

σύγχρονη

τεύχος 184 • Σεπτέμβριος 2007

ΤΕΧΝΙΚΗ

Ε Π Ι Θ Ε Ω Ρ Η Σ Η

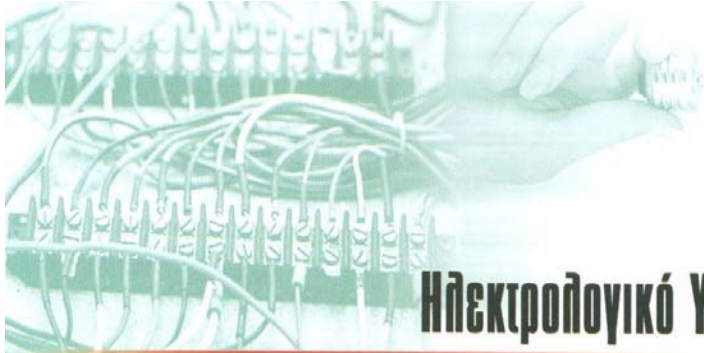
electrical



ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΟ
ΤΕΧΝ. ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ
ΚΕΜΠ ΑΒ
Συγγρού 15
11528

- Ηλεκτρολογικό Ψηφίο
- Εξοικονόμηση Ενέργειας
- Βιομηχανικός Εξοπλισμός

www.mte.gr



Ηλεκτρολογικό Υλικό

Ηλεκτρικές δοκιμές

μετά την εγκατάσταση σε καλώδια μέσης τάσης

Χρ. Χριστοδούλου, Ι. Γκόνας, Ι. Σταθόπουλος

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

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 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



Σχήμα 1: Διάταξη για την ηλεκτρική δοκιμή για τον έλεγχο του μανδύα του καλωδίου

εξωτερικό μανδύα και στη μόνωση του καλωδίου.

Στο παρόν άρθρο 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. Η εργασία αυτή, σε μια παρόμοια μορφή, παρουσιάστηκε στο 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο του ΠΣΔΜΗ και δημοσιεύθηκε στο Δελτίο του ΠΣΔΜΗ (τεύχος 398, Μάιος 2007) [5].

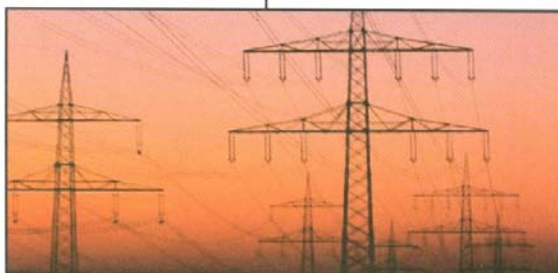
ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

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 (Σχήμα 1), 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.

Επιπλέον, στα εγκατεστημένα καλώδια πραγματοποιείται η δοκιμή της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης με εναλλασσόμενη τάση 2U₀ ή εναλλασσόμενη τάση πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF) 3U₀ [2], όπου U₀ 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



Electrical Components

f (Hz)	Τάση δοκιμής	$X_c (= 1/2\pi fC)$	Ρεύμα	Ισχύς
50 Hz	24 kV	3,18 kΩ	7,6 A	182,4 kVA
0,1 Hz	26kV	1,59 MΩ	23 mA	0,828 kVA

Πίνακας 1: Το ρεύμα και η ισχύς που απαιτούνται για τη δοκιμή ενός καλωδίου 12/20kV χωρητικότητας 1μF για συχνότητα 0,1Hz και 50Hz

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 μικρές τιμές είναι το ρεύμα και η ισχύς που απαιτούνται για τη δοκιμή υψηλών χωρητικότητας. 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 2 [6] 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.

Όστόσο, 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 οφείπει 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 υδατινούς δενδρίτες [6].

