

Τα καλώδια μέσης τάσης, πριν τεθούν σε λειτουργία, αλλά και κατά τη διάρκεια ζωής τους, δοκιμάζονται σε λειτουργικές συνθήκες, που αντιστοιχούν στις μέγιστες καταπονήσεις, έτσι ώστε να ελεγχθεί και να εξασφαλισθεί η αξιόπιστη λειτουργία τους. Οι δοκιμές, που προβλέπονται από τους κανονισμούς [1-4], περιλαμβάνουν:

- α) Δοκιμές σειράς, που γίνονται σε όλο το μήκος του καλωδίου και δεν είναι καταστρεπτικές.
- β) Δειγματοληπτικές δοκιμές, που πραγματοποιούνται σε τυχαία δείγματα και αφορούν, κυρίως, μετρήσεις των διαστάσεων των καλωδίων.
- γ) Ηλεκτρικές και μηχανικές δοκιμές τύπου, που μπορεί να είναι καταστρεπτικές και για αυτό πραγματοποιούνται σε ένα δείγμα (κομμάτι) του καλωδίου.
- δ) Δοκιμές μετά την εγκατάσταση, οι οποίες περιλαμβάνουν ηλεκτρικές δοκιμές στον εξωτερικό μανδύα και στη μόνωση του καλωδίου.

---

Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου,  
Ιωάννης Φ. Γκόνος,  
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
e-mail: Christ\_fth@yahoo.gr,  
igonos@ieee.org,  
stathop@power.ece.ntua.gr.

---

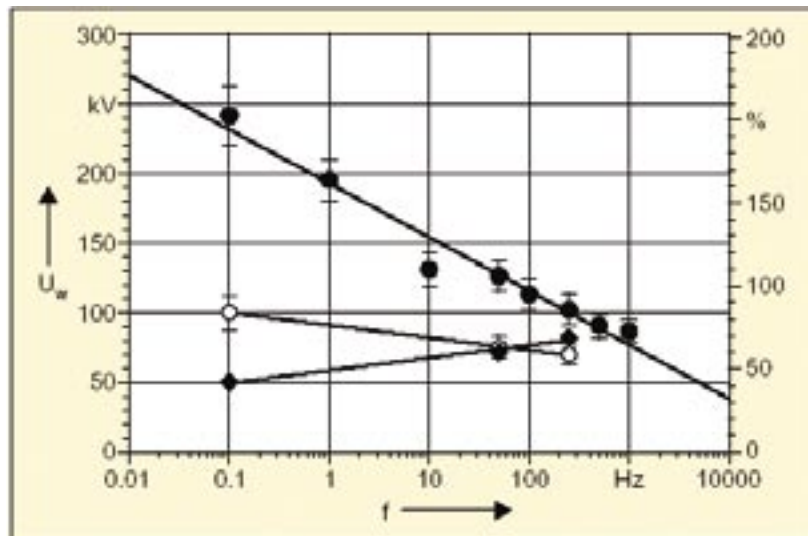


Δοκιμές σε καλώδια Μέσης Τάσης

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τις δοκιμές μετά την εγκατάσταση και συγκεκριμένα με τις δοκιμές με εφαρμογή υψηλής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας (Very Low Frequency, VLF) για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης του καλωδίου.

### Δοκιμές μετά την εγκατάσταση

Τα καλώδια μέσης τάσης δοκιμάζονται μετά την εγκατάσταση [2] με συνεχή τάση για τον έλεγχο του μανδύα. Η συνεχής υψηλή τάση, που εφαρμόζεται μεταξύ της μεταλλικής θωράκισης και της γης, έχει τιμή 3kV, εάν ο μανδύας του καλωδίου είναι από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και 5kV, εάν είναι από πολυαιθυλένιο (PE). Ο χρόνος εφαρμογής της τάσης πρέπει να είναι τουλάχιστον 1min, ενώ κριτήριο για την επιτυχία της δοκιμής είναι η μη εμφάνιση διάσπασης (διάτρησης) του μανδύα.



