



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Μέτρηση μονωτήρων και υλικών με χρήση Megger 5KV
Εφαρμογή στη διάγνωση της κατάστασης μόνωσης

Μελιάδης Πασχάλης

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου για την στήριξη που μου έδωσαν ώστε να πραγματοποιηθεί η παρούσα εργασία.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	6
Summary.....	Error! Bookmark not defined.
Εισαγωγή	7
1. Μονωτικά υλικά και Μονωτήρες	10
1.1. Μονωτικά υλικά και ο ρόλος τους στην μεταφορά και στην διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας	10
1.1.1. Αέρια μονωτικά υλικά	11
1.1.2. Υγρά μονωτικά υλικά	13
1.1.3. Στερεά μονωτικά υλικά	15
1.2. Τύποι μονωτήρων.....	19
1.2.1. Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το υλικό κατασκευής	26
1.2.2. Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον τρόπο στήριξης.....	28
1.2.3. Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους χρήσης	28
1.2.4. Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το σχήμα και τη χρήση τους	29
1.3. Ρύπανση και Διάτρηση.....	30
1.3.1. Θαλάσσια ρύπανση.....	30
1.3.2. Βιομηχανική ρύπανση	30
1.3.3. Αποτελέσματα ρύπανση	32
1.4. Υπερπήδηση	36
1.5. Τεχνικές αντιμετώπισης της ρύπανσης	38
1.6. Μηχανική Αντοχή	40
2. Διαδικασία αξιολόγησης ηλεκτρομονωτικών υλικών	42
2.1. Η διηλεκτρική αντοχή	42
2.2. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά.....	43
2.3. Ο συντελεστής απωλειών	46
2.4. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα	48
2.5. Η επιφανειακή αγωγιμότητα	51
2.6. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.....	52
3. Διαδικασία και αποτελέσματα μετρήσεων	54
3.1. Διαδικασία και διάταξη των μετρήσεων με το όργανο metrel 5Kn plus	54

3.2.	Συντελεστές αξιολόγησης αντίστασης μόνωσης.....	59
3.3.	Διαδικασία μετρήσεων	60
3.4.	Μετρήσεις	61
4.	Κριτική ανάλυση των μετρήσεων και συμπεράσματα	66
	Βιβλιογραφία.....	68

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Βασικές ιδιότητες του εξαφθοριούχου θείου

Πίνακας 2: Σύγκριση μονωτικών πολυμερών υλικών

Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση επιπέδων ρύπανσης

Πίνακας 4: Επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815

Πίνακας 5: Επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815

Πίνακας 6: Σχετικές διηλεκτρικές αντοχές

Πίνακας 7: Τάξη μεγέθους των τιμών $\epsilon \tan\delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20°C

Πίνακας 8: Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας (λ) για ορισμένα

Πίνακας 9: Κατάταξη των τιμών του δείκτη PI

Πίνακας 10: Κατάταξη των τιμών του δείκτη DAR

Πίνακας 11: Μετρήσεις μονωτήρων 1ου δοκιμίου με βήμα 500 V

Πίνακας 12: Μετρήσεις μονωτήρων 2ου δοκιμίου με βήμα 500 V

Πίνακας 13: Μετρήσεις μονωτήρων 3ου δοκιμίου με βήμα 500 V

Πίνακας 14: Μετρήσεις μονωτήρων 4ου δοκιμίου με βήμα 500 V

Πίνακας 15: Μετρήσεις μονωτήρων 5ου δοκιμίου με βήμα 500

Πίνακας 16: Μετρήσεις μονωτήρων με βήμα 500

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Μονωτήρας τύπου cap & pin

Εικόνα 2: Μονωτήρας πορσελάνης τύπου pin

Εικόνα 3: Μονωτήρας Στήριξης

Εικόνα 4: Μονωτήρας διέλευσης

Εικόνα 5: Μονωτήρας μεγάλου μήκους

Εικόνα 6: Σύνθετος πολυμερής μονωτήρας

Εικόνα 7: Τυπικός cap and pin μονωτήρας

Εικόνα 8: Η μορφή του δενδρίτη

Εικόνα 9: Διάσπαση μονωτήρων

Εικόνα 10: Πλύσιμο μονωτήρων σε μια γραμμή μεταφοράς

Εικόνα 8: Καθαρισμός Γραμμής Μεταφοράς 150kV του Συστήματος Κρήτης, υπό τάση, με ελικόπτερο

Εικόνα 12: Το όργανο Metrel 5kv plus

Εικόνα 13: Πληκτρολόγιο για το χειρισμό του Metrel 5kv plus

Εικόνα 14: Θέσεις σύνδεσης για τους αγωγούς μετρήσεις

Εικόνα 15: Σημεία εξαγωγής δεδομένων μέτρησης

Εικόνα 16: Ειδική αγωγοί για την μέτρηση των μονωτήρων

Εικόνα 17: Κύκλωμα σύνδεσης οργάνου στον μονωτήρα

Περίληψη

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία αποτελεί την μελέτη της αντίστασης διαφόρων μονωτικών υλικών κάνοντας χρήση ενός φορητού οργάνου μέτρησης της αντίστασης μόνωσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα διάφορα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές χρήσεις αλλά ακόμα γίνεται αναφορά στην ρύπανση που δέχονται τα υλικά αυτά και στο τη ζημία μπορεί να προκαλέσει αυτή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνονται αναφορες σε όλους τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να αξιολογήσουμε τα μονωτικά υλικά ώστε να βλέπουμε ότι λειτουργούν σωστά και μας παρέχουν την μέγιστη προστασία που μπορούν να προσφέρουν.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρετε στο όργανο μέτρησης που χρησιμοποιούμε και στις μετρήσεις που πήραμε από τα διάφορα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν.

Και στο τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει διάφορες παρατηρήσεις αλλά και τα συμπεράσματα που μπορούμε να βγάλουμε από τις μετρήσεις που πήραμε.

Τέλος υπό την μορφή παραρτήματος έχουμε το εγχειρίδιο χρήσης μεταφρασμένο του οργάνου που χρησιμοποιήσαμε για να μετρήσουμε τα διάφορα μονωτικά υλικά, το όργανο είναι το Metrel 5 KV plus.

Λέξεις κλειδιά: Μονωτικά υλικά, Όργανο μέτρησης, Μονωτήρες

Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της ανθρώπινης δραστηριότητας συναντώνται μονωτικά υλικά διαφόρων μορφών και διαφόρων χρήσεων. Το είδος της μόνωσης που προσφέρουν τους προσδίδει και την γενικότερη ονομασία τους, οπότε γίνεται λόγος για θερμομονωτικά, ηχομονωτικά ή ηλεκτρομονωτικά υλικά. Τα τελευταία αποτελούν και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά, τα οποία αναλύονται διεξοδικά στη συνέχεια, αποσκοπούν στην προστασία του ανθρώπου ή άλλων διατάξεων από το ηλεκτρικό ρεύμα. Η θανατηφόρα διέλευση ακόμη και μικρής σχετικά έντασης ηλεκτρικού ρεύματος από το σώμα του ανθρώπου, γνωστή και ως ηλεκτροπληξία οδήγησε στην χρησιμοποίηση υλικών που έχουν αυτήν ακριβώς την ιδιότητα: Να εμποδίζουν τη δημιουργία αγωγίμου δρόμου ανάμεσα σε δύο διαφορετικής φόρτισης σημεία προβάλλοντας μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Ένας ακόμη λόγος είναι η αποφυγή βραχυκυκλώματος που έχει καταστρεπτικές συνέπειες για τον ηλεκτρικό-ηλεκτρονικό εξοπλισμό και συχνά συντελεί σε εκδήλωση πυρκαγιάς καθώς συνεπάγεται μεγάλες τιμές έντασης ρεύματος.

Καθώς οι απαιτήσεις ως προς την ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος που παρέχεται στους καταναλωτές αυξάνονται, είναι σημαντική η χρήση υψηλής απόδοσης και βελτιωμένων ιδιοτήτων μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται τόσο στην παραγωγή, όσο και στη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος υπό υψηλή τάση. Ο κύριος σκοπός των μονωτικών υλικών είναι να προσφέρουν προστασία, να αυξήσουν την αντοχή των συστημάτων και να δράσουν ως μηχανική υποστήριξη τους. Αφού η παραγωγή και η κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος σπάνια βρίσκονται στο ίδιο μέρος και η ηλεκτρική ισχύς πρέπει να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις, τα μονωτικά υλικά εκτίθενται σε διάφορες ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η βροχή, η ομίχλη, οι ατμοσφαιρικοί ρύποι κλπ., που αναπόφευκτα επιδρούν στη μονωτική τους ικανότητα.

Για την επιλογή του κατάλληλου στερεού μονωτικού πρέπει κυρίως να ληφθούν υπόψη η υψηλή μονωτική ικανότητα, η χαμηλή διηλεκτρική σταθερά ώστε να παρουσιάζει μικρή χωρητικότητα, ο χαμηλός συντελεστής απωλειών ώστε να μη θερμαίνεται και η υψηλή αντίσταση.

Τόσο τα μονωτικά υλικά όσο και οι μονωτήρες, δηλαδή οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα, δέχονται πολλές καταπονήσεις με αποτέλεσμα την μείωση των μονωτικών ιδιοτήτων τους.

Για τη σωστή αξιολόγηση των ηλεκτρομονωτικών υλικών και την παρακολούθηση της συμπεριφοράς αυτών κατά την διάρκεια λειτουργίας τους, με στόχο τη διαπίστωση της καταλληλότητας τους για χρήση σε μια εγκατάσταση υψηλών τάσεων, υφίστανται σύμφωνα με την βιβλιογραφία διάφορα κριτήρια.

Βασικό προβληματισμό στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε η ορθή και έγκαιρη αξιολόγηση της λειτουργίας ενός μονωτήρα. Στο πλαίσιο της διερεύνησης του εν λόγω προβληματισμού, θα αναλυθεί η διαδικασία αξιολόγησης ηλεκτρομονωτικών υλικών και θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα ενός πειράματος έξι δοκιμίων με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων που σχετίζονται με την μελέτη της αντίστασης διαφόρων μονωτικών υλικών. Για την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το φορητό όργανο μέτρησης της αντίστασης μόνωσης metrel 5Kv plus.

Πιο αναλυτικά η δομή της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας, αποτελείται από τέσσερα (4) κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα βασικά μονωτικά υλικά, οι μονωτήρες καθώς και οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την μονωτική απόδοση των μονωτήρων, όπως η ρύπανση. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά και οι κυριότερες αέρια, των υγρών και στερεών μονωτικών υλικών. Κατόπιν παρουσιάζονται οι βασικότερες κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, τον τρόπο στήριξης, τους χώρους χρήσης και το σχήμα τους. Τέλος, αναλύονται τα φαινόμενα της ρύπανσης, της διάτρησης, της υπερπήδησης και της μηχανικής αντοχής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία αξιολόγησης ηλεκτρομονωτικών υλικών, και πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι έννοιες της διηλεκτρικής αντοχής, της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, του συντελεστή απωλειών, της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, της επιφανειακής αγωγιμότητας και του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύεται η διαδικασία και η διάταξη των μετρήσεων με το πολυλειτουργικό όργανο, το metrel 5Kn plus. Παράλληλα παρουσιάζονται οι συντελεστές αξιολόγησης αντίστασης μόνωσης, δηλαδή ο δείκτης πόλωση PI και ο δείκτης DAR δηλαδή ο λόγος διηλεκτρικής απορρόφησης. Κατόπιν περιγράφονται οι συνθήκες των μετρήσεων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο λαμβάνει χώρα η κριτική ανάλυση των μετρήσεων και τα συμπεράσματα.

1. Μονωτικά υλικά και Μονωτήρες

Στο παρόν κεφάλαιο, θα αναλυθεί ο ρόλος των μονωτικών υλικών στην μεταφορά και στην διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, και θα παρουσιαστούν τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αέριων, υγρών και στερεών μονωτικών υλικών. Κατόπιν θα αναλυθεί ο ρόλος και τα χαρακτηριστικά των μονωτήρων, και θα παρουσιασθούν διάφορες κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, τον τρόπο στήριξης, τους χώρους χρήσης αλλά και το σχήμα και την γενικότερη χρήση τους. Τέλος θα παρουσιασθούν τα φαινόμενα της ρύπανσης και της διάτρησης μονωτήρων, και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα της ρύπανσης.

1.1. Μονωτικά υλικά και ο ρόλος τους στην μεταφορά και στην διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας

Ο ηλεκτρισμός αποτελεί μια μορφή ενέργειας με σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς είναι εύχρηστη και η μεταφορά της είναι εύκολη, με μικρές απώλειες και σε μεγάλες αποστάσεις. Το δίκτυο με το οποίο μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια ονομάζεται δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται ευκολότερα σε μεγάλες τιμές τάσεις με την χρήση διαφόρων εγκαταστάσεων οι οποίες απαρτίζονται από υποσταθμούς τόσο ανυψώσεις όσο και υποβιβασμού της τάσης. Παράλληλα, οι εγκαταστάσεις αυτές πρέπει να είναι καλά προστατευμένες ώστε να είναι ασφαλείς, και αυτό γίνεται μέσω των διαφόρων μονωτικών υλικών. [1]

Το βασικό χαρακτηριστικό των μονωτών ή των μονωτικών σωμάτων είναι η έλλειψη ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που συνεπάγεται η έκθεσή τους σε σχετικά ασθενή πεδία συνεχούς ρεύματος. Η ιδιότητα αυτή έγκειται στην μη ύπαρξη επαρκούς ποσότητας ευκίνητων φορέων ηλεκτρικού φορτίου στο εσωτερικό τους, τέτοιων ώστε να επιτρέπουν τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από το εσωτερικό τους. [6]

Σε κάθε ηλεκτροτεχνική κατασκευή, σκοπός των απαιτούμενων μονώσεων είναι ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ των ρευματοφόρων μερών, καθώς και των ρευματοφόρων μερών προς γη, κατά τρόπο ώστε το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο να είναι ηλεκτροστατικό. [9]

Τα μονωτικά υλικά με βάση τη μορφή τους διακρίνονται σε αέρια, υγρά και στερεά, ενώ με βάση τους δεσμούς σε ιοντικά, μοριακά και ομοιοπολικά [4]. Παρακάτω θα παρουσιασθούν τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αέριων, των υγρών και των στερεών μονωτικών υλικών.

1.1.1. Αέρια μονωτικά υλικά

Τα αέρια μονωτικά υλικά αποτελούν τα πιο απλά και συνηθισμένα μονωτικά υλικά. Ο ατμοσφαιρικός αέρας, που αποτελεί το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αέριου μονωτικού υλικού, συνιστά ένα διηλεκτρικό υλικό, που συναντάται στην πλειοψηφία των ηλεκτρολογικών εφαρμογών, καθώς βρίσκεται σε περίσσεια στη φύση, έχει μηδενικό του κόστος και δύναται να επαναποκτή τις μονωτικές του ιδιότητες μετά από μία ενδεχόμενη διάσπασή του. [4]

Μια από τις βασικότερες εφαρμογές του ατμοσφαιρικού αέρα, ως μονωτικό υλικό, αποτελεί η χρήση του στα δίκτυα των εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη εφαρμογή ο αέρας υστερεί όταν πρόκειται για την περίπτωση μεταφοράς υπερυψηλής τάσης, καθώς η αρκετά χαμηλή διηλεκτρική σταθερά που διαθέτει, η οποία έχει τιμή κοντά στην μονάδα, με συνέπεια να πρέπει οι αγωγοί μεταφοράς να έχουν μεταξύ τους μεγάλα διάκενα. [10]

Αυτό το σημαντικό μειονέκτημα του αέρα έχει ωθήσει στην ανάπτυξη άλλων μονωτικών αερίων που έχουν καλύτερες μονωτικές ιδιότητες σε σχέση με τον αέρα, όπως το άζωτο (N_2), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το φρέον (CCl_2F_2) και κυρίως το εξαφθοριούχο θείο (SF_6). Το εξαφθοριούχο θείο έχει ευρεία εφαρμογή σε διακόπτες αλλά και σε πίνακες μέσης τάσης, έτσι ώστε να μειωθούν οι αποστάσεις μόνωσης. Η διηλεκτρική του αντοχή είναι διπλάσια σε σχέση με τον αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση ενώ έχει άριστη χαρακτηριστική θερμικής καταπόνησης για την σβέση του ηλεκτρικού τόξου. Στον πίνακα 1 παραθέτουμε ορισμένες ιδιότητες του [2].

Πίνακας 9: Βασικές ιδιότητες του εξαφθοριούχου θείου

Μοριακός Τύπος	<ul style="list-style-type: none"> • SF₆
Μοριακό Βάρος	<ul style="list-style-type: none"> • 146,06 g/mol
Πυκνότητα	<ul style="list-style-type: none"> • 6,164 g/L, ως αέριο σε 1 ατμόσφαιρα (~5.1 πιο πυκνό από τον αέρα) • 1,329 kg/L, ως υγρό στους 25 °C • 2,510 kg/m³ ή 2,510 kg/L, ως στερεό στους -50.8 °C
Σημείο ζέσης	-64 °C
Σημείο τήξης	-50,8 °C

Το εξαφθοριούχο θείο (SF₆) έχει πληθώρα εφαρμογών. Η βασικότερη εφαρμογή του είναι σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και το 80% της παραγωγής του προορίζεται αυτό τον σκοπό. Ειδικότερα, σε διακόπτες η παρουσία εξαφθοριούχου θείου δίνει τη δυνατότητα μείωσης των αποστάσεων μόνωσης κατά 10 φορές. Το 19% της παραγωγής του προορίζεται για τη διαδικασία επεξεργασίας με πλάσμα στην κατασκευή ημιαγωγών κατάλληλης μορφολογίας. Παράλληλα, χρησιμοποιείται στην παραγωγή μετάλλου του μαγνησίου και δρα βοηθητικά στην ανακύκλωση του αλουμινίου, μειώνοντας το πορώδες του μετάλλου. Συν τοις άλλοις, χρησιμοποιείται ακόμη και ως θερμομονωτικό ή ηχομονωτικό στα ελαστικά των αεροπλάνων, σε σόλες σπορ υποδημάτων, σε αεριοθαλάμους δυτών κα. Σε αρκετές περιπτώσεις δρα επικουρικά στη μέτρηση της στεγανότητας του εδάφους όπως για παράδειγμα στον έλεγχο διαρροής πυρηνικών αποβλήτων. Τέλος, απορροφά τμήμα της του υπέρυθρου φάσματος της ακτινοβολίας και γι' αυτό χρησιμοποιείται στο θόλο αεροσκαφών τύπου AWACS. [11]

Γενικά γίνεται μια προσπάθεια από την επιστημονική κοινότητα για τη δημιουργία τέτοιων αέριων με παρόμοιες ιδιότητες με αυτές του εξαφθοριούχου θείου ώστε να προσφέρουν μεγάλα πλεονεκτήματα. Παραδείγματα τέτοιων μειγμάτων είναι συνδυασμός του SF₆ με φθηνά αέρια συστατικά όπως ο αέρας, το άζωτο (N₂), και το

διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) τα οποία βρίσκονται υπό πειραματικά στάδια για έως ότου γίνουν κατανοητά όσο το δυνατόν καλύτερα [2].

