



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Διαγνωστικές δοκιμές σε αλεξικέραυνα μέσης τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμμανουήλ Β. Αυγερινός

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Αθήνα, Ιούλιος 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

141

Διαγνωστικές δοκιμές σε αλεξικέραυνα μέσης τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμμανουήλ Β. Αυγερινός

Καθηγητής : Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Καθηγητής

Περικλής Δ. Μπούρκας
Καθηγητής

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2008

Εμμανουήλ Β. Αυγερινός

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στην οικογένειά μου

Περίληψη

Τα αλεξικέραυνα προσφέρουν προστασία έναντι των κεραυνικών εκκενώσεων. Ο προσδιορισμός συνεπώς της κατάστασης ενός αλεξικέραυνου αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό εγχείρημα καθώς μας δείχνει κατά πόσο ένα αλεξικέραυνο είναι κατάλληλο ή όχι για χρήση. Το κυριότερο κριτήριο για τον έλεγχο της κατάστασης ενός αλεξικέραυνου αποτελεί το ρεύμα διαρροής του και συγκεκριμένα η ωμική συνιστώσα του ρεύματος αυτού. Η ακριβής μέτρηση του συνολικού ρεύματος και η απομόνωση του ωμικού του μέρους αποτελούν αρκετά δυσχερείς διαδικασίες καθώς είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε εξωτερικές παρεμβολές όπως τονίζεται και στο διεθνές πρότυπο IEC 60099-4.

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζονται λοιπόν μία σειρά από τεχνικές για τον έλεγχο της κατάστασης ενός αλεξικέραυνου σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο, μερικές από τις οποίες βασίζονται και στην απομόνωση της ωμικής συνιστώσας του συνολικού ρεύματος διαρροής. Ειδικότερα, επιχειρείται ο προσδιορισμός του ωμικού ρεύματος διαρροής υπό συνθήκες περιβάλλοντος, υπό συνθήκες τεχνητής βροχής και μετά από καταπόνηση του αλεξικέραυνου με κρουστικές τάσεις. Επιπλέον, πραγματοποιείται μία διαγνωστική δοκιμή για τον έλεγχο της κατάστασης του αλεξικέραυνου μέσω της μέτρησης της αντίστασής του. Επιχειρείται τέλος, μία πρώτη προσπάθεια πεδιακής ανάλυσης ενός αλεξικέραυνου με τη χρήση του προγράμματος OPERA.

Λέξεις κλειδιά

Αλεξικέραυνο, μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ), ρεύμα διαρροής, αντίσταση μέτρησης, τεχνητή βροχή, καταπόνηση με κρουστική τάση, ανάλυση ηλεκτρικού πεδίου, κατανομή δυναμικού.

Abstract

Arresters offer protection against the lightning evacuations. The determination of the condition of the arrester constitutes therefore a particularly important task because it shows us whether an arrester is appropriate for use or not. The main manner for the control of the status of an arrester constitutes the measurement of its leakage current and specifically the resistant component of this current. The precise measurement of the total leakage current and the isolation of resistant part constitute highly difficult processes since they are particularly sensitive in exterior interferences as it is also mentioned in the international model IEC 60099-4.

The present diploma thesis presents a number of techniques for the control of the condition of a lightning arrester according to this model, some of which are based in the determination of the resistant component of the total leakage current. Specifically, it is attempted to measure the resistant leakage current under environmental conditions, under conditions of artificial rain and after the application of voltages impulses to the arresters. Moreover, it is presented a diagnostic trial for the control of the condition of an arrester through the measurement of its resistance. Last but not least, an analysis of the electrical field of an arrester is attempted with the use of the program OPERA.

Key Words

Arrester, non linear resistance (varistor), leakage current, measurement resistance, artificial rain, application of voltage impulses, analysis of the electrical field, distribution of the electrical dynamic.

Πρόλογος

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται ευρέως για την προστασία από το φαινόμενο του κεραυνού. Είναι δυνατόν να ελέγχει η κατάσταση στην οποία έχει περιέλθει ένα αλεξικέραυνο μέσω της μέτρησης του ρεύματος διαρροής του και ειδικότερα του ωμικού του μέρους. Η μέτρηση αυτή ωστόσο αποτελεί ένα εξαιρετικά δύσκολο έργο λόγω της ευαισθησίας της διαδικασίας σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Αναλυτικά:

Στο **πρώτο κεφάλαιο** περιγράφεται το φαινόμενο του κεραυνού και παρουσιάζονται οι κίνδυνοι οι οποίοι πηγάζουν από αυτόν όπως επίσης και τρόποι προστασίας για τις γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρική ενέργειας.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται μία εκτενής παρουσίαση του αλεξικέραυνου ως μέσο προστασίας από υπερτάσεις.

Στα **κεφάλαια τρία και τέσσερα** παρουσιάζεται μία ανασκόπηση του περιεχόμενου του Προτύπου IEC 60099-4 και IEC 60099-5 αντίστοιχα.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** επιχειρείται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυριότερων σχετικών εργασιών των τελευταίων ετών.

Στο **έκτο κεφάλαιο** περιγράφονται οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής.

Στο **έβδομο κεφάλαιο** πραγματοποιείται η προσομοίωση τόσο του ηλεκτρικού όσο και του δυναμικού πεδίου με τη χρήση του προγράμματος pc OPERA -2d.

Στο **όγδοο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, επισημαίνονται τα συμπεράσματα τα οποία προήλθαν από τις εργαστηριακές αυτές διαδικασίες, γίνεται μία γενικότερη εκτίμηση των αποτελεσμάτων και προτείνεται περαιτέρω μελέτη των δοκιμών αυτών.

Τέλος, σε αυτό το σημείο νιώθω την υποχρέωση να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα:

Στον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Ε.Μ.Π. για την εμπιστοσύνη την οποία έδειξε στο πρόσωπό μου με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στον κ. Χρήστο Αθ. Χριστοδούλου, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών Ε.Μ.Π. και Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη καθοδήγησή και ουσιαστική βοήθεια του, τον χρόνο τον οποίο διέθεσε και την άποψη συνεργασία την οποία είχαμε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Στον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π., για την σημαντική συμβολή του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας και τις χρήσιμες συμβουλές τις οποίες μου προσέφερε.

Στον κ. Χρήστο Ηλία για την τεχνική υποστήριξη και βοήθεια κατά την διεξαγωγή των δοκιμών.

Στον κ. Γιάννακα Άρη για την τεχνική υποστήριξη κατά την διεξαγωγή των δοκιμών.

Στην κ. Κονταργύρη Βασιλική, Διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π., για την καθοδήγησή της στην εκμάθηση του προγράμματος OPERA.

Στην κ. Ηλία Νικολέτα, υπεύθυνη ποιότητας του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π., στην κ. Ασημακοπούλου Φανή, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών Ε.Μ.Π. και Υποψήφια Διδάκτορα Ε.Μ.Π. και στον κ. Κατσιβέλη Παύλο, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών Ε.Μ.Π. για ην βοήθεια τους στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Στον κ. Οικονόμου Λάμπρο, για τις συμβουλές του στην επιλογή των δειγμάτων.

Στον κ. Μαυρόματο Κώστα από την διεύθυνση μεταφοράς ΔΕΗ για την παραχώρηση των δύο δειγμάτων.

Στους κ. Ρέππα Ανδρέα και Λύτρα Κώστα για την βοήθειά τους κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΚΔΕΠ.

Στον κ. Κάμπο για την συμπαράστασή του κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής.

Τέλος, στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξη και κατανόηση την οποία μου παρείχε κατά την πενταετή φοίτησή μου στο Ε.Μ.Π.

Εμμανουήλ Βασ. Αυγερινός

Ιούλιος 2008

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Ο Κεραυνός	1
1.1 Ιστορική Αναδρομή	1
1.2 Μηχανισμός Δημιουργίας.....	1
1.3 Κατηγορίες Κεραυνικών Εκκενώσεων.....	3
1.4 Στάδια Εκκένωσης.....	4
1.5 Τα Είδη του Κεραυνού	5
1.6 Ο Σφαιρικός Κεραυνός.....	8
1.7 Χαρακτηριστικά του Κεραυνού.....	9
1.8 Κεραυνική Στάθμη-Ισοκεραυνική Καμπύλη.....	10
1.9 Κίνδυνοι οι οποίοι πηγάζουν από τον Κεραυνό	11
1.10 Κεραυνικά Πλήγματα σε Δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής.....	13
1.10.1 Ιστορική Αναδρομή	13
1.10.2 Κατηγορίες και Μορφή των Γραμμών Μεταφοράς	14
1.10.3 Κεραυνικά Πλήγματα σε Γραμμές Μεταφοράς.....	16
1.11 Προστασία Γραμμών Μεταφοράς με Αγωγούς.....	17
Βιβλιογραφία	20
Κεφάλαιο 2: Αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης	21
2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Αλεξικέραυνα με διάκενα.....	21
2.3 Αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα.....	27
Βιβλιογραφία	33
Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση του Προτύπου IEC 60099-4	35
3.1 Γενικά περί Δοκιμών ποιοτικού Ελέγχου σε ηλεκτροτεχνικές Κατασκευές.....	35
3.2 Εργαστηριακές Δοκιμές σε Αλεξικέραυνα.....	37
3.3 Δοκιμές Σειράς.....	38
3.3.1. Θερμική Συμπεριφορά.....	38
3.3.2. Δοκιμή εσωτερικών Υπερτάσεων.....	39
3.3.3. Δοκιμή Σειράς με Εναλλασσόμενη Τάση.....	40
3.4 Δοκιμές τύπου.....	41
3.4.1 Έλεγχος της μονωτικής Ικανότητας του Αλεξικέραυνου.....	41
3.4.1.1 Δοκιμή κρουστικής Τάσης.....	41
3.4.1.2 Δοκιμή εναλλασσόμενης Τάσης βιομηχανική Συχνότητας.....	42
3.4.2 Έλεγχος Παραμένουσας Τάσης.....	43
3.4.2.1 Έλεγχος Παραμένουσας Τάσης υπό κρουστικό διακοπτικό Ρεύμα.....	43
3.4.2.2 Έλεγχος Παραμένουσας Τάσης υπό κρουστικό κεραυνικό Ρεύμα.....	44
3.4.2.3 Έλεγχος Παραμένουσας Τάσης απότομου Ρεύματος.....	44
3.4.3 Έλεγχος εσωτερικών μερικών Εκκενώσεων.....	45
3.4.4 Έλεγχος Ραδιοπαρεμβολών Τάσης.....	45
3.4.5 Έλεγχος μηχανικής Αντοχής (Θλίψη-Εφελκυσμός).....	46

3.4.5 Μακράς Διάρκειας Έλεγχος Αντοχής Ρεύματος	46
Βιβλιογραφία	47
Κεφάλαιο 4: Ανασκόπηση του Προτύπου IEC 60099-5	48
4.1 Εισαγωγικά	48
4.2 Ιδιότητες του Ρεύματος Διαρροής των μη γραμμικών Αντιστάσεων Οξειδίων του Ψευδαργύρου.	50
4.3 Μέτρηση του Συνολικού Ρεύματος Διαρροής.....	52
4.4 Μέτρηση του Ωμικού Ρεύματος Διαρροής ή της Απώλειας Ενέργειας	53
Κεφάλαιο 5: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	58
Βιβλιογραφία	67
Κεφάλαιο 6: Εργαστηριακές Δοκιμές	69
6.1 Εξεταζόμενα Δείγματα	69
6.2 Μέτρηση Αντίστασης Αλεξικέραυνου με Τάση 5 kV	70
6.3 Μέτρηση του Ρεύματος Διαρροής και Προσδιορισμός του Ωμικού Μέρους	72
Κεφάλαιο 7: Προσομοίωση Κατανομής Ηλεκτρικού Πεδίου και Δυναμικού με Χρήση του Προγράμματος OPERA	141
7.1 Εισαγωγικά	141
7.2 Μέθοδοι Επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών Προβλημάτων	141
7.2.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	143
7.3 Το πρόγραμμα PC OPERA-2d	146
7.3.1 Εισαγωγικά	146
7.3.2 Προγράμματα.....	147
7.3.3 Μοντελοποίηση-Προεπεξεργασία	148
7.3.4 Ανάλυση-Μετεπεξεργασία	148
7.3.5 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων στο PC OPERA -2d	149
7.3.6 Επίλυση.....	150
7.4 Επίλυση του Προβλήματος.....	151
7.4.1 Εισαγωγή της Γεωμετρίας στο PC OPERA-2d	151
7.4.2 Δημιουργία Πλέγματος.....	153
7.4.3 Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού	155
7.4.4 Υπολογισμός και Κατανομή ηλεκτρικού Πεδίου	158
7.5 Συμπεράσματα – Επέκταση	161
Βιβλιογραφία	161
Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα, Παρατηρήσεις και Επόμενη Μέρα	162

Κεφάλαιο 1: Ο Κεραυνός

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Από τα παλαιά χρόνια φαινόμενα ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού όπως ο κεραυνός προκαλούσαν τόσο το δέος όσο και τον θαυμασμό του ανθρώπου απέναντι στη φύση. Η άγνοια και η μη δυνατότητα ερμηνείας τους οδηγούσε συχνά στην απόδοσή τους σε υπερφυσικές δυνάμεις. Τις περισσότερες φορές, μάλιστα ο άνθρωπος αδυνατώντας να τα εξηγήσει τα θεωρούσε θεϊκά σημάδια και οιωνούς με τα οποία η εκάστοτε θεότητα φανέρωνε είτε την αγανάκτηση είτε την ικανοποίησή της για τα ανθρώπινα έργα. Χαρακτηριστικό άλλωστε παράδειγμα αποτελεί η αρχαία Ελλάδα. Ειδικότερα, κατά την ελληνική μυθολογία ο κεραυνός θεωρείται αποκλειστικό προνόμιο του Δία το οποίο απέκτησε ως δώρο από τους Κύκλωπες. Με αυτόν, ο πατέρας των θεών απειλεί τους εχθρούς του και τον στέλνει στη γη για να ευεργετήσει τους αγαθούς ή για να τιμωρήσει τους υβριστές και τους άδικους. Σημαντικές, παράλληλα αναφορές στα φαινόμενα του κεραυνού και της αστραπής συναντά κανείς τόσο στο έργο του Έλληνα συγγραφέα Πλουτάρχου (50 - 120 μ.Χ.) όσο και σε αυτό του Γάλλου αστρονόμου Φλαμμαρίονα (Camille Flammarion 1846-1936). Ένας Αμερικάνος, προγενέστερος του Φλαμμαρίονα ωστόσο ήταν αυτός ο οποίος κατάφερε να απομυθοποιήσει τον κεραυνό, αποκλείοντας παράλληλα κάθε θεοκεντρική θεωρία που αφορούσε την ερμηνεία του ως φυσικό φαινόμενο: Ο Φραγκλίνος (Benjamin Franklin 1706-1790). Ο διαπρεπής αυτός φυσικός και πολιτικός κατάφερε να αποδείξει ότι ο κεραυνός δεν είναι παρά μία ηλεκτρική εκκένωση. Με την απόδειξή του αυτή προσπάθησε να εξαλείψει κάθε ίχνος θεοκεντρισμού από την εξήγησή του κεραυνού.

1.2 Μηχανισμός Δημιουργίας

Στη σημερινή εποχή πλέον οι κεραυνοί έχουν πάψει να αποτελούν μυστήριο καθώς ο μηχανισμός δημιουργίας του γίνεται όλο και πιο κατανοητός χωρίς ωστόσο να έχει επιτευχθεί πλήρως η αποσαφήνισή του. Οι κεραυνοί συνοδεύονται τόσο από φωτεινά

φαινόμενα (τις αστραπές) όσο και από ηχητικά (τις βροντές). Δημιουργούνται συνήθως σε σύννεφα τύπου σωρειτομελανία (cumulonimbus), χωρίς ωστόσο να αποκλείεται η εμφάνισή τους σε σύννεφα τύπου μελανόστρωμα (nimbostratus), σε χιονοθύελλες, κονιορτοθύελλες, σε νέφη τα οποία συνοδεύουν την έκρηξη ενός ηφαιστείου αλλά ακόμη και σε καθαρό ουρανό.

Οι κεραυνοί δημιουργούνται λόγω του διαχωρισμού φορτίου σε ένα νέφος. Ο διαχωρισμός αυτός δημιουργεί με τη σειρά του μία ηλεκτρική φόρτιση στην συγκεκριμένη περιοχή της ατμόσφαιρας, η οποία όταν αυξηθεί σημαντικά, προκαλεί την διάσπαση του ατμοσφαιρικού αέρα από τα ηλεκτρικά πεδία, τα οποία συνδέονται με τη φόρτιση αυτή, προκαλώντας κατά αυτόν τον τρόπο την εμφάνιση του φαινομένου του κεραυνού.

Κατά τη διάρκεια μία καταιγίδας δηλαδή λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός φορτίου σε ένα νέφος [1], γεγονός το οποίο δίνει στο νέφος τη δομή ενός ηλεκτρικού διπόλου. Ειδικότερα, θετικά φορτία κινούνται προς το ανώτερο τμήμα του νέφους παρουσιάζοντας έτσι το τελευταίο στο κάτω μέρος του ένα σημαντικό φορτίο αρνητικής πολικότητας (κυμαινόμενο από δεκάδες ως εκατοντάδες Cb) και στο πάνω μέρος του ένα φορτίο θετικής πολικότητας. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει συμφωνία σχετικά με το μηχανισμό αυτό δημιουργίας του φορτίου. Δύο αποτελούν ωστόσο τις επικρατούσες θεωρίες: Αυτή του Wilson και αυτή του Simpson [1]. Η πρώτη βασίζεται στην παραδοχή ότι στην ατμόσφαιρα υπάρχουν πολυάριθμα ιόντα στα οποία προσκολλώνται σταγονίδια και σκόνη και πέφτουν στη γη. Η θεωρία του Simpson αντιθέτως ερμηνεύει τον διαχωρισμό ως αποτέλεσμα της ύπαρξης ανοδικών ρευμάτων στη ατμόσφαιρα τα οποία οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές μέσα στη ατμόσφαιρα. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο έχει παρατηρηθεί ότι ο παραπάνω διαχωρισμός πραγματοποιείται από μερικά ως τριάντα λεπτά

ενώ τόσο η πυκνότητα όσο και η διασπορά των φορτίων μέσα σε ένα νέφος μεταβάλλονται διαρκώς.



Σχήμα 1: Φωτογραφία με κεραυνικά πλήγματα

1.3 Κατηγορίες Κεραυνικών Εκκενώσεων

Τρεις είναι οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι κεραυνικές εκκενώσεις: Από ένα σύννεφο προς το έδαφος ή και αντίστροφα, ανάμεσα σε διαφορετικά σύννεφα (διανεφικές εκκενώσεις) και μέσα στο ίδιο το σύννεφο (ενδονεφικές εκκενώσεις).

Η πρώτη κατηγορία αποτελεί την πιο κατανοητή χωρίς ωστόσο να είναι και η πιο συνηθισμένη. Οι κεραυνοί αυτού του είδους παρατηρούνται κοντά στην αρνητικά φορτισμένη περιοχή του νέφους και εμφανίζονται, όταν το επιτόπιο ηλεκτρικό πεδίο προσεγγίζει την τιμή κατά την οποία προκαλείται ιονισμός του ατμοσφαιρικού αέρα (η οποία ισούται περίπου με 30 kV/cm). Όταν το πεδίο αυτό βρίσκεται πλησίον του νέφους έχουμε κατερχόμενη κεραυνική εκκένωση ενώ όταν βρίσκεται πλησίον του εδάφους έχουμε ανερχόμενη [1].

Η δεύτερη κατηγορία η οποία αποτελεί και την πιο σπάνια λαμβάνει χώρα σε ύψος μεταξύ 1 και 12 km, ενώ χαρακτηρίζεται και από το μεγάλο σε μήκος της κεραυνικού τόξου.

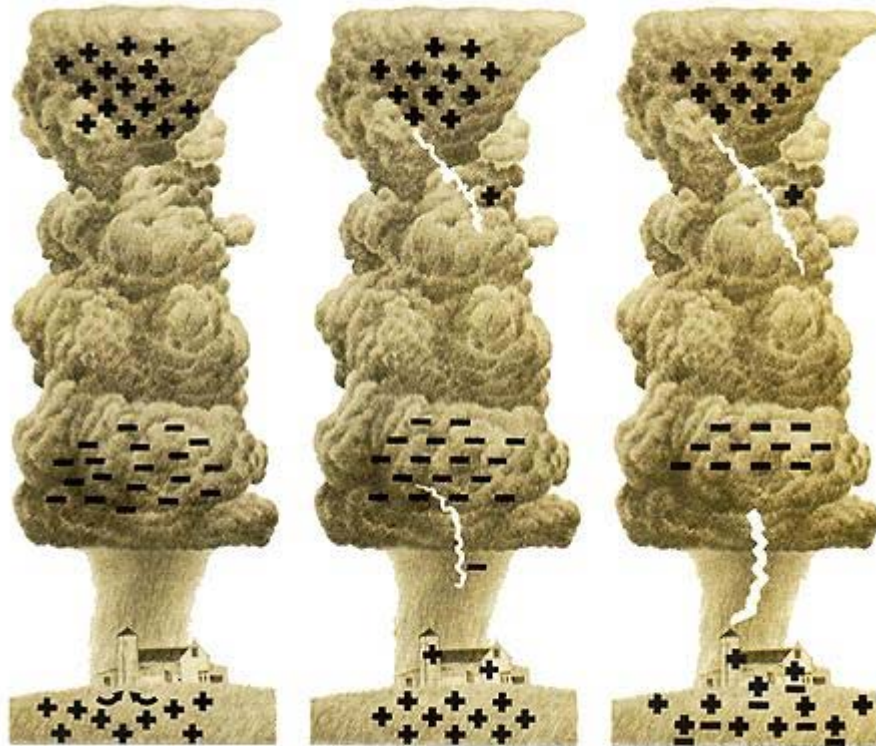
Τέλος, οι κεραυνικές εκκενώσεις οι οποίες πραγματοποιούνται εντός ενός νέφους αποτελούν και τη συνηθέστερη μορφή. Η εν λόγω εκκένωση γίνεται μεταξύ του ανώτερου και του κατώτερου θετικά και αρνητικά φορτισμένου χωρίου ενώ η τιμή του ρεύματός της κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες ως χίλια Amperes [1]. Κατά τη διάρκεια επίσης της εκκένωσης το σύννεφο παρουσιάζει μία συνεχή φωτεινότητα της τάξεως των 0,2 sec με μερικούς παλμούς μεγαλύτερης λαμπρότητας διάρκειας 1 msec.

1.4 Στάδια Εκκένωσης

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό τα παραπάνω διαφορετικά είδη κεραυνικών εκκενώσεων παρουσιάζουν και διαφορετικά στάδια εκκένωσης. Κατά το πρώτο στάδιο ανάπτυξης ενός κεραυνού μεταξύ νέφους και εδάφους παρατηρείται μία αμυδρή φωτεινή διαδικασία σε εξέλιξη με κανονικά διακριτά βήματα μήκους 50 ή 100 m και με διαστήματα παύσεως μεταξύ των βημάτων που διαρκούν μερικές δεκάδες msec [1], η οποία κατεβαίνει προς το έδαφος (ή ανεβαίνει από αυτό) με τη μορφή διακλάδωσης (κλιμακωτός οδηγός). Ο κλιμακωτός αυτός οδηγός διαδίδεται με μέση ταχύτητα περί τα 10^5 m/sec μεταφέροντας ρεύμα της τάξεως των 100 Amperes. Καθώς ο οδηγός αυτός πλησιάζει στο έδαφος επάγεται εκεί ένα αντίθετο φορτίο. Όταν το φορτίο αυτό αυξηθεί μέχρι κάποια συγκεκριμένη τιμή και καθώς το ρεύμα μεταξύ του προπορευόμενου τμήματος του κεραυνού και του σημείου όπου θα πέσει ο κεραυνός αυξάνεται σημειώνεται μία εκφόρτιση προς τα πάνω με αφετηρία το σημείο αυτό του εδάφους για να συναντήσει τον κλιμακωτό οδηγό σε ύψος πενήντα περίπου μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Όταν πραγματοποιηθεί αυτή η «συνάντηση» η επιστρέφουσα εκκένωση αρχίζει από το έδαφος προς το νέφος. Το πλήγμα αυτό (στο ρεύμα του οποίου μάλιστα οφείλονται και τα καταστροφικά αποτελέσματα των κεραυνών) κινείται με ταχύτητα ίση περίπου με 5×10^7 m/sec, το ρεύμα του κυμαίνεται από λίγα ως 250 kA και η θερμοκρασία εντός του διαύλου (κατά μήκος του οποίου κινείται η επιφόρτιση) της τάξεως των 15000^0 - 20000^0 C [1]. Στη συνέχεια, τη στιγμή αυτή το αρνητικό φορτίο του σύννεφου ουδετεροποιείται από το επαγόμενο στο έδαφος θετικό φορτίο και γίνεται και αντιληπτό το φαινόμενο από το ανθρώπινο μάτι. Η επιστρέφουσα αυτή εκκένωση δύναται να συνοδεύεται και από άλλες δευτερεύουσες εκκενώσεις οι οποίες πλέον

ξεκινούν όχι με κλιμακωτό οδηγό αλλά με την εμφάνιση ενός φωτεινού βέλους, μήκους 50 περίπου μέτρων, που διαδίδεται στον διάυλο της επιστρέφουσας εκκένωσης προς τα κάτω. Με ταχύτητα 10^6 m/sec, ο βελοειδής οδηγός μεταφέρει ένα ρεύμα της τάξης των 1.000 Amperes προς το έδαφος. Ξανά μια φορτισμένη περιοχή στο σύννεφο βραχυκυκλώνεται προς το έδαφος και εμφανίζεται μια επιστρέφουσα εκκένωση. Η ακολουθία αυτή, βελοειδής οδηγός-επιστρέφουσα εκκένωση, σημειώνεται συνήθως τρεις με τέσσερις φορές, παρ'όλο που έχει αναφερθεί και κεραυνός που είχε 26 επιμέρους εκκενώσεις και είχε διάρκεια δύο δευτερολέπτων. Όταν ένας κεραυνός αποτελείται από περισσότερες της μιας εκκενώσεις, οι επόμενες (δεύτερη, τρίτη κλπ) επιστρέφουσες εκκενώσεις αντλούν φορτία από διαδοχικά υψηλότερα κέντρα φορτίου στα σύννεφα τύπου σωρειτομελανία.

Κατά τη φάση ροής επιστρέφουσας εκκένωσης καταναλώνεται μέσα στον διάυλο του κεραυνού ενέργεια ίση με 10^5 J/m. Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε ενέργεια διάσπασης, ιοντισμού, διέγερσης και κινητική των μορίων, σε ενέργεια εκτόνωσης του διαύλου και σε ακτινοβολία. Οι φασματοσκοπικές μετρήσεις αποκαλύπτουν ότι τα μόρια του αέρα, κυρίως το άζωτο, το οξυγόνο και οι υδρατμοί, διασπώνται στα αντίστοιχα άτομα και ότι από κάθε άτομο απομακρύνεται κατά μέσο όρο ένα ηλεκτρόνιο. Η μετατροπή των μορίων του αέρα σε απλά ιοντισμένο πλάσμα σημειώνεται μέσα σε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου. Στον χρόνο αυτό, η θερμοκρασία του πλάσματος είναι τουλάχιστον 30.000 K και η πίεσή του μεγαλύτερη από 10 atm. Η υψηλή αυτή πίεση ξεπερνά κατά πολύ την πίεση του περιβάλλοντος. Ο διάυλος της επιστρέφουσας εκκένωσης εκτονώνεται με υπερηχητική ταχύτητα και το κρουστικό κύμα μετατρέπεται σε ηχητικό, στη βροντή που ακούμε. Υπολογίζεται ότι το 1% της ενέργειας καταναλώνεται στα μόρια και λιγότερο από 1% εκπέμπεται ως ακτινοβολία στην ορατή και την υπέρυθη περιοχή. Συνεπώς το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας πιθανότατα μετατρέπεται σε ενέργεια εκτόνωσης του διαύλου, μια διαδικασία που δεν διαρκεί περισσότερο από 10-20 εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου.



Σχήμα 2: Κεραυνός μεταξύ νέφους και εδάφους [2]

Στην περίπτωση των ενδονεφικών εκκενώσεων η εκκένωση ξεκινά με έναν οδηγό που διαδίδεται ανάμεσα σε κέντρα φορτίου. Η εμφάνιση παλμών λαμπρότητας υποδηλώνει την ύπαρξη μικρότερων εκκενώσεων επιστροφής, καθώς ο οδηγός φτάνει σε θύλακες φορτίου. Η ταχύτητα διάδοσης της εκκένωσης είναι της τάξεως των 10^4 m/sec ενώ το ρεύμα της μερικές χιλιάδες Amperes.

1.5 Τα Είδη του Κεραυνού

Οι κεραυνικές εκκενώσεις διαχωρίστηκαν παραπάνω με βάση μια επιστημονική ταξινόμηση. Και πριν όμως γίνουν γνωστές οι συνιστώσες ενός κεραυνού, οι άνθρωποι είχαν επινοήσει δικές τους μεθόδους για την ταξινόμηση των κεραυνών. Οι ονομασίες γραμμική, διάχυτη, ραβδωτή, ταινιωτή, θερμική, κροκοειδής, θερμή και ψυχρή εξηγούνται σε σχέση με τους κεραυνούς οι οποίοι είτε πέφτουν στο έδαφος είτε ξεσπούν μέσα στα σύννεφα.

Η διχαλωτή αστραπή συνδέεται με τους κεραυνούς που εμφανίζουν πολλούς κλάδους και πέφτουν από τα σύννεφα προς το έδαφος. Η "διχάλα" είναι ακριβώς η εκτενής πολυδιακλάδωση που δημιουργείται από πολυάριθμους κλιμακωτούς οδηγούς που κινούνται προς τη διεύθυνση του εδάφους, ώσπου ένας από αυτούς να έλθει τυχαία σε επαφή με το έδαφος. Οι κλιμακωτοί οδηγοί που δεν φτάνουν στο έδαφος γίνονται κλάδοι της πρώτης επιστρέφουσας εκκένωσης. Αν υπάρχουν πολύ λίγοι κλάδοι, η αστραπή είναι γνωστή ως ραβδωτή.

Μια εκκένωση που ξεσπά μέσα σ' ένα σύννεφο (ενδονεφικός κεραυνός) είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος κεραυνού και συνήθως φωτίζει το σύννεφο χωρίς ο διάυλος να γίνεται ορατός. Το σύννεφο δίνει τότε την εντύπωση ενός λευκού σεντονιού, απ' όπου και η ονομασία διάχυτος κεραυνός [3].

Ο θερμικός κεραυνός είναι ένα είδος μακρινής εκκένωσης από σύννεφο προς το έδαφος, που ξεσπά τα ζεστά καλοκαιρινά βράδια και έχει ένα χαρακτηριστικό κόκκινο ή πορτοκαλί χρώμα.

Οι αστραπές εκπέμπουν φως σε όλα τα χρώματα του ορατού φάσματος (από τη μπλε ακτινοβολία που έχει το ελάχιστο μήκος κύματος, ως την κόκκινη που έχει το μέγιστο). Το μπλε φως σκεδάζεται πιο πολύ από το κόκκινο, γεγονός το οποίο έχει ως αποτέλεσμα το κόκκινο φως να φτάνει σε πιο μακρινούς παρατηρητές, στους οποίους έτσι δίνεται η εντύπωση ότι ο κεραυνός είναι κόκκινος.

Ο θερμός και ο ψυχρός κεραυνός συνδέονται με την παρατήρηση ότι άλλοι κεραυνοί προκαλούν φωτιές στα δάση και άλλοι όχι. Παρόλο που η φύση του υλικού που πλήττεται από τον κεραυνό διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για το αν θα προκληθεί φωτιά ή όχι, τα χαρακτηριστικά του ρεύματος επιστροφής της επιστρέφουσας εκκένωσης είναι πιο σημαντικά. Οι κεραυνοί που περιλαμβάνουν εκκενώσεις με συνεχές ρεύμα μερικών εκατοντάδων Amperes και διαρκούν χιλιοστά του δευτερολέπτου μετά τη φάση του υψηλού ρεύματος έχει αποδειχθεί ότι δύναται να προκαλέσουν πυρκαγιές στα δάση και χαρακτηρίζονται κατά συνέπεια ως θερμοί. Οι κεραυνοί χωρίς συνεχές ρεύμα που πέφτουν σε δέντρα προξενούν, συνήθως, μόνο καταστροφές, όπως μία έκρηξη, και είναι γνωστοί ως ψυχροί κεραυνοί.

Μερικές σπάνιες μορφές κεραυνών περιλαμβάνουν αστραπές με μορφή ταινίας ή κομπολογιού (κροκοειδής κεραυνός). Οι κεραυνοί αυτοί είναι μια μορφή εκκενώσεων

που ξεσπούν από ένα σύννεφο προς το έδαφος. Αν ένας κεραυνός συνίσταται από διαδοχικές εκκενώσεις και σε διεύθυνση κάθετη προς τη γραμμή παρατήρησης φυσάει δυνατός άνεμος, ο διάυλος εκτονώνεται προς τα πλάγια και οι διαδοχικές εκκενώσεις μετατοπίζονται. Λόγω της αδράνειας του αμφιβληστροειδούς χιτώνα του ματιού, το οποίο διατηρεί για κάποιον επιπλέον χρόνο το είδωλο, η λάμψη εμφανίζεται σαν μια ταινία που αποτελείται από αρκετές εκκενώσεις.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να καταγραφεί και φωτογραφικά με αργή κίνηση μιας μηχανής, από τη μια πλευρά ως την άλλη, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ένας αργός διαχωρισμός των επιμέρους εκκενώσεων ενός κεραυνού. Αυτός άλλωστε ήταν και ο τρόπος με τον οποίο, στην πραγματικότητα, πρωτοαναγνωρίστηκαν οι επιμέρους εκκενώσεις γύρω στο 1900. Κροκοειδής κεραυνός έχει φωτογραφηθεί σε αρκετές περιπτώσεις. Η κύρια φωτεινότητα της αστραπής σπάει σε φωτεινά τμήματα ή "χάντρες", καθώς η ένταση του φωτός του διαύλου ελαττώνεται. Η χρονικά αυξανόμενη φωτεινότητα της "χάντρας" μπορεί να οφείλεται σε τμήματα του διαύλου που παρατηρούνται το ένα πίσω από το άλλο ή σε τμήματα που έχουν από μόνα τους μεγαλύτερη διάμετρο και κατά συνέπεια αργούν περισσότερο να ψυχθούν [3].

1.6 Ο Σφαιρικός Κεραυνός

Η πιο σπάνια ωστόσο και μυστηριώδης μορφή κεραυνού είναι ο σφαιρικός ή σφαιροειδής κεραυνός, που αποτελείται από φλεγόμενη σφαίρα, η οποία εμφανίζεται κατά τη διάρκεια καταιγίδας και κοντά συνήθως σε μέρος όπου έπεσε ένας κεραυνός. Ο εν λόγω κεραυνός κινείται με οριζόντια ταχύτητα από 1-2 m/sec , έχει τη μορφή φωτεινής σφαίρας διαμέτρου από 10-100 cm [2], το χρώμα της μοιάζει με αυτό της φλόγας, έχει χρόνο ζωής μερικών δευτερολέπτων και ενδέχεται να συνοδεύεται και από ένα είδους σφυρίγματος. Ορισμένοι από τους σφαιρικούς κεραυνούς εξαφανίζονται αθόρυβα ενώ άλλοι προκαλούν μία έκρηξη η οποία δύναται να προκαλέσει και περιορισμένης εκτάσεως ζημιές. Οι θεωρίες για τον σφαιροειδή κεραυνό μπορούν να ταξινομηθούν σ' εκείνες που προτείνουν μια εξωτερική πηγή ενέργειας και σ' εκείνες που προτείνουν μια εσωτερική πηγή ενέργειας. Καμιά από τις θεωρίες ωστόσο δεν κατάφερε

να εξηγήσει την κινητικότητα της φωτεινής σφαίρας ή τον λόγο για τον οποίον αυτή δεν υπερυψώνεται, όπως θεωρητικά θα έπρεπε να συμβαίνει σε θερμό πλάσμα αερίου που βρίσκεται σε ισορροπία από την άποψη της πίεσης. Καμιά αυθεντική φωτογραφία σφαιροειδούς κεραυνού δεν έχει δημοσιευθεί μέχρι σήμερα γεγονός το οποίο δημιουργεί εύλογες αμφιβολίες σχετικά με την ύπαρξη ή όχι του φαινομένου αυτού, έχει όμως αφιερωθεί ερευνητική προσπάθεια στο φαινόμενο αυτό χωρίς ωστόσο κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα.

1.7 Χαρακτηριστικά του Κεραυνού

Ο κεραυνός ως ηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από 4 παραμέτρους οι οποίες μάλιστα μπορούν να επιφέρουν αρνητικά αποτελέσματα τόσο στις ανθρώπινες ζωές όσο και στις τεχνικές εγκαταστάσεις:

- Η μέγιστη τιμή ρεύματος (i_{\max}): Η μέγιστη τιμή είναι αυτή η οποία προκαλεί τόσο την υπερπήδηση μονωτήρων όσο και την καταστροφή των μονωτικών υλικών καθώς ανυψώνεται το δυναμικό του σημείου όπου έπεσε ο κεραυνός [1].
- Η μέγιστη κλίση του ρεύματος του κεραυνού [$(di/dt)_{\max}$]: Η εν λόγω κλίση προσδιορίζει τις τάσεις λογικών κυκλωμάτων ή κυκλωμάτων στοιχείων συστημάτων πλοήγησης αεροσκαφών και γενικότερα όλα τα είδη επαγωγικών πτώσεων τάσης [1].
- Το μεταφερόμενο φορτίο ($\int_0^{\infty} i(t) dt$): Αποτελεί το μέτρο της ενέργειας του κεραυνού προς μεταλλικές επιφάνειες όπως και αυτό της διάχυσης του μεταβατικού ηλεκτρικού πεδίου μέσω μεταλλικών κλωβών [1]. Φαινόμενα όπως η τοπική τήξη και διάτρηση μετάλλων προκαλείται συνήθως από το μεταφερόμενο φορτίο του κεραυνού.

- Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος $(\int_0^{\infty} i^2(t) dt)$: Αποτελεί ποσό ανάλογο με την ενέργεια της κεραυνικής εκκένωσης και δύναται να προκαλέσει θερμικά φαινόμενα (όπως η έναυση εύφλεκτων υγρών ή αερίων) [1].

1.8 Κεραυνική Στάθμη-Ισοκεραυνική Καμπύλη

Μία περιοχή χαρακτηρίζεται από την κεραυνική στάθμη (γνωστή και ως κεραυνικό επίπεδο). Η στάθμη αυτή ορίζεται ως το πλήθος των ημερών κατά τις οποίες παρατηρείται καταιγίδα στην συγκεκριμένη περιοχή (ή αλλιώς γίνονται αντιληπτές κεραυνικές εκκενώσεις μέσω του χαρακτηριστικού θορύβου της βροντής στην περιοχή αυτή), ορισμός βέβαια αρκετά υποκειμενικός ο οποίος μάλιστα αγνοεί και την ποικιλία και σοβαρότητα των θυελλών [1]. Μέσω του παραπάνω κριτηρίου έχουμε την δυνατότητα να κατατάξουμε τις διάφορες περιοχές. Ενώνοντας λοιπόν τις περιοχές ενός χάρτη οι οποίες παρουσιάζουν το ίδιο κεραυνικό επίπεδο προκύπτει μία ισοκεραυνική καμπύλη. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ισοκεραυνικές καμπύλες όλης της υφηλίου.



Σχήμα 3: Οι Ισοκεραυνικές Καμπύλες της Υφηλίου [1]

Με τη βοήθεια του μέσου αριθμού των ημερών κατά τις οποίες γίνεται αντιληπτός ένας κεραυνός σε μία περιοχή (T) δίνεται ο αριθμός των κεραυνών ανά μονάδα επιφάνειας και ανά έτος στην συγκεκριμένη περιοχή (N_s):

$$N_s = T/7 \text{ κεραυνοί/km}^2 \text{ έτος} \quad (1.1)$$

Αξίζει επίσης να παρατηρηθεί ότι η τιμή του N_s επηρεάζεται τόσο από την φύση της θύελλας όσο και από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής (στις ορεινές περιοχές ειδικότερα παρατηρούνται περισσότεροι κεραυνοί από ότι στις πεδινές).

1.9 Κίνδυνοι οι οποίοι πηγάζουν από τον Κεραυνό

Εκτός από τις εξωτερικές υπερτάσεις, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω, με τις δυσάρεστες συνέπειές τους στις γραμμές μεταφοράς αλλά και στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις γενικότερα ο κεραυνός μπορεί να γίνει αιτία σημαντικών καταστροφών και να οδηγήσει ακόμα και στην απώλεια της ανθρώπινης ζωής. Οι κεραυνοί που πλήττουν απευθείας ανθρώπους προκαλούν συνήθως τον θάνατο και προξενούν τους περισσότερους θανάτους από οποιοδήποτε άλλο μετεωρολογικό φαινόμενο. Οι πτώσεις ωστόσο κεραυνών απευθείας σε έναν άνθρωπο δεν είναι και κατ' ανάγκη θανατηφόρες, αν εφαρμοστούν σε αυτόν έγκαιρα μαλάξεις καρδιάς και παρατεταμένη τεχνητή αναπνοή [5]. Και αυτό διότι ένα άτομο το οποίο πλήττεται από κεραυνό χάνει τις αισθήσεις του και διακόπτεται η λειτουργία της καρδιάς και της αναπνοής του. Η πιθανή ανάρρωση ωστόσο μπορεί να είναι και πλήρης εκτός από πιθανές βλάβες στην όραση και στην ακοή του ατόμου.

Οι σημαντικότερες υλικές καταστροφές προκαλούνται από τα χτυπήματα του κεραυνού σε επίγεια αντικείμενα τα οποία δεν έχουν καλές ηλεκτρογειώσεις. Ο κεραυνός συχνά διαπερνάει το υλικό σχηματίζοντας έτσι στενούς αγωγούς, στους οποίους τείνει το ρεύμα του κεραυνού ενώ ένα μέρος του υλικού εξατμίζεται κατά την έκρηξη καθώς στους αγωγούς αυτούς δημιουργείται πολύ υψηλή θερμοκρασία. Τα παραπάνω καταλήγουν στο διαμελισμό του αντικειμένου που πλήττεται από κεραυνό και στην ανάφλεξη των στοιχείων του [1]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η δυνατότητα

ενός κεραυνού αρχικά να διαμελίσσει και στη συνέχεια να εκσφεντονίσει κομμάτια βράχων των οποίων το βάρος προσεγγίζει τους 5 τόνους. Παράλληλα, είναι δυνατόν να εμφανιστούν μεγάλες διαφορές δυναμικών και ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ διάφορων αντικειμένων στο εσωτερικό της κατασκευής τους οι οποίες δύνανται να προκαλέσουν πυρκαγιές.

Μεγάλα δένδρα, υψηλά κτίρια, καπνοδόχοι, σκάφη που πλέουν στη θάλασσα, ακόμη και κολυμβητές, αποτελούν σημεία έλξης των κεραυνών. Συχνά τα θύματα δεν πλήττονται άμεσα από τον κεραυνό, αλλά από τα ισχυρά επαγωγικά ρεύματα που δημιουργούνται στην περιοχή πτώσης του. Βασικοί κανόνες αποφυγής της κεραυνοπληξίας αποτελούν τόσο η απομάκρυνση από υψηλά και μεμονωμένα αντικείμενα, όπως δένδρα, την ώρα της καταιγίδας όσο και η αποφυγή επαφής με μεταλλικά αντικείμενα [3].



Σχήμα 4: Φωτογραφία με κεραυνό που πλήττει δέντρο

1.10 Κεραυνικά Πλήγματα σε Δίκτυα Μεταφοράς και Διανομής

1.10.1 Ιστορική Αναδρομή

Τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσίασαν μία συνεχή και αλματώδη ανάπτυξη κατά τον 20^ο αιώνα. Εμφανίστηκαν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα οπότε και έκαναν την εμφάνισή τους και οι πρώτες εφαρμογές του ηλεκτρισμού. Στη σημερινή πλέον εποχή, οι γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτουν το σύνολο των κατοικημένων περιοχών εξασφαλίζοντας έτσι την ηλεκτροδότηση του συνόλου των καταναλωτών. Την τελευταία ωστόσο δεκαετία η σημαντική ανάπτυξη των τηλεπικοινωνιακών μέσων σε συνδυασμό με την ανάγκη αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιφέρουν αναπόφευκτα την ανάγκη για ορισμένες επιθυμητές αλλαγές στην τεχνική της μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση των καταναλωτών σε συνδυασμό με την πληρέστερη εκμετάλλευση των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Στη χώρα μας το σύνολο του συστήματος παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας ανήκει στην Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Ένα σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να διακριθεί στα παρακάτω τμήματα:

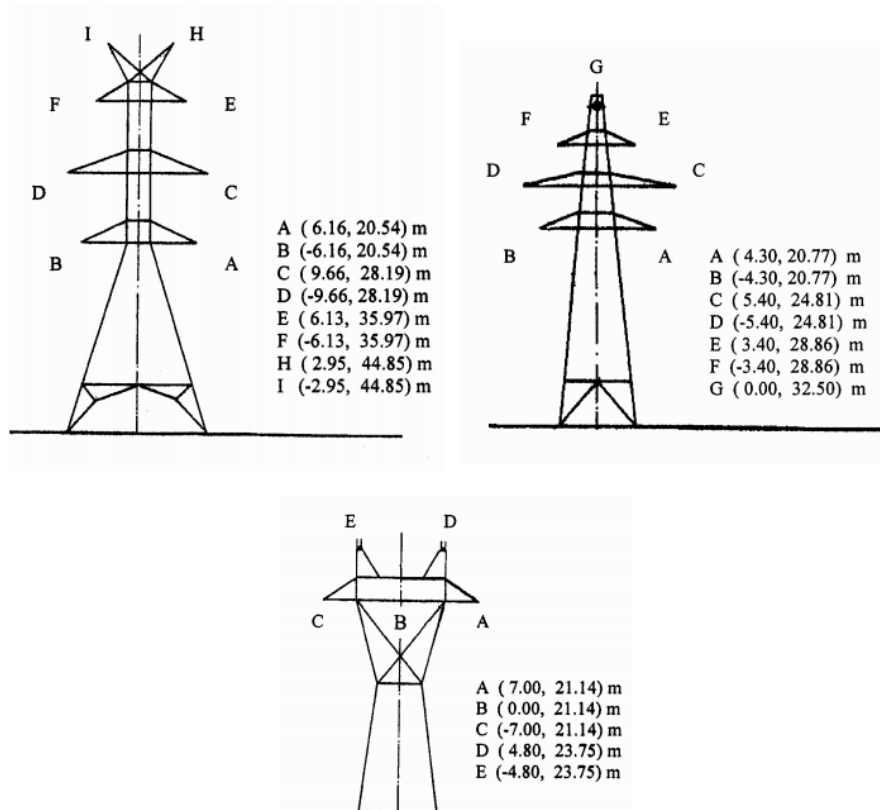
- Τους σταθμούς παραγωγής, όπου και παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια.
- Τα δίκτυα μεταφοράς, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η σύνδεση των σταθμών παραγωγής μεταξύ τους και η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας πλησίον των κέντρων κατανάλωσης (YYT, YT).
- Τα δίκτυα διανομής, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές (MT, XT).

1.10.2 Κατηγορίες και Μορφή των Γραμμών Μεταφοράς

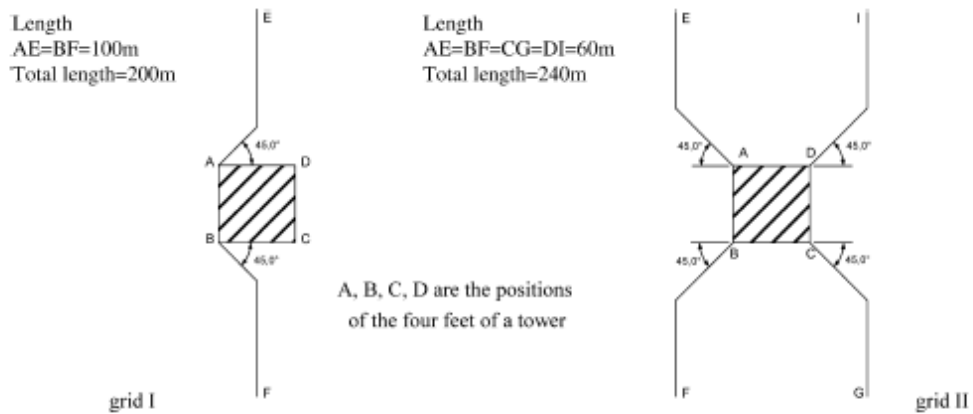
Οι γραμμές μεταφοράς διακρίνονται σε εναέριες και υπόγειες. Στον ελλαδικό ηπειρωτικό χώρο η πλειοψηφία των γραμμών μεταφοράς είναι εναέριες και η διάκριση τους μπορεί να γίνει με βάση τη μεταφερόμενη τάση σε αυτές των 150 kV και σε αυτές των 400 kV. Οι μεν πρώτες παρουσιάζουν μέγιστη τάση αντοχής ίση με 750 kV ενώ οι δεύτερες ίση 1550 kV. Ένας επιπλέον διαχωρισμός των γραμμών μεταφοράς είναι δυνατόν να γίνει σε γραμμές ελαφρύ και βαρύ τύπου όπως επίσης και σε απλού ή διπλού κυκλώματος [5].

Στην αρχή των γραμμών μεταφοράς η τάση πολλαπλασιάζεται μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης της τάσης και αυτό διότι πρέπει να έχει ένα επαρκές μέγεθος ικανό να υπερκεράσει τις πολύ μεγάλες απώλειες τάσης κατά μήκος της τεραστίου μήκους γραμμής μεταφοράς. Αντιθέτως, στο τέλος της γραμμής μεταφοράς η τάση υποβιβάζεται με τη βοήθεια μετασχηματιστών υποβιβασμού της τάσης και τούτο για να αποκτήσει μέγεθος κατάλληλο για τους καταναλωτές, δηλαδή από 220 V ως μερικά kV [3].

Οι γραμμές μεταφοράς αναρτώνται από μονωτήρες οι οποίοι βρίσκονται και αυτοί με τη σειρά τους αναρτημένοι από κάποιους χαλύβδινους συνήθως πυλώνες. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πυλώνων ποικίλει ανάλογα με το επιτρεπόμενο κατακόρυφο βέλος του τόξου του αγωγού που είναι αναρτημένος. Για χαλύβδινους ειδικότερα πυλώνες η εν λόγω οριζόντια απόσταση είναι μεταξύ 330 m και 400 m. Παρακάτω φαίνονται τρεις τύποι πυλώνων όπως επίσης και δύο τύποι πλεγμάτων συστημάτων γείωσης πύργων, που χρησιμοποιούνται σήμερα στη χώρα μας [1].



Σχήμα 5: Τύποι πυλώνων της ΔΕΗ



Σχήμα 6: Τύποι πλεγμάτων συστημάτων γείωσης πυλώνων.

1.10.3 Κεραυνικά Πλήγματα σε Γραμμές Μεταφοράς

Όταν πέσει ένας κεραυνός κοντά ή επί μίας γραμμής μεταφοράς εμφανίζονται σε αυτήν υψωμένες ηλεκτρικές τάσεις, οι λεγόμενες εξωτερικές υπερτάσεις. Τα διάφορα είδη των εξωτερικών αυτών επιπονήσεων αναφέρονται και περιγράφονται παρακάτω:

Καταρχάς, έχουμε την απευθείας πτώση μίας κεραυνικής εκκένωσης επί τον αγωγό μίας γραμμής μεταφοράς. Στην περίπτωση αυτή καθώς το ρεύμα του κεραυνού παρουσιάζει ιδιαίτερα μικρή διάρκεια συμπεριφέρεται σαν ένα οδεύον κύμα. Το κεραυνικό αυτό πλήγμα θα συναντήσει την χαρακτηριστική αντίσταση Z της γραμμής η οποία έχει καθαρά ωμικό χαρακτήρα [1]. Στο σημείο αυτό διαχωρίζουμε τις εξής περιπτώσεις με βάση το σημείο πτώσης του κεραυνού πάνω στη γραμμή μεταφοράς:

- Στην περίπτωση κατά την οποία σημειώνεται πτώση του κεραυνού στο άκρο της γραμμής, τότε η τάση η οποία θα προκύψει θα ισούται με το γινόμενο του κεραυνικού ρεύματος επί της κυματικής αντίστασης της γραμμής. Δημιουργούνται δηλαδή τελικά δύο οδεύοντα κύματα (ένα του ρεύματος και ένα της τάσης) [6], τα οποία πρακτικά διαδίδονται κατά μήκος της γραμμής και διαμορφώνονται από τις παραμέτρους της αντίστασης, της επαγωγής, της χωρητικότητας, από τις απώλειες λόγω του φαινομένου Corona και από τις συγκεντρωμένες χωρητικότητες των μονωτήρων της γραμμής μεταφοράς [1].
- Στην περίπτωση αντιθέτως κατά την οποία το σημείο πρόπτωσης του κεραυνού εκτείνεται και προς τις δύο κατευθύνσεις τότε το συνολικό κεραυνικό ρεύμα διαμοιράζεται σε δύο ίσα μέρη [5], από τα οποία προκύπτουν δύο ίσης τιμής τάσεις (των οποίων το άθροισμα θα ισούται με την παραπάνω προκύπτουσα τάση με την προϋπόθεση βέβαια ότι έχουμε τον ίδιο κεραυνό σε διαφορετικά αλλά σημεία της γραμμής μεταφοράς) και ισχύει ό,τι και προηγουμένως σχετικά με τα οδεύοντα κύματα που δημιουργούνται.

Η ταχύτητα ενός οδεύοντος κύματος είναι θεωρητικά ίση με αυτήν του φωτός (3×10^8 m/sec). Πρακτικά όμως θεωρούμε ότι ισούται περίπου με 250 m/sec [1]. Τέλος,

θεωρώντας ότι μία ηλεκτρική γραμμή μπορεί να παρουσιάζει κυματική αντίσταση μέχρι και 500Ω και πως η μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος δύναται να φτάσει τα 200 kA, προκύπτει ότι θεωρητικά η τιμή της τάσης (της εξωτερικής δηλαδή υπέρτασης) είναι δυνατόν να προσεγγίσει τα 100 MV [5]. Πρακτικά βέβαια η τιμή των εξωτερικών υπερτάσεων είναι αρκετά μικρότερη.

Ένα δεύτερο είδος εξωτερικού πλήγματος αποτελεί το φαινόμενο της ανάστροφης διάσπασης (reverse breakdown). Δύο είναι οι διαδικασίες ενδεχόμενης δημιουργίας του φαινομένου αυτού: Η πρώτη περιλαμβάνει την απευθείας κεραυνοπληξία του πυλώνα ή του αγωγού προστασίας μίας γραμμής μεταφοράς οπότε και ανυψώνεται το δυναμικό του πυλώνα [1]. Η δεύτερη περίπτωση περιλαμβάνει την πτώση ενός κεραυνού σε έναν αγωγό κύριας φάσης της γραμμής μεταφοράς, γεγονός το οποίο οδηγεί στη διάσπαση της μόνωσης της φάσης αυτής. Κάτι τέτοιο επιφέρει την δημιουργία ενός ρεύματος προς τη γη το οποίο με τη σειρά του καταλήγει στην ανύψωση του δυναμικού του πύργου. Τελικά, η ανύψωση αυτή ενδέχεται να δημιουργήσει ανάστροφη διάσπαση μεταξύ του πυλώνα και μίας υγιούς φάσης.

Τέλος, υπάρχει και η περίπτωση κατά την οποία σημειώνεται η πρόσπτωση ενός κεραυνού πλησίον μίας γραμμής μεταφοράς. Το έδαφος τότε φορτίζεται με ένα αρνητικό φορτίο και στην επιφάνειά του δημιουργείται η λεγόμενη βηματική τάση, η οποία αποτελεί μία διαφορά δυναμικού ανά απόσταση ίση περίπου με τη βήμα ενός ατόμου και εξαπλώνεται περίπου γραμμικά [5]. Το έδαφος και η γραμμή μεταφοράς λειτουργούν σε αυτήν την περίπτωση σαν ένας πυκνωτής εξαιρετικά μεγάλων διαστάσεων [1], με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός φορτίου εξ επαγωγής πάνω στη γραμμή μεταφοράς κατά τη χρονική διάρκεια της εξάπλωσης επί του εδάφους του μεταφερόμενου από τον κεραυνό φορτίου [5].

