



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ
ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ**

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2021

1. Γενικά

Τα υγρά μονωτικά¹ χρησιμοποιούνται στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό τόσο για τη μονωτική τους ικανότητα όσο και για τη θερμική τους αγωγιμότητα. Έχουν αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τα αέρια και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι αρκετά μεγάλος με αποτέλεσμα να διευκολύνουν την απαγωγή θερμότητας, η οποία δημιουργείται στους αγωγούς, στις επαφές διακοπών και στους σιδηροπυρήνες των μετασχηματιστών. Η διηλεκτρική σταθερά των υγρών μονωτικών είναι σχετικά χαμηλή ($\epsilon_r=2-2,5$), οι διηλεκτρικές απώλειες επίσης μικρές (ο συντελεστής απωλειών $\tan\delta$ είναι της τάξης του 1×10^{-4}), ενώ έχουν τη δυνατότητα να επανακτούν τις μονωτικές τους ιδιότητες μετά από μια διάσπαση. Άλλα πλεονεκτήματα των υγρών διηλεκτρικών είναι ότι γεμίζουν πλήρως τον προς μόνωση όγκο και ο συνδυασμός τους με στερεά μονωτικά δεν επιτρέπει την ύπαρξη αέρα, ο οποίος προκαλεί βλάβες στις επιφάνειες των στερεών μονωτικών.

2. Τύποι μονωτικών λαδιών

Τα υγρά μονωτικά διακρίνονται σε οργανικά, ορυκτά και συνθετικά.

Τα **οργανικά έλαια** περιλαμβάνουν φυτικά έλαια και εστέρες. Τα οργανικά έλαια έχουν καλές ηλεκτρολογικές ιδιότητες, αναφλέγονται δύσκολα, έχουν καλύτερη αντοχή στη φωτιά συγκρινόμενα με τα ορυκτά έλαια, αποδομούνται πιο γρήγορα από τα ορυκτά έλαια, είναι όμως υδρόφιλα και οξειδώνονται εύκολα, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους.

Τα **ορυκτά έλαια** παράγονται ως κλάσματα της απόσταξης του αργού πετρελαίου. Το αργό πετρέλαιο, ανάλογα με το είδος των υδρογονανθράκων που περιέχει καθώς και τις αναλογίες τους, μπορεί να χωρισθεί σε τρεις κατηγορίες:

- παραφινικής βάσης
- ναφθενικής βάσης
- μικτής βάσης

Σε αντιστοιχία προκύπτουν τα μεθανέλαια τα ναφθανέλαια και ναφθαλμεθανέλαια.

Στα **συνθετικά έλαια** ανήκουν τα έλαια σιλικόνης. Πρόκειται για υδρογονάνθρακες που περιλαμβάνουν πυρίτιο. Τα έλαια σιλικόνης έχουν περιορισμένη χρήση εξαιτίας της κακής απαγωγής θερμότητας, ενώ παρουσιάζουν ευαισθησία στις ηλεκτρικές εκκενώσεις. Στα συνθετικά μονωτικά έλαια ανήκουν επίσης υδρογονάνθρακες που έχουν υποστεί χλωρίωση, όπως το Askarel, το Pyradol, το Nepdin κ.α. Τα μονωτικά αυτά είναι άκαυστα και έχουν μεγάλη διηλεκτρική σταθερά ($\epsilon_r=4-5$), δεν χρησιμοποιούνται όμως πλέον, γιατί περιέχουν τοξικά συστατικά. Μια άλλη κατηγορία συνθετικών μονωτικών ελαίων είναι υδρογονάνθρακες που έχουν υποστεί φθορίωση. Έχουν μεγάλη διηλεκτρική σταθερά, δεν προκαλούν φθορές στα στερεά μονωτικά και είναι άκαυστα υλικά. Η χρήση τους είναι περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους τους.

Ο Πίνακας 1 δείχνει τη χρήση των κυριότερων υγρών διηλεκτρικών στους ηλεκτρολογικούς εξοπλισμούς. (βλ.[1], σελ.297-298)

¹ Οι όροι μονωτικά λάδια, μονωτικά έλαια, υγρά μονωτικά και υγρά διηλεκτρικά χρησιμοποιούνται ισοδύναμα στο παρόν φυλλάδιο.

Τύπος Μονωτικού	Εξοπλισμός
Ορυκτέλαια	κάθε είδους
Συνθετικοί υδρογονάνθρακες	καλώδια, πυκνωτές
Χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες	μετασχηματιστές, πυκνωτές, διακόπτες
Έλαια σιλικόνης	μετασχηματιστές
Οργανικά έλαια	μετασχηματιστές

Πίνακας 1: Χρήση των κυριότερων υγρών διηλεκτρικών στους ηλεκτρολογικούς εξοπλισμούς.

3. Παράγοντες που επηρεάζουν τη διηλεκτρική αντοχή των υγρών μονωτικών

A.) Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων

Όσο μεγαλύτερο είναι το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων, τόσο μικρότερη γίνεται η διηλεκτρική αντοχή του υπό εξέταση μονωτικού υγρού. Αυτό συμβαίνει διότι μεγαλύτερο διάκενο συνεπάγεται μεγαλύτερο όγκο υγρού που καταπονείται και κατά συνέπεια περισσότερα αιωρούμενα σωματίδια, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα διάσπασης.

B.) Το εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίων

Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια των ηλεκτροδίων, τόσο μικρότερη γίνεται η διηλεκτρική αντοχή του υπό εξέταση μονωτικού υγρού. Αυτό συμβαίνει διότι μεγαλύτερη επιφάνεια ηλεκτροδίων αναμένεται να έχει περισσότερες μικροπροεξοχές και ανωμαλίες.

Γ.) Το υλικό των ηλεκτροδίων

Μέταλλα με υψηλό έργο εξόδου δίνουν υψηλή διηλεκτρική αντοχή. Επίσης η χρησιμοποίηση διαφορετικών μετάλλων για την άνοδο και την κάθοδο έδειξαν εξάρτηση της διηλεκτρικής αντοχής μόνο από την κάθοδο.

Δ.) Η γεωμετρία των ηλεκτροδίων

Από τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων εξαρτάται η ομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο, τόσο μειώνεται η τάση διάσπασης.