1.1.2. Υγρά μονωτικά υλικά

Τα υγρά μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρολογικούς εξοπλισμούς, τόσο για τη μονωτική του ικανότητα, όσο και για τη θεσμική τους αγωγιμότητα, η διηλεκτρική τους αντοχή είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των αερίων μονωτικών υλικών σε ατμοσφαιρική πίεση (διηλεκτρική αντοχή αέρα 21kV/cm, ενώ διηλεκτρική αντοχή υγρών μονωτικών 60-200kV), και διαθέτουν μεγάλο συντελεστή θεσμικής αγωγιμότητας ($0,3 \cdot 10^{-3}$ cal/ cms^oC) διευκολύνοντας την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, τις επαφές διακοπών και τους σιδηροπυρήνες μετασχηματιστών. [12]

Σε ότι αφορά την υψηλή διηλεκτρική αντοχή σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης μιας ατμόσφαιρας των υγρών μονωτικών υλικών, χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ορισμένα από τα έλαια που χρησιμοποιούνται στους μετασχηματιστές έχουν τρεις έως και δέκα φορές μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τον αέρα. Αυτό αυτόματα συνεπάγεται ότι αντιστρόφως ανάλογα είναι και η δυνατότητα για ελαχιστοποίηση των διακένων ασφαλείας που απαιτούνται στις ηλεκτρολογικές διατάξεις. [4]

Τα υγρά μονωτικά έχουν μεγάλη εφαρμογή ως ψυκτικά υγρά στους μετασχηματιστές, γιατί παρέχουν διηλεκτρική αντοχή από 3 έως 10 φορές μεγαλύτερη από ότι ο αέρας, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στους μετασχηματιστές να προκύπτει ελαχιστοποίηση της φθοράς των επιφανειών των στερεών μονωτικών που υπάρχουν, και ακόμα να μπορεί να γίνει σωστός συνδυασμός των υγρών με το χαρτί που χρησιμοποιείται στο εσωτερικό των μετασχηματιστών για την αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής τους. [7]

Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα υγρά μονωτικά υλικά είναι διάφορα είδη λαδιών, τα οποία είναι προϊόν απόσταξης του πετρελαίου και ανάλογα με την επεξεργασία που δέχονται χωρίζονται στις εξής κατηγορίες [7]:

- Τα μεθανέλαια, στα οποία κυριαρχούν κεκορεσμένοι υδρογονάνθρακες τύπου παραφίνης.
- Τα ναφθανέλαια, στα οποία κυριαρχούν ακόρεστοι υδρογονάνθρακες τύπου ναφθαλίνης

Τα υγρά μονωτικά υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως για τον εμποτισμό του χαρτιού σε καλώδια MT και YT και πυκνωτές, και για τη μόνωση των μετασχηματιστών, καθώς περιβάλλουν τα ηλεκτροφόρα στοιχεία και εμποδίζουν την ηλεκτρική υπερπήδηση ανάμεσα σε σημεία με διαφορά δυναμικού. Από τα πιο συνηθισμένα υγρά μονωτικά υλικά είναι τα πετρελαϊκά έλαια, τα οποία και βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στους μετασχηματιστές. Για πολύ υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται σιλικονούχα έλαια και φθοριούχοι υδρογονάνθρακες. Τα τελευταία χρόνια δοκιμάζονται επίσης φυτικά έλαια, τα οποία έχουν πολύ καλές ηλεκτρολογικές ιδιότητες αλλά είναι υδρόφιλα, καθώς και εστέρες, τα οποία είναι συνθετικά έλαια με βάση τον άνθρακα, έχουν πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες και αποικοδομούνται πιο γρήγορα από τα ορυκτέλαια, αλλά είναι επίσης υδρόφιλα. Σε διάφορες άλλες εφαρμογές συναντούμε και συνθετικούς υδρογονάνθρακες και αλογονούχους υδρογονάνθρακες. [4]

Παρόλο που τα μονωτικά λάδια δεν έχουν τοξικές ουσίες και είναι ακίνδυνα για το προσωπικό κατά τις διάφορες εργασίες κατασκευών και συντήρησης, με εξαίρεση τις εργασίες που μπορούν να προκαλέσουν τιμές της θερμοκρασίας στην περιοχή ανάφλεξης, αξίζει ωστόσο να σημειωθεί, ότι έχει αποδειχθεί πως ορισμένα από τα υγρά μονωτικά είναι τοξικά και δηλητηριώδη με αποτέλεσμα να προωθείται ο περιορισμός της χρήσης τους. [4]

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που πρέπει να ληφθεί κατά την χρήση υγρών μονωτικών σε μια εγκατάσταση, είναι η θερμοκρασία λειτουργίας της εγκατάστασης ώστε να επιτυγχάνεται η σωστή λειτουργία της εγκατάστασης, και να μην εξαλείφεται ο κίνδυνος ανάφλεξης των ελαίων. Η θερμοκρασία ανάφλεξης των περισσότερων ελαίων είναι από τους 130 Co έως 250 Co, και αυτός είναι ο λόγος που η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των εγκαταστάσεων, στις οποίες χρησιμοποιούνται έλαια ως υγρά μονωτικά υλικά, ορίζεται από τα πρότυπα στους 90 Co. [7]

Τα υγρά διηλεκτρικά δεν πρέπει να περιέχουν υγρασία, προϊόντα οξείδωσης και ξένα αιωρούμενα σωματίδια. Η υγρασία αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα δραστικής μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής ενός μονωτικού ελαίου. Συν τοις άλλοις, η ύπαρξη αιωρούμενων σωματιδίων έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία αγώγιμων γεφυρών. Τέλος ο αέρας συνεπάγεται την οξείδωση των υγρών μονωτικών υλικών, γεγονός που οδηγεί στην μείωση της διηλεκτρικής αντοχής τους. Ως εκ τούτου, ο αέρας θα πρέπει να αποκλείεται από τις κατασκευές που χρησιμοποιούν λάδι ως μονωτικό μέσο. [8]

1.1.3. Στερεά μονωτικά υλικά

Στην πράξη, τα περισσότερα συστήματα μόνωσης που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από στερεά μονωτικά υλικά. Σε αντιδιαστολή με τα αέρια και τα υγρά μονωτικά υλικά που ολικώς ή μερικώς αντίστοιχα, ξαναβρίσκουν τη μονωτική τους ικανότητα μετά την «απομάκρυνση» του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τα στερεά μονωτικά υλικά καταστρέφονται μόνιμα. Ο μηχανισμός διάσπασης των στερεών μονωτικών είναι σύνθετο φαινόμενο και εξαρτάται από το χρονικό διάστημα εφαρμογής της τάσης. [12]

Τα στερεά μονωτικά υλικά, τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των μονωτήρων, είναι η πορσελάνη και το γυαλί για το εξωτερικό κέλυφος και παίζουν το ρόλο του διηλεκτρικού στον μονωτήρα, καθώς επίσης και το τσιμέντο και διάφορα λιπαντικά που χρησιμοποιούνται στα εσωτερικά τμήματα. Τα υλικά αυτά περιγράφονται στη συνέχεια.

1.1.3.1. Πορσελάνη και Κεραμικά υλικά

Τα κεραμικά και η πορσελάνη, ως μονωτικά υλικά, είναι κατάλληλα για όλες τις περιπτώσεις που απαιτούν θερμικά υψηλής τάσης μονώσεις, όπως οι θερμαντήρες βύθισης, τα μπουζί ή οι θερμικά αγωγίμες μονώσεις που συναντώνται στην συναρμολόγηση ημιαγωγών ισχύος. Παράλληλα, λόγω της εξαιρετικά πυκνής πορώδους επιφάνειας (υαλοπίνακες), χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντοχή στις καιρικές συνθήκες και αδιαπερατότητα έναντι της επίδρασης χημικών. Μόνο το υδροφθορικό οξύ, το συμπυκνωμένο φωσφορικό οξύ, το υδροξείδιο του νατρίου μακράς δράσης και το υδροξείδιο του καλίου έχει διαπιστωθεί ότι μπορούν να διαβρώσουν τα τζάμια πορσελάνης. Η επιφανειακή αντίσταση των στέρεων μονωτικών υλικών μειώνεται έντονα σε συνθήκες σχετικής υγρασίας του αέρα πάνω από 80%. Παράλληλα, η μη διατήρηση καθαρού μέρους της επιφάνειάς τους έχει ιδιαίτερα αρνητική επίδραση. Οι σύνθετοι μονωτές σιλικόνης έχουν σημαντικά καλύτερες υδρόφοβες ιδιότητες, δηλαδή υδατοαπωθητικές ιδιότητες, και στην περίπτωση δύσκολων συνθηκών περιβάλλοντος, αντικαθιστούν όλο και περισσότερο τους μονωτές πορσελάνης. Επιπλέον, κεραμικές ουσίες και οξειδία μετάλλων χρησιμοποιούνται ως διηλεκτρικά πυκνωτών σε χαμηλότερες τάσεις, όπως σιδηροηλεκτρικά κεραμικά με εξαιρετικά υψηλή διαπερατότητα ή λεπτά στρώματα οξειδίου αργιλίου σε ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές. Σε μπουζί, χρησιμοποιούνται

μονωτές από κεραμικά οξειδίου του αλουμινίου. Η εκτεταμένη χρήση των μπουζί στην αυτοκινητοβιομηχανία οδηγεί στο γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό κεραμικών για εφαρμογές υψηλής τάσης χρησιμοποιείται σε αυτόν τον τομέα. [25]

Για την κατασκευή μονωτικών πορσελάνης, οι μεταλλικές πρώτες ύλες είναι το άστριο (πυριτικό αλκαλικό αλουμίνιο), η καολίνη (πυριτικό αργίλιο) και το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Ειδικότερα, το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) που χρησιμοποιείται σαν μονωτικό υλικό στις διατάξεις των μονωτήρων, αποτελείται από κεραμικά υλικά. Το SiO_2 είναι ένα στερεό που αποτελείται από ένα άτομο SI που ενώνεται με ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς με τέσσερα άτομα οξυγόνου. Τα άτομα του οξυγόνου είναι τετραεδρικά διατεταγμένα γύρω από κάθε άτομο SI, και κάθε άτομο οξυγόνου ενώνεται επιπλέον με δύο άτομα SI με ομοιοπολικό επίσης δεσμό, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκύπτει ένα υλικό με μεγάλη σκληρότητα, υψηλό σημείο τήξης, κακή αγωγιμότητα και ελάχιστη διαλυτότητα. Η πορσελάνη αποτελείται από ένα υαλώδες πλέγμα που περιλαμβάνει κρυστάλλους διαφόρων συστατικών από τα αρχικά ορυκτά, το κύριο συστατικό είναι το γυαλί, που στην ιδανική περίπτωση είναι ένα μίγμα πυριτικών αλάτων χωρίς προσμείξεις, όμως στην πραγματικότητα περιέχει παγιδευμένες φυσαλίδες αερίων και θραύσματα από πυρίμαχο υλικό το οποίο οδηγεί σε μεγαλύτερο σημείο τήξεως, και άρα η πορσελάνη είναι ένα υλικό το οποίο μπορεί να δουλεύει σε μεγάλες θερμοκρασίες. Επομένως η πορσελάνη είναι ένα ιδανικό υλικό για εξωτερική χρήση. [26]

1.1.3.2. Πολυμερή υλικά

Τα συνθετικά πολυμερή είναι πολυμερή υλικά που διαθέτουν πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες και μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Οι δύο βασικές κατηγορίες πλαστικών, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της παραμόρφωσής τους σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι τα θερμοπλαστικά (thermoplastic) και τα θερμοσκληρυνόμενα (thermosetting). Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων είναι η απουσία των διασταυρώσεων στα θερμοπλαστικά και η παρουσία τους στα μακρομόρια των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών. Τα θερμοπλαστικά παραμορφώνονται με τη θερμοκρασία, ενώ τα θερμοσκληρυνόμενα όχι και κρατούν την μορφή τους. [5]

Τα πολυμερή υλικά ως στέρεα μονωτικά υλικά, χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές περιπτώσεις, καθώς χαρακτηρίζονται από πλήθος διαφορετικών ιδιοτήτων, επιλογών επεξεργασίας, επιλογών χύτευσης και επιλογών εφαρμογής. Ως εκ τούτου, η ακόλουθη ανάλυση θα εστιάσει μόνο σε μερικά σημαντικά σημεία ως παραδείγματα. Χαρακτηριστικά, τα πολυμερή έχουν σχετικά χαμηλή θερμική σταθερότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις τα θερμοπολυμερή υλικά λιώνουν ελάχιστα πάνω από τους 100 °C. Η εξάρτηση του συντελεστή διάτμησης (ως μέτρο της αντίστασης ενός υλικού έναντι μηχανικής παραμόρφωσης) από τη θερμοκρασία διαφέρει γενικά στις θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα υλικά. Παράλληλα, το βάρος των πολυμερών μονωτικών υλικών είναι πολύ χαμηλότερο σε σύγκριση με των μονωτικών υλικών από πορσελάνη ή γυαλί. Η αντοχή των πολυμερών έναντι των επιδράσεων του καιρού, της ακτινοβολίας και της επίδρασης χημικών ουσιών ή μέσων στο περιβάλλον μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το υλικό. Επομένως, οι δοκιμές συμβατότητας υπό πραγματικές σε κάθε περίπτωση συνθήκες είναι συχνά απαραίτητες πριν από τη χρήση. Εν προκειμένω, προβλήματα όπως η διάχυση της υγρασίας και η υδρολυτική αποσύνθεση (π.χ. στην περίπτωση κολλητικών δεσμών και σύνθετων υλικών) είναι σημαντικά. Οι μέγιστες δυνατές ηλεκτρικές αντοχές μπορούν να επιτευχθούν με πολυμερή (π.χ., λεπτά φύλλα), αλλά εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επεξεργασία. Επί προσθέτως, η αγωγιμότητα των πολυμερών είναι πολύ χαμηλή σε σύγκριση με τις αγωγίμες ουσίες όπως η πορσελάνη και το γυαλί. Οι απώλειες διείσδυσης και πόλωσης εξαρτώνται από τις διπολικές ροπές των μορίων. [25]

Για την δημιουργία πολυμερών υλικών, ενώνονται υλικά τα οποία συνδέονται σταυροειδώς σε πολύπλοκες δομές σχηματίζοντας μακρομόρια. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα καθαρά πολυμερή υλικά είναι τελείως απαλλαγμένα από ξένες ουσίες, και αποτελούνται από ένα βασικό είδος μορίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συγκεκριμένα υλικά σπάνια χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μονωτήρων, καθώς για την κατασκευή αυτών χρησιμοποιούνται συνπολυμερή και ορυκτά υλικά ώστε να προκύπτουν οι επιθυμητές μηχανικές αλλά και ηλεκτρικές ιδιότητες των παραγόμενων υλικών. [26]

1.1.3.3. Σύγκριση στερεών μονωτικών υλικών

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των ιδιοτήτων των στερεών μονωτικών υλικών και θα γίνει μια σύγκριση μεταξύ τους.

Με σκοπό την σύνοψη των βασικών χαρακτηριστικών των κεραμικών μονωτικών υλικών, θα πρέπει να αναφερθούν το υψηλό σημείο τήξεως (χημική σταθερότητα), η μεγάλη χημική αντοχή, η υψηλή αντίσταση στη διάβρωση από χημικά μέσα, το χαμηλό κόστος πρώτης ύλης, αλλά και η υψηλή διαβρεξιμότητα και επικάθιση ρύπανσης, η μεγάλη παραγωγική διαδικασία και ο αυξημένος χρόνος επεξεργασίας, η μικρή μηχανική αντοχή και το μεγάλο βάρος τους.

Ανάμεσα στα βασικά χαρακτηριστικά των πολυμερών μονωτικών υλικών διακρίνεται η δυνατότητα μειωμένης επιφανειακής ρύπανσης, η υδροφοβικότητα, το χαμηλό τους βάρος, η βραχύτερη διαδικασία παραγωγής, η ύπαρξη τρόπων βελτίωσης της απόδοσης και της διάρκειας ζωής, αλλά και η μικρή διάρκεια ζωής, η αποσύνθεση τους λόγω χημικής ή φωτοχημικής προσβολής, το υψηλό κόστος πρώτων υλών και η μειωμένη μηχανική αντοχή.

Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες (πυκνότητα, αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε θλίψη, συντελεστής εφελκυσμού, θερμική αγωγιμότητα, διασταλτικότητα, διηλεκτρική σταθερά, εφαπτομένη απωλειών, Πεδιακή αντοχή και ειδική αντίσταση) των βασικότερων –ως προς τις Υψηλές Τάσεις- μονωτικών υλικών, δηλαδή της υαλώδους πορσελάνης, του σκληρυσμένου γυαλικού, των πολυμερών και των υαλώδων ινών συνδεδεμένων με ρητίνη.

Πίνακας 10: σύγκριση μονωτικών πολυμερών υλικών [4]

Ιδιότητα	Υαλώδης πορσελάνη	Σκληρυσμένο γυαλί	Πολυμερές	Υαλώδεις ίνες συνδεδεμένες με ρητίνη
Πυκνότητα (g/cm)	2.3-3.9	2.5	0.9-2.5	2.1-2.2
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	30-100	100-200	20-35	1300-1600
Αντοχή σε θλίψη (Mpa)	240-820	210-300	80-170	700-750
Συντελεστής εφελκυσμού (Gra)	50-100	7.2	0.6-16	43-60

Θερμική αγωγιμότητα (w/m° K)	1-4	1.0	0.17-0.9	0.2-1.2
Διασταλτικότητα (20-100 C °)	3.5-9.1	8.0-9.5	45-200	7.5-20
Διηλεκτρική σταθερά (50 -60 Hz)	5.0-7.5	7.3	2.3-5.5	2.5-6.5
Εφαπτομένη απωλειών (50 -60 Hz) $\{10^{-3}\}$	20-40	15-50	0.1-0.5	5.0-20
Πεδιακή αντοχή (Kv/mm)	10-20	>25	>25	3.0-20
Ειδική αντίσταση (Ω cm)	10^{11} - 10^{13}	10^{12}	10^{15} - 10^{17}	10^{11} - 10^{14}

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, είναι εμφανή ότι τα πολυμερή μονωτικά υλικά σε σχέση με τα κεραμικά, εμφανίζουν χαμηλότερα πυκνότητα, μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό, χαμηλότερη αντοχή σε θλίψη, χαμηλότερο συντελεστή εφελκυσμού (κυρίως σε σύγκριση με την υαλώδη πορσελάνη), πολύ χαμηλότερη θερμική αγωγιμότητα, πολύ υψηλότερη διασταλτικότητα, χαμηλότερη διηλεκτρική σταθερά, χαμηλότερη εφαπτομένη απωλειών, παρόμοια πεδιακή αντοχή και υψηλότερη ειδική αντίσταση.