1.11 Προστασία Γραμμών Μεταφοράς με Αγωγούς

Επειδή σε καμιά περίπτωση δεν είναι δυνατή η αποτροπή της δημιουργίας των κεραυνικών εκκενώσεων πρωταρχικό μέλημα του ανθρώπου για την προστασία των γραμμών μεταφοράς αλλά και για την γενικότερη προστασία του από τους κινδύνους που πηγάζουν από τους κεραυνούς θα πρέπει να αποτελεί η λήψη κατάλληλων μέτρων, τα

οποία θα εξαλείψουν ή έστω θα μετριάσουν τις δυσμενείς συνέπειες της δημιουργίας τους.

Για την προστασία των γραμμών μεταφοράς έναντι της απευθείας κεραυνοπληξίας τοποθετούνται οι αγωγοί προστασίας, σε θέση τέτοια ώστε να προστατεύουν τους αγωγούς της γραμμής και γειωμένοι κατάλληλα μέσω αντιστάσεων μικρής σχετικά τιμής. Αγωγοί φάσεων υψηλού κινδύνου θεωρούνται οι υψηλότερα τοποθετημένοι σε γραμμές διπλού κυκλώματος με κατακόρυφη διάταξη αγωγών και οι ακραίοι αγωγοί με οριζόντια διάταξη [6].

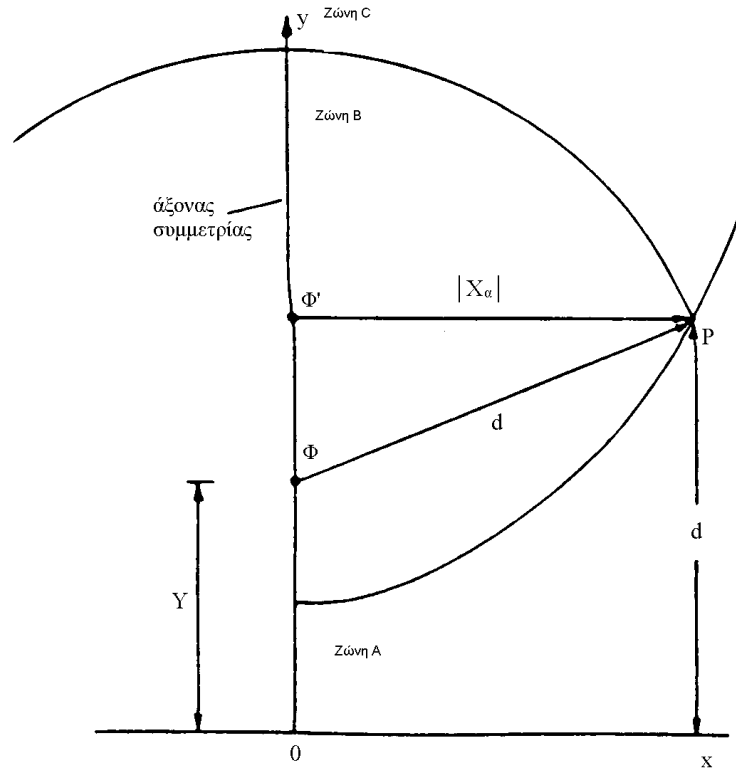
Ένα μοντέλο το οποίο θεωρείται ότι αποδίδει επαρκώς τους φυσικούς μηχανισμούς, οι οποίοι εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της απευθείας κεραυνοπληξίας μίας γραμμής μεταφοράς είναι το λεγόμενο ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο. Η πρώτη εκδοχή του συγκεκριμένου μοντέλου αναπτύχθηκε από τους F.S. Young, J.M. Clayton και A.R. Hileman κατά τον 20^ο αιώνα με τη συνεχή μελέτη και βελτίωσή του κατά τα επόμενα χρόνια.

Το γειωμένο αντικείμενο το οποίο θα πληγεί από έναν κεραυνό θα είναι εκείνο το οποίο θα βρεθεί πρώτο σε απόσταση d από την κεφαλή του οδηγού οχητού του κεραυνού, απόσταση η οποία θα ισούται με:

$$d = 6,7 \cdot I^{0,8} \text{ (m)} \quad (1.2)$$

όπου I το ρεύμα του κεραυνού σε kA [6].

Θεωρούμε το ίχνος ενός αγωγού ο οποίος είναι περισσότερο εκτεθειμένος σε κεραυνικές εκκενώσεις από τους υπόλοιπους και φέρουμε την παραβολή με εξίσωση $(y-Y)^2 + x^2 = y^2$, όπου Y το ύψος του πυλώνα της γραμμής μεταφοράς, και η οποία έχει το έδαφος ως διευθετούσα (άξονας $x'x$ στο σχήμα μας) και το υψηλότερο σημείο του πύργου Φ ως εστία. Κάθε οδηγός οχητός του οποίου η κεφαλή βρίσκεται στη ζώνη A θα προκαλέσει κεραυνοπληξία σε σημείο του εδάφους, οπότε και δεν υπάρχει κίνδυνος για την γραμμή μεταφοράς.



Σχήμα 7 : Ηλεκτρογεωμετρικό Μοντέλο [6]

Κάθε οδηγός σχετός του οποίου η κεφαλή βρίσκεται στη ζώνη B είναι επίσης ακίνδυνος για τη γραμμή καθώς να μην θα πλήξει τον αγωγό φάσεως της γραμμής, το μέγιστο ρεύμα του ωστόσο θα είναι σίγουρα μικρότερο από το κρίσιμο ρεύμα της μίας φάσης (το οποίο είναι το ρεύμα που θα προκαλούσε διάσπαση της μόνωσης) με αποτέλεσμα να μην προκληθεί διάσπαση της μόνωσης από την αναπτυσσόμενη υπέρταση ακόμα και αν δεν είχαμε αγωγό προστασίας. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι οι αγωγοί προστασίας τοποθετούνται για την προστασία των φάσεων από υπερτάσεις οι οποίες αναπτύσσονται από κεραυνικές εκκενώσεις οι οποίες παρουσιάζουν οδηγούς σχετούς με κεφαλές βρισκόμενες στη ζώνη C. Και αυτό διότι μόνο σε αυτήν την περίπτωση δημιουργείται υπέρταση ικανή να διασπάσει τη μόνωση της φάσεως, αν δεν υπάρχει αγωγός προστασίας.

Βιβλιογραφία

1. Μιχαήλ Γ. Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Αθήνα 2005.
2. Τεχνικό Άρθρο Νόησης (Κέντρο Διάδοσης Επιστημών και Μουσείο Τεχνολογίας), Αθήνα 2007.
3. Earle R. Williams, “The Electrification of Thunderforms”, USA, November 2008.
4. Γιώργος Μαλλιώτης, «Μετασχηματιστές», Μετάδοση Ισχύος, Αθήνα 2007.
5. Π.Νικολόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Αθήνα 1994
6. Ι.Α. Σταθόπουλος, «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων έναντι Υπερτάσεων», Αθήνα 1989.

Κεφάλαιο 2: Αλεξικέραυνα μέσης και υψηλής τάσης

2.1 Εισαγωγή

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών μεταφοράς και διανομής και των υποσταθμών από υπερτάσεις. Είναι συσκευές οι οποίες επιτρέπουν τη δίοδο του ηλεκτρισμού προς τη γη σε περιπτώσεις υπέρτασης, ενώ στην κανονική λειτουργία δεν άγουν σχεδόν καθόλου. Τα αλεξικέραυνα μπορούν να χαρακτηρισθούν σαν διακόπτες οι οποίοι κλείνουν στιγμιαίως σε περίπτωση υπέρτασης και δημιουργούν μια αγωγή προς τη γη, διοχετεύοντας την υπέρταση μακριά από τις προς προστασία συσκευές. Βασικές, λοιπόν, ιδιότητες ενός αλεξικέραυνου είναι [1,2]:

- Να μην άγει κατά την κανονική τάση λειτουργίας (στην πραγματικότητα υπάρχει ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής της τάξεως του 1 mA).
- Να αρχίσει να άγει μόλις εμφανισθεί μια υπέρταση.
- Να διακόπτει αμέσως τη λειτουργία του μόλις παρέλθει η υπέρταση.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι αλεξικέραυνων (με ή χωρίς διάκενα) οι οποίοι λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο: παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση της τάξης των MΩ σε κανονική λειτουργία, ενώ σε περίπτωση υπέρτασης η αντίσταση μειώνεται σε μερικά Ω. Παλαιότερα, αλεξικέραυνα με διάκενα σε σειρά με μη γραμμικές αντιστάσεις ήταν ευρέως διαδεδομένα, σήμερα όμως δίνουν τη θέση τους σε αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα, τα οποία αποτελούνται από μη γραμμικές αντιστάσεις οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO).

2.2 Αλεξικέραυνα με διάκενα

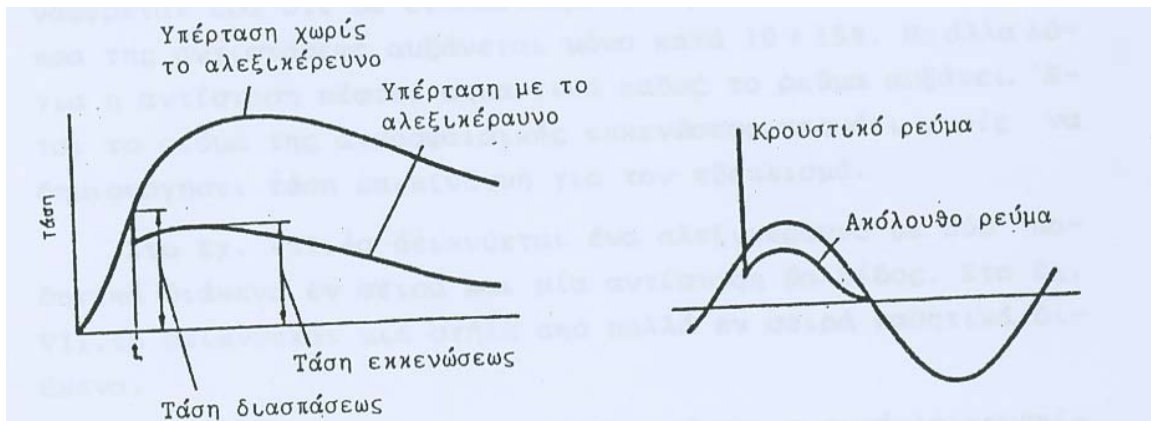
Αυτού του τύπου τα αλεξικέραυνα αποτελούνται από σειρά διακένων σε σειρά μια μη γραμμική αντίσταση, περικλειόμενα σε κατάλληλο μονωτικό περίβλημα. Τα διάκενα, τα οποία πρέπει να έχουν όσο γίνεται περισσότερο ομοιογενές πεδίο, ούτως ώστε η τάση διάσπασης τους αν είναι ανεξάρτητη από την κλίση του μετώπου της κρουστικής τάσης-διασπώνται όταν η υπέρταση υπερβεί μια ορισμένη τιμή, συνδέοντας τον αγωγό υψηλής

τάσης με τη γη. Μόλις παρέλθει η υπέρταση, το τόξο δεν μπορεί να συντηρηθεί υπό την κανονική τάση λειτουργίας λόγω της μη γραμμικής αντίστασης. Οι μη γραμμικές αντιστάσεις στα αλεξικέραυνα με διάκενα είναι συνήθως από ανθρακοπυρίτιο (SiC), ενώ η χαρακτηριστική τάσεως – ρεύματος, που εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα του υλικού, το συνεκτικό υλικό και τον τρόπο κατασκευής τους, είναι της μορφής:

$$I = kU^a \quad (2.1)$$

όπου k και a συντελεστές.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του αλεξικέραυνου όταν φθάσει σε αυτό μια υπέρταση. Μετά τη διάσπαση των διακένων, το ακόλουθο ρεύμα περιορίζεται από τις μη γραμμικές αντιστάσεις, ώστε μόλις η τιμή του γίνει μηδενική να διακόπτεται[1-4].



Σχήμα 1: Αρχή λειτουργίας αλεξικέραυνου και διακοπή ακόλουθου ρεύματος

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των αλεξικέραυνων είναι [5]:

α. Ονομαστική τάση: Είναι η μέγιστη τάση (rms) στη συχνότητα λειτουργίας του αλεξικέραυνου, στην οποία το αλεξικέραυνο μπορεί να διακόψει με βεβαιότητα το ακόλουθο ρεύμα. Η τάση αυτή πρέπει, αν μείνει μονίμως τα άκρα του αλεξικέραυνου, να μην επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του.

β. Κρουστική Τάση Διασπάσεως

Μετωπική: Είναι η τάση διασπάσεως του αλεξικέραυνου, που συμβαίνει στο μέτωπο του κρουστικού κύματος (δηλαδή προ της κορυφής).

Η κλίση του μετώπου κατά IEC είναι 100 kV/μsec για κάθε 12 kV της ονομαστικής τάσης του αλεξικέραυνου, αλλά όχι παραπάνω από 1200 kV/μsec (π.χ. για 21 kV η κλίση είναι $21/12100 = 175$ kV/μsec).

Κρουστική 100%: Είναι η κορυφή της ελάχιστης τάσης κρουστικού κύματος ορισμένης μορφής (κατά IEC 1,2/50 μsec), για την οποία όσες φορές κι αν επιβληθεί έχουμε διάσπαση του αλεξικέραυνου.

Κρουστική 50% (κρίσιμη): Είναι η κορυφή της τάσης κρουστικού κύματος (1,2/50 μsec) που όταν επιβληθεί επανειλημμένως θα προκαλέσει διάσπαση του αλεξικέραυνου στο 50% των περιπτώσεων.

Για κάθε σημείο της καμπύλης τάσης διάσπασης του αλεξικέραυνου-χρόνου (βλέπε σχήμα 4), τετμημένη είναι η διάρκεια από την αρχή της επιβολής της τάσης μέχρι της διάσπασης του αλεξικέραυνου και τεταγμένη η τάση διάσπασης προκειμένου για μετωπική διάσπαση ή η κορυφή της τάσης που επιβάλλεται προκειμένου για διάσπαση στη ουρά του κύματος.

γ. Τάση εκκενώσεως ή παραμένουσα τάση: Είναι η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του αλεξικέραυνου μετά τη διάσπασή του, κατά τη διάρκεια της εκκενώσεως του ρεύματος (μορφής 8/20 μsec).

δ. Τάση διάσπασης Β.Σ. (50 Hz) : Είναι η ενδεικνυμένη τιμή της ελαχίστης τάσης Β.Σ. που προκαλεί διάσπαση του αλεξικέραυνου, όταν και όσες φορές κι αν επιβληθεί στα άκρα του.

ε. Ρεύμα εκκενώσεως : Το κρουστικό ρεύμα που διέρχεται από το αλεξικέραυνο κατά την εκκένωσή του.

ζ. Ονομαστικό ρεύμα εκκενώσεως: Το ρεύμα εκκενώσεως ορισμένης μορφής (8x20 μsec), που μπορεί να εκκενώσει το αλεξικέραυνο, χωρίς η τάση στα άκρα του να υπερβαίνει την επιτρεπόμενη τάση εκκενώσεως (παραμένουσα).

Η ένταση αυτή ορίζει την κλάση του αλεξικέραυνου. Το αλεξικέραυνο πρέπει να μπορεί να εκκενώνει το ονομαστικό ρεύμα εκκενώσεως, σε αριθμό (φορές) και συχνότητα, που ορίζονται από την προδιαγραφή του.

στ. Κρουστικό ρεύμα εκκενώσεως: Είναι η μέγιστη τιμή (κορυφή) κρουστικού ρεύματος μορφής 4/10 μsec , που μπορεί να εκκενώνει το αλεξικέραυνο.

η. Ακόλουθο ρεύμα: Το ρεύμα 50 Hz που διέρχεται από το αλεξικέραυνο μετά την εκκένωση του κρουστικού ρεύματος.

Υπάρχουν δύο τύποι διακένων: Τα συμβατικά ή παθητικά διάκενα και τα ενεργητικά διάκενα.

Ένα συγκρότημα με παθητικά διάκενα αποτελείται από ηλεκτρόδια χωρισμένα με τα τεμάχια στεατίου και με μη γραμμικές αντιστάσεις κατανομής μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στα διάκενα αυτά υπάρχει επίσης μία διάταξη προιοντισμού ούτως ώστε να επιτυγχάνεται συγκεκριμένη στάθμη τάσης διάσπασης (χωρίς δηλαδή μεγάλη διασπορά) και χαμηλή στάθμη προστασίας. Σκοπός των αντιστάσεων κατανομής (grading resistors) είναι η ομοιόμορφη κατανομή της τάσης κατά μήκος των διακένων κατά τη διάρκεια σχετικώς βραδέως μεταβαλλόμενων υπερτάσεων. Για ταχέως μεταβαλλόμενες υπερτάσεις την ομοιόμορφη κατανομή εξασφαλίζουν πυκνωτές κατανομής (grading capacitors) παράλληλοι προς τις αντιστάσεις αυτές και τα διάκενα. Έτσι η τάση διάσπασης στην βιομηχανική συχνότητα και σε υπερτάσεις χειρισμών εξαρτάται κυρίως από τις αντιστάσεις κατανομής ενώ η τάση διάσπασης σε ταχέως μεταβαλλόμενες υπερτάσεις ατμοσφαιρικής προελεύσεως εξαρτάται από τις χωρητικότητες κατανομής του αλεξικέραυνου [1-6].

Ένα συγκρότημα με ενεργητικά διάκενα αποτελείται από ηλεκτρόδια στερεωμένα πάνω σε μονωτικούς δίσκους οι οποίοι φέρνουν και αντίσταση στο τόξο. Εν σειρά με τα ηλεκτρόδια αυτά και τους δίσκους υπάρχει ένα πηνίο το οποίο δημιουργεί ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο με την βοήθεια του οποίου το τόξο μετακινείται προς ένα στενό θάλαμο σβέσεως όπου και επιμηκύνεται περίπου 100 φορές. Η επιμήκυνση αυτή του τόξου δημιουργεί μεγάλη πτώση τάσης κατά μήκος των διακένων και βελτίωση στις συνθήκες εκκαθάρισεως του ακόλουθου ρεύματος. Έτσι τα κυριότερα προσόντα των αλεξικέραυνων με ενεργά διάκενα είναι:

- Καλύτερη προστασία χωρίς να έχουμε σημαντική αύξηση της ισχύος του ακόλουθου ρεύματος.
- Καλύτερη δυνατότητα σφραγίσεως.
- Δυνατότητα απορροφήσεως μεγαλύτερης διάρκειας εκκενώσεως.

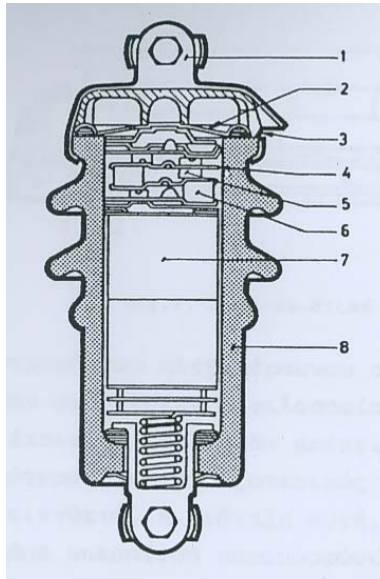
Τα αλεξικέραυνα με ενεργά διάκενα χρησιμοποιούνται για δίκτυο ονομαστικών τάσεων μεγαλύτερων από 200 kV για τα οποία οι σχετικές στάθμες μόνωσης είναι χαμηλές και η στάθμη προστασίας σε υπερτάσεις χειρισμών είναι επίσης χαμηλή [1-6].

Εκτός από τις μη γραμμικές αντιστάσεις κατανομής της τάσης που βρίσκονται παράλληλα με κάθε διάκενο έχουμε και εν σειρά με τα διάκενα μία μη γραμμική αντίσταση (είτε μία ανά διάκενο είτε μία συνολική για όλο το αλεξικέραυνο) από ανθρακούχο πυρίτιο SiC). Η αντίσταση αυτή, που καλείται και αντίσταση βαλβίδας εξαρτάται από την τάση. Έτσι τυπικά αναφέρεται εδώ ότι με διπλασιασμό του ρεύματος η τάση στα άκρα της αντίστασης αυξάνεται μόνο κατά 10-15%. Με άλλα λόγια η αντίσταση πέφτει σημαντικά ενώ το ρεύμα αυξάνει. Έτσι το ρεύμα της ατμοσφαιρικής εκκενώσεως περνάει χωρίς αν δημιουργήσει τάση επικίνδυνη για τον εξοπλισμό [1-6].

Σε μία λίγο διαφορετική κατασκευή δεν υπάρχει πηνίο για την δημιουργία μαγνητικού πεδίου που θα επιμηκύνει το τόξο αλλά η διαμόρφωση των ηλεκτροδίων είναι τέτοια ώστε το ίδιο το ρεύμα του τόξου να δημιουργεί το απαραίτητο για το σκοπό αυτόν μαγνητικό πεδίο [1-6].

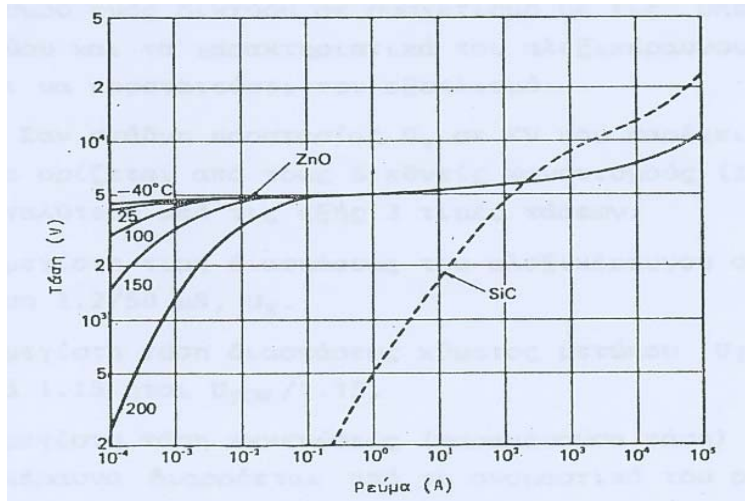
Τα περισσότερα αλεξικέραυνα έχουν μία ανακουφιστική διάταξη πίεσεως (pressure relief arrangement) με την οποία αποφεύγεται η βίαιη καταστροφή τους σε περίπτωση

που το αλεξικέραυνο δεν σφραγίζει. Η φιλοσοφία της διάταξης αυτής είναι ότι σε μία τέτοια περίπτωση θα πρέπει η διάσπαση να μεταφέρεται το ταχύτερο δυνατόν εκτός του αλεξικέραυνου. Η δημιουργούμενη στον εσωτερικό χώρο υπερπίεση παραμορφώνει τον δίσκο και έτσι τα ιονισμένα αέρια εξέρχονται προκαλώντας εξωτερική διάσπαση λόγω του ιονισμού τους [1].



Σχήμα 2: Αλεξικέραυνο με παθητικά διάκενα και αντίσταση βαλβίδας (1. Άνω βραχίονας, 2. Διάφραγμα και ανακουφιστική διάταξη υπερπίεσης, 3. Άνοιγμα διαφυγής αερίων, 4. Ηλεκτρόδιο διακένου, 5. Διαχωριστικό στεατίτου, 6, 7. Αντίσταση βαλβίδας, 8. Πορσελάνη)

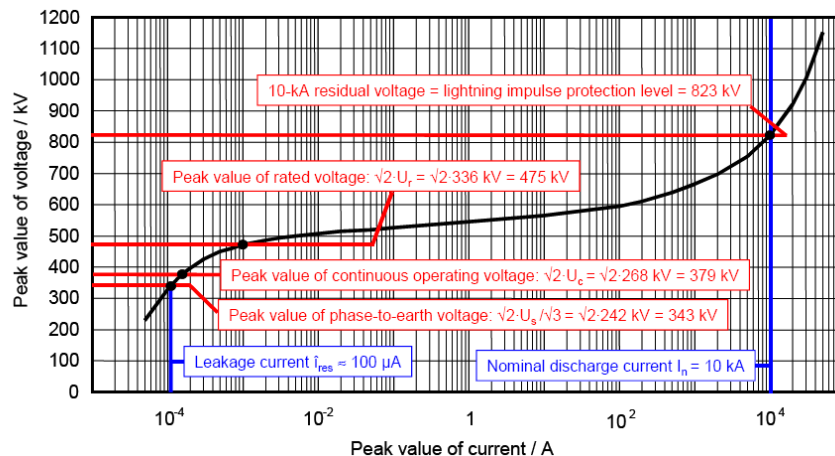
Εκτός από το ανθρακούχο πυρίτιο (SiC) που χρησιμοποιείται πάνω από 25 χρόνια σαν το βασικό υλικό για τις μη γραμμικές αντιστάσεις των αλεξικέραυνων, χρησιμοποιήθηκε κατά την δεκαετία 1970-80 και το οξειδίο του ψευδαργύρου (ZnO) το οποίο σε σύγκριση με το SiC παρουσιάζει πολύ πιο έντονη γραμμικότητα όπως φαίνεται και στο Σχ.3. Τα αλεξικέραυνα με ZnO έχουν χαμηλότερη και ακριβέστερα προσδιορισμένη στάθμη προστασίας και για το λόγο αυτό έχουν αντικαταστήσει τα αλεξικέραυνα με SiC.



Σχήμα 3: Χαρακτηριστικές τάσης - ρεύματος [1]

2.3 Αλεξικέρανα χωρίς διάκενα

Τα τελευταία χρόνια τα αλεξικέρανα με διάκενα αντικαθίστανται με αυτά χωρίς διάκενα, τα οποία αποτελούνται από μη γραμμικές αντιστάσεις κατασκευασμένες από οξειδίο του ψευδαργύρου (ZnO), το οποίο συνιστά σημαντική βελτίωση έναντι του SiC, καθώς η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος είναι σχεδόν επίπεδη και μη γραμμική και καλύπτει περίπου 8 δεκάδες (Σχ.4). Αυτή ακριβώς η έντονη μη γραμμικότητα είναι αυτή που καθιστά την κατασκευή αλεξικέρανου χωρίς διάκενα [4].



Σχήμα 4: Χαρακτηριστική τάσεως – ρεύματος ενός αλεξικέρανου χωρίς διάκενα [8]

Σε τάση κανονικής λειτουργίας το ρεύμα διαρροής περιορίζεται σε κάποια mA, ενώ μπορεί να διακόπτει κρουστικές τάσεις με ρεύματα πολλών kA. Το ρεύμα που ρέει δια της μη γραμμικής αντίστασης είναι αμελητέο για κάθε τάση μικρότερη μιας ορισμένη τιμής V_1 (που μπορεί να είναι η κανονική τάση λειτουργίας του δικτύου), εάν όμως εμφανιστεί στα άκρα του αλεξικέραυνου μια τάση μεγαλύτερη με αναμενόμενο εύρος τιμής υψηλότερο μιας τιμής $V_m > V_1$, ρέει δια αυτού μεγάλο ρεύμα έτσι ώστε η τάση να περιορισθεί κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες στην τιμή V_m [4,7-8].

Τα πλεονεκτήματα των αλεξικέραυνων αυτών είναι η απλή τους κατασκευή, η μη γραμμική σχέση τάσης ρεύματος για μια μεγάλη περιοχή τιμών καθώς και η απουσία διακένων τα οποία είναι δυνατόν να προκαλέσουν πολύ απότομο μέτωπο μείωσης της τάσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία επικίνδυνων καταπονήσεων. Το κύριο μειονέκτημα τους είναι η συνεχής ροή ρεύματος βιομηχανική συχνότητας και κατά συνέπεια η απώλεια ισχύος.

Η μη γραμμική αντίσταση συνίσταται από ZnO με μικρές προσμίξεις και άλλων οξειδίων, όπως Bi_2O_3 , MnO, Cr_3O_3 και Sb_2O_3 . Οι πρώτες κατασκευές από οξείδιο του ψευδαργύρου τοποθετούνταν σε κεραμικό περίβλημα, όπου τα στοιχεία του βαρίστορ περιβάλλονταν από μονωτικό αέριο και οι καταλήξεις τους σφραγιζόνταν με δακτυλίους από καουτσούκ. Με την πάροδο του χρόνου όμως οι δακτύλιοι φθείρονταν με αποτέλεσμα την είσοδο υγρασίας στην όλη κατασκευή. Κατά τη δεκαετία του 80 άρχισαν να χρησιμοποιούνται περιβλήματα από πολυμερή υλικά (όπως το καουτσούκ σιλικόνης). Τέτοια υλικά, τα οποία είναι κατάλληλα και για περιοχές με μεγάλη ατμοσφαιρική ρύπανση, προσφέρουν ελαφρύτερες κατασκευές, βελτιωμένη μηχανική αντοχή και αύξηση της τάσης υπερπήδησης σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη ρύπανση[4].

Τα κυριότερα μεγέθη που ενδιαφέρουν σε ένα αλεξικέραυνο είναι [9]:

α. Η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας (Maximum Continuous Operating Voltage- U_c): Είναι η μέγιστη ενεργός τιμή της τάσης που μπορεί να εφαρμόζεται διαρκώς στα άκρα του αλεξικέραυνου. Η μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την κανονική τάση του δικτύου. ($U_c = 1.05-1.1U$)

β. Ονομαστική τάση (Rated Voltage- U_r): Είναι η μέγιστη ενεργός τιμή της τάσης στα άκρα του αλεξικέραυνου, για την οποία το αλεξικέραυνο συνεχίζει να λειτουργεί σωστά για προσωρινές υπερτάσεις (10-100sec). Η ονομαστική τάση είναι 1,25 φορές τη μέγιστη τάση συνεχούς λειτουργίας: $U_r = 1.25U_c$.

γ. Παραμένουσα τάση (U_{res}): Είναι η τάση στα άκρα του αλεξικέραυνου κατά την εφαρμογή κρουστικών ρευμάτων.

δ. Βασική κρουστική τάση μονώσεως (Lightning Impulse Protective Level): Είναι η τάση στα άκρα του αλεξικέραυνου όταν διέρχεται δι'αυτού το ονομαστικό ρεύμα εκφορτίσεως.

ε. Ενέργεια αντοχής (Thermal energy absorption capability): Είναι η μέγιστη τιμή της εγχύμενης ενέργειας στο αλεξικέραυνο, μετά την οποία το αλεξικέραυνο επανέρχεται στην κανονική θερμοκρασία λειτουργίας.

Στα Σχήματα 4 και 5 φαίνεται η τομή ενός αλεξικέραυνου, βασικά στοιχεία του οποίου είναι η μη γραμμική αντίσταση (βαρίστορ) από οξειδία του ψευδαργύρου, το μονωτικό περίβλημα από πολυμερές υλικό, ένα ενδιάμεσο υαλώδες υλικό και τα ηλεκτρόδια σύνδεσης με την υψηλή τάση και τη γη. Λόγω της ανομοιομορφίας του δυναμικού στο εσωτερικό του βαρίστορ (η οποία καταπονεί θερμικά το τμήμα του βαρίστορ που βρίσκεται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης) τοποθετούνται, ιδίως στα αλεξικέραυνα 150kV και 400kV, κατάλληλα τοροειδή (Σχήμα 6).



Σχήμα 4: Τομή αλεξικέραυνου [10]



Σχήμα 5: Τομή αλεξικέραυνου [7]

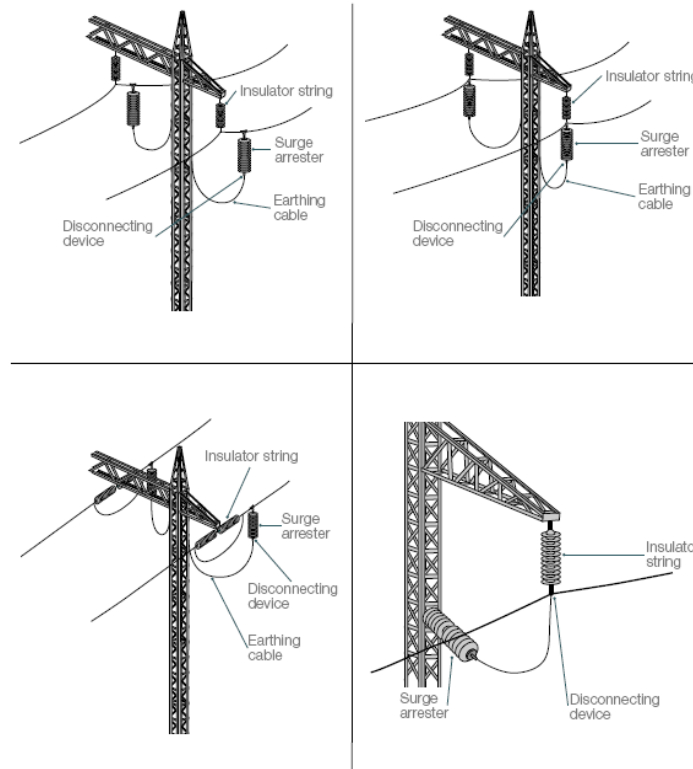


Σχήμα.6: Αλεξικέραυνα 400kV και 150kV με τοροειδή [7]

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών υψηλής και μέσης τάσης καθώς και των μετασχηματιστών, τόσο για απευθείας όσο και για επαγόμενα κεραυνικά πλήγματα. Τοποθετούνται μεταξύ φάσης και γης (Σχήματα 7 και 8) και είναι ιδιαίτερα αναγκαία στην περίπτωση υψηλών αντιστάσεων γείωσης.



Σχήμα7: Αλεξικέραυνα σε γραμμή μεταφοράς [7]



Σχήμα 8: Τρόποι τοποθέτησης αλεξικέραυνων σε πυλώνες γραμμών μεταφοράς [8]

Εξοπλισμός που συνοδεύει συνήθως τα αλεξικέραυνα είναι ο μετρητής υπερτάσεων, η συσκευή αποσύνδεσης και ο μετρητής του ρεύματος διαρροής. Οι μετρητές υπερτάσεων (Σχήμα 9) συνδέονται εν σειρά με το αλεξικέραυνο και καταγράφουν με ηλεκτρομηχανικό ή ηλεκτρονικό τρόπο πόσες φορές λειτούργησε το αλεξικέραυνο.



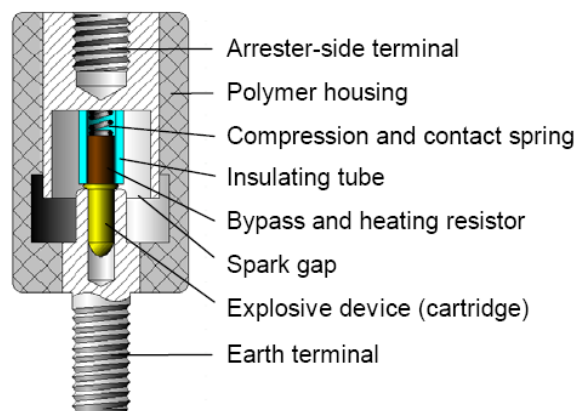
Σχήμα 9: Μετρητής Υπερτάσεων [7]

Ο μετρητής του ρεύματος διαρροής συνδέεται σε σειρά με το αλεξικέραυνο και μετράει το ολικό ρεύμα διαρροής. Η ένδειξη αυτή ωστόσο δεν έχει μεγάλη πρακτική αξία, αφού αυτό που ενδιαφέρει είναι η ωμική συνιστώσα του ρεύματος διαρροής.



Σχήμα10: Μετρητής ρεύματος διαρροής [8]

Η συσκευή αποσύνδεσης (Σχήμα11) αποσυνδέει το αλεξικέραυνο από το σύστημα σε περίπτωση υπερφόρτισης ή πιθανής καταστροφής του. Στην περίπτωση αυτή την περίπτωση η γραμμή μένει απροστάτευτη από υπερτάσεις. Τυπική αρχή λειτουργίας της συσκευής αποσύνδεσης είναι ένας εκρηκτικός μηχανισμός ενεργοποιούμενος από το ρεύμα διαρροής.



Σχήμα11: Συσκευή αποσύνδεσης [8]

Τα αλεξικέραυνα έχουν μεγάλη σημασία καλή λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και διανομής, για αυτό θα πρέπει να είναι σε καλή κατάσταση και να λειτουργούν αξιόπιστα τόσο υπό κανονικές συνθήκες όσο και σε μεταβατικά φαινόμενα. Οι πιο συνηθισμένες αστοχίες σε αλεξικέραυνα όλων των τύπων είναι [11]:

- Εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό του αλεξικέραυνου.
- Μερικές εκκενώσεις στο εσωτερικό, εξαιτίας κακής επαφής μεταξύ των δίσκων του βαρίστορ).
- Καταστροφή ή ρύπανση του εξωτερικού περιβλήματος.
- Μηχανικές – θερμικές καταπονήσεις και καταστροφή ή αλλοίωση της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος μετά από διέλευση ισχυρού ρεύματος.

Είναι φανερό ότι απαιτείται συχνή οπτική επιθεώρηση και διεξαγωγή κατάλληλων δοκιμών για τον έλεγχο της κατάστασης των αλεξικέραυνων, εάν δηλαδή μπορούν να λειτουργούν και προστατεύουν αποτελεσματικά τη γραμμή σε περίπτωση υπέρτασης. Οι δοκιμές και οι έλεγχοι που προβλέπονται για τα αλεξικέραυνα μελετώνται στα οικεία κεφάλαια.

Βιβλιογραφία

1. Ε.Λεκατσάς, «Θέματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας», ΔΕΗ, Αθήνα 1985.
2. Κ.Α.Στασινόπουλος, «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Α' Έκδοση, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 1996.
3. Ι.Α.Σταθόπουλος, «Προστασία Τεχνικών Εγκαταστάσεων έναντι Υπερτάσεων», Εκδ. Συμεών.
4. Μιχ.Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Εκδ. Οικονομικών, Αθήνα 2005.

5. Οδηγία Διανομής Νο 23 «Προστασία Δικτύων ΜΤ από ατμοσφαιρικές υπερτάσεις». ΔΕΗ, Γραφείο βοηθού Γενικού Διευθυντή Διανομής, Εκδ.01/06/1988.
6. Α.Παπαθανασίου, «Ηλεκτρικά Δίκτυα, Τόμος Α: Εναέρια Δίκτυα», Σημ. για τη Σιβιτανίδειο Σχολή, Αθήνα.
7. ABB Buyer's Guide, "High Voltage Surge Arresters", Edition 5.1, 2004-2007.
8. V. Hinrichsen, "Metal-Oxide Surge Arresters", Siemens, 1st Edition, 2001.
9. IEC 60099-4, "Surge Arresters: Part 4: Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems", second edition, 2004-2005.
10. Διαφημιστικό έντυπο της Tyco Electronics.
11. R.E. James, Q.Su, "Condition Assessment of high Voltage Insulation in Power System Equipment", IET Power and Energy Series 53, 1st Edition 2008.

Κεφάλαιο 3: Ανασκόπηση του Προτύπου IEC 60099-4

3.1 Γενικά περί Δοκιμών ποιοτικού Ελέγχου σε ηλεκτροτεχνικές Κατασκευές

Κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, πριν διατεθεί σε χρήση, πρέπει να δοκιμαστεί σε λειτουργικές συνθήκες, που αντιστοιχούν σε μελλοντικές μέγιστες καταπονήσεις, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της κατασκευής. Θα πρέπει τόσο τα επιμέρους στοιχεία όσο και η κατασκευή στο σύνολό της να εναρμονίζονται με τις απαιτήσεις των κατά περίπτωση κανονισμών κατασκευής και προδιαγραφών δοκιμής.

Οι δοκιμές προβλέπονται από διάφορους κανονισμούς (VDE, IEC, ΕΛΟΤ κτλ) και διακρίνονται σε δοκιμές τύπου και δοκιμές σειράς. Οι δοκιμές τύπου γίνονται σε περιορισμένο αριθμό έτοιμων προς διάθεση προϊόντων, ενώ οι δοκιμές σειράς πραγματοποιούνται σε όλα ανεξαιρέτως τα τεμάχια [1] [3].

Οι δοκιμές σειράς δεν είναι καταστρεπτικές και για αυτό θα πρέπει να πραγματοποιούνται παρουσία του αγοραστή. Η ΔΕΗ πραγματοποιεί όλες τις δοκιμές σειράς στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που προμηθεύεται. Σε μικρές προμήθειες εξοπλισμού ή σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατόν να γίνουν οι δοκιμές παρουσία του αγοραστή, θα πρέπει να επιβεβαιώνεται η ποιότητα του εξοπλισμού από διεθνώς αναγνωρισμένα εργαστήρια [3].

Οι δοκιμές τύπου γίνονται σε διεθνώς αναγνωρισμένα εργαστήρια ή εργαστήριο του κατασκευαστή και αφορούν συνήθως ένα τυχαίο δείγμα ακριβώς ίδιο με αυτό με τα έτοιμα προς διάθεση προϊόντα. Οι δοκιμές τύπου χαρακτηρίζονται ως καταστρεπτικές γιατί παρά την επιτυχή διεξαγωγή τους μπορεί να γίνουν αιτία μελλοντικών βλαβών.

Όταν μια κατασκευή δεν ανταπεξέλθει επιτυχώς σε κάποια από τις προβλεπόμενες δοκιμές, τότε κρίνεται ακατάλληλη, πράγμα ιδιαίτερα ζημιογόνο για τον κατασκευαστή. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται έλεγχος τόσο στις πρώτες ύλες (δοκιμές πρώτων υλών), όσο και στις διάφορες φάσεις της παραγωγής (δοκιμές παραγωγής). Οι δοκιμές πρώτων υλών είναι κυρίως δειγματοληπτικοί έλεγχοι που βασίζονται σε κάποια μέθοδο πιθανοτήτων, λόγω των μεγάλων προς έλεγχο ποσοτήτων. Οι δοκιμές παραγωγής είναι μετρήσεις που ελέγχουν την ποιότητα στις διάφορες φάσεις της παραγωγικής

διαδικασίας, οπότε ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες για λάθη στην τελική συναρμολόγηση [4].

Οι δοκιμές τύπου και σειράς δεν είναι ίδιες για κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, αλλά εξαρτώνται από το είδος της κατασκευής, τα ονομαστικά στοιχεία και τις συνθήκες λειτουργίας που πρόκειται να αντιμετωπίσει αυτή κατά περίπτωση στο δίκτυο. Το σκεπτικό για την αναζήτηση των δοκιμών που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν σε μία ηλεκτροτεχνική κατασκευή, πηγάζει βασικά από την ανάγκη να δοθεί μία απάντηση στα παρακάτω ερωτήματα, όταν αυτά έχουν νόημα για την προς έλεγχο κατασκευή :

- α) Πως θα επιβεβαιωθεί το ονομαστικό ρεύμα.
- β) Πως θα επιβεβαιωθεί η διηλεκτρική αντοχή της κατασκευής.
- γ) Ποιες είναι οι απαιτήσεις σε μηχανική αντοχή.
- δ) Αντέχει η κατασκευή το βραχυκύκλωμα μέχρι να γίνει διακοπή του από το μέσο προστασίας του δικτύου.
- ε) Ποιες οι ειδικές απαιτήσεις που πρέπει να χαρακτηρίζουν την κατασκευή.

Οι απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα δίνονται με τη διεξαγωγή συγκεκριμένων δοκιμών που περιλαμβάνονται στους διάφορους κανονισμούς και είναι αντίστοιχα για τις τέσσερις πρώτες ερωτήσεις :

- α) δοκιμή υπερθέρμανσης
- β) διηλεκτρικές δοκιμές
- γ) δοκιμή μηχανικής αντοχής
- δ) δοκιμή βραχυκύκλωσης [4].

Η δοκιμή υπερθέρμανσης αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος μιας κατασκευής. Η τιμή αυτή δεν μπορεί να είναι τυχαία, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται σε προδιαγεγραμμένες τιμές ρεύματος. Για το σκοπό αυτό η δοκιμή αυτή διαρκεί συνήθως αρκετές ώρες και θεωρείται ότι είναι επιτυχής όταν η θερμοκρασία δεν υπερβεί κάποιο συγκεκριμένο όριο σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Οι διηλεκτρικές δοκιμές στοχεύουν στην εξακρίβωση της ικανότητας μόνωσης. Η ονομαστική τάση κάθε κατασκευής δεν μπορεί να είναι μια τυχαία τιμή, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγεγραμμένη διαβάθμιση των τάσεων του δικτύου. Συνήθως γίνεται αναφορά εκτός από την ονομαστική τάση, στη στάθμη μόνωσης της κατασκευής (μέγιστη τάση λειτουργίας), που είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση. Οι

μετρήσεις που γίνονται για τον έλεγχο της ικανότητας μόνωσης αφορούν κυρίως τις μέγιστες λειτουργικές καταστάσεις της κατασκευής, από τις οποίες επιβεβαιώνεται η στάθμη μόνωσης.

Η δοκιμή μηχανικής αντοχής αφορά κυρίως την ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα των επαφών των διακοπών μετά από ένα μεγάλο αριθμό χειρισμών, ενώ παράλληλα ελέγχεται η στιβαρότητα της κατασκευής.

Με τη δοκιμή σε τριπολικό βραχυκύκλωμα ελέγχεται η καταπόνηση μιας κατασκευής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα και μάλιστα για χρονικό διάστημα 1s, μέχρι δηλαδή να ενεργοποιηθούν τα μέσα προστασίας ου δικτύου. Κατά τη δοκιμή μετρώνται το κρουστικό και το εναλλασσόμενο τμήμα του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Οι τιμές των ρευμάτων αυτών καθορίζονται από την ισχύ του δικτύου στη θέση βραχυκύκλωσης, η δοκιμή θεωρείται επιτυχής όταν μετά το πέρας της δεν έχουν αναιρεθεί η στάθμη μόνωσης και η ικανότητα σε ονομαστικό ρεύμα. Δηλαδή, στη συνέχεια πραγματοποιούνται στο συγκεκριμένο δοκίμιο οι διηλεκτρικές δοκιμές και η δοκιμή υπερθέρμανσης [4].

3.2 Εργαστηριακές Δοκιμές σε Αλεξικέραυνα

Σκοπός των εργαστηριακών δοκιμών είναι η συγκέντρωση πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του αλεξικέραυνου, η οποία βρίσκεται σε άμεση συσχέτιση τόσο με τη διάρκεια ζωής του αλεξικέραυνου όσο και με την αξιοπιστία του συστήματος. Στο πρότυπο IEC 60099-4 παρουσιάζονται μερικές από τις πιο συνηθισμένες εργαστηριακές διαγνωστικές μεθόδους για αλεξικέραυνα του οξειδίου του ψευδαργύρου.

Οι πιο συνηθισμένες εργαστηριακές μέθοδοι συναντιούνται σε όλα σχεδόν τα προγράμματα ελέγχου της κατάστασης του αλεξικέραυνου και εξετάζουν συνήθως μία θεμελιώδη και κρίσιμη παράμετρο του. Μερικές από τις πιο συνήθεις είναι οι εξής: Έλεγχος της μονωτικής αντίστασης, της διαρροής ρεύματος (είτε AC είτε DC), της παραμένουσας τάσης, έλεγχος του περιβλήματος του αλεξικέραυνου, καταπόνηση του αλεξικέραυνου με κρουστικές τάσεις, δοκιμή με εναλλασσόμενη τάση και οπτική επιθεώρηση των εσωτερικών μερών του αλεξικέραυνου.

Οι πιο ειδικές εργαστηριακές δοκιμές εφαρμόζονται πιο σπάνια από ότι οι παραπάνω και αυτό είτε επειδή είναι ιδιαίτερα δύσκολες να πραγματοποιηθούν είτε επειδή δοκιμάζουν περιορισμένα την απόδοση του αλεξικέραυνο. Είναι δυνατόν επίσης να επιφέρουν ιδιαίτερη καταπόνηση σε ένα αλεξικέραυνο (όπως οι δοκιμές αντοχής ρεύματος) ή να μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες (όπως οι δοκιμές τεχνητής ρύπανσης). Μερικές από τις πιο διαδεδομένες είναι οι εξής: δοκιμή τεχνητής ρύπανσης ή τεχνητής βροχής, ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, θερμικής απεικόνισης, δοκιμή εσωτερικών υπερτάσεων, ειδικές δοκιμές μηχανικής αντοχής, δοκιμές τεχνητής γήρανσης και ραδιοπαραεμβολών. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες από το πρότυπο δοκιμές σειράς και τύπου σε αλεξικέραυνα μέσης τάσης.

3.3 Δοκιμές Σειράς

Στις δοκιμές σειράς ελέγχεται η συμπεριφορά του αλεξικέραυνο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, εφαρμόζοντας κρουστικούς παλμούς και τάσεις βιομηχανικής συχνότητας, με τιμές που προβλέπονται για κάθε δοκιμή. Η τάση πρέπει να μετρηθεί με απόκλιση ± 1 % και η μέγιστη τιμή της δεν πρέπει να διαφέρει περισσότερο από 1% μεταξύ της λειτουργίας εν κενώ και πλήρους φορτίου. Η κυριότερη απαίτηση για να περάσει ένα αλεξικέραυνο τις δοκιμές αυτές είναι η ικανότητά του να μπορεί να επανέρχεται σε φυσιολογικά επίπεδα θερμοκρασίας μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής.

3.3.1.Θερμική Συμπεριφορά

Στις δοκιμές σειράς η συμπεριφορά του δείγματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ικανότητα του να απάγει θερμότητα, να μπορεί να μειώνει την θερμοκρασία του μετά από την ενεργοποίησή του. Εφαρμόζουμε τρεις διαδοχικούς ρευματικούς παλμούς με ενδιάμεσα διαλείμματα 50 με 60 δευτερόλεπτα. Το αλεξικέραυνο θεωρείται ότι πέρασε από τον έλεγχο αν επιτευχθεί θερμική σταθερότητα, αν η μετρούμενη παραμένουσα τάση πριν και μετά τη δοκιμή δεν διαφέρει περισσότερο από 5% και αν η οπτική εξέταση του δεν αποκαλύπτει ραγίσματα των μη γραμμικών αντιστάσεων οξειδίου του ψευδαργύρου.

3.3.2. Δοκιμή εσωτερικών Υπερτάσεων

Καταρχάς, καθορίζεται η παραμένουσα τάση κεραυνικού παλμού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια τα δείγματα υποβάλλονται σε ένα conditioning τεστ το οποίο περιλαμβάνει 20 κεραυνικά ρεύματα 8/20 με μέγιστη τιμή ίση με το ονομαστικό ρεύμα του αλεξικέραυνου. Κατά τη διάρκεια των παλμών το δείγμα τροφοδοτείται με τάση ίση με 1,2 φορές την τάση λειτουργίας του ενώ οι παλμοί εφαρμόζονται σε 4 ομάδες των 5 παλμών. Τα διαλείμματα μεταξύ των παλμών πρέπει να είναι από 50 ως 60 δευτερόλεπτα ενώ μεταξύ των διαφορετικών ομάδων 25 με 30 λεπτά. Κατά την έναρξη της διαδικασίας η θερμοκρασία του κυκλώματος πρέπει να είναι $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15\text{ K}$. Στη συνέχεια τα δείγματα υποβάλλονται σε δύο υψηλού ρεύματος κεραυνικούς παλμούς 4/10 με μέγιστη τιμή ανάλογα με τον παρακάτω πίνακα:

Αλεξικέραυνο	Μέγιστη τιμή ρεύματος (kA)
10 000 A	100
5 000 A	65
2 500 A	25
1 500 A	10

Πίνακας 1

Μεταξύ των δύο παλμών τα δείγματα θα προθερμαίνονται σε ένα φούρνο έτσι ώστε η θερμοκρασία τους κατά τη διάρκεια του δεύτερου παλμού να ισούται με $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15\text{ K}$ ενώ η θερμοκρασία περιβάλλοντος πρέπει και εδώ να είναι ίση με $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15\text{ K}$.

Μετά το πέρας της διαδικασίας επαναλαμβάνονται οι δοκιμές παραμένουσας τάσης οι οποίες έλαβαν χώρα και πριν από την έναρξη της διαδικασίας. Η δοκιμή θεωρείται πετυχημένη αν επιτευχθεί θερμική σταθερότητα, αν η μετρούμενη τάση πριν και μετά τη δοκιμή δεν έχει αλλάξει περισσότερο από 5% και αν η εξέταση του δείγματος δεν φανερώνει σημάδια οπών, αναφλέξεων και σπασιμάτων των μη γραμμικών αντιστάσεων οξειδίου του ψευδαργύρου (βαρίστορ).

3.3.3. Δοκιμή Σειράς με Εναλλασσόμενη Τάση

Η συγκεκριμένη δοκιμή αποτελείται από δύο μέρη. Καταρχάς, καθορίζεται η παραμένουσα τάση κεραυνικού παλμού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια τα δείγματα υποβάλλονται σε ένα conditioning test το οποίο περιλαμβάνει 20 κεραυνικά ρεύματα 8/20 με μέγιστη τιμή ίση με το ονομαστικό ρεύμα του αλεξικέραυνου. Κατά τη διάρκεια των παλμών το δείγμα τροφοδοτείται με τάση ίση με 1,2 φορές την τάση λειτουργίας του ενώ οι παλμοί εφαρμόζονται σε 4 ομάδες των 5 παλμών. Τα διαλείμματα μεταξύ των παλμών πρέπει να είναι από 50 ως 60 δευτερόλεπτα ενώ μεταξύ των διαφορετικών ομάδων 25 με 30 λεπτά. Κατά την έναρξη της διαδικασίας η θερμοκρασία του κυκλώματος πρέπει να είναι $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15\text{ K}$. Κατά το δεύτερο μέρος του conditioning test, εφαρμόζονται δύο υψηλού ρεύματος παλμοί 4/10, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της αντοχής του δείγματος στην περίπτωση απευθείας κεραυνοπληξίας. Ο ενδιάμεσος χρόνος μεταξύ των παλμών πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 50 και 60 δευτερολέπτων ενώ η θερμοκρασία του κυκλώματος πρέπει να είναι $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ K}$ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15\text{ K}$. Κατά το δεύτερο μέρος της δοκιμής και με τις θερμοκρασίες κυκλώματος και περιβάλλοντος να έχουν τις παραπάνω τιμές, εφαρμόζονται στα δείγματα δύο υψηλής διάρκειας παλμοί ρεύματος με ενδιάμεσο διάλειμμα μεταξύ 50 και 60 δευτερολέπτων σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Αλεξικέραυνο	Τάξη Γραμμικής Εκφόρτισης	Κυματική Γραμμική Αντίσταση (Ω)	Πραγματική Διάρκεια της Κορυφής (μs)	Τροφοδοτούμενη Τάση U_L (kV)
10 000 A	1	$4,9 U_T$	2 000	$3,2 U_T$
10 000 A	2	$2,4 U_T$	2 000	$3,2 U_T$
10 000 A	3	$1,3 U_T$	2 400	$2,8 U_T$
20 000 A	4	$0,8 U_T$	2 800	$2,6 U_T$
20 000 A	5	$0,5 U_T$	3 200	$2,4 U_T$

Πίνακας 2

όπου U_T -η τάση μετρούμενη τάση του δείγματος.

Κατά τη διάρκεια του δεύτερου παλμού καταγράφονται από έναν παλμογράφο η τάση κατά μήκος και το ρεύμα του δείγματος. Η ενέργεια απώλειας του δείγματος κατά τη

διάρκεια του δεύτερου παλμού υπολογίζεται από τις καταγραφόμενες τιμές τάσης και ρεύματος.

Μετά το πέρας της διαδικασίας επαναλαμβάνονται οι δοκιμές παραμένουσας τάσης οι οποίες έλαβαν χώρα και πριν από την έναρξη της διαδικασίας. Η δοκιμή θεωρείται πετυχημένη αν επιτευχθεί θερμική σταθερότητα, αν η μετρούμενη τάση πριν και μετά τη δοκιμή δεν έχει αλλάξει περισσότερο από 5% και αν η εξέταση του δείγματος δεν φανερώνει σημάδια οπών, αναφλέξεων και σπασμάτων των μη γραμμικών αντιστάσεων οξειδίου του ψευδαργύρου.