Ε.) Το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης

Η διηλεκτρική αντοχή υπό κρουστική τάση είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη τάση 50Hz επί 1min. Υπό συνεχή τάση η διηλεκτρική αντοχή είναι μεγαλύτερη από ότι με εναλλασσόμενη, ενώ η τάση διάσπασης κατά την καταπόνηση με κρουστικές τάσεις είναι μεγαλύτερη κατά την αρνητική πολικότητα απ' ότι κατά τη θετική (φαινόμενο πολικότητας).

ΣΤ.) Η θερμοκρασία

Αυξανόμενη της θερμοκρασίας μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού.

Ζ.) Η πίεση (εξωτερική ή υδροστατική)

Αυξανόμενη της πίεσης αυξάνεται η διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού.

Η.) Η παρουσία υγρασίας, ξένων σωματιδίων και φυσαλίδων αέρα

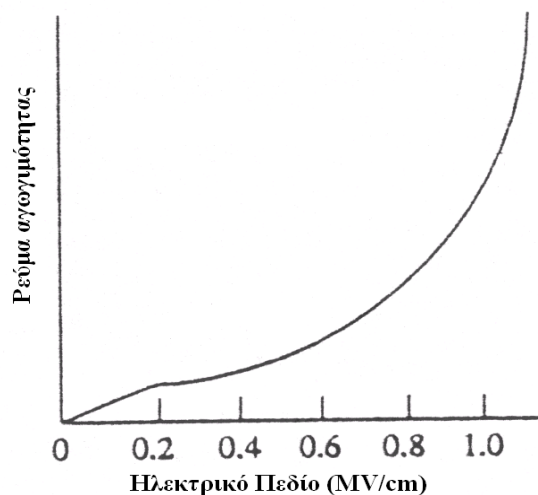
Η παρουσία υγρασίας μειώνει κατά πολύ τη μονωτική ικανότητα του υγρού διηλεκτρικού, ενώ τα αιωρούμενα σωματίδια μειώνουν τις αποστάσεις μόνωσης, δημιουργώντας αγωγίμες γέφυρες. Επίσης, τα υγρά μονωτικά οξειδώνονται από τον αέρα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διηλεκτρική αντοχή τους. Για αυτό η παρουσία αέρα θα πρέπει να αποκλείεται στις κατασκευές που χρησιμοποιούνται μονωτικά έλαια. Γι' αυτό το λόγο άλλωστε όταν γίνεται η πλήρωση των δοχείων ελαίου των μετασχηματιστών στο στάδιο κατασκευής τους, η όλη διαδικασία λαμβάνει χώρα σε κενό αέρα, ώστε να αποφευχθεί η παρουσία αέρα στο δοχείο ελαίου, γεγονός που θα μειώσει τη διηλεκτρική αντοχή του ελαίου.

4. Μηχανισμοί διάσπασης υγρών μονωτικών

4.1 Ηλεκτρονική (ή ενδογενής) διάσπαση

Η ηλεκτρονική διάσπαση βρίσκει εφαρμογή σε υγρά διηλεκτρικά, τα οποία είναι καθαρά, δηλαδή δεν είναι μίξεις, είναι διηθημένα και απιονισμένα, ενώ έχουν απομακρυνθεί φυσαλίδες αέρα ή άλλα ξένα σωματίδια.

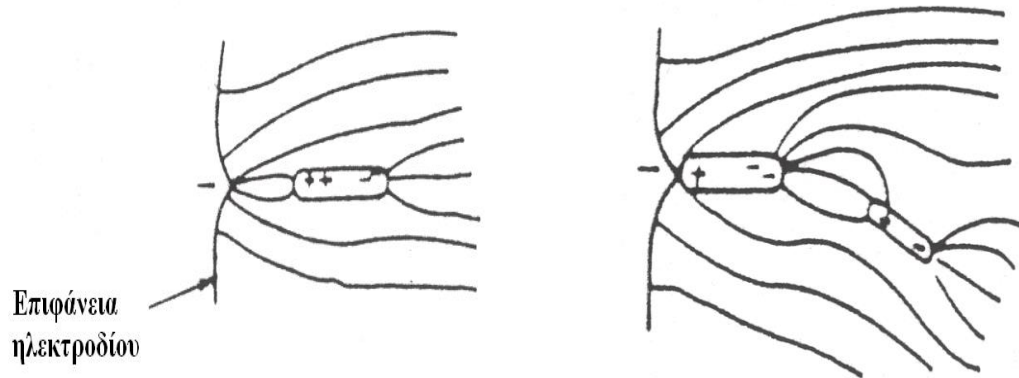
Όταν το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι μικρότερο από 1kV/cm οι αγωγιμότητες που παρατηρούνται στο υγρό κυμαίνονται από 10^{-18} έως 10^{-20} S/cm. Για πεδία όμως μεγαλύτερα των 100kV/cm το ρεύμα αγωγιμότητας αυξάνει όπως φαίνεται και στο Σχ. 1. Με πεδίο λοιπόν μεγαλύτερο από 100kV/cm ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την κάθοδο επιταχύνονται εξαιτίας του πεδίου και συγκρούονται με τα άτομα των μορίων του υγρού, προκαλώντας τον ιονισμό τους. Με τον τρόπο αυτό ο αριθμός των ηλεκτρονίων πολλαπλασιάζεται (με μία διαδικασία ανάλογη με το μηχανισμό Townsend στα αέρια), δημιουργείται μια χιονοστιβάδα ηλεκτρονίων κινούμενη από την κάθοδο προς την άνοδο, που οδηγεί στη διάσπαση του διηλεκτρικού. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου παρατηρούνται, λόγω του μεγάλου ρεύματος και των ηλεκτροστατικών δυνάμεων που δέχονται τα υπάρχοντα χωρικά φορτία, ταλαντώσεις με συνέπεια την επιτόπιο κίνηση του υγρού. Η όλη διαδικασία συνοδεύεται από εκπομπή φωτός.



Σχήμα 1: Ρεύμα αγωγιμότητας συναρτήσει του εφαρμοζόμενου πεδίου σε υγρό μονωτικό

4.2 Διάσπαση μέσω αιωρούμενων σωματιδίων

Σε ένα υγρό διηλεκτρικό υπάρχουν συνήθως σωματίδια σκόνης, ίνες, μεταλλικά σωματίδια, σωματίδια από στερεά μονωτικά κ.α. Υπό την επίδραση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου E και επειδή η διηλεκτρική σταθερά των σωματιδίων (ϵ_2) είναι μεγαλύτερη από τη διηλεκτρική σταθερά του υγρού (ϵ_1) τα σωματίδια πολώνονται και οδηγούνται προς την περιοχή της υψηλότερης πεδιακής έντασης (Σχ. 2).