Ως εκ τούτου, δεν μπορεί κανείς με σιγουριά να πει ποιο είναι το ιδανικότερο υλικό για την ευρεία χρησιμοποίηση του για μονωτήρες, άρα βγαίνει σαν συμπέρασμα ότι το κάθε υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια συγκεκριμένη εφαρμογή ή για συγκεκριμένες κατηγορίες εφαρμογών.

1.2. Τύποι μονωτήρων

Οι μονωτήρες είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την απομόνωση των ηλεκτροφόρων στοιχείων μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης από τα μη ηλεκτροφόρα [12]. Το πιο συνηθισμένο πεδίο εφαρμογής των μονωτήρων είναι τα δίκτυα μεταφοράς και

διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου και χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να στηρίζουν, να διαχωρίζουν ή να εμπεριέχουν ρευματοφόρους αγωγούς [26].

Η αρχική εφαρμογή των μονωτήρων ήταν σε δίκτυα τηλεγράφων (1835) και χρησιμοποιήθηκαν σε δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος το 1882, οπότε και τέθηκε σε λειτουργία η πρώτη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ελλείψεις που προκλήθηκαν σε σχέση με τους αρχικούς τύπους των μονωτήρων που χρησιμοποιούνταν σε δίκτυα τηλεγράφων, οφείλονταν στις νέες απαιτήσεις που προέκυψαν λόγω των ηλεκτρικών και μηχανικών τάσεων, και οδήγησαν στην άμεση εξέλιξή τους. [4]

Η μόνωση, την οποία παρέχει ο μονωτήρας, οποίος είναι κατασκευασμένος από τα υλικά που ήδη έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, είναι εξωτερική και αυτοεπανερχόμενη. Με τον όρο αυτοεπανερχόμενη εννοείται ότι επηρεάζεται από τις εξωγενείς επιδράσεις, που έχουν σαν αποτέλεσμα μέσω μιας διάσπασης η μόνωση να χάνει τις αρχικές της ιδιότητες, γεγονός που ενδεχομένως να δημιουργήσει σοβαρό πρόβλημα στην ίδια την γραμμή. [13]

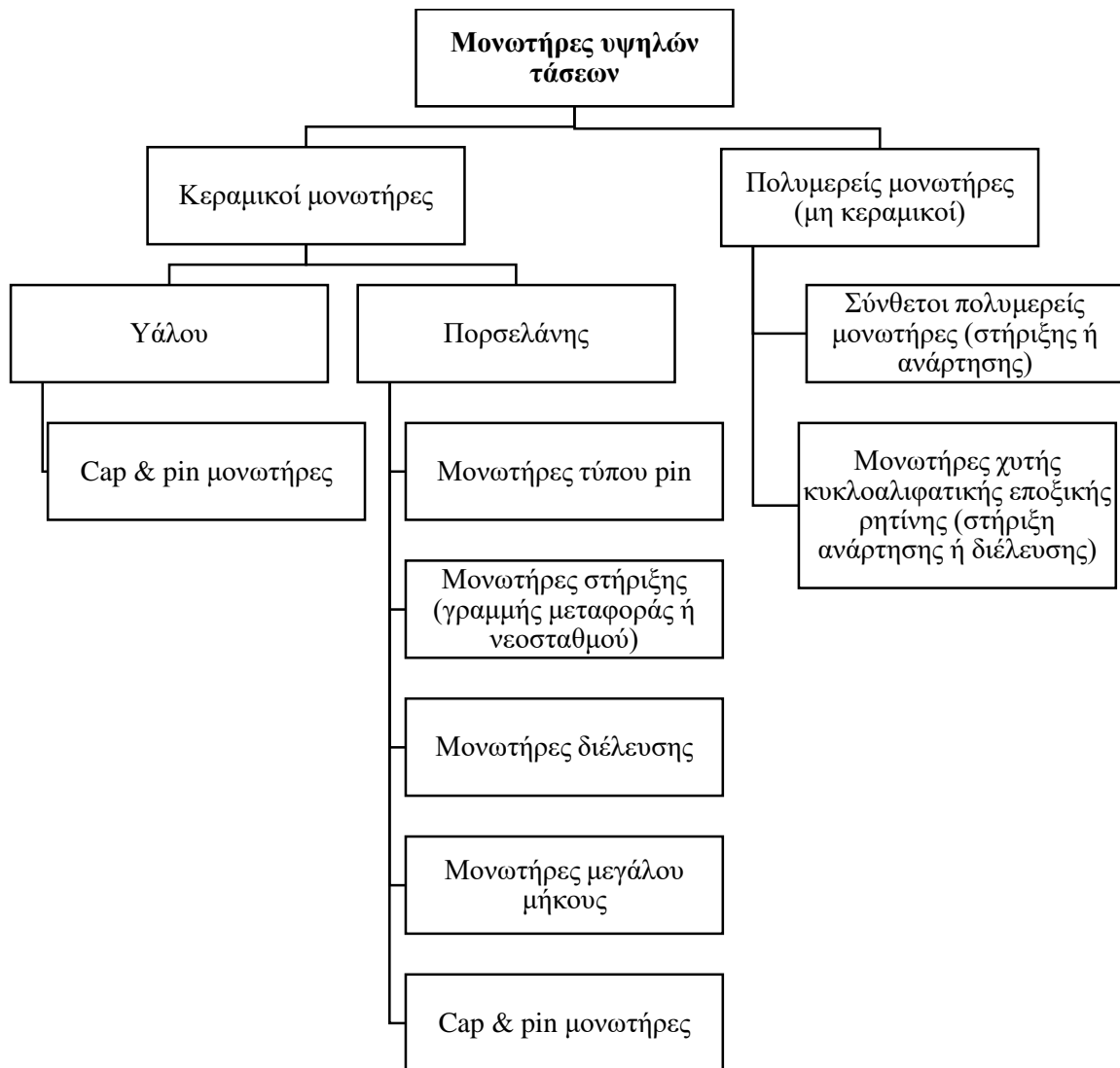
Γενικά ένας μονωτήρας δέχεται πολλών ειδών καταπονήσεις οι οποίες και διαχωρίζονται σε εξωτερικές και εσωτερικές [13]:

- οι εξωτερικές καταπονήσεις, προερχόμενες από κεραυνοπληξίες της ηλεκτρικής γραμμής και διαδιδόμενες μέσω αυτής, καταπονούν με σοβαρές, συχνά, συνέπειες τον εξοπλισμό του δικτύου.
- οι εσωτερικές καταπονήσεις προέρχονται από το γεγονός ακριβώς της λειτουργίας της ηλεκτρικής γραμμής και υποδιαιρούνται:
 - στην τάση βιομηχανικής συχνότητας, με την οποία λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες η ηλεκτρική γραμμή,
 - στις παροδικές υπερτάσεις βιομηχανικής συχνότητας, με διάρκεια της τάξεως του δευτερολέπτου,
 - στις υπερτάσεις χειρισμών, με διάρκεια εκατοντάδων έως χιλιάδων ms.

Για εγκαταστάσεις πάνω από 20kV το υλικό των μονωτήρων είναι είτε κεραμικό (πορσελάνη), είτε γυαλί, είτε συνθετικό (δηλαδή ίνες fiber glass σε συνδυασμό με εποξειδικές ρητίνες). Πέρα από το υλικό, σημαντικό ρόλο στις μονωτικές επιδόσεις των μονωτήρων παίζει και το γεωμετρικό τους σχήμα, καθώς συνδέεται άμεσα με τον

αυτοκαθαρισμός τους, κυρίως από την βροχή, την κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, καθώς και τα μονοπάτια διαρροής.

Στο παρακάτω σχήμα 1 παρουσιάζεται μια ταξινόμηση των κύριων τύπων μονωτήρων σύμφωνα με το υλικό και το σχήμα τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται οι βασικότερες κατηγορίες μονωτήρων.



Σχήμα 1: Κατάταξη μονωτήρων υψηλής τάσης [24]

Ο βασικός διαχωρισμός των μονωτήρων γίνεται με βάση το υλικό κατασκευής τους, και χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τους κεραμικούς και τους συνθετικούς. Το κέλυφος των πρώτων κατασκευάζεται από πορσελάνη ή από γυαλί, ενώ το κέλυφος των συνθετικών κατασκευάζεται από υλικά όπως η σιλικόνη (silicone rubber). Η πρώτη κατηγορία είναι γνωστή από την αρχική ανάπτυξη των δικτύων υψηλής τάσης, και το

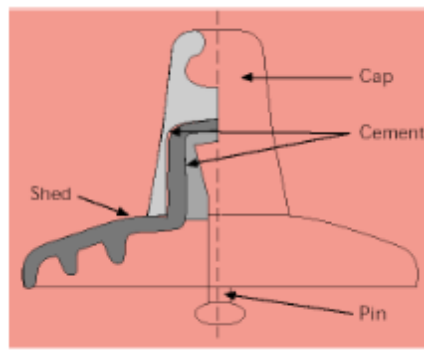
1990 έγιναν η πιο συνηθισμένη επιλογή. Η δεύτερη κατηγορία εμφανίστηκε στην αγορά το 1960 και είχε σκοπό την αντικατάσταση των κεραμικών μονωτήρων λόγω του μεγάλου βάρους που οφειλόταν στα κεραμικά υλικά άλλα και στην κακή συμπεριφορά τους στις συνθήκες ρύπανσης. [13]

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι μονωτήρων που σήμερα χρησιμοποιούνται στις πραγματικές εγκαταστάσεις είναι οι ακόλουθοι [13]:

- Κεραμικοί μονωτήρες
- Cap & Pin
- Γυαλιού
- Πορσελάνης Cap & Pin
- Τύπου Pin
- Στήριξης
- Διέλευσης
- Μεγάλου μήκους
- Μη Κεραμικοί μονωτήρες (Πολυμερείς)
- Σύνθετοι πολυμερείς (Στήριξης ή Διέλευσης)
- Χυτής κυκλοαλιφατικής εποξειδικής ρητίνης

Μονωτήρες τύπου cap & pin

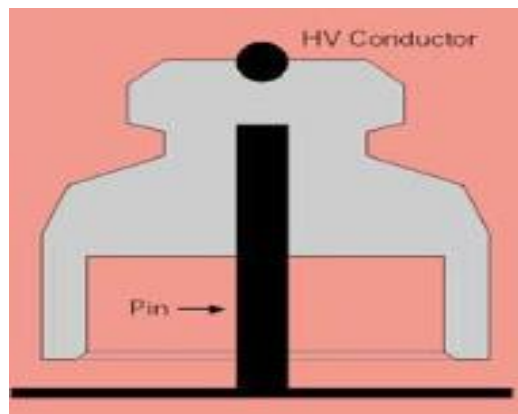
Οι μονωτήρες τύπου cap and pin κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί. Η αλυσίδα μονωτήρων αποτελείται από μεμονωμένους μονωτήρες που συνδέονται μέσω χαλύβδινων καλυμμάτων (caps) και πείρων (pins). Αυτές οι αλυσίδες χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς. Τα καλύμματα και ο πείρος είναι στερεωμένα στο γυάλινο ή πορσελάνινο δίσκο με τσιμέντο. Οι κωνικές μορφές των συναρμολογήσεων εξασφαλίζουν υψηλή μηχανική αντοχή κατά την άσκηση δυνάμεων εφελκυσμού. [3]



Εικόνα 9: Μονωτήρας τύπου cap & pin [3]

Μονωτήρες πορσελάνης τύπου pin

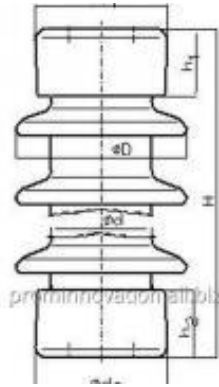
Οι μονωτήρες πορσελάνης τύπου pin χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για τηλεφωνικές γραμμές και αλεξικέραυνα. Κατόπιν τροποποιήσεων χρησιμοποιείται στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 10: Μονωτήρας πορσελάνης τύπου pin [3]

Μονωτήρες στήριξης

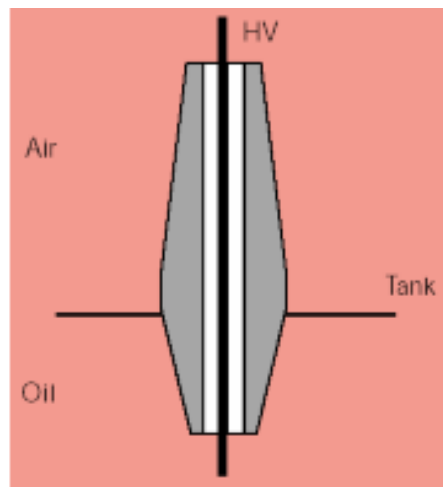
Οι μονωτήρες στήριξης αποτελούνται από ένα συμπαγή κύλινδρο πορσελάνης με κυματοειδείς πτυχές, για να αυξάνεται το μήκος ερπυσμού, και από μεταλλικά ηλεκτρόδια σε κάθε άκρη. Οι μονωτήρες στήριξης έχουν μεγάλο μήκος. Χρησιμοποιούνται οριζόντια ή κάθετα για να στηρίξουν τον αγωγό υψηλής τάσης και τοποθετούνται στις βάσεις ή στους εγκάρσιους βραχίονες των γραμμών μεταφοράς [3]



Εικόνα 11: Μονωτήρας Στήριξης

Μονωτήρες διέλευσης

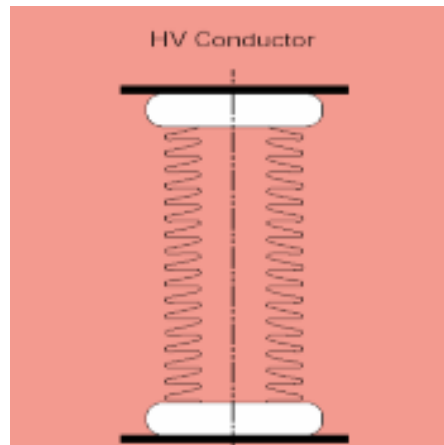
Οι μονωτήρες διέλευσης χρησιμοποιούνται για την μόνωση αγωγών των ακροδεκτών υψηλής τάσης κυρίως μετασχηματιστών ή άλλων διατάξεων, και το σύνηθες υλικό κατασκευής τους είναι η πορσελάνη. [3]



Εικόνα 12: Μονωτήρας διέλευσης [3]

Μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους

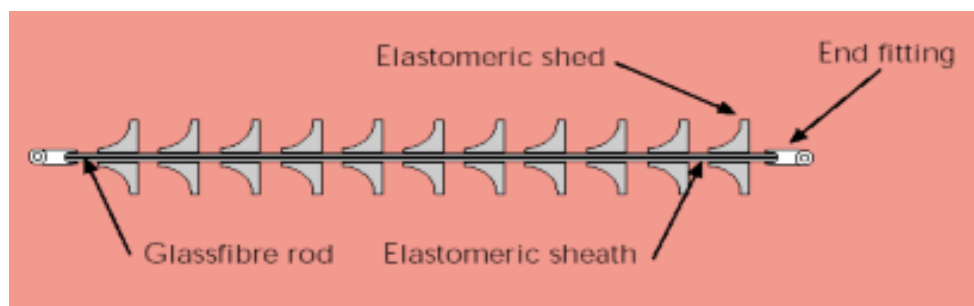
Οι μονωτήρες πορσελάνης μεγάλου μήκους προσομοιάζουν με τους μονωτήρες στήριξης. Ωστόσο είναι ελαφρύτεροι και λεπτότεροι. [3]



Εικόνα 13: Μονωτήρας μεγάλου μήκους [3]

Σύνθετοι πολυμερείς μονωτήρες

Οι σύνθετοι πολυμερείς μονωτήρες είναι παρόμοιοι σχηματικά με τους πορσελάνινους μονωτήρες μεγάλου μήκους. Ωστόσο διαφέρουν ως προς τα υλικά κατασκευής. Ένας σύνθετος πολυμερής μονωτήρας αποτελείται από έναν πυρήνα ρητίνης ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, ένα ελαστομερές περίβλημα προστασίας του πυρήνα και ελαστομερείς δίσκους για την αύξηση του μήκους ερπυσμού. [3]



Εικόνα 14: Σύνθετος πολυμερής μονωτήρας [3]

Μονωτήρες κυκλοαλιφατικής εποξικής ρητίνης

Η κυκλοαλιφατική ρητίνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χυτευτούν μονωτήρες παρόμοιοι με τους πορσελάνης και τύπου line post για διανομή των τάσεων. Σε περιβάλλον με κακές καιρικές συνθήκες οι επιφάνειες των μονωτήρων αυτών γίνονται

τραχιές, γεγονός που μπορεί να έχει επιπτώσεις στην αξιοπιστία του μονωτήρα, αν δεν ληφθεί υπόψη. [3]

Προβλήματα και ιδιότητες μονωτήρων

Ένα σημαντικό πρόβλημα που ενδέχεται να προκύψει στην χρήση ενός μονωτήρα γραμμής, είναι η περίπτωση που σπάσει μηχανικά και «κοπεί» η γραμμή. Σε αυτήν την περίπτωση οι μονωτήρες των γειτονικών πυλώνων θα πρέπει να δύνανται να αναλάβουν το επιπλέον φορτίο και ταυτόχρονα να μην καταπονηθούν μηχανικά. Ο τρόπος αποφυγής προβλημάτων τέτοιου είδους είναι ο ορθός σχεδιασμός των μονωτήρων.

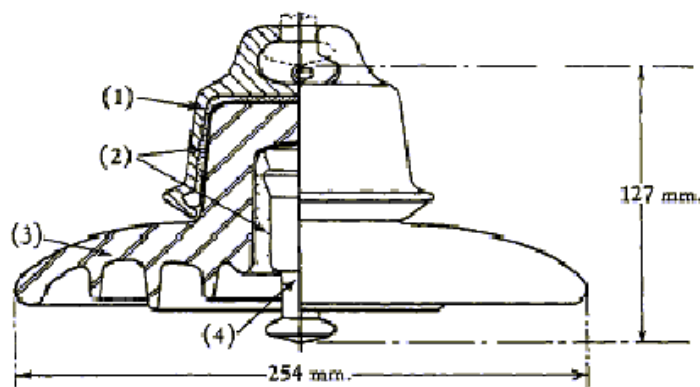
Η σημαντικότερη διαφορά μεταξύ των κύριων κατηγοριών μονωτήρων, δηλαδή αυτών που έχουν κατασκευαστεί από πολυμερή και αυτών που έχουν κατασκευαστεί από κεραμικά υλικά, είναι η σταθερότητά τους. Ειδικότερα, Οι ισχυροί ηλεκτροστατικοί δεσμοί πυριτίου – οξυγόνου που συγκρατούν τα κεραμικά υλικά (πορσελάνη και γυαλί) έχουν σαν αποτέλεσμα το υψηλό σημείο τήξεως, τη μεγάλη μηχανική αντοχή (αλλά και το εύθραυστο) και υψηλή αντίσταση διάβρωσης από χημικά μέσα [4]. Από αυτήν την άποψη, όταν συγκρίνουμε τις βασικές φυσικές ιδιότητες, τα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού πολυμερή, που είναι περισσότερο ελαστικά, φαίνεται να πλεονεκτούν έναντι των στέρεων πλην όμως εύθραυστων κεραμικών υλικών [3].