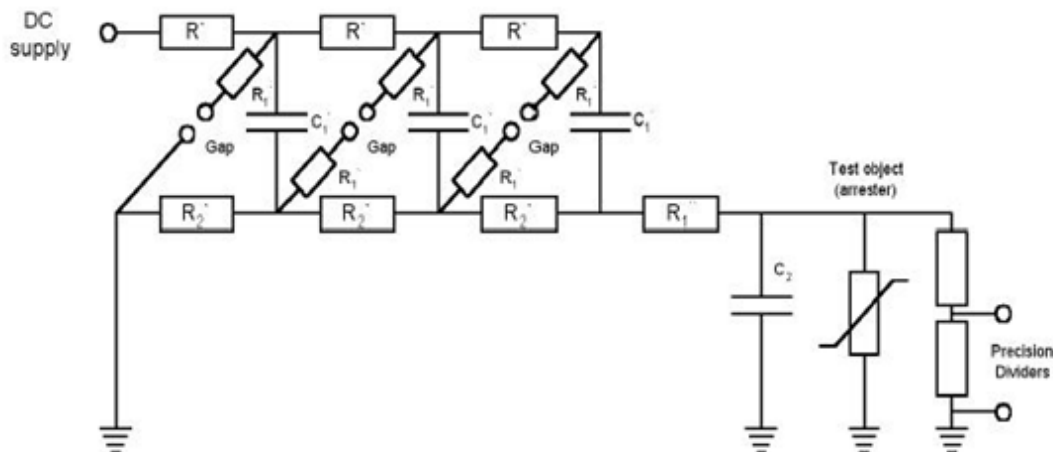
3.4 Δοκιμές τύπου

3.4.1 Έλεγχος της μονωτικής Ικανότητας του Αλεξικέραυνου

Οι δοκιμές αυτές καταδεικνύουν την αντοχή στην τάση της εξωτερικής μόνωσης του αλεξικέραυνου, το οποίου η εξωτερική επιφάνεια πρέπει να καθαριστεί προσεκτικά πριν την οποιαδήποτε διαδικασία.

3.4.1.1 Δοκιμή Κρουστικής Τάσης

Εφαρμόζονται διαδοχικά δεκαπέντε κρουστικές τάσεις στο αλεξικέραυνο, το οποίο θεωρείται ότι έχει περάσει το τεστ αν δεν σημειωθούν εσωτερικές διασπάσεις και αν ο αριθμός των εξωτερικών δεν υπερβαίνει τις δύο. Η τάση δοκιμής είναι 1,3 φορές την τάση προστασίας.

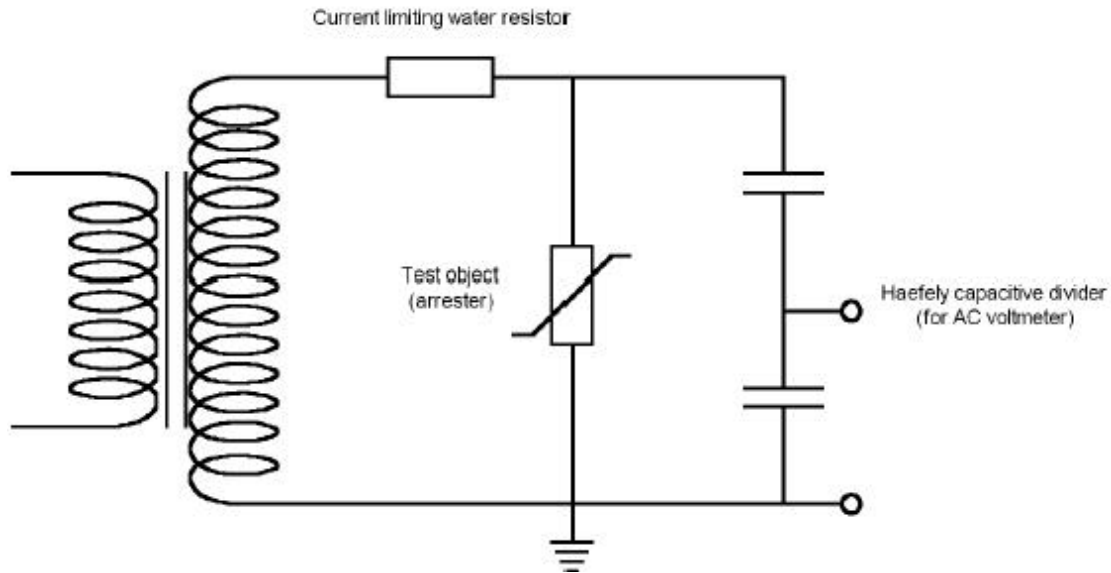


Σχήμα 1: Κύκλωμα για την δοκιμή κρουστικής τάσης

3.4.1.2 Δοκιμή Εναλλασσόμενης Τάσης βιομηχανικής Συχνότητας

Η τάση κατά μήκος του αλεξικέρανου αυξάνεται απότομα ως την τιμή της τάσης προστασίας του πολλαπλασιασμένη επί ένα δείκτη και παραμένει σταθερή για ένα λεπτό. Για αλεξικέρανα των 1500, 2500 και 5000 A ο δείκτης θα ισούται με 0,88 ενώ για αυτά των 10000 και 20000 A με 1.06. Το αλεξικέρανο δεν πρέπει να διασπαστεί κατά τη διάρκεια αυτού του λεπτού.

Αλεξικέρανα τα οποία προορίζονται για εξωτερική χρήση θα εξεταστούν είτε υπό βροχή ενώ όσα προορίζονται για εσωτερική χρήση μόνο υπό ξηρές συνθήκες. Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα που χρησιμοποιείται για τις πειραματικές διαδικασίες.



Σχήμα 2: Κύκλωμα για την δοκιμή εναλλασσόμενη τάσης

3.4.2 Έλεγχος Παραμένουσας Τάσης

Σκοπός των δοκιμών αυτών είναι η απόκτηση όλων των απαραίτητων πληροφοριών για την άντληση της μέγιστης παραμένουσας τάσης από ένα κύκλωμα για όλα τα καθορισμένα ρεύματα και κυματομορφές. Η μέγιστη παραμένουσα τάση για οποιοδήποτε ρεύμα ή κυματομορφή ενός αλεξικέραυτου υπολογίζεται από αυτήν των μερών του πολλαπλασιασμένη επί έναν συγκεκριμένο παράγοντα, ο οποίος προκύπτει από τον μέσο όρο της μέγιστης παραμένουσας τάσης όπως αυτή προκύπτει από συνηθισμένες δοκιμές ρουτίνας και τη μετρούμενη υπολειμματική τάση των επιμέρους μερών του στο ίδιο ρεύμα και στην ίδια κυματομορφή.

3.4.2.1 Έλεγχος Παραμένουσας Τάσης υπό κρουστικό διακοπτικό Ρεύμα

Εφαρμόζεται ένα εναλλασσόμενο ρεύμα στο αλεξικέραυτο και υπολογίζεται σύμφωνα με τα παραπάνω η εναλλασσόμενη παραμένουσα τάση του ενώ η τάση προστασίας του ορίζεται ως αυτή που προκύπτει από το αντίστοιχο ρεύμα.

3.4.2.2 Έλεγχος Παραμένουσας Τάσης υπό κρουστικό κεραυνικό Ρεύμα

Εφαρμόζεται ένα κεραυνικό ρεύμα στο αλεξικέραυνο με μέγιστη τιμή ίση, υποδιπλάσια και διπλάσια με αυτή του ονομαστικού ρεύματος διάσπασης του και υπολογίζεται σύμφωνα με τα παραπάνω η εναλλασσόμενη υπολειμματική τάση του. Σχεδιάζουμε στη συνέχεια την καμπύλη παραμένουσας τάσης-ρεύματος διάσπασης και ορίζουμε ως τάση προστασίας αυτή η οποία αντιστοιχεί στο ονομαστικό ρεύμα.

3.4.2.3 Έλεγχος Παραμένουσας Τάσης απότομου Ρεύματος

Εφαρμόζεται ένα κρουστικό ρεύμα με χρόνο μετώπου 1μs και μέγιστη τιμή ίση με το ονομαστικό ρεύμα διάσπασης με απόκλιση $\pm 5\%$ και υπολογίζεται στη συνέχεια την παραμένουσα τάση του αλεξικέραυνου επιλέγοντας μία από τις παρακάτω διαδικασίες:

α) Πολλαπλασιάζουμε, αρχικά την κυματομορφή της τάσης που πήραμε με έναν παράγοντα (ο οποίος προκύπτει από τον μέσο όρο της μέγιστης παραμένουσας τάσης όπως αυτή προκύπτει από συνηθισμένες δοκιμές ρουτίνας και τη μετρούμενη παραμένουσα τάση των επιμέρους μερών του στο ίδιο ρεύμα και στην ίδια κυματομορφή).

β) Πολλαπλασιάζουμε στη συνέχεια την κλίση της καμπύλης (di/dt) με την αυτεπαγωγή για να βρούμε την πτώση τάσης:

$$u(t) = L di/dt = L' h di/dt \quad (3.1)$$

όπου

$u(t)$ -η τάση αυτεπαγωγής ως συνάρτηση του χρόνου (kV)

L' -η αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους (μH/m)

h -το μήκος του αλεξικέραυνου (m).

γ) Προσθέτοντας τα αποτελέσματα των Α και Β καταλήγουμε σε μία κυματομορφή της οποίας η μέγιστη τιμή αποτελεί και την ζητούμενη απομένουσα τάση.

1) Πολλαπλασιάζουμε ομοίως την κυματομορφή τάσης με τον ίδιο παράγοντα.

2) Υπολογίζουμε την τάση αυτεπαγωγής μεταξύ των γειώσεων του αλεξικέραυνου από τον παρακάτω τύπο:

$$U_L = L di/dt = L' h I_n/T_f \quad (3.2)$$

όπου

U_L -η μέγιστη τιμή της τάσης αυτεπαγωγής (kV)

L' -η αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους (μH/m)

h -το μήκος του αλεξικέραυνου (m)

T_f -ο χρόνος μετώπου του ρεύματος ίσος με 1μs

I_n -το ονομαστικό ρεύμα διάσπασης (kV).

γ) Προσθέτουμε τα αποτελέσματα των I και II και το αποτέλεσμα αποτελεί τη ζητούμενη παραμένουσα τάση.

3.4.3 Έλεγχος εσωτερικών μερικών Εκκενώσεων

Η παρουσία εσωτερικών εκκενώσεων σε ένα αλεξικέραυνο καταδεικνύει ότι έχει μειωθεί η μονωτική ικανότητά του. Η μονωτική υποβάθμιση χαρακτηρίζεται συνήθως από την παρουσία κενών μέσα στο υλικό της μόνωσης, η δημιουργία των οποίων ανιχνεύεται μετρώντας το επακόλουθο παραγόμενο ρεύμα. Αυξάνεται η εναλλασσόμενη τάση ως την ονομαστική τάση του δείγματος, διατηρείται σταθερή για 2 ως 10 δευτερόλεπτα και στη συνέχεια μειώνεται ως 1,05 την τιμή της τάσης λειτουργίας του δείγματος. Η μετρούμενη τιμή για την εσωτερική μερική εκκένωση δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 pC.

3.4.4 Έλεγχος Ραδιοπαρεμβολών Τάσης

Η συγκεκριμένη δοκιμή πραγματοποιείται για τον υπολογισμό του θορύβου που παράγεται στις ραδιοσυχνότητες μεταξύ 150 kHz και 30 MHz. Με τη βοήθεια του κυκλώματος παρακάτω ακολουθούμε την εξής διαδικασία: Ρυθμίζουμε την τάση ίση με $1,15 U_c$ και στη συνέχεια την μειώνουμε σε $1,05 U_c$, όπου U_c τάση λειτουργίας του αλεξικέραυνου. Ακολούθως, η τάση θα μειωθεί με σταθερό βήμα ως $0,5 U_c$, θα αυξηθεί ως $1,05 U_c$ και τελικά θα ξαναμειωθεί ως $0,5 U_c$. Σε κάθε βήμα θα παίρνουμε μία μέτρηση, θα καταγράφουμε το επίπεδο ραδιοπαρεμβολής και θα το σχεδιάζουμε ως συνάρτηση της επιβαλλόμενης τάσης. Η καμπύλη η οποία θα δημιουργηθεί είναι η χαρακτηριστική ραδιοπαρεμβολής του αλεξικέραυνου. Το αλεξικέραυνο θα θεωρείται

ότι έχει περάσει τον έλεγχο αν το επίπεδο ραδιοπαρεμβολής του όταν η τάση ισούται με $1,05 U_c$ και όλα τα μικρότερα βήματα της τάσης δεν ξεπερνούν τα 2500 μV . Τέλος, θα καταγράφονται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες διεξαγωγής της δοκιμής, δοκιμή η οποία μπορεί να τεθεί υπό αμφισβήτηση αν η υγρασία ξεπερνάει το 80%.

3.4.5 Έλεγχος μηχανικής Αντοχής (Θλίψη-Εφελκυσμός)

Εν λόγω δοκιμή πραγματοποιείται για να διαπιστωθεί αν το αλεξικέραυνο αντέχει στις τιμές σε μηχανικές καταπονήσεις. Τοποθετούμε τα δείγματα οριζόντια και κολλημένα με την οριζόντια επιφάνεια της μηχανής ελέγχου. Το φορτίο εφαρμόζεται στο ελεύθερο άκρο του αλεξικέραυνο και το οποίο θα ισούται με το μέγιστο επιτρεπόμενο service load (MPDSL). Το φορτίο θα αυξηθεί σταδιακά στην μέγιστη τιμή του μέσα σε 30 με 90 δευτερόλεπτα και θα διατηρηθεί για 60 με 90 δευτερόλεπτα. Κατά τη διάρκεια αυτή θα μετρηθεί η απόκλιση, στη συνέχεια το φορτίο θα απελευθερωθεί σταδιακά και θα καταγραφεί η παραμένουσα απόκλιση. Το αλεξικέραυνο θα θεωρηθεί ως ικανοποιητικό αν παρατηρηθούν:

- Καμία ορατή μηχανική ζημιά.
- Συνεχής καμπύλη δύναμης-απόκλισης.
- Επιμήκυνση του αλεξικέραυνο με απόκλιση ± 5 % του μήκους του πριν τον έλεγχο.

3.4.6 Μακράς Διάρκειας Έλεγχος Αντοχής Ρεύματος

Η εφαρμοζόμενη τάση στα δείγματα πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 kV και να μην υπερβαίνει τα 6 kV (αν η τάση του αλεξικέραυνο δεν είναι μικρότερη από 3 kV). Κάθε δοκιμή περιλαμβάνει 18 διασπάσεις χωρισμένες σε έξι ομάδες των τριών ενώ τα ενδιάμεσα διαλείμματα θα πρέπει να είναι 50 με 60 δευτερόλεπτα για τις εκφορτίσεις και για την κάθε ομάδα τέτοια ώστε το αλεξικέραυνο να επανέρχεται στη φυσιολογική του θερμοκρασία. Μετά το πέρας των μετρήσεων και αφού το αλεξικέραυνο έχει επανέλθει σε φυσιολογική θερμοκρασία πρέπει να επαναληφθούν οι έλεγχοι παραμένουσας τάσης (αν αυτοί είχαν προηγηθεί) και δεν πρέπει να υπάρχει απόκλιση μεγαλύτερη του ± 5 %.

Για να θεωρείται πετυχημένος ο έλεγχος πρέπει να μην παρατηρούνται σπασίματα ή οποιαδήποτε άλλη σημαντική ζημιά στο δείγμα μας.

Τέλος, ενδεικτικά αναφέρονται και ορισμένες περιβαλλοντικές δοκιμές οι οποίες καταδεικνύουν κατά πόσο το αλεξικέραυνο είναι ευάλωτο στις περιβαλλοντικές συνθήκες και πρέπει να γίνονται η μία μετά την άλλη στο ίδιο δείγμα. Ειδικότερα, υπάρχουν ο έλεγχος θερμοκρασίας, διοξειδίου του θείου και νέφους άλατος. Το αλεξικέραυνο θεωρείται ικανοποιητικό αν δεν υπάρχουν ορατές ζημιές και διαρροή ρεύματος.

Βιβλιογραφία

1. Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Γ. Καραγιαννόπουλος, «Μετρήσεις σε βιομηχανικές διατάξεις και υλικά», Αθήνα 2004.
2. Π.Δ. Μπούρκας, «Βιομηχανικές-Κτιριακές Ηλεκτρομηχανολογικές Εγκαταστάσεις».
3. Ι.Α. Σταθόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι».
4. Π.Δ. Μπούρκας, Κ.Θ. Δέρβος, «Ηλεκτρομονωτικά Υλικά», Αθήνα 1990.

Κεφάλαιο 4: Ανασκόπηση του Προτύπου IEC 60099-5

4.1 Εισαγωγικά

Με εξαίρεση ελάχιστες περιπτώσεις όπου ένα αλεξικέραυνο λειτουργεί ως μία συσκευή περιορισμού των υπερτάσεων, αναμένεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων να συμπεριφέρεται σαν μονωτής. Η μονωτική δυνατότητα ενός αλεξικέραυνου κρίνεται έτσι ως ιδιαίτερα σημαντική τόσο για τη διάρκεια ζωής του ίδιου του αλεξικέραυνου όσο και για την αξιοπιστία του συστήματος. Στο εν λόγω πρότυπο παρουσιάζονται μερικές από τις πιο συνηθισμένες διαγνωστικές μεθόδους για αλεξικέραυνα του οξειδίου του ψευδαργύρου χωρίς διάκενο σε λειτουργία όπως και λεπτομερείς πληροφορίες για μετρήσεις διαρροής ρεύματος. Παρακάτω ορίζονται μεγέθη και συσκευές, που χρησιμοποιούνται στις on-line διαγνωστικές δοκιμές αλεξικέραυνων :

α. Δείκτες Σφαλμάτων: Οι δείκτες σφαλμάτων δίνουν μία ξεκάθαρη εικόνα ενός κατεστραμμένου αλεξικέραυνου χωρίς να είναι αναγκαία η αποσύνδεση του από τη γραμμή. Η συσκευή ενδέχεται να είναι είτε ενσωματωμένη στο αλεξικέραυνο είτε μία εξωτερική μονάδα συνδεδεμένη σε σειρά με αυτό. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται συνήθως στο πλάτος και στη διάρκεια του ρεύματος του αλεξικεραύνου ή στη θερμοκρασία της μη γραμμικής αντίστασης οξειδίου του ψευδαργύρου.

β. Συσκευές Αποσύνδεσης: Χρησιμοποιούνται συνήθως σε αλεξικέραυνα μέσης τάσης και δίνουν και αυτές μία εικόνα ενός κατεστραμμένου αλεξικέραυνου αποσυνδέοντάς το όμως από το σύστημα. Μπορεί να είναι επίσης ενσωματωμένη στο αλεξικέραυνο ή μία εξωτερική συσκευή ενώ η τυπική αρχή λειτουργίας τους είναι ένας εκρηκτικός μηχανισμός ενεργοποιούμενος από το ρεύμα σφάλματος/διαρροής.

γ. Μετρητές Υπερτάσεων: Οι συγκεκριμένοι μετρητές λειτουργούν σε ρεύματα πάνω από ένα συγκεκριμένο πλάτος ή πάνω από συγκεκριμένους συνδυασμούς πλάτους και διάρκειας ρεύματος. Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας και την ευαισθησία του μετρητή,

δύναται αυτός να παρουσιάσει ενδείξεις για υπερτάσεις που παρουσιάζονται στο σύστημα ή να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των εκφορτίσεων που αντιστοιχούν σε σημαντικές ενεργειακές καταπονήσεις του αλεξικέραυνου χωρίς ωστόσο να καθιστά σαφή την κατάστασή του.

δ. Σπινθηριστές καταγραφής: Χρησιμοποιούνται για να δείξουν τόσο τον αριθμό όσο και το πλάτος και διάρκεια των ρευμάτων εκφόρτισης. Μερικοί σπινθηριστές μπορούν να εξεταστούν με το αλεξικέραυνο σε λειτουργία ενώ για άλλους χρειάζεται να τεθεί εκτός λειτουργίας το αλεξικέραυνο. Απαιτείται επίσης το αλεξικέραυνο να διαθέτει γείωση ή η συσκευή να είναι ενσωματωμένη σε αυτό. Οι σπινθηριστές δεν παρέχουν άμεσες πληροφορίες σχετικά με την πραγματική κατάσταση του αλεξικέραυνου, ενδέχεται όμως με τη σωστή εκτίμηση της κατάστασης του διακένου να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την περαιτέρω χρησιμοποίηση ή όχι του αλεξικέραυνου.

ε. Μετρήσεις θερμοκρασίας: Μακρινές μετρήσεις ενός αλεξικέραυνου μπορεί να πραγματοποιηθούν με μέσα θερμικής απεικόνισης. Οι μετρήσεις αυτές ωστόσο ενδείκνυνται μόνο για εκτιμήσεις καθώς η πτώση θερμοκρασίας μεταξύ των αντιστάσεων και της επιφάνειας μπορεί να είναι σημαντική. Αντιθέτως, άμεσες μετρήσεις της θερμοκρασίας των αντιστάσεων δίνουν μία ακριβή ένδειξη της κατάστασης του αλεξικέραυνου, απαιτούν όμως να είναι εφοδιασμένο το αλεξικέραυνο με συσκευές μέτρησης.

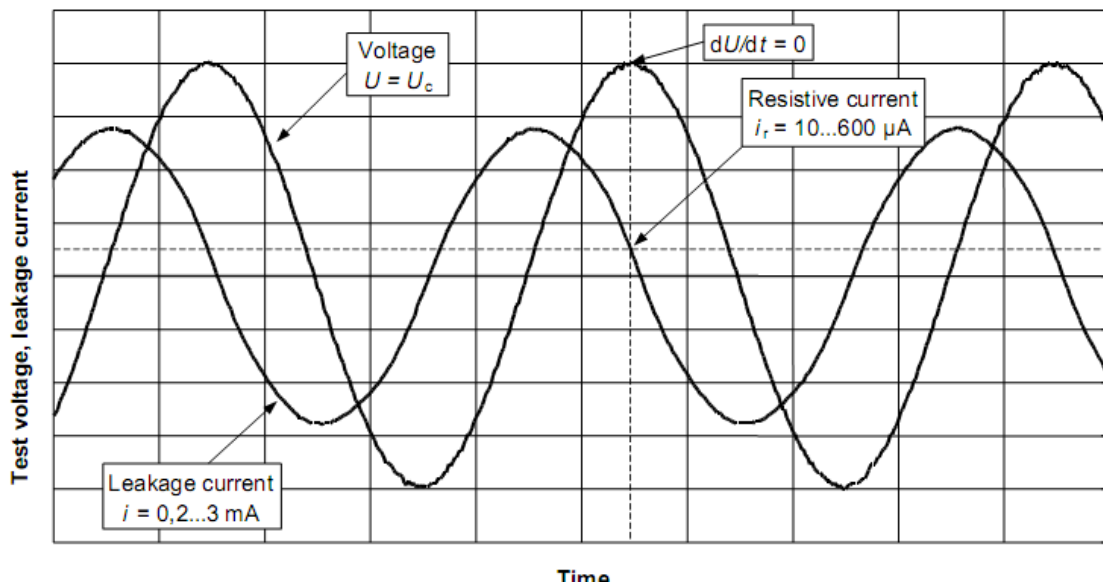
στ. Μετρήσεις του ρεύματος διαρροής του αλεξικέραυνου: Η πλειοψηφία των διαγνωστικών μεθόδων της κατάστασης των αλεξικέραυνων χωρίς διάκενο βασίζονται σε μετρήσεις του ρεύματος διαρροής. Και αυτό διότι οποιαδήποτε διαταραχή της μονωτικής ικανότητας ενός αλεξικέραυνου θα προκαλέσει αύξηση του ρεύματος διαρροής ή απώλεια ενέργειας για συγκεκριμένες τιμές τάσης και θερμοκρασίας. Οι διαδικασίες μετρήσεων μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: Στις on-line μετρήσεις, κατά τις οποίες το αλεξικέραυνο βρίσκεται συνδεδεμένο στο σύστημα και λειτουργεί κανονικά και στις off-line, κατά τις οποίες το αλεξικέραυνο αποσυνδέεται από το σύστημα και του παρέχεται τάση από ανεξάρτητη πηγή.

Οι off-line μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με πηγές τάσεις ειδικά σχεδιασμένες για αυτό τον σκοπό όπως μεταφερόμενη AC/DC γεννήτρια. Οι συγκεκριμένοι μέθοδοι παρέχουν αρκετά καλή ακρίβεια, τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι όμως το σημαντικό κόστος του εξοπλισμού και η ανάγκη αποσύνδεσης του αλεξικέραυνου από το σύστημα.

Οι on-line μετρήσεις, κατά τις οποίες το αλεξικέραυνο βρίσκεται συνδεδεμένο λειτουργεί κανονικά, είναι και οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι. Τόσο για πρακτικούς λόγους όσο και λόγους ασφαλείας το ρεύμα διαρροής είναι δυνατόν να μετρηθεί μόνο από το γειωμένο άκρο του αλεξικέραυνου. Για αυτό το λόγο, το τελευταίο πρέπει να είναι εφοδιασμένο με μονωτικό γειωμένο άκρο.

4.2 Ιδιότητες του Ρεύματος Διαρροής των μη γραμμικών Αντιστάσεων Οξειδίων του Ψευδαργύρου.

Το AC ρεύμα διαρροής χωρίζεται σε χωρητικό και ωμικό με το πρώτο να εμφανίζεται σαφώς μεγαλύτερο από το δεύτερο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.

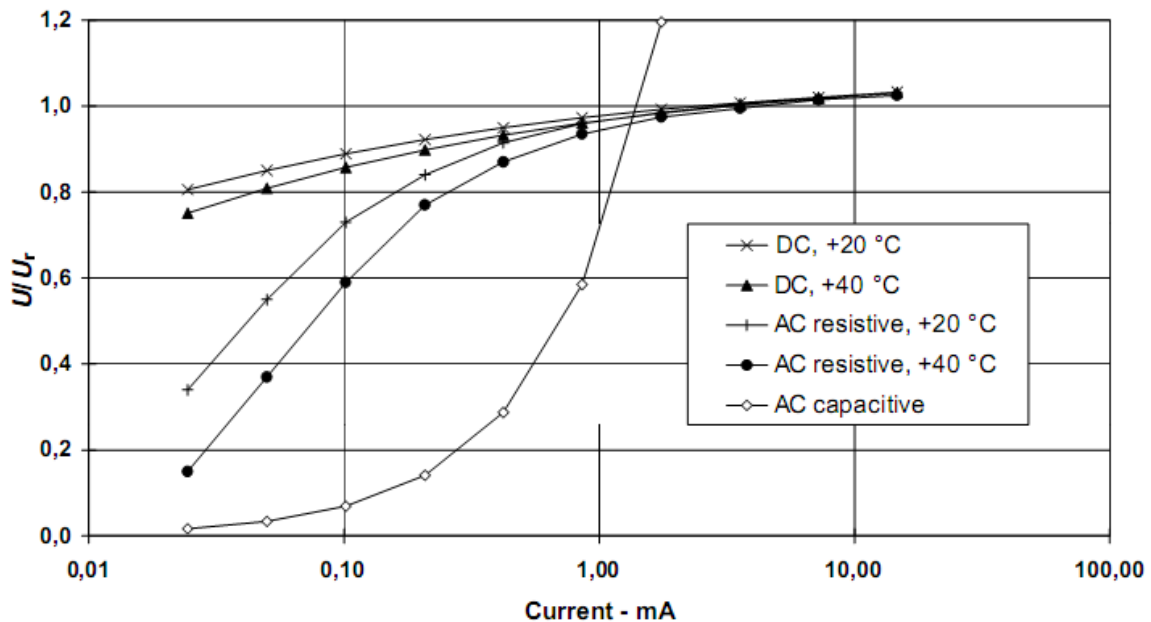


Σχήμα 1: Τυπικό ρεύμα διαρροής ενός αλεξικέραυνου σε συνθήκες εργαστηρίου

Το χωρητικό ρεύμα διαρροής μετριέται στο γειωμένο άκρο ενός αλεξικέραυνου και προκαλείται από την επιτρεπτότητα των μη γραμμικών αντιστάσεων και τις παράσιτες χωρητικότητες. Η χωρητικότητα ενός ωμικού στοιχείου κυμαίνεται από 60 pF.kV/cm² ως 150 pF.kV/cm² και καταλήγει σε ένα χωρητικό ρεύμα διαρροής από 0.2 mA ως 3 mA υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Δεν υπάρχει κάτι το οποίο να αποδεικνύει ότι μία επιδείνωση της κατάστασης του αλεξικέραυνου θα προκαλούσε σημαντική αύξηση στο χωρητικό ρεύμα διαρροής με αποτέλεσμα να θεωρείται απίθανο οι μετρήσεις του εν λόγω ρεύματος να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήριο για την κατάσταση ενός αλεξικέραυνου.

Το ωμικό ρεύμα διαρροής για συγκεκριμένες τιμές τάσης και θερμοκρασίας αποτελεί έναν ευαίσθητο δείκτη αλλαγών της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος των αντιστάσεων.

Το ωμικό ρεύμα μπορεί δηλαδή να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο στον εντοπισμό αλλαγών της κατάστασης ενός αλεξικέραυνου. Παρακάτω φαίνονται τυπικές χαρακτηριστικές του ωμικού και του χωρητικού ρεύματος διαρροής.



Σχήμα 2: Τυπικές χαρακτηριστικές Τάσης-Ρεύματος για ένα αλεξικέραυνο

Η μη γραμμική χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος ενός αλεξικέραυνου προκαλεί αρμονικές στο ρεύμα διαρροής όταν στο αλεξικέραυνο εφαρμόζεται μία ημιτονοειδής τάση. Η παρουσία των αρμονικών εξαρτάται από το μέγεθος του ωμικού ρεύματος και το βαθμό της μη γραμμικότητας, η οποία είναι συνάρτηση της τάσης και της θερμοκρασίας. Οι αρμονικές επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένδειξη του ωμικού ρεύματος. Η παρουσία αρμονικών στην τάση αποτελεί επίσης πηγή αρμονικών, γεγονός το οποίο ενδέχεται να επηρεάσει τη μέτρηση αρμονικών στο ρεύμα διαρροής. Τα χωρητικά αρμονικά ρεύματα που παράγονται από τις αρμονικές της τάσης δύνανται να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτά που δημιουργούνται από τη μη γραμμική αντίσταση του αλεξικέραυνου.

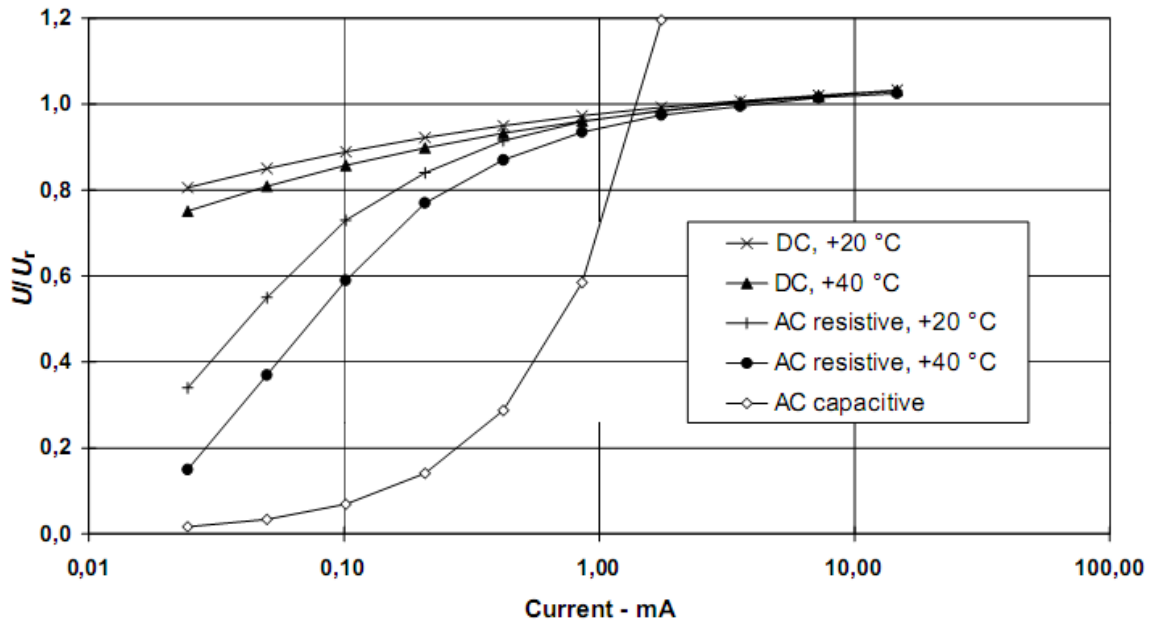
Η απώλεια ενέργειας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως διαγνωστική ένδειξη των αλεξικέραυνων με τρόπο εφάμιλλο με αυτό του ωμικού ρεύματος διαρροής.

Τέλος, το επιφανειακό ρεύμα διαρροής χρησιμοποιείται σε διαγνωστικές μετρήσεις. Ρεύμα διαρροής στην εξωτερική επιφάνεια του αλεξικέραυνου μπορεί να εμφανιστεί προσωρινά είτε κατά τη διάρκεια μίας βροχόπτωσης είτε σε καταστάσεις έντονης υγρασίας σε συνδυασμό με επιφανειακή μόλυνση. Επιπλέον, μπορεί να εμφανιστεί και ρεύμα διαρροής στην εσωτερική επιφάνεια εξαιτίας ενδεχόμενης διείσδυσης υγρασίας στο εσωτερικό του αλεξικέραυνου. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων τα επιφανειακά αυτά ρεύματα αλληλεπιδρούν με το ρεύμα διαρροής των αντιστάσεων, η ευαισθησία τους ωστόσο διαφέρει ανάλογα με τη μέτρηση. Η επιρροή, τέλος του ρεύματος στην εξωτερική επιφάνεια είναι δυνατόν να αποφευχθεί είτε πραγματοποιώντας τις μετρήσεις σε ξηρές συνθήκες είτε με οποιαδήποτε άλλη κατάλληλη μέθοδο όπως παρακάμπτοντας το επιφανειακό ρεύμα στο έδαφος.

4.3 Μέτρηση του Συνολικού Ρεύματος Διαρροής

Το συνολικό ρεύμα διαρροής εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το χωρητικό μέρος καθώς το αντίστοιχο ωμικό είναι κατά πολλές τάξεις μικρότερο. Τα δύο αυτά ρεύματα παρουσιάζουν επίσης μία διαφορά φάσης 90° . Χρειάζεται επομένως μία αρκετά μεγάλη αύξηση του ωμικού ρεύματος προκειμένου να εμφανιστεί μία σημαντική αλλαγή στο επίπεδο του συνολικού ρεύματος διαρροής, το οποίο είναι επιπλέον ευαίσθητο στην

εγκατάσταση μιας και το χωρητικό ρεύμα εξαρτάται από τις παράσιτες χωρητικότητες. Οι on-line μετρήσεις του συνολικού ρεύματος διαρροής χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πράξη και πραγματοποιούνται με τη χρήση αμπερόμετρων, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ενσωματωμένα σε μετρητές υπερτάσεων. Παρακάτω φαίνεται η επιρροή που έχει στο συνολικό ρεύμα διαρροής η αύξηση του ωμικού του μέρους. Η μικρή ευαισθησία του συνολικού ρεύματος διαρροής σε μεταβολές της τιμής του ωμικού του μέρους, καθιστά το πρώτο κατάλληλο διαγνωστικό μέσο μόνο κατά την εξαιρετικά σπάνια περίπτωση κατά την οποία το ωμικό ρεύμα είναι της ίδιας τάξης με το χωρητικό.



Σχήμα 3: Επιρροή της αύξησης της ωμικής συνιστώσας στο συνολικό ρεύμα διαρροής

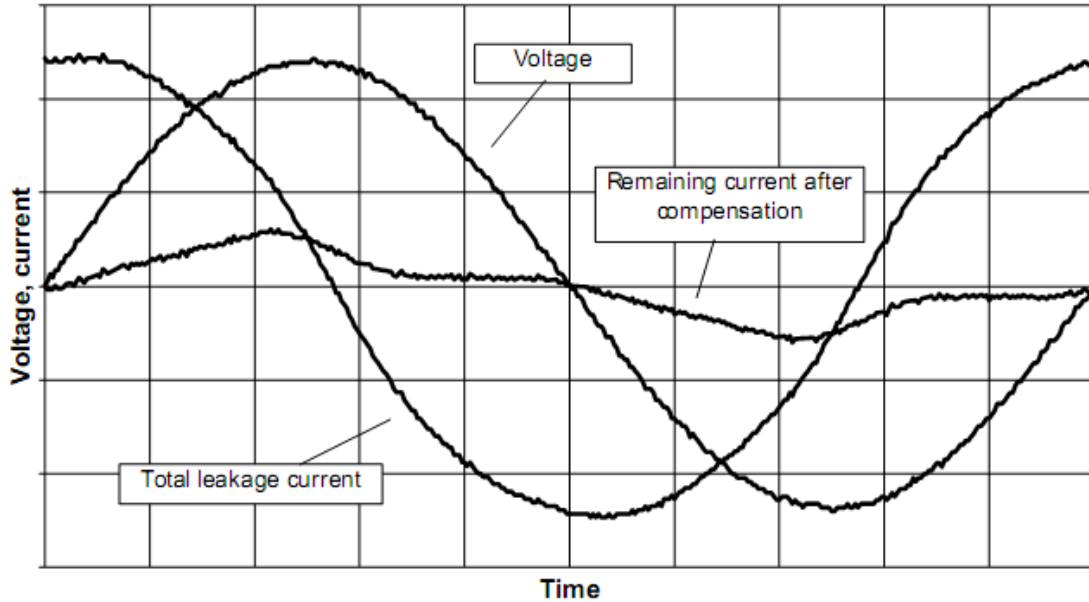
4.4 Μέτρηση του Ωμικού Ρεύματος Διαρροής ή της Απώλειας Ενέργειας

Το ωμικό ρεύμα διαρροής ή η απώλεια ενέργειας μπορεί να καθοριστεί με διάφορες μεθόδους, εκ των οποίων τρεις αναγνωρίζονται ως βασικές, με τον περαιτέρω διαχωρισμό του σε υποκατηγορίες να είναι επίσης δυνατός.

Μέθοδος Α: Απευθείας μέτρηση του ωμικού ρεύματος διαρροής. Η μέθοδος αυτή χωρίζεται στις παρακάτω τέσσερις υποκατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο απομόνωσης της ωμικής συνιστώσας του ρεύματος διαρροής.

A₁. Χρησιμοποιώντας ένα σήμα τάσης ως αναφορά: Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην χρήση της τάσης κατά μήκος του αλεξικέραυνου ως σήμα αναφοράς. Με τη βοήθεια ενός παλμογράφου ή μίας παρόμοιας συσκευής είναι δυνατόν να καταγραφεί απευθείας η τάση και το ωμικό ρεύμα διαρροής όταν η τάση βρίσκεται στη μέγιστη τιμή της. Πρακτικά, η ακρίβεια της μεθόδου είναι περιορισμένη κυρίως λόγω της μετατόπισης της φάσης του σήματος αναφοράς και των διακυμάνσεων στο πλάτος και στη φάση της τάσης κατά μήκος των μη γραμμικών αντιστάσεων στο γειωμένο άκρο του αλεξικέραυνου. Η παρουσία αρμονικών τάσης μπορεί να μειώσουν ακόμα περισσότερο την ακρίβεια της μεθόδου. Σημαντικό, τέλος μειονέκτημα για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αλεξικέραυνου αποτελεί η ανάγκη για ένα σήμα αναφοράς.

A₂. Αντιστάθμιση της χωρητικής συνιστώσας με χρήση σήματος αναφοράς: Η συγκεκριμένη μέθοδος αποσκοπεί στην αύξηση της ευαισθησίας της μέτρησης της ωμικής συνιστώσας. Η βασική αρχή είναι μία γέφυρα υψηλής τάσης όπου το χωρητικό-ωμικό μέρος ρυθμίζεται να αντισταθμίζει τη χωρητική συνιστώσα έτσι ώστε μόνο η ωμική συνιστώσα να συνεισφέρει στην καταγραφόμενη τάση και η οποία μπορεί να μελετηθεί με τη βοήθεια ενός παλμογράφου. Η γέφυρα βρίσκεται σε ισορροπία όταν η τάση είναι σχεδόν μηδενική και η χωρητική συνιστώσα είναι στη μέγιστη τιμή της. Επειδή βέβαια η χωρητικότητα του αλεξικέραυνου εξαρτάται από την τάση (ειδικότερα αυξάνει με την τάση), όσο η χωρητικότητα της γέφυρας παραμένει σταθερή, το ρεύμα που απομένει αναπαριστά μαζί με το ωμικό και ένα μέρος του χωρητικού ρεύματος. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Η μέθοδος αυτή, τέλος παρουσιάζει τα ίδια προβλήματα στην ακρίβεια και μειονεκτήματα στην εφαρμογή της on-line με την προηγούμενη μέθοδο.



Σχήμα 4: Ρεύμα που απομένει μετά την αντιστάθμιση από το χωρητικό ρεύμα

A₃. Αντιστάθμιση της χωρητικής συνιστώσας χωρίς σήμα αναφοράς: Η βασική αρχή είναι ότι ένα σήμα αναφοράς θεμελιώδους συχνότητας δημιουργείται τεχνητά από πληροφορίες απορρέουσες από το ρεύμα διαρροής. Με τη σωστή ρύθμιση του πλάτους και της γωνίας φάσης, η οποία μπορεί να γίνει αυτόματα ή με τη χρήση παλμογράφου, το σήμα αναφοράς μπορεί να αντικαταστάσει τη χωρητική συνιστώσα του ρεύματος διαρροής. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για on-line δοκιμές. Ένα σημαντικό πρόβλημα αποτελεί η παρουσία αρμονικών τάσης οι οποίες προκαλούν αρμονικά χωρητικά ρεύματα τα οποία αλληλεπιδρούν με τη ωμική συνιστώσα ενώ και σε αυτή την περίπτωση το ρεύμα που απομένει αναπαριστά μαζί με το ωμικό και ένα μέρος του χωρητικού ρεύματος. Τέλος, μεταβολές της φάσης των τάσεων και των ρευμάτων ενδέχεται να μειώσουν την ακρίβεια όπως και στις δύο προαναφερθείσες μεθόδους.

A₄. Χωρητική αντιστάθμιση συνδυάζοντας το ρεύμα διαρροής των τριών φάσεων: Η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι τα χωρητικά ρεύματα μηδενίζονται αν τα ρεύματα διαρροής των αλεξικέραυνων των τριών φάσεων αθροιστούν. Το ρεύμα που προκύπτει αποτελείται από τις αρμονικές των ωμικών ρευμάτων των τριών αλεξικέραυνων μιας και οι θεμελιώδεις συνιστώσες μηδενίζονται αν έχουν το ίδιο πλάτος. Αν υπάρξει κάποια αύξηση της ωμικής συνιστώσας σε οποιοδήποτε από τα τρία αλεξικέραυνα, αυτή θα

εμφανιστεί στο συνολικό ρεύμα καθώς τα χωρητικά ρεύματα δεν θα μεταβληθούν. Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δεν υπάρχει η ανάγκη για ένα σήμα αναφοράς. Για on-line δοκιμές, το κυριότερο μειονέκτημα είναι η ανάγκη για τέλεια συμμετρία η οποία θα εξασφαλίσει την ισότητα των χωρητικών ρευμάτων ενώ και η παρουσία αρμονικών τάσης θα προκαλέσει αρμονικές στο συνολικό ρεύμα επηρεάζοντας έτσι την ακρίβεια της μεθόδου.

Μέθοδος Β: Έμμεσος καθορισμός του ωμικού μέρους μέσω της αρμονικής ανάλυσης του ρεύματος διαρροής.

B₁. Ανάλυση της τρίτης αρμονικής: Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι οι αρμονικές δημιουργούνται στο ρεύμα διαρροής από την μη γραμμική χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του αλεξικέραυνου. Δεν χρειάζεται τάση αναφοράς καθώς θεωρούμε ότι όλες οι αρμονικές προέρχονται από το μη γραμμικό ωμικό ρεύμα. Το περιεχόμενο των αρμονικών εξαρτάται από το πλάτος του ωμικού ρεύματος, το βαθμό της μη γραμμικότητας της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος, την τάση και τη θερμοκρασία του αλεξικέραυνου. Επιπλέον, η τρίτη αρμονική είναι αυτή η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για διαγνωστικές μετρήσεις καθώς αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του ωμικού ρεύματος ενώ για την μετατροπή από το επίπεδο της αρμονικής σε αυτό του ωμικού ρεύματος βασίζεται σε πληροφορίες που παρέχονται είτε από τον κατασκευαστή είτε από εργαστηριακές μετρήσεις. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί για on-line μετρήσεις με το κυριότερο ωστόσο πρόβλημα να είναι η ευαισθησία των αρμονικών στην τάση. Ειδικότερα, οι αρμονικές τάσης μπορεί να δημιουργήσουν χωρητικά αρμονικά ρεύματα τα οποία μπορούν να συγκριθούν σε μέγεθος με τα αρμονικά ρεύματα που προέρχονται από τη μη γραμμική αντίσταση του αλεξικέραυνου. Υπάρχει κατά αυτόν τρόπο η πιθανότητα να παρουσιάζεται σημαντικό σφάλμα στη μέτρηση του αρμονικού ρεύματος.

B₂. Ανάλυση της τρίτης αρμονικής με αντιστάθμιση των αρμονικών τάσης: Η εν λόγω μέθοδος βασίζεται στην ίδια αρχή με την προηγούμενη, η ευαισθησία όμως των αρμονικών στην τάση έχει μειωθεί αισθητά με την εισαγωγή ενός σήματος ρεύματος που

αντικαθιστά το χωρητικό ρεύμα τρίτης αρμονική στο αλεξικέραυνο και το οποίο προέρχεται από το ηλεκτρικό πεδίο στη βάση του αλεξικέραυνου. Και σε αυτή τη μέθοδο η μετατροπή από την τρίτη αρμονική στο ωμικό ρεύμα απαιτεί πληροφορίες από τον κατασκευαστή ενώ και αυτή η μέθοδος θεωρείται κατάλληλη για on-line μετρήσεις.

B₃. Ανάλυση της πρώτης αρμονικής: Το θεμελιώδες μέρος του ωμικού ρεύματος το παίρνουμε με χρήση κατάλληλων φίλτρων και ολοκληρώνοντας το ρεύμα διαρροής παράγοντας ένα σήμα ανάλογο στο ωμικό μέρος. Χρησιμοποιώντας έτσι μόνο τα θεμελιώδη μέρη τάσης και ρεύματος καταφέρνουμε πρακτικά να εξουδετερώσουμε την επιρροή της τάσης στις αρμονικές κατά τη διάρκεια των on-line μετρήσεων, χωρίς ωστόσο να εξαλείψουμε την εξάρτηση της ακρίβειας της μεθόδου από τις μεταβολές φάσης στις τάσεις και στα ρεύματα. Η κυριότερη, τέλος δυσκολία της παραπάνω τεχνικής είναι η ανάγκη να πάρουμε ένα σήμα τάσης π.χ. από το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή.

Μέθοδος C: Άμεσος καθορισμός των ενεργειακών απωλειών.

Η απώλεια ενέργειας είναι το ολοκλήρωμα του γινομένου των στιγμιαίων τιμών της τάσης και του ρεύματος διαρροής διαιρούμενες με το χρόνο. Η επιρροή των αρμονικών στην τάση μειώνεται αισθητά με την πολλαπλασιαστική και ολοκληρωτική διαδικασία. Το κυριότερο, τέλος μειονέκτημα αποτελεί και πάλι η ανάγκη για ένα σήμα τάσης ενώ και η ακρίβεια σε on-line μετρήσεις μπορεί να μειωθεί αρκετά εξαιτίας των φασικών μεταβολών στις τάσεις και στα ρεύματα όπως και σε προηγούμενες μεθόδους.

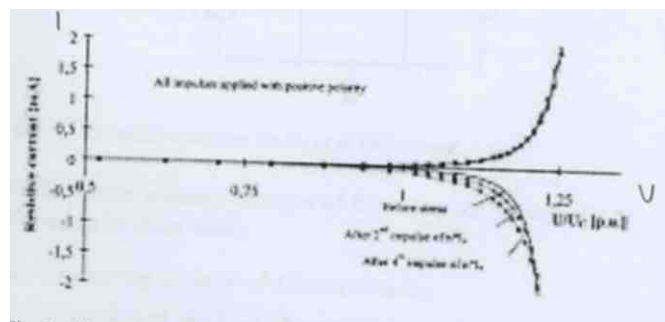
Κεφάλαιο 5: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Εκτός από τις διαγνωστικές μεθόδους που περιγράφονται στα δύο πρότυπα έχουν εξεταστεί και διάφορες άλλες δοκιμές είτε on-line είτε off-line οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

Οι Christian Heinrich και Volker Hinrichsen περιγράφουν στο [1] μία σειρά δοκιμών οι οποίες βασίζονται στη μέτρηση του ρεύματος διαρροής.

α. Μέτρηση της Τάσης Αναφοράς

Τάση αναφοράς ορίζεται ως η πτώση τάσης μεταξύ των γειώσεων ενός αλεξικέραυνου όταν εφαρμόζεται σε αυτό το ρεύμα αναφοράς, το οποίο καθορίζεται από τον κατασκευαστή και κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1 και 10 mA. Το ρεύμα αυτό βρίσκεται στην περιοχή διάσπασης της χαρακτηριστικής V-I, κοντά στο σημείο διάσπασης και αποτελείται από ένα συγκριτικά μικρό χωρητικό και από ένα μεγάλο ωμικό ρεύμα. Η μεταβολή της τάσης αναφοράς που προκαλείται από την καταπόνηση του αλεξικέραυνου μπορεί να είναι είτε αρνητική είτε θετική είτε ακόμα και μηδενική. Κάτι τέτοιο βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με το πώς καθορίζεται το ρεύμα αναφοράς σε σχέση με σημείο διάσπασης του αλεξικέραυνου. Κατά αυτό τον τρόπο, η εν λόγω μέθοδος δεν αποτελεί αξιόπιστο δείκτη της αλλαγής της χαρακτηριστικής V-I και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για διαγνωστικούς σκοπούς.



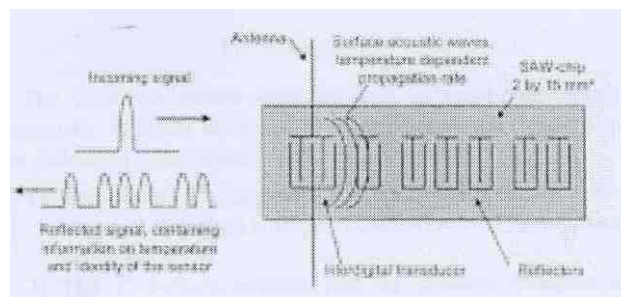
Σχήμα 1: Χαρακτηριστική V-I

β. Μέτρηση της Θερμοκρασίας του Εσωτερικού Μετάλλου του Αλεξικέραυνου

Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους η θερμοκρασία αποτελεί την αποφασιστική παράμετρο και όχι μία παράμετρο που δείχνει με έμμεσο τρόπο την κατάσταση του αλεξικέραυνου. Και αυτό διότι η θερμοκρασία της μεταλλικής του στήλης είναι το καλύτερο κριτήριο σε σχέση με την ικανότητα η όχι απορρόφησης ενέργειας από το αλεξικέραυνο και κατ' επέκταση με την σταθερή λειτουργία του. Η υπερθέρμανσή του επίσης συνδέεται άμεσα με την απώλεια ενέργειας, καθιστώντας έτσι την θερμοκρασία χρήσιμη παράμετρο στις διαγνωστικές μεθόδους.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι για την μέτρηση της θερμοκρασία στο εσωτερικό ενός αλεξικέραυνου, στην πλειοψηφία των οποίων μεταφέρονται οι πληροφορίες μέσω οπτικών ινών στον παραλήπτη, χωρίς να είναι πρακτικές εκτός εργαστηρίου.

Αντιθέτως, μία νέα διαγνωστική μέθοδος έχει αναπτυχθεί τελευταία, η οποία επιτρέπει τη μακρινή μέτρηση της θερμοκρασίας μέσω παθητικών δεκτών τοποθετημένων απευθείας μέσα στη στήλη. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε δείκτες θερμοκρασίας ασύρματων, παθητικών, επιφανειακών, ακουστικών κυμάτων, οι οποίοι δεν απαιτούν παροχή ενέργειας ή σύνδεση με το περιβάλλον. (σχήμα 2)



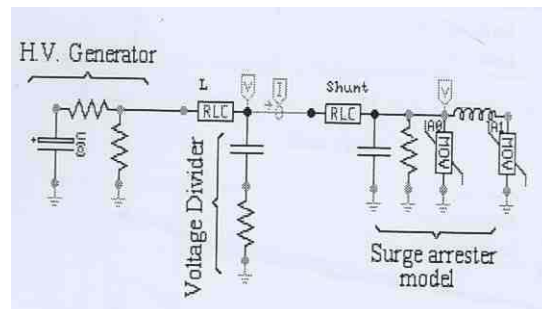
Σχήμα 2: Δείκτες Θερμοκρασίας

Η θερμική σταθερότητα ενός αλεξικέραυνου εξαρτάται από την ισορροπία της απώλειας ενέργειας της στήλης και της ικανότητας ψύχραυσής του. Στην τάση λειτουργίας η απώλεια ενέργειας είναι συνήθως μικρότερη από την ικανότητα ψύχραυσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας ωστόσο η απώλεια αυξάνεται πιο γρήγορα από την ικανότητα. Κατά συνέπεια, το αριστερό σημείο τομής των δύο καμπυλών αναπαριστά το σημείο σταθερής λειτουργίας του αλεξικέραυνου, ενώ το δεξιό το όριο θερμικής σταθερότητάς του. Το περιθώριο θερμοκρασίας μεταξύ των δύο αυτών σημείων καθορίζει την ικανότητα απορρόφησης θερμικής ενέργειας του αλεξικέραυνου.

Σε περίπτωση καταπόνησης του αλεξικέραυνου, οι χαρακτηριστικές απώλειες ενέργειας μετατοπίζονται προς τα πάνω με αποτέλεσμα την μείωση της ικανότητάς του, καθώς έχουμε την μετακίνηση του σημείου σταθερής λειτουργίας προς τα δεξιά και του ορίου θερμικής σταθερότητας προς τα αριστερά.

Μία παρόμοια μέθοδο με την παραπάνω εφάρμοσε και ο K.L. Chrzan στο [2]. Ειδικότερα, υπολόγισε τη θερμοκρασία στο εσωτερικό αλλά και στο εξωτερικό αλεξικέραυνων βασιζόμενος στη μέτρηση με υπέρυθρες και τοποθετώντας δύο μικροσκοπικούς αισθητήρες στη βάση και στην κορυφή της στήλης του βαρίστορ. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησε νέα βαρίστορ όπως επίσης και βαρίστορ τα οποία είχαν καταπονηθεί σε συνθήκες υγρασίας για επτά έτη και πραγματοποίησε μετρήσεις τόσο στα βαρίστορ αυτά καθ' αυτά όσο και σε αλεξικέραυνα με τα νέα, τα παλιά αλλά και χωρίς βαρίστορ.

Οι R. Diaz, F. Fernandez και J. Silva στο [3] καθόρισαν τις παραμέτρους ενός αλεξικέραυνου που καθορίζονται σε μία πιο απλουστευμένη εκδοχή του [4] χωρίς να έχουν καμία πληροφορία από τον κατασκευαστή του σχετικά με τις απομένουσες τάσεις του χρησιμοποιώντας το παρακάτω κύκλωμα:



Σχήμα 3: Η πειραματική Διάταξη

Οι Hanxin Zhu και M.R. Raghuvver στο [5] εφαρμόζουν μία ημιτονοειδή τάση σε ένα αλεξικέραυνο και υπολογίζουν την τρίτη αρμονική του ωμικού ρεύματος διαρροής (η οποία υπάρχει καθώς το ωμικό ρεύμα δεν είναι και αυτό ημιτονοειδής). Καταλήγουν έτσι στον ισχυρισμό ότι το πλάτος τόσο του ωμικού ρεύματος όσο και της τρίτης αρμονικής του δεν εξαρτάται μόνο από το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης αλλά και από την γωνία φάσης της. Επιβεβαιώνουν επίσης και την άποψη ότι η χρήση της τρίτης αρμονικής ως δείκτη της κατάστασης του αλεξικέραυνου μπορεί να αποδειχτεί λανθασμένη αν η τάση

κατά μήκος του δεν είναι καθαρό ημίτονο και δεν ληφθεί υπόψη και η επιρροή των αρμονικών της τάσης αυτής.

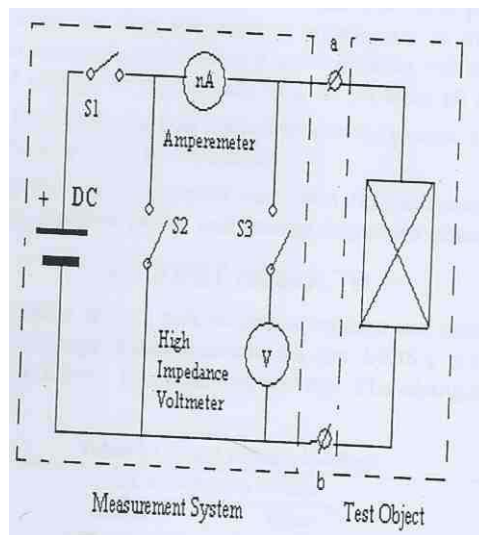
Οι Tong Zhao, Qingmin Li και Jiali Qian στο [6] παρουσιάζουν ένα νέο ψηφιακό αλγόριθμο για on-line δοκιμές σε αλεξικέραυνα βασιζόμενοι σε ένα βελτιωμένο ισοδύναμο μοντέλο για αλεξικέραυνα οξειδίων ψευδαργύρου. Συγκεκριμένα, οι περισσότεροι αλγόριθμοι βασίζονται σε ένα απλουστευμένο μοντέλο που αποτελείται από έναν πυκνωτή συνδεδεμένο παράλληλα με μία μη γραμμική αντίσταση. Παρά την ευρεία χρήση τους, οι αλγόριθμοι αυτοί παρουσιάζουν μία έλλειψη καθώς δείχνουν μία διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης της γραμμής και του ωμικού ρεύματος αλλά και ένα φαινόμενο υστέρησης στα χαρακτηριστικά της καμπύλης V-I. Στο [6] βελτιώνεται το ισοδύναμο μοντέλο τοποθετώντας έναν ακόμα πυκνωτή σε σειρά με τη μη γραμμική αντίσταση και με βάση αυτή τη βελτίωση επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός νέου αλγορίθμου. Ελέγχεται τέλος η ακρίβεια των αλγορίθμων και των δύο παραπάνω μοντέλων, όπου και διαφαίνεται καθαρά η υπεροχή του βελτιωμένου έναντι του απλουστευμένου μοντέλου.

Οι Estacio Tavares Wanderley Neto, Edson Guedes Da Costa και Marcelo Josi De Albuquerque Maia στο [7] κάνουν μία πρώτη προσπάθεια για την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου κατάλληλου για τη διάγνωση βλαβών βασισμένου σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης. Ειδικότερα, προκαλούν σε αλεξικέραυνα τις πιο συνηθισμένες βλάβες που παρουσιάζονται σε αυτά γενικά και μελετούν τις συνέπειές τους στη θερμική απεικόνισή τους. Καταλήγουν έτσι στον ισχυρισμό ότι η θερμική απεικόνιση αποτελεί έναν επαρκή μηχανισμό εντοπισμού βλαβών των αλεξικέραυνων καθώς οποιαδήποτε βλάβη τους έχει (ακόμα και ένα ελάχιστο) αντίκτυπο στη θερμοκρασία τους το οποίο αποτυπώνεται καθαρά στο θερμική απεικόνιση του εξοπλισμού. Κατά αυτόν τον τρόπο, προχωρούν στην πρώτη προσπάθεια ανάπτυξης ενός αλγορίθμου διάγνωσης βλαβών με μέσα τεχνητών νευρωνικών δικτύων ο οποίος αναλύει τις θερμικές απεικονίσεις και αντιλαμβάνεται τυχόν ανωμαλίες σε αυτές.

Οι K.P. Mardira, T.K. Saha και R.A. Sutton στο [8] εφαρμόζουν μία σειρά από καταστροφικές και μη δοκιμές σε αλεξικέραυνα: Έλεγχος της τάσης αναφοράς, της παραμένουσας τάσης κεραυνικού ρεύματος, μέτρηση του ρεύματος πόλωσης, επιστρέφουσα τάση και δοκιμές που βασίζονται σε παρατηρήσεις της δομής όπως οπτική

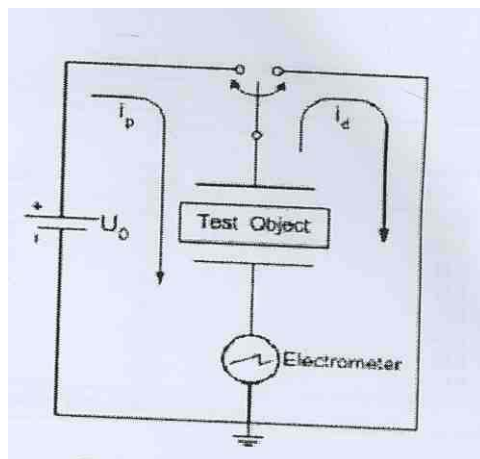
εξέταση με μικροσκόπιο, εξέταση με ηλεκτρικό μικροσκόπιο, διάθλαση με ακτίνες X και ενεργειακή φασματομετρία διασκορπισμού.

Με τη βοήθεια του παρακάτω κυκλώματος πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ρεύματος πόλωσης/αντιπόλωσης οι οποίες γίνονται για να εξεταστεί η διηλεκτρική αντίδραση των μονωτικών υλικών μέσω της ανάπτυξης πόλωσης εγκαίρως όταν μία βηματική τάση εφαρμόζεται.



Σχήμα 4: Κύκλωμα για την μέτρηση πόλωσης/αντιπόλωσης

Η επιστρέφουσα τάση βασίζεται στην πόλωση και στην επακόλουθη αντιπόλωση των δίπολων των μονωτικών υλικών. Με τη βοήθεια του παρακάτω κυκλώματος πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις οι οποίες αποτελούνται από τρία στάδια. Αρχικά, φορτίζουμε το δείγμα με μία DC τάση (U_c) για καθορισμένο χρόνο, η οποία είναι αρκετά μικρότερη από την υπολογισμένη τάση. Αποφορτίζουμε στη συνέχεια το δείγμα στο μισό περίπου χρόνο φόρτισης και μετράμε τέλος την τάση ανοικτού κυκλώματος κατά μήκος του δείγματος, την οποία και χαρακτηρίζουμε ως επιστρέφουσα τάση.



Σχήμα 5: Κύκλωμα για την μέτρηση της επιστρέφουσας τάσης

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν κάποιες τεχνικές με σκοπό την καταπόνηση των αλεξικέραυνων. Ειδικότερα, τα δείγματα ζύστηκαν με μία κινούμενη διαμαντένια βελόνα και μετά γυαλίστηκαν για την απομάκρυνση των κομματιών που είχαν αφαιρεθεί. Στη συνέχεια εξετάστηκαν και τέλος ρυπάνθηκαν ελαφρώς με χλωριούχο νάτριο και επανεξετάστηκε η δομή τους με τις τέσσερις τεχνικές που προαναφέραμε.

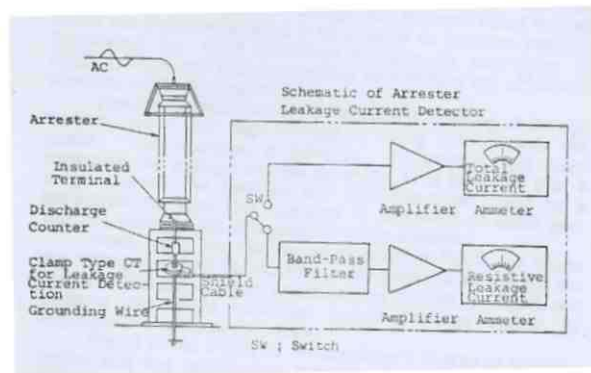
Συμπερασματικά, οι τεχνικές πόλωσης έδειξαν να έχουν άμεση συσχέτιση με τις μετρήσεις απομένουσας τάσης και αναφοράς και μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες για την μονωτική κατάσταση του αλεξικέραυνου ενώ και η μικροδομή ενός βαρίστορ βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του.

Οι I.A.D. Giriantari και T.R. Blackburn στο [9] παρατήρησαν τις επιφανειακές εκφορτίσεις αλεξικέραυνων σε συνθήκες υψηλής υγρασίας και τεχνητής ρύπανσης. Χρησιμοποίησαν δύο αλεξικέραυνα. Στο πρώτο εφάρμοσαν μία τάση σε συνθήκες υψηλής υγρασίας για οκτώ συνεχόμενες μέρες και κάθε πέντε λεπτά καταγράφονταν οι επιφανειακές εκφορτίσεις και το επιφανειακό ρεύμα διαρροής. Το δεύτερο αλεξικέραυνο βυθίστηκε σε ένα μείγμα τεχνητής ρύπανσης από καολίν και χλωριούχο νάτριο, αφήθηκε αν στεγνώσει και εφαρμόστηκαν σε αυτό οι ίδιες τεχνικές. Και τα δύο αλεξικέραυνα παρουσίασαν από την πρώτη στιγμή επιφανειακές εκφορτίσεις, με αυτές του δευτέρου να είναι μεγαλύτερες ενώ η χαρακτηριστική του συνολικού ρεύματος διαρροής δεν άλλαξε ιδιαίτερα με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατόν να ειπωθεί κάτι με βεβαιότητα για την κατάσταση της επιφάνειας με βάση το ρεύμα διαρροής. Αντιθέτως, το πρότυπο των μερικών εκφορτίσεων φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε επιφανειακές ζημιές

λόγω εκφορτίσεων. Θα μπορούσε συνεπώς να χρησιμοποιηθεί ως διαγνωστικό μέσο των μονωτικών από πολυμερή υλικά.

Οι Edward A. Cherney, Behdad Biglar και Shesha Jayaram στο [10] εξέτασαν πέντε τύπους αλεξικέραυνων υπό συνθήκες νέφους άλατος και σύγκριναν την απώλεια ενέργειας του καθενός. Τοποθέτησαν τα αλεξικέραυνα σε ένα θάλαμο ρύπανσης και εφάρμοσαν σε αυτά 1280 συνολικά ώρες ρύπανση με χλωριούχο νάτριο σε εννέα κύκλους των 120 ωρών με ενδιάμεσα διαλείμματα των 48 ωρών. Ένα σύστημα απόκτησης πληροφοριών χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή του ρεύματος διαρροής και της τάσης και τον υπολογισμό της απώλειας ενέργειας. Κατέληξαν στα εξής: Η απώλεια ενέργειας ενδέχεται να μειωθεί αν προβλεφθεί κατάλληλο μήκος ερπυσμού. Η γραμμή διαχωρισμού ή γραμμή πλέγματος αποτελεί τρωτό σημείο στο σχεδιασμό και απαιτεί τη βελτίωση στα δείγματα τα οποία εξετάστηκαν. Ο εσωτερικός σχεδιασμός μόνωσης χρειάζεται απαραίτητα βελτίωση καθώς μέσω των καταγεγραμμένων διασπάσεων και οπτικών παρατηρήσεων φαίνεται η παρουσία κενών αέρα. Τέλος, η παρουσία απομονωτή σε ορισμένα δείγματα κρίνεται ως εντελώς αχρείαστη καθώς σε μερικά από αυτά οι εσωτερικές εκφορτίσεις τον κατέστησαν πέρα για πέρα αναποτελεσματικό.

Οι S. Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Kurita, K. Goto και M. Sakai στο [11] περιγράφουν μία μέθοδο μέτρησης του ρεύματος διαρροής ενός αλεξικέραυνου χωρίς να είναι απαραίτητη η αποσύνδεσή του καλωδίου γείωσης. Συνδέοντας ένα καλώδιο μετασχηματισμού ρεύματος στο καλώδιο της γείωσης και στην άκρη του έναν μετρητή του ρεύματος διαρροής είναι δυνατόν να ανιχνευτεί το ρεύμα διαρροής (σχήμα 6). Στον μετρητή το ρεύμα διαρροής περνάει από ένα φίλτρο το οποίο απομονώνει την τρίτη αρμονική, στη συνέχεια ένας ενισχυτής την ενισχύει και φαίνεται το ωμικό ρεύμα διαρροής σε ένα αμπερόμετρο. Ταυτόχρονα, το συνολικό ρεύμα διαρροής ενισχύεται και μετριέται σε ένα αμπερόμετρο χωρίς να περάσει από το φίλτρο. Καθίσταται έτσι δυνατή η ταυτόχρονη και ακριβή μέθοδο τόσο του συνολικού όσο και του ωμικού ρεύματος διαρροής χωρίς να είναι απαραίτητη η αποσύνδεση του καλωδίου γείωσης.



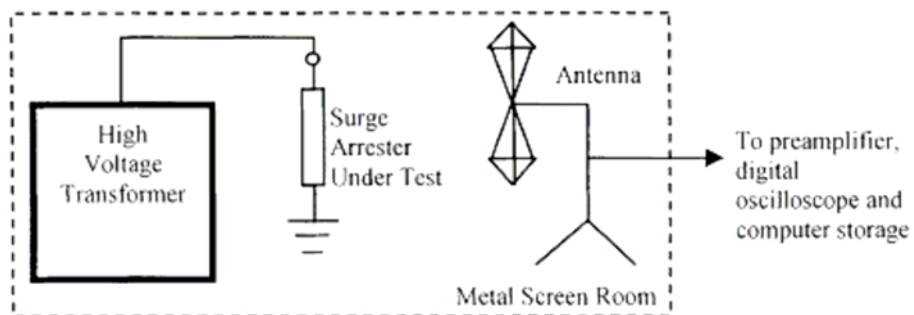
Σχήμα 6: Διάταξη για την μέτρηση του ρεύματος διαρροής

Οι R.T. De Souza, E.G. Da Costa, S.R. Naidu και M.J. De Maia στο [12] περιγράφουν μία νέα τεχνική για τον προσδιορισμό του ωμικού ρεύματος διαρροής ενός αλεξικέραυνου. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην εξάλειψη του χωρητικού μέρους του συνολικού ρεύματος διαρροής μέσω ενός προγράμματος Matlab. Το πρόγραμμα δέχεται σαν εισόδους το συνολικό ρεύμα διαρροής και την κυματομορφή της επιβαλλόμενης τάσης. Για συγκεκριμένη τιμή της ωμικής αντίστασης του αλεξικέραυνου το πρόγραμμα υπολογίζει την κυματομορφή του ωμικού ρεύματος διαρροής. Η τεχνική δεν απαιτεί την χρησιμοποίηση ενός ακριβούς κυκλώματος υψηλής τάσης για την εξάλειψη του χωρητικού ρεύματος ενώ επιτρέπει και τον άμεσο, γρήγορο και ακριβή υπολογισμό του ωμικού ρεύματος καθώς πραγματοποιείται μέσω του προγράμματος. Η τεχνική, τέλος εφαρμόστηκε σε δύο περιπτώσεις και συγκρίθηκε με την γνωστή μέθοδο εξάλειψης του χωρητικού ρεύματος με τις δύο κυματομορφές να παρουσιάζουν σημαντική (αν όχι απόλυτη) συμφωνία.

Μία νέα επίσης μέθοδο παρουσιάζουν και οι J. Lundquist, L. Stenstrom, A. Schei και B. Hansen στο [13] για την μέτρηση του ρεύματος διαρροής. Η εν λόγω μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση των αρμονικών του ρεύματος ενώ το κυριότερο πλεονέκτημά της αποτελεί η αισθητά μειωμένη επιρροή των αρμονικών της τάσης σε αυτές του ρεύματος. Ειδικότερα, θεωρούν ότι το ωμικό ρεύμα προκύπτει αν αφαιρεθεί το χωρητικό από το συνολικό ρεύμα διαρροής. Μετά από ανάλυση Fourier καθορίζεται η τρίτη αρμονική του ολικού ρεύματος ενώ μέσω ηλεκτρικών υπολογισμών είναι δυνατός ο προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ αυτής και της αντίστοιχης τρίτης αρμονικής του χωρητικού ρεύματος. Καταλήγουν, συνεπώς στο ωμικό ρεύμα διαρροής με την

παραπάνω τεχνική, η οποία έπειτα από ελέγχους και σύγκριση με την άμεση μέτρηση του ωμικού ρεύματος κρίνεται από αρκετά ικανοποιητική έως και ανώτερη μιας και δεν υπάρχει εξάρτηση της μεθόδου αυτής από τις αρμονικές της επιβαλλόμενης τάσης (όπως σημειώνεται στις πιο πολλές γνωστές αντίστοιχες μεθόδους).

Τέλος, ο K.L. Wong στο [14] χρησιμοποίησε ηλεκτρομαγνητικά σήματα για την ανίχνευση τυχόν ανωμαλιών τόσο στην εξωτερική επιφάνεια όσο και στο εσωτερικό του αλεξικέρανου. Ειδικότερα, μέσω μιας κεραίας κατέγραψε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς προερχόμενους από ένα αλεξικέρανο στην τάση λειτουργίας του. Τοποθέτησε τα δείγματα σε οριζόντια θέση και σε απόσταση τεσσάρων μέτρων από την κεραία η οποία βρισκόταν μέσα σε ένα μεταλλικό δωμάτιο και συνδεδεμένη με έναν προενισχυτή. Ο τελευταίος βρισκόταν και αυτός με τη σειρά του συνδεδεμένος με ένα ψηφιακό παλμογράφο στον οποίο απεικονίζονταν τα καταγραφόμενα σήματα. Για την μελέτη του αυτή χρησιμοποίησε τόσο καινούργια όσο και καταπονημένα (αλλά λειτουργικά) αλεξικέρανα, τα οποία υπέβαλλε και σε τεχνητή ρύπανση με καολίν, νερό και χλωριούχο νάτριο και επανέλαβε την διαδικασία.



Σχήμα 7: Διάταξη καταγραφής ηλεκτρομαγνητικών παλμών με κεραία [14]

Συμπερασματικά, κατέληξε στον ισχυρισμό ότι με την χρήση της ηλεκτρομαγνητικής εκπομπής είναι δυνατόν να ανιχνευτούν ζημιές σε ένα αλεξικέρανο. Και αυτό διότι τυχόν ανωμαλία σε ένα δείγμα προκαλεί μερική εκφόρτιση με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών σημάτων στην τάση λειτουργίας του. Η τεχνητή ρύπανση επίσης ευνοεί και αυξάνει την απώλεια ενέργειας σύμφωνα με τις απεικονίσεις των δειγμάτων μετά την ρύπανση ενώ τέλος, δεν ήταν δυνατόν να καταγραφούν ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί στα καινούργια δείγματα από την κεραία. Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος δύναται

συνεπώς να αποτελέσει χρήσιμο διαγνωστικό εργαλείο για την κατάσταση ενός αλεξικέραυτου αν δοθεί φυσικά προσοχή στην ευαισθησία της μεθόδου.

Βιβλιογραφία

1. “Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks-Comparison of Existing and Newly Developed Procedures”, Christian Heinrich, Volker Hinrichsen, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 1, January 2001.
2. “Termovision Diagnostics of Metal Oxide Surge Arresters”, K.L. Chrzan, August 2007.
3. “Simulation and Tests on Surge Arresters in High-Voltage Laboratory”, R. Diaz, F. Fernandez, J. Silva.
4. IEEE Working Group 3.4.11, “Modeling of Metal Oxide Surge Arresters”, Trans. of Power Delivery, pp. 302-309, 1992.
5. “Influence of Harmonics in System Voltage on Metal Oxide Surge Arrester Diagnostics”, Hanxin Zhu, M.R. Raghuveer, 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
6. “Investigation on Digital Algorithm for On-Line Monitoring and Diagnostics of Metal Oxide Surge Arrester Based on an Accurate Model”, Tong Zhao, Qingmin Li, Jiali Qian, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005.
7. “Artificial Neural Networks Used for Failure Diagnosys in ZnO Arresters”, Estacio Tavares Wanderley Neto, Edson Guedes Da Costa, Marcelo Josi De Albuquerque Maia, September 2006.

8. "Investigation of Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters", K.P. Mardira, T.K. Saha, R.A. Sutton.
9. "Surface Discharge Characteristic of Silicone Rubber Surge Arrester Housings with High Humidity and Pollution", I.A.D. Giriantari, T.R. Blackburn.
10. "Salt Fog Testing of Polymer Housed Surge Arresters", Edward A. Cherney, Behdad Biglar, Shesha Jayaram, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001.
11. "Maintenance of Surge Arrester by a Portable Arrester Leakage Current Detector", S. Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Kurita, K. Goto M. Sakai, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1998.
12. "A Virtual Bridge to Compute the Resistive Leakage Current Waveform in ZnO Surge Arresters", R.T. De Souza, E.G. Da Costa, S.R. Naidu, M.J. De Maia, 2004 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America.
13. "New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service", J. Lundquist, L. Stenstrom, A. Schei B. Hansen, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990.
14. "Electromagnetic Emission Based Monitoring Technique for Polymer ZnO Surge Arresters", K.L. Wong, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 13, No. 1, February 2006.

Κεφάλαιο 6: Εργαστηριακές Δοκιμές

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δοκιμές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τον προσδιορισμό της κατάστασης των εξεταζόμενων αλεξικέραυνων.

6.1 Εξεταζόμενα Δείγματα

Το προς εξέταση δείγμα αποτελείται από δύο αλεξικέραυνα των 10 kA με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ονομαστική Τάση = 30 kV (ενεργός τιμή).
- Μέγιστη Τάση Λειτουργίας = 24 kV.
- Παραμένουσες Τάσεις

A. Υπό Κεραυνικό Ρεύμα (8/20 μ s)

I (kA)	U_r (kV)
5	78.19
10	82.99
20	91.87

B. Υπό Κεραυνικό Ρεύμα (1/60 μ s)

I(kA)	U_r (kV)
20	90.24

Γ. Υπό Διακοπτικό Ρεύμα (30/60 μ s)

I (A)	U_r (kV)
-------	------------

125	62.50
500	64.61

Τα αλεξικέραυνα είναι κατασκευής της General Electrics συνίστανται από μη γραμμικές αντιστάσεις από ZnO χωρίς διάκενα. Οι μη γραμμικές αντιστάσεις (βαρίστορ) περικλείονται, τέλος σε περίβλημα από πολυμερές υλικό.



Σχήμα1: Το προς εξέταση αλεξικέραυνο

6.2 Μέτρηση Αντίστασης Αλεξικέραυνου με Τάση 5 kV

Η συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιείται ευρέως και αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την διαπίστωση της κατάστασης και της ακεραιότητας ενός αλεξικέραυνου. Ειδικότερα, με τη μέτρηση του ρεύματος το οποίο ρέει εντός του αλεξικέραυνου υπό μία DC τάση (σε αυτήν την περίπτωση ίση περίπου με 5kV) είναι δυνατόν να καθοριστεί η εσωτερική αντίσταση του αλεξικέραυνου. Κατά συνέπεια, μία μικρή

τιμή της εσωτερικής αυτής αντίστασης καταδεικνύει σημαντική εσωτερική διάβρωση και καθιστά επικίνδυνη την χρήση ενός τέτοιου αλεξικέρανου.

Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα με τη χρήση μίας συσκευής μέτρησης της αντίστασης, συνδεδεμένης όπως φαίνεται παρακάτω. Η τεχνική του τοροειδούς χρησιμοποιήθηκε για να εξασφαλιστεί ότι το επιφανειακό ρεύμα διαρροής στο πορσελάνινο περίβλημα του αλεξικέρανου δεν θα επηρεάσει την ακρίβεια της μέτρησης της αντίστασης. Τα επιφανειακά ρεύματα εξουδετερώθηκαν από ένα κομμάτι καλωδίου (το τοροειδές δηλαδή) το οποίο δέθηκε γύρω από το αλεξικέρανο και συνδέθηκε με το ηλεκτρόδιο προστασίας της συσκευής μέτρησης της αντίστασης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το προς εξέταση αλεξικέρανο τοποθετήθηκε πάνω σε μία πλάκα βακελίτη, η οποία λειτούργησε σαν μόνωση για τις μετρήσεις μας.

Χρησιμοποιήθηκαν τα δύο αλεξικέρανα 6490 και 6491. Τάση ίση με 5087 V εφαρμόστηκε κατά μήκος των δύο αλεξικέρανων για 30 δευτερόλεπτα. Στο τέλος αυτού του χρόνου, καταγραφόταν η τιμή της αντίστασης και του εσωτερικού ρεύματος του αλεξικέρανου. Πραγματοποιήθηκαν 15 μετρήσεις για καθένα αλεξικέρανο ενώ ο χρόνος μεταξύ δύο μετρήσεων για το ίδιο αλεξικέρανο ήταν ίσος με 90 δευτερόλεπτα.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα δύο αλεξικέρανα:

Αλεξικέρανο 6490

V (kV)	I (nA)	R (GΩ)	DAR
5.087	18.50	275.0	1.25
5.087	19.05	267.0	1.17
5.087	18.42	276.3	1.18
5.087	17.63	288.5	1.08
5.087	16.63	305.9	1.12
5.087	16.41	310.0	1.11
5.087	16.48	308.7	1.15
5.087	15.73	325.4	1.10
5.087	15.54	327.5	1.11
5.087	16.57	306.9	1.12
5.087	15.97	318.6	1.15
5.087	16.67	305.1	1.15
5.087	16.85	301.9	1.13
5.087	16.17	314.7	1.07
5.087	16.01	317.8	1.09
MO	16.842	303.2867	1.132
Τυπική			
Απόκλιση	1.070295	18.54326	0.045701

Αλεξικέραυνο 6491

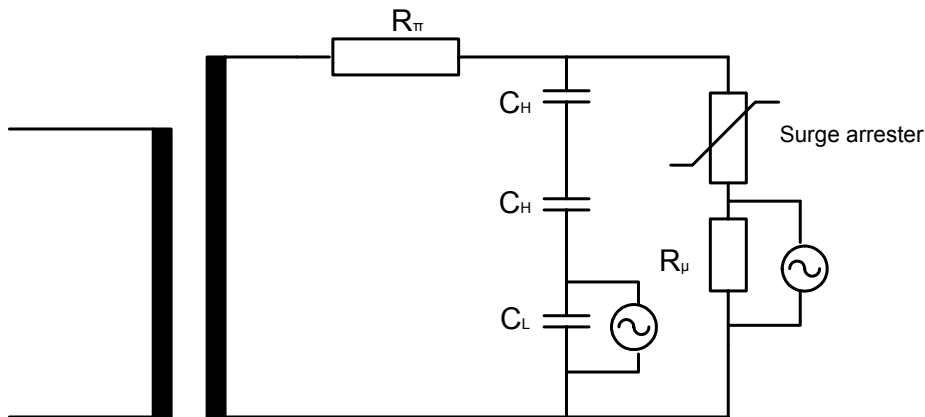
V (kV)	I (nA)	R (GΩ)	DAR
5.087	21.10	214.2	1.30
5.087	18.68	272.4	1.16
5.087	17.46	291.4	1.12
5.087	16.67	305.3	1.11
5.087	16.23	313.5	1.10
5.087	15.97	318.7	1.10
5.087	16.01	317.8	1,14
5.087	15.95	319.0	1.11
5.087	15.63	325.7	1.05
5.087	17.17	296.4	1.04
5.087	15.29	332.7	1.15
5.087	15.18	335.2	1.13
5.087	14.96	340.1	1.08
5.087	15.44	329.5	1.13
5.087	15.25	333.5	1.03
MO	16.466	309.6933	1.116667
Τυπική Απόκλιση	1.630337	32.30227	0.063994

6.3 Μέτρηση του Ρεύματος Διαρροής και Προσδιορισμός του Ωμικού Μέρους

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια η πλειοψηφία των διαγνωστικών μεθόδων της κατάστασης των αλεξικέραυνων χωρίς διάκενο βασίζονται σε μετρήσεις του ρεύματος διαρροής καθώς οποιαδήποτε διαταραχή της μονωτικής ικανότητας ενός αλεξικέραυνο θα προκαλέσει αύξηση του ρεύματος αυτού. Το συνολικό ωστόσο ρεύμα διαρροής εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το χωρητικό μέρος καθώς το αντίστοιχο ωμικό είναι κατά πολλές τάξεις μικρότερο. Τα δύο αυτά ρεύματα παρουσιάζουν επίσης μία διαφορά φάσης 90° . Χρειάζεται επομένως μία αρκετά μεγάλη αύξηση του ωμικού ρεύματος προκειμένου να εμφανιστεί μία σημαντική αλλαγή στο επίπεδο του συνολικού ρεύματος διαρροής. Στη συγκεκριμένη δοκιμή υπολογίζεται αρχικά το συνολικό ρεύμα διαρροής και στη συνέχεια προσδιορίζεται η ωμική συνιστώσα του.

Το πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου και περιλαμβάνει την μέτρηση του συνολικού ρεύματος διαρροής υπό συνθήκες περιβάλλοντος.

Ειδικότερα, με τη βοήθεια του παρακάτω κυκλώματος υπολογίσαμε το συνολικό ρεύμα διαρροής τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος για τα δύο δείγματα, τα οποία καταγράφονταν με έναν παλμογράφο. Πραγματοποιήθηκαν 12 μετρήσεις για κάθε αλεξικέρανο με τάση λειτουργίας 15, 16.5 και 20.6 V, καταγράφηκαν δηλαδή τέσσερις μετρήσεις για κάθε τάση λειτουργίας.



Σχήμα 2: Κύκλωμα για τη μέτρηση του ρεύματος διαρροής

όπου: $R_{\pi}=10 \text{ M}\Omega$

$R_M=10 \Omega$

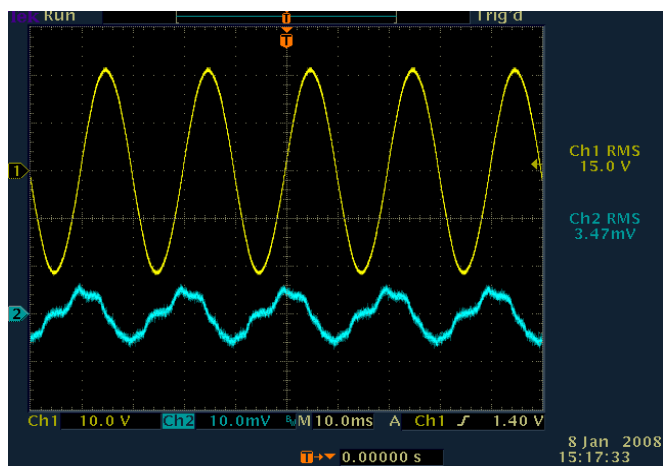
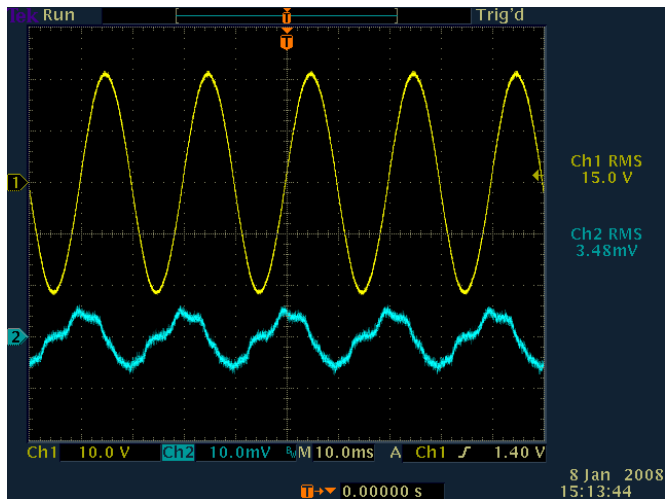
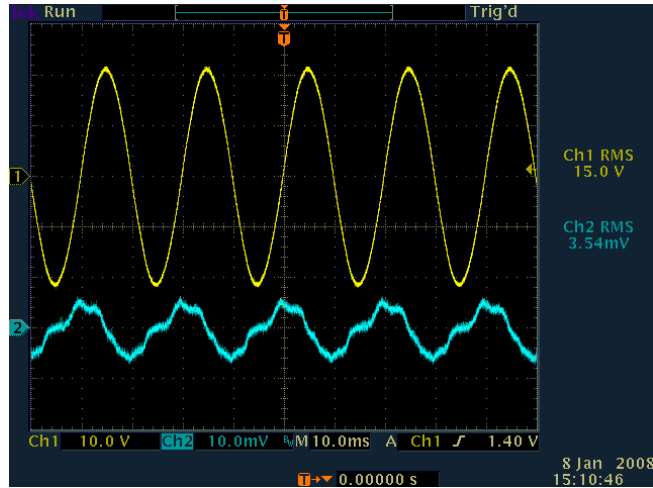
$C_H=1200 \text{ pF}$

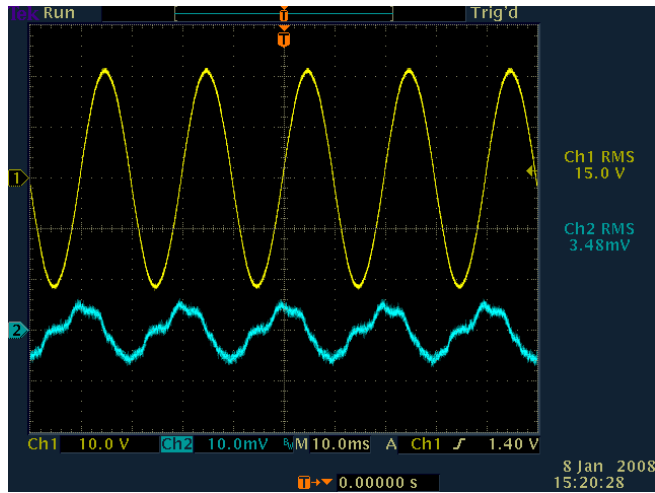
$C_L=485 \text{ nF}$

Παρακάτω φαίνονται οι 24 κυματομορφές οι οποίες καταγράφηκαν στον παλμογράφο.

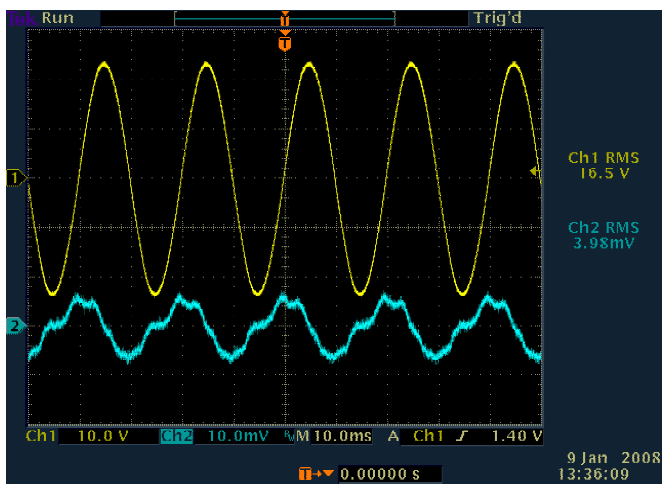
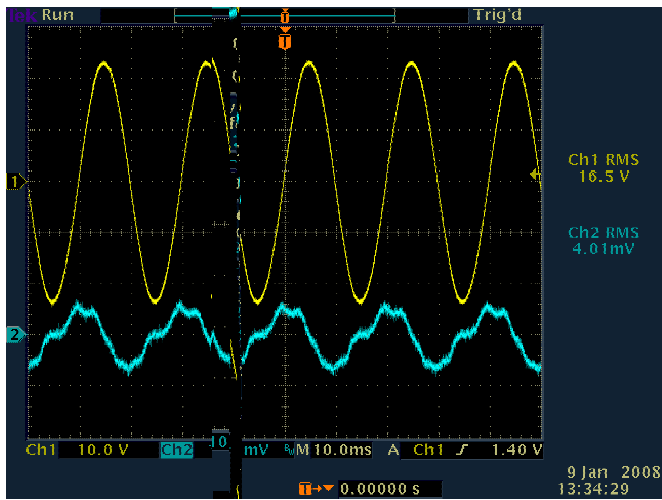
Αλεξικέρανο 6490

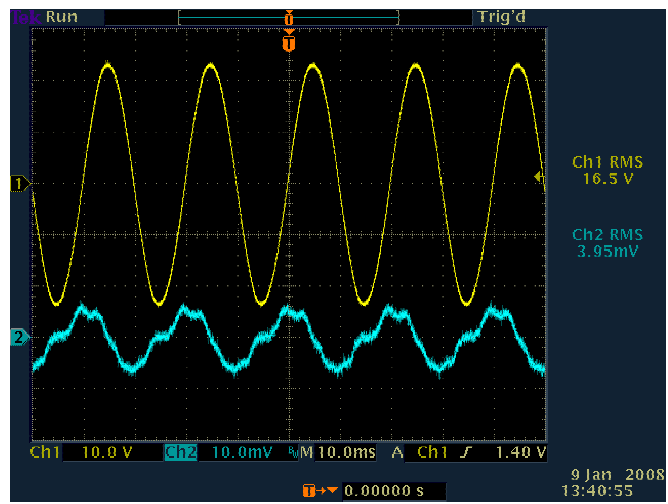
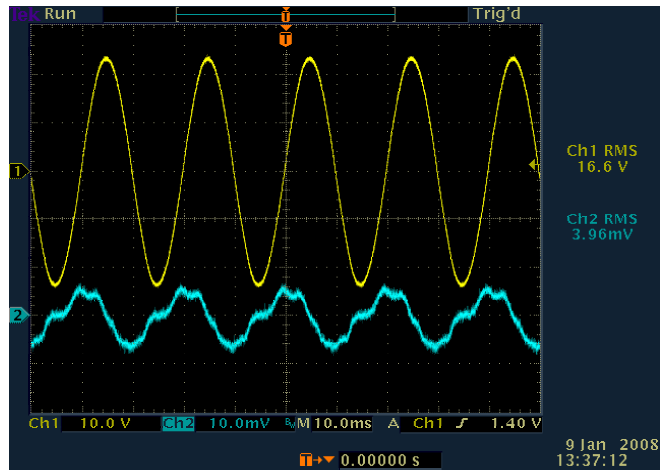
- 12 kV



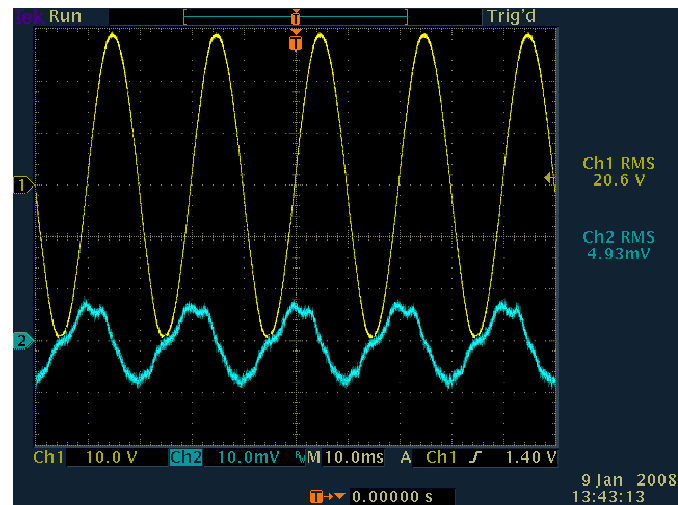


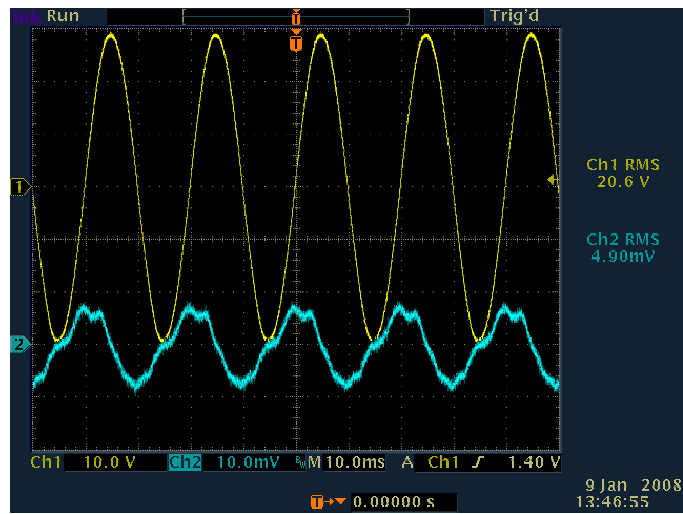
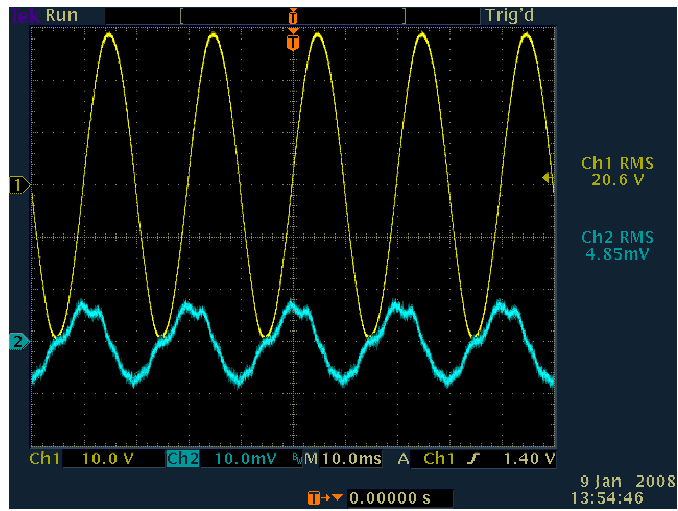
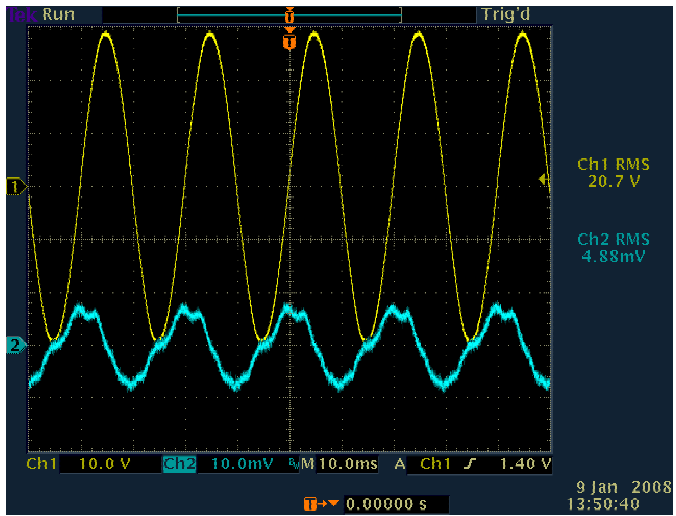
- 13.2 kV





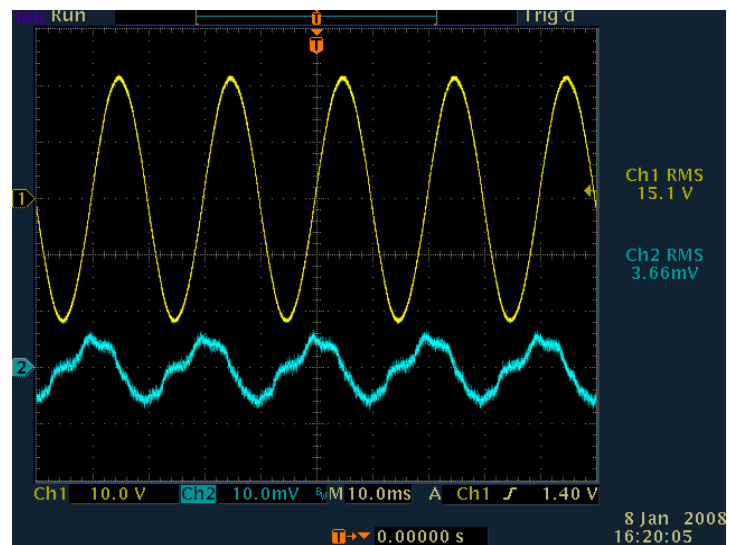
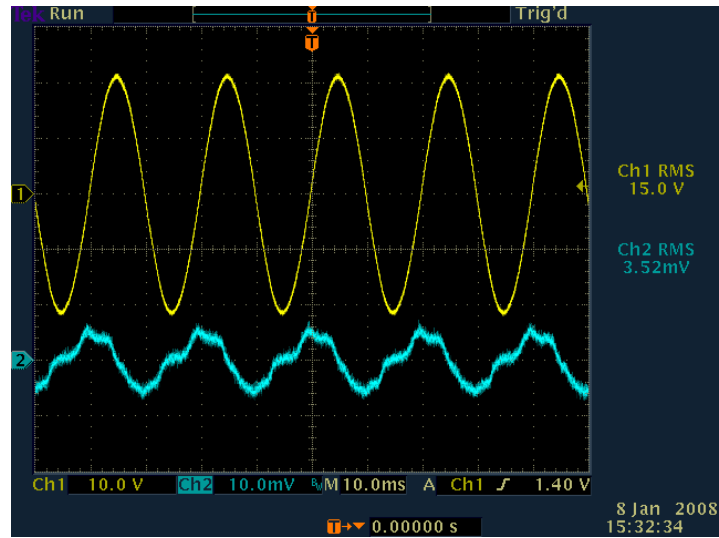
- 16.5 kV

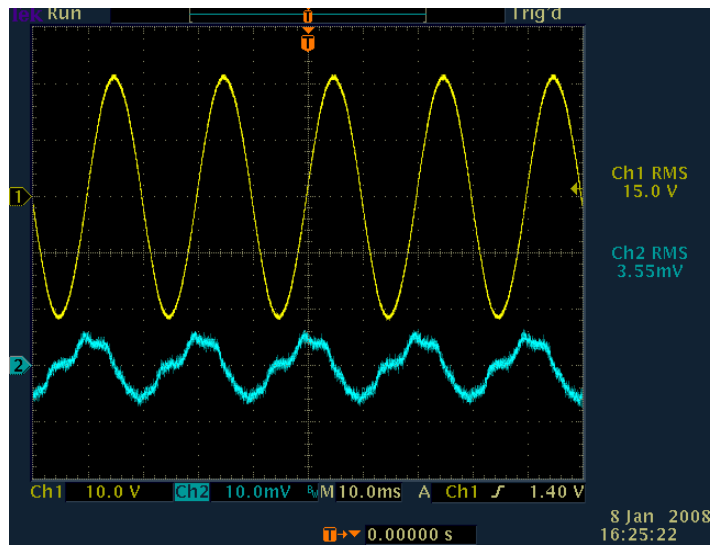
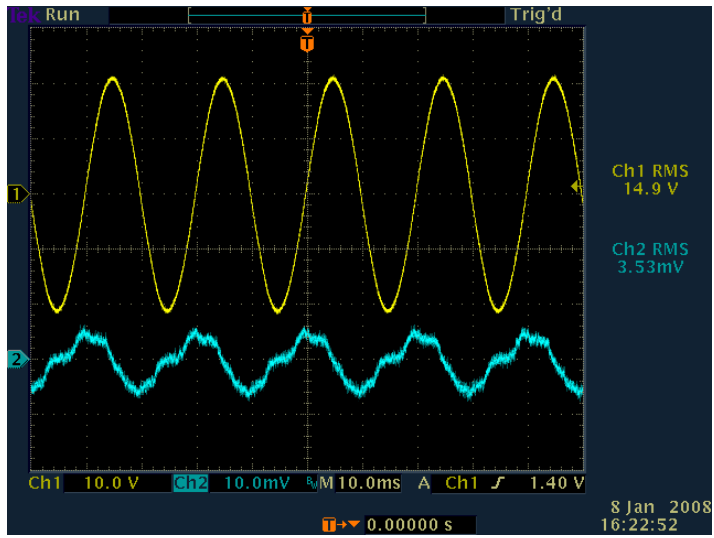




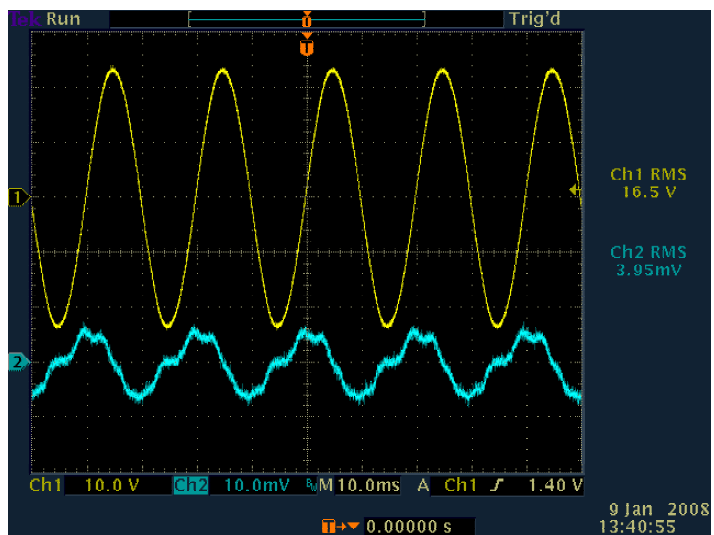
Αλεξικέρανο 6491

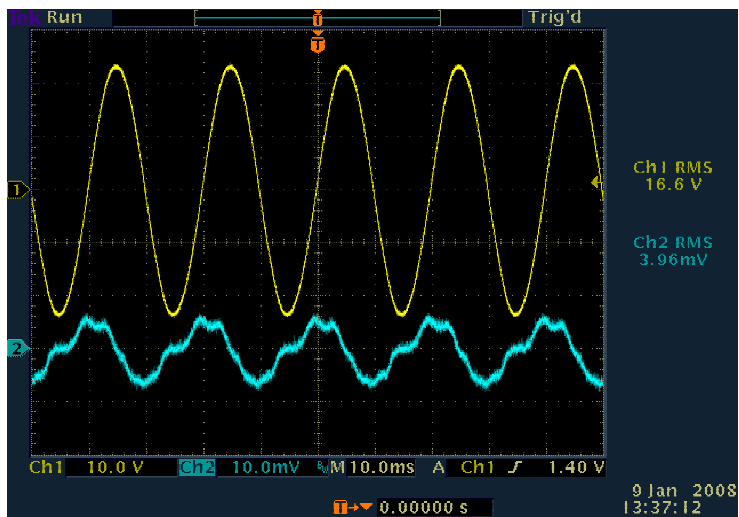
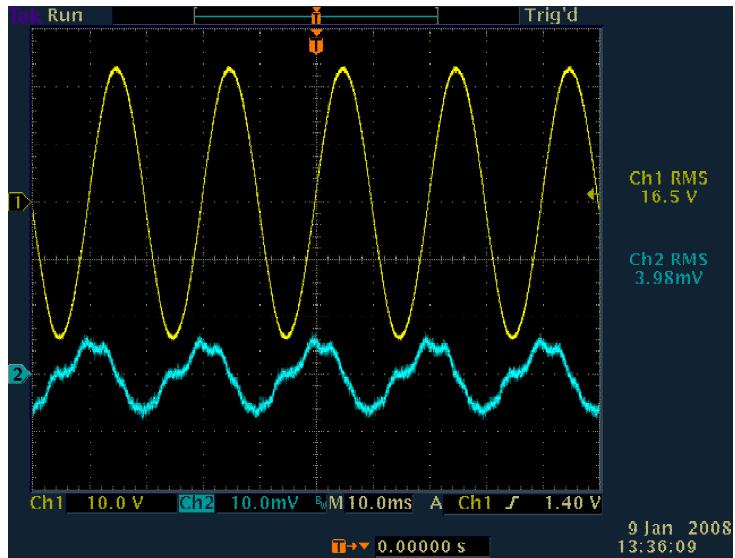
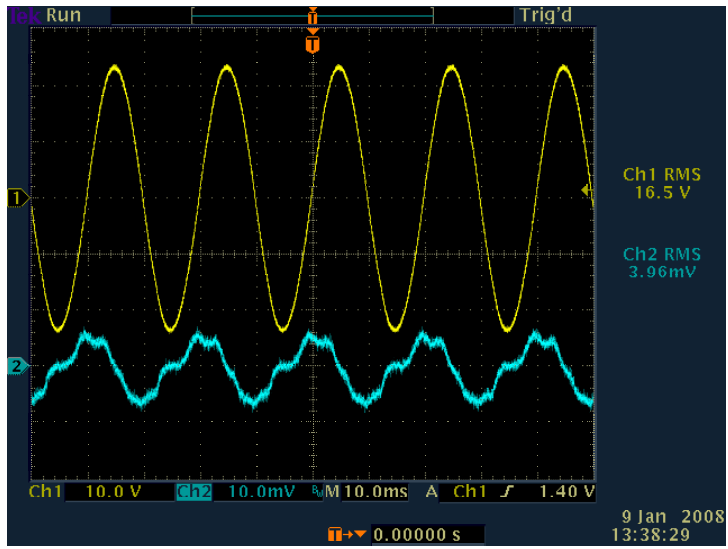
- 12 kV



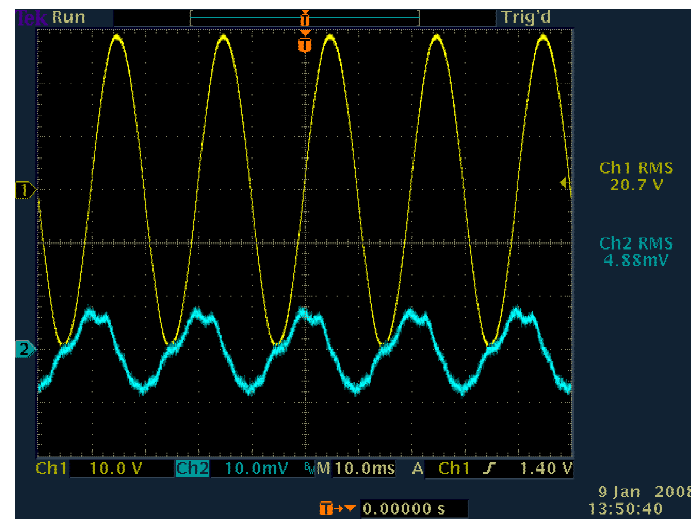
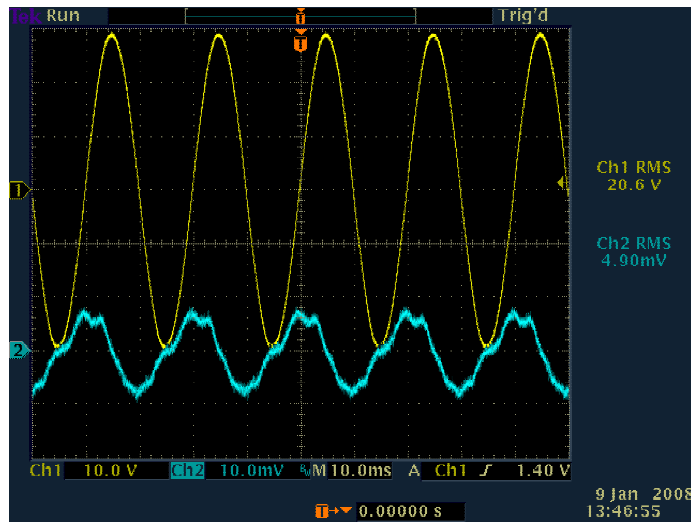
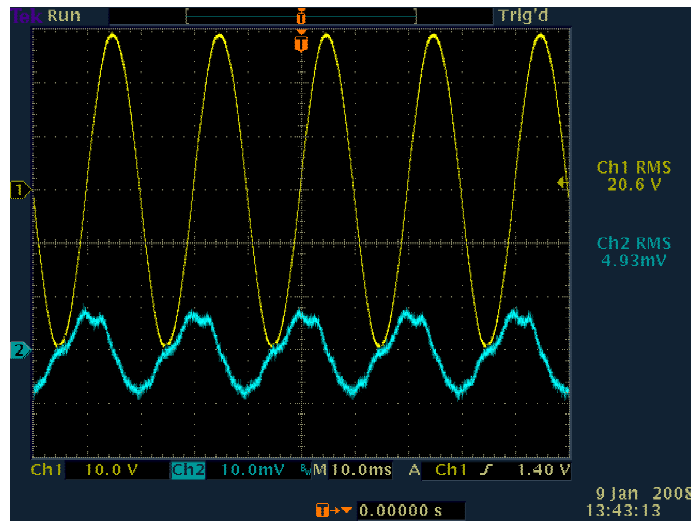


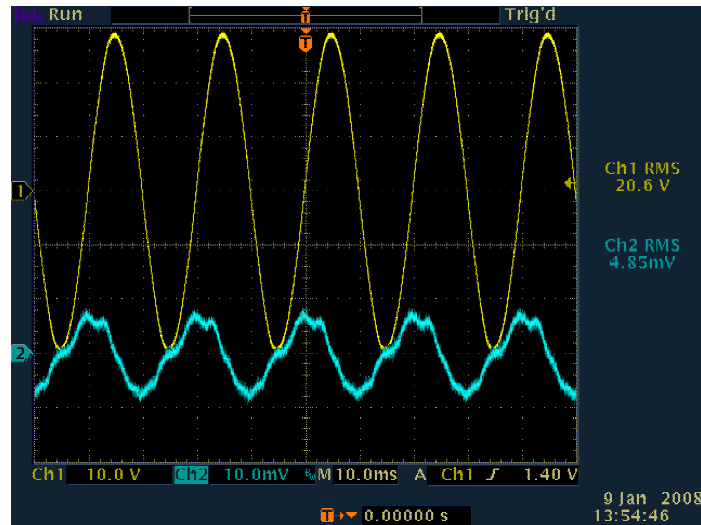
- 13.2 kV





- 16.5 kV



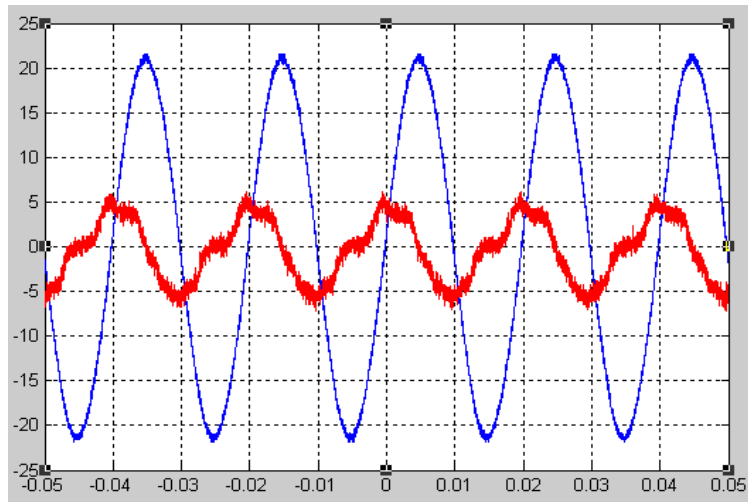


Στη συνέχεια, με χρήση Matlab καταφέραμε και απομονώσαμε τις δύο κυματομορφές και επιλέγοντας τέσσερα σημεία σε κάθε κυματομορφή υπολογίσαμε την γωνία μεταξύ του συνολικού ρεύματος διαρροής (I_{total}) και του χωρητικού του μέρους (I_C) ως εξής:

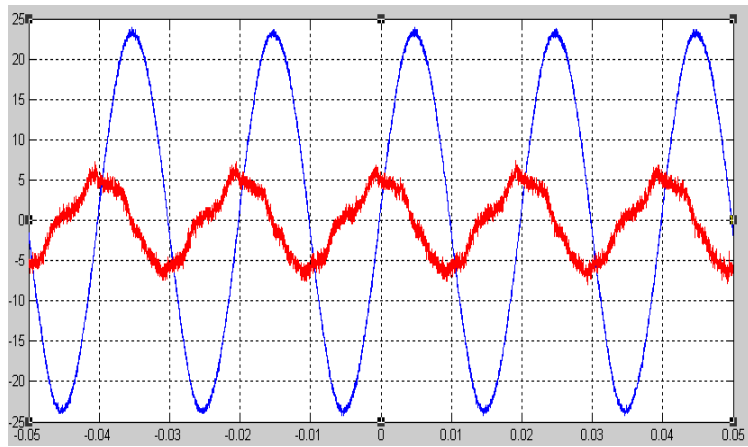
Υπολογίζοντας την διαφορά μεταξύ της τιμής του χρόνου κατά την οποία μηδενίζεται η τάση και αυτής κατά την οποία το ρεύμα παρουσιάζει την μέγιστη τιμή του, πολλαπλασιάζοντας την απόλυτη τιμή της διαφοράς αυτής επί 360° και διαιρώντας το αποτέλεσμα με την περίοδο (η οποία στην προκειμένη περίπτωση ισούται με 0.02 sec) καταλήγουμε στην ζητούμενη γωνία. Κατά αυτόν τον τρόπο, μας δόθηκε η δυνατότητα να υπολογίσουμε την ωμική συνιστώσα του ρεύματος διαρροής (I_R) πολλαπλασιάζοντας το συνολικό ρεύμα διαρροής με το ημίτονο της γωνίας αυτής.