Σχήμα. 1: Τάση διάσπασης συναρτήσει της συχνότητας της εφαρμοζόμενης τάσης (τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν σε καλώδια χωρίς μηχανικές καταπονήσεις, τα λευκά σε καλώδια με μηχανικές καταπονήσεις και οι ρόμβοι στο λόγο της τάσης διάσπασης για καλώδια με και χωρίς καταπονήσεις)[5]

Επιπλέον, στα εγκατεστημένα καλώδια πραγματοποιείται η δοκιμή της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης με εναλλασσόμενη τάση  $2U_0$  ή με εναλλασσόμενη τάση πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF)  $3U_0$  [2], όπου  $U_0$  η ονομαστική φασική τάση του καλωδίου [2-4].

Η πραγματοποίηση των δοκιμών με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας απαιτεί συσκευές μεγάλης ισχύος και όγκου, οι οποίες παρουσιάζουν δυσκολίες στη μεταφορά και είναι υψηλού κόστους. Ένα καλώδιο μεγάλου μήκους έχει υψηλή χωρητικότητα. Ο μόνος πρακτικός τρόπος να δοκιμασθούν υψηλές χωρητικότητες, όπως εκείνες των καλωδίων, με εναλλασσόμενη τάση είναι να χρησιμοποιήσουμε εναλλασσόμενη τάση πολύ χαμηλής συχνότητας, συνήθως 0,1Hz [4, 5]. Όσο πιο χαμηλή είναι η συχνότητα, τόσο πιο μικρό είναι το ρεύμα και η ισχύς που απαιτούνται για τη δοκιμή υψηλών χωρητικότητων.

Παρά το γεγονός ότι τα καλώδια λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας και με τέτοια τάση θα έπρεπε (εάν ήταν πρακτικά δυνατό) να δοκιμάζονται, αφού ο μηχανισμός διάσπασης στα 0,1 Hz φαίνεται να διαφέρει από το μηχανισμό διάσπασης στα 50 Hz, οι δοκιμές VLF είναι αποτελεσματικές. Στο σχήμα 1 [5] φαίνεται η τάση διάσπασης για καλώδια σε διάφορες συχνότητες χωρίς και με μηχανικές καταπονήσεις (μαύρα και λευκά σημεία αντίστοιχα).

Η τάση διάσπασης μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της συχνότητας σε λογαριθμική κλίμακα

συχνότητας. Οι τιμές των τάσεων διάσπασης στα 0,1Hz και στα 50Hz στην περίπτωση που υπάρχουν μηχανικές φθορές είναι πιο κοντά (μικρότερη κλίση), καθώς σε όλο το εύρος των συχνοτήτων κύρια αιτία της διάσπασης είναι οι μηχανικές αυτές βλάβες. Η τάση διάσπασης χωρίς μηχανικές βλάβες είναι 200% μεγαλύτερη στα 0,1Hz απ' ό,τι στα 50Hz, πράγμα που δείχνει ότι ο μηχανισμός διάσπασης είναι διαφορετικός για τις δύο συχνότητες. Ωστόσο, αυτό που έχει σημασία δεν είναι σε ποια τάση έχουμε διάσπαση στο «υγιές» καλώδιο, αλλά να διαπιστωθεί κατά πόσον ο βαθμός φθοράς της μόνωσης επιτρέπει τη συνέχιση της λειτουργίας του καλωδίου, το αποτέλεσμα, επομένως, της δοκιμής οφείλει να είναι ποιοτικό (pass/fail) και όχι ποσοτικό. Επιπλέον, όπως ήδη αναφέρθηκε, η τάση διάσπασης για «υγιές» καλώδιο είναι αρκετά μεγαλύτερη στα 0,1Hz από ότι στα 50Hz, αλλά η τιμή της για τις δύο συχνότητες δε διαφέρει σημαντικά για καλώδια με μηχανικές βλάβες και υδάτινους δενδρίτες [5].

## Δοκιμές VLF

Σκοπός της δοκιμής VLF είναι να διαπιστωθεί εάν η εγκατάσταση του υπό έλεγχο καλωδίου έγινε με επιτυχία, οπότε το καλώδιο μπορεί να ηλεκτρισθεί χωρίς πρόβλημα. Αναλυτικότερα, ελέγχονται τα εξής :

- κατά πόσον το καλώδιο, κατά την εγκατάσταση του, έχει υποστεί μηχανικές καταπονήσεις που μπορεί να έχουν επίδραση στην ηλεκτρική του συμπεριφορά, και συγκεκριμένα να έχουν προκαλέσει αλλοίωση των μονωτικών ιδιοτήτων της μόνωσης.
- κατά πόσον η τοποθέτηση των ενδιάμεσων συνδέσμων (μουφών) και των ακροκλιβωτίων τερματισμού έγινε με επιτυχία, ώστε το καλώδιο να λειτουργήσει σύμφωνα με τις προδιαγραφές στο σύνολό του.

Κανονισμοί που αναφέρονται στις δοκιμές με εφαρμογή υψηλής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας είναι αυτοί της CENELEC [2] και του IEEE [3, 4]. Οι παραπάνω κανονισμοί απαγορεύουν τη χρήση υψηλής συνεχούς τάσης σε καλώδια μέσης τάσης με πλαστική μόνωση, διότι, όπως έχει αποδειχθεί, η εφαρμογή συνεχούς τάσης :

- δεν ανιχνεύει την παρουσία πολλών τύπων αλλοίωσης μόνωσης και δεν εξασφαλίζει ότι σφάλματα που έχουν ξεκινήσει να σχηματίζονται θα εκδηλωθούν την ώρα της δοκιμής,
- προκαλεί πολλαπλές εστίες δημιουργίας νέων σφαλμάτων, λόγω της παρατεταμένης εφαρμογής ισχυρών φορτίων μιας πολικό-

τητας. Οι εστίες αυτές είναι, συνήθως, ξένα σωματίδια και μικροκοιλότητες, που σχηματίζονται κατά τη διαδικασία έκχυσης του θερμοπλαστικού μονωτικού υλικού.

Αντιθέτως, έχει πλέον αποδειχθεί [3-7] πως η εφαρμογή τάσης VLF σε καλώδια με πλαστική μόνωση είναι η πλέον αποτελεσματική και δεν προκαλεί καμία απολύτως καταπόνηση στο μονωτικό υλικό. Οι δοκιμές VLF, που πραγματοποιούνται, είτε προληπτικά, είτε ύστερα από κάποιο πιθανό σφάλμα, διακρίνονται σε **δοκιμές αντοχής (withstand)** και **διαγνωστικές δοκιμές (diagnostic)** και ενδείκνυνται, κυρίως, πριν και μετά την τοποθέτηση των συνδέσμων και των ακροκλιβωτίων, αλλά και περιοδικά κατά τη διάρκεια ζωής του καλωδίου. Οι δοκιμές αντοχής πραγματοποιούνται συνήθως με τάση ημιτονοειδούς μορφής (sinusoidal) ή συνημιτονοειδούς-ορθογώνιας μορφής (cosine-rectangular), ενώ οι διαγνωστικές δοκιμές περιλαμβάνουν μέτρηση του συντελεστή απωλειών tan $\delta$  (VLF-DF), μέτρηση των μερικών εκκενώσεων (VLF-PD) και μέτρηση ρεύματος διαρροής και απωλειών.

Η δοκιμή VLF δεν είναι καταστρεπτική για μόνωσεις που βρίσκονται σε καλή κατάσταση, ενώ δεν προκαλεί επιπλέον φθορές στην ήδη φθαρμένη μόνωση. Σε περίπτωση που η μόνωση περιέχει θέσεις φθοράς, ανομοιογένειας και υδάτινους δενδρίτες, η μόνωση διασπάται, πράγμα το οποίο επιδιώκεται, αφού εάν μια μόνωση δεν μπορεί να αντέξει τάση 2-3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής, για χρόνο ίσο το πολύ προς μία ώρα, δε θα αντέξει για πολύ ευρισκόμενη σε λειτουργία. Είναι προτιμότερο, λοιπόν, να προκληθεί διάσπαση κατά τη δοκιμή, οπότε στη συνέχεια, μπορούμε να εντοπίσουμε και να διορθώσουμε τις θέσεις φθοράς, παρά κατά τη λειτουργία του καλωδίου.

