηση του συντελεστή απωλειών μονωτικών υλικών.
3. Στην ανίχνευση και μέτρηση των μερικών εκκενώσεων σε μονωτικών υλικά.
4. Στον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης καλωδίων Μ.Τ. και Υ.Τ. [13], [14]. Στο σχήμα 3 εικονίζεται η διάταξη δοκιμών υπό εναλλασσόμενη υψηλή τάση σε καλώδια Μ.Τ. και Υ.Τ. που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.
5. Στον έλεγχο και την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων και τραυματισμών της μόνωσης, των συνδέσμων (μούφες) και των ακροκιβωτίων των καλωδίων Μ.Τ. και Υ.Τ., μετά την εγκατάστασή τους, ή στην επιβεβαίωση της ακεραιότητας των καλωδίων, με δοκιμή σε υψηλή εναλλασσόμενη τάση πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF) της τάξεως του 0,1Hz, σε διάταξη όπως εικονίζεται στο σχήμα 4 και σύμφωνα με τα [15], [16].



Σχήμα 3: Διάταξη δοκιμών καλωδίων Μ.Τ και Υ.Τ. στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.



Σχήμα 4: Σχηματική διάταξη δοκιμών VLF.

3.1.2. Παραγωγή και μέτρηση Εναλλασσόμενων Υψηλών Τάσεων στο εργαστήριο

Η παραγωγή εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων (Ε.Υ.Τ.) στα εργαστήρια υψηλών τάσεων γίνεται με διαφορετικά κριτήρια και σκοπούς, άρα και προδιαγραφές, απ' ότι στα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα εργαστήρια, η παραγωγή Ε.Υ.Τ. αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα και μέλημα του προσωπικού των εργαστηρίων, αφού η συγκεκριμένη μορφή τάσης δε χρησιμοποιείται αυτούσια μόνο για τη διεξαγωγή δοκιμών, αλλά εφαρμόζεται και στα πρώτα στάδια παραγωγής άλλων μορφών υψηλής τάσης, όπως η συνεχής και η κρουστική, μιας και η Ε.Υ.Τ είναι πάντοτε η τάση εισόδου στις διατάξεις παραγωγής συνεχών και κρουστικών υψηλών τάσεων.

Στην τεχνολογία των Ε.Υ.Τ η επικρατούσα μορφή τάσεως που συναντάται κατά κόρον στις εφαρμογές, είναι η *ημιτονοειδής*. Εκτός από τη γνώση της ενεργού τιμής της εναλλασσόμενης τάσεως (U_{rms} ή απλώς U), ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει και η γνώση της μέγιστης τιμής της (U_{peak}) στον τομέα των υψηλών τάσεων. Ο ορισμός της ενεργού (ή ενδεικνύμενης) τιμής της εναλλασσόμενης τάσεως είναι:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (7)$$

και στην περίπτωση που η τάση είναι καθαρά ημιτονοειδής, η εξίσωση (7) δίνει:

$$U = \frac{U_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

Η ονομαστική τιμή της τάσης δοκιμής ορίζεται από τη σχέση (8). Μια ημιτονοειδής εναλλασσόμενη υψηλή τάση, συνήθως βιομηχανικής συχνότητας, που παράγεται εντός εργαστηρίου υψηλών τάσεων, προκειμένου να γίνει αποδεκτή για δοκιμές, θα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές της IEC, μία εκ των οποίων είναι η τιμή του πλάτους U_m να μην υπερβαίνει το $\pm 5\%$ του γινομένου $\sqrt{2} U_m$ [2], [3]. Επίσης, η αρμονική παραμόρφωση και, δη, η ενεργός τιμή των αρμονικών συνιστωσών να μην υπερβαίνει το $\pm 5\%$ της ενεργού τιμής της θεμελιώδους.

Μετασχηματιστές δοκιμών

Η εργαστηριακή παραγωγή των Ε.Υ.Τ. γίνεται συνήθως με τη χρήση των μετασχηματιστών δοκιμών [6], [7], [11]–[19]. Κύρια χαρακτηριστικά των Μ/Σ δοκιμών είναι:

- Υψηλοί λόγοι μετασχηματισμού. Για παράδειγμα, Μ/Σ δοκιμών των 500kV κατασκευάζονται με τάση πρωτεύοντος λίγων εκατοντάδων Volts.
- Περιορισμένη ισχύς. Η ικανότητα φόρτισης στην πλευρά της υψηλής τάσης κυμαίνεται από ένα έως μερικά amperes.
- Αντοχή σε βραχυκυκλώματα, καθώς, διάσπαση των υπό εξέταση δοκιμών μπορεί να συμβαίνει συχνά.

Οι Μ/Σ δοκιμών, αν και βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας με της κοινούς Μ/Σ ισχύος, παρουσιάζουν ορισμένες βασικές διαφορές ως προς την κατασκευή και τη λειτουργία τους, παρά το γεγονός ότι, από άποψη θερμικής συμπεριφοράς, ισχύος εξόδου και βασικού σχεδιασμού του πυρήνα σιδήρου και των τυλιγμάτων, δεν υπάρχει πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ τους.

Η απαίτηση για χαμηλή αρμονική παραμόρφωση της υψηλής τάσης εξόδου του Μ/Σ δοκιμής, οδηγεί σε κατασκευή πυρήνων σιδήρου μεγαλύτερης διατομής για περιορισμό της μαγνητικής επαγωγής ($< 10\text{kG}$), επομένως και περιορισμό των υπερβολικά υψηλών ρευμάτων μαγνήτισης, τα οποία θα προκαλούσαν υψηλότερες αρμονικές στον ρυθμιστή τάσης που τροφοδοτεί τον μετασχηματιστή. Όσον αφορά τα τυλίγματα, λόγω πιθανών συχνών διασπάσεων των δοκιμών, τα εμφανιζόμενα βραχυκυκλώματα προκαλούν ισχυρά μεταβατικά φαινόμενα και μηχανικές καταπονήσεις στα τυλίγματα του Μ/Σ δοκιμών. Προκειμένου να αποφευχθούν τοπικές καταπονήσεις, απαιτείται η καλύτερη δυνατή κατανομή δυναμικού στα τυλίγματα. Γι' αυτόν τον λόγο, η περιέλιξη των τυλιγμάτων υλοποιείται σε στρώσεις, των οποίων το μήκος είναι αντιστρόφως ανάλογο της διατομής τους, έτσι ώστε η χωρητικότητα μεταξύ των στρωμάτων να διατηρείται σταθερή και οι μεταβατικές υπερτάσεις να ισοκατανέμονται σε αυτά. Επίσης, το τύλιγμα υψηλής του Μ/Σ δοκιμών θα πρέπει να διαθέτει πολύ καλή μόνωση, ικανή να αντέχει όχι μόνο στην

ονομαστική τάση λειτουργίας του Μ/Σ, αλλά και στις ισχυρές μεταβατικές υπερτάσεις που προκαλούνται στα τυλίγματα λόγω διασπάσεων στα δοκίμια.

Ανάλογα με τον τρόπο και τη στάθμη μόνωσης των τυλιγμάτων τους οι Μ/Σ δοκιμών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε *αέρος* και *ελαίου*. Οι αέρος έχουν μικρότερο βάρος, δε χρειάζονται μονωτήρες διελεύσεως, όμως παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε σκόνη και υγρασία, ενώ οι ελαίου έχουν τα τυλίγματά τους εντός μεταλλικού δοχείου πληρωμένου με μονωτικό έλαιο, διαθέτουν μονωτήρες διελεύσεως και έχουν τη δυνατότητα απαγωγής της θερμότητας.

Συνοπτικά, οι Μ/Σ δοκιμών διαφέρουν από τους Μ/Σ ισχύος ως προς τα εξής:

1. Είναι συνήθως μονοφασικοί.
2. Έχουν μικρή ονομαστική ισχύ.
3. Η χρήση τους είναι μόνο για δοκιμές, ενώ οι Μ/Σ ισχύος έχουν συνεχή λειτουργία στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Η τάση εξόδου μπορεί να μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι την ονομαστική τιμή του τυλίγματος υψηλής, ενώ στους Μ/Σ ισχύος η τάση εξόδου είναι σταθερή.
5. Η μόνωσή τους προορίζεται να αντέχει κυρίως στη μέγιστη τάση λειτουργίας και στις ενδεχόμενες μεταβατικές υπερτάσεις λόγω διάσπασης των δοκιμών, διότι δεν υφίστανται τις ισχυρές καταπονήσεις που συναντώνται στους Μ/Σ ισχύος.
6. Ο πυρήνας τους κατασκευάζεται με μεγαλύτερη διατομή από τον αντίστοιχο των Μ/Σ ισχύος, με σκοπό τον περιορισμό της πυκνότητας ροής και, συνεπώς, την εξάλειψη της παραμόρφωσης της τάσης εξόδου από τα ισχυρά ρεύματα μαγνήτισης.

Συνεπώς ένας μονοφασικός Μ/Σ δοκιμών μπορεί να συγκριθεί με τη δομή ενός Μ/Σ τάσης που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση τάσης και ισχύος στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

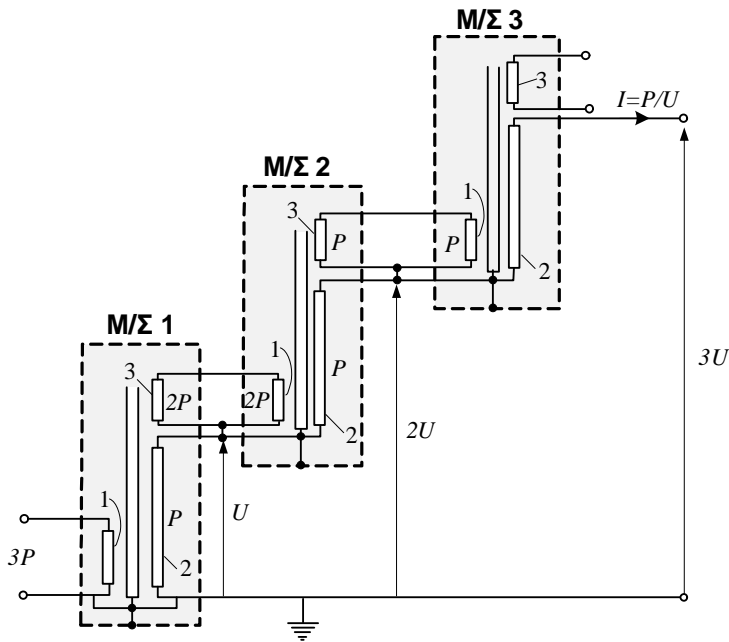
Σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις της δοκιμής σε τάση δεν ξεπερνούν την τιμή των 500kV, ή ακόμη και των 750kV ανάλογα με το μέγεθος και την τεχνολογία του εργαστηρίου, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις δοκιμές μία και μόνη βαθμίδα Μ/Σ δοκιμών. Οι διατάξεις Μ/Σ δοκιμής, που διατίθενται σήμερα στο εμπόριο, διακρίνονται, με βάση την τάση εξόδου και την ισχύ τους (kVA), σε δύο μεγάλες κατηγορίες: α) Τις φορητές ή μεταφερόμενες διατάξεις, των οποίων η τάση εξόδου φθάνει τα 100kV και η ισχύς τους κυμαίνεται από 1 έως και 5kVA και β) τις μεγαλύτερες και σταθερές διατάξεις, οι οποίες λειτουργούν με τάση εξόδου 250kV–300kV και των οποίων η ισχύς μπορεί να φθάσει και τα 100kVA. Οι Μ/Σ δοκιμών της πρώτης κατηγορίας, οι οποίοι είναι και οι πιο συνήθεις, έχουν ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση της τάξης του 5%. Το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. διαθέτει τέσσερις Μ/Σ δοκιμών των 100kV, 5kVA, έναν των 30kV, 60kVA, έναν των 130kV, 260kVA και έναν των 500kV, 50kVA.