ΔΟΚΙΜΕΣ VLF

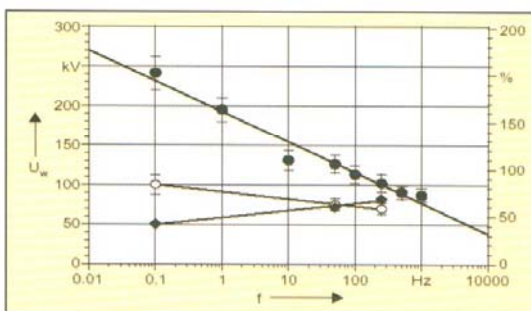
Σκοπός της δοκιμής VLF είναι να διαπιστωθεί εάν η εγκατάσταση του υπό έλεγχο καλωδίου έγινε με επιτυχία, οπότε το καλώδιο μπορεί να ηλεκτρισθεί χωρίς πρόβλημα. Αναλυτικότερα, ελέγχονται τα εξής:

- κατά πόσον το καλώδιο, κατά την εγκατάστασή 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 (μούφών) και των ακροκλιωτών 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 GENELEC [2] και του IEEE [3, 4].

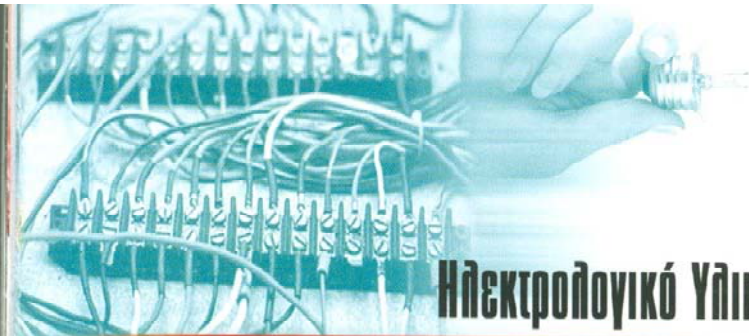
Οι παραπάνω κανονισμοί απαγορεύουν τη χρήση υψηλής συνεχούς τάσης σε καλώδια μέσω τάσης με πλάστική μόνωση, διότι, όπως έχει αποδειχθεί, η εφαρμογή συνεχούς τάσης:

- 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 πολλοαπλής εστίες δημιουργίας νέων σφαλμάτων, λόγω της παρατεταμένης εφαρμογής ισχυρών φορτίων μιας πολικότητας. Οι εστίες αυτές είναι, συνήθως, ξένα σωματίδια και μικροκλιπότητες, που σχηματίζονται κατά τη διαδικασία έκχυσης του θερμοπλαστικού μονωτικού υλικού.

Αντιθέτως, έχει πλέον αποδειχθεί [3-8] πως η εφαρμογή τάσης VLF σε καλώδια με πλάστική 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 σφάλμα, διακρίνονται σε δοκιμές



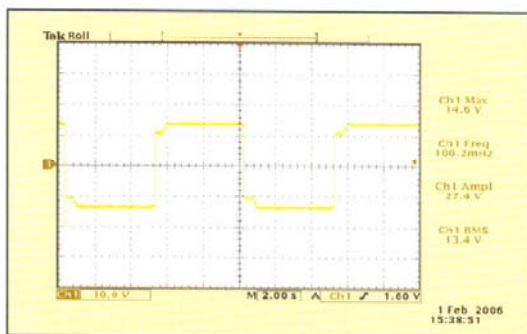
Σχήμα 2: Τάση διάσπασης συναρτήσει της συχνότητας της εφαρμοζόμενης τάσης (τα μαύρα σημεία αντιστοιχούν σε καλώδια χωρίς μηχανικές καταπονήσεις, τα λευκά σε καλώδια με μηχανικές καταπονήσεις και οι ρόμβοι στο λόγο της τάσης διάσπασης για καλώδια με και χωρίς καταπονήσεις)[6]



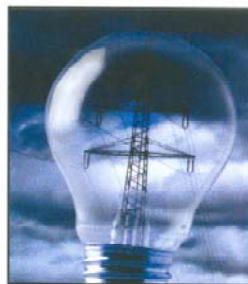
Ηλεκτρολογικό Υλικό



αντοχής (withstand) και διαγνωστικές δοκιμές (diagnostic) και ενδείκνυται, κυρίως, πριν και μετά την τοποθέτηση των συνδέσμων και των ακροκιβωτίων, αλλά και περιοδικά κατά τη διάρκεια ζωής του καλωδίου. Οι δοκιμές αντοχής πραγματοποιούνται, συνήθως, με τάση ημιτονοειδούς μορφής (sinusoidal) ή συνημιτονοειδούς-ορθογωνίας μορφής (cosine-rectangular) (Σχήμα 3), ενώ οι διαγνωστικές δοκιμές περιλαμβάνουν μέτρηση του συντελεστή απωλειών τάση (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 περιλαμβάνει θέσεις φθοράς, ανομοιογένειας και υδατίνους δένδριτες (Σχήμα 4), 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 ποσό προς μία ώρα, δεν θα αντέξει για πολύ



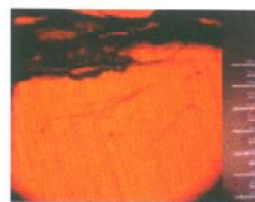
Σχήμα 3: Παλμογράφημα VLF τάσης συμμητονοειδούς-ορθογωνίας διπολικής μορφής



την ονομαστική τάση 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.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ VLF ΣΕ ΚΑΛΩΔΙΑ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

Κατά τη δοκιμή VLF ένας ηλεκτρικός δένδριτης, που εμφανίζεται σε ένα σημείο ανομοιογένειας της μόνωσης, ενισχύεται, προκαλώντας τη διάτρηση της μόνωσης. Η έναρξη της δένδροειδούς διάσπασης και ο χρόνος δημιουργίας του αγωγίσιμου καναλιού είναι συνάρτηση της συχνότητας και του πλάτους της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμής. Τα επίπεδα της εφαρμοζόμενης τάσης είναι 2U₀ έως 3U₀ (όπου U₀ 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, ημιτονοειδούς ή συνημιτονοειδούς-ορθογωνίας μορφής, συχνότητας από 0,01Hz έως 1Hz. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη συχνότητα είναι 0,1Hz. Όταν σε ένα σημείο ανομοιογένειας η τιμή του πεδίου



Σχήμα 4: Ηλεκτρικός δένδριτης αναπτυσσόμενος σε πλαστικό

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 αγωγίσιμα 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].

Το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου έχει διεξαγει πλήθος δοκιμών VLF σε εγκατεστημένα καλώδια ανά την Ελλάδα. Μέχρι στιγμής έχουν δοκιμασθεί συνολικά 238 καλώδια, στα οποία περιλαμβάνονται και 50 σύνδεσμοι (μούφες). Σφάλματα έχουν παρουσιασθεί σε 6 συνδέσμους (μούφες), εκ των οποίων οι δύο «έσκασαν» σε χρόνο μικρότερο του 1min, οι δύο σε 5min περίπου, ο ένας σε 10min περίπου και ο ένας σε 25min περίπου. Έχουν διαπιστωθεί επίσης σφάλματα σε 4 μανδύες κατά την ηλεκτρική δοκιμή του εξωτερικού μανδύα. Οι συσκευές VLF (Σχήμα 5) που διατίθενται από τις διάφορες εταιρείες έχουν δυνατότητα παροχής τάσης από 25kV έως 200kV και συχνότητας

Electrical Components



Σχήμα 5: Η συσκευή δοκιμής VLF του Εργαστήριου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.

0,1Hz ή και μικρότερη, ενώ τα επίπεδα των χωρητικότητων των καλωδίων που μπορούν να ελεγχθούν είναι 0,4μF – 50μF.

Στο Σχήμα 6 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.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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 αξιοπιστίας λειτουργίας του συστήματος καλωδίων, ακροκλιμαίων και συνδέσμων (μουφών). Είναι απαραίτητος ο έλεγχος των καλωδίων πριν την οριστική παραλαβή και λειτουργία τους, από εργαστήριο χαρακτηριζόμενο 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 υδατικούς δενδρίτες παρουσιάζουν σφάλματα («σκάνε») στην ίδια περίπου τάση, είτε με τάση VLF είτε με εναλλασσόμενη τάση βιομηχανικής συχνότητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[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] 400TM: "IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems", 2001.

[4] 400.2TM: "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)", 2004.

[5] Χ.Α.Χριστοδούλου, Ι.Φ.Γκόκος, Ι.Α.Σταθόπουλος, «Δοκιμές σε καλώδια μέσης τάσης», Δελτίο Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Τεύχος 398, Μάιος 2007 (Η εργασία αυτή παρουσιάστηκε στο 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο του Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων)

[6] 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.

[7] Richard Reid: "High Voltage VLF Test Equipment with Sinusoidal Waveform", Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE, pp.8-12.

[8] 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.

Σχήμα 6: Σχηματική διάταξη δοκιμών VLF