Παρακάτω φαίνεται τρεις πρότυπες κυματομορφες (μία για κάθε τάση) τις οποίες απομονώσαμε με τη χρήση Matlab και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω.

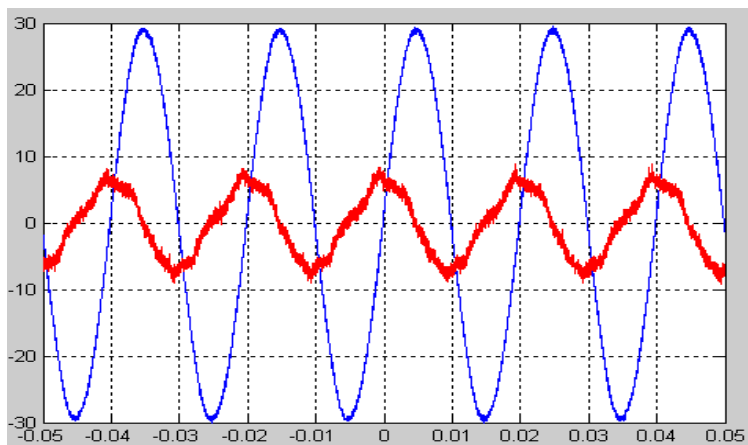
- 12 kV



- $V=13.2$ kV



- $V=16.5$ kV



Αλεξικέρανο 6490

- V=12 kV

$I_{total}(mA)$	$\Phi(^{\circ})$	$I_R(mA)$
0.64	6.21	0.069
0.64	8.01	0.089
0.66	7.61	0.087
0.60	6.39	0.067

$R_{μετρ}=10 \Omega$

- V=13.2 kV

$I_{total}(mA)$	$\Phi(^{\circ})$	$I_R(mA)$
0.72	7.20	0.090
0.68	9.81	0.116
0.70	14.13	0.171
0.66	10.80	0.124

$R_{μετρ}=10 \Omega$

- V=16.5 kV

$I_{total}(mA)$	$\Phi(^{\circ})$	$I_R(mA)$
0.82	7.20	0.103

0.84	10.44	0.152
0.88	10.80	0.165
0.88	9.00	0.138

$$R_{\text{μετρ}}=10 \Omega$$

Αλεξικέραυνο 6491

- $V=12 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
0.68	10.80	0.127
0.64	10.80	0.120
0.66	9.00	0.103
0.70	5.76	0.070

$$R_{\text{μετρ}}=10 \Omega$$

- $V=13.2 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
0.70	9.81	0.119
0.72	10.8	0.135
0.74	7.20	0.093
0.70	12.60	0.153

$$R_{\text{μετρ}}=10 \Omega$$

- $V=16.5 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
0.80	12.60	0.175
0.82	7.20	0.103
0.84	9.00	0.131
0.90	12.60	0.196

$$R_{\text{μετρ}}=10 \Omega.$$

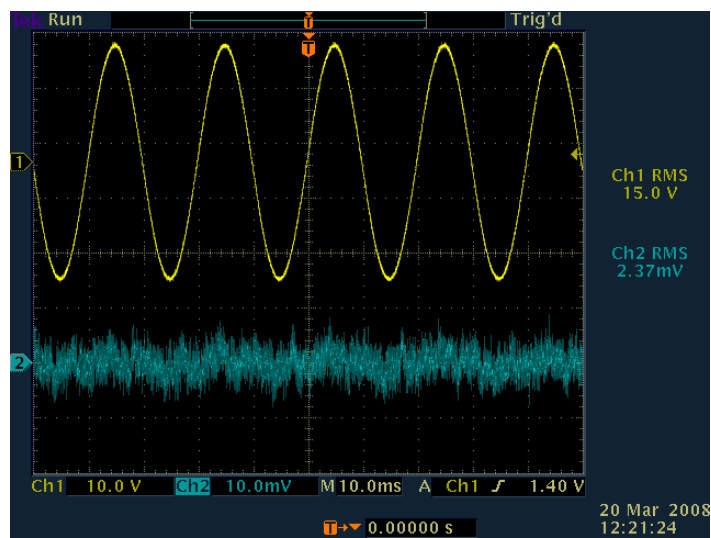
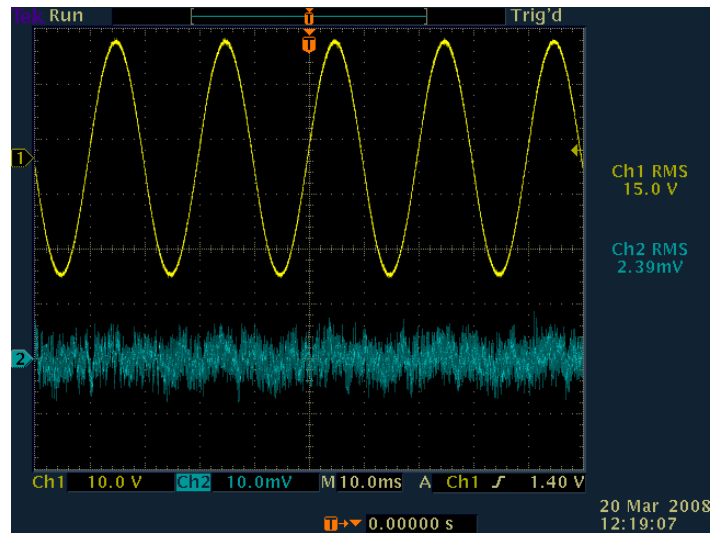
Στη συνέχεια επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία με το ίδιο κύκλωμα με τη μόνη διαφορά ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν υπό τεχνητή βροχή. Η διαδικασία έλαβε χώρα στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΚΔΕΠ σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60-1.

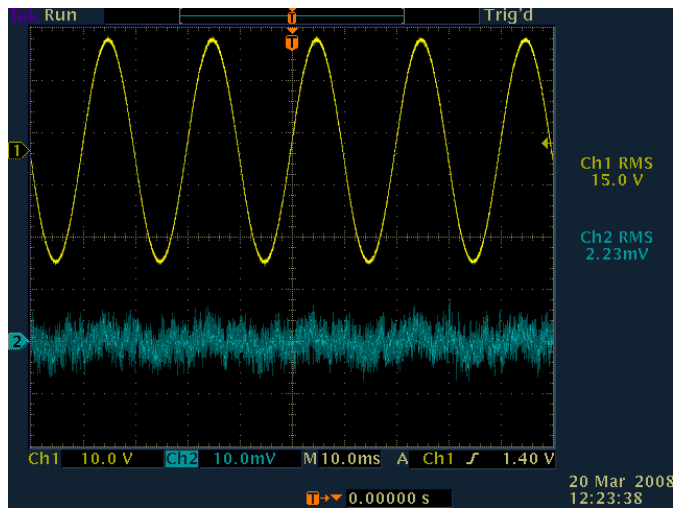
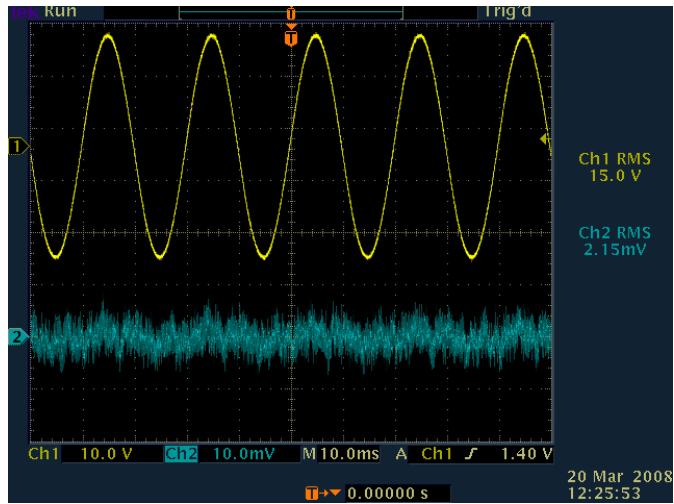
Ειδικότερα, το προς εξέταση δείγμα ψεκάζεται με νερό συγκεκριμένης αντίστασης και θερμοκρασίας, το οποίο πέφτει στο δείγμα με την μορφή σταγόνων με τρόπο τέτοιο ώστε η κάθετη και η οριζόντια πλευρά του δείγματος να δέχονται την ίδια ποσότητα νερού. Αρχικά, καθαρίζεται η εξωτερική επιφάνεια του δείγματος και καθορίζεται τόσο η θερμοκρασία όσο και η αντίσταση του νερού. Η θερμοκρασία πρέπει να είναι ίση με αυτήν του περιβάλλοντος ($\pm 15^{\circ}\text{C}$) ενώ η αντίσταση ίση με $100 \pm 15 \Omega\text{m}$. Επίσης, ο μέσος ρυθμός ψεκασμού τόσο για το οριζόντιο όσο και για το κατακόρυφο μέρος του αλεξικέραυνου πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 2.5 mm/min ενώ η διάρκεια του ισούται με 15 λεπτά.

Παρακάτω φαίνονται οι 24 κυματομορφές οι οποίες καταγράφηκαν στον παλμογράφο.

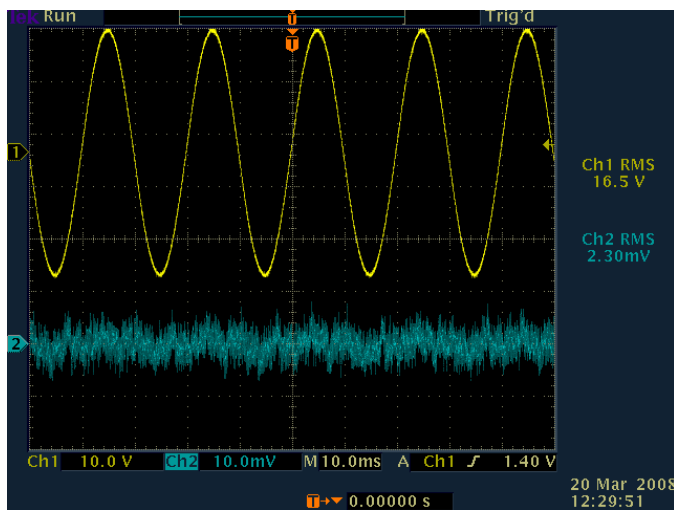
Αλεξικέρανο 6490

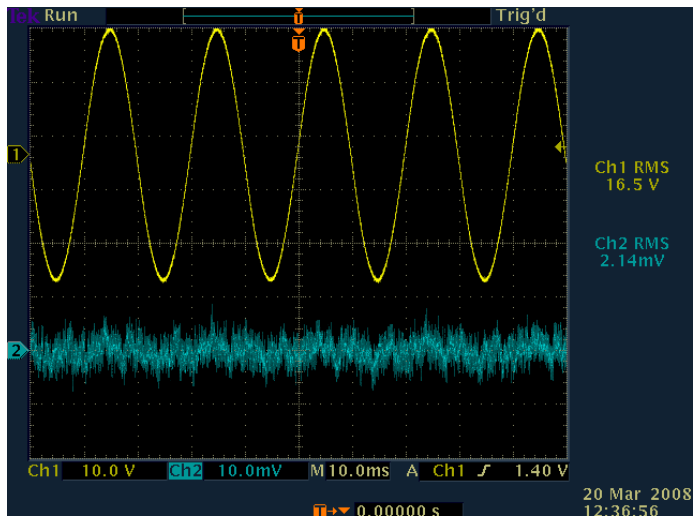
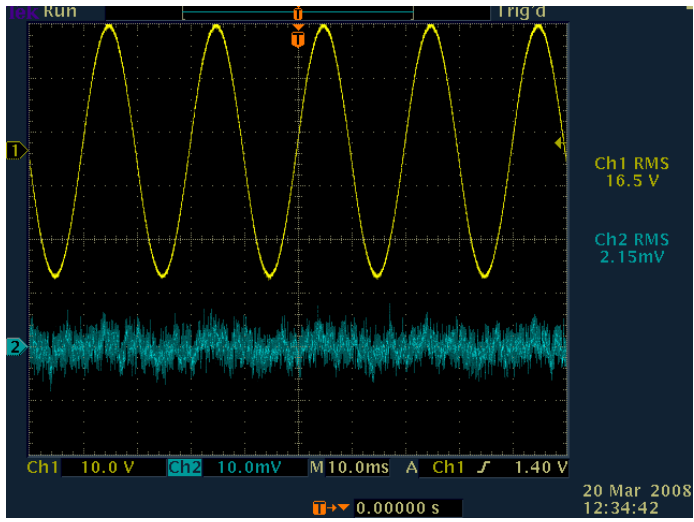
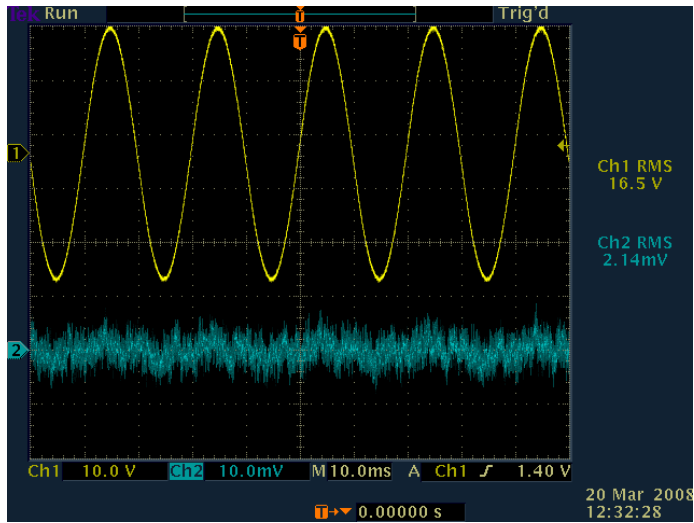
- $V=12\text{ kV}$



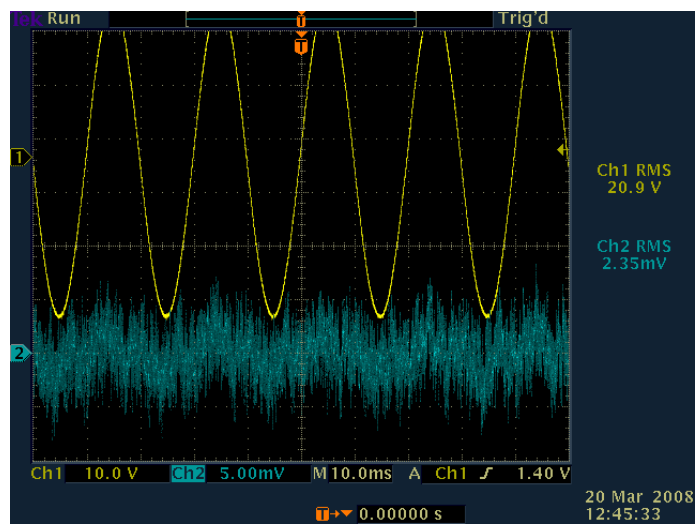
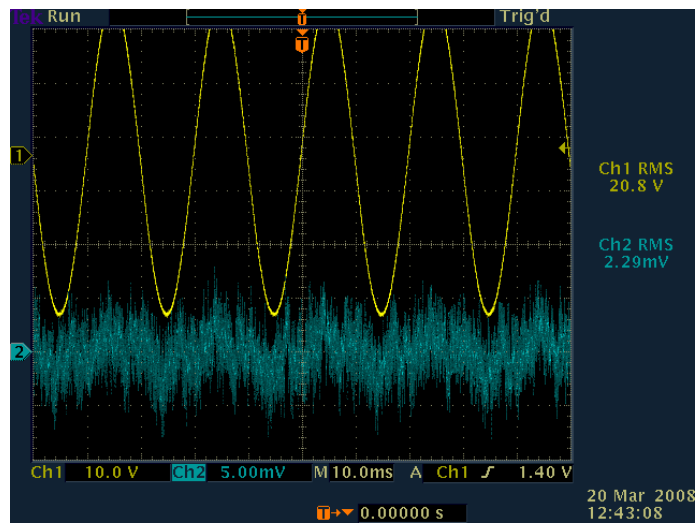
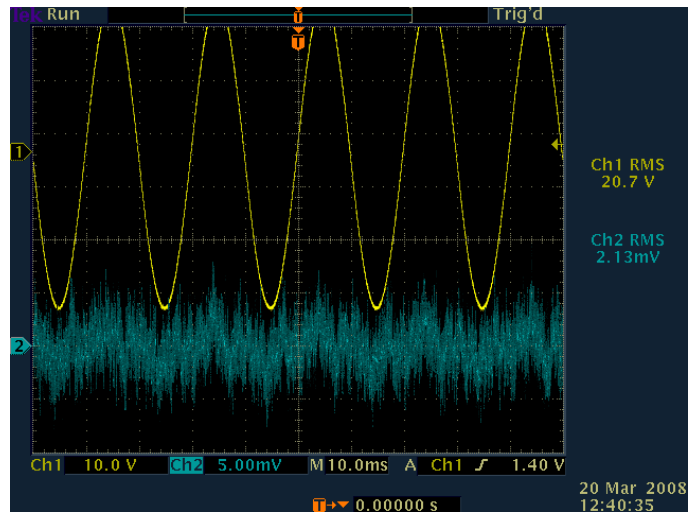


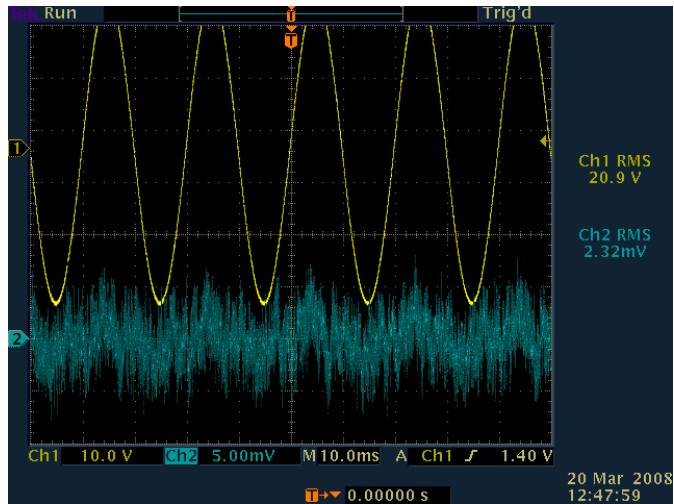
- $V=13.2 \text{ kV}$





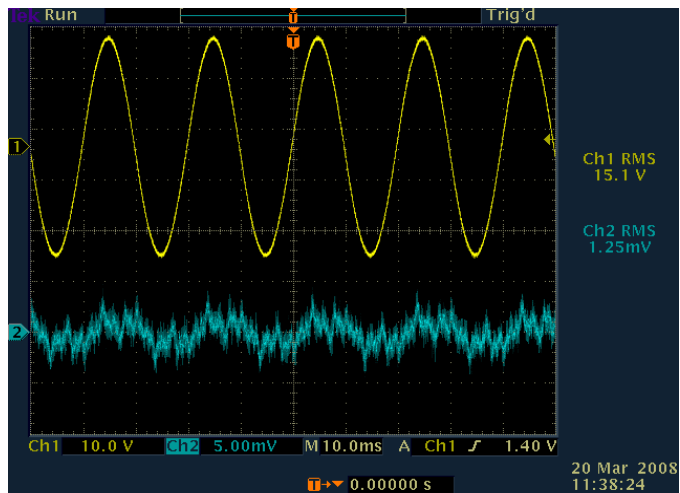
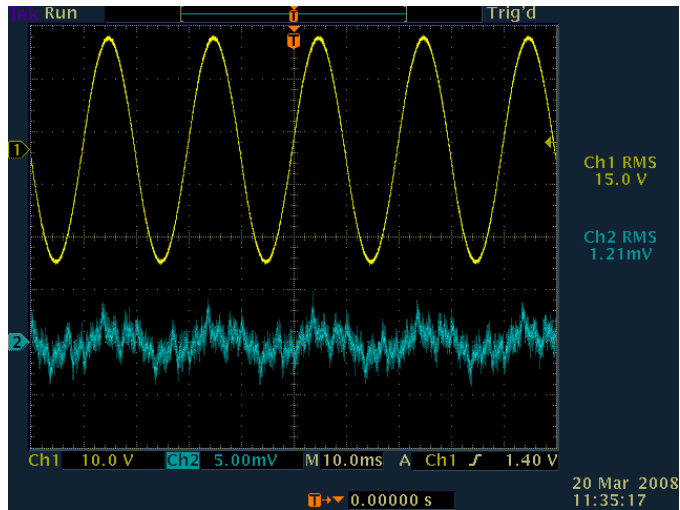
- $V=16.5\text{ kV}$

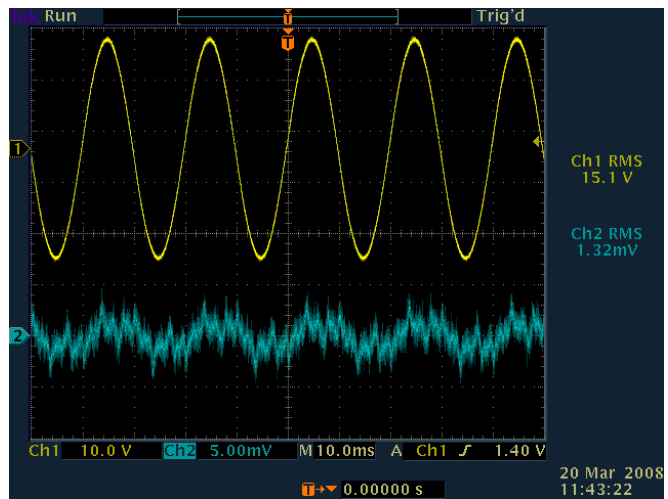
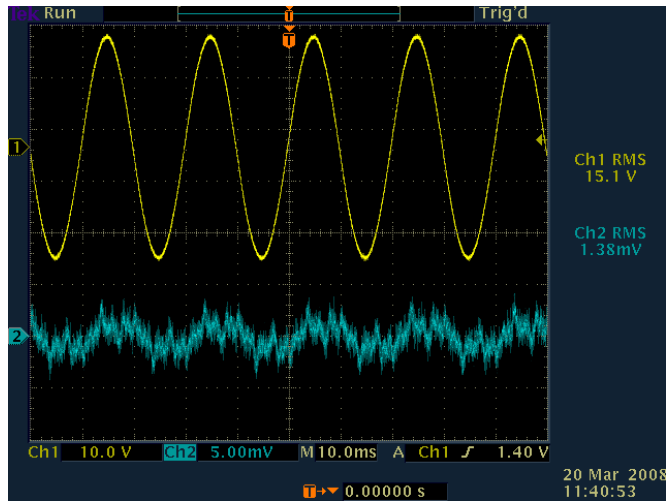




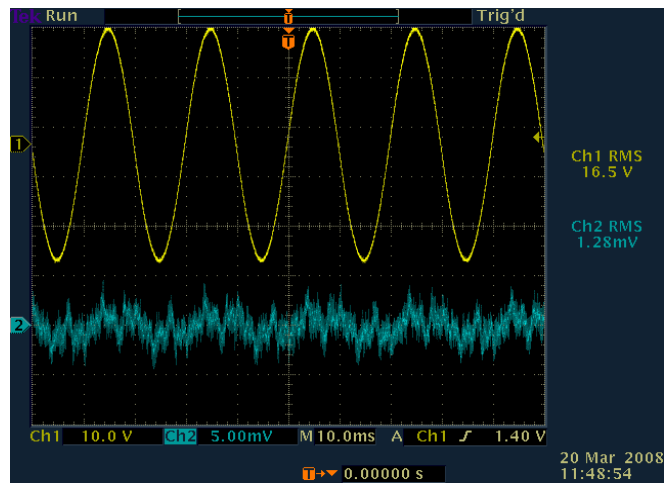
Αλεξικέρανο 6491

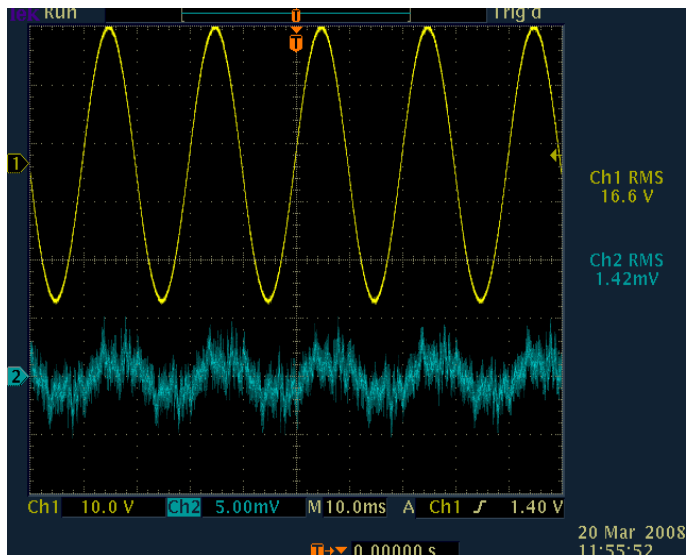
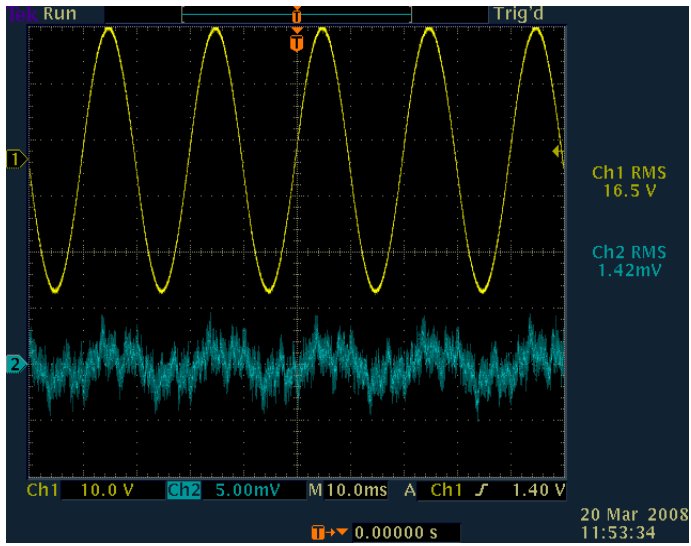
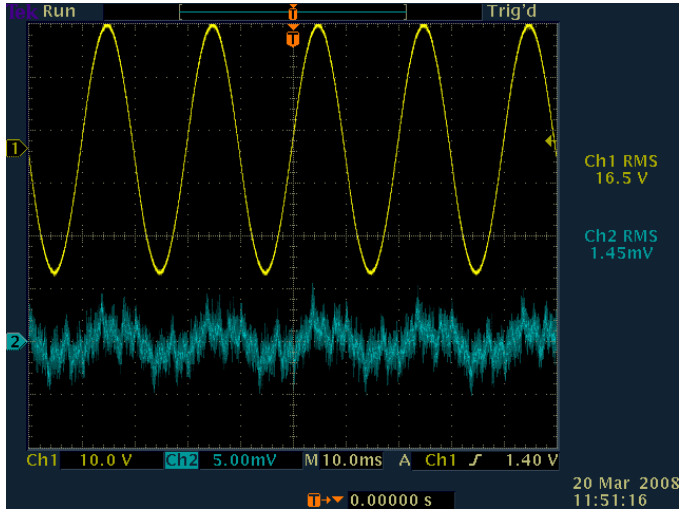
- V=12 kV



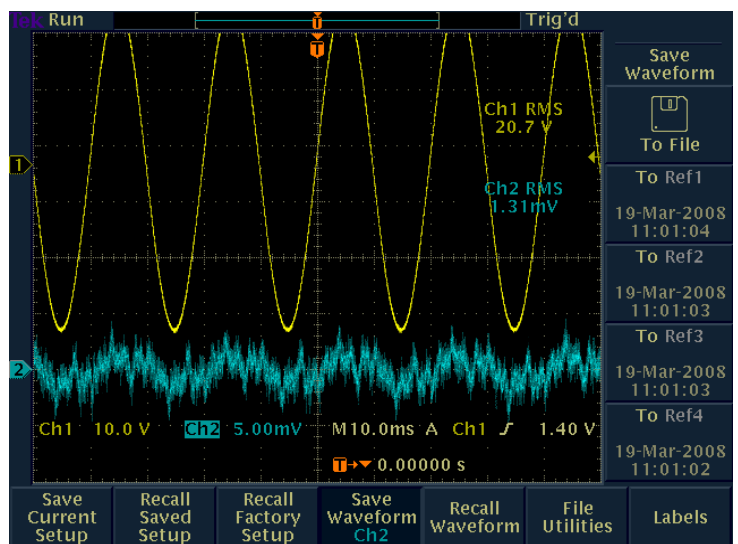
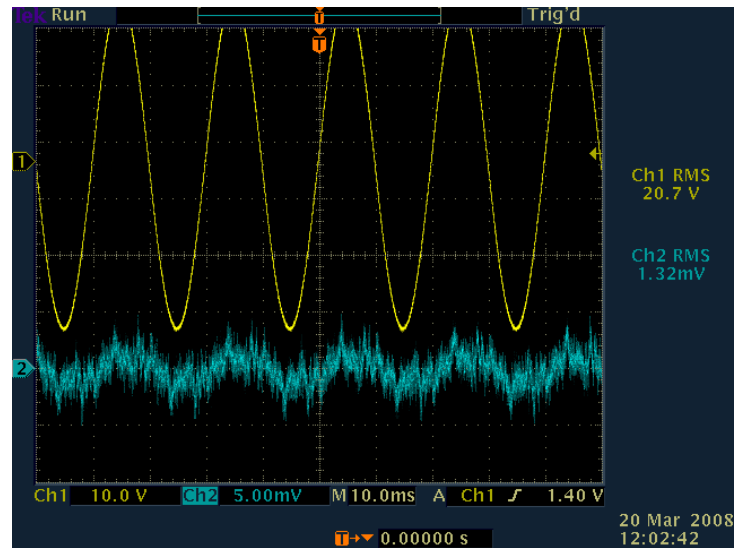
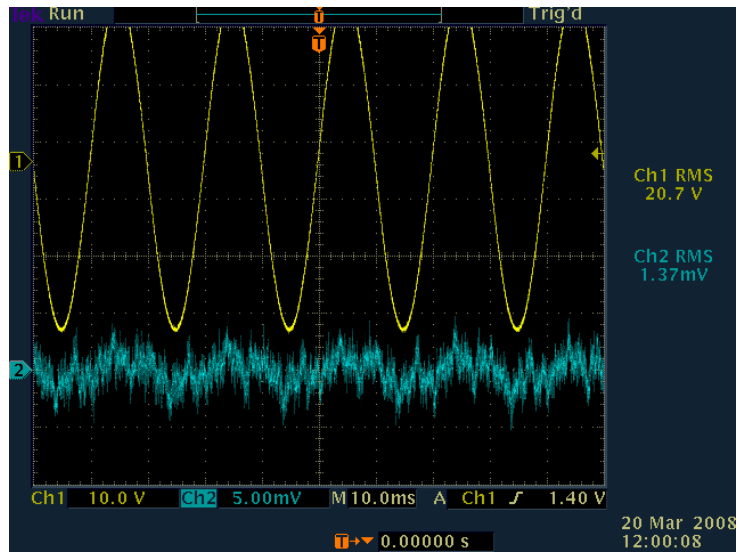


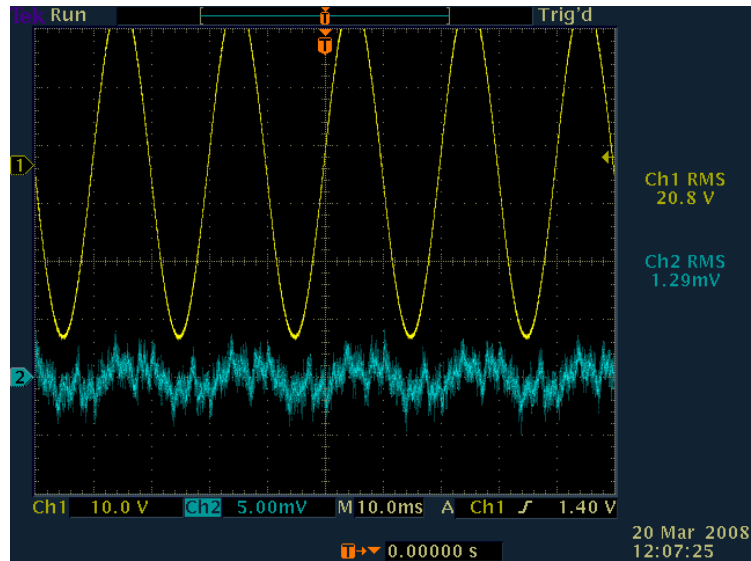
- $V=13.2 \text{ kV}$





- $V=16.5\text{ kV}$

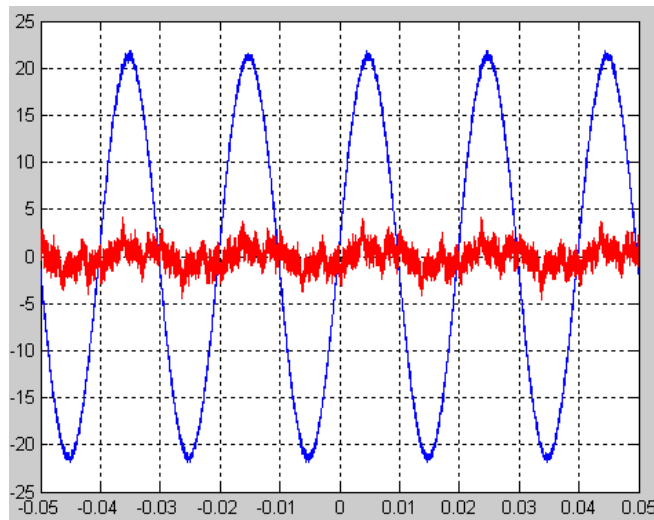




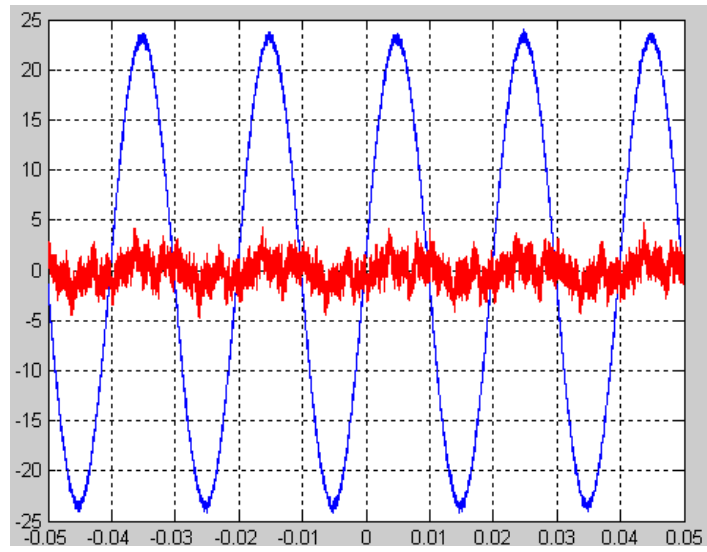
Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις πρότυπες κυματομορφές (μία για κάθε τάση)

Που απομονώσαμε με χρήση Matlab και τα αποτελέσματα από την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω για τον υπολογισμό του ωμικού ρεύματος.

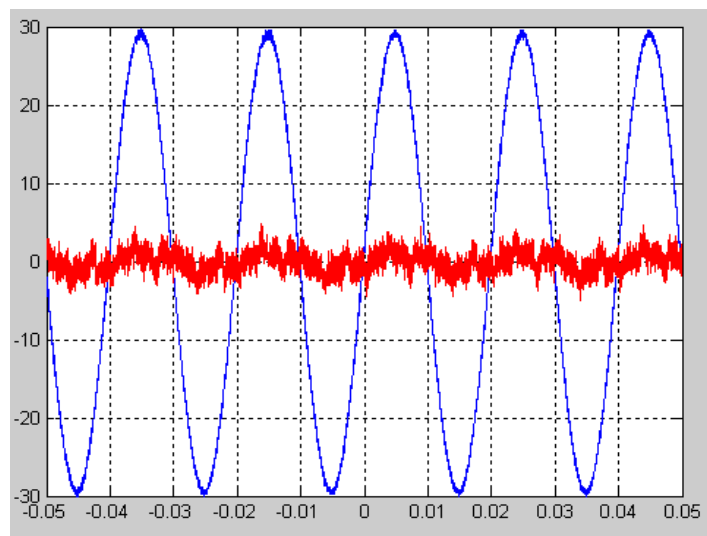
- 12 kV



- 13.2 kV



- 16.5 kV



Αλεξικέρανο 6490

- $V=12\text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
0.42	19.80	0.142
0.41	18.00	0.127
0.49	19.20	0.161
0.47	18.60	0.150

$R_{\text{μετρ}}=10\ \Omega$

- $V=13.2\text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
0.51	21.60	0.188
0.49	19.80	0.166
0.49	18.80	0.158
0.47	19.40	0.156

$R_{\text{μετρ}}=10\ \Omega$

- $V=16.5 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
0.49	14.40	0.122
0.44	18.00	0.136
0.37	16.80	0.107
0.47	17.80	0.144

$R_{\text{μετρ}}=10 \Omega$

Αλεξικέραυνο 6491

- $V=12 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
0.82	18.00	0.253
0.88	16.80	0.254
0.72	18.60	0.230
0.74	17.40	0.221

$R_{\text{μετρ}}=10 \Omega$

- $V=13.2 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
0.72	12.60	0.157
0.68	14.40	0.169
0.66	14.20	0.162
0.68	13.80	0.162

$$R_{\text{μετρ}}=10 \Omega$$

- $V=16.5 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
0.66	19.80	0.224
0.68	14.40	0.169
0.70	16.80	0.202
0.72	14.80	0.184

$$R_{\text{μετρ}}=10 \Omega.$$

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω πίνακες το ωμικό ρεύμα διαρροής παρουσιάζει μία τάση αύξησης χωρίς ωστόσο να προσφέρει ασφαλή συμπεράσματα για την κατάσταση του δείγματος και αυτό διότι η εν λόγω αύξηση μπορεί να οφείλεται στην υγρασία στην επιφάνεια του αλεξικέρανου.

Τέλος, επαναλάβαμε την ίδια ακριβώς διαδικασία αφού όμως πρώτα υποβάλαμε και τα δύο εξεταζόμενα αλεξικέρανα σε καταπόνηση τόσο με κρουστική τάση.

Αρχικά, εφαρμόσαμε 20 κρουστικές τάσεις 1.2/50 με τάση ίση με 20 kV. Οι κρουστικές αποτελούνταν από τέσσερις ομάδες των πέντε κρουστικών ενώ τα διαλείμματα μεταξύ κάθε κρουστικής ήταν ίσο με 50-60 δευτερόλεπτα. Το διάλειμμα τέλος μεταξύ κάθε ομάδας ήταν ίσο με 25-30 λεπτά.

Στη συνέχεια εφαρμόσαμε 20 κρουστικές τάσεις με τάση ίση με 40 kV και επαναλάβαμε την ίδια διαδικασία και τέλος εφαρμόσαμε 20 τάσεις με τάση ίση με 90 kV και επαναλάβαμε την ίδια διαδικασία.

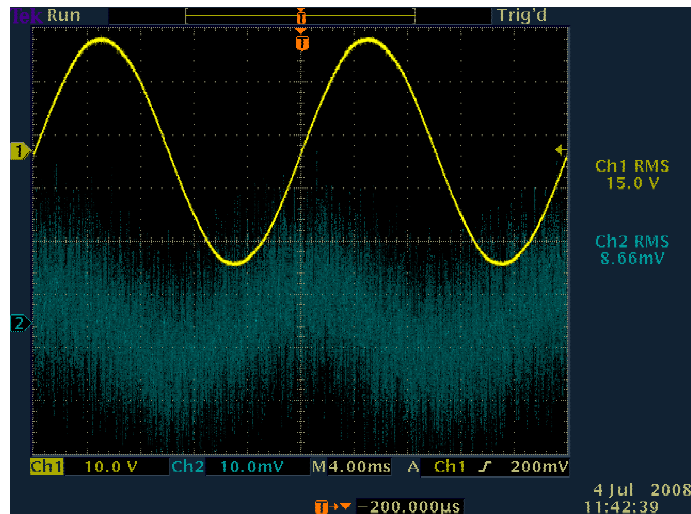
Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι έγινε προσπάθεια να καταπονηθούν τα δείγματα και με κρουστικά ρεύματα. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν κατέστη δυνατό καθώς η αντίστοιχη κρουστική γεννήτρια δεν επαρκούσε.

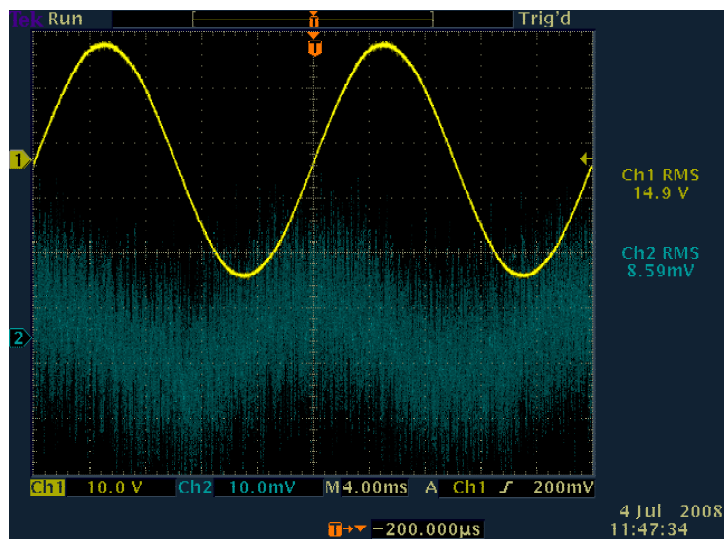
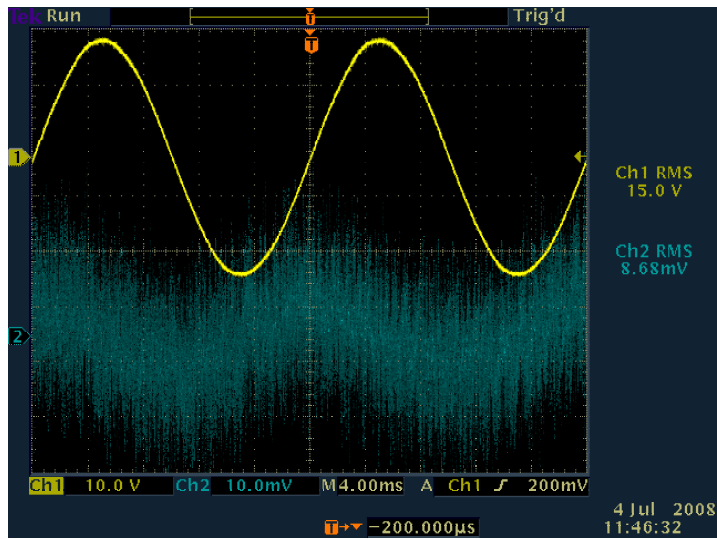
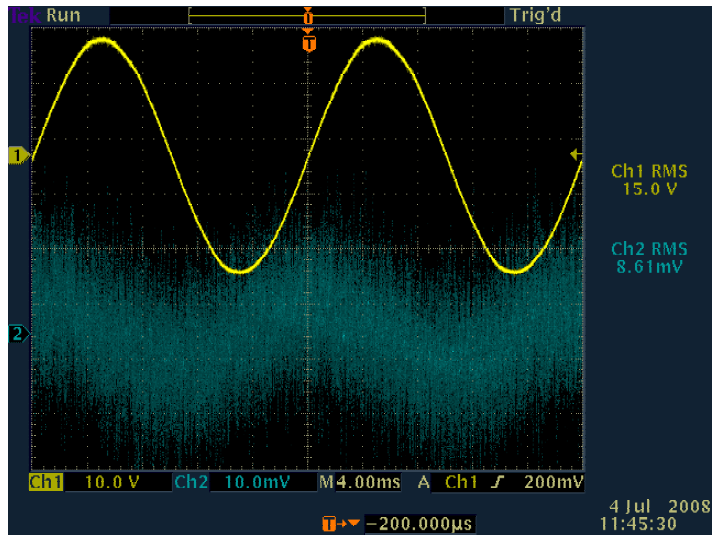
Παρακάτω φαίνονται τόσο οι κυματομορφές, τρεις κυματομορφές που απομονώσαμε με την χρήση Matlab και τα αποτελέσματα μετά από κάθε καταπόνηση.

α) Καταπόνηση με 20 kV

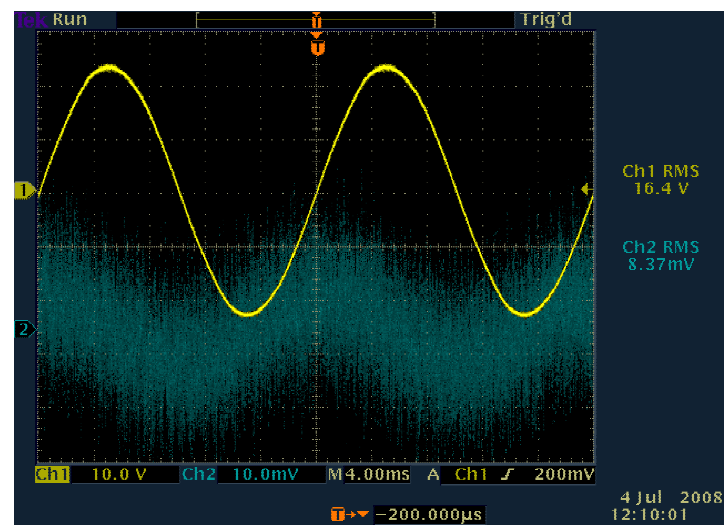
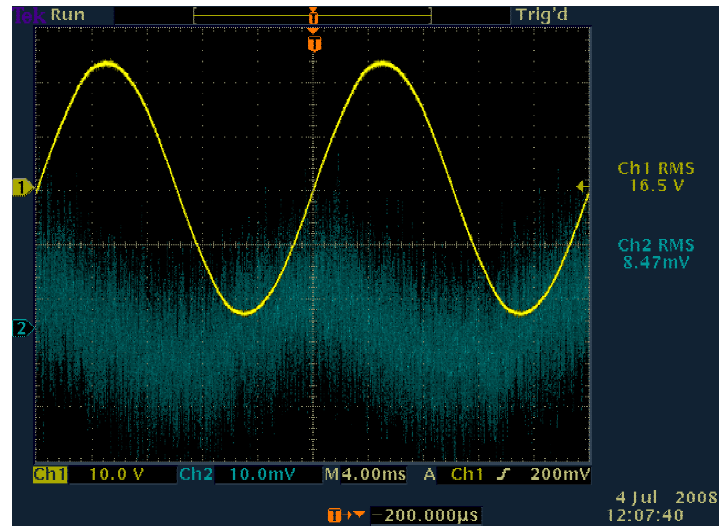
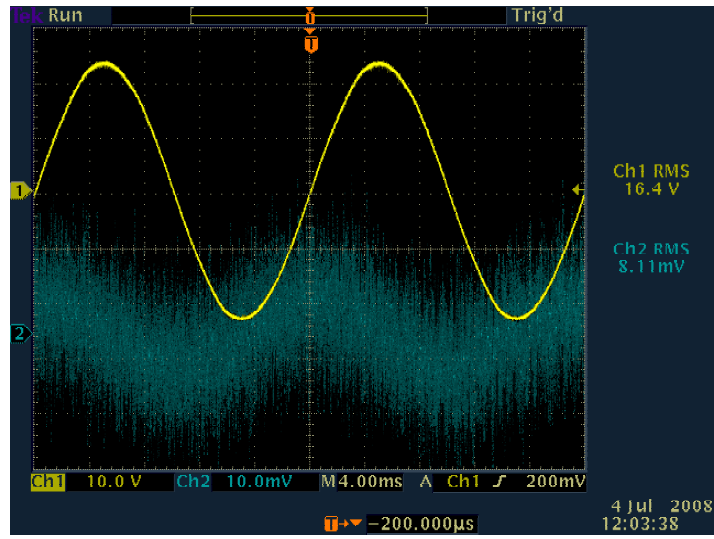
Αλεξικέραυνο 6490

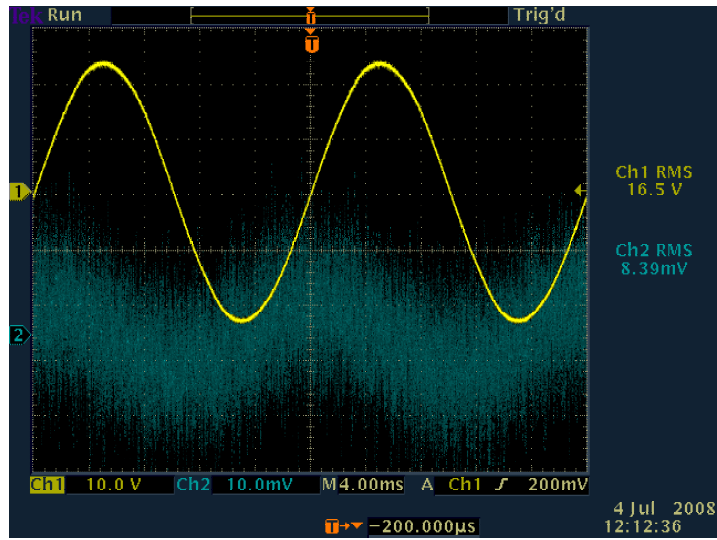
- $V=12 \text{ kV}$



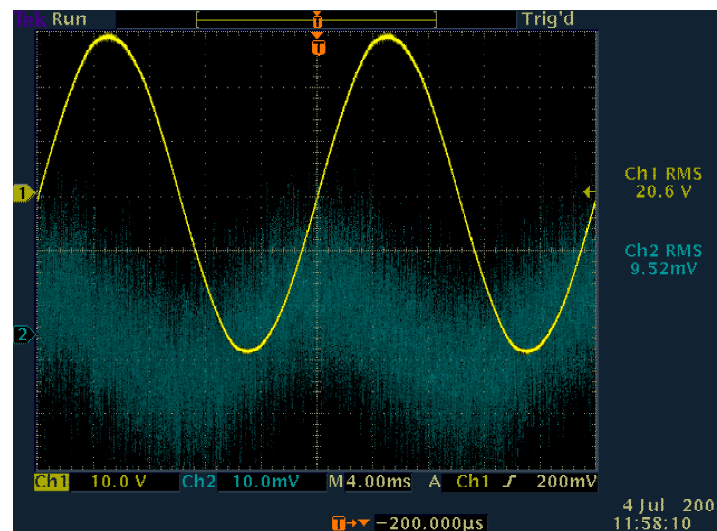
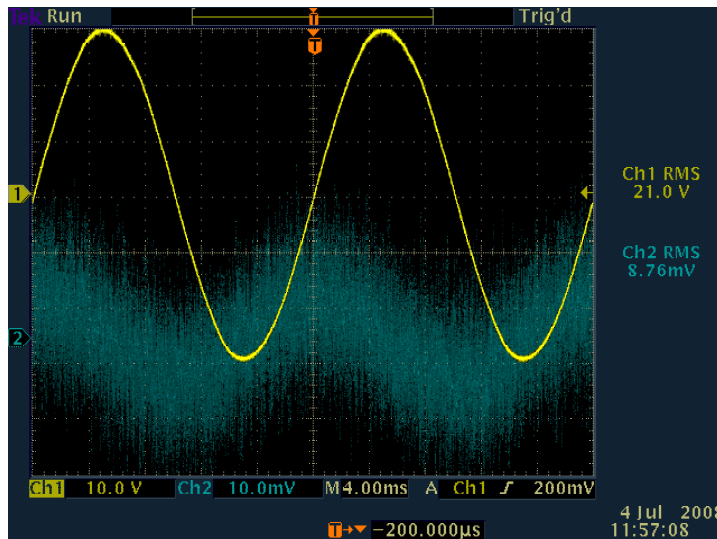


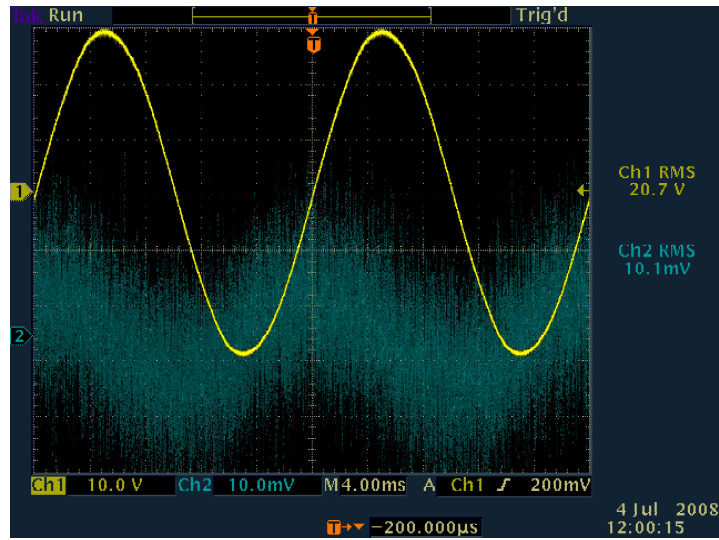
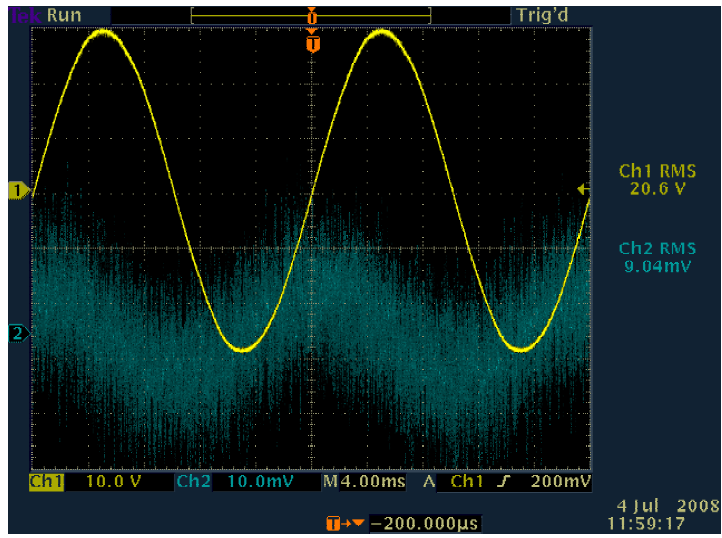
- $V=13.2\text{ kV}$





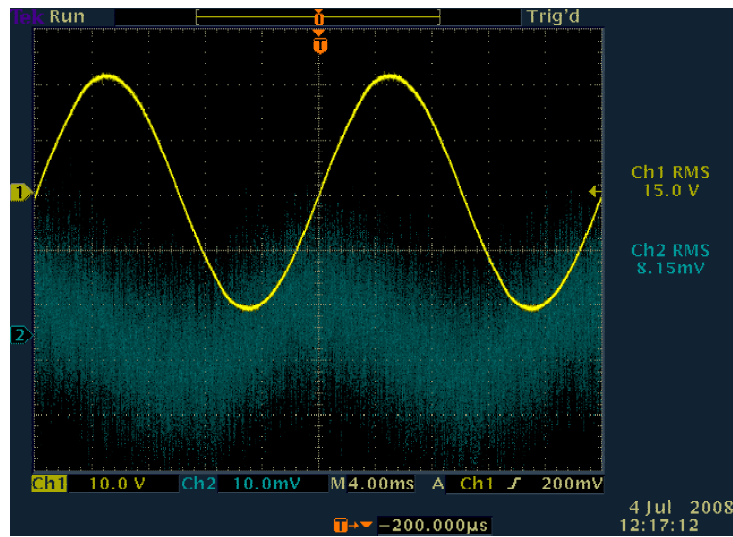
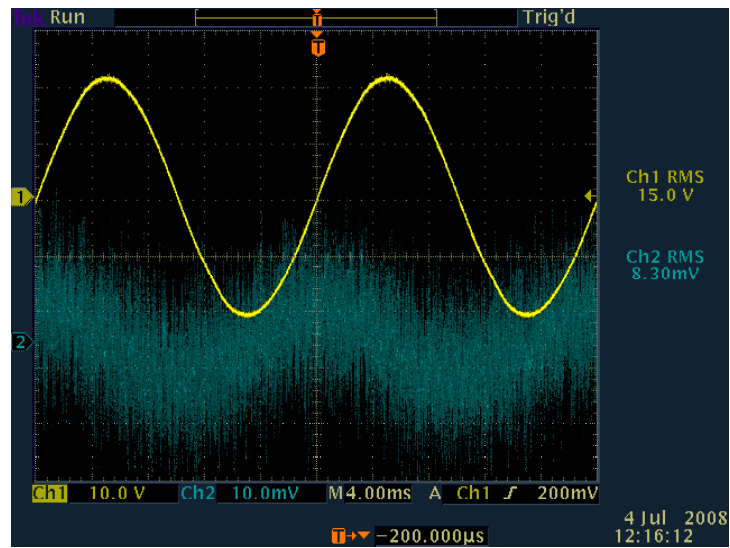
- $V=16.5 \text{ kV}$

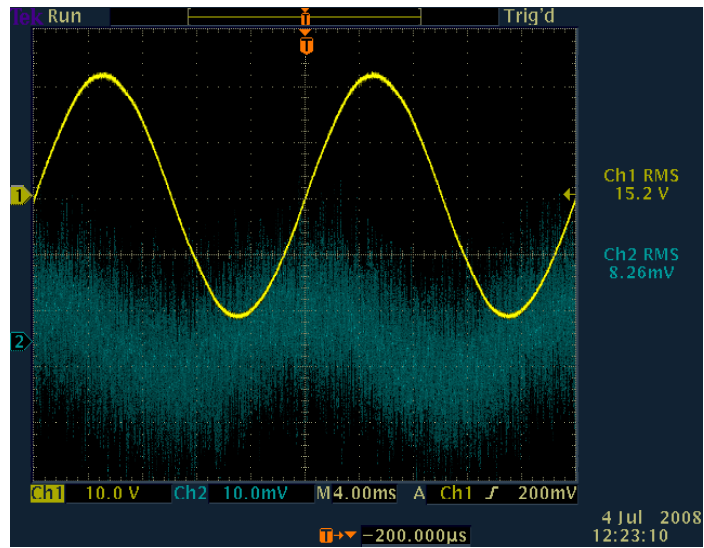
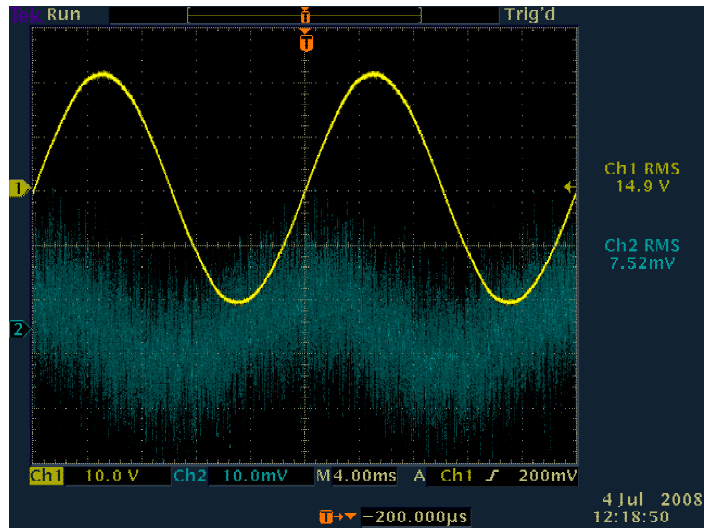




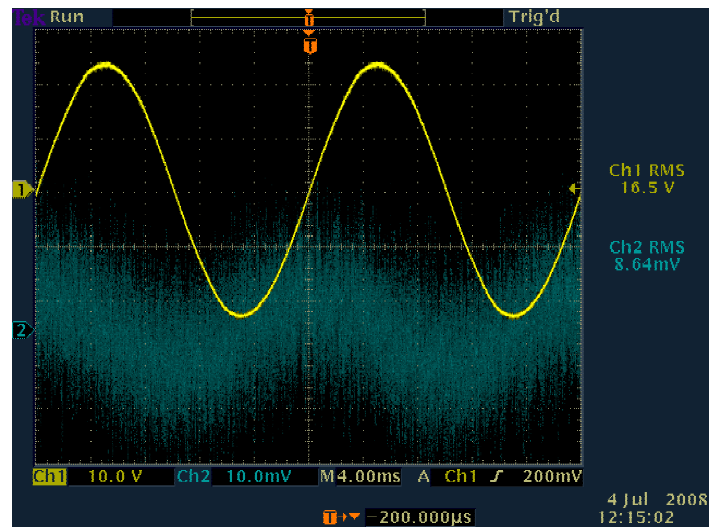
Αλεξικέρανο 6491

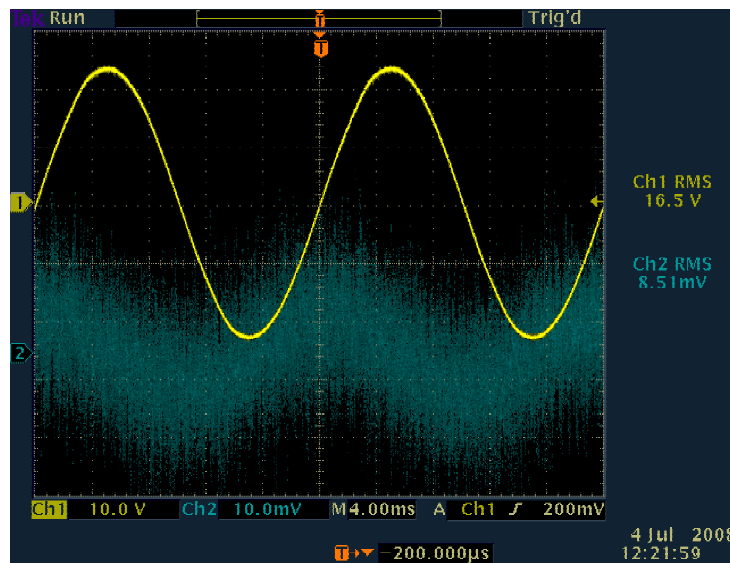
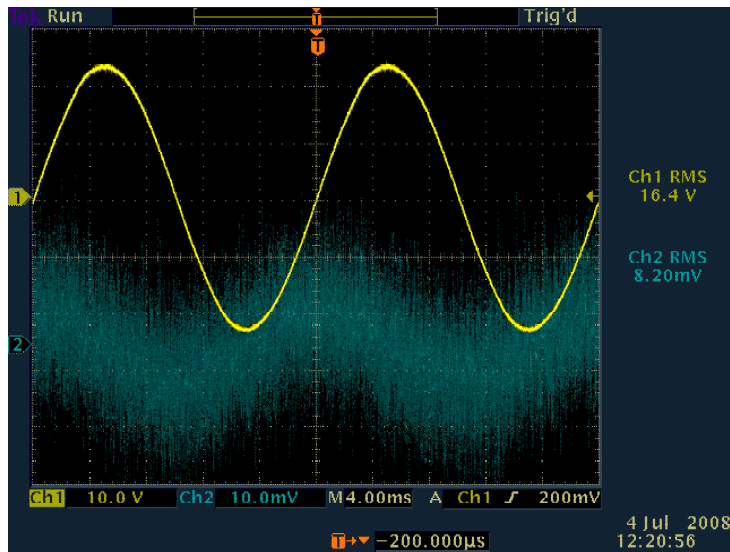
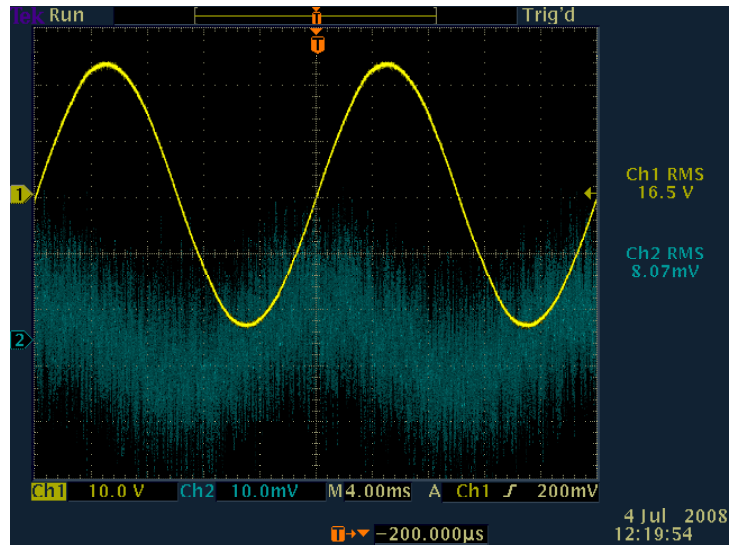
- $V=12\text{ kV}$



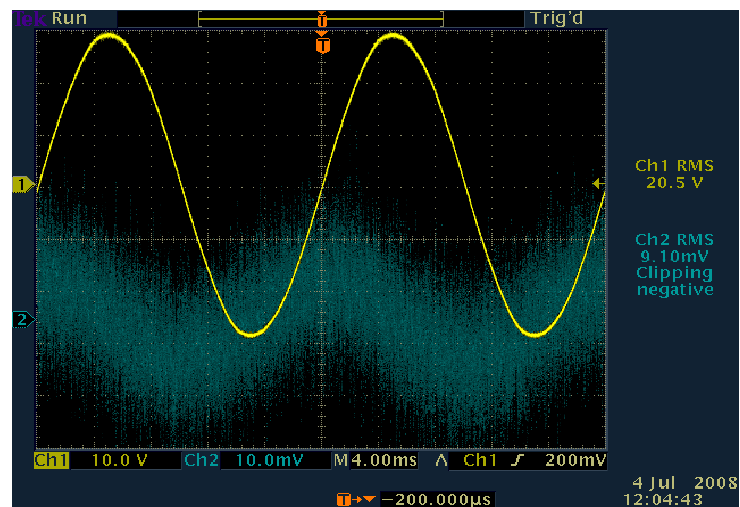
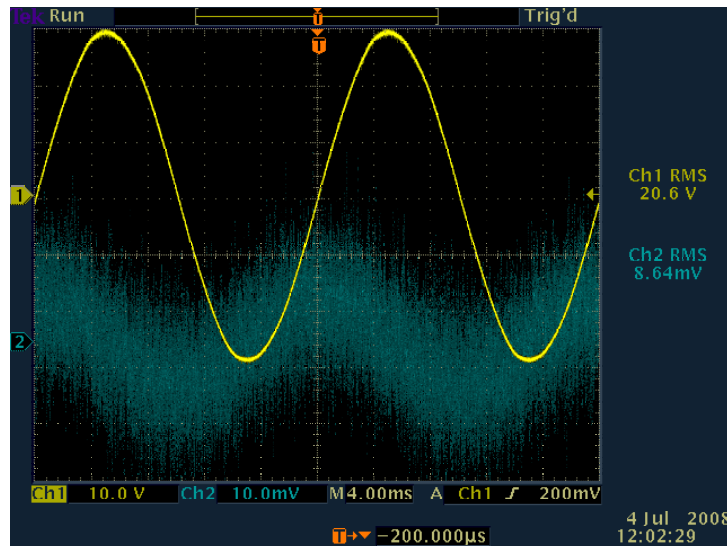
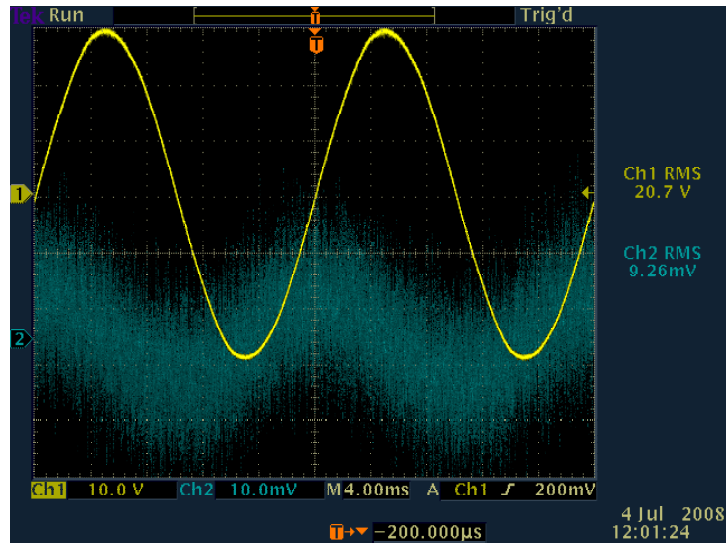


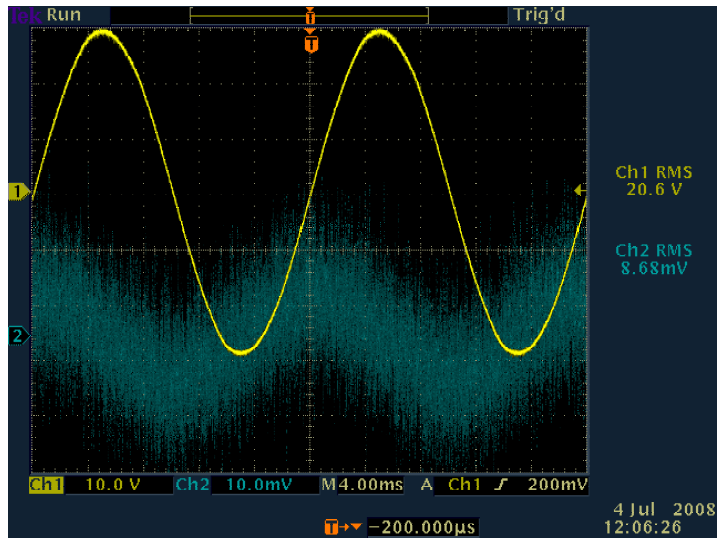
- $V=13.2 \text{ kV}$





- $V=16.5\text{ kV}$

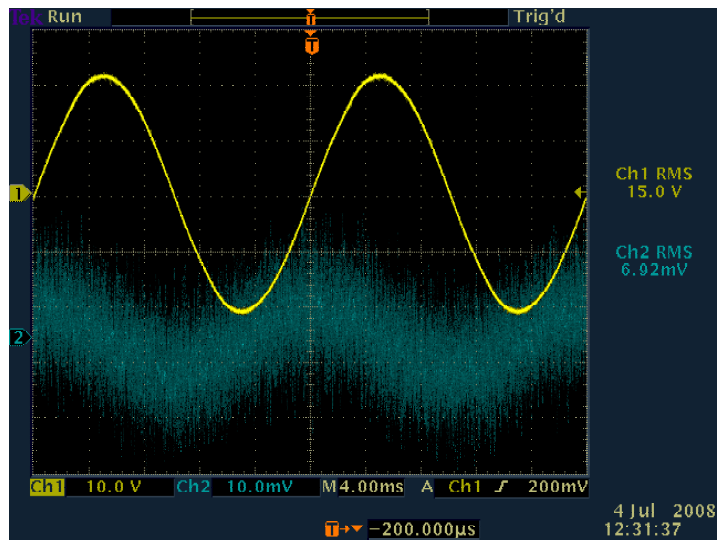


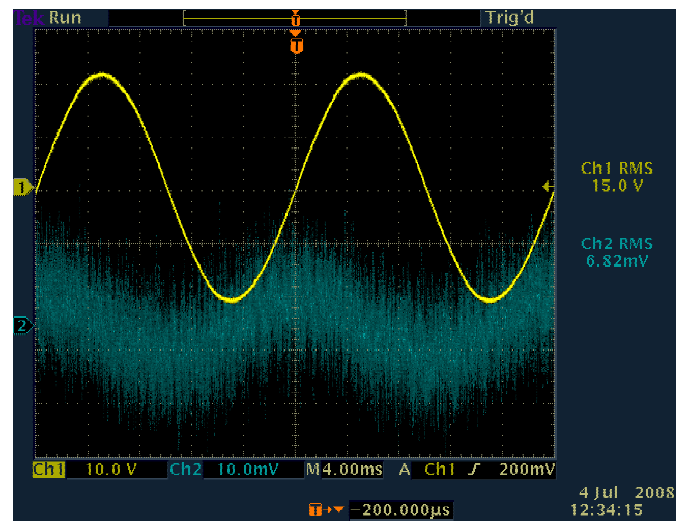
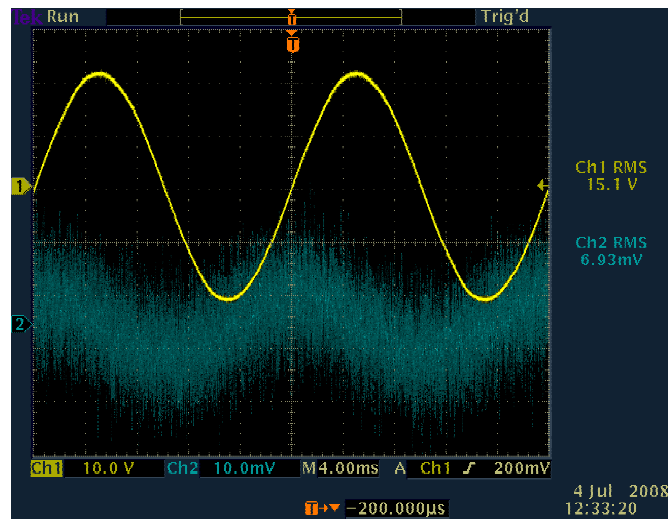
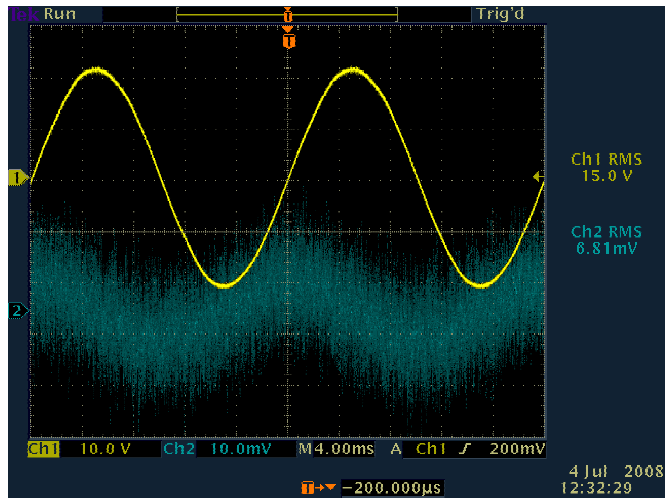


β) Καταπόνηση με 40 kV

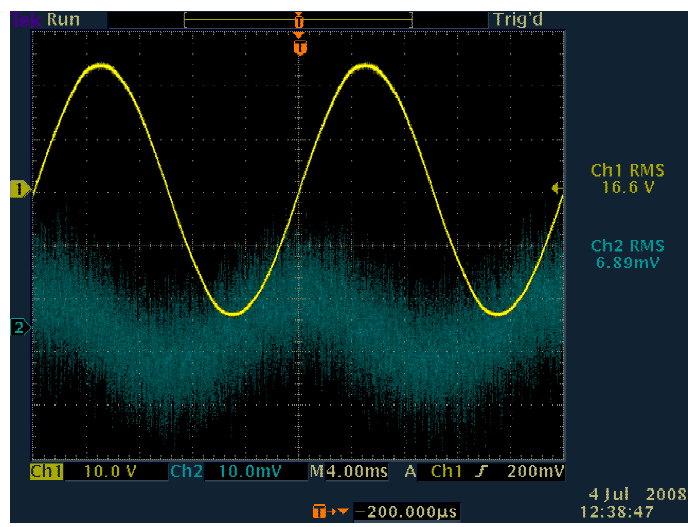
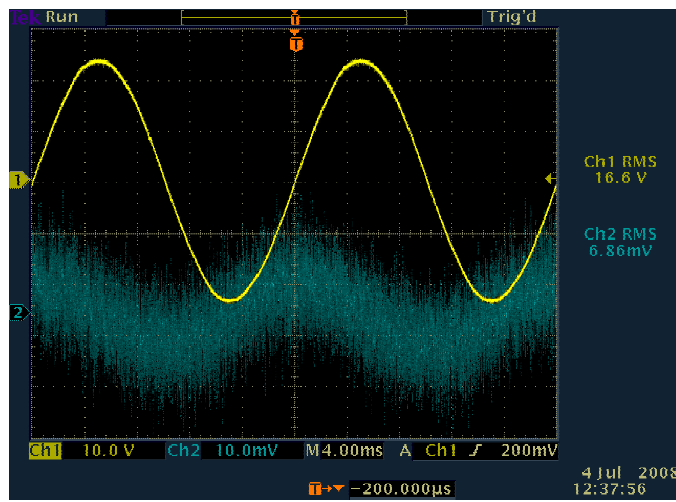
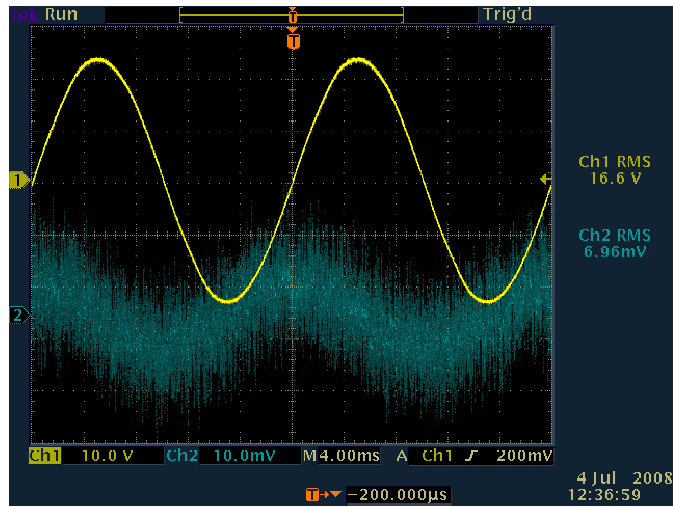
Αλεξικέρανο 6490

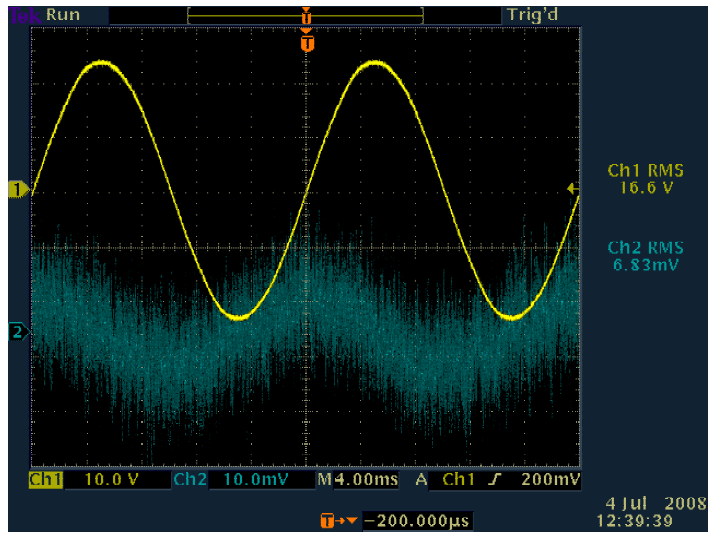
- V=12 kV



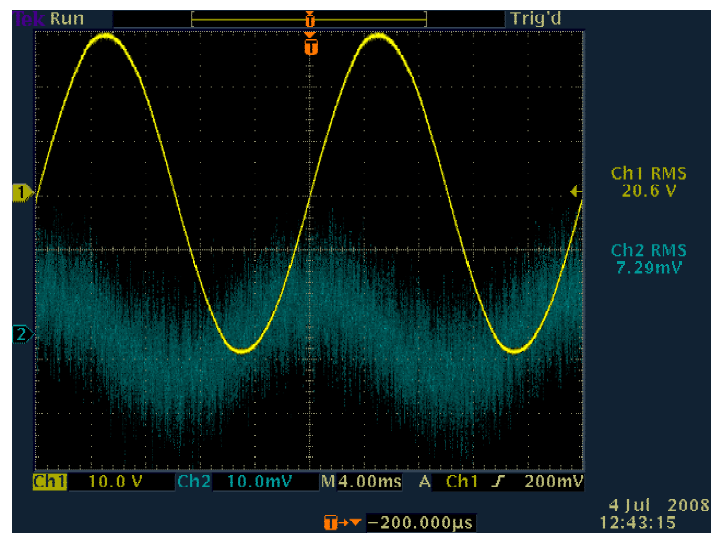
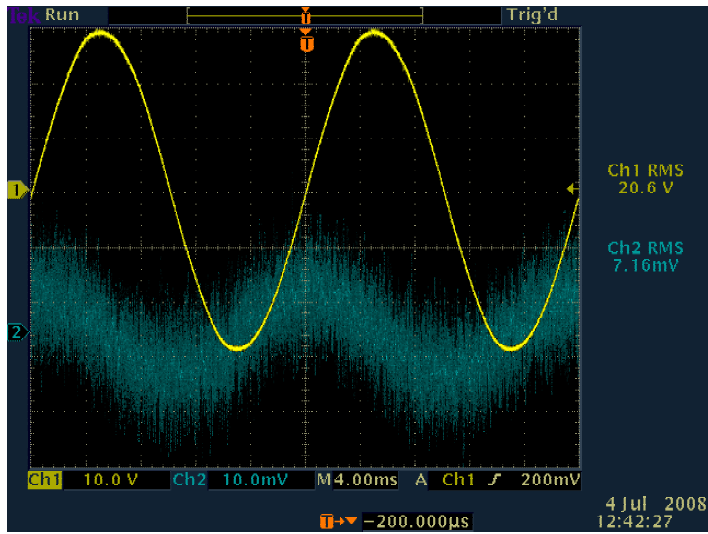


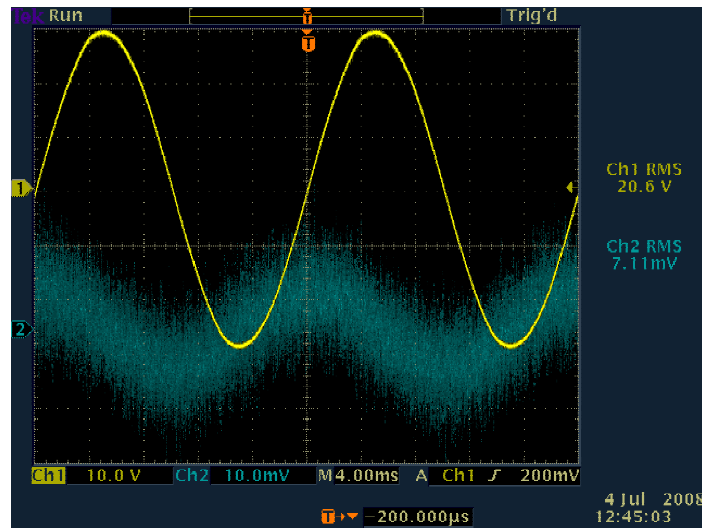
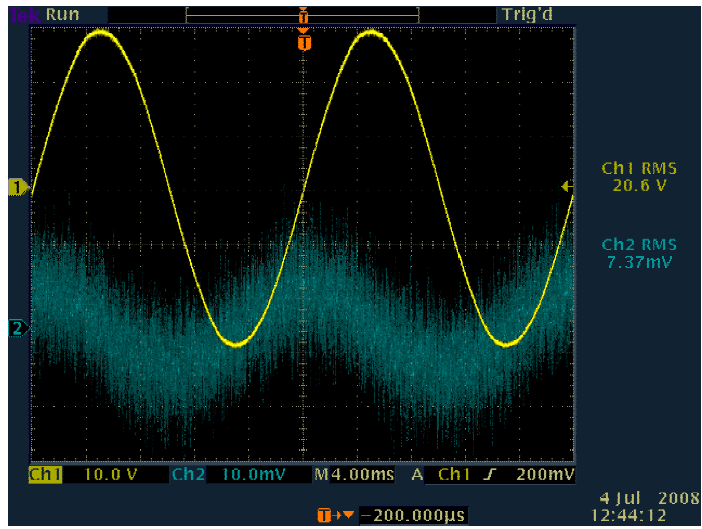
- $V=13.2\text{ kV}$





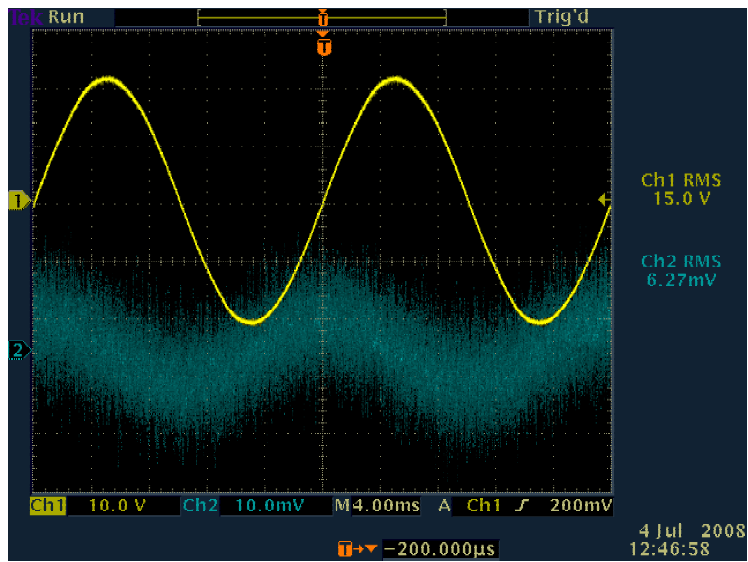
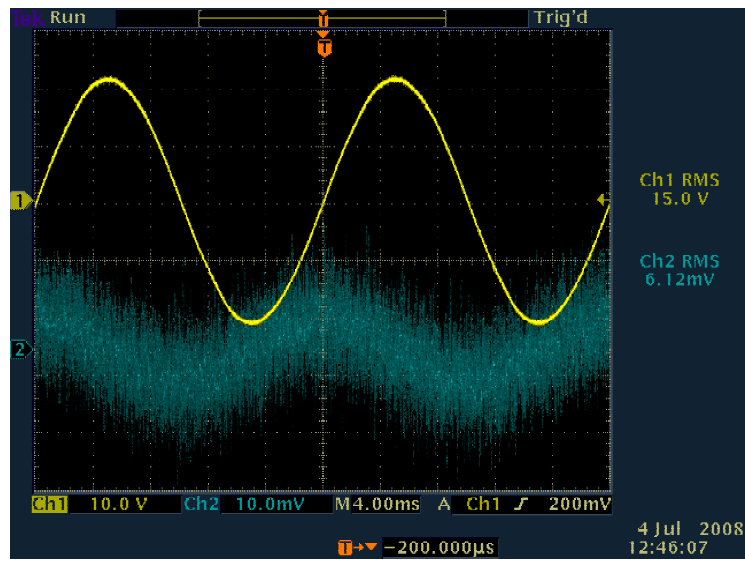
- $V=16.5 \text{ kV}$

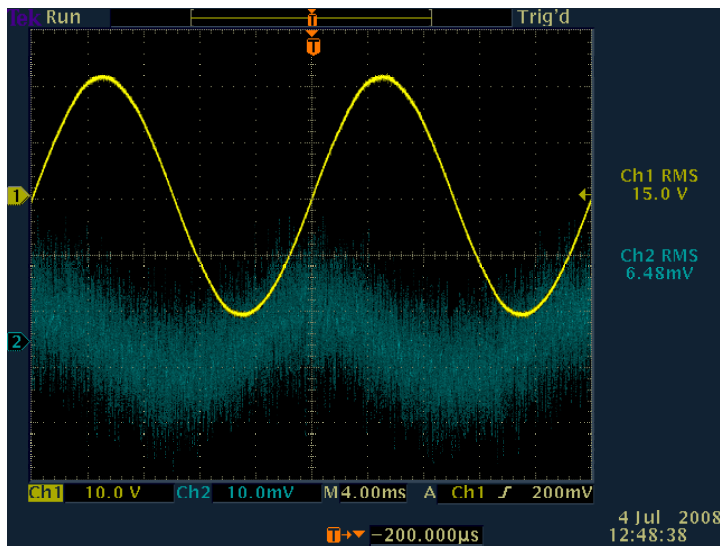
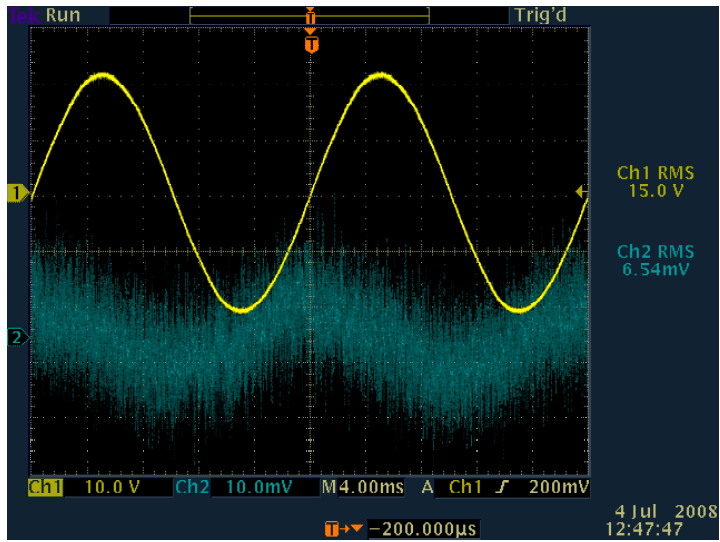




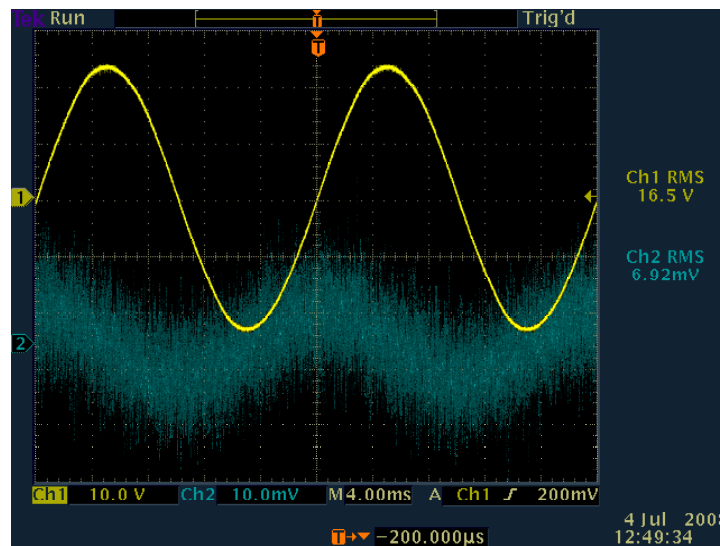
Αλεξικέρανο 6491

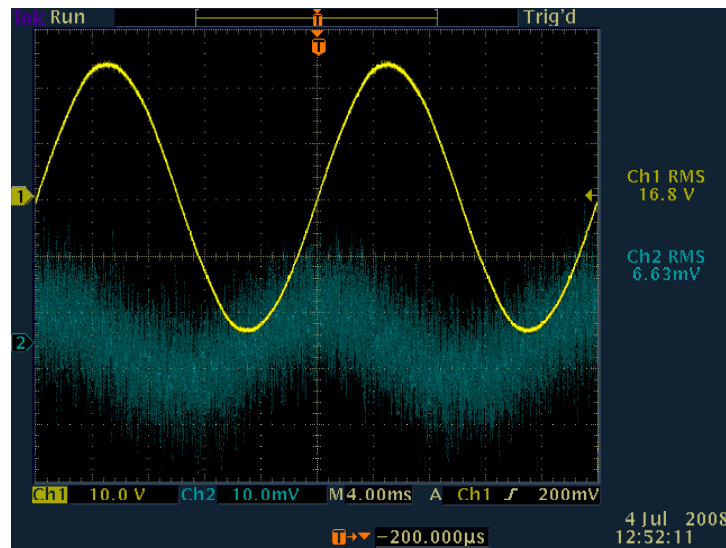
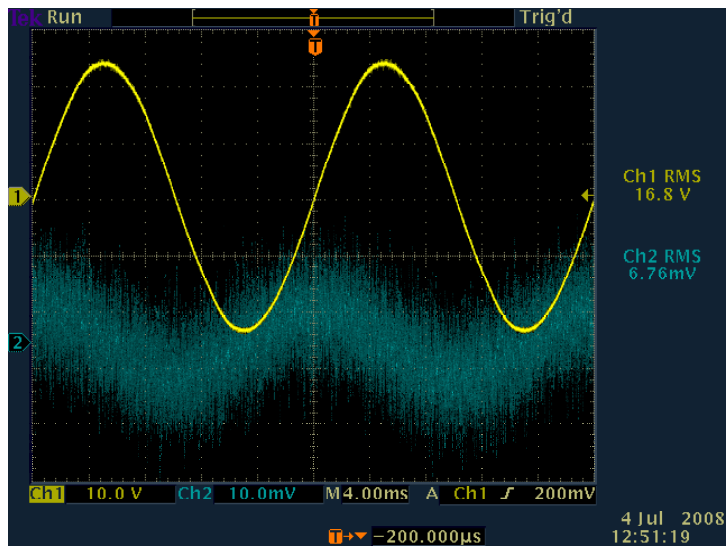
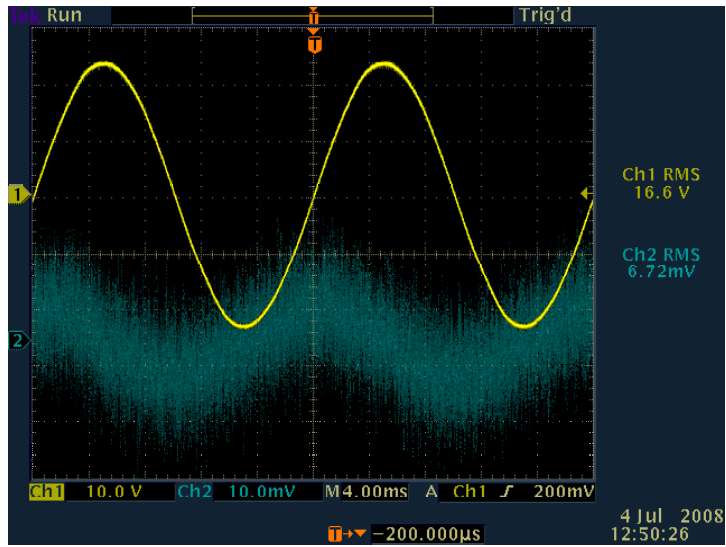
- $V=12\text{ kV}$



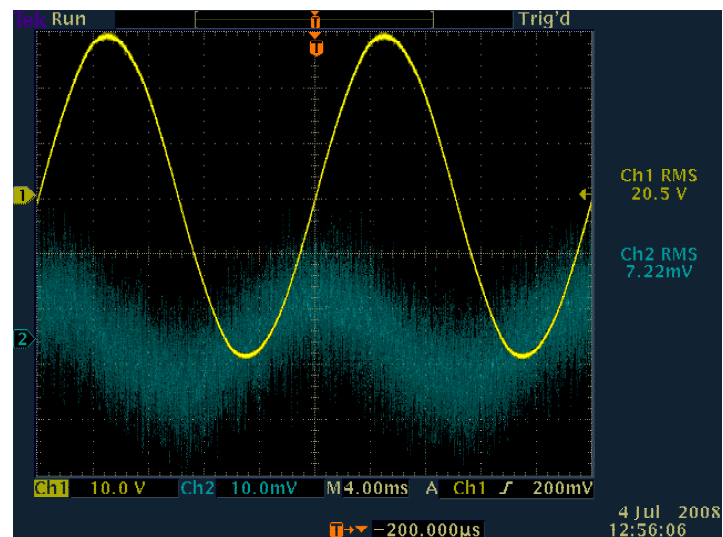
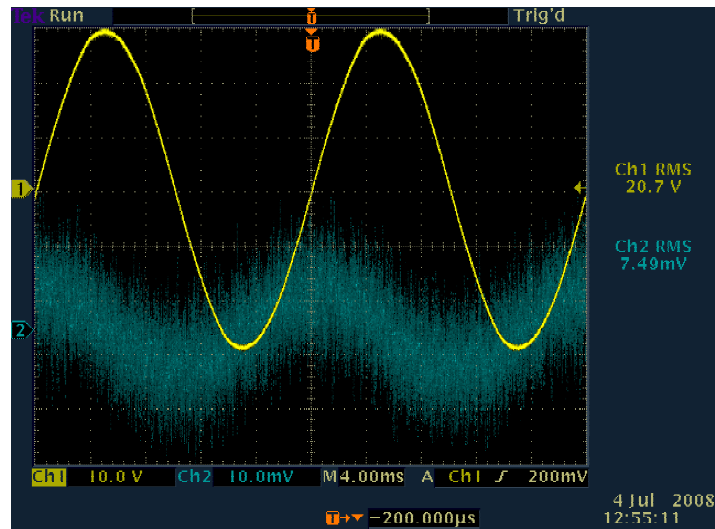
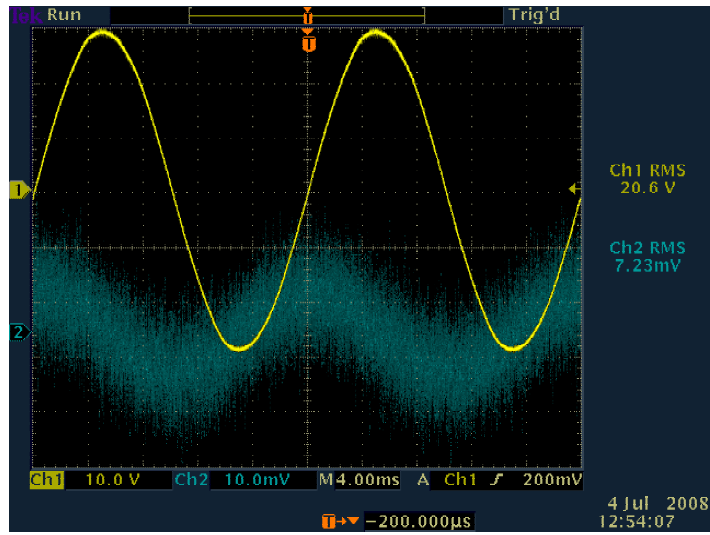


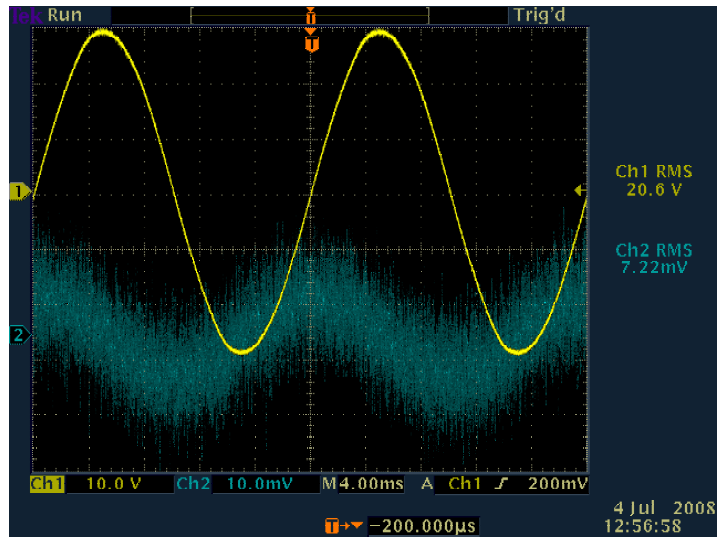
- $V=13.2 \text{ kV}$





- $V=16.5\text{ kV}$

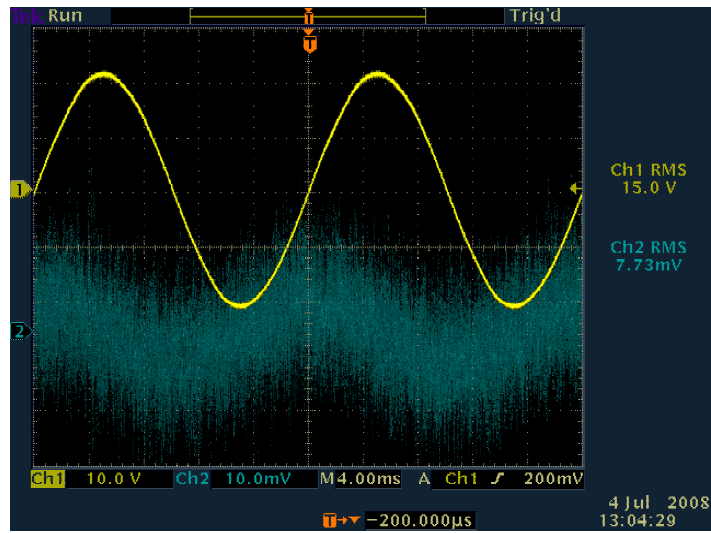


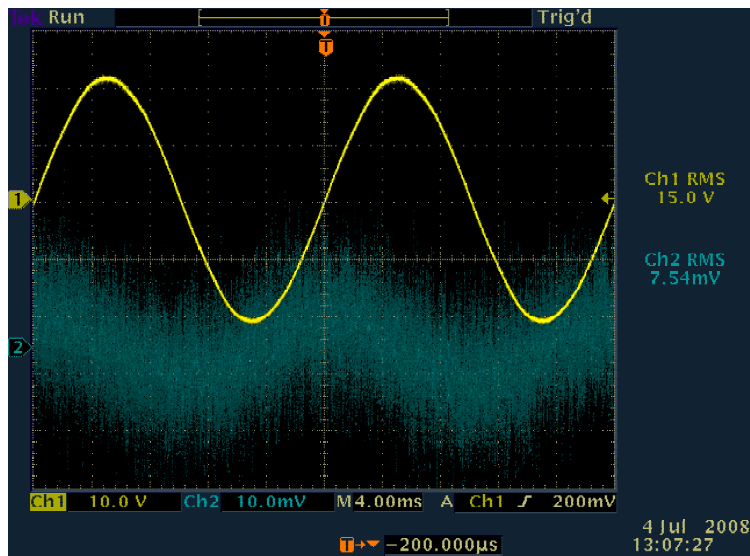
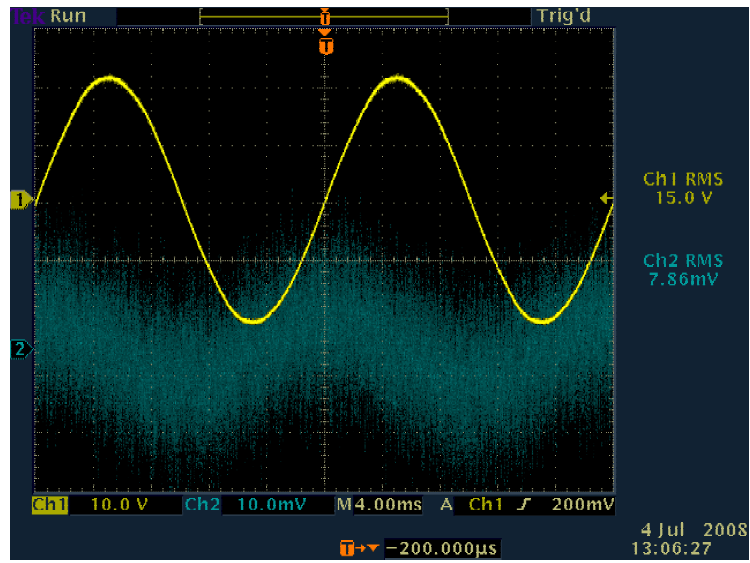
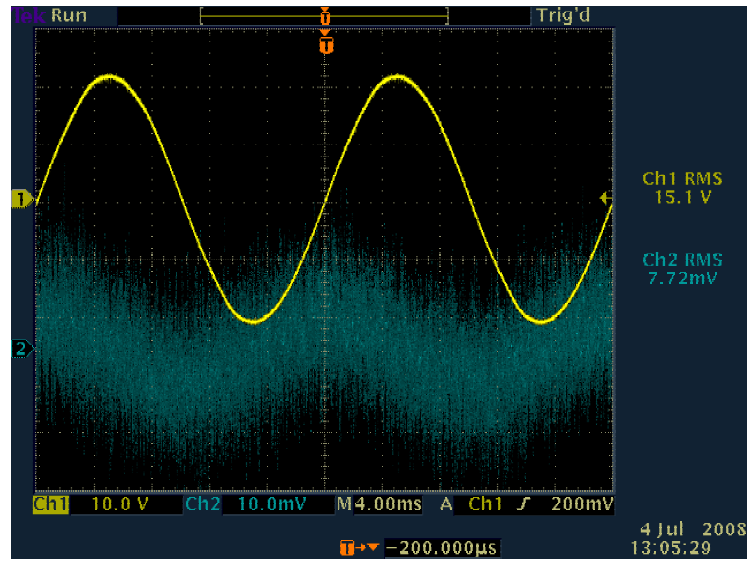


β) Καταπόνηση με 90 kV

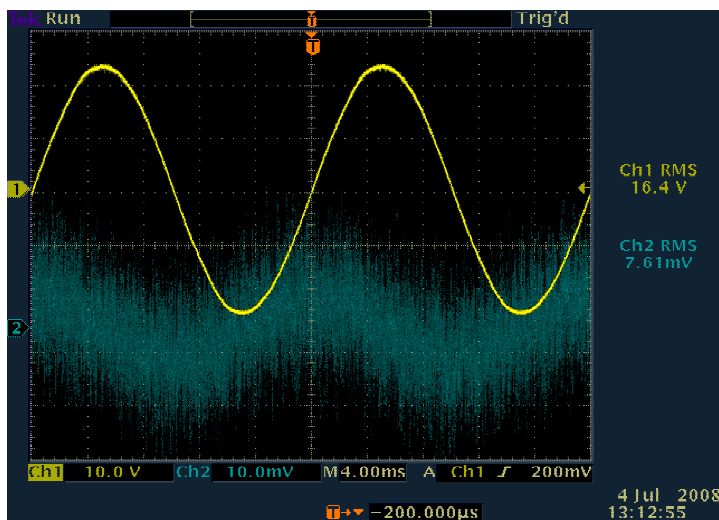
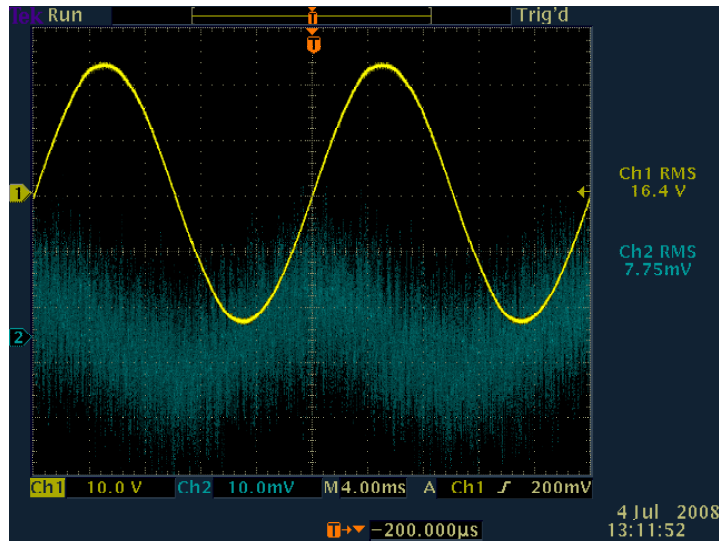
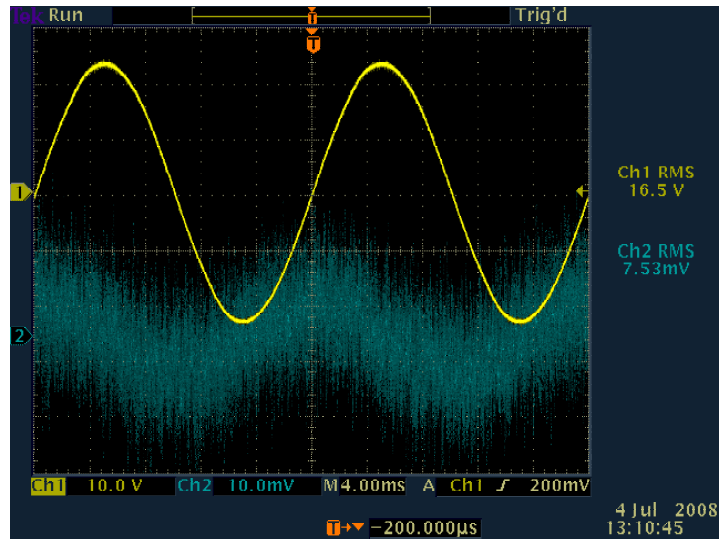
Αλεξικέρανο 6490

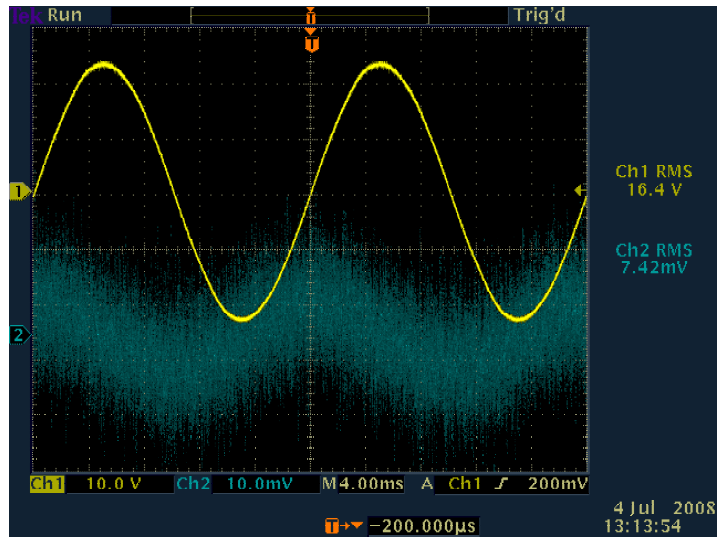
- $V=12$ kV



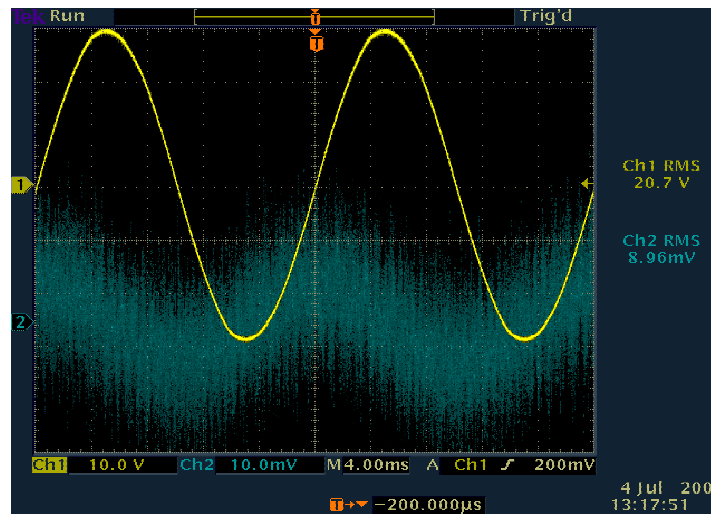
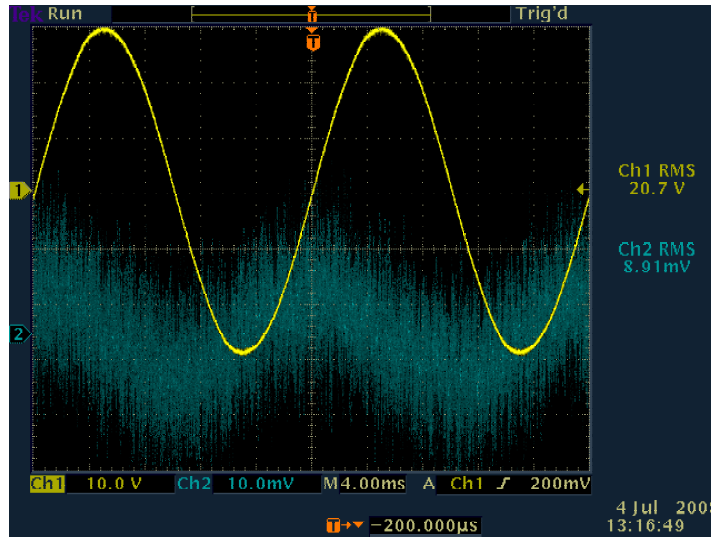


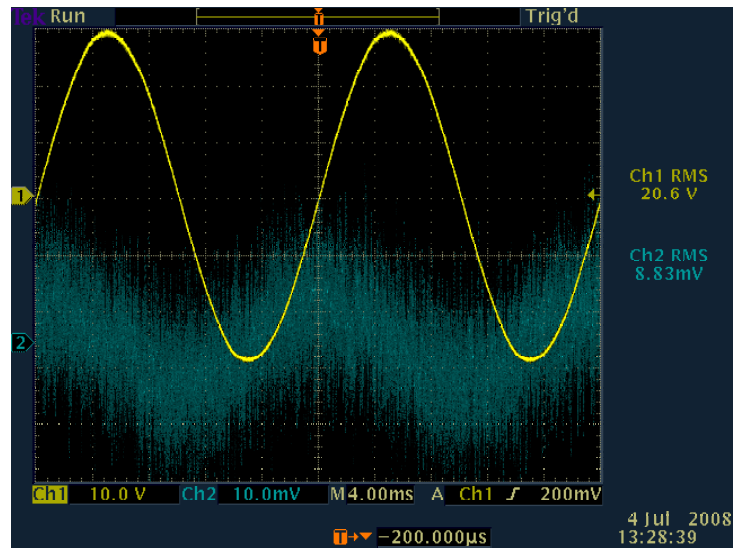
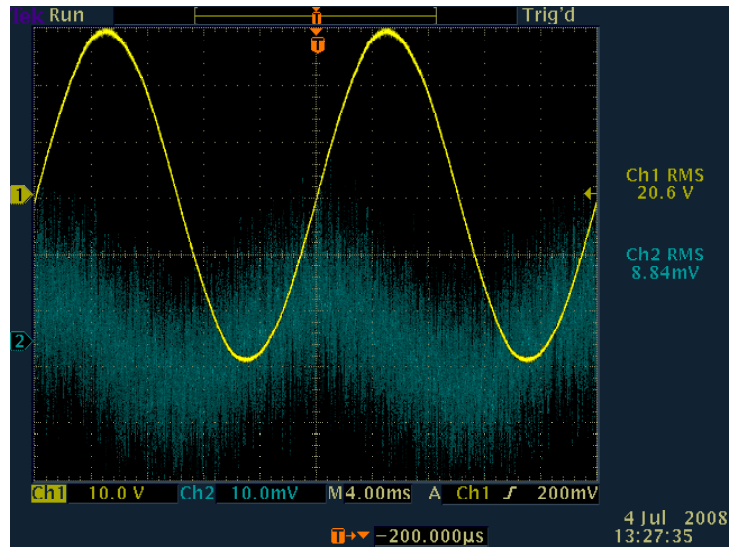
- $V=13.2\text{ kV}$





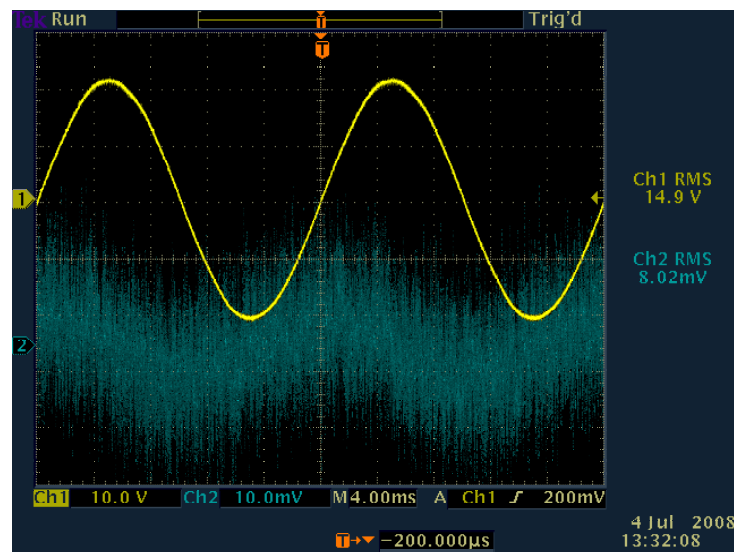
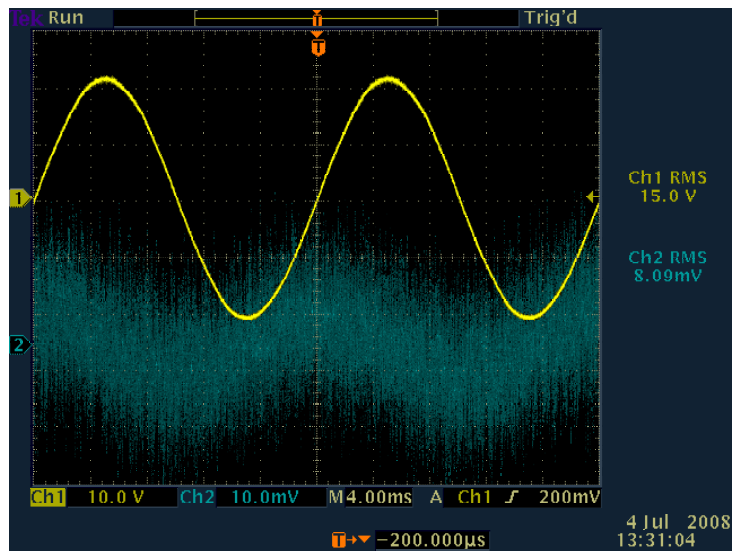
- $V=16.5 \text{ kV}$

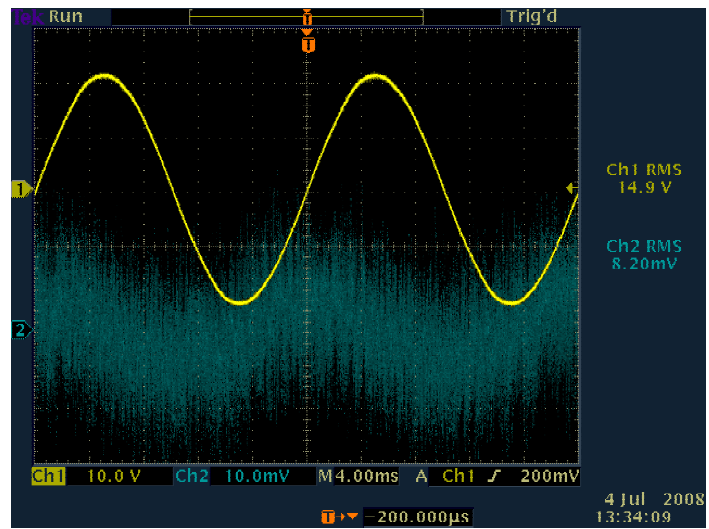
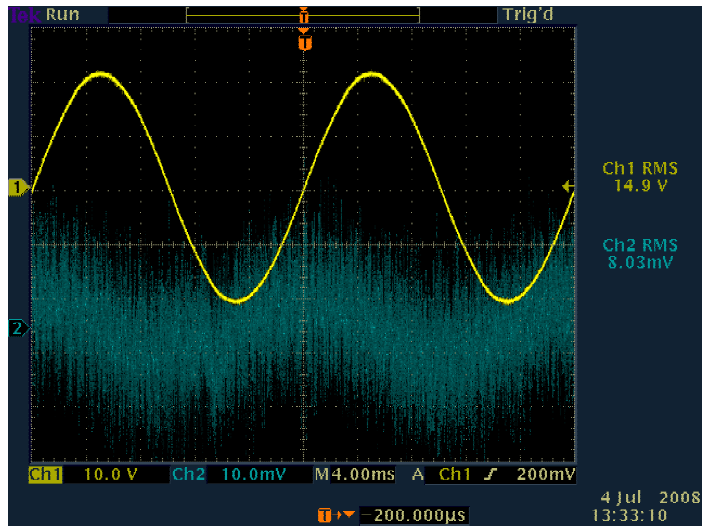




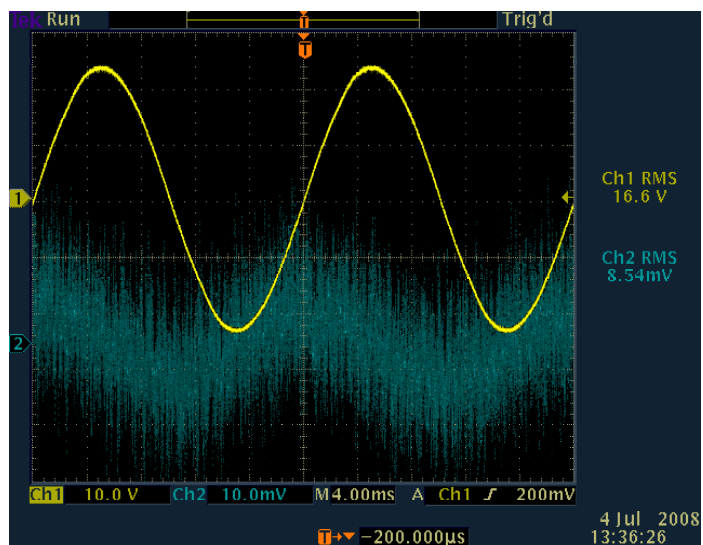
Αλεξικέρανο 6491

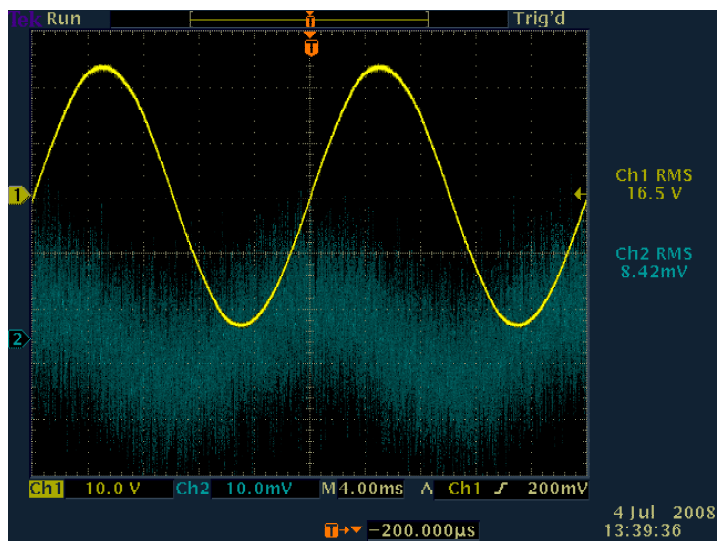
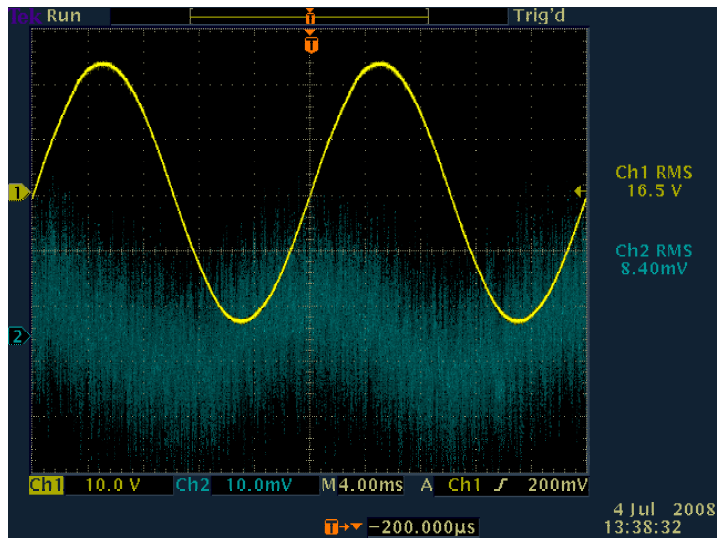
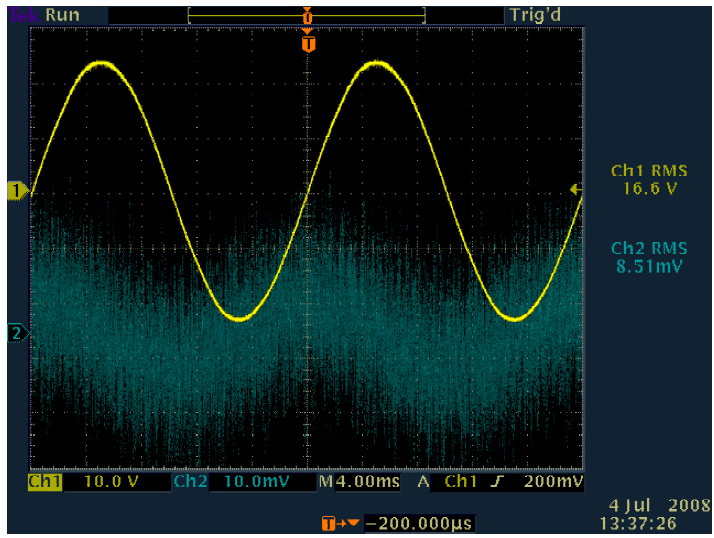
- $V=12\text{ kV}$



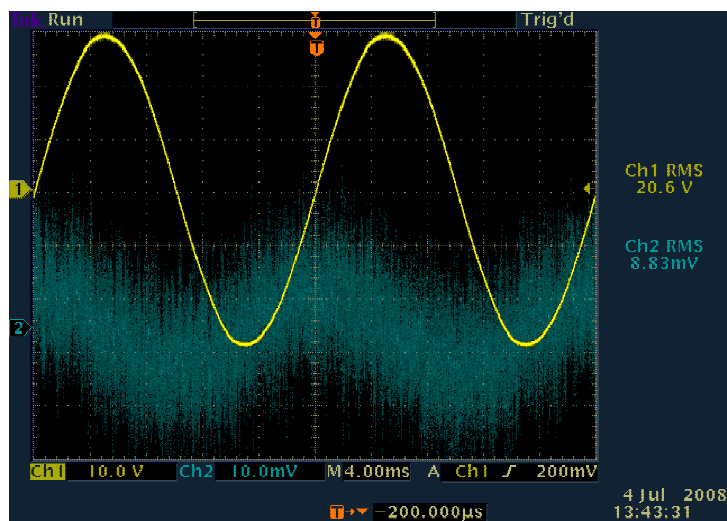
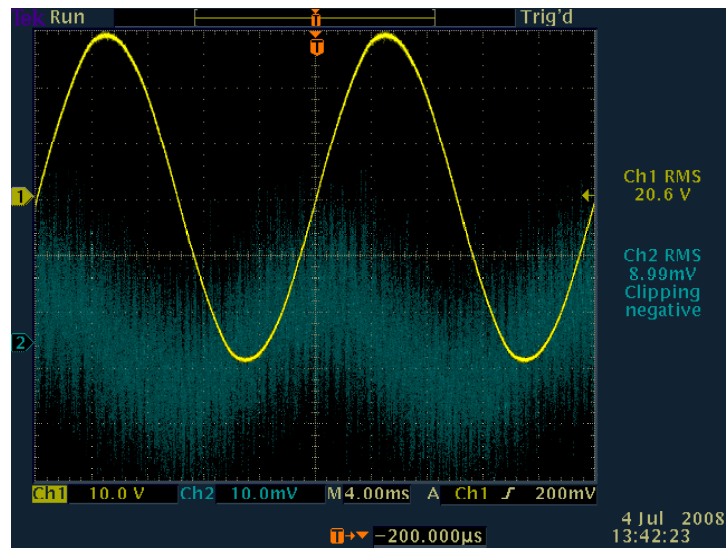
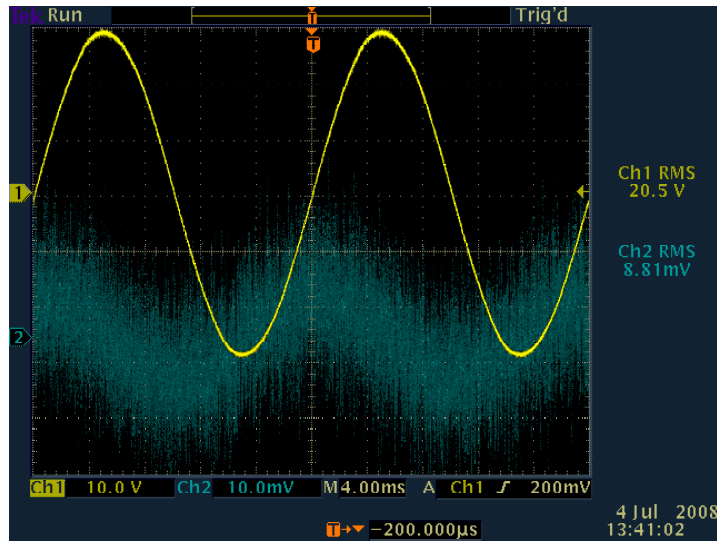


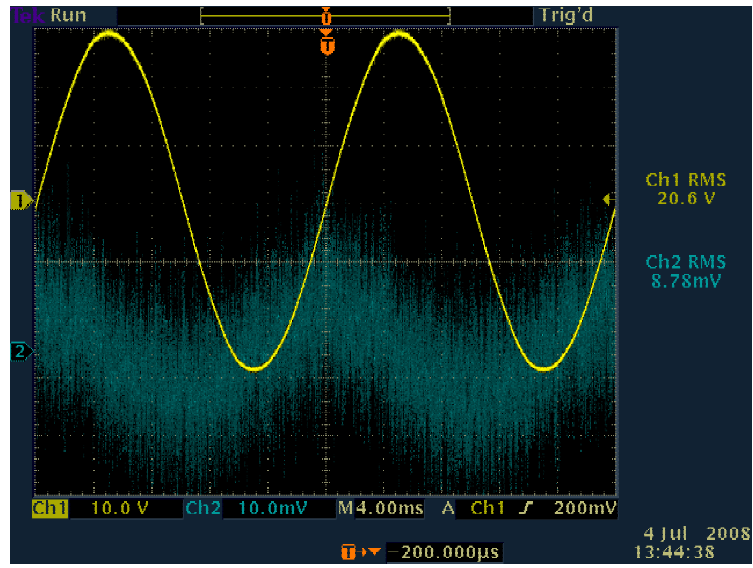
- $V=13.2 \text{ kV}$





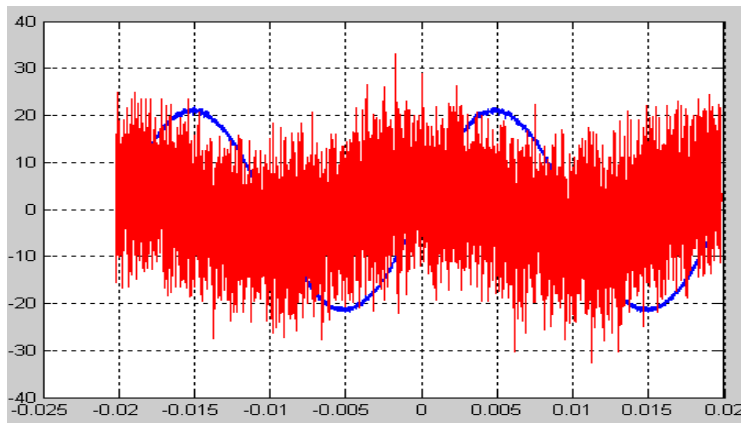
- $V=16.5\text{ kV}$



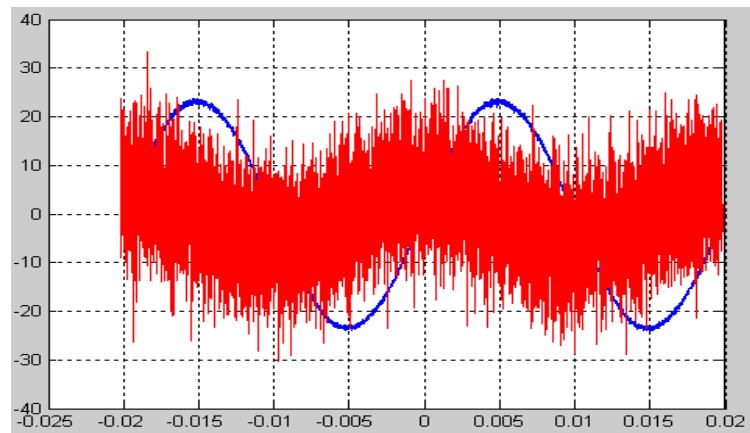


α) Καταπόνηση με 20 kV

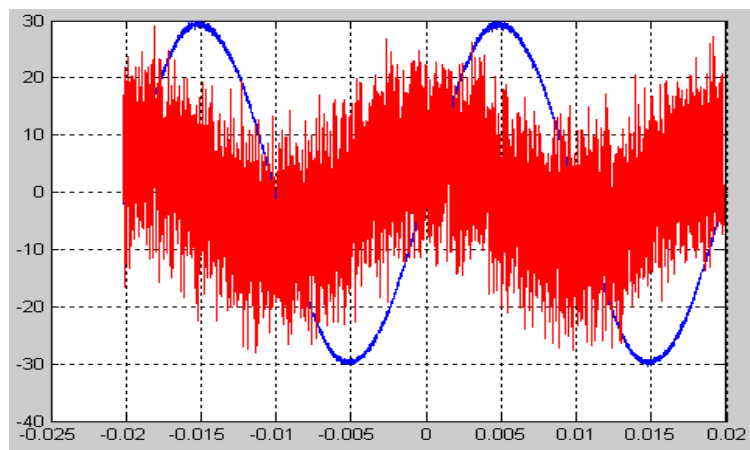
- 12 kV



- 13.2 kV

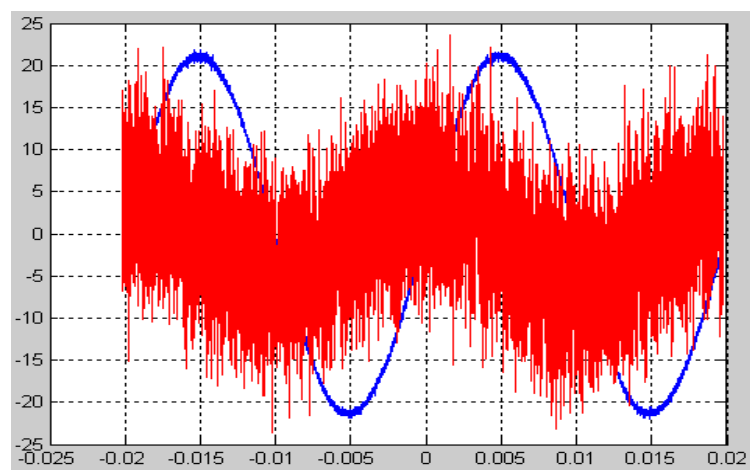


- 16.5 kV

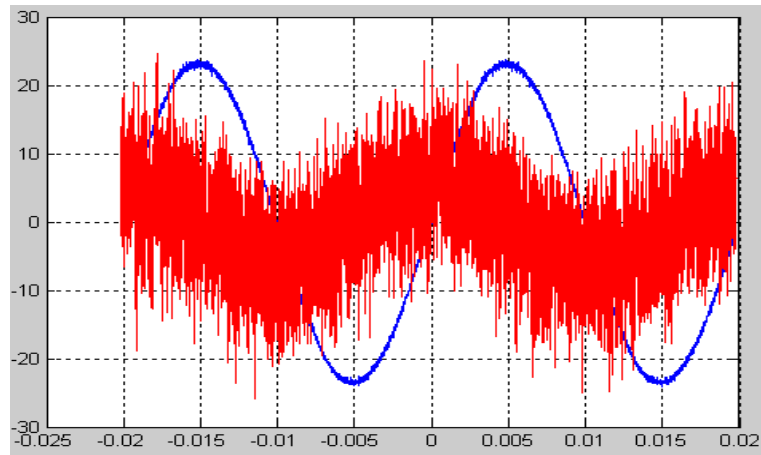


β) Καταπόνηση με 40 kV

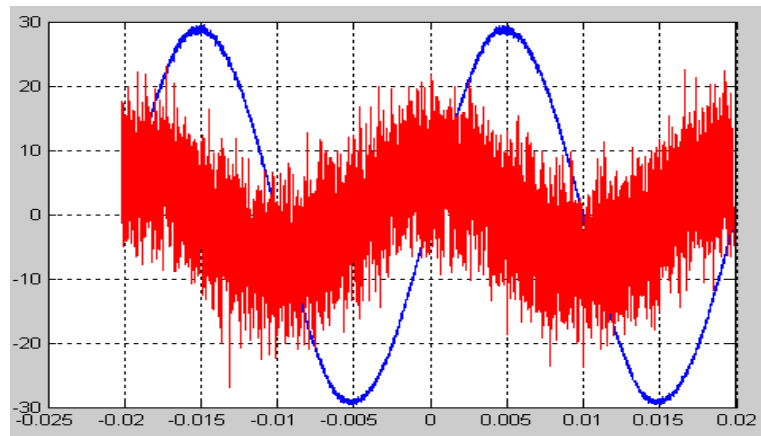
- 12 kV



- 13.2 kV

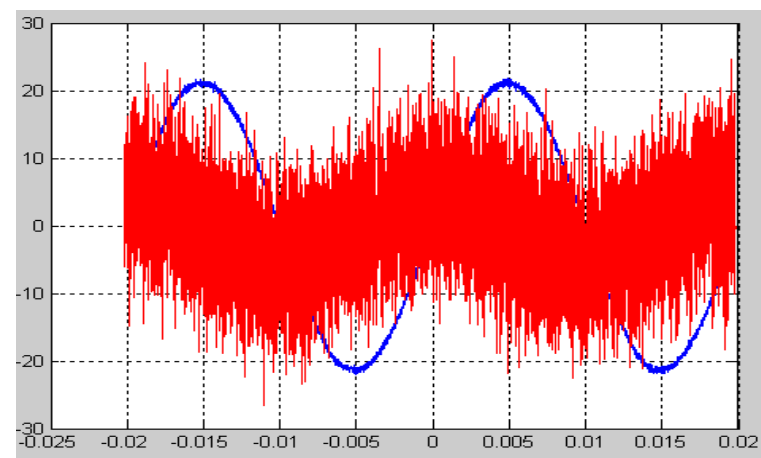


- 16.5 kV

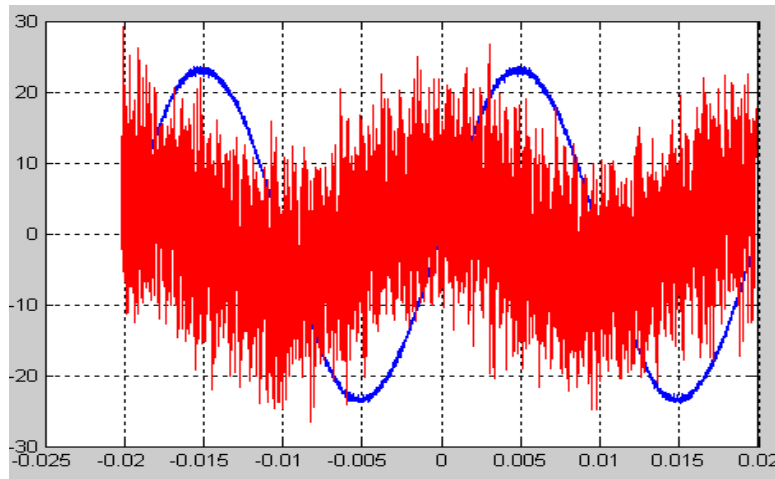


γ) Καταπόνηση με 90 kV

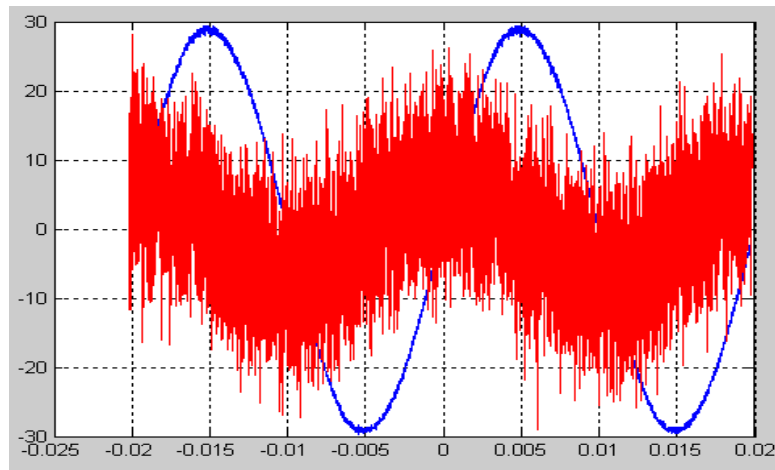
- 12 kV



- 13.2 kV



- 16.5 kV



α) Καταπόνηση με 20 kV

Αλεξικέραυνο 6490

- V=12 kV

$I_{total}(mA)$	$\Phi(^{\circ})$	$I_R(mA)$
2.72	18.91	0.882
2.37	24.93	1.182
2.50	19.80	0.847
2.44	14.40	0.607

$R_{μετρ}=10\Omega$

- V=13.2 kV

$I_{total}(mA)$	$\Phi(^{\circ})$	$I_R(mA)$
2.84	25.6	1.227
2.04	7.56	0.268
2.88	18.4	0.909
2.76	7.2	0.346

$R_{μετρ}=10\Omega$

- $V=16.5 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.46	19.8	0.833
2.66	16.7	0.764
2.76	29.9	1.376
2.61	16.2	0.728

$$R_{\text{μετρ}}=10\Omega$$

Αλεξικέραυνο 6491

- $V=12 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
3.26	19.1	1.067
3.30	18.6	1.053
2.68	16.6	0.766
2.71	12.3	0.577

$$R_{\text{μετρ}}=10\Omega$$

- $V=13.2 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.26	12.6	0.493
3.34	14.4	0.831
2.77	16.9	0.805
2.59	21.4	0.945

$$R_{\mu\text{e}\tau\text{p}}=10\Omega$$

- $V=16.5 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.86	21.8	1.062
2.34	14.9	0.602
2.59	18.4	0.818
2.97	22.6	1.141

$$R_{\mu\text{e}\tau\text{p}}=10\Omega$$

β) Καταπόνηση με 40 kV

Αλεξικέραυνο 6490

- V=152 kV

$I_{total}(mA)$	$\Phi(^{\circ})$	$I_R(mA)$
2.21	18.1	0.687
2.36	9.6	0.394
2.32	22.7	0.895
2.00	10.8	0.375

$R_{μετρ}=10\Omega$

- V=13.2 kV

$I_{total}(mA)$	$\Phi(^{\circ})$	$I_R(mA)$
2.46	29.6	1.215
2.12	13.6	0.499
2.48	17.8	0.758
2.04	15.4	0.542

$R_{μετρ}=10\Omega$

- $V=16.5 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.22	18.0	0.686
2.00	11.7	0.406
2.38	24.6	0.991
2.24	10.8	0.419

$$R_{\text{μετρ}}=10\Omega$$

Αλεξικέραυνο 6491

- $V=12 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.84	14.6	0.716
2.29	19.8	0.776
2.98	18.9	0.965
2.23	26.4	0.992

$$R_{\text{μετρ}}=10\Omega$$

- $V=13.2 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.58	17.2	0.763
2.50	22.7	0.965
1.98	19.8	0.671
1.99	14.4	0.495

$$R_{\mu\text{e}\tau\text{p}}=10\Omega$$

- $V=16.5 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.18	27.0	0.990
2.26	12.6	0.493
2.10	21.0	0.753
2.02	23.4	0.802

$$R_{\mu\text{e}\tau\text{p}}=10\Omega$$

γ) Καταπόνηση με 90 kV

Αλεξικέραυνο 6490

- V=152 kV

$I_{total}(mA)$	$\Phi(^{\circ})$	$I_R(mA)$
2.46	21.6	0.906
2.66	16.2	0.742
2.26	26.9	1.023
2.46	9.2	0.393

$R_{μετρ}=10\Omega$

- V=13.2 kV

$I_{total}(mA)$	$\Phi(^{\circ})$	$I_R(mA)$
2.62	16.2	0.731
2.46	9.0	0.385
2.48	8.7	0.375
2.26	10.8	0.423

$R_{μετρ}=10\Omega$

- $V=16.5 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.40	16.6	0.686
2.71	21.8	1.006
2.42	19.5	0.808
2.18	12.6	0.476

$$R_{\text{μετρ}}=10\Omega$$

Αλεξικέραυνο 6491

- $V=12 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.39	28.6	1.144
2.34	27.4	1.077
2.06	14.8	0.526
2.04	19.8	0.691

$$R_{\text{μετρ}}=10\Omega$$

- $V=13.2 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.52	7.9	0.346
2.34	15.8	0.637
2.48	25.2	1.056
2.24	16.2	0.625

$$R_{\text{μετρ}}=10\Omega$$

- $V=16.5 \text{ kV}$

$I_{\text{total}}(\text{mA})$	$\Phi(^{\circ})$	$I_{\text{R}}(\text{mA})$
2.82	19.8	0.955
2.72	15.6	0.731
2.56	19.6	0.859
2.54	36.0	1.493

$$R_{\text{μετρ}}=10\Omega.$$

Και εδώ παρουσιάζεται μία σημαντική αύξηση του ρεύματος διαρροής, χωρίς ωστόσο να είναι δυνατόν να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα για την κατάσταση του δείγματος λόγω της μεγάλης ευαισθησίας σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές της πειραματικής διαδικασίας.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι επιχειρήθηκε και η μέτρηση του ρεύματος διαρροής μέσω τη συσκευή VLF, τροφοδοτήθηκαν δηλαδή τα δείγματα με συνεχή τάση. Ο απευθείας ωστόσο προσδιορισμός του ωμικού ρεύματος δεν πραγματοποιήθηκε καθώς δεν το επέτρεπε η διακριτότητα του οργάνου σε συνδυασμό με την ελάχιστη τιμή του ρεύματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέσοι όροι για το ωμικό ρεύμα διαρροής από τις μετρήσεις του συνολικού ρεύματος διαρροής σε όλες τις περιπτώσεις.

Αλεξικέραυνο 6490

Τάση	Υπό συνθήκες εργαστηρίου	Υπό τεχνητή βροχή	Καταπόνηση με 20 kV	Καταπόνηση με 40 kV	Καταπόνηση με 90 kV
12 kV	0.078	0.145	0.880	0.588	0.766
13.2 kV	0.125	0.167	0.688	0.754	0.479
16.5 kV	0.140	0.127	0.925	0.623	0.744

Αλεξικέραυνο 6491

Τάση	Υπό συνθήκες εργαστηρίου	Υπό τεχνητή βροχή	Καταπόνηση με 20 kV	Καταπόνηση με 40 kV	Καταπόνηση με 90 kV
12 kV	0.105	0.240	0.866	0.862	0.860
13.2 kV	0.125	0.163	0.769	0.724	0.666
16.5 kV	0.151	0.195	0.906	0.760	1.010

Κεφάλαιο 7: Προσομοίωση Κατανομής Ηλεκτρικού Πεδίου και Δυναμικού με Χρήση του Προγράμματος OPERA

7.1 Εισαγωγικά

Οι J. Lundquist, L. Stenstrom, A. Schei και B. Hansen στο [1] στην προσπάθεια τους προσδιορισμού της σχέσης μεταξύ της τρίτης αρμονικής του ολικού ρεύματος διαρροής και της αντίστοιχης τρίτης αρμονικής της χωρητικής συνιστώσας του χρειάστηκε να υπολογίσουν το ηλεκτρικό πεδίο στη βάση του αλεξικέραυνο. Γενικότερα όμως, τόσο το ηλεκτρικό πεδίο μέσα και γύρω από ένα αλεξικέραυνο όσο και η κατανομή δυναμικού κατά μήκος του, είναι δυνατόν να μας παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κατάστασή του.

Στο συγκεκριμένο συνεπώς, κεφάλαιο γίνεται μία πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης της συμπεριφοράς ενός αλεξικέραυνο 20kV ως προς την κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του και του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από αυτό με χρήση κατάλληλου υπολογιστικού πακέτου. Η κατανομή του δυναμικού και το ηλεκτρικό πεδίο εξαρτώνται από τις ηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών και τη γεωμετρία του αλεξικεραύνου. Η ανομοιομορφία στην κατανομή του δυναμικού μειώνει τη διάρκεια ζωής του αλεξικεραύνου, αφού το τμήμα του βαρίστορ που είναι πιο κοντά στο ηλεκτρόδιο της υψηλής τάσης καταπονείται περισσότερο, πράγμα που είναι εντονότερο όσο αυξάνει το ύψος του αλεξικεραύνου. Κύρια αιτία της ανομοιόμορφης κατανομής του δυναμικού είναι οι παράσιτες χωρητικότητες προς γη, οι οποίες επιτρέπουν τη ροή χωρητικού ρεύματος από το αλεξικέραυνο στη γη. Η μελέτη του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο μπορεί να συμβάλλει στις on-line διαγνωστικές δοκιμές, και ειδικότερα στη μέτρηση της ωμικής συνιστώσας του ρεύματος διαρροής.

7.2 Μέθοδοι Επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών Προβλημάτων

Για την επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων έχουν δημιουργηθεί δύο μέθοδοι, οι οποίες είναι οι εξής:

- Οι αναλυτικές μέθοδοι
- Οι αριθμητικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι παρέχουν ταχύτατη επίλυση και ακριβή αποτελέσματα, αλλά η εφαρμογή τους γίνεται εξαιρετικά δύσκολη σε πολύπλοκες γεωμετρίες και σε μη γραμμικά υλικά. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των αναλυτικών μεθόδων ισχύουν αντίστροφα για τις αριθμητικές μεθόδους. Έτσι, οι αριθμητικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν σε πολύπλοκα προβλήματα, αλλά υπεισέρχονται ανακρίβειες στις λύσεις, οι οποίες πρέπει να ελέγχονται διεξοδικά προκειμένου να μην οδηγηθούμε σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Οι αριθμητικές μέθοδοι χωρίζονται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες:

- Πεπερασμένες διαφορές

Πλεονεκτήματα

- Άμεση κατάστρωση
- Πολύπλοκες γεωμετρίες
- Μη γραμμικότητα

Μειονεκτήματα

- Περιορισμός πλέγματος
- Έντονο επιδερμικό φαινόμενο
- Ανοικτά όρια

- Πεπερασμένα στοιχεία

Πλεονεκτήματα

- Πολύπλοκες γεωμετρίες
- Μη γραμμικότητα

Μειονεκτήματα

- Έντονο επιδερμικό φαινόμενο
- Ανοικτά όρια

- Οριακά στοιχεία

Πλεονεκτήματα

- Πολύπλοκες γεωμετρίες
- Ανοικτά όρια
- Μία διάσταση λιγότερη

Μειονεκτήματα

- Μη γραμμικότητα
- Γεμάτοι πίνακες

7.2.1 Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος που βρίσκει εφαρμογή σε πλήθος προβλημάτων της επιστήμης του μηχανικού. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στις επιστήμες του μηχανικού κατά το δεύτερο ήμισυ του 20ού αιώνα. Η σύλληψη της μεθόδου αποδίδεται στο μεγάλο Έλληνα μηχανικό-ερευνητή Τζον Αργύρη, στην προσπάθειά του να επιλύσει το πρόβλημα του σχεδιασμού των πρώτων αεριωθούμενων μαχητικών αεροσκαφών με κεκλιμένες προς τα πίσω πτέρυγες στο Royal Aeronautical Society της Βρετανίας περί το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Η τυπική διατύπωση της μεθόδου παρουσιάστηκε με πληρότητα το 1960 σε μία εκτεταμένη μονογραφία των Τ. Αργύρη και S. Kelsey, καθώς και σε άρθρο του R. Clough στην άλλη πλευρά του Ατλαντικού. Από την εποχή εκείνη και μετά, η ανάπτυξη της μεθόδου και η χρήση της για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων του μηχανικού συμβαδίζει με την τεχνολογία των Η/Υ. Κι αυτό γιατί με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγουμε σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων που το πλήθος τους ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος και το οποίο μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια του Η/Υ. Η εξέλιξη των Η/Υ με τις ολοένα και μεγαλύτερες δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας εκτελέσεως των αριθμητικών πράξεων σε συνδυασμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, κατέστησε εφικτή την επίλυση σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού, τα οποία θεωρούνταν απροσπέλαστα πριν μερικά χρόνια. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, αν και επινοήθηκε και εφαρμόστηκε για τη στατική ανάλυση φορέων, έχει καθολικότερη εφαρμογή σε μία ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων του μηχανικού, όπως για παράδειγμα στη ρευστομηχανική, στη μεταφορά θερμότητας, στην ακουστική, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην εμβιομηχανική.

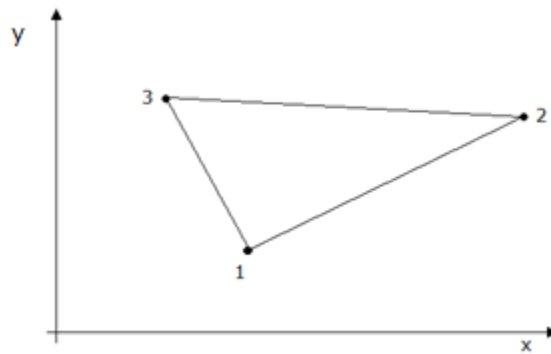
Η βασική ιδέα είναι να χωριστεί το πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών (στοιχείων) με απλή γεωμετρία. Έτσι, από ένα «μικρό» αλλά δύσκολο πρόβλημα οδηγούμαστε σε ένα πιο «μεγάλο» αλλά ευκολότερο.

Παρότι οι μαθηματικές πράξεις είναι σημαντικά περισσότερες στα δισδιάστατα προβλήματα απ' ό,τι στα μονοδιάστατα, η επέκταση της FEM σε δισδιάστατα

προβλήματα είναι εννοιολογικά παρόμοια με τις μονοδιάστατες εφαρμογές. Άρα, η διαδοχή των ενεργειών μας θα είναι η εξής [3]:

α) Διακριτοποίηση

Για το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις χρησιμοποιούμε συνήθως διάφορα απλά στοιχεία όπως τρίγωνα ή τετράπλευρα, όπως αυτό που βλέπετε στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Τριγωνικό στοιχείο

β) Στοιχειακές Εξισώσεις

Το επόμενο βήμα είναι να βρούμε μια εξίσωση που να προσεγγίζει τη λύση του στοιχείου. Για τριγωνικό στοιχείο, η πιο απλή μέθοδος είναι να χρησιμοποιήσουμε το γραμμικό πολυώνυμο.

$$u(x, y) = a_0 + a_{1,1}x + a_{1,2}y \quad (1)$$

Όπου $u(x, y)$, είναι η εξαρτημένη μεταβλητή, a_i οι συντελεστές, και x, y , οι ανεξάρτητες μεταβλητές. Η συνάρτηση αυτή πρέπει να περνά από τις τιμές της $u(x, y)$ στους κόμβους (x_1, y_1) , (x_2, y_2) και (x_3, y_3) του τριγώνου. Άρα,

$$u_1 = a_0 + a_{1,1}x_1 + a_{1,2}y_1$$

$$u_2 = a_0 + a_{1,1}x_2 + a_{1,2}y_2$$

$$u_3 = a_0 + a_{1,1}x_3 + a_{1,2}y_3$$

Λύνοντας παίρνουμε,

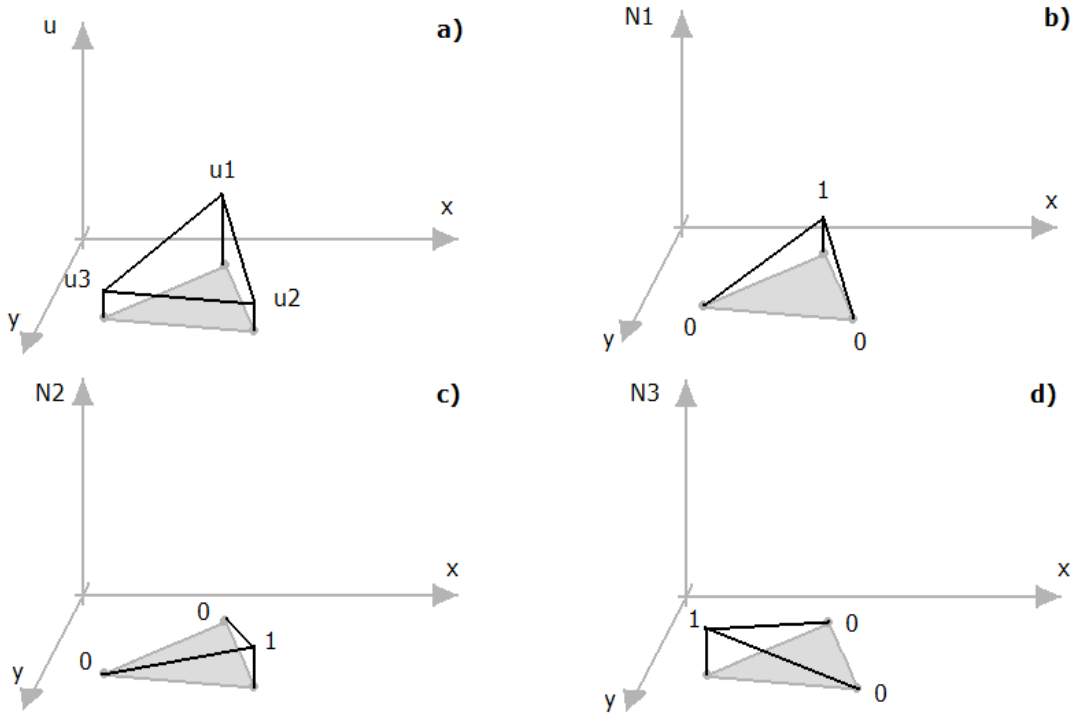
$$a_0 = \frac{1}{2A} [u_1(x_2y_3 - x_3y_2) + u_2(x_3y_1 - x_1y_3) + u_3(x_1y_2 - x_2y_1)] \quad (2)$$

$$\alpha_{1,1} = \frac{1}{2A_e} [u_1(y_2 - y_3) + u_2(y_3 - y_1) + u_3(y_1 - y_2)] \quad (3)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{1}{2A_e} [u_1(x_3 - x_2) + u_2(x_1 - x_3) + u_3(x_2 - x_1)] \quad (4)$$

Όπου, A_e είναι το εμβαδόν του τριγωνικού στοιχείου, δηλαδή

$$A_e = \frac{1}{2} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (x_3 y_1 - x_1 y_3) + (x_1 y_2 - x_2 y_1)]$$



Σχήμα 2: Γραμμική προσέγγιση τριγωνικού στοιχείου. Οι αντίστοιχες συναρτήσεις παρεμβολής φαίνονται στα b) έως d).

Αν αντικαταστήσουμε τις εξισώσεις (2)-(4), στην (1), βρίσκουμε

$$u = N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 \quad (5)$$

όπου,

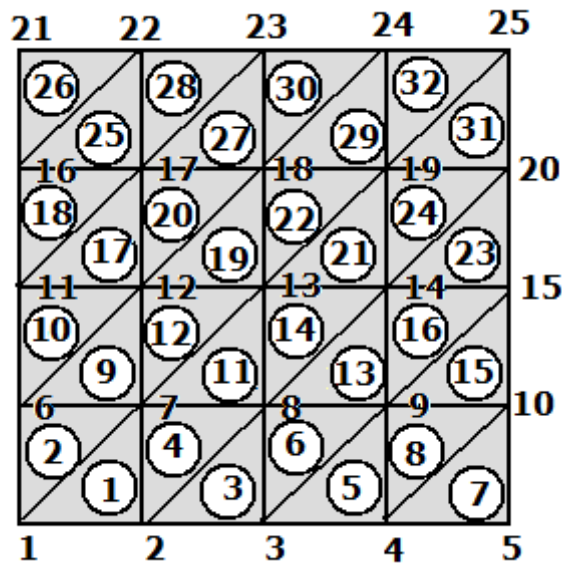
$$N_1 = \frac{1}{2A_e} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - y_2)y]$$

$$N_2 = \frac{1}{2A_e} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y]$$

$$N_3 = \frac{1}{2A_e} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y]$$

Η Εξ. (5) μας δίνει ένα μέσο για να προβλέψουμε ενδιάμεσες τιμές για το στοιχείο με βάση τις τιμές στους κόμβους του. Στο Σχ.3 βλέπετε τη διαμορφική συνάρτηση καθώς και τις αντίστοιχες συναρτήσεις παρεμβολής.

Οι όροι του τελικού στοιχειακού πίνακα θα αποτελείται από χαμηλοβάθμια πολυώνυμα και σταθερές.



Σχήμα 3: Σύστημα αρίθμησης των κόμβων και των στοιχείων σε προσεγγισμό πεπερασμένων στοιχείων θερμαινόμενης πλάκας

Η ενσωμάτωση των συνοριακών συνθηκών και η συγκρότηση του συστημικού πίνακα είναι επίσης πιο σύνθετη όταν εφαρμόζουμε τη FEM σε προβλήματα 2 ή 3 διαστάσεων. Ωστόσο, η δυσκολία σχετίζεται περισσότερο με το μηχανισμό της διαδικασίας παρά με εννοιολογική πολυπλοκότητα.

7.3 Το πρόγραμμα PC OPERA-2d

7.3.1 Εισαγωγικά

Το πρόγραμμα OPERA-2d [4] είναι μία δεσμίδα προγραμμάτων, για την επίλυση προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε δύο διαστάσεις, τα οποία χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, για να λύσουν τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τα πεδία, όπως η εξίσωση Poisson, η εξίσωση Helmholtz και η εξίσωση Διάχυσης.

Η ανάλυση προϋποθέτει γνώση πολλών πληροφοριών, η εισαγωγή γίνεται με τη χρήση του προεπεξεργαστή. Σε καρτεσιανές ή κυλινδρικές συντεταγμένες, γίνεται η διαίρεση του χώρου ενδιαφέροντος σε μια συνεχή ομάδα τριγωνικών στοιχείων. Έπειτα, το πρόγραμμα ανάλυσης καθορίζει τη σωστή λύση, τα αποτελέσματα της οποίας ελέγχονται με τον μετεπεξεργαστή. Στη συνέχεια αναλύονται και τα αριθμητικά σφάλματα που οφείλονται σε ατυχή προσδιορισμό του πλέγματος, ώστε το πλέγμα να βελτιωθεί και να έχουμε βελτίωση των αποτελεσμάτων.

7.3.2 Προγράμματα

Τα προγράμματα ανάλυσης του OPERA-2d δέχονται δεδομένα από τον προεπεξεργαστή και τον μετεπεξεργαστή καθώς και δημιουργούν αρχεία για τα αποτελέσματα συμβατά με τον προεπεξεργαστή και τον μετεπεξεργαστή.

Τα προγράμματα ενδιαφέροντος μας είναι:

- ST Για γραμμικά ή μη γραμμικά μαγνητοστατικά ή ηλεκτροστατικά με ιστροπικά υλικά και μόνιμους μαγνήτες.
- SP Ηλεκτροστατικά, περιλαμβάνοντα τις συνέπειες χωρικών φορτίων από δέσμες σωματιδίων.

Και τέλος το

- AC Μόνιμης κατάστασης εναλλασσόμενα δινορρεύματα με γραμμικά ή μη γραμμικά υλικά και εξαρτημένες πηγές ρεύματος ή τάσης. Οι επιτρεπτότητες μπορούν να ληφθούν από τα δεδομένα της περιοχής, από μια προηγούμενη ST ή TR λύση, ή να υπολογιστούν από το πεδίο της AC λύσης. Σε όλες τις περιπτώσεις η επιτρεπτότητα μπορεί να είναι σύνθετη.

Σε κάθε περίπτωση, για μια πλήρη λύση στο OPERA-2d απαιτείται

- 1) προεπεξεργασία,
- 2) ανάλυση, και
- 3) μετεπεξεργασία.

7.3.3 Μοντελοποίηση-Προεπεξεργασία

Η διάταξη μπορεί να αναπαρασταθεί στο πρόγραμμα ως δισδιάστατο μοντέλο αν είναι συμμετρικό εκ περιστροφής, (δεν υπάρχει γωνιακή συνιστώσα του πεδίου και η κατανομή του πεδίου είναι ίδια για κάθε αξονική τομή), ή έχει μεγάλο μήκος σε μια διεύθυνση σχετικά με τις υπόλοιπες, με ομοιόμορφη εγκάρσια διατομή στο μεγαλύτερο μήκος.

Η τομές των υλικών χωρίζονται σε μη επικαλυπτόμενα πολύγωνα και εισάγονται στον προεπεξεργαστή και στον μετεπεξεργαστή. Υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί μια περιοχή ως τέτοια που να καλύπτει όλο το χώρο του προβλήματος.

Μέσα στα τετράπλευρα το πλέγμα δημιουργείται από μετασχηματισμό σε μοναδιαίο τετράγωνο και κανονική υποδιαίρεση. Ενώ γενικά στα πολύγωνα δημιουργείται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο που βασίζεται στον τριγωνισμό Delaunay. Εσωτερικοί κόμβοι προστίθενται, αν είναι απαραίτητο, για να επιτύχουν μεγέθη στοιχείων που διαφέρουν λίγο εκατέρωθεν των περιοχών και σχήματα στοιχείων που είναι κατά το δυνατό περίπου ισόπλευρα. Τα πολύγωνα επιτρέπουν σε μεγάλες περιοχές χώρου, ειδικά κοντά στα όρια να πλεγματοποιούνται με τον ελάχιστο αριθμό περιοχών. Όλες οι ιδιότητες των υλικών και οι οριακές συνθήκες αποθηκεύονται με την κάθε περιοχή, εκτός των μη γραμμικών σχέσεων μεταξύ πυκνότητας ροής και έντασης πεδίου που αποθηκεύονται ως πίνακες τιμών.