Συνήθως, όταν απαιτούνται τάσεις δοκιμών άνω των 500kV, τότε, αντί της συμπαγούς και σταθερής διάταξης Μ/Σ, προτιμάται η βαθμίδωση των μετασχηματιστών δοκιμών, με προφανές το πλεονέκτημα της εύκολης μετακίνησης

και συναρμολόγησης πολλών μονών βαθμίδων. Στην κατηγορία πολυβάθμιων Μ/Σ δοκιμών όπου η κάθε βαθμίδα τροφοδοτείται από την προηγούμενη, κάθε μονή βαθμίδα, εκτός από τα δύο κύρια τυλίγματα, διαθέτει και ένα *τριτεύον τύλιγμα διέγερσης* στην πλευρά της υψηλής τάσης, ονομαστικής τάσης 220V–240V, όταν πρόκειται για μονοφασικούς Μ/Σ. Η συνδεσμολογία μεταξύ των μονών βαθμίδων πραγματοποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε, το τριτεύον τύλιγμα της προηγούμενης βαθμίδας (πλευρά υψηλής) να συνδέεται με το πρωτεύον τύλιγμα της επόμενης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.

Οι πολυβάθμιοι Μ/Σ δοκιμών είναι οι δεσπόζουσες διατάξεις δοκιμών υπό Ε.Υ.Τ. σε όλα τα μεγάλα εργαστήρια υψηλών τάσεων στη σημερινή εποχή. Μειονέκτημα των πολυβάθμιων διατάξεων είναι η βαριά φόρτιση των πρωτευόντων τυλιγμάτων στις κατώτερες βαθμίδες, όπως επίσης και η υψηλή τιμή εσωτερικής σύνθετης αντίστασης που παρουσιάζουν. Στην περίπτωση ενός πολυβάθμιου Μ/Σ δοκιμών, οι ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις των επιμέρους μονών βαθμίδων δεν προστίθενται αλγεβρικά, όπως θα περίμενε κανείς, αλλά η τιμή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του συνολικού συνδυασμού των βαθμίδων προκύπτει με κάπως πιο περίπλοκο τρόπο [18.] Ενδεικτικά, σε μια ομάδα μονοβάθμιων Μ/Σ δοκιμής με τιμή ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης 2,5% εκάστου, η σύνδεση δύο μονοβάθμιων αποφέρει σύνθετη αντίσταση 8% και η σύνδεση τριών, περίπου 23%.

Τέλος, αναφορικά με τη ρύθμιση της τιμής της τάσεως στο τύλιγμα χαμηλής των Μ/Σ δοκιμών, για Μ/Σ μερικών kVA αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω *ρυθμιζόμενων ωμικών αντιστάσεων* με χαμηλό κόστος, ευκολία στη χρήση και χαμηλή αρμονική παραμόρφωση, αλλά με υψηλές απώλειες Joule, είτε με χρήση μικρών *αυτομετασχηματιστών* (AM/Σ ή Variac). Για Μ/Σ όμως ισχύος δεκάδων kVA και υψηλής φόρτισης, λόγω δοκιμών υψηλής χωρητικότητας, οι απλοί AM/Σ κρίνονται ακατάλληλοι για τον έλεγχο της τάσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται *επαγωγικοί ρυθμιστές* (induction regulators) για τον έλεγχο της τάσης στο τύλιγμα χαμηλής [17]. Αυτές οι διατάξεις είναι παρόμοιες στη σχεδίαση με τους επαγωγικούς κινητήρες τυλιγμένου δρομέα, αλλά ουσιαστικά είναι μετασχηματιστές, των οποίων η τάση εξόδου μεταβάλλεται με περιστροφή του δευτερεύοντος τυλίγματός της σε σχέση με το πρωτεύον τους. Ο στάτης (πρωτεύον) μεταφέρει το ρεύμα, ενώ ο ρότορας (δευτερεύον) συνδέεται μεταξύ της κύριας τροφοδοσίας και του πρωτεύοντος του Μ/Σ δοκιμών. Τέτοια διάταξη διαθέτει το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. για τον έλεγχο της τάσης του Μ/Σ δοκιμών των 500kV.



Σχήμα 5: Κύκλωμα τριβάθμιου Μ/Σ δοκιμών. (1) Πρωτεύον τύλιγμα, (2), Δευτερεύον τύλιγμα, (3) Τριτεύον τύλιγμα διέγερσης.

Παράλληλη επαγωγική αντιστάμιση, εν σειρά κυκλώματα συντονισμού και εναλλακτικές μέθοδοι παραγωγής E.Y.T.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη λειτουργία των Μ/Σ δοκιμών, και μάλιστα αρκετά έντονο σε πολλές περιπτώσεις, είναι η εμφάνιση υψηλών αρμονικών στην τάση εξόδου, οι οποίες προκαλούν σοβαρή παραμόρφωση της τάσης. Ειδικότερα, στην περίπτωση των πολυβάθμιων Μ/Σ, οι Μ/Σ αποτελούν, κατά μείζονα λόγο, κατανεμημένα κυκλώματα που είναι δυνατόν να ταλαντώνονται. Οι πιθανές αρμονικές που περιέχονται στην τάση τροφοδοσίας του πρωτεύοντος, καθώς και οι αρμονικές που δημιουργούνται στο εσωτερικό του μετασχηματιστή από το ρεύμα μαγνήτισης λόγω της μη γραμμικής μαγνητικής συμπεριφοράς, ενισχύονται πολύ από αυτές τις ταλαντώσεις. Η μη λήψη μέτρων καταστολής των αρμονικών σε αυτές τις περιπτώσεις, έχει ως αποτέλεσμα την έντονη παραμόρφωση της υψηλής τάσεως εξόδου του μετασχηματιστή, έτσι ώστε να μην πληροί τα κριτήρια για εφαρμογή της σε δοκιμές ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού.

Μία λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η *επαγωγική αντιστάθμιση*, με σύνδεση επαγωγέα παράλληλα προς το δοκίμιο, το οποίο στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων δοκιμών υπό υψηλή τάση, παρουσιάζει έντονη χωρητική συμπεριφορά. Με την επαγωγική αντιστάθμιση επιτυγχάνεται δραστική μείωση στα πλάτη των αρμονικών, έως και πλήρης εξάλειψή τους από την τάση εξόδου, και παράλληλα βελτιώνεται η τιμή του συντελεστή ισχύος. Η σύνδεση των επαγωγέων γίνεται συνήθως στην πλευρά υψηλής τάσης (παράλληλα στο δοκίμιο), σε μερικές όμως περιπτώσεις μπορούν να συνδεθούν στην πλευρά του πρωτεύοντος τυλίγματος [18].

Ένα φαινόμενο που εμφανίζεται συχνά στους Μ/Σ δοκιμών, υπό χωρητική φόρτιση, είναι η σημαντική αύξηση της τάσης εξόδου του Μ/Σ και μάλιστα πολύ πάνω από την αναμενόμενη τιμή (*φαινόμενο Ferranti*). Γι' αυτό το φαινόμενο ευθύνεται, κατά κύριο λόγο, η εν σειρά σύνδεση της ισοδύναμης επαγωγικής

αντίδρασης των δύο τυλιγμάτων του M/Σ με τη χωρητικότητα του δοκιμίου στο κύκλωμα της διάταξης δοκιμής. Η αύξηση αυτή, με ανάλογη τιμή της επαγωγικής αντίδρασης, μπορεί να φθάσει και το 30%.

Σε περίπτωση που η ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση από τα τυλίγματα του M/Σ και από τον ρυθμιστή τάσεως του πρωτεύοντος (L) γίνει ίση με την ισοδύναμη χωρητική αντίδραση του δοκιμίου, των μονωτήρων διέλευσης και της ενισχυμένης μόνωσης του M/Σ (C), δηλαδή $\omega L=1/\omega C$, τότε συμβαίνει τυχαίος *συντονισμός* στο κύκλωμα του M/Σ . Το φαινόμενο αυτό μπορεί να είναι άκρως επικίνδυνο στη συχνότητα τροφοδοσίας, μιας και μπορεί να δώσει τάση δευτερεύοντος 20 φορές την αναμενόμενη. Αυτό έχει προκαλέσει ορισμένες βίαιες εκρήξεις κατά τον έλεγχο καλωδίων [6].

Αρμονικές οι οποίες περιέχονται στην τάση τροφοδοσίας του πρωτεύοντος, είτε αναπτύσσονται από το ρεύμα μαγνήτισης στο μαγνητικό κύκλωμα του σιδηρού πυρήνα του M/Σ , μπορούν να διεγείρουν ταλαντώσεις σε διάφορες συχνότητες, οι οποίες οδηγούν σε σοβαρότατη παραμόρφωση και, ταυτόχρονα, ανύψωση της τάσης εξόδου του δευτερεύοντος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μπορεί να συμβεί συντονισμός από μία αρμονική ή και περισσότερες αρμονικές συνιστώσες. Αυτού του είδους οι συντονισμοί δεν είναι τόσο καταστρεπτικοί, αλλά προκαλούν μεγαλύτερη διαταραχή τάσης (παραμόρφωση) απ' ό,τι άλλα φαινόμενα, αφού και η 13^η αρμονική μπορεί να δώσει μια κυμάτωση της τάξης του 5% στην κυματομορφή της τάσης.

Τα εν σειρά κυκλώματα συντονισμού προέκυψαν ως μέσο αντιμετώπισης αυτών των τυχαίων και ανεπιθύμητων συντονισμών. Με τις εν σειρά διατάξεις, μάλιστα, ο συντονισμός αρμονικών ελέγχεται στη θεμελιώδη συχνότητα, οπότε αποκλείεται η εμφάνιση οποιουδήποτε ανεπιθύμητου συντονισμού, οι δε αρμονικές εξασθενούν αποτελεσματικά.

Στην πορεία το φαινόμενο του συντονισμού στις διατάξεις των M/Σ δοκιμών αξιοποιήθηκε για την παραγωγή, ακριβώς, πολύ υψηλών τάσεων. Έτσι, με την προσθήκη ενός επαγωγέα ρυθμιζόμενης τιμής εν σειρά με το δοκίμιο και την επίτευξη συνολικής τιμής L' , ώστε το κύκλωμα να φθάσει σε συντονισμό, επιτυγχάνεται η παραγωγή πολύ υψηλής τάσης στους ακροδέκτες εξόδου του M/Σ δοκιμών. Ο συντελεστής ποιότητας του κυκλώματος ($Q=\omega L'/R=1/\omega CR$) φανερώνει το μέγεθος του πολλαπλασιασμού της τάσης κατά μήκος του δοκιμίου σε συνθήκες συντονισμού.

Διατάξεις εν σειρά κυκλωμάτων συντονισμού για την παραγωγή υψηλών τάσεων αποτελούν:

1. Ο M/Σ συντονισμού: Αν η τιμή της επαγωγικής αντίδρασης του μεταβλητού επαγωγέα ρυθμιστεί έτσι, ώστε να προσαρμόζεται απόλυτα στη χωρητική αντίδραση του δοκιμίου, τότε μπορεί να παραχθεί υψηλή τάση με τη χρήση μόνο ενός επαγωγικού πηνίου. Ένα τέτοιο πηνίο ονομάζεται M/Σ συντονισμού, το οποίο είναι ένα απλό μεταβλητό πηνίο, δίχως να έχει δύο διακριτά τυλίγματα μαγνητικώς συζευγμένα μέσω σιδηρού πυρήνα.
2. Το πηνίο *Ruhmkorff*: Αυτό αποτελείται από δύο συζευγμένα πηνία τυλιγμένα σε ανοικτό πυρήνα, εν σειρά με μια αντίσταση R και ένα διακόπτη, στα άκρα του οποίου συνδέεται παράλληλα μια χωρητικότητα.