Σχήμα 2: Προσανατολισμός των αιωρούμενων σωματιδίων υπό την επίδραση του πεδίου μέσα σε μονωτικό υγρό

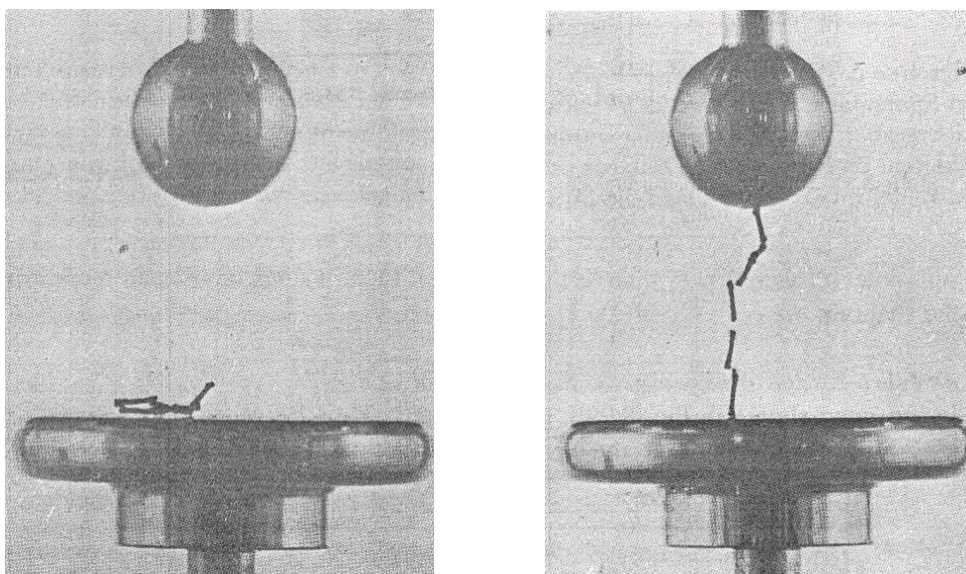
Για ένα σφαιρικό σωματίδιο ακτίνας r το μέγεθος της αναπτυσσόμενης δύναμης είναι:

$$F = \frac{r^3(\epsilon_2 - \epsilon_1)\nabla E^2}{2(2\epsilon_1 + \epsilon_2)} \quad (1)$$

Στην περίπτωση όπου $\epsilon_2 \rightarrow \infty$ (π.χ. μεταλλικά σωματίδια) η δύναμη είναι :

$$F = \frac{r^3\nabla E^2}{2} \quad (2)$$

Η δύναμη F είναι ανεξάρτητη της κατεύθυνσης του πεδίου E , οπότε τα αποτελέσματα αναμένονται να είναι ίδια τόσο για συνεχή όσο και για εναλλασσόμενη τάση (δε συμβαίνει όμως το ίδιο για υψηλές συχνότητες ή για κρουστικές τάσεις).



Σχήμα: 3 Σχηματισμός αγώγιμης γέφυρας και διάσπαση υγρού μονωτικού

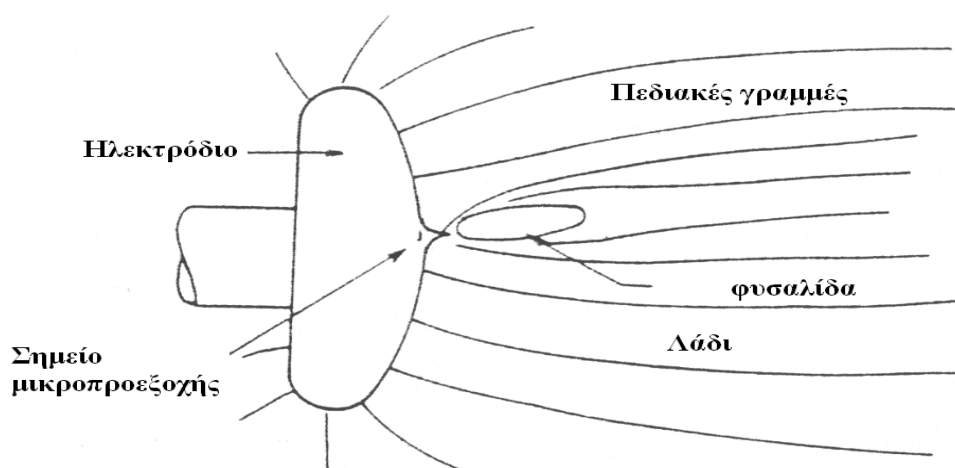
Εξαιτίας των δυνάμεων αυτών τα σωματίδια τείνουν να ευθυγραμμιστούν, σχηματίζοντας αγωγίμες γέφυρες μεταξύ των ηλεκτροδίων με αποτέλεσμα τη διάσπαση του υγρού (Σχ. 3). Στην περίπτωση που έχουμε μόνο ένα σωματίδιο (ή γενικότερα μικρό αριθμό σωματιδίων) τότε, ανάλογα με το σχήμα του σωματιδίου, παρατηρείται τοπική αύξηση του πεδίου γύρω από αυτό. Όταν η τιμή του πεδίου ξεπεράσει τη διηλεκτρική αντοχή του υγρού, έχουμε την έναρξη μερικών εκκενώσεων με αποτέλεσμα το σχηματισμό φυσαλίδων αέρα που μπορεί να οδηγήσουν στη διάσπαση του υγρού.

4.3 Διάσπαση διά φυσαλίδων

Η παρουσία φυσαλίδων αερίου μέσα σε ένα υγρό διηλεκτρικό μειώνει τη διηλεκτρική αντοχή του και οδηγεί στη διάσπασή του. Ο σχηματισμός φυσαλίδων αερίου (Σχ. 4) οφείλεται:

- σε θύλακες αερίου στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων
- σε αέρια προϊόντα που προέρχονται από την αποσύνθεση των μορίων του υγρού λόγω σύγκρουσής τους με ηλεκτρόνια
- σε ηλεκτροστατικές απωθητικές δυνάμεις μεταξύ χωρικών φορτίων που μπορεί να ξεπεράσουν την επιφανειακή τάση
- σε εξάτμιση του υγρού λόγω εκκεώσεων τύπου Corona (εκπομπή ηλεκτρονίων) σε προεξοχές των ηλεκτροδίων

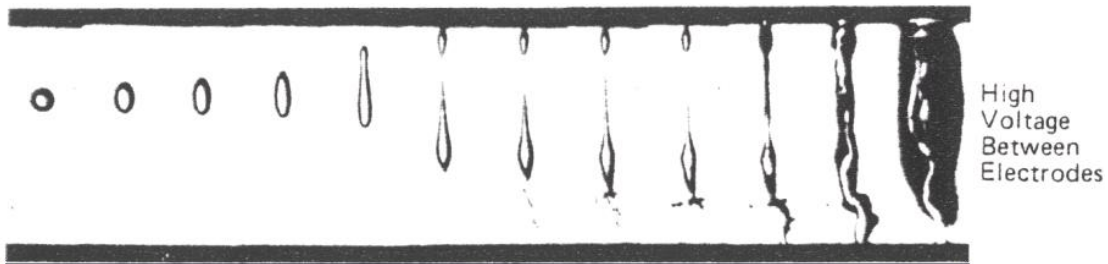
Εξαιτίας της διαφοράς των διηλεκτρικών σταθερών αερίου και υγρού, το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό της φυσαλίδας είναι έως και 1,5 φορά μεγαλύτερο από ότι στο υγρό. Έτσι, μετά το σχηματισμό της, η φυσαλίδα επιμηκύνεται προς την κατεύθυνση του πεδίου υπό την επίδραση ηλεκτροστατικών δυνάμεων, ενώ ο όγκος της παραμένει σταθερός. Διάσπαση έχουμε όταν η πτώση τάσης κατά μήκος της φυσαλίδας πάρει μια συγκεκριμένη τιμή, καθορισμένη από το νόμο του Raaschen για τα αέρια. Η τάση διάσπασης εξαρτάται από το αρχικό σχήμα και το μέγεθος της φυσαλίδας, τα οποία με τη σειρά τους εξαρτώνται από την υδροστατική πίεση και τη θερμοκρασία του υγρού.



Σχήμα 4: Σχηματισμός φυσαλίδας στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου

Παρόμοιος είναι και ο μηχανισμός στην περίπτωση παρουσίας υγρασίας. Τα σταγονίδια επιμηκύνονται υπό την επίδραση του πεδίου, δημιουργώντας αγωγίμους διαύλους με αποτέλεσμα για κάποια συγκεκριμένη τιμή του πεδίου να επέλθει διάσπαση (Σχ. 5).

Γενικά, υπό κανονικές συνθήκες η υγρασία που υπάρχει σε ένα υγρό μονωτικό δεν πρέπει να ξεπερνά το $10^{-3}\%$.



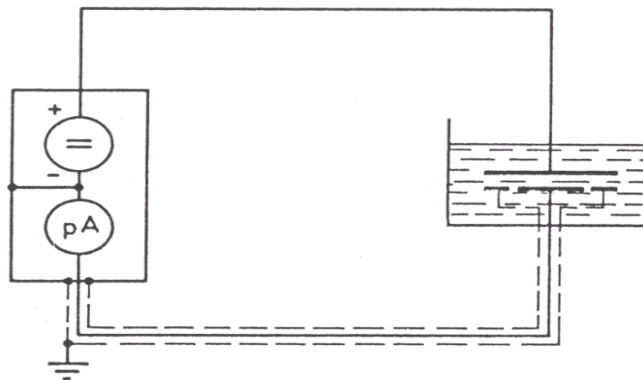
Σχήμα 5: Επιμήκυνση σταγονιδίου μέσα σε υγρό μονωτικό και διάσπαση του διηλεκτρικού

5. Δοκιμές και έλεγχοι σε μονωτικά λάδια

Για την εκτίμηση της κατάστασης των μονωτικών λαδιών είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση δοκιμών και ελέγχων τόσο πριν τη χρησιμοποίησή τους όσο και περιοδικά, ώστε να προβλεφθεί έγκαιρα το ενδεχόμενο αστοχίας.

Οι δοκιμές που αφορούν τα μονωτικά λάδια περιλαμβάνουν δοκιμές στα φυσικά, χημικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους (βλ. [1] σελ. 301-307). Υπάρχουν διάφοροι κανονισμοί (διεθνείς, γερμανικοί, βρετανικοί, αμερικανικοί, ιταλικοί, ελληνικοί) που περιγράφουν τους απαιτούμενους ελέγχους. Τα μεγέθη που συνήθως ελέγχονται είναι η διηλεκτρική αντοχή, η οξύτητα, το ποσό των αιωρημάτων, ο συντελεστής ισχύος, η ειδική αντίσταση και το χρώμα. Τα μονωτικά λάδια πρέπει να αντικαθίστανται μόλις κάποια από αυτές τις ιδιότητες υπερβεί κάποια όρια, όπως αυτά περιγράφονται από τα πρότυπα.

Στα Σχήματα 6 και 7 παρουσιάζονται δύο διατάξεις για τη μέτρηση της αγωγιμότητας και του συντελεστή απωλειών σε μονωτικά λάδια.



Σχ.6 Διάταξη για τη μέτρηση της αγωγιμότητας υγρών μονωτικών

Στο Σχήμα 6 εφαρμόζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων μία συνεχής τάση 100V και μετράται η ένταση του ρεύματος. Η αγωγιμότητα προκύπτει από τη σχέση :

$$\kappa = \frac{I}{U} \cdot \frac{s}{A} \quad (3)$$

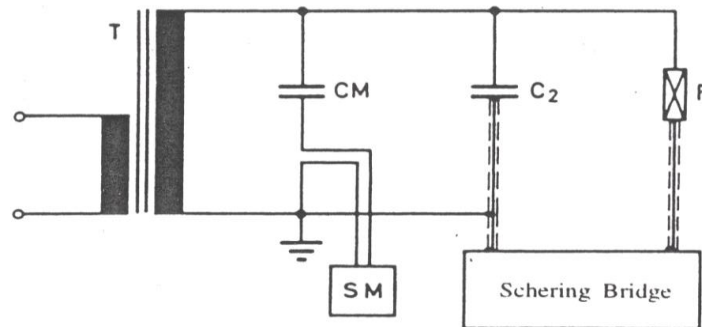
όπου I : η ένταση του ρεύματος

s : το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων

U : η εφαρμοζόμενη τάση

A : το εμβαδό των ηλεκτροδίων

Στο Σχήμα 7 μετράται ο συντελεστής απωλειών με χρήση της γέφυρας Shering (βλ. [1] σελ. 332).



Σχήμα 7: Διάταξη για τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών σε υγρά μονωτικά

(C_M : πυκνωτής μέτρησης, P : δοκίμιο, SM : βολτόμετρο μεγίστου)

Η πιο συνηθισμένη δοκιμή που γίνεται στα μονωτικά λάδια (και που θα πραγματοποιηθεί στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση) είναι ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 60156, ASTM D 877-02 και ASTM 1816-04 για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης σε μονωτικά λάδια.

6. Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 60156 για τον προσδιορισμό της τάσης διακοπής λειτουργίας σε βιομηχανική συχνότητα για μονωτικά υγρά

6.1. Γενικά

Το Πρότυπο περιγράφει τη μέθοδο για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης υγρών μονωτικών σε βιομηχανική συχνότητα. Στο υπό εξέταση μονωτικό εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση, η οποία αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, μέχρι να επέλθει διάσπαση. Το πρότυπο αφορά όλα τα είδη των μονωτικών υγρών και είναι κατάλληλο τόσο για υγρά που θα χρησιμοποιηθούν για πρώτη φορά, όσο και για τον έλεγχο υγρών μονωτικών σε διαδικασίες συντήρησης.

6.2. Διάταξη δοκιμής

6.2.1 Σύστημα παραγωγής και μέτρησης υψηλής τάσης

6.2.1.1 Ρυθμιστής τάσης

Η ρύθμιση της τάσης μπορεί να γίνει είτε με έναν ρυθμιζόμενο αυτομετασχηματιστή είτε με έναν ηλεκτρονικό ρυθμιστή τάσης.

6.2.1.2 Μετασχηματιστής ανύψωσης

Το πρωτεύον του μετασχηματιστή τροφοδοτείται από μια εναλλασσόμενη ημιτονική τάση συχνότητας από 48Hz έως 62Hz, η τιμή της οποίας ανυψώνεται με σταθερό ρυθμό.

6.2.1.3 Αντιστάσεις προστασίας για τον περιορισμό του ρεύματος

Για την προστασία του εξοπλισμού και για την αποφυγή υπερβολικής αποσύνθεσης του υπό εξέταση υγρού κατά τη διάσπασή του, τοποθετούνται αντιστάσεις προστασίας για τον περιορισμό του ρεύματος κατά τη διάσπαση.

6.2.1.4 Σύστημα απόξευξης

Για τη διακοπή του κυκλώματος σε περίπτωση εμφάνισης τόξου υπάρχει πριν από το πρωτεύον του μετασχηματιστή αυτόματος διακόπτης, ο οποίος ανοίγει μέσα σε 10ms. Η διακοπή της τάσης μπορεί να γίνει και χειροκίνητα, σε περίπτωση που διαπιστωθεί – ακουστικά ή οπτικά- εμφάνιση σπινθήρα.

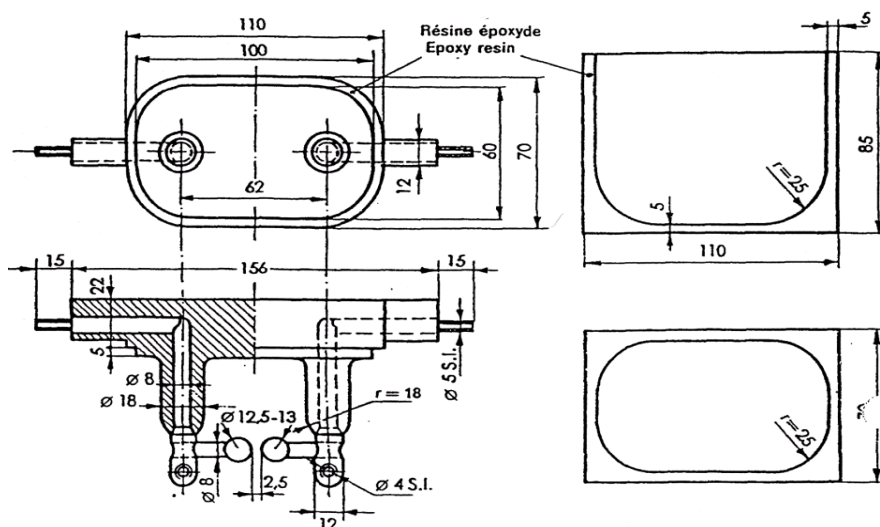
6.2.1.5 Μέτρηση της τάσης

Η τάση διάσπασης μετράται με ένα βολτόμετρο μεγίστου ή άλλου τύπου βολτόμετρο, που συνδέεται στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.

6.2.2 Δοχείο δοκιμών

Το δοχείο δοκιμών (Σχ. 8 και 9), ο όγκος του οποίου κυμαίνεται από 350ml έως 600ml, είναι κατασκευασμένο από διαφανές και χημικά αδρανές μονωτικό υλικό, ανθεκτικό στα μονωτικά υγρά και στα προϊόντα καθαρισμού που θα χρησιμοποιηθούν, και είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να επιτρέπει την εύκολη μετακίνηση των ηλεκτροδίων για καθαρισμό και συντήρηση.

Σε περίπτωση αλλαγής του υπό εξέταση μονωτικού πρέπει να απομακρύνονται από το δοχείο δοκιμών όλα τα υπολείμματα με κατάλληλο διαλυτικό, να ξεπλένεται το δοχείο με μονωτικό υγρό του ίδιου τύπου με αυτό που πρόκειται να δοκιμαστεί και κατόπιν να ξηραίνεται.



Σχήμα 8: Δοχείο δοκιμών και ηλεκτρόδια

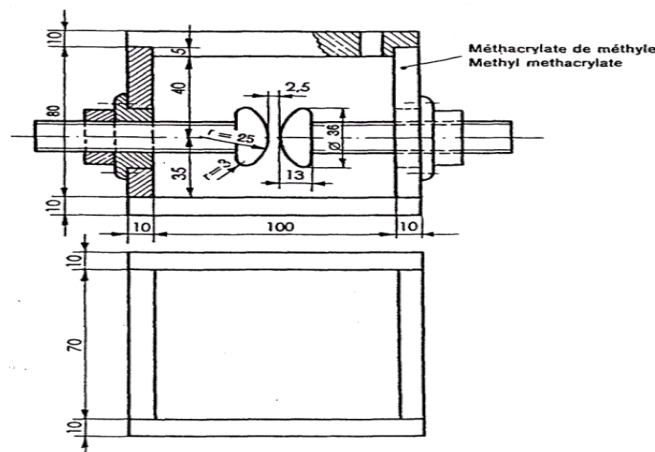
6.2.3 Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια (Σχ. 8 και 9) είναι κατασκευασμένα από ορείχαλκο (μπρούντζο) ή ανοξείδωτο ατσάλι. Πρέπει να είναι γυαλισμένα και το σχήμα τους να είναι είτε σφαιρικό (διαμέτρου 12,5-13mm), είτε μερικώς σφαιρικό. Ο άξονας των ηλεκτροδίων είναι οριζόντιος και τουλάχιστον 40mm κάτω από την επιφάνεια του υγρού. Κανένα

μέρος του ηλεκτροδίου δε θα πρέπει να απέχει λιγότερο από 12mm από τα τοιχώματα του δοχείου δοκιμών ή τον αναδευτήρα. Το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι $2,5 \pm 0,05\text{mm}$.

Ο καθαρισμός των ηλεκτροδίων γίνεται με την παρακάτω διαδικασία :

- καθαρισμός όλων των επιφανειών με κατάλληλο πτητικό διαλυτικό το οποίο αφήνεται να εξατμιστεί
- γυάλισμα με λειαντική σκόνη ή λειαντικό χαρτί ή ύφασμα
- καθαρισμός με μίγμα οινόπνεύματος και ασετόνη
- καθαρισμός με μονωτικό υγρό (αχρησιμοποίητο) του ίδιου τύπου με αυτό που πρόκειται να εξεταστεί



Σχήμα 9: Δοχείο δοκιμών και ηλεκτρόδια

6.2.4 Αναδευτήρας

Η διεξαγωγή της δοκιμή μπορεί να γίνει με ή χωρίς ανάδευση. Η ανάδευση επιτυγχάνεται με έναν αναδευτήρα δύο λεπίδων διαμέτρου 20-25mm και ταχύτητα περιστροφής 250-300 r.p.m. Ο αναδευτήρας πρέπει να περιστρέφεται με τέτοια φορά έτσι ώστε η ροή του υγρού να κατευθύνεται προς τα κάτω, ενώ παράλληλα πρέπει να αποφεύγεται ο σχηματισμός φυσαλίδων.

6.3. Διεξαγωγή της δοκιμής

Αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία καθαρισμού του δοχείου δοκιμών και των ηλεκτροδίων, όπως αναφέρθηκε στις παραγράφους 6.2.2 και 6.2.3, γεμίζεται αργά το δοχείο δοκιμών με το υπό εξέταση μονωτικό λάδι, αποφεύγοντας το σχηματισμό φυσαλίδων, και μετράται η θερμοκρασία του υγρού, η οποία πρέπει να είναι $25 \pm 5^\circ\text{C}$. Να σημειωθεί ότι, πριν την πλήρωση του δοχείου δοκιμών, το δοχείο φύλαξης του δείγματος αναταράσσεται με προσοχή, έτσι ώστε να διασκορπιστούν ομοιόμορφα τυχόν σωματίδια που περιέχονται στο υγρό.

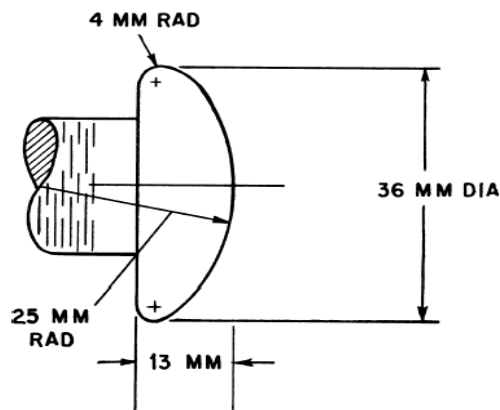
5 min μετά την τοποθέτηση του λαδιού στο δοχείο δοκιμών και αφού έχει ελεγχθεί ότι δεν υπάρχουν ορατές φυσαλίδες αέρα στο διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων, εφαρμόζεται τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων, η οποία ανυψώνεται με σταθερό ρυθμό $2\text{kV/sec} \pm 0,2\text{kV/sec}$. Όταν συμβεί διάσπαση γίνεται απόζευξη της τάσης είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα.

Πραγματοποιούνται 6 δοκιμές, αφήνοντας ένα χρονικό διάστημα 2min μεταξύ τους, και υπολογίζεται η μέση τιμή των καταγραφόμενων τάσεων διάσπασης.

7. Πρότυπα ASTM D 877-02 και ASTM D 1816-04 για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης μονωτικών υγρών

Το πρότυπο ASTM D 877-02 περιγράφει δύο διαδικασίες A και B. Η διαδικασία A εφαρμόζεται σε μονωτικά λάδια, όπως τα ορυκτέλαια και τα συνθετικά, όπου μικροσωματίδια και παραπροϊόντα, που πιθανόν να δημιουργηθούν κατά τη διάσπαση, επικάθονται σχετικά γρήγορα στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μέχρι την επόμενη δοκιμή. Αντίθετα η διαδικασία B εφαρμόζεται σε λάδια, όπως τα σιλικονούχα, όπου τα παραγόμενα κατά τη διάσπαση σωματίδια δεν επικάθονται εύκολα. Για αυτό στη διαδικασία B μετά από κάθε διάσπαση το δοχείο αδειάζεται και ξαναγεμίζεται με νέο δείγμα μονωτικού, αφήνοντας ένα χρόνο 2-3min μέχρι την εφαρμογή της τάσης. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται έχουν τη μορφή παράλληλων δίσκων διαμέτρου $25,4\text{mm} \pm 2\%$, πάχους $3,18\text{mm}$ και το μεταξύ τους διάκενο είναι $2,54\text{mm} \pm 1\%$. Πραγματοποιούνται 5 δοκιμές με εφαρμογή τάσης, η οποία ανυψώνεται με ρυθμό $3\text{kV/sec} \pm 5\%$, καταγράφονται οι τιμές της τάσης διάσπασης και υπολογίζεται η μέση τιμή τους. Μεταξύ δύο διαδοχικών διασπάσεων μεσολαβεί χρόνος 1min.

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 1816-04 χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια τύπου VDE (Σχ. 10). 3-5min μετά την πλήρωση του δοχείου δοκιμών, η τάση ανυψώνεται με ρυθμό $0,5\text{kV/sec} \pm 5\%$, ενώ ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών δοκιμών κυμαίνεται από 60sec έως 90sec. Πραγματοποιούνται 5 διασπάσεις και υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των τιμών της τάσης.



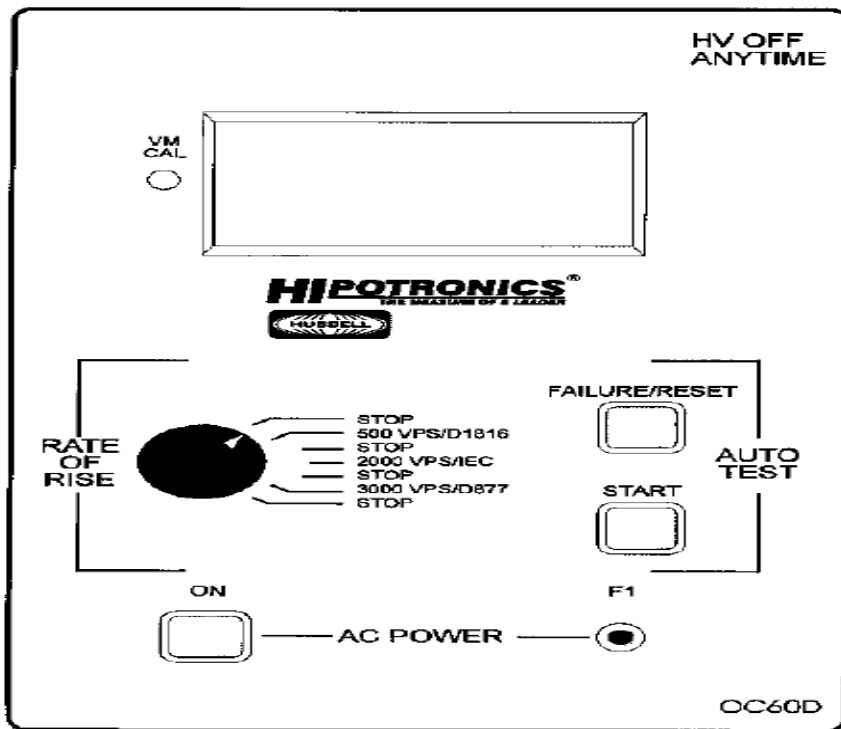
Σχήμα 10: VDE Ηλεκτρόδια

8. Εκτέλεση δοκιμής διηλεκτρικής αντοχής στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων

8.1 Συσκευή δοκιμών

Η συσκευή με την οποία γίνεται η δοκιμή διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών λαδιών στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. είναι κατασκευής της HIPOTRONICS (Model Number: O C60D-B) και σύμφωνη με τους κανονισμούς δοκιμών κατά ASTM, IEC και VDE. Η συσκευή παρέχει μέγιστη τάση εξόδου 60kV (rms) , ενώ η τάση μπορεί να ανυψώνεται με ρυθμό 0,5 ή 2 ή 3 kV/sec.

Στο Σχήμα 11 φαίνονται τα κομβία χειρισμού της συσκευής :



Σχήμα 11: Σχήμα 11 Κομβία χειρισμού της συσκευής HIPOTRONICS
(Model Number: O C60D-B)

Βολτόμετρο : Μετράει την εναλλασσόμενη τάση εξόδου σε kV με ακρίβεια $\pm 2\%$.

Rate of Rise Selector (Επιλογέας του ρυθμού ανύψωσης τάσης) : Επιλέγεται ο ρυθμός ανύψωσης της τάσης (0,5/2/3 kV/s). Στρέφοντας το κομβίο στις αντίστοιχες θέσεις STOP, η τάση σταματάει να ανυψώνεται, παραμένοντας σταθερή στην επιθυμητή τιμή.

START : Πιέζοντας το κομβίο START εφαρμόζεται τάση στο δοκίμιο μέχρι να επέλθει διάσπαση, οπότε ανάβει η κόκκινη λυχνία **FAILURE** και διακόπτεται το κύκλωμα.

RESET : Το κομβίο χρησιμοποιείται για την επαναφορά των κυκλωμάτων στην αρχική τους κατάσταση. Συγκεκριμένα πιέζοντας το κομβίο RESET σβήνει η λυχνία FAILURE και μηδενίζεται η ένδειξη του βολτομέτρου. Επίσης με το κομβίο RESET επιτυγχάνεται η διακοπή μιας υπό εξέλιξη δοκιμής.

HV OFF Anytime Switch (Κομβίο Κινδύνου): Επιτυγχάνεται η διακοπή της τάσης ανά πάσα στιγμή.

8.2 Προετοιμασία της δοκιμής

Πριν την έναρξη της δοκιμής ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία :






1. Γειώνεται η συσκευή.
2. Μετράται η θερμοκρασία του υγρού, η οποία πρέπει να είναι $25 \pm 5^\circ\text{C}$.
3. Μετράται το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων με ένα πρότυπο διαστημόμετρο.
4. Καθαρίζονται τα ηλεκτρόδια και το δοχείο δοκιμών σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και γεμίζεται το δοχείο δοκιμών με το υπό εξέταση λάδι.

5. Εκτελείται μια δοκιμή στο μονωτικό λάδι, σύμφωνα με τα βήματα της παραγράφου 8.3.
6. Εάν η τάση διάσπασης είναι μέσα στα αναμενόμενα όρια τιμών που ορίζει ο παρασκευαστής, τότε προχωρούμε στο βήμα 8.
7. Εάν η τάση διάσπασης δεν είναι μέσα στα αναμενόμενα όρια, τότε αδειάζεται το δοχείο και επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το βήμα 4. Εάν η δοκιμή και πάλι δεν είναι επιτυχής, επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το βήμα 4 με λάδι, του οποίου η τάση διάσπασης είναι γνωστή. Εάν αυτή τη φορά η τιμή της τάσης διάσπασης είναι στα αναμενόμενα όρια, τότε απορρίπτεται το υπό εξέταση υγρό ως ακατάλληλο. Εάν όμως και πάλι οι τιμές της τάσης διάσπασης δεν είναι ικανοποιητικές, απαιτείται διακρίβωση του οργάνου.
8. Αδειάζεται το δοχείο δοκιμών, ξαναγεμίζεται με νέο δείγμα του υπό εξέταση λαδιού και αναδεύεται για την όσο καλύτερη ομοιογενή ανάμειξη των τυχόν ξένων σωματιδίων που υπάρχουν στο δείγμα. Στη συνέχεια αφήνεται να ηρεμήσει για μερικά min (ανάλογα με το πρότυπο που ακολουθείται) και ελέγχεται για την παρουσία φυσαλίδων αέρα.

8.3 Εκτέλεση της δοκιμής

Αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία προετοιμασίας, εκτελούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Ο διακόπτης AC POWER στρέφεται στη θέση ON
2. Εάν ανάψει η λυχνία, πιέζεται το κομβίο RESET μέχρι να μηδενιστεί η τιμή του βολτομέτρου.
3. Επιλέγεται με τον επιλογέα RATE OF RISE ο επιθυμητός ρυθμός ανύψωσης της τάσης.
4. Για την εφαρμογή της τάσης πιέζεται το κομβίο START.
5. Όταν συμβεί διάσπαση, η τάση διακόπτεται αυτόματα και ανάβει η λυχνία FAILURE.
6. Αφού καταγραφεί η τάση διάσπασης, πιέζεται το κομβίο RESET για το μηδενισμό της τάσης του βολτομέτρου.
7. Επαναλαμβάνεται ο απαιτούμενος, σύμφωνα με το Πρότυπο που ακολουθείται, αριθμός δοκιμών, αφήνοντας το κατάλληλο χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών δοκιμών.
8. Υπολογίζεται η μέση τιμή των τάσεων διάσπασης και εξάγεται η διηλεκτρική αντοχή του υπό εξέταση μονωτικού λαδιού σε kV/cm διαιρώντας την ευρεθείσα μέση τιμή των τάσεων με το μήκος του διακένου.

SPECIFICATIONS			
Test Standard	Test Electrodes	Gap	Rate of Rise kV/s
ASTM D877 (USA)	Polished brass disc 1.0 in (25mm) dia.	 0.1" ± 0.0005"	3
ASTM D1816 (USA)	Spherical dome 1.4 in (36mm) dia.	 0.040" or 0.080" ± 0.001"	0.5
VDE (Germany)	Spherical dome 36mm (1.4 in) dia.	 2.5mm ± 0.05	2
IEC (Europe)	Spherical dome 36mm (1.4 in) dia.	 2.5mm ± 0.1	2
BSI (UK)	Spherical cap 12.5mm (0.5 in) dia.	 2.5mm ± 0.1	2

Πίνακας 2

* η τιμή του διακένου που δίνεται στον πίνακα είναι σε ίντσες

Πρότυπο	
----------------	--

Ρυθμός ανύψωσης τάσης	kV/sec
------------------------------	---------------

Τύπος Ηλεκτροδίων		Διάκενο	mm
--------------------------	--	----------------	-----------

Χρόνος αναμονής μετά την πλήρωση του δοχείου δοκιμών	
Χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών δοκιμών	

Αριθμός δοκιμής	Τάση διάσπασης (kV)
1 ^η Δοκιμή	
2 ^η Δοκιμή	
3 ^η Δοκιμή	
4 ^η Δοκιμή	
5 ^η Δοκιμή	
6 ^η Δοκιμή	

Μέση τιμή		Διασπορά	
------------------	--	-----------------	--

Ζητούμενα :

1. Να βρεθεί η τάση διάσπασης του μονωτικού υγρού σύμφωνα με το Πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε στην άσκηση. Να υπολογιστεί επίσης η διηλεκτρική του αντοχή (kV/cm) και να καταταχθεί ανάλογα με αυτή.
2. Να σχεδιασθεί και να σχολιαστεί το διάγραμμα (με διακριτά σημεία) αριθμός δοκιμής – τάση διάσπασης. Καθώς προχωρούμε στις δοκιμές αυξάνεται ή μειώνεται η τάση διάσπασης; Τι θα περιμέναμε με βάση τη θεωρία; Είναι δυνατόν να δοθεί μια ασφαλής απάντηση και γιατί;
3. Στην παράγραφο 4 του παρόντος φυλλαδίου περιγράφονται οι μηχανισμοί διάσπασης των υγρών μονωτικών. Πιστεύετε ότι η διάσπαση ενός υγρού διηλεκτρικού είναι αποτέλεσμα αποκλειστικά των τριών αυτών μηχανισμών, οι οποίοι «δρουν» ανεξάρτητα, ή όχι; Υπάρχουν άλλοι παράγοντες που μπορούν να επιδράσουν στη διάσπαση ενός υγρού μονωτικού;
4. Το πρότυπο του ΕΛΟΤ, που περιγράφεται στην παράγραφο 6, αναφέρει την προαιρετική παρουσία αναδευτήρα στη συσκευή. Ποιος ο λόγος της ανάδευσης του υγρού (πιθανόν και μετά από κάθε διάσπαση, ανάλογα με το πρότυπο που ακολουθείται); Πιστεύετε ότι με απεριόριστη αύξηση της ταχύτητας ανάδευσης του υγρού θα έχουμε καλύτερα αποτελέσματα, ως προς το επίπεδο της τάσης διάσπασης;
5. Ανάλογα με το πρότυπο που ακολουθείται αλλάζει η μορφή των ηλεκτροδίων, το διάκενο και ο ρυθμός ανύψωσης της τάσης, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί. Ποιος κύριος παράγοντας αλλάζει σε κάθε περίπτωση; Πως επηρεάζουν τα παραπάνω τη δοκιμή και τις τιμές της τάσης διάσπασης;

Βιβλιογραφία

- [1] Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος, «Υψηλές Τάσεις Ι», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1988
- [2] Naidu, Kamaraju, «High Voltage Engineering», McGraw-Hill, 1996
- [3] Khalifa, «High Voltage Engineering», MARCEL DEKKER, INC., 1990
- [4] Kind, Feser, «HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES », SBA, 1999
- [5] Μιχ.Δανίκας, «Στοιχεία Υψηλών Τάσεων», Εκδόσεις Οικονομικών, Αθήνα 2005
- [6] Κ.Α.Στασινόπουλος, «Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων», Α' Έκδοση, Θεσσαλονίκη 1986
- [7] Κ.Θ.Δέρβος, Π.Δ. Μπούρκας, «Ηλεκτρομονωτικά Υλικά», Αθήνα 1990
- [8] Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 60156: Μονωτικά υγρά- Προσδιορισμός της τάσης διακοπής λειτουργίας σε βιομηχανική συχνότητα-Μέθοδος δοκιμής, Αύγουστος 1995
- [9] Πρότυπο IEEE C57.106 Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment, Νοέμβριος 2002
- [10] Πρότυπο ASTM D 877-02, «Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes», Φεβρουάριος 2004
- [11] Πρότυπο ASTM D 1816-04, «Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes», Μάρτιος 2004