Σημαντικό πρόβλημα αποτελεί και η υπερπήδηση (flashover), που μπορεί να προκληθεί από υπερτάσεις ή ρύπανση. Σε ότι αφορά την υπερπήδηση που οφείλεται στην ρύπανση, αυτή συνήθως συνδέεται με το μήκος ερπυσμού του μονωτήρα και τις επιφανειακές του ιδιότητες. Η υπερπήδηση που οφείλεται στις υπερτάσεις, συνδέεται με καταπονήσεις, στις οποίες η σημαντικότερη παράμετρος είναι το μήκος του τόξου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι αποδεκτό να επιτρέπουμε επιφανειακές εκκενώσεις στο μονωτήρα, αν αυτό προστατεύει έναν πιο ακριβό εξοπλισμό από μια πολύ μεγάλη υπέρταση. [3]

1.2.1. Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το υλικό κατασκευής

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των μονωτήρων είναι ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους. Έτσι ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους, οι μονωτήρες χωρίζονται σε [1]:

- **Μονωτήρες Πορσελάνης:** Η πορσελάνη είναι σύνθετη ύλη από αργίλιο, πυρίτιο και μαγνήσιο. Προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της επίδρασης του περιβάλλοντος, αύξηση της επιφανειακής αντίστασης και ομογενές ηλεκτρικό πεδίο στους μονωτήρες, η πορώδης επιφάνειά τους καλύπτεται με διηλεκτρικά υλικά κρυσταλλικής μορφής, ελαττώνοντας έτσι τις απώλειες. Οι μονωτήρες από πορσελάνη είναι κατάλληλοι για χρήση σε σχετικά υψηλές τάσεις, αλλά σε χαμηλές συχνότητες.
- **Μονωτήρες Γυαλιού:** Το γυαλί έχει χαρακτηριστικά μονωτικού υλικού (σχετικά μεγάλη διηλεκτρική σταθερά και ειδική αντίσταση, όπως και μικρό θερμικό συντελεστή). Είναι μίγμα διαφόρων πυριτικών αλάτων (κυρίως του Na ή του K και του Ca), παρουσιάζεται με τη μέθοδο της σύντηξης λεπτής άμμου χαλαζία και CaCO_3 , Na_2CO_3 ή K_2CO_3 . Η οριακή του θερμοκρασία είναι άνω των 200°C . Κατασκευάζεται σε λεπτά φύλλα πάχους μέχρι $10\mu\text{m}$.
- **Κεραμικοί μονωτήρες υψηλής συχνότητας:** Σαν κεραμικό υψηλής συχνότητας χρησιμοποιείται ο στεατίτης. Ανάλογα με την περίπτωση χρήσης τους διακρίνονται σε:
 - μονωτήρες για υψίσυχνες κεραίες
 - εξαρτήματα στήριξης
 - κεραμικά πυκνωτών
 - πορώδη κεραμικά



Εικόνα 15: Τυπικός cap and pin μονωτήρας (1): Γαλβανισμένη μεταλλική θήκη(cap), (2): Τσιμέντο, (3): Πορσελάνη, (4): μεταλλικός πείρος (pin)

- **Μονωτήρες εποξειδικής ρητίνης:** Χρησιμοποιείται γιατί είναι φθηνότερη από την πορσελάνη, και δεν παρουσιάζει τεχνικά προβλήματα στην κατασκευή μονωτήρων.

Το μειονέκτημά της είναι ότι όταν υπόκειται σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, και υπό την επίρεια των ατμοσφαιρικών συνθηκών, δημιουργείται μία αποσύνθεση και απελευθέρωση άνθρακα, ιδιαίτερα κοντά στους σπλισμούς του μονωτήρα.

1.2.2. Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τον τρόπο στήριξης

Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των μονωτήρων είναι ανάλογα με τον τρόπο στήριξης τους, δηλαδή με το πώς εγκαθίστανται στην εφαρμογή που προορίζονται να χρησιμοποιηθούν. Ανάλογα με τον τρόπο στήριξής τους, οι μονωτήρες διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες [1]:

- **Μονωτήρες ανάρτησης:** Χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάρτηση των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, και αποτελούνται από μία ή δύο σειρές δισκοειδών μονωτήρων, διατεταγμένων σε μορφή αλύσου. Το πλήθος των δισκοειδών μονωτήρων σε μια διάταξη αλύσου, εξαρτάται προφανώς από την τάση λειτουργίας της γραμμής και από τη διηλεκτρική αντοχή έκαστου δισκοειδούς μονωτήρα.
- **Μονωτήρες στήριξης:** Χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αγωγών υψηλής τάσης και διακρίνονται σε μονωτήρες μεταφοράς και μονωτήρες σταθμών.
- **Μονωτήρες γραμμής:** Χρησιμοποιούνται στις γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι 70kV.
- **Μονωτήρες διέλευσης:** Χρησιμοποιούνται στις θέσεις εξόδου των αγωγών από τους μετασχηματιστές.

1.2.3. Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με τους χώρους χρήσης

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των μονωτήρων μπορεί να γίνει ανάλογα με τον χώρο θα χρησιμοποιηθούν αλλά και με την μορφή που έχουν. Ανάλογα με τους χώρους χρήσης και κατ' επέκταση, με τον ειδικό τρόπο σχεδίασής τους, διακρίνονται οι εξής τύποι μονωτήρων [1]:

- **Τύπου ομίχλης:** Χρησιμοποιούνται σε περιοχές όπου επικρατούν συνθήκες έντονης ρύπανσης (συνήθως, κοντά σε βιομηχανικές ή παραθαλάσσιες περιοχές). Οι μονωτήρες αυτοί έχουν μεγάλο μήκος ερπυσμού και τέτοια διαμόρφωση της

εξωτερικής επιφάνειας, ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή προστασία έναντι επικαθίσεως ακαθαρσιών.

- **Κανονικού τύπου:** Χρησιμοποιούνται σε σύνηθες περιβάλλον και έχουν μικρότερο μήκος ερπυσμού.
- **Εσωτερικού τύπου:** Χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους, κυρίως σε κλειστούς υποσταθμούς.

1.2.4. Κατηγορίες μονωτήρων ανάλογα με το σχήμα και τη χρήση τους

Ανάλογα με το σχήμα και τη χρήση τους, οι μονωτήρες χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες (Τσουκανέλης, 2011) :

- **Μονωτήρες πορσελάνης τύπου pin:** Αυτός ο τύπος μονωτήρων χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τις τηλεφωνικές γραμμές και τα αλεξικέραυνα, ενώ στη συνέχεια τροποποιήθηκε για να χρησιμοποιηθεί στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές παραλλαγές του είναι ακόμα σε χρήση στα συστήματα μέσης τάσης.
- **Μονωτήρες τύπου cap & pin:** Οι μονωτήρες αυτοί κατασκευάζονται από πορσελάνη ή γυαλί και είναι βασισμένοι στις ίδιες κατασκευαστικές αρχές με τους μονωτήρες τύπου pin. Ένας αριθμός τέτοιων μονάδων συνδέεται μέσω χαλύβδινων καλυμμάτων (caps) και πείρων (pins), σχηματίζοντας μια αλυσίδα μονωτήρων. Αυτές οι αλυσίδες χρησιμοποιούνται ως μονωτήρες ανάρτησης και στήριξης γραμμών μεταφοράς. Τα καλύμματα και ο πείρος είναι στερεωμένα στο γυάλινο ή πορσελάνινο δίσκο με τσιμέντο. Οι κωνικές μορφές των συναρμολογήσεων εξασφαλίζουν υψηλή μηχανική αντοχή κατά την άσκηση δυνάμεων εφελκυσμού.

Στους μονωτήρες τύπου «pin» και τύπου «cap & pin», η συντομότερη απόσταση μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων μέσω της πορσελάνης ή του γυαλιού, είναι λιγότερη από το 50% της συντομότερης απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων μέσω του αέρα.

1.3. Ρύπανση και Διάτρηση

Ο σημαντικότερος εχθρός των στερών μονωτικών υλικών είναι η ρύπανση καθώς επηρεάζει την μονωτική ικανότητα των υλικών, ειδικά όταν είναι τοποθετημένα σε εξωτερικό χώρο. Ο όρος ρύπανση αναφέρεται στην επικάθιση διαφόρων ακαθαρσιών στην επιφάνεια του μονωτήρα, που οφείλονται στα διάφορα σωματίδια που μεταφέρει ο ατμοσφαιρικός αέρας ή η θαλάσσια άλμη. Πιο συγκεκριμένα, η ρύπανση στην επιφάνεια ενός μονωτικού υλικού μπορεί να είναι είτε θαλάσσια, όταν το μονωτικό βρίσκεται σε παράκτια περιοχή και οι άνεμοι μεταφέρουν θαλασσινό νερό υπό μορφή σταγονιδίων στην επιφάνεια του, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό ενός λεπτού υγρού αλατούχου επιστρώματος, είτε βιομηχανική, όταν προέρχεται από στερεά κατάλοιπα των βιομηχανιών που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα.

Η θεωρητική ανάλυση αλλά κυρίως η πρακτική αντιμετώπιση του φαινομένου της ρύπανσης των μονωτήρων, ενέχει πολλές δυσκολίες, και το πρόβλημα γίνεται πιο έντονο για τις περιοχές που διαθέτουν νησιωτικά και παράκτια δίκτυα.

1.3.1. Θαλάσσια ρύπανση

Ένα πρώτο είδος ρύπανσης είναι η θαλάσσια ρύπανση. Το είδος αυτό συναντάται σε μονωτήρες που βρίσκονται κοντά σε παραθαλάσσιες περιοχές. Οι άνεμοι που πλέουν σε αυτές τις περιοχές μεταφέρουν μαζί τους θαλασσινό νερό με την μορφή του καταιωτισμένου νερού, το οποίο επικάθεται στην επιφάνεια του μονωτήρα και δημιουργεί ένα αλατούχο στρώμα. [13]

1.3.2. Βιομηχανική ρύπανση

Ένα δεύτερο είδος ρύπανσης είναι η βιομηχανική ρύπανση. Αυτό το είδος ρύπανσης εμφανίζεται σε μονωτήρες που βρίσκονται εντός βιομηχανικής περιοχής, και οφείλεται στα στερεά κατάλοιπα που αποβάλλουν στην ατμόσφαιρα οι βιομηχανίες. [13]

Υπάρχει πιθανότητα οι δυο παραπάνω κατηγορίες ρύπανσης να συνυπάρχουν οδηγώντας με αυτό τον τρόπο στη μείωση της μονωτικής ικανότητας των υλικών σε μεγάλο βαθμό (από 40% ~ 80%), με αποτέλεσμα την ευκολότερη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου που θα προκαλέσει καταστροφή του ίδιου του μονωτήρα αλλά και περαιτέρω του (Σταθόπουλος, 1991).

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 815/1986 έχει γίνει κατηγοριοποίηση των περιοχών ανάλογα με το ποσοστό ρύπανσης και αυτό μας το δείχνει ο πίνακας 3:

Πίνακας 11: Κατηγοριοποίηση επιπέδων ρύπανσης

Επίπεδο ρύπανσης	Ελάχιστο ειδικό μήκος ερπυσμού(mm/KV)
Ελαφριά	16
Μεσαία	20
Βαριά	25
Πολύ βαριά	31

Για κάθε επίπεδο ρύπανσης που αναφέρεται στον πίνακα 4 υπάρχει και ένα ελάχιστο ονομαστικό ειδικό μήκος ερπυσμού που μετριέται σε mm/KV και δείχνει την υψηλότερη τιμή πολιτικής τάσης που μπορεί να εφαρμοστεί στον μονωτήρα [4].

Πίνακας 12: Επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815

Επίπεδο ρύπανσης	Παράδειγμα τυπικού περιβάλλοντος
I. Ελαφριά	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και με μικρή πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης. • Περιοχές με μικρή πυκνότητα βιομηχανιών ή κατοικιών, αλλά εκτεθειμένες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις. • Αγροτικές περιοχές. • Ορεινές περιοχές. <p>Όλες αυτές οι περιοχές πρέπει να βρίσκονται τουλάχιστον 10km με 20km από τη θάλασσα και δεν πρέπει να εκτίθενται σε ανέμους κατ' ευθείαν από τη θάλασσα.</p>
II. Μεσαία	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές με βιομηχανίες, οι οποίες δεν παράγουν ιδιαίτερα ρυπασμένο καπνό, και/ή με μέση πυκνότητα κατοικιών εξοπλισμένων με εγκατάσταση θέρμανσης. • Περιοχές με υψηλή πυκνότητα κατοικιών και/ή βιομηχανιών, αλλά εκτεθειμένες σε συχνούς ανέμους και/ή βροχοπτώσεις. • Περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους από τη θάλασσα, αλλά όχι πολύ κοντά στην ακτή (τουλάχιστον σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων ανάλογα με τη μορφολογία της παράκτιας περιοχής και τις συνθήκες ανέμου).

III. Βαριά	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές με υψηλή πυκνότητα βιομηχανιών και προάστια μεγάλων πόλεων με υψηλή πυκνότητα εγκαταστάσεων θέρμανσης, οι οποίες παράγουν ρύπανση. • Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή κάθε περιοχή που εκτίθεται σε σχετικά ισχυρούς ανέμους από τη θάλασσα.
IV. Πολύ βαριά	<ul style="list-style-type: none"> • Περιοχές περιορισμένης έκτασης εκτεθειμένες σε αγωγήμη σκόνη και βιομηχανικό καπνό προκαλώντας αγωγήμες εναποθέσεις σημαντικού πάχους. • Περιοχές περιορισμένης έκτασης, οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά σε ακτή και εκτίθενται σε ψεκασμό θαλασσινού νερού ή σε πολύ δυνατό και ρυπασμένο αέρα από τη θάλασσα. • Περιοχές ερήμου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έλλειψη βροχής για μεγάλες χρονικές περιόδους, εκτίθενται σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι και υποβάλλονται σε κανονική συμπίκνωση.

1.3.3. Αποτελέσματα ρύπανση

Όσο αυξάνεται η ρύπανση σε ένα στερεό μονωτικό υλικό, προκαλεί ζημιά η οποία μπορεί να είναι από πολύ μικρή έως τέτοια που να προκαλέσει και μόνιμη ζημιά στην δομή του μονωτικού, και άρα στην συμπεριφορά του μονωτικού υλικού. Συνηθισμένο αποτέλεσμα είναι η διάτρηση η οποία καταστρέφει εντελώς το μονωτικό υλικό. Οι συνήθεις λόγοι που τα μονωτικά υλικά καταστρέφονται είναι οι εξής [2]:

1. Οι απώλειες Joule
2. Οι δυνάμεις Coulomb
3. Οι μερικές εκκενώσεις
4. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

Οι αντίστοιχες προς τα παραπάνω μορφές της διάτρησης είναι [2]:

1. Η θερμική διάτρηση
2. Η ηλεκτρική διάτρηση
3. Η ηλεκτροχημική διάτρηση ή τεχνητή γήρανση
4. Η θερμοχημική διάτρηση

1.3.3.1. *Θερμική διάτρηση*

Το φαινόμενο της θερμικής διάτρησης προκαλείται σε χαμηλές τιμές τάσης όταν το υλικό καταπονείται θερμικά λόγω των απωλειών Joule (συνήθως οφείλονται σε παράγοντες ρύπανσης). Σαν αποτέλεσμα έχει την τήξη ή/και απανθράκωση του υλικού, ιδιαίτερα σε περιοχές που οι απώλειες Joule είναι αυξημένες. Ο οχετός διάτρησης δημιουργείται όταν η ειδική αγωγιμότητα σε κάποιο σημείο του υλικού αποκτήσει την απαιτούμενη για την θερμική διάτρηση οριακή τιμή οπότε ισχύει από τη σχέση 1. [2]

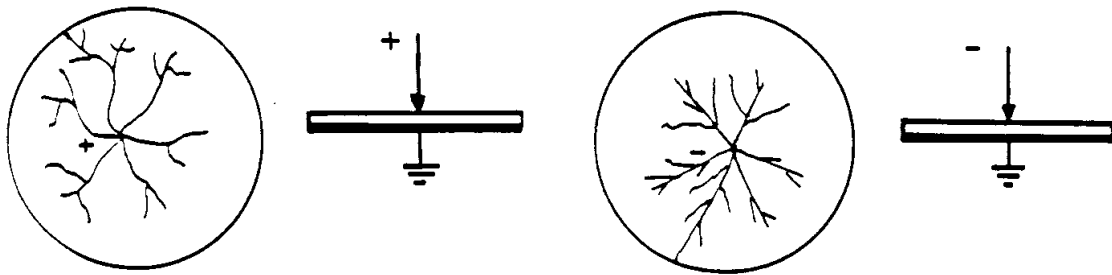
$$\sigma_1 = \sigma_0 = e^{\beta\theta} \quad (1)$$

1.3.3.2. *Ηλεκτρική διάτρηση*

Όταν η ενεργός τιμή της τάσεως που εφαρμόζεται στο δοκίμιο είναι αρκετά μεγαλύτερη από την οριακή τιμή για την θερμική διάτρηση, η πεδιακή ένταση γίνεται μεγαλύτερη και οι ελεύθεροι φορείς μέσα στο υλικό αποκτούν μεγάλη ενέργεια. Συνήθως για τάσεις μεγαλύτερες από την ενεργό τιμή, όταν επέλθει η διάτρηση, αυτό οφείλεται στις δυνάμεις Coulomb. [2]

Η μορφή της διάτρησης που οφείλεται στις δυνάμεις Coulomb ονομάζεται ηλεκτρική και έχει δενδροειδή μορφή ή την μορφή οχετού και τη διεύθυνση του πεδίου. [2]

Η δενδροειδής διάτρηση είναι ένα θερμικό φαινόμενο μικρής χρονικής διάρκειας σε σχέση με την θερμική διάτρηση, γιατί λόγω της μεγαλύτερης τιμής της τάσεως δημιουργείται μεγαλύτερη τιμή πεδιακής έντασης, και συνεπώς δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια με κρούσεις. Η διάτρηση συμβαίνει όταν μια διακλάδωση του δεντρίτη ολοκληρώνει την πλήρη αγωγή σύνδεση των ηλεκτροδίων. Στην εικόνα 8 δίνεται ένα παράδειγμα με την μορφή του δεντρίτη ανάλογα με την πολικότητα της τάσης. [2]



Εικόνα 8: Η μορφή του δενδρίτη [2]

Στην περίπτωση της θετικής ακίδας ο δενδρίτης, έχει αρκετές διακλαδώσεις λόγω των δυνάμεων Coulomb που εξασκούνται μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων κατά την κίνησή τους προς την ακίδα, οι οποίες διακλαδώσεις είναι κατά κανόνα μη ευθύγραμμες [5].