3. Το πηνίο *Tesla*: Αυτό είναι παρόμοιο με το πηνίο *Ruhmkorff*, με τη διαφορά ότι τα δύο πηνία συντονίζονται από δύο ξεχωριστές χωρητικότητες, μία για το κάθε πηνίο και περιλαμβάνει και ένα σπινθηριστή διακένου. Τα δύο πηνία είναι επίσης ανοικτού πυρήνα, τυλιγμένα γύρω από μονωτικό καλούπι και εμβαπτισμένα σε έλαιο. Το πηνίο *Tesla* χρησιμοποιείται για την παραγωγή υψηλής τάσης αποσβεννυμένων ταλαντώσεων σε υψηλή συχνότητα. Δοκιμές ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού που γίνονταν με τέτοιου είδους τάσεις, πραγματοποιούνται σήμερα με εφαρμογή κρουστικών υψηλών τάσεων μεγάλης διάρκειας.

Μέτρηση *E.Y.T.*

Η μέτρηση των *E.Y.T.* μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις κάτωθι διατάξεις:

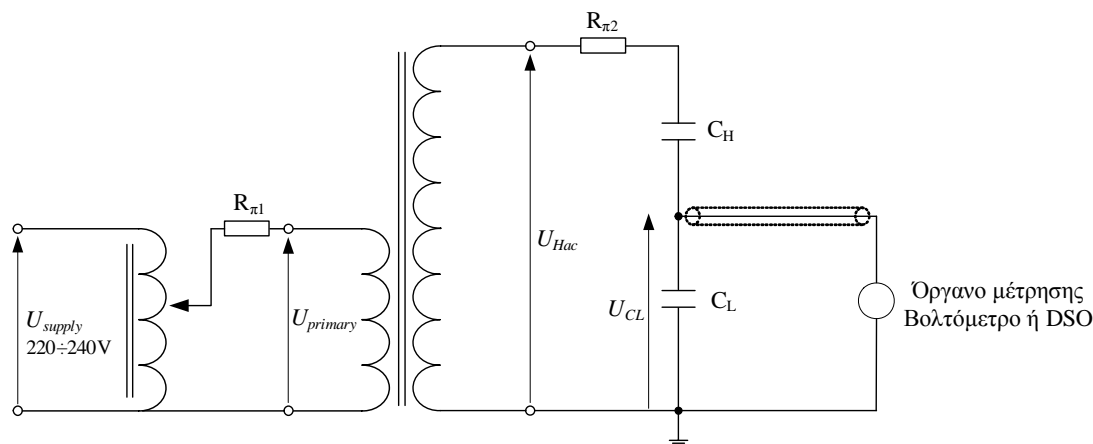
1. Σπινθηριστή σφαιρών.
2. Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο.
3. Καταμεριστές τάσεως (χωρητικοί και χωρητικοί με απόσβεση).
4. Μετασηματιστές τάσεως (επαγωγικοί και χωρητικοί).
5. Χωρητικότητα εν σειρά με μιλλιαμπερόμετρο.
6. Μέθοδος Chubb-Fortescue (Βολτόμετρο μεγίστου) για τη μέτρηση της μέγιστης τιμής της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης. Περιλαμβάνει χωρητικότητα εν σειρά με διάταξη αντιπαράλληλων διόδων και μιλλιαμπερόμετρο για τη μέτρηση της έντασης του ανορθωμένου ρεύματος.
7. Μέθοδος Boeck (παραλλαγή της Chubb-Fortescue) για τη μέτρηση της μέγιστης τιμής της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης.
8. Μέθοδος Bowdler για τη μέτρηση της μέγιστης τιμής της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης, η οποία περιλαμβάνει χωρητικό καταμεριστή και ανορθωτικές διατάξεις.

Κύκλωμα παραγωγής και μέτρησης *E.Y.T.*

Το πιο απλό κύκλωμα που μπορεί να πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο για την παραγωγή, αλλά και τη μέτρηση, εναλλασσομένων υψηλών τάσεων, το οποίο υλοποιείται και στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση, εικονίζεται στο σχήμα 6. Σημειώνεται ότι, οι πυκνωτές C_H και C_L είναι οι χωρητικότητες υψηλής και χαμηλής τάσης, αντίστοιχα, του χωρητικού καταμεριστή, οι αντιστάσεις $R_{\pi 1}$ και $R_{\pi 2}$ είναι αντιστάσεις προστασίας, ενώ το όργανο μέτρησης (βολτόμετρο ή ψηφιακός παλμογράφος) συνδέεται στον καταμεριστή μέσω ομοαξονικού καλωδίου κυματικής σύνθετης αντίστασης Z .

Ο λόγος καταμερισμού του χωρητικού καταμεριστή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{U_{Hac}}{U_{CL}} = \frac{Z_H + Z_L}{Z_L} \Rightarrow K_C = \frac{C_H + C_L}{C_H} \quad (9)$$



Σχήμα 6: Διάταξη παραγωγής και μέτρησης εναλλασσομένων υψηλών τάσεων.

3.2 Συνεχής Υψηλή Τάση (HVDC)

3.2.1. Εφαρμογές

Αν και η εναλλασσόμενη υψηλή τάση είναι η κυρίαρχη μορφή τάσης στον τομέα της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα, εντούτοις, η ιδέα της χρήσης συνεχούς υψηλής τάσης (Σ.Υ.Τ.) στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δεν εγκαταλείφθηκε ποτέ. Η πρόοδος στην τεχνολογία των μετασχηματιστών, η εφαρμογή ατμοστροβίλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η τεχνολογική εξέλιξη των διακοπών ισχύος, έδωσαν σημαντική ώθηση και προβάδισμα στην εναλλασσόμενη τάση για τη μεταφοράς της ενέργειας [6], [11]. Ωστόσο, η μεταφορά με Σ.Υ.Τ. από εναέριες γραμμές, υποθαλάσσια καλώδια και από εγκαταστάσεις τύπου πλάτη-με-πλάτη (back-to-back) παρέχει μία πολύ καλή εναλλακτική λύση για μαζική μεταφορά τεράστιας ποσότητας ισχύος. Η χρήση Σ.Υ.Τ. στις γραμμές μεταφοράς επιτρέπει τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις και αυτό γιατί είναι πιο οικονομικές στην κατασκευή, δεν αναπτύσσονται χωρητικά ρεύματα, εμφανίζουν μικρότερες πτώσεις τάσεως και μικρότερες απώλειες ισχύος.

Η πρώτη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, υπό συνεχή τάση, πραγματοποιήθηκε από τον Marcel Deprez το 1882, ο οποίος κατάφερε να μεταφέρει ηλεκτρική ισχύ 1,5kW υπό τάση 2kV σε μια απόσταση 35 μιλίων. Έκτοτε συνεχίστηκαν οι προσπάθειες αύξησης της μεταφερόμενης ισχύος και σε μεγαλύτερες αποστάσεις, με χαρακτηριστικότερη την περίπτωση του Thury, ο οποίος το 1889 κατάφερε να μεταφέρει 20MW υπό τάση 125kV από Moutiers στη Lyon, σε απόσταση 230km [20]. Η πρώτη υποβρύχια καλωδιακή γραμμή συνεχούς υψηλής τάσης ήταν η σύνδεση υπό τάση 100kV μεταξύ Σουηδίας και του νησιού Gotland το 1954. Σήμερα, στην Κίνα λειτουργεί εναέρια γραμμή UHVDC $\pm 800\text{kV}$, μήκους 2.383km και ικανότητας 8GW, μεταφέροντας ενέργεια παραγόμενη εξ ολοκλήρου από αιολικά και ηλιακά πάρκα, ενώ εντός του 2018 θα τεθεί σε λειτουργία εναέρια γραμμή UHVDC $\pm 1100\text{kV}$, μήκους 3.400km και ικανότητας 12GW.

Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η Σ.Υ.Τ έναντι της Ε.Υ.Τ., στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι τα εξής:

1. Χαμηλότερο κόστος κατασκευής των εναέριων γραμμών λόγω μικρότερου πλήθους αγωγών και χαμηλότερες απώλειες απ' ότι στις ισοδύναμες AC εναέριες γραμμές.
2. Η ικανότητα μεταφοράς μιας εναέριας γραμμής DC συγκεκριμένου μήκους είναι σαφώς μεγαλύτερη από την ισοδύναμη AC. Επιπλέον, η γωνία φορτίου θέτει περιορισμούς στην ανά μονάδα τιμή της εν σειράς επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής, άρα και στο μήκος της, με αποτέλεσμα να χρειάζονται ενδιάμεσοι σταθμοί διασύνδεσης με διατάξεις αντιστάθμισης. Επειδή στο συνεχές ρεύμα δεν υφίστανται τα μεγέθη της αυτεπαγωγής και της χωρητικότητας, η μεταφορά υπό συνεχή υψηλή τάση ενδείκνυται για πολύ μεγάλες αποστάσεις, χωρίς ενδιάμεσες λήψεις και ενδιάμεσους σταθμούς διασύνδεσης [20].
3. Τα καλώδια υψηλής τάσης παρουσιάζουν χαμηλή τιμή αυτεπαγωγής και υψηλή τιμή χωρητικότητας προς γη, με αποτέλεσμα επικίνδυνη ανύψωση της τάσης κατά μήκος του καλωδίου και στην άφιξή του. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερο στα υποθαλάσσια καλώδια μεγάλων αποστάσεων λόγω της πολύ ενισχυμένης μόνωσής τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μεταφορά με Σ.Υ.Τ. είναι επιβεβλημένη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στον ελλαδικό χώρο αποτελεί η διασύνδεση Ελλάδας – Ιταλίας με υποβρύχιο καλώδιο 400kV DC.
4. Η ροή ισχύος σ' ένα σύστημα DC μπορεί να ελεγχθεί εύκολα και με υψηλή ταχύτητα, οπότε με τον κατάλληλο έλεγχο, μια DC σύνδεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ευστάθειας των AC συστημάτων.
5. Μεταφορά ισχύος και σταθεροποίηση τάσης μεταξύ AC συστημάτων που είναι μη συγχρονισμένα.
6. Διασύνδεση συστημάτων AC που λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα τάσης και συχνότητας.
7. Αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος και βελτίωση της αξιοποίησης του συστήματος μεταφοράς, με την ανάπτυξη των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς (Flexible AC Transmission Systems-FACTS) τα οποία στηρίζονται σε πρόσφατα αναπτυσσόμενα ηλεκτρονικά στοιχεία υψηλής ισχύος όπως είναι τα «GTOs» και τα «IGBTs». Αυτές οι διατάξεις λειτουργούν υπό συνεχή υψηλή τάση, βελτιώνοντας και κάνοντας πιο άμεσο τον έλεγχο της τάσης και της ισχύος του συστήματος μεταφοράς.

Οι Σ.Υ.Τ. παρουσιάζουν και μειονεκτήματα στη χρήση τους για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία αφορούν κυρίως τη μετατροπή και τα διακοπτικά στοιχεία. Το κόστος και οι απώλειες στα διακοπτικά στοιχεία και στους τερματικούς σταθμούς των γραμμών DC είναι υψηλότερο από τα αντίστοιχα στο AC. Η μετατροπή της εναλλασσόμενης σε συνεχή τάση και το αντίστροφο, συνοδεύονται από ένα όριο υπερφόρτισης. Όσον αφορά στις μικρές και μεσαίες αποστάσεις μεταφοράς, οι απώλειες στους μετατροπείς ισχύος στο DC είναι αρκετά μεγαλύτερες απ' ότι σε μια γραμμή Ε.Υ.Τ. Τέλος, υπάρχει μεγάλη δυσκολία στον σχεδιασμό και στην κατασκευή διακοπών ισχύος Σ.Υ.Τ., λόγω των εξαιρετικά μεγάλων τόξων που δημιουργούνται σε αυτούς κατά τους χειρισμούς ζεύξης και απόζευξης.