7.3.4 Ανάλυση-Μετεπεξεργασία

Ο χρήστης με τη εντολή SOLVE ορίζει την ανοχή σύγκλισης, σημεία χρονικής εισόδου, μη γραμμικό επαναληπτικό τύπο, και τις λοιπές παραμέτρους για να αρχίσει η ανάλυση του προβλήματος.

Η πρώτη απαίτηση για μια πεδιακή τιμή από τον μετεπεξεργαστή δείχνει στο πρόγραμμα να εκτελέσει “μέση τιμή πεδίου”. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, δίνει παραγώγους δυναμικού ασυνεχείς από το ένα στοιχείο στο επόμενο. Η διαδικασία “μέσης τιμής πεδίου” βρίσκει την μέση τιμή κάθε στοιχείου που περικλείει ένα κόμβο και εφαρμόζει αυτή τη μέση τιμή στον κόμβο (οι φυσικές ασυνέχειες διατηρούνται). Οι επιλεγείσες μέσες τιμές χρησιμοποιούνται σε όλες τις

εντολές του μετεπεξεργαστή, αλλά μερικές εντολές μπορούν να χρησιμοποιήσουν και τις κανονικές τιμές (αυτές που δεν έχουν υποστεί τη διαδικασία “μέσης τιμής”). Σύγκριση των “μέσων τιμών” και των κανονικών τιμών πεδίου επιτρέπει μια εκτίμηση των τοπικών και ολικών σφαλμάτων στη λύση.

7.3.5 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων στο PC OPERA -2d

7.3.5.1 Μεθοδολογία Επίλυσης Προβλημάτων

Αρχικά γίνεται η επίλυση του απλούστερου δυνατού προβλήματος, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας γραμμικά υλικά ή υλικά με μοναδιαία ή μεγάλη σχετική διαπερατότητα ή επιτρεπτότητα. Ελέγχεται ότι η λύση έχει την αναμενόμενη συμμετρία. Ελέγχεται ότι η λύση συμφωνεί με τις προβλέψεις που προέκυψαν μέσω της απλής γραμμικής ολοκλήρωσης (εφ’ όσον είναι εφαρμόσιμη η προσέγγιση της άπειρης διαπερατότητας). Εάν το πεδίο είναι χρονομεταβλητό, κρίνεται σκόπιμος ο έλεγχος ότι οι σταθερές του χρόνου συμφωνούν με τα μοντέλα ισοδυνάμων κυκλωμάτων.

7.3.5.2 Συναρτήσεις Λάθους

Το τοπικό λάθος (σε μονάδες πυκνότητας ροής) και το *rms* λάθος μπορούν να προσεγγιστούν μέσω των συναρτήσεων του συστήματος ERROR και RMSERROR. Οι τιμές του *rms* λάθους υπολογίζονται από το πρόγραμμα με τη μέθοδο «RMS λάθος του συνολικού προβλήματος» (είναι η τιμή που αποθηκεύεται στη μεταβλητή του συστήματος RMSERROR, και υπολογίζεται μέσω των σχετικών λαθών σε κάθε στοιχείο) ή με την μέθοδο «RMS λάθος με βάρη» (χρησιμοποιεί τα μεγέθη των στοιχείων ως βάρη στους υπολογισμούς, ώστε τα μικρότερα στοιχεία να έχουν μικρότερη συμμετοχή στην τιμή του λάθους.)

7.3.5.3 Συνοριακές Συνθήκες

ΑΠΛΕΣ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ		
Συμμετρικό πεδίο	Βαθμωτό δυναμικό	Διανυσματικό δυναμικό
$\mathbf{H}_n = 0$ ή $\mathbf{B}_n = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$	$\mathbf{A} = \text{constant}$
$\mathbf{H}_t = 0$ ή $\mathbf{B}_t = 0$	$\phi = \text{constant}$	$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n} = 0$

7.3.5.4 Εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων που χρησιμοποιεί το PC OPERA-2d

Μαγνητοστατική	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}$ $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $\mathbf{B} = \mu \cdot (\mathbf{H} - \mathbf{H}_c)$ $\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}$ $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ $\mathbf{H} = -\nabla \phi$
Ηλεκτροστατική	$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}$ $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ $\mathbf{E} = -\nabla V$

7.3.6 Επίλυση

Από μια μη γραμμική εξίσωση Poisson υπολογίζεται το βαθμωτό ή διανυσματικό δυναμικό. Το διανυσματικό δυναμικό συνήθως χρησιμοποιείται για ανάλυση μαγνητικών πεδίων επειδή τα αποτελέσματα του βαθμωτού δυναμικού δεν μπορούν να περιέχουν ρεύμα σαν πηγή των πεδίων, ωστόσο αν ένα μοντέλο έχει σαν διέγερση μόνο οριακές συνθήκες ή μόνιμους μαγνήτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο μορφές δυναμικού.

Για την προετοιμασία της επίλυσης ορίζονται οι εξής παράμετροι: γραμμική ή μη γραμμική λύση (για γραμμική επίλυση χρησιμοποιείται η τιμή της επιτρεπτότητας που δίνεται ως παράμετρος της περιοχής ενώ για μη γραμμικά υλικά χρησιμοποιούνται οι

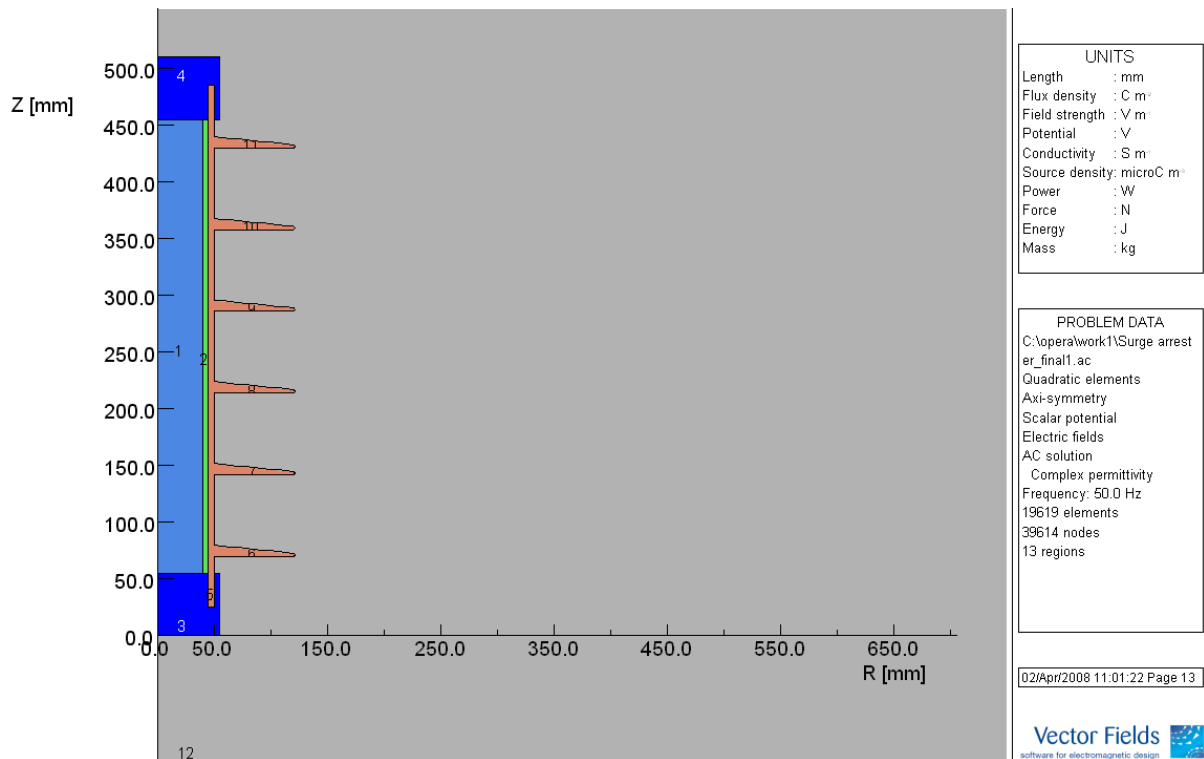
χαρακτηριστικές BH ή DE), καθορισμός η όχι του πλέγματος (με αυτή την εντολή ο χρήστης επιλέγει αν το πλέγμα ορίζεται αυτόματα από την ανάλυση η αν ορίζεται από τον χρήστη- αν το πλέγμα ορίζεται από τον χρήστη τότε μπορούν να δοθούν: ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, ο μέγιστος αριθμός των στοιχείων, η τελική ακρίβεια σύγκλισης %, συντελεστής κλίμακας. Ο συντελεστής κλίμακας πολλαπλασιάζει τις τιμές των φορτίων, της πυκνότητας ρεύματος και τις μη μηδενικές οριακές συνθήκες.)

Η επίλυση προβλημάτων με την στατική ανάλυση γίνεται από το κύριο μενού του προγράμματος με την εξής ακολουθία: εισαγωγή του αρχείου του μοντέλου, επεξεργασία αρχείου, αποθήκευση αποτελεσμάτων σε αρχείο μορφής (.st), έξοδος από το πρόγραμμα ανάλυσης. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων ανοίγουμε το αρχείο μορφής (.st) που έχει δημιουργηθεί από το πρόγραμμα ανάλυσης.

7.4 Επίλυση του Προβλήματος

7.4.1 Εισαγωγή της Γεωμετρίας στο PC OPERA-2d

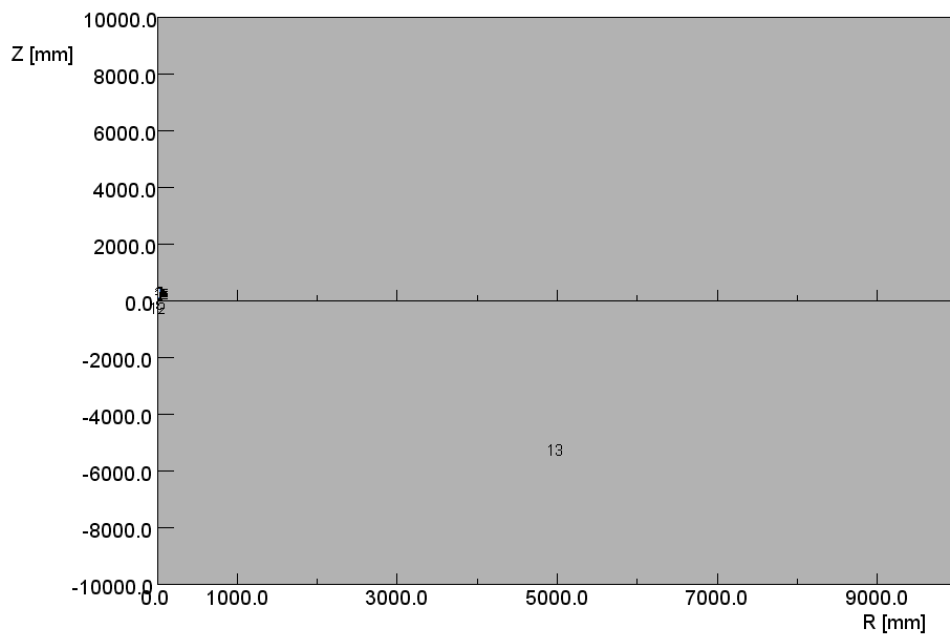
Το πρόβλημα πεδιακής ανάλυσης του αλεξικεραύνου είναι τρισδιάστατο, επειδή, όμως, παρουσιάζει αξονική συμμετρία μπορεί να επιλυθεί από το δισδιάστατο πρόγραμμα PC OPERA, καθώς οι παράμετροι που υπολογίζονται σε ένα επίπεδο διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας έχουν την ίδια τιμή σε οποιοδήποτε άλλο επίπεδο, επίσης, διερχόμενο από τον άξονα συμμετρίας. Η διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Σχεδίαση του μονωτήρα στο PC OPERA

Η περιοχή 1 του Σχήματος 4 αποτελείται από το βαρίστορ (μη γραμμική αντίσταση) από οξειδία του ψευδαργύρου (ZnO), του οποίου η διηλεκτρική σταθερά είναι $\epsilon_r = 800$ και $\sigma = 10^{-4}$ S/m. Η περιοχή 2 αποτελείται από υαλώδες υλικό (glass fiber) με $\epsilon_r = 4.6$ και $\sigma = 0,01$ S/m. Οι περιοχές 3 και 4 είναι οι αγωγοί που αποτελούνται από σίδηρο, για τον οποίο τέθηκε $\epsilon_r = 10^6$ και $\sigma = 10^4$ S/m. Στο ηλεκτρόδιο 2 εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση 12,5kV (rms), ενώ το ηλεκτρόδιο 4 είναι σε μηδενικό δυναμικό. Τέλος, οι περιοχές 5-11 είναι το εξωτερικό περίβλημα από πολυμερές μονωτικό υλικό με $\epsilon_r = 5$ και $\sigma = 0,01$ S/m.

Το αλεξικέραυνο τοποθετήθηκε στο κέντρο ενός ορθογωνίου, του οποίου το μήκος είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από την ακτίνα του αλεξικέραυνου (Σχήμα 5). Ο ορισμός της συγκεκριμένης ορθογωνικής διάταξης είναι απαραίτητος, καθώς οριοθετεί ένα εξωτερικό όριο στο πρόβλημα, αφού στην περίμετρο του ορθογωνίου θεωρείται ότι είναι το άπειρο. Το μέγεθος του ορθογωνίου αποδείχτηκε ότι είναι ικανοποιητικό, καθώς με δοκιμές βρέθηκε ότι μεγαλύτερο μέγεθος ορθογωνίου δεν αυξάνει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



UNITS	
Length	: mm
Flux density	: C m
Field strength	: V m
Potential	: V
Conductivity	: S m
Source density	: microC m
Power	: W
Force	: N
Energy	: J
Mass	: kg

PROBLEM DATA	
C:\opera\work1\Surge arrest	
er_final1.ac	
Quadratic elements	
Axi-symmetry	
Scalar potential	
Electric fields	
AC solution	
Complex permittivity	
Frequency: 50.0 Hz	
19619 elements	
39614 nodes	
13 regions	

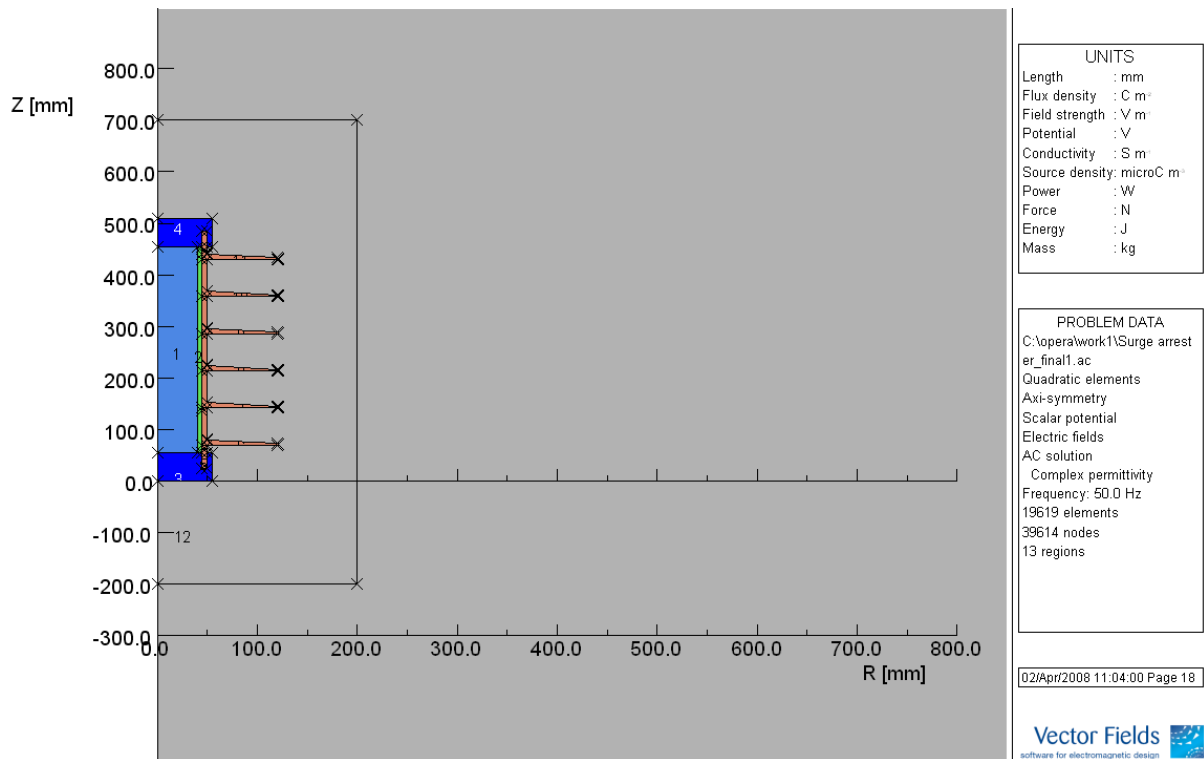
02/Apr/2008 11:03:05 Page 14

Vector Fields
software for electromagnetic design

Σχήμα 5: Ορθογωνικό περίβλημα σε «άπειρη» απόσταση από το μονωτήρα

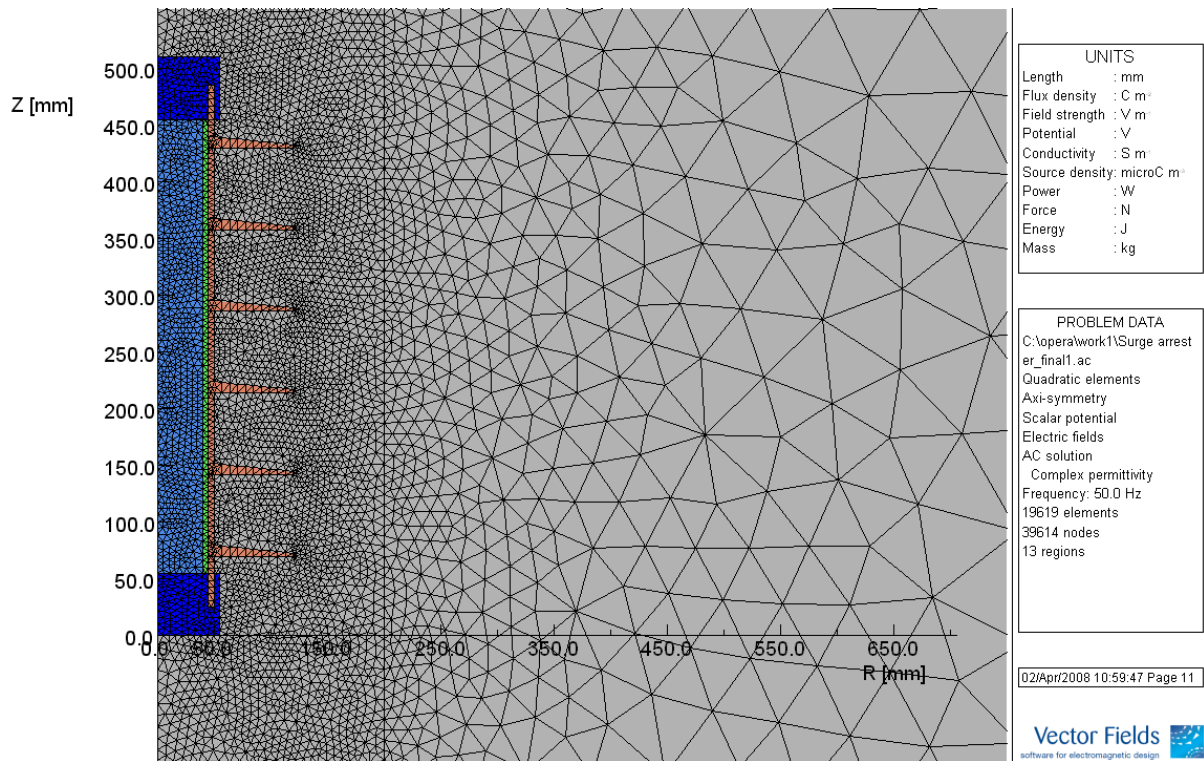
7.4.2 Δημιουργία Πλέγματος

Κάθε γραμμή του αλεξικέραννου χωρίστηκε σε κατάλληλο αριθμό τμημάτων, με τη λογική ότι σε σημεία που ενδιαφέρουν το πλέγμα να είναι πυκνότερο. Για να επιτύχουμε πυκνότερο πλέγμα κοντά στο αλεξικέραννο ορίστηκε επιπλέον μια πιο μικρή ορθογώνια περιοχή (Σχήμα 6)



Σχήμα 6: Το αλεξικέραυνο με την πιο μικρή ορθογωνική περιοχή γύρω από αυτό για να επιτευχθεί πυκνότερο πλέγμα κοντά στο αλεξικέραυνο

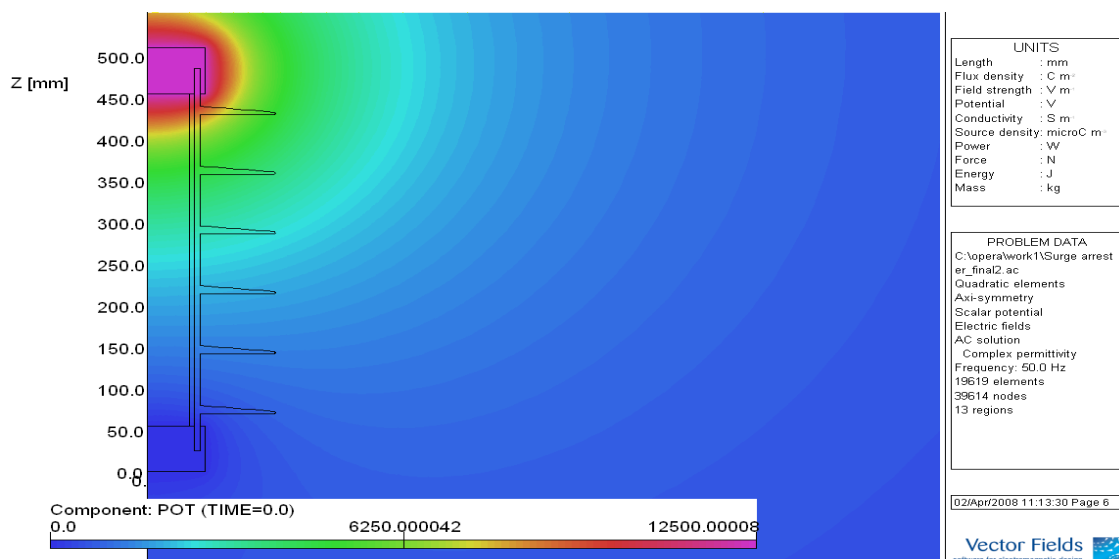
Στο Σχήμα 7 φαίνεται το πλέγμα που δημιουργήθηκε για τη λύση του προβλήματος. Συνολικά δημιουργήθηκαν 19619 στοιχεία και 39614 κόμβοι. Είναι φανερό από το Σχήμα 7 ότι κοντά στο αλεξικέραυνο, στην περιοχή που ορίστηκε από το μικρό ορθογώνιο, όπου και ενδιαφέρει η κατανομή του πεδίου και του δυναμικού το πλέγμα είναι αρκετά πυκνό. Ο μέγιστος αριθμός στοιχείων που μπορεί να δημιουργηθούν στο PC OPERA 2-d είναι 20000. Έγινε προσπάθεια ώστε να πλησιάσουμε τον αριθμό αυτό ώστε τα αποτελέσματα που θα πάρουμε να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβή.



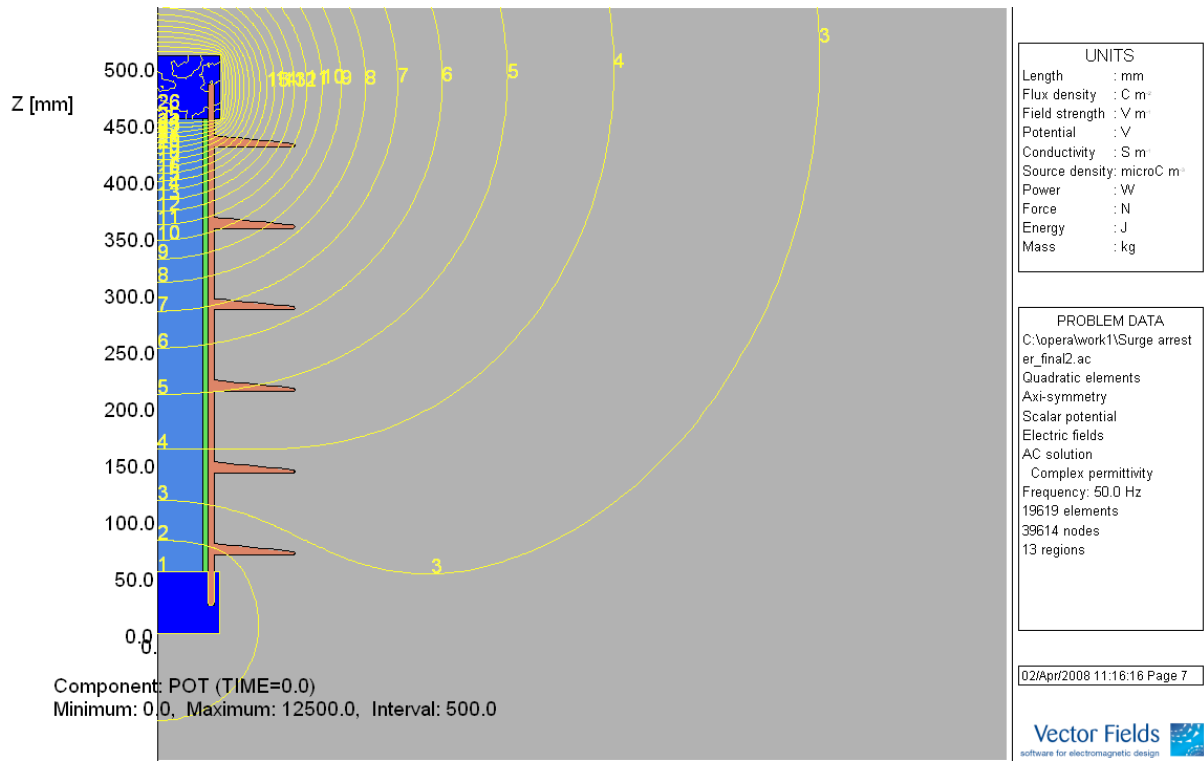
Σχήμα 7: Το πλέγμα της διάταξης

7.4.3 Υπολογισμός και Κατανομή Δυναμικού

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το δυναμικό που επικρατεί στο εσωτερικό του αλεξικεραύνου και γύρω από αυτό. Στο Σχήμα 9 φαίνονται επιπλέον και οι δυναμικές γραμμές.



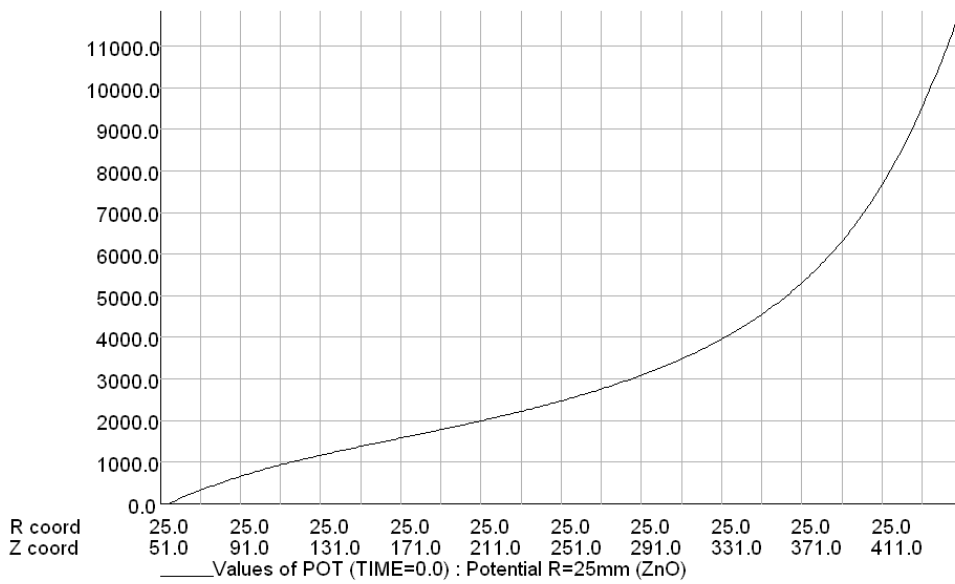
Σχήμα 8: Κατανομή του δυναμικού



Σχήμα 9: Ισοδυναμικές γραμμές

Όπως αναμενόταν η κατανομή του δυναμικού μέσα στο βαρίστορ δεν είναι ίση, και τα τμήματα που βρίσκονται εγγύτερα στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης καταπονούνται περισσότερο. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 10.

Στο Σχήμα 11 φαίνεται η μεταβολή του δυναμικού για συγκεκριμένο ύψος όσο απομακρυνόμαστε ακτινικά από το αλεξικέραυνο. Η μορφή της καμπύλης είναι και η αναμενόμενη και συγκρίσιμη για παρόμοια ανάλυση σε άλλα αλεξικέραυνα [2].



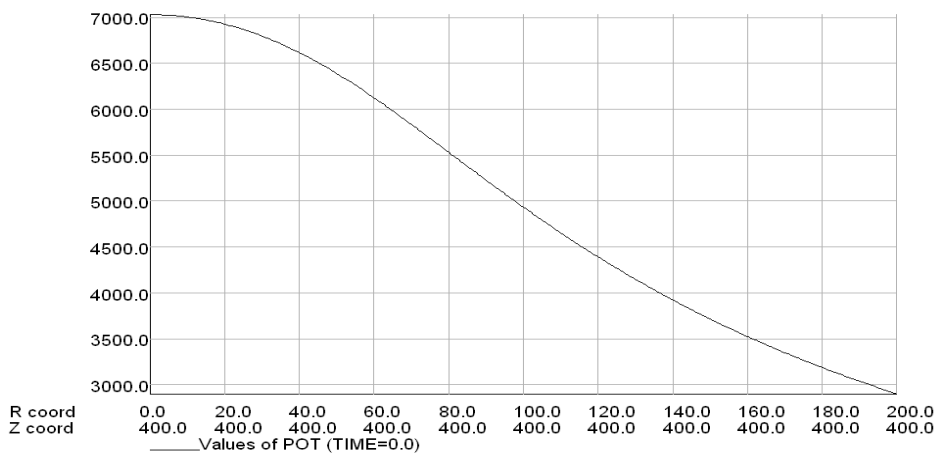
UNITS	
Length	: mm
Flux density	: C m ⁻²
Field strength	: V m ⁻¹
Potential	: V
Conductivity	: S m ⁻¹
Source density: microC	: m ⁻³
Power	: W
Force	: N
Energy	: J
Mass	: kg

PROBLEM DATA	
C:\opera\work1\Surge arrest	
er_final2.ac	
Quadratic elements	
Axi-symmetry	
Scalar potential	
Electric fields	
AC solution	
Complex permittivity	
Frequency: 50.0 Hz	
19619 elements	
39614 nodes	
13 regions	

02/Apr/2008 11:18:58 Page 11



Σχήμα 10: Η κατανομή του δυναμικού κατά μήκος του βαρίστορ



UNITS	
Length	: mm
Flux density	: C m ⁻²
Field strength	: V m ⁻¹
Potential	: V
Conductivity	: S m ⁻¹
Source density: microC	: m ⁻³
Power	: W
Force	: N
Energy	: J
Mass	: kg

PROBLEM DATA	
C:\opera\work1\Surge arrest	
er_final2.ac	
Quadratic elements	
Axi-symmetry	
Scalar potential	
Electric fields	
AC solution	
Complex permittivity	
Frequency: 50.0 Hz	
19619 elements	
39614 nodes	
13 regions	

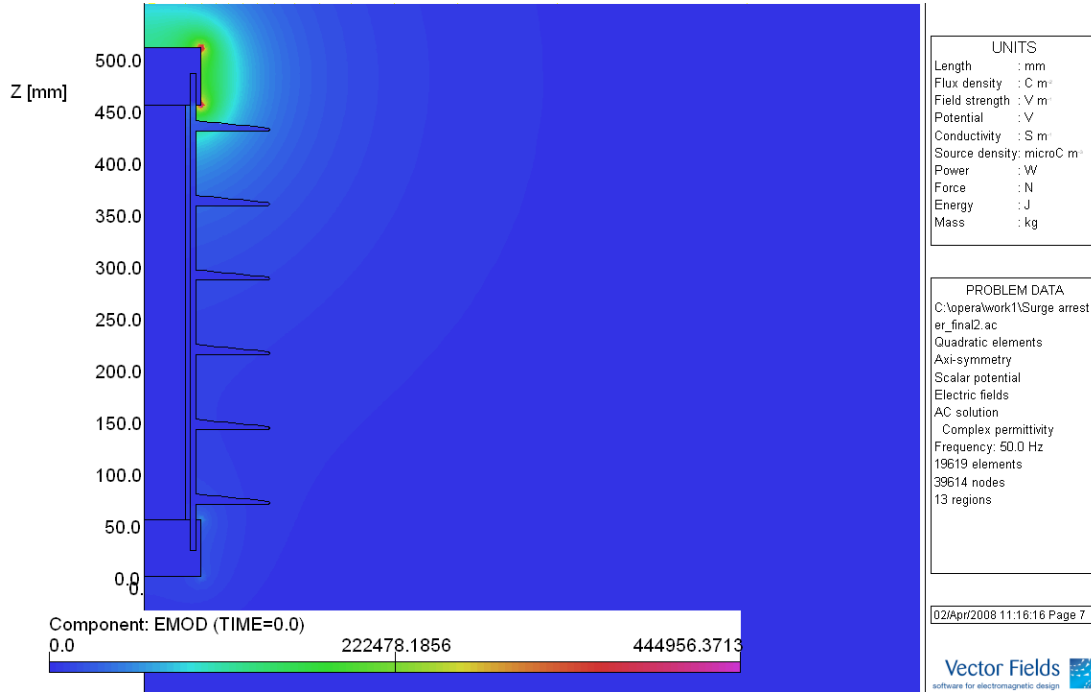
02/Apr/2008 11:22:29 Page 18



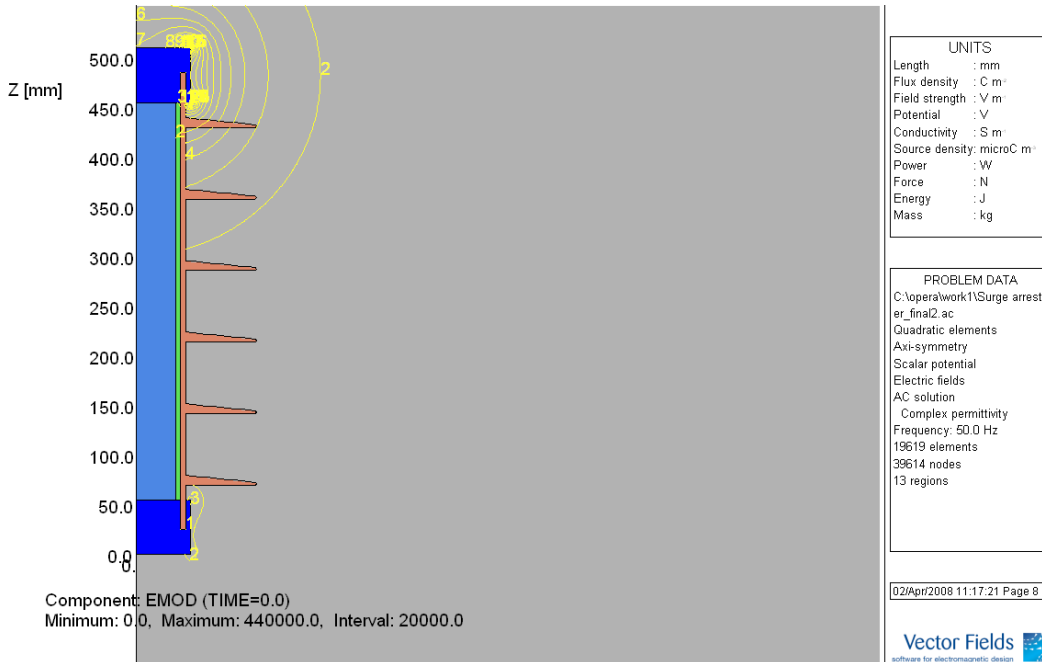
Σχήμα 11: Το δυναμικό κατά μήκος του άξονα χ σε ύψος 40cm

7.4.4 Υπολογισμός και Κατανομή ηλεκτρικού Πεδίου

Στο Σχήμα 12 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα και γύρω από το αλεξικέραυνο, ενώ στο Σχήμα 13 είναι σχεδιασμένες και οι δυναμικές γραμμές του πεδίου.

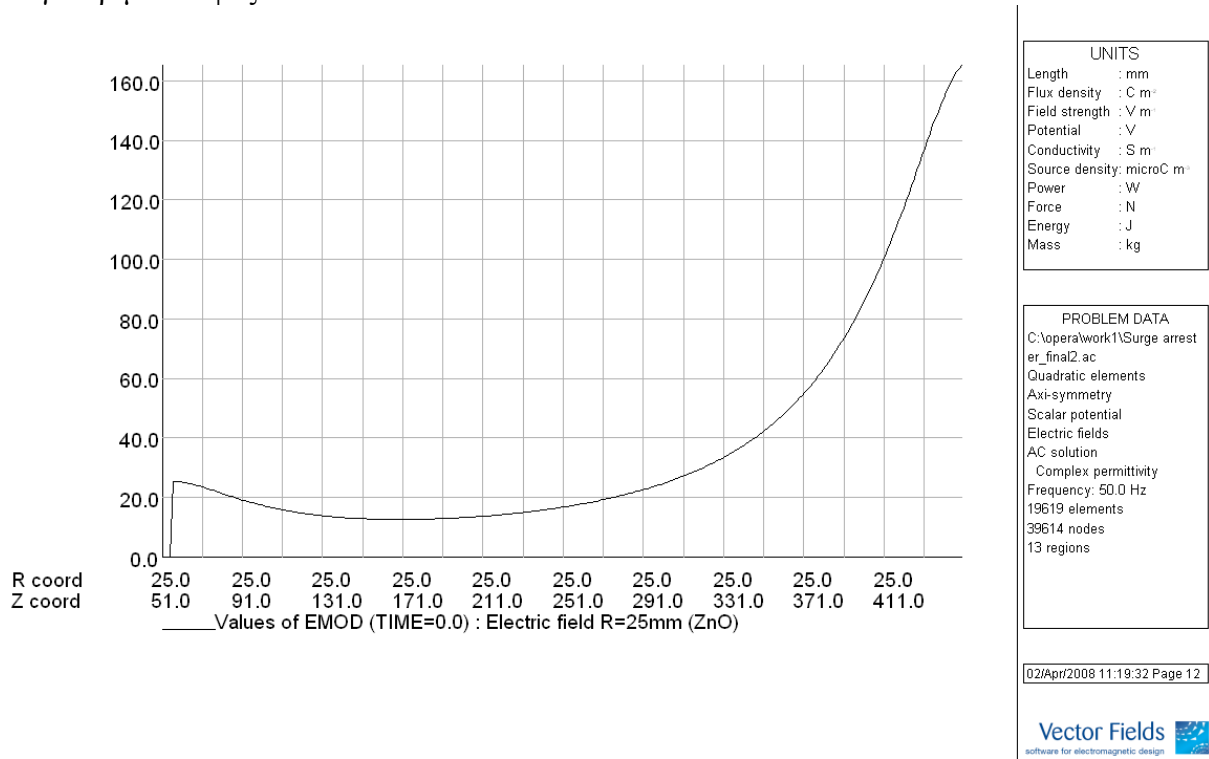


Σχήμα 12: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου

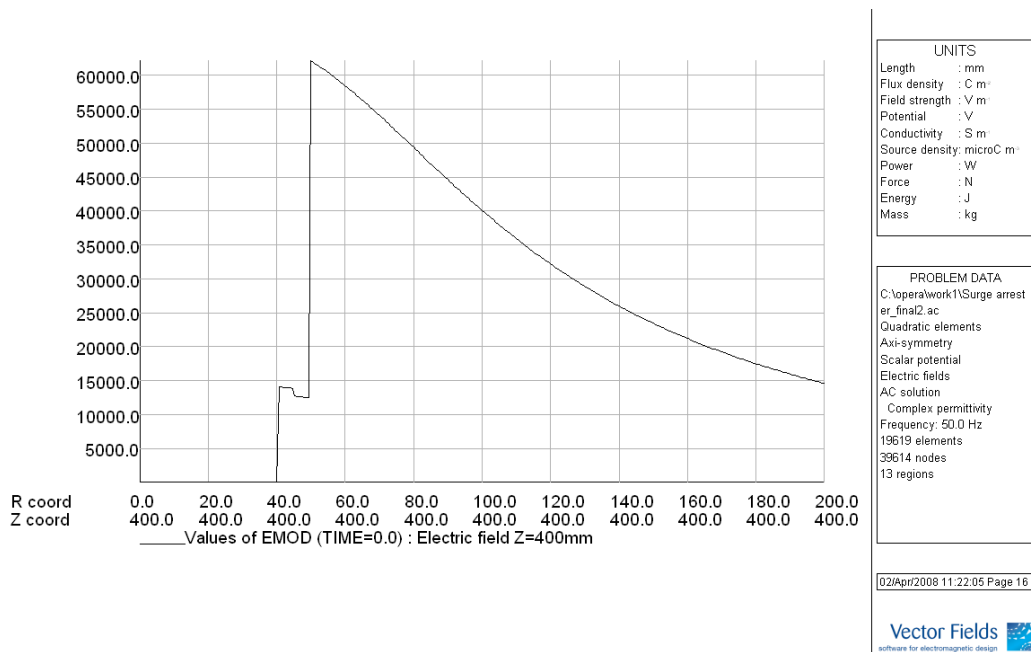


Σχήμα 13: Δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου

Στο Σχήμα 14 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο βαρίστορ, ενώ στο Σχήμα 15 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για συγκεκριμένο ύψος.

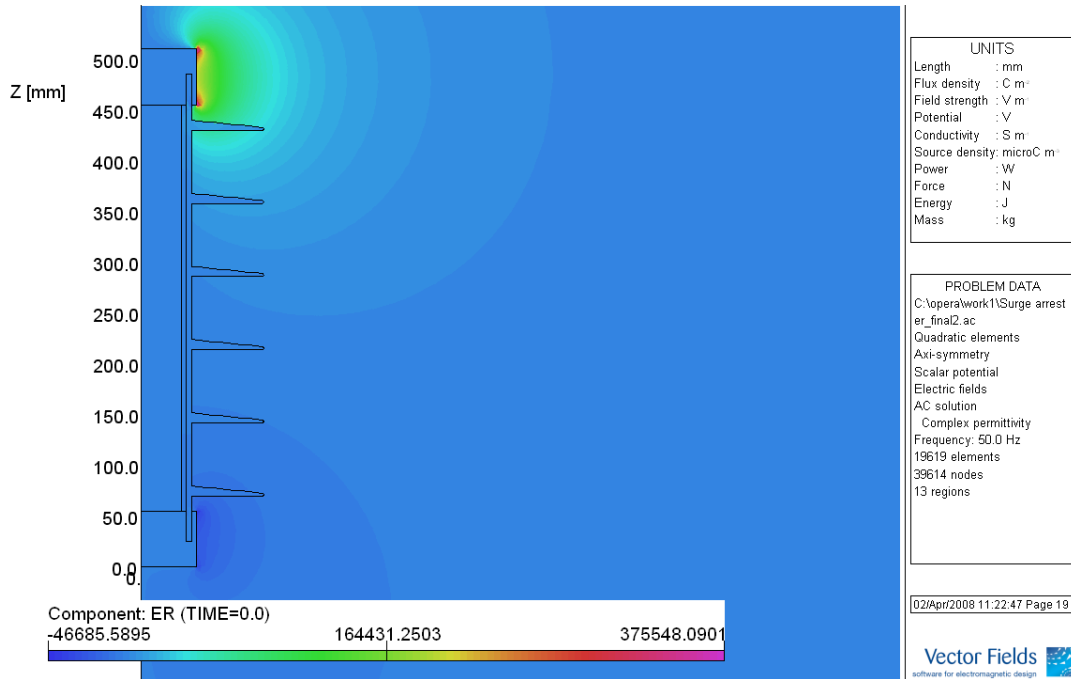


Σχήμα 14: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο βαρίστορ

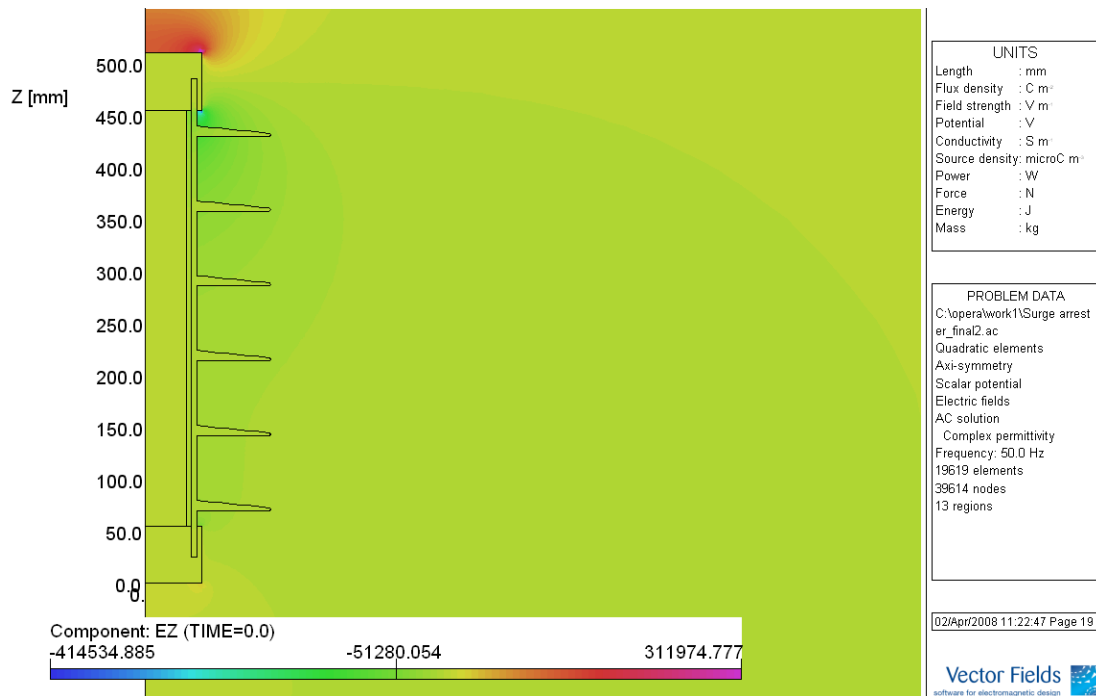


Σχήμα 15: Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το αλεξικέραυνο για ύψος 40cm

Στα Σχήματα 16 και 17 φαίνονται οι κατανομές των συνιστωσών E_r και E_z αντίστοιχα.



Σχήμα 16: Κατανομή της συνιστώσας E_r του πεδίου



Σχήμα 17: Κατανομή της συνιστώσας E_z του πεδίου

7.5 Συμπεράσματα – Επέκταση

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζεται μια πρώτη προσπάθεια για την πεδιακή ανάλυση ενός αλεξικεραύνου μέσης τάσης. Από την παραπάνω ανάλυση φάνηκε ότι η κατανομή του δυναμικού δεν είναι ομοιόμορφη κατά μήκος του βαρίστορ, με αποτέλεσμα τα τμήματα που είναι κοντά στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης να καταπονούνται θερμικά περισσότερο. Για τον περιορισμό του φαινομένου έχουν εφαρμοσθεί, αλλά και αναζητούνται και νέοι, τρόποι για την ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού.

Σαν επόμενο βήμα, μπορεί να εξεταστεί το δυναμικό και το πεδίο σε περίπτωση ρύπανσης του αλεξικεραύνου, κάποιου σπασίματος του εξωτερικού περιβλήματος ή να δοκιμαστούν άνισες διαστάσεις στους δίσκους του εξωτερικού μονωτικού περιβλήματος.

Βιβλιογραφία

1. J. Lundquist, L. Stenstrom, A. Schei και B. Hansen, “New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990.
2. Analysis of Electric Field and Voltage Distribution Zno Surge Arrester for Polluted Condition, B. Vahidi R. Shariati Nasab J.S.Moghani, Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, August 25-29, 2005.
3. S.Chapra, «Εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων», Εκδ. Φούντας
4. Εγχειρίδιο του υπολογιστικού πακέτου PC OPERA.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα, Παρατηρήσεις και Επόμενη Μέρα

Αφού λοιπόν μελετήθηκαν τα δύο πρότυπα και παρουσιάστηκε και μία γενικότερη βιβλιογραφική ανασκόπηση, πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της ωμικής συνιστώσας του ρεύματος διαρροής των δύο αλεξικέραυνων στις εξής περιπτώσεις:

- Όταν τα δύο αλεξικέραυνα είναι καινούργια υπό συνθήκες περιβάλλοντος.
- Όταν τα δύο αλεξικέραυνα είναι καινούργια υπό συνθήκες τεχνητής βροχής.
- Αφού τα δύο αλεξικέραυνα έχουν καταπονηθεί με κρουστικές τάσεις 1.2/50μs, μεγέθους 20 kV, 40 kV και 90 kV.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το ρεύμα διαρροής υπό τεχνητή βροχή παρουσιάζει μία τάση να αυξηθεί και μετά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις αυξάνεται σημαντικά, χωρίς ωστόσο να μπορούν να προκύψουν απολύτως ασφαλή συμπεράσματα. Το πρότυπο άλλωστε αναφέρει ρητά την περιορισμένη χρήση και εμπειρία πάνω στη συγκεκριμένη δοκιμή. Ειδικότερα η αύξηση του ρεύματος διαρροής υπό τεχνητή βροχή μπορεί να οφείλεται στην υγρασία που επικρατεί στην επιφάνεια του αλεξικέραυνου, υπόθεση η οποία μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα για την κατάσταση του αλεξικέραυνου (πόσο μάλλον αν πραγματοποιείται on-line διαδικασία). Φαίνεται επίσης καθαρά μία σημαντική αύξηση της τιμής του ρεύματος διαρροής και της ωμικής του συνιστώσας μετά την εφαρμογή των κρουστικών τάσεων στα δείγματα, γεγονός το οποίο καταδεικνύει την καταπόνηση των αλεξικέραυνων από τις κρουστικές τάσεις. Η αύξηση αυτή ωστόσο δεν φαίνεται να χαρακτηρίζεται από γραμμικότητα ως προς το είδος της καταπόνησης. Οι πειραματικές διαδικασίες έδειξαν επίσης μεγάλη ευαισθησία των μετρήσεων (που είναι της τάξης των mA) στον περιβάλλοντα χώρο, στις γειώσεις, στην διάταξη και στα όργανα μέτρησης. Κατά αυτόν τον τρόπο τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρά την σημαντική αύξηση της του ωμικού ρεύματος μαρτυρούν την

καταπόνηση των αλεξικέραυνων χωρίς ωστόσο να καταδεικνύουν κάποια σχέση μεταξύ της αύξησης και του είδους καταπόνησης. Συμπερασματικά, η μέτρηση του συνολικού ρεύματος διαρροής και η εξαγωγή της ωμικής συνιστώσας του καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη, πόσο μάλλον όταν πρόκειται για on-line δοκιμή είτε πάνω σε γραμμή μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικού ρεύματος είτε σε μετασχηματιστή. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε προσπάθεια για καταπόνηση των δειγμάτων με κρουστικό ρεύμα, χωρίς όμως να επιτευχθεί κάτι τέτοιο καθώς δεν επαρκούσε η αντίστοιχη γεννήτρια.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε μέτρηση με τη συσκευή VLF με την προσδοκία ότι θα καταγραφεί απευθείας το ωμικό ρεύμα διαρροής. Οι προσδοκίες μας ωστόσο δεν επαληθεύτηκαν καθώς δεν επαρκούσε η διακριτότητα του οργάνου.

Τέλος, μετρήθηκε η αντίσταση των δύο δειγμάτων με τάση 5 kV και ελέγχθηκε έτσι η αρχική τους κατάσταση.

Παράλληλα, επιχειρήθηκε η διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας που περιγράφεται στο πέμπτο κεφάλαιο από τον K.L. Wong. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε πολλαπλάσια τάση στα δείγματα αλλά δεν κατέστη δυνατή η καταγραφή αποτελεσμάτων παρόμοιων με αυτά του K.L Wong λόγω παρασίτων. Η κυματομορφή ωστόσο του K.L Wong φαίνεται να αντιστοιχεί περισσότερο σε διάσπαση διακένου ακίδας πλάκας παρά σε εσωτερικές ή επιφανειακές εκκενώσεις..

Το FEM-OPERA επίσης έχει εφαρμογή στον προσδιορισμό τόσο του ηλεκτρικού πεδίου όσο και της κατανομής δυναμικού ενός αλεξικέραυνου.

Όπως φάνηκε και από την παρούσα διπλωματική εργασία η μέτρηση του συνολικού ρεύματος διαρροής και η χρήση της ωμικής του συνιστώσας για τον έλεγχο της κατάστασης ενός αλεξικέραυνου αποτελεί ένα εξαιρετικά δυσχερές έργο. Κάτι τέτοιο φαίνεται επίσης και από την περιορισμένη αναφορά που γίνεται στο διεθνές πρότυπο IEC 60099-4 στην εν λόγω δοκιμή. Και αυτό διότι τόσο η απομόνωση του ρεύματος διαρροής από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κατά την μέτρησή του όσο και ο ακριβής προσδιορισμός του ωμικού του μέρους κρίνονται ως επιτακτικές διαδικασίες χωρίς ωστόσο να επιτυγχάνονται εύκολα. Ειδικότερα, η ωμική συνιστώσα του ρεύματος διαρροής ενός αλεξικέραυνου είναι κατά πολλές τάξεις μικρότερη από την αντίστοιχη χωρητική, με αποτέλεσμα ακόμα και μία ελάχιστη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή κατά

την μέτρηση του συνολικού ρεύματος διαρροής να οδηγεί σε ανακριβή αποτελέσματα για την τιμή της ωμικής συνιστώσας του. Επιπλέον, ο προσδιορισμός του ωμικού μέρους πρέπει να επιτυγχάνεται με σημαντική ακρίβεια λόγω της μικρής τάξης μεγέθους της ωμικής συνιστώσας.

Στη παρούσα διπλωματική επιχειρείται μία πρώτη προσπάθεια για τον προσδιορισμό της ωμικής συνιστώσας του συνολικού ρεύματος διαρροής μέσω της χρήσης των κυματομορφών της τάσης και ρεύματος. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι η τεχνική αυτή δεν μπορεί να διασφαλίσει την ακρίβεια στον προσδιορισμό ωμικού μέρους και να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για την κατάσταση ενός αλεξικέραυτου.

Σαν επόμενο βήμα, επιτακτική κρίνεται η δοκιμή νέων τεχνικών για την βελτίωση των συνθηκών μέτρησης και ακρίβειας της διάταξης με σκοπό την απομόνωση του ρεύματος διαρροής από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές κατά την μέτρησή του και η περαιτέρω μελέτη και αξιολόγηση τεχνικών προσδιορισμού της ωμικής συνιστώσας του ρεύματος. Επιπλέον, προτείνεται η μέτρηση του ρεύματος διαρροής αφού το αλεξικέραυνο καταπονηθεί με κρουστικό ρεύμα όπως επίσης και η μελέτη της επιρροής των αρμονικών τάσης και ρεύματος στο ρεύμα διαρροής του αλεξικέραυτου. Θεωρείται επίσης χρήσιμη η μέτρηση του ρεύματος με χρήση αμπεροτσιμπίδας, ικανής να καταγράφει ρεύματα της τάξης των mA και με την κατάλληλη θωράκιση από εξωτερικές παρεμβολές. Παράλληλα, η διάθεση ενός δείγματος, το οποίο θα ήταν δυνατόν να καταστραφεί ολοσχερώς, θα οδηγούσε σε χρήσιμα συμπεράσματα και θα διευκόλυνε την μέτρηση του ρεύματος. Η παρατήρηση επίσης των μεταβολών της χαρακτηριστικής Τάσης-Ρεύματος θα φανέρωνε τυχόν καταστροφή ενός δείγματος, διεργασία ωστόσο η οποία απαιτεί κρουστική γεννήτρια ρευμάτων. Τέλος, προτείνεται η πραγματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας σε γραμμή μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικού ρεύματος η σε υποσταθμό.