Όταν όμως η ακίδα είναι αρνητική, οι δυνάμεις απομάκρυνσης μεταξύ των ελεύθερων αρνητικών ηλεκτρικών φορέων είναι, λόγω της μεγάλης ακτίνας, μικρότερες και έτσι οι διαδρομές είναι περίπου οι ακτίνες του κύκλου, των οποίων όμως η λαμπρότητα μειώνεται προς την περιφέρειά του. Υπάρχει δηλαδή, ανάλογα με την πολικότητα της ακίδας, ομοιότητα με τις εικόνες Lichtenberg κατά τη μέτρηση κεραυνών. [2]

Όταν όμως δημιουργείται διάτρηση με την μορφή του οχετού, και σε αντίθεση με την δενδροειδή, έχουμε την εμφάνιση την μορφής οχετού σε περιπτώσεις αύξησης της ενεργού τιμής της τάσης, και για αυτό τον λόγο η διάτρηση συμβαίνει λόγω των δυνάμεων Coulomb που αναπτύσσονται μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρονίων της διάταξης. Το φαινόμενο έχει χρονική διάρκεια μερικά μs και η εικόνα του υλικού μετά την καταπόνηση έχει την μορφή μια ακαριαίας άσκησης δυνάμεων στην περιοχή όπου η πεδιακή ένταση είναι ιδιαίτερα αυξημένη. [2]

Κατά την καταπόνηση οργανικών στερεών μονωτικών υλικών με κρουστικές τάσεις, έχει διαπιστωθεί ότι πάνω από μία μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, συμβαίνει η διάτρηση με μία κρούση υπό μορφή οχετού, αν και η τιμή της πεδιακής έντασης είναι αρκετά μικρότερη από εκείνη κατά την ηλεκτρομηχανική διάτρηση υπό εναλλασσόμενη τάση καταπόνησης. Η μορφή της διάτρησης αυτής χαρακτηρίζεται επίσης ως ηλεκτρομηχανική. Το φαινόμενο έχει αποδοθεί στην απότομη μεταβολή της πεδιακής έντασης, λόγω της οποίας δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την ηλεκτρομηχανική διάτρηση από τις δυνάμεις Coulomb

μεταξύ του αρνητικού ηλεκτροδίου και των θετικών ηλεκτρικών φορέων, που συγκρατούνται στο πλέγμα των μορίων. [2]

1.3.3.3. Τεχνητή διάτρηση

Κατά την καταπόνηση ενός στερεού μονωτικού υλικού με κάποια μορφή τάσης, εναλλασσόμενη, κρουστική ή συνεχής, διαπιστώνει κανείς ότι μετά από κάποια τιμή της τάσης, εμφανίζονται μερικές εκκενώσεις. Η γήρανση του μονωτικού υλικού στο εργαστήριο με τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων χαρακτηρίζεται ως τεχνητή γήρανση. Η τεχνητή αυτή γήρανση του στερεού μονωτικού δεν ανταποκρίνεται βέβαια στην πραγματική κατάσταση που δημιουργείται με την πάροδο του χρόνου (όταν το υλικό εργάζεται υπό ονομαστικά μεγέθη στο δίκτυο). Ένα κριτήριο αξιολόγησης που έχει προταθεί, βασισμένο στην έναρξη της τεχνητής γήρανσης, είναι ο φαινόμενος συντελεστής ανομοιογενειών. Ο συντελεστής έχει ορισθεί ως το πηλίκο της τάσης έναρξης των μερικών εκκενώσεων προς την τάση της διηλεκτρικής δοκιμής που προβλέπεται στις προδιαγραφές, ανάλογα με την ονομαστική τάση και τη μορφή της εφαρμοζόμενης τάσης. [2]

1.3.3.4. Η θερμοχημική διάτρηση

Η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής είναι δεδομένη κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος μέσου, γιατί η παραγωγή ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων γίνεται μεγαλύτερη. Στα πολυμερή μονωτικά υλικά μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι εξασθενούν οι δεσμοί των μορίων και επομένως η ενέργεια εξόδου των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων από το πλέγμα των μορίων είναι μικρότερη. [2]

Η διάτρηση που προκαλείται μόνο από τη θερμότητα του περιβάλλοντος στερεού μονωτικού μέσου, ονομάζεται θερμοχημική. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι, μετά από μία τιμή της τάσης, η θερμοχημική διάτρηση δεν αντιμετωπίζεται με την αύξηση του πάχους της μόνωσης. Η τάση αυτή ονομάζεται θερμική τάση ανατροπής. Η τάση αυτή αποτελεί το κριτήριο για το τεχνοοικονομικό πάχος στερεών μονωτικών στις πρακτικές εφαρμογές (όπως μετασχηματιστές, καλώδια κτλ.). Η τιμή δίνεται για τα περισσότερα υλικά, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C και καταπόνηση με εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 50 Hz και είναι της τάξης του 1MV. Πρόσφατες έρευνες σε στερεά μονωτικά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο περιβάλλον μέσο του στερεού μονωτικού ενισχύει τις μερικές εκκενώσεις, με

αποτέλεσμα τη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Έχει διαπιστωθεί ότι οι μερικές εκκενώσεις εκδηλώνονται, λόγω της θερμότητας του περιβάλλοντος, σε μικρότερες τιμές της τάσης από ότι σε κανονική θερμοκρασία 20 °C, με αποτέλεσμα να συμβαίνει ο ιονισμός με κρούσεις σε αρκετά μικρότερες τιμές του πεδίου από ότι κατά την καταπόνηση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C. [2]

1.4.Υπερπήδηση

Η διηλεκτρική αντοχή των υλικών κατασκευής των μονωτήρων είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του περιβάλλοντος αέρα, άρα και η ηλεκτρική καταπόνηση αυτών των υλικών είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με την καταπόνηση του αέρα. Όταν η μεταξύ των δύο ακρότατων σημείων του μονωτήρα επιβαλλόμενη τάση υπερβεί μια κρίσιμη τιμή, σημειώνεται υπερπήδηση (flashover, uberschlag), δηλαδή γεφύρωση με ηλεκτρικό τόξο, η οποία οδεύει διαμέσου του αέρα του διακένου μεταξύ του σημείου πρόσδεσης του αγωγού της γραμμής στο μονωτήρα και του προσγειωμένου σημείου στήριξης ή ανάρτησης του μονωτήρα. Η υπερπήδηση επέρχεται εν μέρει λόγω επιφανειακών εκκενώσεων, οι οποίες έρπονται πάνω στην επιφάνεια του μονωτήρα (η οποία σημειωτέον είναι επιφάνεια διαχωρισμού δύο διαφορετικών διηλεκτρικών, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την ένταση του Ηλεκτρικού Πεδίου στην περιοχή αυτή), και εν μέρει λόγω διάσπασης στρωμάτων αέρα. Το δημιουργούμενο κατά την υπερπήδηση ηλεκτρικό τόξο έρχεται σε επαφή με το στερεό μονωτικό, προκαλώντας καταστροφή του υαλώδους επιχρίσματός του. Η επιφανειακή αγωγιμότητα που προκαλεί την υπερπήδηση παραμένει, ακόμα κι όταν το τόξο έχει εξαλειφθεί από τη λειτουργία της προστασίας, γεγονός που επιτρέπει να ακολουθήσουν κι άλλες υπερπηδήσεις. Με άλλα λόγια, καθορίζεται (κατά ένα ποσοστό τουλάχιστον 50%) η «οδός διέλευσης» νέου ηλεκτρικού τόξου που ενδεχομένως θα λάβει χώρα στο μέλλον. Για το λόγο αυτό συνήθως εφαρμόζονται στους μονωτήρες προστατευτικοί δακτύλιοι ή κερατίδια, με τα οποία «υποδεικνύεται» στο ηλεκτρικό τόξο η «οδός διέλευσής» του, μακριά από το στερεό μονωτικό. (Σταθόπουλος, 1991)

Το φαινομενικό παράδοξο στην υπερπήδηση μονωτήρων λόγω ρύπανσης είναι ότι παράγονται καταστροφικές ηλεκτρικές εκκενώσεις, που επεκτείνονται σε μέτρα αέρα, από ηλεκτρικά δυναμικά τα οποία, σε κανονικές συνθήκες, θα μπορούσαν να αναχαιτιστούν από διάκενα αέρα μήκους λίγων εκατοστών. Με κάποιον τρόπο, η παρουσία δυσδιάκριτων αγωγίμων σωματιδίων, τα οποία επικάθονται σε μια επιφάνεια

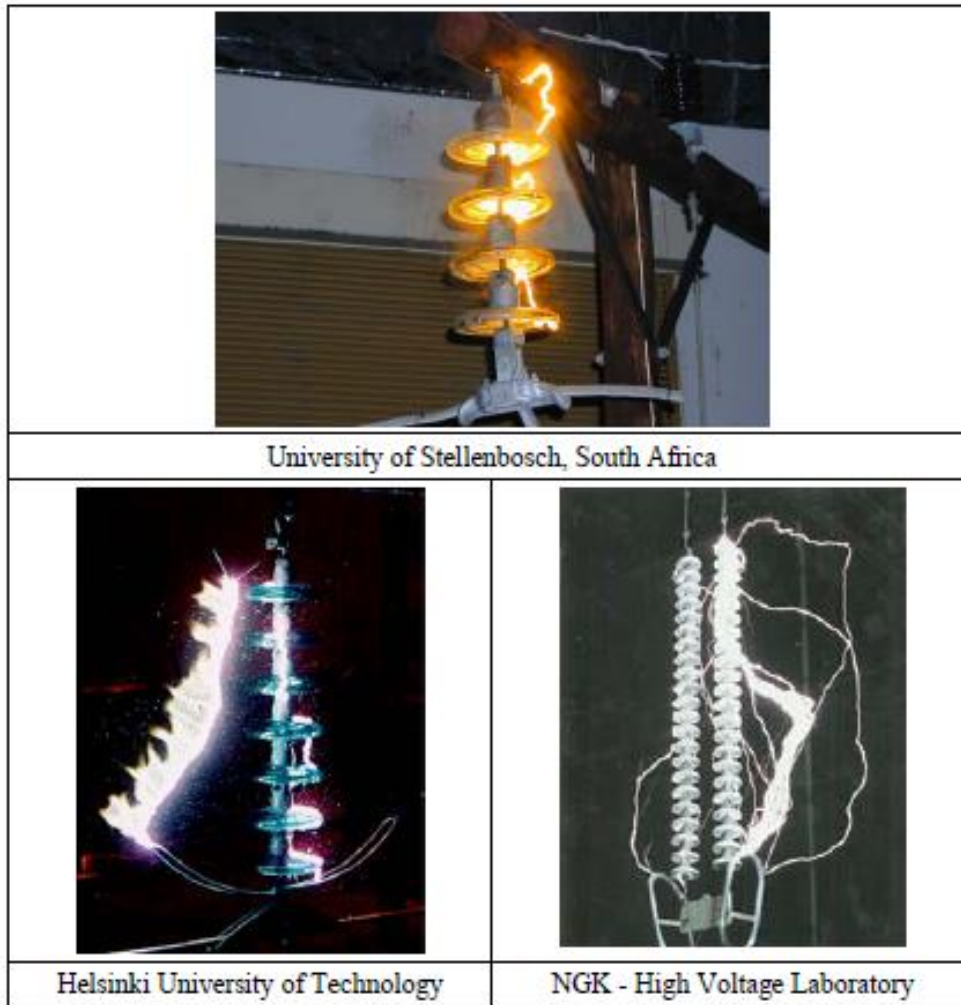
που αλλιώς θα ήταν ισχυρά μονωτική, μειώνει την πραγματική ηλεκτρική αντοχή της κατά έναν παράγοντα όχι πολύ μικρότερο του 100. [3]

Το φαινόμενο της υπερπήδησης αποδίδεται στα παρακάτω δύο αίτια [26]:

- Η εντοπισμένη αφυδάτωση ενός στρώματος ηλεκτρολύτη αυξάνει τις ασυνέχειες στο αγωγίμο στρώμα -γνωστές ως ξηρές ζώνες-, κατά μήκος των οποίων παράγονται ηλεκτρικές τάσεις (stresses) που επαρκούν για να ιονιστεί ο αέρας.
- Τα τόξα σε ένα αέριο, από τη στιγμή που δημιουργούνται, μπορούν εύκολα να επεκταθούν χωρίς εξασθένιση, με σχετικά αργή απομάκρυνση των άκρων μεταξύ των οποίων εμφανίζονται.

Παράγοντες που ευνοούν την ηλεκτρική διάσπαση στα μονωτικά υλικά κατά την εκδήλωση του φαινομένου της υπερπήδησης είναι οι παρακάτω [26]:

- Η πτώση σχεδόν καθαρού νερού, όπως σταγόνες, βροχή ή ομίχλη σε ένα μονωτήρα, πάνω στον οποίο βρίσκεται ποσότητα ρύπανσης που περιλαμβάνει διαλυτά ιονικά στοιχεία, όπως το κοινό αλάτι.
- Η εναπόθεση σταγονιδίων θαλάσσιας, βιομηχανικής ομίχλης ή άλλου συνδυασμού νερού και ηλεκτρολύτη.
- Η συγκέντρωση παγετού, παγετώδους ομίχλης ή πάγου στη ρυπασμένη επιφάνεια ενός μονωτήρα. Στην περίπτωση αυτή, τα ιοντικά συστατικά των ρύπων ενεργούν έτσι, ώστε να μειώσουν το σημείο ψύξης του νερού· κατ' αυτό τον τρόπο, επιτρέπουν την ύπαρξη υγρού διαλύματος στο σημείο επαφής των δύο επιφανειών.
- Η ένταξη ενός κυκλώματος που περιέχει υγρούς και ρυπασμένους μονωτήρες.
- Η δημιουργία μιας προσωρινής υπέρτασης ή μιας μεταβατικής αιχμής σε ένα μονωτήρα υγρό, ρυπασμένο και πιθανόν ήδη ενεργοποιημένο.



Εικόνα 9: Διάσπαση μονωτήρων [4]

1.5. Τεχνικές αντιμετώπισης της ρύπανσης

Η επίδραση του φαινομένου της ρύπανσης όσον αφορά στη διατήρηση ή μη της μονωτικής ικανότητας μιας διάταξης μονωτήρα είναι εξαιρετικά σημαντική. Ο ρόλος που παίζει η ρύπανση, δεδομένου ότι αυτή συμπεριφέρεται σαν ένας μεταβλητός - μη γραμμικός αντιστάτης, είναι εκείνος του μέσου μέσα από το οποίο μεταφέρεται ηλεκτρικό φορτίο όταν εφαρμοστεί τάση στα άκρα του μονωτήρα. Το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα (ρεύμα διαρροής) διευκολύνει τη δημιουργία μερικών εκκενώσεων, η προοδευτική αύξηση των οποίων μπορεί να οδηγήσει σε υπερπήδηση του μονωτήρα, δηλαδή πλήρη απώλεια της μονωτικής ικανότητάς του όταν οι ατμοσφαιρικές και καιρικές συνθήκες που επικρατούν το επιτρέπουν. [26]

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ρύπανσης οι επικρατέστερες μέθοδοι είναι οι εξής (Σιουκιούρογλου, 1995):

- *Επιλογή κατάλληλου μήκους ερπυσμού*

Έχει αποδειχθεί ότι η κρίσιμη τιμή της τάσης υπερπήδησης είναι ανάλογη του μήκους ερπυσμού. Έτσι, για συγκεκριμένες τιμές ρύπανσης, είναι δυνατό να προσδιορισθεί το ελάχιστο μήκος ερπυσμού που απαγορεύει τη δημιουργία τόξου.

- *Χρησιμοποίηση ημιαγωγικών μονωτήρων*

Με τη χρησιμοποίηση αυτού του είδους των μονωτήρων περιορίζεται η δυνατότητα δημιουργίας μερικών εκκενώσεων κατά μήκος των ξηρών ζωνών, γιατί μειώνεται η ειδική αντίσταση που παρουσιάζουν οι τελευταίες, άρα και η τάση που αναπτύσσεται σε αυτές.

- *Γρασάρισμα μονωτήρων*

Η επάλειψη του μονωτήρα με σιλικονούχο ή πετρελαϊκό γράσο είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται προκειμένου να απορροφηθούν από την επιφάνειά του τα συστατικά της ρύπανσης (όπως π.χ. το NaCl).

- *Πλύσιμο μονωτήρων*

Το πλύσιμο των μονωτήρων γίνεται τακτικά με εκτόξευση νερού υπό πίεση, έτσι ώστε να απομακρυνθούν από την επιφάνεια του μονωτήρα μικροσωματίδια – εστίες ρύπανσης.