Όπως προαναφέρθηκε, η εξέλιξη στην τεχνολογία των υλικών και των διατάξεων των υψηλών τάσεων είναι αλματώδης, με αποτέλεσμα οι παραπάνω δυσκολίες να υπερνικούνται και η κατασκευή UHVDC γραμμών τεραστίων αποστάσεων να είναι πια γεγονός στη σύγχρονη ιστορία των γραμμών μεταφοράς.

Όπως οι Ε.Υ.Τ. έτσι και οι Σ.Υ.Τ., εκτός από την εφαρμογή τους στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, βρίσκουν εφαρμογή και σε άλλους τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας, όπως:

- Στις δοκιμές καλωδίων Μ.Τ. και Υ.Τ για τη μέτρηση της αντίστασης του εξωτερικού μανδύα των καλωδίων [21].
- Στη δοκιμή διαφόρων μονωτικών υλικών.
- Στα ηλεκτροστατικά φίλτρα.
- Στις ηλεκτροστατικές βαφές.
- Στην παραγωγή ακτίνων Χ (ακτίνες Röntgen), κ.α.

3.2.2. Παραγωγή και μέτρηση Συνεχών Υψηλών Τάσεων στο εργαστήριο

Οι συνεχείς υψηλές τάσεις παράγονται στο εργαστήριο ως εξής:

1. Με ανόρθωση της ημιτονοειδούς εναλλασσόμενης τάσης μέσω μονοβάθμιων διατάξεων, γεφυρών ανόρθωσης και διατάξεων πολλαπλασιασμού της τάσης.
2. Με ηλεκτροστατικές γεννήτριες.

Η συνεχής τάση δοκιμής U_{dc} ορίζεται από τη σχέση (10), η οποία, ουσιαστικά, ορίζει και την αριθμητική μέση τιμή της ανορθωμένης κυματομορφής $u(t)$ [2]:

$$U_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (10)$$

Επειδή οι συνεχείς υψηλές τάσεις δοκιμής, όπως και όλες σχεδόν οι συνεχείς τάσεις που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ισχύος και ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας, προέρχονται από μονοφασική ή τριφασική ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης, η κυματομορφή της τάσης που προκύπτει από ανόρθωση δεν είναι απολύτως σταθερή, αλλά ταλαντώνεται, αποκλίνοντας περιοδικά από τη μέση τιμή της (βλέπε σχήμα 7). Η περιοδική απόκλιση της στιγμιαίας τιμής της ανορθωμένης τάσης από τη μέση τιμή της U_{DC} , δηλαδή η διακύμανσή της μεταξύ μιας μέγιστης U_{max} και μιας ελάχιστης τιμής U_{min} ονομάζεται *κυμάτωση*. Το πλάτος της κυμάτωσης δU ορίζεται ως το ήμισυ της διαφοράς μεταξύ U_{max} και U_{min} [2]

$$\delta U = \frac{1}{2}(U_{max} - U_{min}) \quad (11)$$

ενώ ο *συντελεστής κυμάτωσης* (ripple factor) ορίζεται ως:

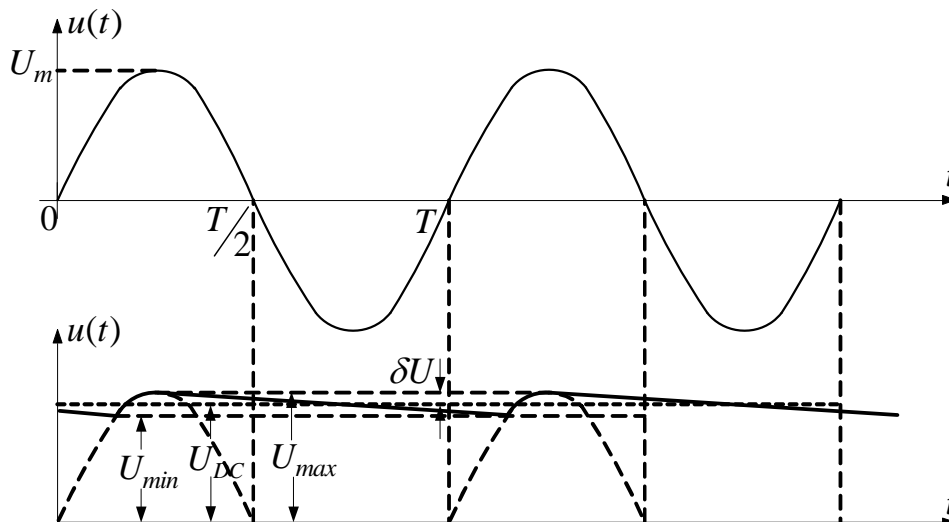
$$RF = \frac{\delta U}{U_{DC}} \quad (12)$$

Σύμφωνα με τη διεθνή τυποποίηση, για να είναι αποδεκτής μορφής για δοκιμές μια συνεχής υψηλή τάση, θα πρέπει ο συντελεστής κυμάτωσης να μην υπερβαίνει το $\pm 3\%$, ενώ για δοκιμές με διάρκεια μικρότερη από 60s η ανοχή της τιμής της τάσης είναι $\pm 1\%$.

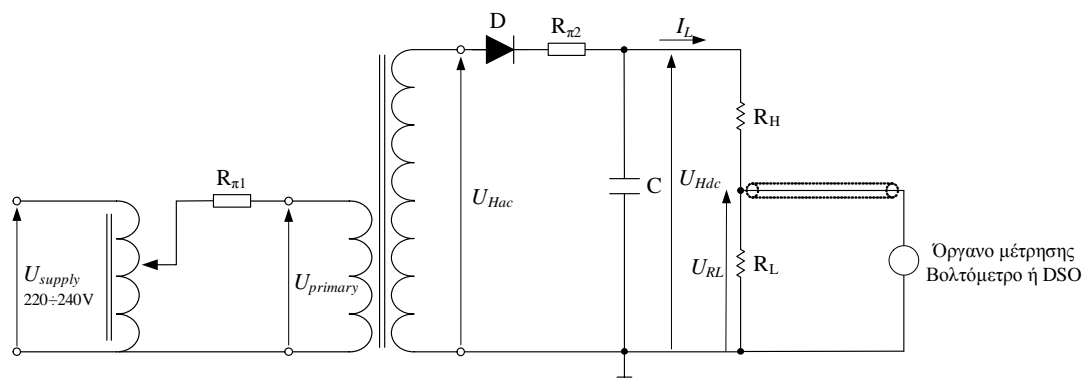
Τα παλαιότερα χρόνια η παραγωγή Σ.Υ.Τ στο εργαστήριο γινόταν με χρήση ηλεκτρονικών λυχνιών κενού, ή μηχανικών ανορθωτών με σύγχρονους κινητήρες. Με

τη ραγδαία εξέλιξη και την ολοκληρωτική διείδυση των ξηρών ημιαγωγικών στοιχείων (σελήνιο-Se, γερμάνιο-Ge, πυρίτιο-Si) στην τεχνολογία της ηλεκτρονικής, η ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος υλοποιείται με φθηνές, ελαφριές και εύκολες διατάξεις ανορθωτικών στοιχείων με μη ελεγχόμενο, ημιελεγχόμενο ή πλήρως ελεγχόμενο τρόπο, ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία (δίοδοι, θυριστορ, GTOs, IGBTs).

Η απλούστερη διάταξη παραγωγής Σ.Υ.Τ. στο εργαστήριο, η οποία θα εξετασθεί και στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση, είναι η μη ελεγχόμενη ανόρθωση μισού κύματος ή αλλιώς *απλή ανόρθωση*, η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση μίας και μόνης διόδου, όπως εικονίζεται στο σχήμα 8. Στο κύκλωμα του σχήματος συνδέεται και χωρητικότητα C για την εξομάλυνση της κυματομορφής της τάσης που προέρχεται από την ημιανόρθωση, η τιμή της οποίας καθορίζει και το ύψος της εξομάλυνσης. Στην τεχνολογία των υψηλών τάσεων συνηθίζεται, στις περιπτώσεις απλής ανόρθωσης, να συνδέονται χωρητικότητες πολύ υψηλής τιμής, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του προτύπου για τον συντελεστή κυμάτωσης της τάσης δοκιμής.



Σχήμα 7: Τάση εξόδου απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης.



Σχήμα 8: Διάταξη παραγωγής και μέτρησης συνεχών υψηλών τάσεων.

Οι σχέσεις που προκύπτουν από τα σχήματα 7 και 8 για την απλή ανόρθωση με πυκνωτή εξομάλυνσης είναι οι ακόλουθες:

$$U_{\max} = \sqrt{2}U_{Hac(rms)}, U_{DC} = U_{\max} - \delta U, U_i \approx 2\sqrt{2}U_{Hac(rms)} \quad (13)$$

όπου $U_{Hac(rms)}$ είναι η rms τιμή της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου του Μ/Σ, U_{DC} η μέση τιμή της συνεχούς υψηλής τάσης, U_i η μέγιστη ανάστροφη τάση της διόδου και δU το πλάτος κυμάτωσης το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$\delta U = \frac{I_L T}{2C} = \frac{I_L}{2fC} \quad (14)$$

με I_L τη μέση τιμή της έντασης του ρεύματος εξόδου της διάταξης και f τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας. Όπως φαίνεται από την εξίσωση (14) οι τρόποι για να μειωθεί η κυμάτωση της ανορθωμένης τάσης είναι η αύξηση της τιμής είτε της χωρητικότητας C είτε της συχνότητας f .

Άλλες ανορθωτικές διατάξεις παραγωγής Σ.Υ.Τ.

Εκτός της απλής ανόρθωσης, υπάρχουν και άλλες διατάξεις παραγωγής Σ.Υ.Τ. μέσω ανόρθωσης της εναλλασσόμενης τάσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα εργαστήρια υψηλών τάσεων. Από αυτές, άλλες πραγματοποιούν ανόρθωση χωρίς πολλαπλασιασμό της τιμής της τάσης εξόδου και άλλες ανορθώνουν και ταυτόχρονα πολλαπλασιάζουν την τιμή της τάσης εξόδου σε σύγκριση με την τάση εξόδου της απλής ανόρθωσης. Επιγραμματικά οι διατάξεις αυτές είναι:

1. Διάταξη διπλής ανόρθωσης
2. Γέφυρα Graetz
3. Διάταξη τριφασικής ανόρθωσης
4. Διάταξη Villard
5. Διάταξη Liebenow-Greinacher
6. Διάταξη Cockroft-Walton

Ανορθωτικές διατάξεις
διπλασιασμού της τάσεως.

Αν υπάρχει ανάγκη για παραγωγή πολύ υψηλής τιμής συνεχούς τάσης, η πιο συνηθισμένη διάταξη που χρησιμοποιείται για ανόρθωση και πολλαπλασιασμό της εναλλασσόμενης είναι η πολυβάθμια διάταξη Cockroft-Walton.

Ηλεκτροστατική γεννήτρια Van de Graaff

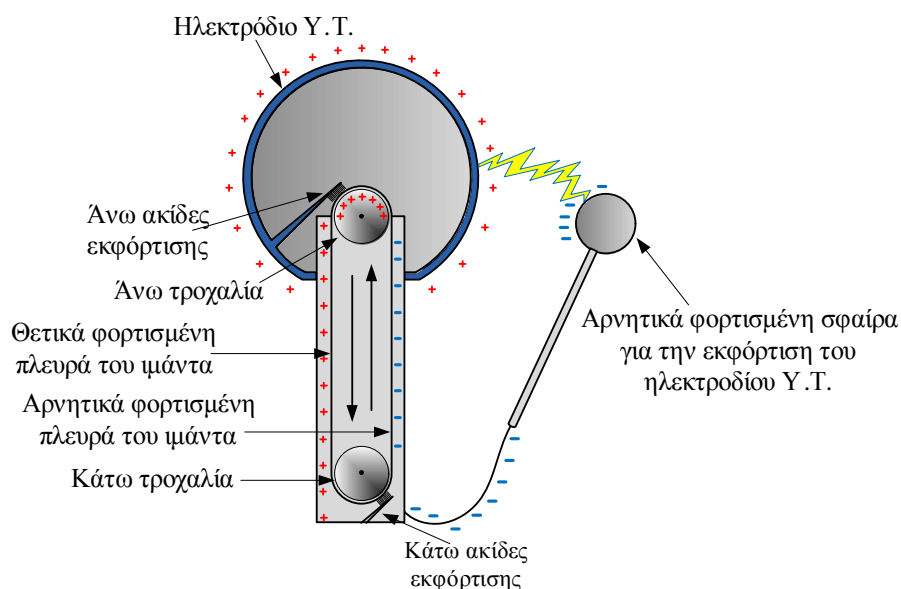
Οι ηλεκτροστατικές γεννήτριες μετατρέπουν άμεσα τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Σε αντίθεση, ωστόσο, με την ηλεκτρομαγνητική μετατροπή ενέργειας, τα ηλεκτρικά φορτία μέσα σε αυτές τις γεννήτριες κινούνται αντίθετα προς τη δύναμη ηλεκτρικών πεδίων, κερδίζοντας έτσι υψηλότερες δυναμικές ενέργειες και καταναλώνοντας μηχανική ενέργεια [6]. Όλες οι ιστορικές ηλεκτροστατικές μηχανές, όπως η τριχοειδής υδατόπτωση του Kelvin ή η μηχανή του Wimshurst, είναι πρόδρομοι των σύγχρονων γεννητριών αυτού του τύπου.

Ο Van de Graaff το 1931 παρουσίασε μια πραγματική καινοτομία στην παραγωγή Σ.Υ.Τ. με την ανάπτυξη ηλεκτροστατικών γεννητριών οδηγούμενων από ιμάντα. Οι γεννήτριες αυτού του τύπου κατασκευάζονται συνήθως για τάσεις έως το πολύ 10MV, με ελάχιστες εξαιρέσεις που μπορούν να φθάσουν και τα 25MV, αλλά για πολύ μικρές ισχύεις της τάξεως μερικών δεκάδων kW και εντάσεις βραχυκυκλώσεως

που περιορίζονται σε λιγότερο από μερικά mA για τις μεγάλες γεννήτριες. Το πλεονέκτημα αυτών είναι ότι η παραγόμενη τάση παρουσιάζει μηδενική κυμάτωση. Οι κυριότερες χρήσεις των γεννητριών Van de Graaff είναι τα ηλεκτροστατικά φίλτρα, οι ηλεκτροστατικές βαφές και οι επιταχυντές σωματιδίων κυρίως στα εργαστήρια πυρηνικής φυσικής. Το σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας με τα κύρια μέρη των γεννητριών Van de Graaff εικονίζεται στο σχήμα 9.

Πολύ συνοπτικά, η γεννήτρια αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης επαρκώς μονωμένο ως προς τη γη, το οποίο έχει λεία επιφάνεια και μεγάλη διατομή για την αποφυγή εκκενώσεων Corona. Συνήθως αυτό το ηλεκτρόδιο στηρίζεται πάνω σε κάποιον μονωτικό κύλινδρο και μπορεί να συλλέξει μεγάλες ποσότητες φορτίου παράγοντας έτσι πολύ υψηλή τάση. Μέσα στον κύλινδρο κινείται ένας ατέρμων ιμάντας από μονωτικό υλικό. Ένα ποσό φορτίου ψεκάζεται πάνω στον κινούμενο ιμάντα μέσω ακίδων εκκένωσης Corona οι οποίες είναι σε τάση περίπου 10kV ως προς γη. Ο ιμάντας, το πλάτος του οποίου μπορεί να ποικίλει, κινείται με μια ταχύτητα 15–30m/s με τη χρήση ενός κινητήρα και το φορτίο μεταφέρεται στο ανώτερο άκρο, όπου αποσπάται από τον ιμάντα μέσω ακίδων εκφόρτισης και φορτίζεται το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Ο όλος εξοπλισμός είναι συνήθως στεγασμένος μέσα σ' ένα γειωμένο μεταλλικό ταμιευτήρα γεμάτο με μονωτικό αέριο υπό υψηλή πίεση. Για απλές εφαρμογές ο μεταλλικός ταμιευτήρας μπορεί να παραλειφθεί και η μόνωση να παρέχεται μόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Η κατώτερη μονάδα ψεκασμού (βλέπε σχήμα 9) μπορεί να απαρτίζεται από ένα πλήθος ακίδων συνδεδεμένων στην ελεγχόμενη πηγή DC, έτσι ώστε η εκκένωση μεταξύ των ακίδων και του ιμάντα να συντηρείται.



Σχήμα 9: Γεννήτρια Van de Graaff.

Μια εξέλιξη της γεννήτριας Van de Graaff είναι η ηλεκτροστατική γεννήτρια τύπου Felici, η οποία διαθέτει μονωτικούς κυλινδρικούς δρομείς που μπορούν να διατηρούν απόλυτα ευσταθή κίνηση ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες. Τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και σύγχρονες ηλεκτροστατικές γεννήτριες με παρεμβαλλόμενους στάτορα και ρότορα, που σχηματίζουν ένα μεταβλητό πυκνωτή, ο οποίος λειτουργεί σε κενό.



Σχήμα 10: Γεννήτρια Van de Graaff σε λειτουργία.

Μέτρηση Σ.Υ.Τ.

Η μέτρηση των Ε.Υ.Τ μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις κάτωθι διατάξεις:

1. Σπινθηριστή σφαιρών.
2. Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο.
3. Παραγωγό (ή περιστροφικό) βολτόμετρο.
4. Ωμικοί καταμεριστές τάσεως.
5. Ωμικός αντιστάτης εν σειρά με μιλιαμπερόμετρο.

3.3 Κρουστική Υψηλή Τάση (High Impulse Voltage)

3.3.1. Εφαρμογές

Εκτός από τις εναλλασσόμενες και τις συνεχείς υψηλές τάσεις υπάρχει ακόμα μία μορφή υψηλής τάσης, η οποία συναντάται λιγότερο συχνά στην καθημερινότητα απ' ό τι οι άλλες δύο, αλλά κατέχει εξίσου σημαντική θέση στον τομέα των υψηλών τάσεων και, δη, στις δοκιμές ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού και μονωτικών υλικών.

Η τάση αυτή ονομάζεται κρουστική τάση και η κυματομορφή της χαρακτηρίζεται από μία μέγιστη τιμή κορυφής, την οποία φθάνει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα της τάξεως του μs. Ως κρουστική τάση, λοιπόν, χαρακτηρίζεται ένας μοναδιαίος και ενιαίος πολικότητας παλμός τάσης. Οι κρουστικές τάσεις χρησιμοποιούνται κατά τη διεξαγωγή τεχνικών δοκιμών υψηλών τάσεων, με στόχο την προσομοίωση των διηλεκτρικών καταπονήσεων που υφίστανται οι εγκατεστημένες στα ηλεκτρικά δίκτυα διατάξεις και στοιχεία, κατά την ανάπτυξη επί των δικτύων εσωτερικών και εξωτερικών υπερτάσεων, καθώς επίσης και κατά τη βασική έρευνα που αφορά στη μελέτη της διασπάσεως μονωτικών υλικών.

Οι κρουστικές τάσεις διακρίνονται σε δύο μεγάλες βασικές κατηγορίες:

1. Κρουστικές τάσεις μικρής διάρκειας γνωστές και ως εξωτερικές κρουστικές τάσεις ή απλώς κεραυνικές τάσεις (lightning impulses).
Αυτές προέρχονται από πλήγματα κεραυνών πάνω στους αγωγούς φάσεων των εναέριων γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, στους

ζυγούς των υπαίθριων υποσταθμών, ή ακόμα και στο έδαφος. Τα πλάτη των κεραυνικών τάσεων, οι οποίες μεταδίδονται υπό τη μορφή οδευόντων κυμάτων πάνω στις γραμμές, μπορούν να λάβουν τιμή άνω των 1000kV, ενώ η μέγιστη τιμή έντασης των κεραυνικών ρευμάτων λαμβάνει συνήθως τιμές μεταξύ 100kA και 300kA.

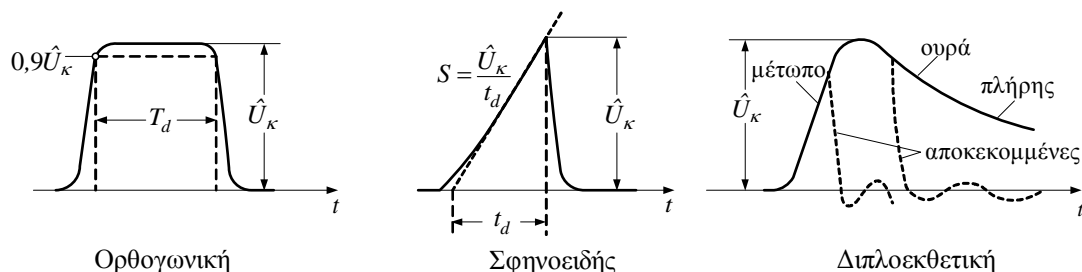
2. Κρουστικές τάσεις μεγάλης διάρκειας γνωστές και ως εσωτερικές κρουστικές τάσεις ή διακοπτικές κρουστικές τάσεις (switching impulses).

Αυτές προκαλούνται από διακοπτικά φαινόμενα και κυρίως κατά τους χειρισμούς ζεύξεως και αποζεύξεως στους διακόπτες ισχύος του συστήματος. Τα πλάτη τους σχετίζονται πάντα με την τάση λειτουργίας, την τοπολογία και την εκμετάλλευση του οικείου ΣΗΕ, η δε μορφή τους επηρεάζεται από τις σύνθετες αντιστάσεις του συστήματος, όπως επίσης και από τις συνθήκες διακοπής [6].

Τόσο η παραγωγή, όσο και κυρίως οι μετρήσεις των υψηλών κρουστικών τάσεων παρουσιάζουν σημαντικές δυσκολίες, λόγω της πολύ μικρής διάρκειας των τάσεων αυτών, συνεπεία της οποίας τα διάφορα μεταβατικά φαινόμενα μπορούν να επηρεάσουν, εισάγοντας σημαντικά σφάλματα, την ακρίβεια της μέτρησης. Κατά κανόνα οι κρουστικές τάσεις παράγονται μέσω της εκφορτίσεως πυκνωτών υψηλής τάσεως, διαμέσου σπινθηριστών εναύσεως, σε ένα κύκλωμα αντιστάσεων και χωρητικότητων.

Οι κρουστικές τάσεις, ανάλογα με την κυματομορφή τους, διακρίνονται σε ορθογωνικές, σφηνοειδείς και διπλοεκθετικές (σχήμα 11). Όλες οι κρουστικές τάσεις έχουν σαν χαρακτηριστικό μέγεθός τους την τιμή κορυφής τους \hat{U}_k . Επιπλέον, έχουν σαν χαρακτηριστικό/ά μέγεθος/η:

- οι ορθογωνικές τον χρόνο T_d κατά τον οποίο έχουν τιμή μεγαλύτερη του $90\% \hat{U}_k$
- οι σφηνοειδείς τη διάρκεια ανόδου t_d και την κλίση μετώπου S ($S = \frac{\hat{U}_k}{t_d}$)
- οι διπλοεκθετικές τον χρόνο μετώπου T_1 (ή T_f) στην περίπτωση κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας, ή τον χρόνο μεγίστου t_m στην περίπτωση κρουστικών τάσεων μεγάλης διάρκειας, και τον χρόνο ημίσεος εύρους T_2 (ή T_h).



Σχήμα 11: Μορφές κρουστικών τάσεων.

Σε ερευνητικές εργασίες συχνά χρησιμοποιούνται οι δύο πρώτες μορφές κρουστικών τάσεων, ενώ για τη διεξαγωγή δοκιμών χρησιμοποιούνται προτυποποιημένες διπλοεκθετικές κρουστικές τάσεις, οι οποίες είναι κρουστικές τάσεις με διάρκεια μετώπου της τάξης του 1μs και ημίσεος εύρους μερικές δεκάδες

μs προσομοιώνουν τις δημιουργούμενες υπερτάσεις από τους κεραυνούς, ενώ σημαντικά μεγαλύτερης διάρκειας κρουστικές τάσεις προσομοιώνουν τις υπερτάσεις που ακολουθούν τους διάφορους χειρισμούς ζεύξης και απόξευξης σε ένα δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

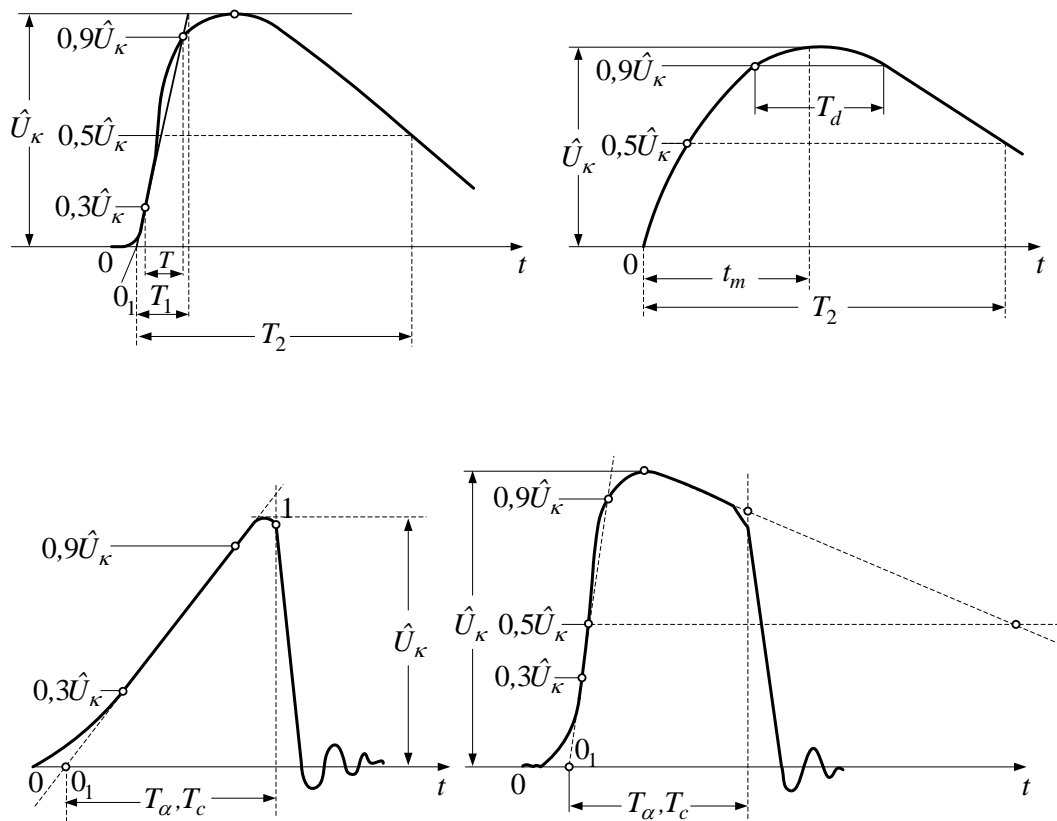
Διακρίνονται λοιπόν πλήρεις και αποκεκομμένες τάσεις (στο μέτωπο ή στην ουρά). Οι αποκεκομμένες κρουστικές τάσεις (σχήμα 11) δημιουργούνται όταν κατά τη διάρκεια επιβολής της κρουστικής τάσης συμβεί διάσπαση στο συνδεδεμένο στην κρουστική γεννήτρια δοκίμιο, ή, εν γένει, διάσπαση, είτε σκοπούμενη, είτε τυχαία, στο κύκλωμα υψηλής τάσης. Σε αυτήν την περίπτωση, εμφανίζεται απότομος μηδενισμός της τάσης, ο οποίος συνεπάγεται την εμφάνιση ταλάντωσης της τάσης (μεταβατικό φαινόμενο).

Λόγω των αναπόφευκτων υψίσυχων ταλαντώσεων που εμφανίζονται στην αρχή των κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας, για τον ορισμό του χρόνου μετώπου T_1 λαμβάνονται υπ' όψιν τα σημεία του μετώπου που βρίσκονται στο 30% και στο 90% της τιμής κορυφής. Η χρονική διαφορά T των δύο σημείων πολλαπλασιαζόμενη επί 1,67 δίνει τον χρόνο μετώπου. Η ευθεία που συνδέει τα προαναφερθέντα σημεία του 30% \hat{U}_k και 90% \hat{U}_k , ορίζει στον άξονα του χρόνου την «ονομαστική αρχή» του χρόνου θ_1 . Το σημείο στην ουρά της κρουστικής τάσης που αντιστοιχεί στο 50% \hat{U}_k , ορίζει τον χρόνο ημίσεος εύρους T_2 της κρουστικής τάσης.

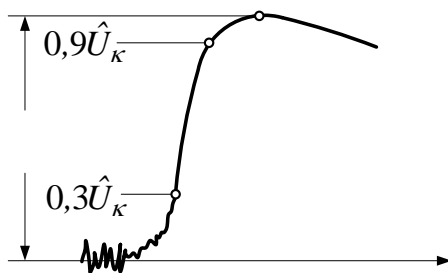
Συνήθως χρησιμοποιούνται μικρής διάρκειας (κεραυνικές) κρουστικές τάσεις χρόνου μετώπου 1,2μs και χρόνου ημίσεος εύρους 50μs, χαρακτηριζόμενες ως κρουστικές τάσεις μορφής 1,2/50μs, για τις οποίες είναι επιτρεπτές ανοχές $\pm 30\%$ στον χρόνο μετώπου και $\pm 20\%$ στον χρόνο ημίσεος εύρους, για την εν κενώ λειτουργία της γεννήτριας κρουστικών τάσεων.

Ο καθορισμός των χρονικών παραμέτρων των κρουστικών τάσεων μεγάλης διάρκειας είναι σημαντικά απλούστερος. Για τον καθορισμό του χρόνου μεγίστου (και όχι πλέον μετώπου) λαμβάνεται υπ' όψιν η πραγματική αρχή των χρόνων και το πραγματικό μέγιστο της κυματομορφής, ενώ για τον καθορισμό του ημίσεος εύρους (ουράς) ισχύουν όσα αναφέρθηκαν και στην περίπτωση κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας. Για την προσομοίωση των καταπονήσεων που δημιουργούν οι εσωτερικές υπερτάσεις χρησιμοποιείται η κυματομορφή 250/2500 μs, όπου 250 μs $\pm 20\%$ είναι ο χρόνος μεγίστου και 2500 μs $\pm 60\%$ είναι ο χρόνος ημίσεος εύρους. Συχνά, στην περίπτωση κρουστικών τάσεων μεγάλης διάρκειας, προς χαρακτηρισμό της διάρκειας του παλμού και αντί του χρόνου ημίσεος εύρους αναφέρεται η χρονική διάρκεια T_d κατά την οποία η στιγμιαία τιμή της τάσης υπερβαίνει το 90% της τιμής κορυφής (σχήμα 12β). Στην περίπτωση αποκεκομμένων κρουστικών τάσεων (σχήματα 12γ και 12δ) ως T_a και T_c ορίζονται ο χρόνος αποκοπής στις περιπτώσεις σκόπιμης και τυχαίας διάσπασης στο κύκλωμα υψηλής τάσης αντίστοιχα.

Σε περίπτωση κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας εμφανίζονται, επί της θεωρητικά διπλοεκθετικής κυματομορφής, υψίσυχνες ταλαντώσεις, των οποίων το εύρος, στην περιοχή του μεγίστου, δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει το 5% \hat{U}_k (σχήμα 13).



Σχήμα 12: Καθορισμός ονομαστικών μεγεθών διπλοεκθετικών κρουστικών τάσεων: α) Κρουστική τάση μικρής διάρκειας, β) Κρουστική τάση μεγάλης διάρκειας, γ) Αποκεκομμένη στο μέτωπο κρουστική τάση μικρής διάρκειας, δ) Αποκεκομμένη στην ουρά κρουστική τάση μικρής διάρκειας.



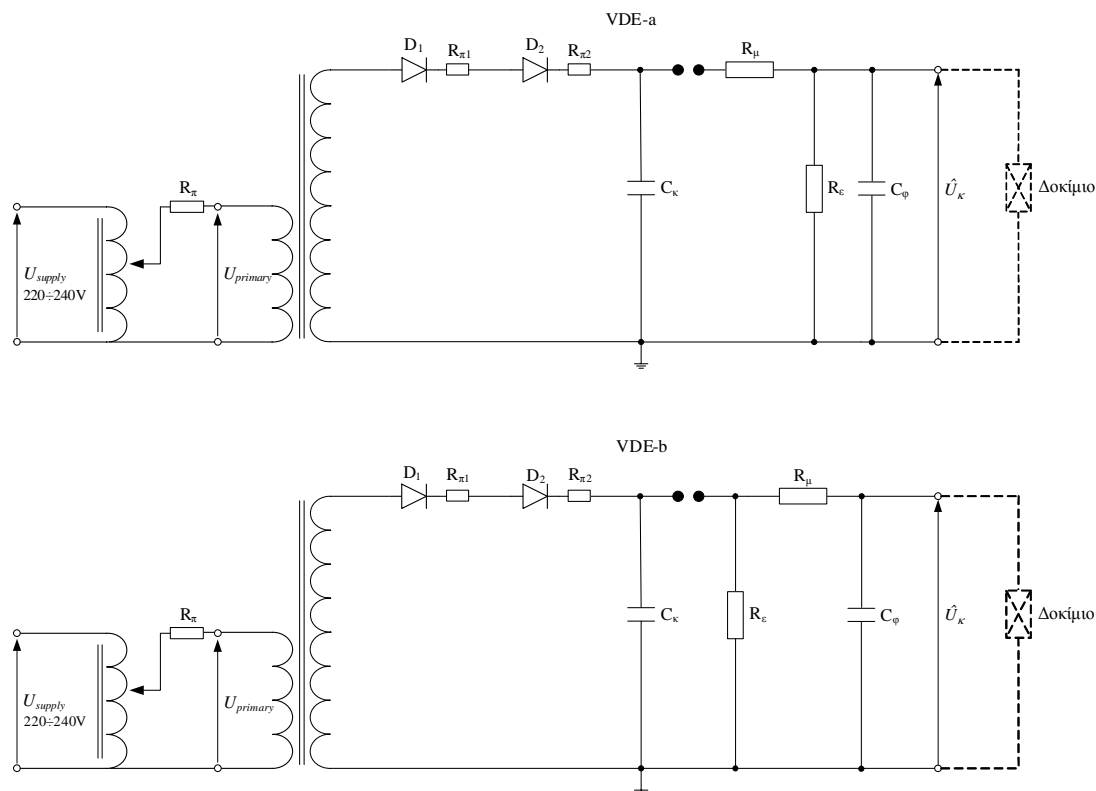
Σχήμα 13: Μέτωπο κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας προς κατάδειξη των ταλαντώσεων στην αρχή της.

Οι κρουστικές τάσεις, ιδιαίτερα οι κεραυνικές και, πιο συγκεκριμένα, η 1,2/50μs, βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε πλήθος εργαστηριακών δοκιμών, όπως για παράδειγμα:

- Για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών υλικών και, δη, ελαίων υπό κρουστική καταπόνηση [22], [23].
- Για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης και των ακροκιβωτίων καλωδίων Μ.Τ. και Υ.Τ. υπό κρουστική καταπόνηση [13]–[16].
- Για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής των Μ/Σ μέτρησης υπό κρουστική καταπόνηση [24]–[26], καθώς και σε πολλές άλλες δοκιμές.

3.2.2. Παραγωγή και μέτρηση Κρουστικών Υψηλών Τάσεων στο εργαστήριο

Η παραγωγή διπλοεκθετικών κρουστικών τάσεων, ανάλογα με το επιθυμητό εύρος αυτών, γίνεται είτε μέσω μονοβάθμιων, είτε μέσω πολυβάθμιων γεννητριών κρουστικών τάσεων. Οι μονοβάθμιες κρουστικές γεννήτριες έχουν συνήθως τη μορφή ενός εκ των δύο κυκλωμάτων κατά VDE, τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 14 (κύκλωμα VDE-a, κύκλωμα VDE-b).



Σχήμα 14: Κύκλωμα γεννήτριας κρουστικών τάσεων 1,2/50μs κατά VDE-a και VDE-b.

Το καθένα από τα δύο κυκλώματα συνίσταται από τέσσερα βασικά στοιχεία:

- τον πυκνωτή κρούσεως C_k
- τον πυκνωτή φορτίου ή (σπανιότερα) πυκνωτή μετώπου C_ϕ
- την αντίσταση αποσβέσεως ή αντίσταση μετώπου R_μ και
- την αντίσταση εκφορτίσεως ή αντίσταση ουράς R_ϵ

Η μεταβολή της τάσης φόρτισης του C_ϕ εξαρτάται κυρίως από τον λόγο C_k/C_ϕ . Στις γεννήτριες κρουστικών τάσεων επιδιώκεται να ισχύει γενικά $C_k \gg C_\phi$, ώστε να απαιτείται μικρό μέρος του φορτίου του C_k για τη φόρτιση του C_ϕ . Τούτο εξασφαλίζει ότι, για δεδομένη συνεχή τάση U_{dc} φόρτισης του C_k , η παραγόμενη κρουστική τάση θα είναι λίγο μόνο μικρότερη της U_{dc} , επομένως ο *συντελεστής χρησιμοποίησης* (σχέση 15) της γεννήτριας θα έχει σχετικά μεγάλη τιμή.

$$\eta = \frac{\hat{U}_k}{U_{dc}} \quad (15)$$

Η αναλυτική έκφραση της κρουστικής τάσης είναι η ίδια και για τους δύο τύπους κυκλωμάτων και προσδιορίζεται σχετικά απλά, αν θεωρηθούν αμελητέες οι

παράσιτες αυτεπαγωγές του κυκλώματος. Ο ακριβής υπολογισμός της χρονικής μεταβολής της τάσης, εφόσον δεν αγνοηθούν τα παράσιτα στοιχεία, απαιτεί πολύπλοκες υπολογιστικές διαδικασίες, στις οποίες υπεισέρχονται διαφορικές εξισώσεις 4^{ης} τάξης. Η αναλυτική έκφραση της κρουστικής τάσης, μετά τις απλοποιητικές παραδοχές, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$u_k(t) = U_{dc} \frac{R_e \cdot C_k}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (16)$$

από την οποία, στη συνέχεια, εύκολα προκύπτει η τιμή κορυφής της κρουστικής τάσης και ο συντελεστής χρησιμοποίησης της κρουστικής γεννήτριας.

$$\hat{U}_k = U_{dc} \frac{R_e \cdot C_k}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{\frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}} \cdot \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \quad \text{και} \quad \eta = \frac{\hat{U}_k}{U_{dc}} = \frac{R_e \cdot C_k}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{\frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}} \cdot \left(1 - \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \quad (17)$$

Οι χρονικές παράμετροι τ_1 και τ_2 διαφοροποιούνται από το κύκλωμα VDE-a στο κύκλωμα VDE-b και οι τιμές τους προκύπτουν με βάση τις τιμές των στοιχείων της γεννήτριας (χωρητικότητες και αντιστάσεις) από ανάλογους τύπους.

Γίνεται φανερό από τα παραπάνω, ότι τα χαρακτηριστικά μεγέθη T_1 και T_2 εξαρτώνται από τις χρονικές σταθερές τ_1 και τ_2 . Υπό την προϋπόθεση ότι $\tau_1 \gg \tau_2$ (που εξασφαλίζεται όταν $R_e C_k \gg R_\mu C_\phi$, δηλαδή όταν ισχύει $R_e \gg R_\mu$ και $C_k \gg C_\phi$), οι μεν χρονικές σταθερές συνδέονται με απλές προσεγγιστικές σχέσεις με τα κυκλωματικά στοιχεία της κρουστικής γεννήτριας, τα δε χαρακτηριστικά μεγέθη T_1 και T_2 συνδέονται με τις σταθερές τ_1 και τ_2 με απλές σχέσεις αναλογίας.

Έτσι, συνηθέστατα, ιδίως κατά τη σύνθεση κυκλωμάτων για τη διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών με κρουστικές τάσεις, χρησιμοποιούνται εύχρηστοι προσεγγιστικοί τύποι για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών κρουστικής τάσης παραγόμενη από δεδομένο κύκλωμα. Η επιτυγχανόμενη ακρίβεια με τη χρήση αυτών των τύπων χαρακτηρίζεται ως επαρκής, είναι δε τόσο καλύτερη, όσο ο λόγος T_1/T_2 είναι μικρότερος.

Ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου κυκλώματος (a ή b) ισχύουν οι ακόλουθες δύο σχέσεις:

$$T_1 = \frac{2}{b} \cdot \tau_2 \quad \text{και} \quad T_2 = \frac{1}{a} \cdot \tau_1 \quad (18)$$

ενώ οι συντελεστές αναλογίας για κάθε μία από τις τρεις γνωστότερες και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες προτυποποιημένες κρουστικές τάσεις, καθώς και οι τιμές των χρονικών σταθερών, δίνονται από τους πίνακες 1 και 2.

Για τα χαρακτηριστικά μεγέθη κρουστικής τάσης μεγάλης διάρκειας ισχύουν οι εξής προσεγγιστικοί τύποι:

$$t_m = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \ln \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad \text{και} \quad T_2 = \tau_1 \cdot \ln \frac{2}{\eta} \quad (19)$$

υπό την προϋπόθεση ότι $T_2 \geq 10t_m$.

Πίνακας 1

		T_1, T_2		
		1,5	1,2/50	1,2/200
Συντελεστές	$\frac{1}{a}$	1,44	0,73	0,70
	$\frac{2}{b}$	1,49	2,96	3,15

Πίνακας 2

VDE-a	VDE-b
$\tau_1 \cong (R_\varepsilon + R_\mu) \cdot (C_\kappa + C_\varphi)$	$\tau_1 \cong R_\varepsilon \cdot (C_\kappa + C_\varphi)$
$\tau_2 \cong \frac{R_\varepsilon \cdot R_\mu}{R_\varepsilon + R_\mu} \cdot \frac{C_\kappa \cdot C_\varphi}{C_\kappa + C_\varphi}$	$\tau_2 \cong R_\mu \cdot \frac{C_\kappa \cdot C_\varphi}{C_\kappa + C_\varphi}$
$\eta \cong \frac{R_\varepsilon}{R_\varepsilon + R_\mu} \cdot \frac{C_\kappa}{C_\kappa + C_\varphi}$	$\eta \cong \frac{C_\kappa}{C_\kappa + C_\varphi}$

Κατά την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή με δεδομένη την επιθυμητή κυματομορφή, να επιλεγούν τα στοιχεία της προς σύνθεση κρουστικής γεννήτριας, γίνεται πάλι χρήση των προηγούμενων προσεγγιστικών τύπων. Με δεδομένες τις επιθυμητές τιμές των T_1 και T_2 και τους διαθέσιμους πυκνωτές που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο επιλεγέν κύκλωμα της κρουστικής γεννήτριας (a ή b), οι προσεγγιστικοί τύποι δίνουν τις τιμές των αντιστάσεων που θα πρέπει να συνδεθούν στο κύκλωμα της γεννήτριας.

Ειδικά για τον υπολογισμό των στοιχείων γεννήτριας κρουστικής τάσης της μορφής 1,2/50μs, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής μίας ακόμη απλούστερης, αλλά υποδεέστερης σε ακρίβεια, μεθόδου για την επιλογή των τιμών των αντιστάσεων μετώπου και ουράς, εφόσον έχουν επιλεγεί οι χωρητικότητες του κυκλώματος. Η απλοποιητική μέθοδος συνίσταται στη χρήση των ακόλουθων απλών εμπειρικών τύπων:

$$R_\varepsilon \cong 1410 \cdot \eta \cdot \frac{T_2}{C_\kappa} \quad (20)$$

$$R_\mu \cong \frac{333}{\eta} \cdot \frac{T_1}{C_\varphi} \quad (21)$$

Για τις σχέσεις (20) και (21) η τιμή του συντελεστή χρησιμοποιήσεως προσδιορίζεται από τον πίνακα 3. Σημειώνεται ότι οι τύποι (20) και (21) ισχύουν για συγκεκριμένες μονάδες μέτρησης των μεγεθών, δηλαδή Ω για τις ωμικές αντιστάσεις, nF για τις χωρητικότητες και ms για τον χρόνο.

Πίνακας 3

		$\frac{C_{\varphi}}{C_{\kappa}}$				
		0,04	0,08	0,12	0,16	0,20
η	VDE-a	0,85	0,82	0,81	0,80	0,77
	VDE-b	0,932	0,899	0,868	0,837	0,810

Μέτρηση Κρουστικών Υψηλών Τάσεων

Ο επικρατέστερος και πληρέστερος τρόπος για να προσδιορισθεί η κυματομορφή μιας υψηλής κρουστικής τάσης με όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη της, είναι η μέτρησή της με χρήση καταμεριστή, συνήθως χωρητικού, σε συνδυασμό με σύγχρονο ψηφιακό παλμογράφο.

3. Πειραματικό μέρος

Εναλλασσόμενες Υψηλές Τάσεις – Συνεχείς Υψηλές Τάσεις

1. Να σχεδιασθεί το κύκλωμα της διάταξης που συνδεσμολογήθηκε στο εργαστήριο για την παραγωγή και μέτρηση των τριών μορφών υψηλής τάσης.
2. Να καταγραφούν τα στοιχεία του κυκλώματος και να υπολογιστούν οι ονομαστικές τιμές του λόγου μετασχηματισμού του Μ/Σ δοκιμών, καθώς και του λόγου καταμερισμού του χωρητικού καταμεριστή για τη μέτρηση της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης.
3. Να ληφθούν 10 μετρήσεις, της τάσης πρωτεύοντος του Μ/Σ δοκιμών, της τάσης στη βαθμίδα χαμηλής τάσης του χωρητικού καταμεριστή, της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης, καθώς και της συνεχούς υψηλής τάσης, από τα αντίστοιχα όργανα μέτρησης της τράπεζας χειρισμών και να συμπληρωθούν οι αντίστοιχες στήλες του πίνακα τιμών που βρίσκεται στο τέλος του παρόντος (στήλες Α-Δ).
4. Να υπολογιστεί η τιμή του λόγου μετασχηματισμού από κάθε μέτρηση και να βρεθεί η μέση τιμή του ($\bar{\alpha}$), (στήλη Ε).
5. Να υπολογιστεί η τιμή του λόγου καταμερισμού από κάθε μέτρηση και να βρεθεί η μέση τιμή του (\bar{k}_c), (στήλη Ζ). Στη συνέχεια να προσδιοριστεί η τιμή της χωρητικότητας της βαθμίδας χαμηλής του χωρητικού καταμεριστή.
6. Να προσδιοριστεί υπολογιστικά η τιμή της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης, με χρήση των σχέσεων που περιλαμβάνονται στον πίνακα τιμών, και να συμπληρωθούν οι αντίστοιχες στήλες (στήλες Η-Ι).
7. Από τις τιμές των στηλών Γ και Ι, αποφανθείτε περί του ορθού ή μη προσδιορισμού του λόγου καταμερισμού του χωρητικού καταμεριστή. Είναι αναγκαία, κατά τη γνώμη σας, η διακρίβωση των καταμεριστών τάσης (διαδικασία προσδιορισμού του λόγου καταμερισμού μέσω στατιστικής επεξεργασίας ενός πλήθους μετρήσεων) ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ακόμη

και στην περίπτωση που είναι γνωστός ο ονομαστικός λόγος καταμερισμού; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

8. Να υπολογιστούν τα σχετικά σφάλματα μεταξύ των υπολογισμένων τιμών (στήλες Η και Θ) και της πειραματικής τιμής (στήλη Γ) της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης και να συμπληρωθούν οι αντίστοιχες στήλες (Κ και Λ).
9. Να σχεδιαστούν τα γραφήματα των προηγούμενων σφαλμάτων του βήματος 8 συναρτήσει της μετρούμενης υψηλής τάσης (U_{Hac}) και να σχολιαστούν τα αποτελέσματα. Πού οφείλεται κατά τη γνώμη σας το σφάλμα μεταξύ της μέτρησης της υψηλής τάσης μέσω του πρωτεύοντος του Μ/Σ και της μέτρησης μέσω του χωρητικού καταμεριστή;
10. Για την πρώτη και την τελευταία μέτρηση, να υπολογιστεί η τιμή της υψηλής συνεχούς τάσης από τον τύπο $U'_{Hdc} = \bar{\alpha} \cdot U_{prim} \cdot \sqrt{2}$ και να υπολογιστεί το σχετικό σφάλμα ως προς τις αντίστοιχες τιμές μέτρησης της στήλης Δ. Σχολιάστε τα σφάλματα και εξηγήστε την προέλευσή τους.
11. Ποια τιμή μέτρησης της συνεχούς υψηλής τάσης (από ερώτημα 10) θα λαμβάνετε για να την ορίσετε ως τιμή της συνεχούς τάσης δοκιμής; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

Κρουστικές Υψηλές Τάσεις

12. Καταγράψτε το παλμογράφημα της μετρούμενης κρουστικής τάσης 1,2/50μs μαζί με τις τιμές των χαρακτηριστικών της μεγεθών (\hat{U}_k , T_1 , T_2).
13. Επαληθεύστε την ικανοποίηση ή μη των ορίων ανοχών για τον χρόνο μετώπου T_1 και τον χρόνο ημίσεος εύρους T_2 τα οποία προκύπτουν από το Πρότυπο [2].
14. Προσδιορίστε την τιμή του χρόνου μετώπου και του χρόνου ημίσεος εύρους με τη βοήθεια των εύχρηστων προσεγγιστικών τύπων [Σχέσεις (18), Πίνακες 1 & 2].
15. Υπολογίστε τα σχετικά σφάλματα για τον χρόνο μετώπου και τον χρόνο ημίσεος εύρους μεταξύ των υπολογισμένων, από τους εύχρηστους προσεγγιστικούς τύπους, τιμών και των τιμών του παλμογραφήματος.
16. Προσδιορίστε την τιμή του χρόνου μετώπου T_1 και του χρόνου ημίσεος εύρους T_2 με τη βοήθεια της απλοποιητικής μεθόδου των εμπειρικών τύπων [Σχέσεις (20) & (21), Πίνακας 3].
17. Υπολογίστε τα σχετικά σφάλματα για τον χρόνο μετώπου και τον χρόνο ημίσεος εύρους μεταξύ των υπολογισμένων, από την απλοποιητική μέθοδο των εμπειρικών τύπων, τιμών και των τιμών του παλμογραφήματος.
18. Σχολιάστε τα αποτελέσματα, διατυπώστε τα συμπεράσματά σας σχετικά με το ποια από τις δύο απλοποιημένες μεθόδους υπολογισμού προσεγγίζει καλύτερα τις τιμές του παλμογραφήματος και δώστε εξήγηση γι' αυτήν τη διαφορά.
19. Προσδιορίστε την τιμή κορυφής \hat{U}_k της κρουστικής τάσης με τη βοήθεια της σχέσης (15), αφού πρώτα προσδιοριστούν η συνεχής τάση φορτίσεως και ο συντελεστής χρησιμοποίησης της γεννήτριας κρουστικών τάσεων. Για τον προσδιορισμό του συντελεστή χρησιμοποίησης να χρησιμοποιηθεί ο προσεγγιστικός τύπος του Πίνακα 2.

20. Υπολογίστε το σχετικό σφάλμα μεταξύ της υπολογισμένης τιμής της τάσης κορυφής (του προηγούμενου βήματος) και της αντίστοιχης τιμής του παλμογραφήματος και σχολιάστε.

21. Να αναφέρετε στοιχεία, από σχετική βιβλιογραφία, για τις διατάξεις και τις μεθόδους μέτρησης υψηλών τάσεων του παρακάτω πίνακα.

Μέθοδος μέτρησης	Συνεχής τάση		Εναλλασσόμενη τάση			Κρουστική τάση	
	Mean	Peak	rms	Peak	Waveform	Peak	Waveform
Σπινθηριστής σφαιρών		X		X		X	
Βολτόμετρο μεγίστου				X			
Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο	X (rms)		X				
Μετασχηματιστής τάσης			X	X	X		
Αντίσταση σε σειρά με μιλιαμπερόμετρο	X		X				
Ωμικός καταμεριστής	X	X	X	X	X	X	X
Χωρητικός καταμεριστής			X	X	X	X	X

Παραγωγή και μέτρηση υψηλών τάσεων διαφόρων μορφών

Εναλλασσόμενη και Συνεχής Υψηλή Τάση

	A	B	Γ	Δ	E	Z	H	Θ	I	K	Λ
α/α μέτρησης	$U_{primary}$ (V)	U_{CL} (V)	U_{Hac} (kV)	U_{Hdc} (kV)	$\alpha = \frac{U_{Hac}}{U_{prim}}$	$k_c = \frac{U_{Hac}}{U_{CL}}$	U'_{Hac} (kV)	U''_{Hac} (kV)	U'''_{Hac} (kV)	F'_{Uac} (%) (στήλες H-Γ)	F''_{Uac} (%) (στήλες Θ-Γ)
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
					$\bar{\alpha}$	\bar{k}_c					

$U_{primary}$: τάση πρωτεύοντος (συνδεδεμένο πολύμετρο), U_{CL} : τάση μετρούμενη στον χωρητικό καταμεριστή (συνδεδεμένο πολύμετρο), U_{Hac} : τάση από βολτόμετρο 1 (τράπεζα χειρισμών), U_{Hdc} : τάση από βολτόμετρο 2 (τράπεζα χειρισμών), α : λόγος μετασχηματισμού, k_c : λόγος καταμερισμού, U'_{Hac} : εναλλασσόμενη υψηλή τάση υπολογισμένη με τον ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού ($U'_{Hac} = \alpha \cdot U_{prim}$), U''_{Hac} : υψηλή εναλλασσόμενη τάση υπολογισμένη με τον μέσο λόγο μετασχηματισμού ($\bar{\alpha}$) ($U''_{Hac} = \bar{\alpha} \cdot U_{prim}$), U'''_{Hac} : υψηλή εναλλασσόμενη τάση υπολογισμένη με τον μέσο λόγο καταμερισμού (\bar{k}_c) ($U'''_{Hac} = \bar{k}_c \cdot U_{CL}$), F'_{Uac} και F''_{Uac} : σχετικά σφάλματα

4. Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Α. Στασινόπουλος, «Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων», Υπηρεσία δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 1996.
- [2] IEC 60060-1:2010, *High-Voltage Test Techniques*. Part 1: “General definitions and test requirements”, IEC 60060-2:2010, Part 2: “Measuring systems”.
- [3] IEEE Std. 4-1995: “IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing”.
- [4] Ι. Α. Σταθόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα, 1998.
- [5] Π. Ν. Νικολόπουλος, «Υψηλές Τάσεις», Τόμος Α, 2^η έκδοση, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. Αθήνα, 1994.
- [6] E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel, «Υψηλές Τάσεις», 2^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2013.
- [7] M. Khalifa, “High-Voltage Engineering”, Marcel Dekker Inc., New York, 1990.
- [8] www.sgcc.com.cn
- [9] ΑΔΜΗΕ, Δεκαετής πρόγραμμα ανάπτυξης συστήματος μεταφοράς 2014–2023, Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα, 2013.
- [10] Ι. Α. Σταθόπουλος, «Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων», Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα, 1989.
- [11] Λ. Οικονόμου, Γ. Φώτης, Χ. Χριστοδούλου, «Υψηλές Τάσεις», 3^η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2016.
- [12] IEC 60156:1995, “Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method”.
- [13] IEC 60502-2: 2014, “Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1kV ($U_m = 1,2kV$) up to 30kV ($U_m = 36kV$) – Part 2: Cables for rated voltages from 6kV ($U_m = 7,2kV$) up to 30 kV ($U_m = 36kV$)”.
- [14] IEC 60840: 2011, “Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30kV ($U_m = 36kV$) up to 150kV ($U_m = 170kV$) – Test methods and requirements”.
- [15] IEEE Std 400.2:2013, “Electric cables – Armoured cables with thermosetting insulation for rated voltages from 3.8/6.6 kV to 19/33 kV – Requirements and test methods”.
- [16] ΕΛΟΤ EN 60229:2008, “Electric cables – Tests on extruded oversheaths with a special protective function”.
- [17] T. J. Gallagher, A. J. Pearmain, “High Voltage-Measurement, Testing and Design”, John Wiley & Sons Ltd., Great Britain, 1983.
- [18] F. H. Kreuger, “Industrial High Voltage”, Vol. II, Delft University Press, Delft, 1992.
- [19] M. S. Naidu, V. Kamaraju, “High Voltage Engineering”, 4th edition, Tata Mc Graw Hill Education Private Limited, New Delhi, 2009.
- [20] Jos Arrillaga, “High voltage direct current transmission”, 2nd edition, IEE Power and Energy Series 29, London, 1998.
- [21] IEC 60229 Ed. 3.0: 2007, “Electric cables – Tests on extruded oversheaths with a special protective function”.
- [22] IEC 60897: 1987, “Methods for the determination of the lightning breakdown voltage of insulating liquids”.
- [23] ASTM D3300-12: “Standard test method for dielectric breakdown voltage of insulating oils of petroleum origin under impulse conditions”.
- [24] ΕΛΟΤ EN 61869-1:2009, “Instrument transformers - Part 1: General requirements”.
- [25] ΕΛΟΤ EN 61869-2:2012, “Instrument transformers - Part 2: Additional requirements for current transformers”.
- [26] ΕΛΟΤ EN 61869-3:2012, “Instrument transformers - Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers”.