## Μέθοδος δοκιμών αντοχής VLF σε καλώδια μέσης τάσης

Κατά τη δοκιμή VLF ένας ηλεκτρικός δενδρίτης, που εμφανίζεται σε ένα σημείο ανομοιογένειας της μόνωσης, ενισχύεται, προκαλώντας τη διάτρηση της μόνωσης. Η έναρξη της δενδροειδούς διάσπασης και ο χρόνος δημιουργίας του αγωγίμου καναλιού είναι συνάρτηση της συχνότητας και του πλάτους της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμής. Τα επίπεδα της εφαρμοζόμενης τάσης είναι  $2U_0$  έως  $3U_0$  (όπου  $U_0$  η ονομαστική φασική τάση του καλωδίου), ενώ ο χρόνος της δοκιμής κυμαίνεται από 15 έως 60 min κατά IEEE [3, 4] και 60min κατά CENELEC [2]. Στις VLF δοκιμές χρησιμοποιούνται εναλλασσόμενες τάσεις,



Σχήμα 2: Σχηματική διάταξη δοκιμών VLF

ημιτονοειδούς ή συνημιτονοειδούς-ορθογώνιας μορφής, συχνότητας από 0,01Hz έως 1Hz. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη συχνότητα είναι 0,1Hz.

Όταν σε ένα σημείο ανομοιογένειας η τιμή του πεδίου ξεπεράσει τη διηλεκτρική αντοχή της μόνωσης, τότε έχουμε έναρξη μερικών εκκενώσεων. Η τιμή του πεδίου αυτού είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης, της γεωμετρίας των θέσεων ανομοιογένειας και του χωρικού φορτίου. Μετά την έναρξη των μερικών εκκενώσεων, τα αγωγίμα κανάλια που δημιουργούνται οδηγούν στη διάσπαση της μόνωσης. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, το 68% των σφαλμάτων συμβαίνουν εντός 12min, το 89% αυτών εντός 30min, το 95% εντός 45min και το 100% των σφαλμάτων εντός 60min από την επιβολή της τάσης [4].

Οι συσκευές VLF που διατίθενται από τις διάφορες εταιρείες έχουν δυνατότητα παροχής τάσης από 25kV έως 200kV και συχνότητας 0,1Hz ή και μικρότερη, ενώ τα επίπεδα των χωρητικότητων των καλωδίων που μπορούν να δοκιμαστούν με μια συσκευή VLF είναι 0,4μF – 50μF, που αντιστοιχεί σε μήκος καλωδίου από 25km έως 50km για καλώδια μέχρι 15kV. Στο σχήμα 2 φαίνεται η διάταξη της δοκιμής αντοχής VLF.

Όταν το καλώδιο περάσει με επιτυχία τη δοκιμή, η τάση μηδενίζεται και το καλώδιο και η συσκευή VLF εκφορτίζονται και γειώνονται. Το καλώδιο στη συνέχεια τίθεται πάλι σε λειτουργία. Εάν το καλώδιο αποτύχει στη δοκιμή, η τάση δοκιμής μηδενίζεται και το σύστημα εκφορτίζεται και γειώνεται. Στη συνέχεια με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού μπορούν να εντοπισθούν οι θέσεις ανομοιογένειας και φθοράς, οι οποίες επιδιορθώνονται, και το καλώδιο δοκιμάζεται εκ νέου έως ότου περάσει με επιτυχία τη δοκιμή.

## Επαλήθευση της συσκευής VLF

Οι δοκιμές VLF γίνονται στον τόπο εγκατάστασης του καλωδίου, πάντα εκτός εργαστηρίου, για αυτό είναι απαραίτητη η επαλήθευση (verification) της σωστής λειτουργίας της συσκευής VLF,

μετά τη μεταφορά της στο σημείο διεξαγωγής των δοκιμών. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί μια διαδικασία επαλήθευσης. Από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. έχει αναπτυχθεί μια διαδικασία επαλήθευσης και προτείνεται μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 60-2 [8], χρησιμοποιώντας μια απλή διάταξη αποτελούμενη από τη συσκευή VLF, έναν ωμικό διαιρέτη τάσης και ένα όργανο καταγραφής τάσης κατάλληλα διακριβωμένο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Το όργανο, με το οποίο μετράται η τάση, μπορεί να είναι ένα πολύμετρο, το οποίο μετρά rms τιμή, ή ένας παλμογράφος, ο οποίος μας δίνει την κυματομορφή της VLF τάσης.

Η τάση εξόδου της συσκευής VLF ισούται με το γινόμενο του λόγου καταμερισμού επί τη μετρούμενη τάση :

$$(1) \quad U_{high} = \kappa U_{low} = \left(1 + \frac{R_H}{R_L}\right) \cdot U_{low}$$

Σύμφωνα με τον νόμο διάδοσης αβεβαιοτήτων, η αβεβαιότητα με την οποία μετράται η υψηλή τάση είναι [8, 9] :

$$(2) \quad u_{high} = \kappa U_{low} \sqrt{\frac{u_{\kappa}^2}{\kappa^2} + \frac{u_{U_{low}}^2}{U_{low}^2}}$$

όπου  $u_{high}$  : η αβεβαιότητα για την υψηλή τάση εξόδου της συσκευής VLF

$u_{\kappa}$  : η αβεβαιότητα του λόγου καταμερισμού  $\kappa$

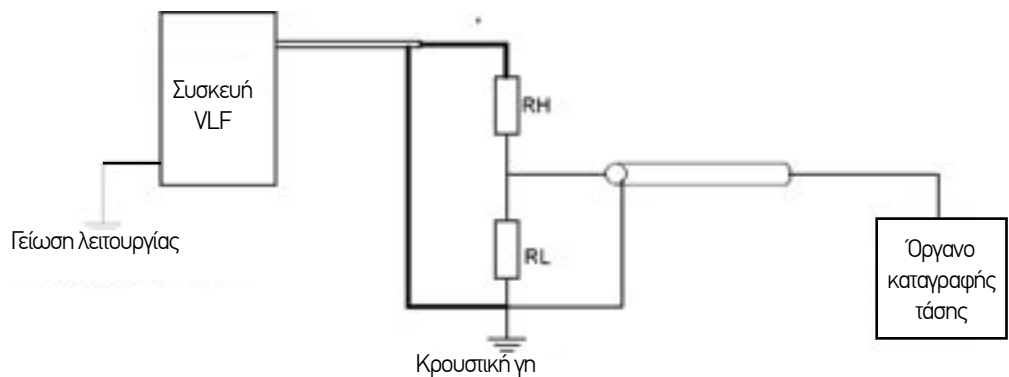
$u_{U_{low}}$  : η αβεβαιότητα με την οποία μετράται η χαμηλή τάση στον παλμογράφο

Η αβεβαιότητα του λόγου καταμερισμού  $\kappa = 1 + \frac{R_H}{R_L}$  είναι, σύμφωνα με το νόμο διάδοσης αβεβαιοτήτων :

$$(3) \quad u_{\kappa} = \frac{R_H}{R_L} \sqrt{\frac{u_{R_H}^2}{R_H^2} + \frac{u_{R_L}^2}{R_L^2}}$$

όπου  $u_{RH}$  και  $u_{RL}$  οι αβεβαιότητες με τις οποίες μετρήθηκαν οι αντιστάσεις του καταμεριστή και οι οποίες προκύπτουν από το συνδυασμό των αβεβαιοτήτων τύπου A και τύπου B. Οι αβεβαιότητες τύπου A υπολογίζονται ύστερα από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις των αντιστάσεων με όργανο μέτρησης αντιστάσεων και κατάλληλη στατιστική επεξεργασία, ενώ οι αβεβαιότητες τύπου B αφορούν το όργανο μέτρησης αντιστάσεων και προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά των οργάνων και τα πιστοποιητικά διακρίβωσης. Ομοίως, η αβεβαιότητα της χαμηλής τάσης, της μετρούμενης με το αντίστοιχο όργανο μέτρησης, υπολογίζεται από τις μετρούμενες τιμές της χαμηλής τάσης και τις αβεβαιότητες τύπου B, που αφορούν το όργανο μέτρησης.





Σχήμα 3: Διάταξη για την επαλήθευση της συσκευής VLF

Η ολική ανηγμένη αβεβαιότητα με την οποία μετράται η υψηλή τάση στην έξοδο της συσκευής VLF δε θα πρέπει να ξεπερνά το 5%, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 400.2 [4].

### Συμπεράσματα

Μια νέα μεθοδολογία είναι διαθέσιμη τα τελευταία χρόνια για τον έλεγχο των καλωδίων μέσης τάσης, μετά την εγκατάστασή τους στην τελική θέση λειτουργίας τους, με τη χρήση υψηλής τάσης πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF). Πορίσματα από την έγκριτη διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και αποτελέσματα δοκιμών διεξαχθεισών υπό του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. δείχνουν ότι οι δοκιμές VLF αποτελούν πολύτιμο αρωγό για την πρόβλεψη της αξιόπιστης λειτουργίας του συστήματος καλωδίων, ακροκιβωτίων και συνδέσμων (μουφών). Είναι απαραίτητος ο έλεγχος των καλωδίων πριν την οριστική παραλήβη και λειτουργία τους, από εργαστήριο χα-

ρακτριζόμενο από τη δέουσα τεχνική επάρκεια και αντικειμενικότητα-αμεροληψία, με τη χρήση της νέας μεθοδολογίας VLF, έτσι ώστε να διαπιστωθεί εάν η εγκατάσταση έγινε σωστά και να προληφθούν τυχόν σφάλματα, που ενδεχομένως θα εμφανισθούν κατά τη λειτουργία των καλωδίων. Καλώδια με μηχανικές βλάβες και υδάτινους δενδρίτες παρουσιάζουν σφάλματα («σκάνε») στην ίδια περίπου τάση, είτε με τάση VLF είτε με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας. Πριν από την έναρξη κάθε δοκιμής, είναι απαραίτητη η επαλήθευση της συσκευής VLF, ώστε να διασφαλιστεί, ότι λειτουργεί σωστά και μέσα στα προβλεπόμενα από τους κανονισμούς όρια. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι δοκιμές VLF και προτείνεται μια μέθοδος επαλήθευσης της συσκευής VLF, έτσι ώστε να εξασφαλίζονται πάντα οι βέλτιστες συνθήκες για την πραγματοποίηση των δοκιμών αντοχής σε καλώδια μέσης τάσης. ▲

## Βιβλιογραφία

- [1] IEC 60502-1: "Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV) - Part 1: Cables for rated voltages of 1 kV ( $U_m = 1,2$  kV) and 3 kV ( $U_m = 3,6$  kV)", 2004
- [2] CENELEC HD 620 S1: "Distribution Cables with Extruded Insulation for Rated Voltages from 3,6/6 (7,2) kV to 20,8/36 (42) kV", 1996.
- [3] 400™: "IEEE Guide for field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems", 2001.
- [4] 400.2™: "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)", 2004.
- [5] Ernst Gockenbach, Wolfgang Hauschild: "The Selection of the Frequency Range for High-Voltage On-Site Testing of Extruded Insulation Cable Systems", IEEE Electrical Insulation Magazine, November/December 2000 – Vol.16, No.6, pp. 11-16.
- [6] Richard Reid: "High Voltage VLF Test Equipment with Sinusoidal Waveform", Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE, pp.8-12
- [7] Mohaupt P., Baur M., Schlick T.: "VLF Testing and Diagnosis on Medium Voltage Power Cables", Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2003. 2003 IEEE ESMO, 2003 IEEE 10th International Conference, pp. 202-209
- [8] IEC 60-2 Amendment 1: "High Voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems, Annex H Procedure for estimating uncertainty in high voltage measurements", 1994
- [9] Μανώλης Ε. Μαθιουλάκης, "Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα", Ελληνική Έκδοση Εργαστηρίων, Αθήνα, 2004.