Εικόνα 10: Πλύσιμο μονωτήρων σε μια γραμμή μεταφοράς [4]



Εικόνα 16: Καθαρισμός Γραμμής Μεταφοράς 150kV του Συστήματος Κρήτης, υπό τάση, με ελικόπτερο

1.6.Μηχανική Αντοχή

Σε αρκετές κατασκευές ενδιαφέρουν όχι μόνο οι ηλεκτρικές ιδιότητες των στερεών μονωτικών) αλλά και οι μηχανικές ιδιότητές τους, όπως για παράδειγμα τα πλαστικά μέρη του μηχανισμού περιστροφής ενός ασφαλειοαποξεύκτη σε ένα πίνακα μέσης τάσης, η αντοχή σε εφελκυσμό ενός μονωτικού, η δύναμη τάνυσης σε μονωτήρες των γραμμών μεταφοράς, κλπ.). Ειδικότερα, στις περιπτώσεις αυτές θεωρείται το στερεό μονωτικό ως ένα "μηχανολογικό εξάρτημα", οπότε ισχύουν για τον υπολογισμό του οι κανόνες της μηχανικής αντοχής των υλικών. Παράλληλα, συχνά ενδιαφέρει η μηχανική σε πλήρεις κατασκευές, που περιλαμβάνουν στερεά μονωτικά, όταν αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τη διηλεκτρική αντοχή από την εξάσκηση μεγάλων δυνάμεων ηλεκτρικής προέλευσης, όπως συμβαίνει κατά το βραχυκύκλωμα (για παράδειγμα σε πίνακες μέσης τάσης, μετασχηματιστές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές μέτρησης στο δίκτυο υψηλών τάσεων, διακόπτες υψηλών τάσεων, κλπ). Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να μειώσουν τις αποστάσεις μόνωσης και να γίνουν αιτία καταστροφής της κατασκευής, όταν δεν υπάρχει η απαιτούμενη μηχανική αντοχή κατά το βραχυκύκλωμα. Η μόνωση, για παράδειγμα, ενός διακόπτη υψηλής τάσης δεν εξασφαλίζεται μόνο με επιλογή των σωστών αποστάσεων μόνωσης, προς δημιουργία

ηλεκτροστατικού πεδίου, όταν η επιδίωξη αυτή δεν συνδυάζεται με την απαιτούμενη μηχανική αντοχή που θα διασφαλίζει την ικανότητα μόνωσης μέχρι να διακοπεί το βραχυκύκλωμα από το μέσο προστασίας του δικτύου. [14]

2. Διαδικασία αξιολόγησης ηλεκτρομονωτικών υλικών

Για τη σωστή αξιολόγηση των ηλεκτρομονωτικών υλικών και την παρακολούθηση της συμπεριφοράς αυτών μέσα στον χρόνο, με στόχο τη διαπίστωση της καταλληλότητας τους για χρήση σε μια εγκατάσταση υψηλών τάσεων, θα παρουσιασθούν και θα αναλυθούν κριτήρια, τα οποία σύμφωνα με την βιβλιογραφία δίνουν την δυνατότητα της αξιολόγησης των ιδιοτήτων των μονωτικών υλικών, όπως είναι η θερμική αντοχή κατά την απαγωγή των απωλειών Joule των αγωγών, η ψυκτική ικανότητα κατά τη σβέση του ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτες, η μηχανική αντοχή των μονωτήρων (π.χ. λόγω του βάρους της γραμμής), και η αντοχή κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος. Τα κριτήρια είναι τα παρακάτω [5]:

1. Η διηλεκτρική αντοχή
2. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά
3. Ο συντελεστής απωλειών
4. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα
5. Ο συντελεστής $\tan\delta$
6. Η επιφανειακή αγωγιμότητα
7. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
8. Η μηχανική αντοχή

2.1. Η διηλεκτρική αντοχή

Η διηλεκτρική αντοχή (E_d) είναι ένας ορισμός για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών, μέσω της ελάχιστης τιμής της πεδιακής για τη διάσπαση εντός ομογενούς πεδίου. Ως διηλεκτρική αντοχή ενός μονωτικού υλικού ορίζεται το πηλίκο της ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για τη διάσπαση (U_{dmin}) του, προς την απόσταση των ηλεκτροδίων (d) σε ομογενές πεδίο. [2]

$$E_d = \frac{U_{dmin}}{d} \quad (2)$$

Όπου

E_d : διηλεκτρική αντοχή μονωτικού υλικού

U_{dmin} : ελάχιστης ενεργού τιμής της τάσης για τη διάσπαση

d : απόσταση των ηλεκτροδίων

Μερικές τυπικές τιμές της διηλεκτρικής αντοχής για συνηθισμένα μονωτικά υλικά δίνονται στον πίνακα 5.

Πίνακας 13: Επίπεδα ρύπανσης σύμφωνα με το IEC 815

Μονωτικό Υλικό	D (mm)	Ed (kV/cm)
Αέρας	-	21
Λάδι μετασχηματιστών	-	60...200
Πορσελάνη	0,5...3	340...380
Στεατίτης	0,5...3	200...300
Γυαλί	<1	160...450
Χαρτί	0,5...1,5	300...450
Χαρτί στο λάδι	<2	200...400
Σκληρό ελαστικό	<3	300...500
Ξύλο	<3	30...50
Glimmer	0,01...0, 1	500...1000

2.2.Η σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r) εκφράζει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μίας διάταξης συγκριτικά προς εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Ως εκ τούτου οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές των διάφορων μονωτικών, που συνθέτουν μια μόνωση (π.χ. περιελίξεις μετασχηματιστών και μονώσεις καλωδίων) θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο, ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειές τους, για να μη διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων. [2]

Ο πίνακας 6 παρουσιάζει τις σχετικές διηλεκτρικές σταθερές διαφόρων υλικών σε θερμοκρασία 20 °C.

Πίνακας 14: Σχετικές διηλεκτρικές αντοχές [2]

Υλικό	ϵ_r
Αέρας	1
Αέρας υγρός	1,5
Αποσταγμένο νερό	1,5
Βακελίτης	3,5-8,2
Condense	4-8
Glimmer	5-16
Γυαλί	5-16
Θερμοπλαστικά συνθετικά	2-5
Λάδι μετασχηματιστών	2-2,5
Λάστιχο	2,8-6,5
Ξύλο	2,5-6,5

Σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται [2]:

α) στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των διπόλων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης,

β) στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά και αυτό φαίνεται στην εικόνα 12.

Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή C με ομοιογενές διηλεκτρικό και απώλειες (λόγω της αγωγιμότητάς του G).

Η μαθηματική σχέση που εκφράζει τον συντελεστή απωλειών είναι:

$$\operatorname{tg} \delta \frac{IR}{IC} = \frac{G}{\omega C} \quad (3)$$

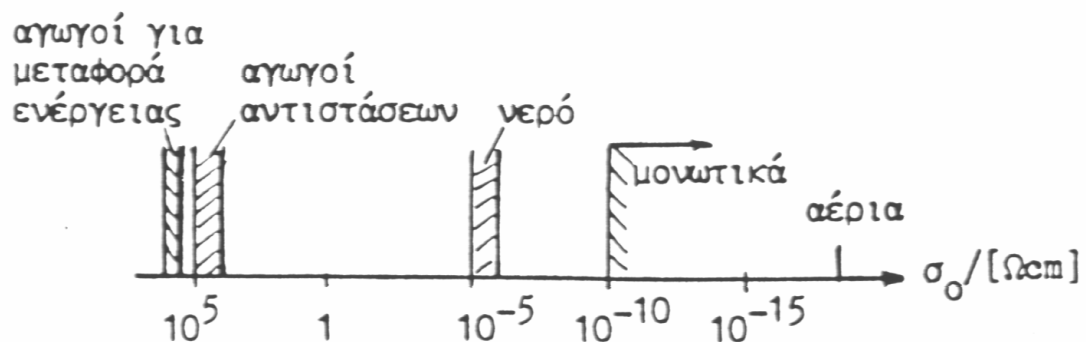
όπου :

$\operatorname{tg} \delta$: συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

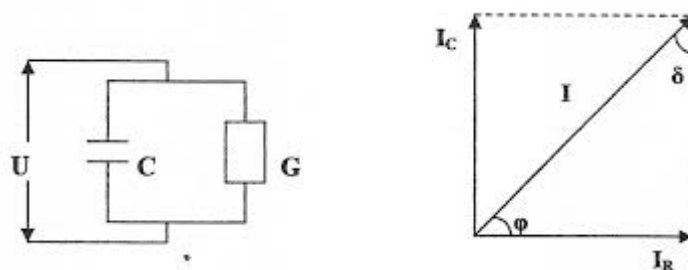
IR : ωμικό ρεύμα διαρροής

IC : χωρητικό ρεύμα

G : τιμή αγωγιμότητας



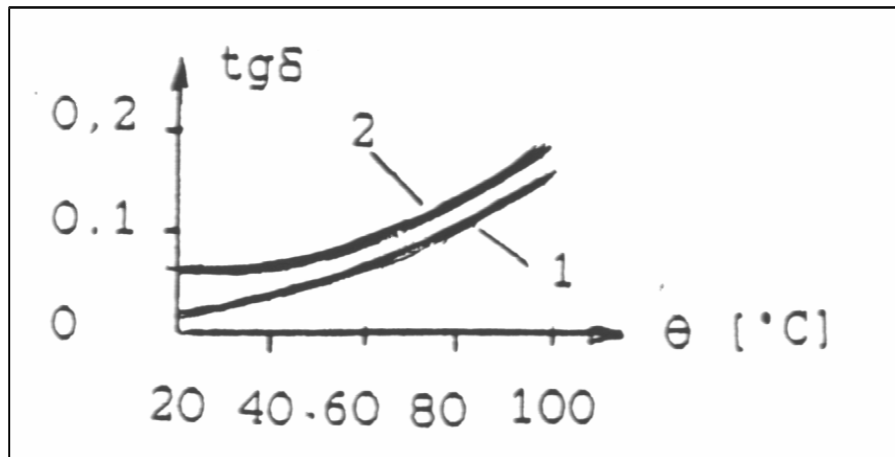
Εικόνα 8:Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα υλικών [2]



Εικόνα 9: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή με απώλειες λόγω της αγωγιμότητας G του διηλεκτρικού του. [2]

2.3.Ο συντελεστής απωλειών

Ο συντελεστής απωλειών είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης του διηλεκτρικού γιατί δίνει πληροφορίες για την αγωγιμότητα του υλικού όπως φαίνεται στην εικόνα 10. Στη συγκεκριμένη εικόνα φαίνεται ξεκάθαρα ότι η $\text{tg}\delta$ αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας θερμοκρασία.



Εικόνα 17: Συντελεστής απωλειών [14]

Πιο συγκεκριμένα σε μία μόνωση, που παρεμβάλλεται μεταξύ ηλεκτροδίων με σκοπό τη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού πεδίου, υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας, οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται [14]:

1. στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής ροπής των δίπολων στο ρυθμό της εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης, καθώς και
2. στην πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που έχουν τα μονωτικά υλικά.

Έτσι, ο μονωτής έχει, εκτός από το χωρητικό ρεύμα I_C και ένα ρεύμα διαρροής I_R . Στην πράξη το ρεύμα διαρροής αυξάνει, γιατί η αγωγιμότητα του μονωτή γίνεται μεγαλύτερη, όπως συμβαίνει π.χ. κατά την εκδήλωση μερικών εκκενώσεων, και τη θερμική καταπόνηση του μονωτή από τις απώλειες των αγωγών. [14]

Οι απώλειες Joule (PW) σε μια δεδομένη τιμή αγωγιμότητας G δίνεται από τη σχέση :

$$P_w = I_R \cdot U = G \cdot U = U \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta = P_B \cdot \text{tg}\delta \quad (4)$$

Όπου

P_w : απώλειες Joule

I_R : ωμικό ρεύμα διαρροής

G : τιμή αγωγιμότητας

C : χωρητικότητα

t_{gd} : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

P_B : η άεργος ισχύς (ισχύς στην χωρητικότητα C)

Θεωρώντας ότι η παραπάνω χωρητικότητα αποτελείται από δύο επίπεδες πλάκες διατομής A σε απόσταση d και ότι ο μεταξύ τους χώρος καταλαμβάνεται από ένα μονωτικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ , τότε η τιμή της χωρητικότητας C είναι :

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (5)$$

Όπου

C : χωρητικότητα

ϵ : σχετική διηλεκτρική σταθερά

A : διατομή πλακών

d : απόσταση μεταξύ των πλακών

Για την αγωγιμότητα G του παραπάνω πυκνωτή ισχύει η σχέση :

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (6)$$

Όπου

G : αγωγιμότητα του πυκνωτή

σ : η ειδική αγωγιμότητα του διηλεκτρικού

A : διατομή πλακών

d : απόσταση μεταξύ των πλακών

Για τις απώλειες της συγκεκριμένης χωρητικότητας ισχύει:

$$P_w = U_2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (7)$$

P_w : απώλειες Joule

ε : σχετική διηλεκτρική σταθερά

A : διατομή πλακών

d : απόσταση μεταξύ των πλακών

$\operatorname{tg} \delta$: συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

2.4. Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή της πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία, κ.λ.π.). Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι επομένως ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των διηλεκτρικών, γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς. Η αύξηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα στερεά μονωτικά, σε τιμές πεδίου, που η καταπόνηση του διηλεκτρικού μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μόνο θερμική, δίνεται από την σχέση [5]:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-W/KT} = \sigma_0 \cdot e^{\beta \cdot \theta} \quad (8)$$

σ_0 : η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα για διαφορά θερμοκρασίας θ ως προς το περιβάλλον

σ : η αρχική ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα

W : η ενέργεια ενεργοποίησης (ενέργεια για τη μεταφορά ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας)

k : η σταθερά Boltzmann ($1,37 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K)

T : η απόλυτη θερμοκρασία

β : ένας συντελεστής του υλικού

Από έρευνες σε οργανικά στερεά μονωτικά συμπεραίνεται ότι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνει απότομα με την ενέργεια των μερικών εκκενώσεων. Έχει

διαπιστωθεί ότι η τιμή της πεδιακής έντασης είναι καθοριστική για την τιμή σ . Μία τιμή πεδιακής έντασης χαρακτηρίζεται ως χαμηλή όταν δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις, ή έστω όταν οι μερικές εκκενώσεις συμμετέχουν μόνο στην αύξηση των απωλειών Joule. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω π.χ. του μεγάλου πάχους του διηλεκτρικού, ή της μικρής τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης. [2]

Για μεγαλύτερες τιμές της πεδιακής έντασης από προηγούμενως, η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας οφείλεται κυρίως στις μερικές εκκενώσεις. Έχει διαπιστωθεί, ότι στην περίπτωση αυτή συμβαίνει ιονισμός με κρούσεις, όπως στα ιονισμένα αέρια.

Για την αύξηση της τιμής σ , από τις απώλειες του διηλεκτρικού και τις μερικές εκκενώσεις, έχει διατυπωθεί η σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{(\beta \cdot \theta)}{(1-\delta \varepsilon)^2}} \quad (9)$$

όπου E η πεδιακή ένταση στο τμήμα του υλικού, που δεν εκδηλώνονται μερικές εκκενώσεις (το οποίο χαρακτηρίζεται ως υγιές τμήμα) και δ ένας συντελεστής, που εκφράζει τη συμμετοχή των ανομοιογενειών του υλικού στη διαμόρφωση της τιμής σ . Για το ομοιογενές υλικό είναι $\delta=0$, διαφορετικά ισχύει $\delta>0$. [2]

Η αγωγιμότητα τέλος των μονωτικών υλικών αυξάνει όταν προσβάλλονται με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία X ειδικότερα μπορεί να μετατρέψει ένα μονωτή σε αγωγό. Φαίνεται ότι η ακτινοβολία προκαλεί διαχωρισμό των ηλεκτρονίων από τους μητρικούς τους πυρήνες και ανύψωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε υψηλότερο ενεργειακό επίπεδο, με αποτέλεσμα την αύξηση της αγωγιμότητας των μονωτικών. Το φαινόμενο αυτό, που είναι γνωστό ως επαγόμενη αγωγιμότητα, αποτελεί πρόβλημα στις διαστημικές κατασκευές, λόγω του υψηλού ποσοστού κοσμικής ακτινοβολίας. [2]

Συνεχίζοντας παρατίθεται η μαθηματική σχέση για το συντελεστής $\varepsilon \cdot \text{tg} \delta$.

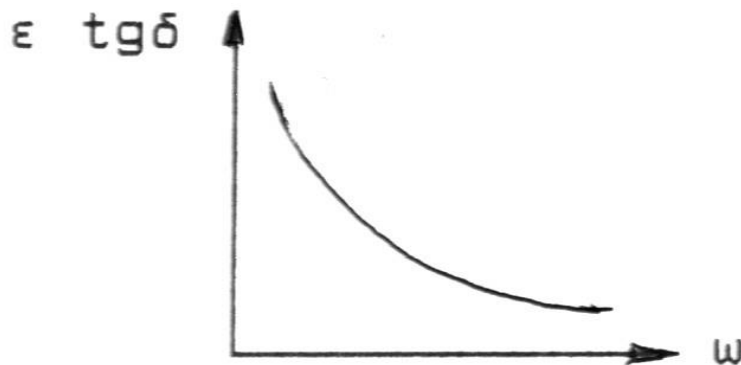
$$\varepsilon \cdot \text{tg} \delta = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \cdot \omega} \quad (10)$$

όπου $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

Και η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega} \quad (11)$$

Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής σύμφωνα με την παραπάνω σχέση.



Εικόνα 11: Δείκτης αξιολόγησης μονωτικών υλικών ($\varepsilon \operatorname{tg}\delta = f(\omega)$) [14]

Το γινόμενο $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ χρησιμοποιείτε για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα 8 δίνεται η τάξη μεγέθους των τιμών $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20°C.

Πίνακας 15: Τάξη μεγέθους των τιμών $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ για ορισμένα διηλεκτρικά σε θερμοκρασία 20°C

Υλικό	Πάχος μόνωσης (mm)	$\varepsilon \operatorname{tg}\delta$
Λάδι μετασχηματιστών		0,004... 0,0046
Πορσελάνη	0,5...3	0,085...0,16
Στεατίτης	0,5...3	0,006...0,02
Γυαλί	<1	
Χαρτόνι	0,5...1,5	0,03...0,1
Glimmer	0,01...0,1	0,009...0,012

Από τις εξισώσεις 7 και 10 προκύπτει σαν αποτέλεσμα ότι το γινόμενο $\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta$ αυξάνει εκθετικά με την θερμοκρασία, όπως δείχνει και η σχέση 12.

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \cdot e^{\beta \cdot \theta} \quad (12)$$

Θεωρώντας ότι το ε έχει σταθερή τιμή και ότι το $\operatorname{tg}\delta$ έχει εκθετική αύξηση, τότε και το γινόμενο $\varepsilon \operatorname{tg}\delta$ αυξάνεται, και συνεπώς υπάρχει αντίστοιχη αύξηση των απωλειών Joule. Αυτό φαίνεται και από την ακόλουθη σχέση:

$$\varepsilon \cdot \operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma_0}{\omega} \frac{e}{(1-\delta\varepsilon)^2} \quad (13)$$

2.5. Η επιφανειακή αγωγιμότητα

Η διηλεκτρική αντοχή των στερεών μονωτικών μειώνεται, όταν η επιφάνειά τους περιλαμβάνει ξένες επικαθίσεις (σκόνη, υγρασία, κ.λ.π.). Το ίδιο συμβαίνει όταν καταπονηθεί θερμικά η επιφάνεια. Έχει διαπιστωθεί, ότι στα φαινόμενα που εκδηλώνονται στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών κατά την ηλεκτρική καταπόνησή τους (κυρίως αύξηση των απωλειών Joule και μερικές εκκενώσεις), συμμετέχει η επιφάνειά τους σε πάχος μέχρι 30Å. Γι' αυτό, η επιφανειακή αγωγιμότητα είναι ένα κριτήριο για την προδιάθεση των διαφόρων στερεών διηλεκτρικών στην εκδήλωση των παραπάνω φαινομένων. Επειδή οι παράγοντες, που προκαλούν αύξηση της επιφανειακής αγωγιμότητας ποικίλουν (ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας), η ειδική επιφανειακή αγωγιμότητα δεν είναι κάποια σταθερά των στερεών μονωτικών. Η επιφανειακή αγωγιμότητα έχει συσχετιστεί με έννοιες, που αφορούν την αντοχή των στερεών μονωτικών από τις καταπονήσεις στην επιφάνειά τους (όπως η αντοχή σε ρεύμα διαρροής, η αντοχή σε ηλεκτρικό τόξο, η δυνατότητα απομάκρυνσης των επικαθίσεων κατά τη βροχή κ.λ.π.), που ενδιαφέρουν στην πράξη για την κατασκευή για παράδειγμα μονωτήρων και φλογοθαλάμων διακοπών. Με κριτήριο για παράδειγμα τη μείωση του ποσοστού της σκόνης συμπεραίνει κανείς, ότι οι μονωτήρες πορσελάνης χρησιμοποιούνται ως εξωτερικού χώρου, έναντι των μονωτήρων ρητίνης (που χρησιμοποιούνται ως εσωτερικού χώρου), γιατί η επιφάνειά τους διευκολύνει περισσότερο στην απομάκρυνση της σκόνης κατά τη βροχή. [2]

2.6.Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

Η θερμική καταπόνηση των μονωτικών υλικών σχετίζεται με την αύξηση του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στις θέσεις όπου η πεδιακή ένταση έτυχε να είναι αυξημένη (όπως π.χ. ανομοιογένειες στον όγκο ή στην επιφάνεια των στερεών μονωτικών, ανεπιθύμητα αιωρούμενα σωματίδια στο λάδι). Η θερμότητα για την εκδήλωση των παραπάνω θέσεων διαταραχής υπάρχει πάντοτε κατά τη λειτουργία των διαφόρων κατασκευών (π.χ. απώλειες Joule των αγωγών, απώλειες σιδήρου, θερμότητα στις επαφές των διακοπών). Επειδή γενικά ισχύει, ότι η θερμική ειδική αγωγιμότητα (λ) συμβαδίζει με την ηλεκτρική ειδική αγωγιμότητα, η τιμή λ είναι (όπως και η τιμή σ) ένα κριτήριο για την αξιολόγηση των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα 8 δίνονται τιμές του συντελεστή λ για διάφορα διηλεκτρικά. [2]

Στις προδιαγραφές IEC και VDE γίνεται μία διαβάθμιση των στερεών μονωτικών ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας τους. Πρόκειται για κατηγορίες (ή κλάσεις) των υλικών αυτών, που διευκολύνουν στην πράξη για τη διάρκεια ζωής τους.

Πίνακας 16: Τιμές του συντελεστή ειδικής θερμικής αγωγιμότητας (λ) για ορισμένα

Υλικό	Πάχος μόνωσης (mm)	λ (W □ cm) cm ² grad
Πορσελάνη	0,5...3	0,008...0,015
Στεατίτης	0,5...3	0,02...0,026
Γυαλί	<1	0,0075...0,012
Ξυλό	<3	0,001...0,002
Χαρτόνι	0,3...1,5	0,003
Σκληρό Ελαστικό	<3	0,001
Glimmer	<0,5	0,003
Χαρτί στο λάδι	<2	0,014...0,03

Για την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής των στερεών μονωτικών υλικών έχουν γίνει αρκετές έρευνες, που δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τις πρακτικές εφαρμογές.

3. Διαδικασία και αποτελέσματα μετρήσεων

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιασθούν το όργανο metrel 5Kn plus που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις, οι συντελεστές αξιολόγησης αντίστασης μόνωσης, η διαδικασία των μετρήσεων και τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

3.1. Διαδικασία και διάταξη των μετρήσεων με το όργανο metrel 5Kn plus

Το metrel είναι ένα όργανο το οποίο μας βοηθάει στις δοκιμές αντίστασης μόνωσης με τη χρήση υψηλής τάσης δοκιμής έως 5kV. Καθώς όμως πρόκειται για ένα πολυλειτουργικό όργανο, το metrel 5Kn plus έχει το παρακάτω πλήθος λειτουργιών:

- Υψηλή μόνωση μέτρηση αντίστασης μέχρι 10 TΩ [6]
- Προγραμματιζόμενη τάση δοκιμής από 250 V μέχρι 5 kV, τα βήματα 25V
- R (t) Γραφήματα
- Προγραμματιζόμενος χρονοδιακόπτης (1s έως 100 λεπτά)
- Αυτόματη απόρριψη αντικείμενο δοκιμής μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης
- Μέτρηση χωρητικότητας
- Μέτρηση της αντίστασης μόνωσης έναντι τάση δοκιμής (δοκιμή τάσης step-up)
- Πέντε διακριτές τάσεις δοκιμής που αναλογικά μέσα προκαθορισμένο εύρος τάσης δοκιμής
- Προγραμματιζόμενος χρονοδιακόπτης 1 λεπτό έως 30 λεπτά ανά βήμα
- Πόλωση Index (PI), Διηλεκτρική αναλογία απορρόφησης (ΣΕΔ)
- Διηλεκτρική απαλλαγή (DD)
- τάση αντοχής (DC) μέχρι 5 kV
- Προγραμματιζόμενη τάση δοκιμής ράμπα από 250 V μέχρι 5 kV
- Ράμπα υψηλής ανάλυσης (περ. 25 V ανά βήμα)
- Τρέχουσα Προγραμματιζόμενη όριο μέχρι 5 mA
- Τάση και συχνότητα μέτρησης μέχρι 600 V AC / DC

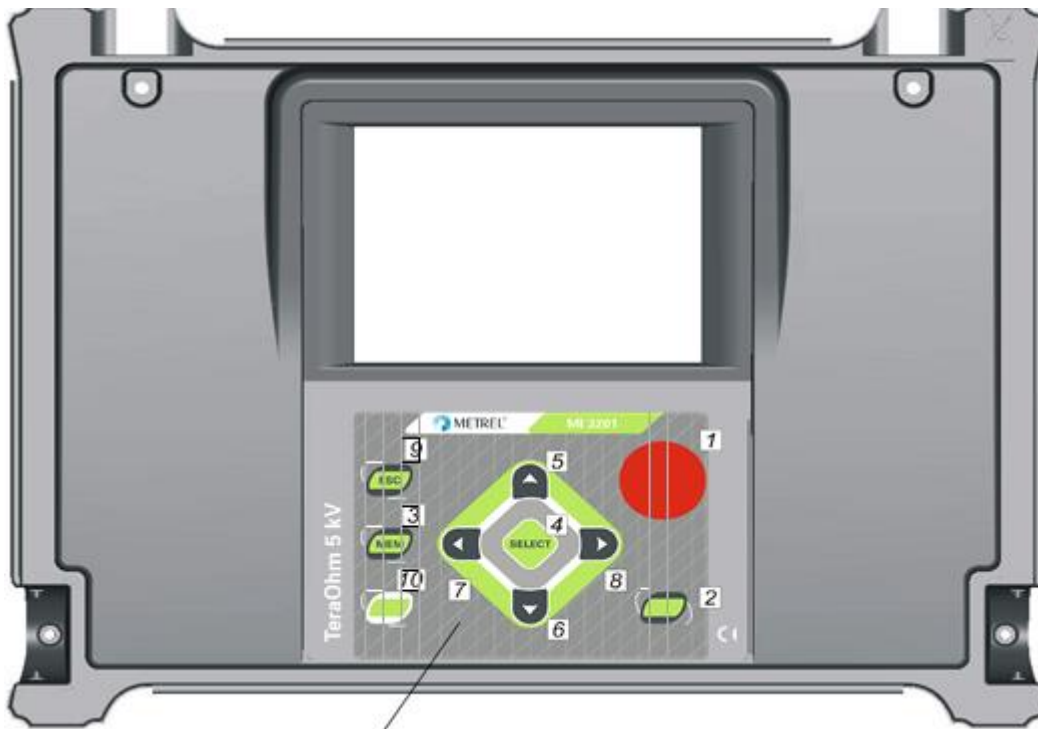
Το όργανο βρίσκεται εντός ενός πλαστικού κουτιού, το οποίο του παρέχει την κατάλληλη προστασία όπως αυτή ορίζεται στις γενικές προδιαγραφές.



Εικόνα 12: Το όργανο Metrel 5kv plus

Με το ανοίξουμε το καπάκι του οργάνου η πρώτη εικόνα που συναντούμε είναι αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 13.

Το όργανο αποτελείται από την οθόνη στην οποία επιλέγουμε την λειτουργία που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε αλλά και το πληκτρολόγιο με το οποίο ρυθμίζουμε τις διάφορες παραμέτρους. Το κάθε κουμπί έχει και μια δικιά του λειτουργία η οποία αναφέρετε παρακάτω, σύμφωνα με το TeraOhm 5kV Plus MI 3201 User Manual Version 1.7 code NO 20751272.

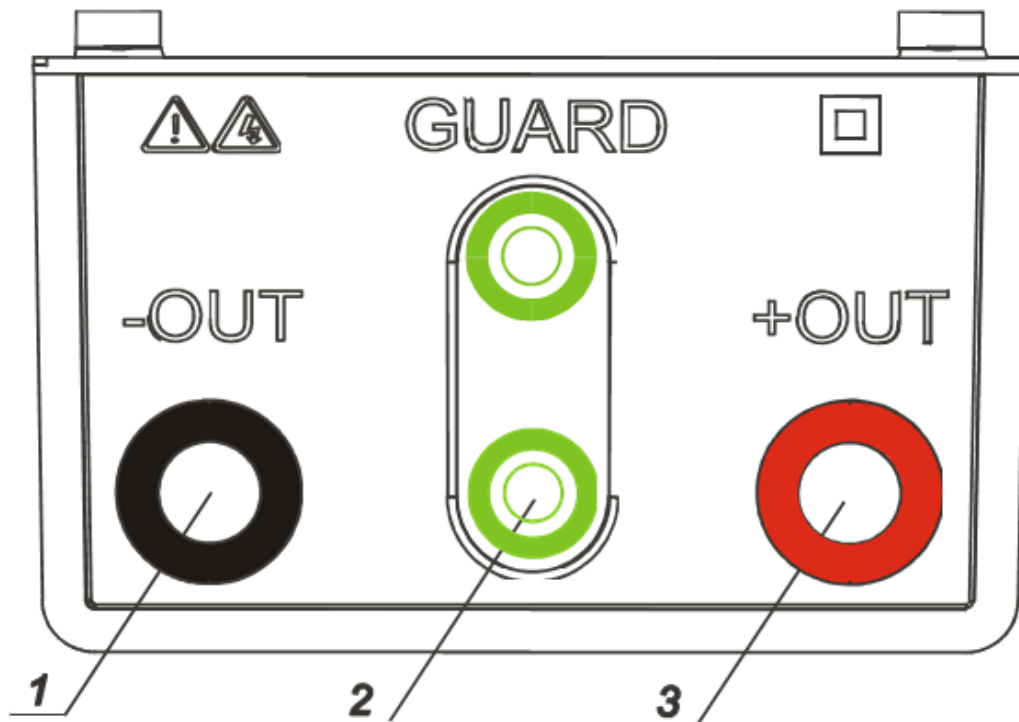


Εικόνα 13:πληκτρολόγιο για το χειρισμό του Metrel 5kv plus

Ειδικότερα, η επεξήγηση των κομβίων έχει ως εξής:

1. πλήκτρο ON / OFF για να ενεργοποιήσετε τη συσκευή ON ή OFF.
2. START / STOP πλήκτρο για να ξεκινήσει ή να σταματήσει κάθε μέτρηση.
3. MEM πλήκτρο για να αποθηκεύσετε, ανάκληση και διαγραφή αποτελεσμάτων.
4. πλήκτρο SELECT για να εισέλθετε στη λειτουργία set-up για την επιλεγμένη λειτουργία ή για να επιλέξετε την ενεργή παράμετρο που πρέπει να ρυθμιστεί.
5. δρομέα για να επιλέξετε μια επιλογή προς τα πάνω.
6. δρομέα για να επιλέξετε μια επιλογή προς τα κάτω.
7. δρομέα κλειδί για να μειώσετε την επιλεγμένη παράμετρο.
8. δρομέα κλειδί για να αυξήσει την επιλεγμένη παράμετρο.
9. πλήκτρο ESC για να βγείτε από την επιλεγμένη λειτουργία.
10. Φως κλειδί για να ενεργοποιήσετε την οθόνη οπίσθιου φωτισμού ON ή OFF.

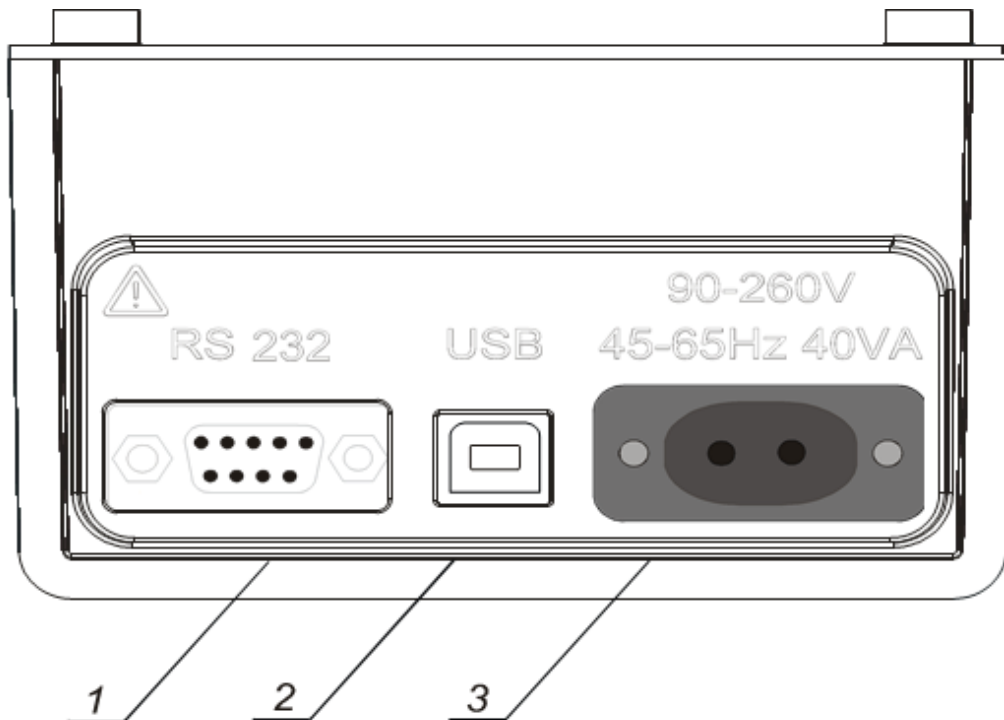
Συν τοις άλλοις, το όργανο στα πλάγια αριστερά έχει 4 σημεία σύνδεσης των ειδικών αγωγών (εικόνα 18) που χρειαζόμαστε για να κάνουμε τις διάφορες μετρήσεις όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Τα σημεία αυτά είναι διαφορετικού χρώματος ώστε να ξεχωρίζουμε που πρέπει να συνδέσουμε την είσοδο που την έξοδο και που την γείωση η οποία είναι πολύ σημαντική για κάποια συγκεκριμένα είδη μετρήσεων.



Εικόνα 14: Θέσεις σύνδεσης για τους αγωγούς μετρήσεις

Στα σημεία 1,3 εκεί συνδέουμε τους 2 αγωγούς τους οποίους συνδέουμε στο πάνω και στο κάτω μέρος του μονωτήρα αντίστοιχα. Στην θέση 2 τώρα συνδέουμε τους αγωγούς της γείωσης τους οποίους τους χρησιμοποιούμε για κάνουμε μετρήσεις που έχουν σχέση με ελέγχους για καμένα ηλεκτρικά εργαλεία η για ηλεκτρικούς κινητήρες.

Ακόμα το όργανο όπως φαίνεται στην παρακάτω σελίδα έχει από την δεξιά του μεριά μας παρέχει 3 διαφορετικούς εξόδους εκ των οποίων οι 2 είναι για σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή (RS 232,USB) και η άλλη έξοδο είναι για την σύνδεση του οργάνου στο δίκτυο τροφοδοσίας της ΔΕΗ (230 V) για να μπορούν να φορτίζονται οι μπαταρίες του, ώστε να μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις και χωρίς να εξαρτόμαστε εάν υπάρχει μονοφασική τροφοδοσία εκεί που θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις.



Εικόνα 15: Σημεία εξαγωγής δεδομένων μέτρησης

Παραπάνω αναφέραμε τους ειδικούς αγωγούς που χρειάζονται ώστε να γίνουν οι διάφοροι τύποι μετρήσεων που μπορούμε να πραγματοποιήσουμε με το όργανο.



Εικόνα 16: Ειδική αγωγοί για την μέτρηση των μονωτήρων

Όπως παρατηρούμε και από τις δυο πλευρές οι αγωγοί είναι ίδιοι, άρα την πλευρά στην οποία υπάρχουν οι πράσινοι αγωγοί τους συνδέουμε στο όργανο και την άλλη μεριά τοποθετούμε τους ειδικούς ακροδέκτες ώστε να τους συνδέσουμε κατάλληλα πάνω στον μονωτήρα.

3.2. Συντελεστές αξιολόγησης αντίστασης μόνωσης

Εν συνεχεία, για τον έλεγχο της αντίστασης της μόνωσης, η οποία καθώς περνούν τα χρόνια καταπονείται, κρίνεται απαραίτητη η ανάλυση δύο ακόμα δεικτών, του δείκτη PI και του δείκτη DAR.

Από την τιμή του δείκτη PI, ο οποίος ονομάζεται δείκτης πόλωσης, δύναται να κριθεί η κατάσταση της μόνωσης. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται με την δοκιμή μέτρησης του ρεύματος διαρροής για χρόνους 1 λεπτό και για 10 λεπτά.

$$P.I = \frac{R600}{R60} \quad (14)$$

Όπου R60 και R600 είναι οι μετρήσεις της δοκιμής διαρροής σε 1 και 10 λεπτά αντίστοιχα.

Ανάλογα με το αποτέλεσμα της παραπάνω πράξης ο παρακάτω πίνακας δείχνει την κατάσταση της μόνωσης.

Πίνακας 9: Κατάταξη των τιμών του δείκτη PI

PI	μόνωση Κατάσταση
<1	Επικίνδυνος
<2	Αμφισβητήσιμος
<4	Καλά
> 4	Έξοχος

Ο δείκτης DAR, ονομάζεται λόγος διηλεκτρικής απορρόφησης και υπολογίζεται με βάση των αποτελεσμάτων της δοκιμής αντίστασης μόνωσης τα οποία παίρνουμε από την συσκευή μας. Ο λόγος διηλεκτρικό απορρόφησης (ΣΕΔ) υπολογίζεται ως εξής:

$$DAR = \frac{R60}{R30} \quad (15)$$

Όπου R30 και R60 οι μετρήσεις της δοκιμής αντίστασης μόνωσης στα 30 και 60 δευτερόλεπτα αντιστοίχως.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω πράξης τα αξιολογούμε με βάση των παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10: Κατάταξη των τιμών του δείκτη DAR

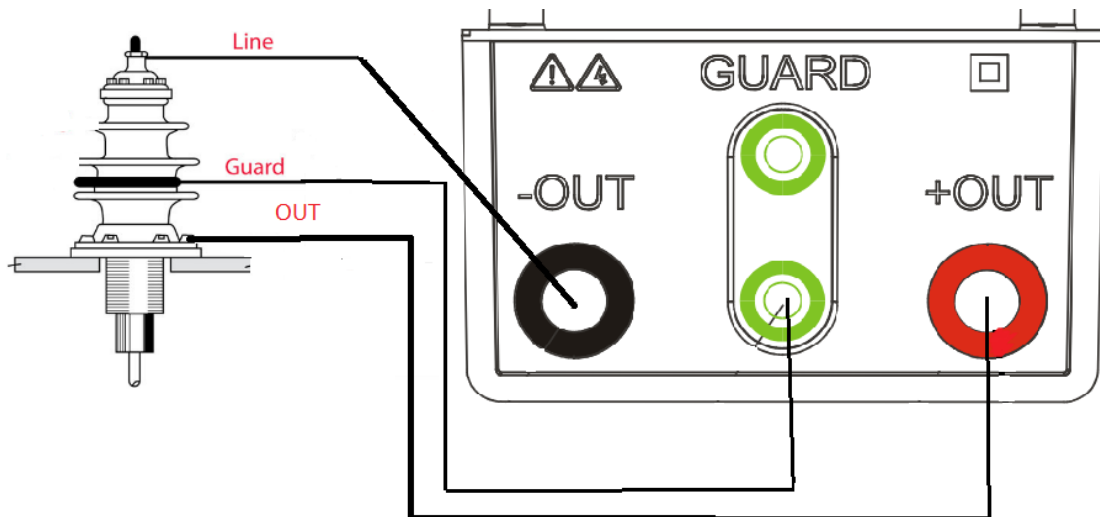
DAR	μόνωση Κατάσταση
<1.25	Αμφισβητήσιμος
≤ 1.6	Επαρκής
> 1.6	Καλά

Τέλος υφίσταται ένας ακόμα δείκτης, ο δείκτης διηλεκτρικής αποφόρτισης DD, ο οποίος για να υπολογιστεί βασίζεται σε διαγνωστικό test στην μόνωση και δείχνει τόσο την γήρανση όσο και την υποβάθμιση της μόνωσης. Η αξιολόγηση του δείκτη αυτού γίνεται μέσα από την καμπύλη εκφόρτωσης που την παίρνουμε από το όργανο μετρήσεων.

3.3. Διαδικασία μετρήσεων

Για την μελέτη της αντίστασης διαφόρων μονωτικών υλικών, εφαρμόστηκε τάση με την βοήθεια του οργάνου metrel 5Kv plus με εύρος από 0,5 ~ 5 KV σε διαφορετικά έξι (6) δοκίμια. Η όλη διαδικασία των μετρήσεων έλαβε χώρα σε ελεγχόμενο εσωτερικό περιβάλλον καθώς δεν ήταν επιθυμητή η οποιαδήποτε επίδραση εξωτερικών παραγόντων, όπως ρύπανση ή εξωτερικές θερμοκρασίες. Κατόπιν και με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα εξαχθούν συμπεράσματα συμπεράσματα για τα ίδια τα δοκίμια αλλά και για γενικά για την κατάσταση μόνωσης.

Όλοι οι μονωτήρες που χρησιμοποιήθηκαν μετρήθηκαν σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 17: Κύκλωμα σύνδεσης οργάνου στον μονωτήρα

3.4.Μετρήσεις

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της παραπάνω εικόνας 21 και με βάση την εν λόγω διάταξη έγιναν οι μετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.

Δοκίμιο 1^ο

Οι μετρήσεις του 1ου δοκιμίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Μετρήσεις μονωτήρων 1ου δοκιμίου με βήμα 500 V

U(KV)	Iδ(nA)	C(nF)	R (15sec) (GΩ)	R (1min) (GΩ)	R (10min) (GΩ)	Un(v)	tm (min)	DAR	PI	DD
0,5	4,56	0,1	97,1	103	122	555	10	1,06	1,18	-
1	11,3	0,2	71,7	76,2	96,5	1082	10	1,06	1,25	-
1.5	21,5	0,5	61,9	64,9	74,4	1603	10	1,05	1,15	-
2	29,5	0,4	62,4	65,6	67,2	2101	10	1,06	1,14	-
2,5	45,6	0,5	49,8	56,4	58,8	2646	10	1,06	1,15	-
3	62,7	0,2	40,9	45,6	51	3194	10	1,11	1,12	-
3,5	48,6	0,1	63,8	67	75,9	3695	10	1,05	1,13	-

4	52,5	0,4	70	73,4	80,2	4211	10	1,05	1,09	-
4,5	52,6	0,5	70,6	74,9	84,3	4736	10	1,06	1,13	-
5	60,4	0,6	76,8	79,5	86,7	5232	10	1,03	1,09	-

Δοκίμιο 2ο

Οι μετρήσεις του 2ου δοκιμίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Μετρήσεις μονωτήρων 2ου δοκιμίου με βήμα 500 V

U(KV)	Iδ (nA)	C(nF)	R 15sec (TΩ)	R (1min) (TΩ)	R (10min) (TΩ)	Un(KV)	tm (min)	DAR	PI	DD
0,5	0	0,3	>1	>1	>1	0,556	10	-	-	-
1	0,01	0,4	>2	>2	>2	1,089	10	-	-	-
1.5	0,03	0,9	>3	>3	>3	1,61	10	-	-	-
2	0,05	0,7	>4	>4	>4	2,108	10	-	-	-
2,5	0,08	0,5	>5	>5	>5	2,665	10	-	-	-
3	0,11	0,5	>6	>6	>6	3,191	10	-	-	-
3,5	0,14	0,2	>7	>7	>7	3,71	10	-	-	-
4	0,17	0,6	>8	>8	>8	4,235	10	-	-	-
4,5	0,23	0,8	8,24	>9	>9	4,775	10	-	-	-
5	0,26	0,7	8,54	>10	>10	5,266	10	-	-	-

Δοκίμιο 3ο

Οι μετρήσεις του 3ου δοκιμίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 13.

Πίνακας 13: Μετρήσεις μονωτήρων 3ου δοκιμίου με βήμα 500 V

U(KV)	Iδ (nA)	C(nF)	R 15sec (GΩ)	R (1min) (GΩ)	R (10min) (GΩ)	Un (KV)	tm (min)	DAR	PI	DD
0,5	2,88	0,2	125	161	193	0,557	10	1,28	1,2	-
1	7,32	0,4	129	144	149	1,09	10	1,11	1,03	-
1.5	10,9	0,6	117	131	148	1612	10	1,12	1,14	-
2	13,8	0,5	116	133	153	2112	10	1,15	1,15	-
2,5	22,4	0,9	113	124	119	2665	10	1,09	0,96	-
3	26,6	0,9	99	106	120	3192	10	1,07	1,113	-
3,5	29,3	0,4	99,4	108	127	3710	10	1,08	1,18	-
4	34,4	0,6	104	110	123	4235	10	1,06	1,12	-
4,5	39,5	0,9	104	111	120	4754	10	1,06	1,08	-
5	44,4	0,7	100	108	118	5269	10	1,07	1,1	-

Δοκίμιο 4ο

Οι μετρήσεις του 4ου δοκιμίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 14: Μετρήσεις μονωτήρων 4ου δοκιμίου με βήμα 500 V

U(KV)	Iδ(nA)	C(nF)	R 15sec (TΩ)	R (1min) (TΩ)	R (10min) (TΩ)	Un (KV)	tm (min)	DAR	PI	DD
0,5	0	0,3	>1	>1	>1	0,555	10	-	-	-
1	0,04	0,2	>2	>2	>2	1,082	10	-	-	-
1.5	0,02	0,4	>3	>3	>3	1,603	10	-	-	-
2	0,04	0,5	>4	>4	>4	2,101	10	-	-	-
2,5	0,05	0,5	>6	>5	>5	2,646	10	-	-	-
3	0,17	0,3	>6	>6	>6	3,169	10	-	-	-

3,5	0,07	0,2	>7	>7	>7	3,695	10	-	-	-
4	0,12	0,5	>8	>8	>8	4,213	10	-	-	-
4,5	0,06	0,6	7,71	>9	>9	4,746	10	-	-	-
5	0,15	0,5	7,03	>10	>10	5,236	10	-	-	-

Δοκίμιο 5ο

Οι μετρήσεις του 5ου δοκιμίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 15.

Πίνακας 15: Μετρήσεις μονωτήρων 5ου δοκιμίου με βήμα 500

U(KV)	Iδ(nA)	C(nF)	R 15sec (TΩ)	R (1min) (TΩ)	R (10min) (TΩ)	Un (KV)	tm (min)	DAR	PI	DD
0,5	0,3	0,1	>1	>1	>1	0,556	10	-	-	-
1	0,69	0,1	0,97	>2	1,59	1,09	10	-	-	-
1.5	1,07	0,7	1,8	1,72	1,51	1,614	10	0,96	0,88	-
2	1,67	0,7	1,6	1,42	1,26	2,112	10	0,89	0,89	-
2,5	2,4	0,6	1,52	1,15	1,11	2,668	10	0,76	0,96	-
3	3,16	0,3	0,712	1,1	1,01	3,195	10	1,54	0,92	-
3,5	3,89	0,4	1,17	1,07	0,956	3,714	10	0,91	0,9	-
4	4,32	0,5	0,787	1,54	0,982	4,24	10	1,96	0,64	-
4,5	5,11	0,8	0,65	1,77	0,934	4,768	10	2,73	0,53	-
5	5,47	0,8	1,58	1,53	0,963	5,266	10	0,97	0,63	-

Δοκίμιο 6ο

Οι μετρήσεις του 6ου δοκιμίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16: Μετρήσεις μονωτήρων με βήμα 500

U(KV)	Iδ(nA)	C(nF)	R 15sec (TΩ)	R (1min) (TΩ)	R (10min) (TΩ)	Un (KV)	tm (min)	DAR	PI	DD
0,5	0,05	0,1	>1	>1	>1	0,554	10	-	-	-
1	0,08	0,2	>2	>2	>2	1,082	10	-	-	-
1.5	0,06	0,6	>3	>3	>3	1,602	10	-	-	-
2	0,09	0,6	>4	>4	>4	2,101	10	-	-	-
2,5	0,13	0,4	>5	>5	>5	2,646	10	-	-	-
3	0,15	0,4	>6	>6	>6	3,169	10	-	-	-
3,5	0,29	0,4	>7	>7	>7	3,695	10	-	-	-
4	0,29	0,5	>8	>8	>8	4,213	10	-	-	-
4,5	0,38	0,6	8,81	>9	>9	4,748	10	-	-	-
5	0,52	0,5	6,65	9,2	>10	5,237	10	-	-	-

4. Κριτική ανάλυση των μετρήσεων και συμπεράσματα

Βασικό προβληματισμό στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε η δυνατότητα ορθής και έγκαιρης αξιολόγησης της λειτουργίας ενός μονωτήρα. Καίριο ερώτημα αποτέλεσε η τυχόν ύπαρξη εξωτερικών ενδείξεων σε έναν μονωτήρα που να οδηγούν στο συμπέρασμα μειωμένης αντίστασης της μόνωσης.

Με σκοπό την αναζήτηση απαντήσεων στους παραπάνω προβληματισμούς, διενεργήθηκαν μετρήσεις αντίστασης σε έξι (6) διαφορετικά δοκίμια μονωτικών υλικών, εφαρμόζοντας τάση με την βοήθεια του οργάνου metrel 5Kn plus με εύρος από 0,5 ~ 5 KV.

Όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδια, και ειδικότερα πρόκειται για μονωτήρες μέσης τάσης για ονομαστική τάση λειτουργίας 20KV. Οι απαιτούμενες μετρήσεις στα δοκίμια πραγματοποιήθηκαν σε κλειστό και ελεγχόμενο χώρο, κατά τρόπο τέτοιο ώστε η διαδικασία και τα αποτελέσματα να μην επηρεαστούν από εξωτερικές συνθήκες όπως για παράδειγμα ρύπανση και εξωτερική θερμοκρασία.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε δοκίμιο θα κριθούν σύμφωνα με τον δείκτη πόλωση PI και τον δείκτη DAR δηλαδή τον λόγο διηλεκτρικής απορρόφησης.

Σύμφωνα με τους πίνακες που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (Πίνακας 11- Πίνακας16), στα αποτελέσματα των μετρήσεων από τα δοκίμια 2, 4, και 6 ο δείκτης PI, καθώς και ο δείκτης DAR, είναι άνω των ορίων. Η ένδειξη αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αντίσταση της μόνωσης είναι πολύ μεγάλη και ως εκ τούτου ο μονωτήρας είναι σε καλή κατάσταση. Συν τοις άλλοις οι ενδείξεις περί την μετρησιμότητα των δεικτών PI και DAR, ήταν ξεκάθαρες από την πρώτη κιόλας μέτρηση με τάση 0,5 KV.

Σε ότι αφορά το 1ο δοκίμιο, σύμφωνα με τον Πίνακα 11 οι τιμές του δείκτη PI κυμαίνονται μεταξύ 1,09 – 1,25 και οι τιμές του δείκτη DAR μεταξύ 1,03-1,11. Συνεπώς, τόσο τα αποτελέσματα των μετρήσεων του δείκτη PI όσο και του δείκτη DAR, κατατάσσουν την κατάσταση της μόνωσης ως αμφισβητήσιμη σύμφωνα με τις κατατάξεις των τιμών στους πίνακες 9 και 10.

Η κατάσταση είναι παρόμοια και στο 3ο δοκίμιο, στο οποίο σύμφωνα με τον Πίνακα 13, οι τιμές του δείκτη PI κυμαίνονται μεταξύ 0,96– 1,18 και οι τιμές του δείκτη DAR μεταξύ 1,06-1,28. Συμπεραίνεται ότι οι τιμές του δείκτη DAR είναι οριακά καλύτερες

και του δείκτη PI οριακά χαμηλότερες τιμές, με μία εκ των μετρήσεων του τελευταίου να βρίσκεται κάτω του 1 και ως εκ τούτου η κατάσταση της μόνωσης να χαρακτηρίζεται ως επικίνδυνη.

Τέλος σε ότι αφορά το 5ο δοκίμιο, σύμφωνα με τον Πίνακα 15 οι τιμές του δείκτη PI κυμαίνονται μεταξύ 0,53 – 0,96 και οι τιμές του δείκτη DAR μεταξύ 0,96-2,73. Ως εκ τούτου σύμφωνα με τον δείκτη DAR η κατάσταση της μόνωσης είναι αμφισβητήσιμη ενώ σύμφωνα με τον δείκτη PI ότι είναι επικίνδυνη.

Βασική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δεικτών είναι παρόμοια σε κάθε δοκίμιο ξεχωριστά ανεξάρτητα την τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης. Συνεπώς, οι μονωτήρες με προβληματική απόδοση εμφανίζουν την μη ικανοποιητική κατάστασή τους από την πρώτη κιάλας μέτρηση. Αυτή η σημαντική ένδειξη οδηγεί άμεσα στο συμπέρασμα αν ο μονωτήρας έχει χάσει την μονωτική του ικανότητα και άρα αν χρήζει αντικατάστασης.

Ωστόσο οι μονωτήρες με μη επαρκή μονωτική λειτουργία δεν παρουσιάζουν κάποια εξωτερική ένδειξη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον μη έγκαιρο έλεγχο τους και ως εκ τούτου την μη έγκαιρη εκκίνηση των διαδικασιών αντικατάστασής τους, η οποία αν καθυστερήσει ενδέχεται να δημιουργηθεί πλήθος προβλημάτων στις αντίστοιχες εγκαταστάσεις, που είναι τοποθετημένοι.

Εν κατακλείδι, αποδεικνύεται ότι ο μόνος ασφαλής τρόπος αξιολόγησης των μεταβολών απόδοσης της μονωτικής λειτουργίας των μονωτήρων των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων είναι η μέτρηση των κατάλληλων δεικτών, χωρίς να παραβλέπονται οι απαιτούμενες ανά περίπτωση διαδικασίες συντήρησης.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

- [1] Αραβανής, Θ.Ι., Αραβανή, Θ.Ι., Αραβανή Ι. ‘‘ΜΟΝΩΤΗΡΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ’’ στον ιστότοπο, <http://www.electrologos.gr/news/112>
- [2] Αράπης, Γ. (2012). Μελέτη Στερεών Μονωτικών. Πάτρα: τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών
- [3] Γιαλκέτση, Α.Α. (2005). Εκτίμηση της κρίσιμης τάσης υπερπήδησης σε μονωτήρες με τη χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
- [4] Δέρβος, Κ.Θ. (2001). Μονωτικά Υλικά ΥΤ. Αθήνα
- [5] Δέρβος, Κ.Θ, Βασιλείου, Παν. (2004). Εισαγωγή στα Υλικά, Μέρος ΙΙ : Πολυμερή – Σύνθετα., Αθήνα
- [6] Καγκαράκης, Κ. (1994). Μαθήματα στα Ηλεκτροτεχνικά Υλικά. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία
- [7] Μπούρκας, Π.Δ. (1998). *Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [8] Μπούρκας, Π.Δ., Δέρβος, Κ.Θ. (1990) *Ηλεκτρομονωτικά Υλικά*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [9] Μπούρκας, Π.Δ. Καραγιαννόπουλος, Κ.Γ. (2004). Μετρήσεις σε βιομηχανικές διατάξεις και υλικά. Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- [10] Ντοκόπουλος, Π. (2005). Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών. Αθήνα: εκδόσεις ΖΗΤΗ

- [11] Ρένεσης, Ν., Τσαλκάνης, Κ. (2008). Μέτρηση αντίστασης ηλεκτρομονωτικών υλικών. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
- [12] Σταθόπουλος, Αθ. Ι. (1991). Υψηλές Τάσεις Ι, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμεών
- [13] Τσουκανέλης, Σ. (2011). Αξιολόγηση της γήρανσης συνθετικών μονωτικών με μεθόδους φασματοσκοπίας. Πάτρα: τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών
- [14] Ελευθερίου, Ε.Γ. (2008). Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Σχετικά με τη Διάρκεια Ζωής του Ηλεκτρολογικού Εξοπλισμού. Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- [14]Holtzhausen J.P., —High voltage insulators|, Διαθέσιμο στο: <http://www.idc-online.com/assets/files/highvoltage.pdf>.
- [15]Küchler A. (2018) Insulating Materials. In: High Voltage Engineering. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11993-4_5
- [16]Looms, J.S.T. “Insulators for high voltages”, Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom, 1990
- [17] IEC 815, (1986) «Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions»